

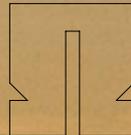
Thomas Lauterbach

# DRM-Lokalradio im 26 MHz-Bereich

Durchführung und Ergebnisse des Projekts „Campus-Radio“

Stand: Juli 2005

GEORG-SIMON-OHM  
FACHHOCHSCHULE  
NÜRNBERG



Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg  
Fachbereich Allgemeinwissenschaften

**DRM-Lokalradio im 26 MHz-Bereich**  
**Durchführung und Ergebnisse des Projekts Campus-Radio**  
Stand Juli 2005

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Thomas Lauterbach  
Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg  
Fachbereich Allgemeinwissenschaften  
Kesslerplatz 12  
90489 Nürnberg  
Tel. (0911) 5880 1381  
E-Mail: [thomas.lauterbach@fh-nuernberg.de](mailto:thomas.lauterbach@fh-nuernberg.de)

© 2005

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>7</b>
1.1 Zur Situation des lokalen Rundfunks	7
1.2 Die Digitalisierung des Rundfunks	8
1.3 Zielsetzungen der Studie	9
1.4 Durchführung des Projekts	10
<b>2 Das DRM-System</b>	<b>13</b>
2.1 DRM-Entwicklungsziele	13
2.2 Technische Herausforderungen und Lösungen	13
2.2.1 Audiokodierung bei DRM	14
2.2.2 Übertragungskanäle, OFDM, QAM	15
2.3 DRM-Systemüberblick	16
<b>3 Aufbau und technische Merkmale der DRM-Versuchssender und Empfänger</b>	<b>19</b>
3.1 Überblick über die Entwicklung der Sender	19
3.2 Software zur Signalerzeugung	20
3.2.1 Einführung	20
3.2.2 Programm zur DRM-Signalerzeugung	20
3.2.2.1 OFDM-Erzeugung	21
3.2.2.2 Senderrahmen-Erzeugung	21
3.2.2.3 Kanalkodierung und Interleaver	21
3.2.2.4 Erzeugung von FAC und SDC	21
3.2.2.5 Erzeugung des MSC	21
3.2.2.6 Grafische Bedienoberfläche	21
3.3 DRM-Versuchssender Nürnberg – 1. Generation	23
3.3.1 Modifikation eines Amateurfunksenders zur DRM-Signalgenerierung	23
3.3.2 Labormessungen am Sender	25
3.4 DRM-Versuchssender Nürnberg – 2. Generation	27
3.5 DRM-Versuchssender Dillberg	31
3.6 DRM-Parameter der Sender	35
3.7 Die im Rahmen des Projekts eingesetzten DRM-Empfänger	35
3.8 Kommerziell erhältliche Geräte	35
3.9 Eigene Entwicklung eines DRM-Frontends	37
3.10 Empfangsantennen für stationären und mobilen Empfang	39
<b>4 Messungen und Ergebnisse</b>	<b>41</b>
4.1 Orientierungsfahrten zur Ermittlung der Reichweite der Sender	41
4.2 Untersuchungen zum stationären Empfang	46
4.2.1 Einzelmessungen in Nürnberg–Altenfurt	46
4.2.1.1 Störungen durch ionosphärische Fernausbreitung (F-Schicht)	46
4.2.1.2 Störungen durch die Ausbreitung über sporadische E-Schicht	48
4.2.1.3 Störungen durch Haushaltsgeräte etc.	48
4.2.1.4 Messkampagnen im Frühjahr 2004	49
4.2.1.5 Messkampagne Dezember 2004 – Januar 2005	54
4.2.1.6 Vergleich des Empfangs in städtischer und ländlicher Umgebung	57
4.2.1.7 Langzeitbeobachtungen	59
4.2.1.8 Empfangsberichte aus größerer Entfernung	60

4	<i>DRM–Lokalradio im 26 MHz – Bereich</i>	
4.3	<i>Mobilempfang</i>	61
<b>5</b>	<b>Ableitung von Planungsparametern im Hinblick auf die Eignung des 26 MHz – Bereichs für digitales Lokalradio mit DRM</b>	<b>67</b>
5.1	<i>Vorhersage der Reichweite von Sendern</i>	67
5.2	<i>Überreichweiten durch ionosphärische Fernausbreitung</i>	69
5.2.1	Grundlagen der Kurzwellen–Ausbreitung	69
5.2.2	Normale ionosphärische Ausbreitung bei 26 MHz	71
5.2.3	Ausbreitung über sporadische E–Schicht	74
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>79</b>
	<b>Anhang 1: Feldstärkeprognosen für einen 1kW–Sender auf 26 MHz in Süddeutschland</b>	<b>83</b>
	<b>Literatur– und Quellenverzeichnis</b>	<b>91</b>

## Vorwort

Dieser Zwischenbericht stellt die Zielsetzungen, die Vorgehensweise und die wesentlichen Ergebnisse des Projekts Campus Radio zusammen, das ab 2003 an der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule durchgeführt wird, soweit sie im Juli 2005 vorliegen.

Er soll damit allen, die von der Digitalisierung des Rundfunks betroffen sind, insbesondere den Landesmedienanstalten, lokalen Rundfunkveranstaltern und Geräteherstellern einige erste Informationen und Hinweise darüber liefern, inwieweit DRM im oberen Kurzwellenbereich, insbesondere im 26 MHz – Bereich (11m – Band) für digitalen lokalen Rundfunk geeignet ist, und welche Einschränkungen gegebenenfalls beim Einsatz dieser Technik hingenommen werden müssen. Die Tatsache, dass über diese Nutzung des Bereiches national und international immer wieder diskutiert wird und dass in der ersten Phase des Projekts bereits wichtige Erkenntnisse gewonnen wurden, rechtfertigt die Veröffentlichung dieses Zwischenberichts, auch wenn das Projekt noch nicht abgeschlossen ist und in den nächsten beiden Jahren weitere Untersuchungen angestellt werden.

An dieser Stelle möchte ich allen, die zum Gelingen dieses Projektes und dazu, dass wertvolle Informationen hinsichtlich der Zielsetzungen gewonnen werden konnten, beigetragen haben, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Zunächst möchte ich die Studenten erwähnen, die im Rahmen von Diplomarbeiten und als studentische Hilfskräfte direkt an diesem Projekt und in seinem Umfeld mitgearbeitet haben: Reinhard Zitzmann, Konrad Blomeier, Eugen Wige, Sven Günther, Markus Dürr.

Besonderen Dank verdient mein Mitarbeiter, Herr Dipl.-Ing. (FH) Benjamin Kreuzer, der auch nach Ende seines Beschäftigungsverhältnisses weiter tatkräftig zur Aufrechterhaltung des Sendebetriebs beigetragen hat. Ebenso gilt mein Dank dem Laboringenieur des Hochfrequenztechnik-Labors, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Eduard Bluoss sowie den Werkmeistern des Fachbereichs Allgemeinwissenschaften, den Herren Heinz Liebel und Bernd Lunkenbein für ihre zahlreichen Unterstützungsleistungen für dieses Projekt.

Hinsichtlich der Programminhalte der Testsendungen danke ich Herrn Dipl.-Inf. (FH) Alexander Schneider, deren das Webradio des Fachbereichs Informatik aufgebaut hat und betreut, sowie den Studierenden und Kollegen, die Programminhalte für das Webradio gestalten.

Weiterhin gilt mein Dank den zahlreichen Testhörern, die mir ihre Ergebnisse bei den Messkampagnen zugänglich gemacht haben, sowie den Herren Stefan Widdau und Frank Held von der Deutschen Welle für die Mitteilung der Ergebnisse ihrer Testfahrten im Raum Nürnberg.

Besonderer Dank gilt dem und insbesondere dem Leiter des Senders Dillberg des Bayerischen Rundfunk, Herrn Johann Sporer und seinen Mitarbeitern, die es uns ermöglicht haben, unseren Sender an diesem Standort aufzubauen und zu betreiben und die uns bei allen auftretenden Problemen engagiert unterstützen.

Für die gute Zusammenarbeit, den Erfahrungsaustausch und die Unterstützung dieses Projekts und darüber hinaus danke ich dem Team des bitExpress – Projekts der Universität Erlangen – Nürnberg, insbesondere Herrn Prof. Dr. Heinz Gerhäuser und Herrn Thomas Bauernschmitt,

sowie den Firmen Coding Technologies, Robert Bosch GmbH, insbesondere Herrn Dr. Frank Hofmann, und der Sat-Service Schneider GmbH, insbesondere Herrn Ulf Schneider.

Aber auch denjenigen Institutionen sei gedankt, die dieses Projektes durch Beiträge zur Finanzierung erst ermöglicht haben: die Staedtler – Stiftung, die Bayerische Landeszentrale für neue Medien BLM, Landkreis und Sparkasse Neumarkt in der Oberpfalz, Gemeinde Postbauer-Heng.

Weiterhin danke ich der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post sowie der Bayerischen Landeszentrale für neue Medien, dass sie die regulatorischen Randbedingungen für dieses Projekt geschaffen haben.

Nicht zuletzt danke ich der Hochschulleitung der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule für die kontinuierliche Unterstützung dieses Projekts und meinen Kollegen der Fachbereiche Allgemeinwissenschaften und Elektrotechnik-Feinwerktechnik-Informationstechnik, die mir durch Übernahme von Lehrveranstaltungen ein halbes Forschungsfreisemester ermöglichten, in dem ich die bisherigen Projektergebnisse abrunden und zusammenstellen konnte.

Ich hoffe, dass die hier zusammengestellten Informationen, Messergebnisse und Überlegungen dazu beitragen werden, dass das DRM – System in möglichst vielen Anwendungsfeldern eingesetzt werden kann.

Nürnberg, im Juli 2005

Thomas Lauterbach

# 1 Einführung

## 1.1 Zur Situation des lokalen Rundfunks

In Deutschland gibt es in vielen Bundesländern lokale Rundfunkstationen. Vielfach benutzen Sie nur eine oder einige wenige UKW-Frequenzen, um ihr Verbreitungsgebiet, das sich häufig auf eine kleinere Stadt oder einen Landkreis beschränkt, abzudecken. In größeren Städten gibt es häufig eine Reihe lokaler Rundfunkstationen, sodass dort mehrere UKW-Frequenzen benötigt werden, um das Stationsangebot zu verbreiten.

In vielen Ländern der Erde ist die lokale Rundfunkversorgung der Regelfall, zum Beispiel in den USA, wo Programmketten, die ein größeres zusammenhängendes Gebiet mit einer Anzahl von Radioprogrammen versorgen, weitgehend unbekannt sind.

Angesichts dieser Situation stellt sich die Frage, wie bei der bevorstehenden Digitalisierung des Rundfunks diese lokalen Programme adäquat abgebildet werden können.

Ein Beispiel möge diese Problematik hier noch verdeutlichen: Abbildung 1 zeigt die Verteilung der lokalen Rundfunkstationen in Bayern anhand der dafür verwendeten UKW-Sender. Es ist deutlich zu erkennen, dass die überwiegende Zahl der Sender außerhalb der Ballungsgebiete Einzelsender mit geringer Sendeleistung sind.



Abb. 1: UKW-Frequenzen, die in Bayern für lokalen Rundfunk verwendet werden.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aus: Hörfunk- und Fernsehsender in der Bundesrepublik Deutschland, Stand 1. Januar 2003, hrsg. vom Norddeutschen Rundfunk.

## 1.2 Die Digitalisierung des Rundfunks

Die Digitalisierung des Hörrundfunks hat im letzten Jahrzehnt begonnen. In Deutschland und Europa wurde ab etwa 1995 das DAB–System eingeführt, zunächst im Rahmen von Pilotprojekten und ab etwa 1998 auch im Regelbetrieb. Zur Zeit der Entwicklung des DAB–Systems in den späten 80er und frühen 90er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde die Rundfunklandschaft in Europa allerdings hauptsächlich durch die öffentlich–rechtlichen Rundfunkanstalten geprägt, die in den meisten Ländern über mehrere Programm Ketten verfügten, die sie in einem größeren Gebiet, zum Beispiel national oder zumindest regional verbreiteten. Dementsprechend ist auch das DAB–System auf diese Situation zugeschnitten.

In den USA, wo die Rundfunklandschaft traditionellen durch einzelne Sender, die lokale Programme übertragen, geprägt ist, wurde das DAB–System nicht eingeführt, sondern es wurde ein digitales System (IBOC) entwickelt, das es gestattete, die bestehende UKW–Rundfunklandschaft digital abzubilden. Hierbei war weniger das Kriterium einer qualitativen Verbesserung der Rundfunkversorgung maßgebend, sondern die Erhaltung des Status Quo im Hinblick auf die Verbreitungsgebiete der einzelnen Stationen.

Im Hinblick auf lokalen Rundfunk wurde bei der DAB–Einführung bisher eine Einschränkung auf wenige größere Ballungsräume vorgenommen. Bislang gibt es digitalen lokalen Hörfunk nur dort, wo sich eine gewisse Mindestanzahl von lokalen Stationen findet, die zum Teil durch öffentlich–rechtliche Programme ergänzt werden. Nur so kann ein DAB–Multiplex, der in der Regel sechs oder mehr Hörfunkprogramme enthält, gefüllt werden und damit eine ökonomisch vertretbare DAB–Versorgung erreicht werden. Häufig werden diese DAB–Ensembles im L–Band ausgestrahlt, wobei in städtischem Gebiet durchaus eine akzeptable Versorgung erreicht werden kann, sofern genügend Sendeleistung zur Verfügung steht.

Im ländlichen Raum wurde der lokale Rundfunk bisher nicht digitalisiert. Zum einen sind dort meist nur einzelne Programme zu verbreiten, sodass die Nutzung von DAB aus Kostengründen ausscheidet, zumal die Ausstrahlung im L–Band für die Versorgung ländlichen Regionen weniger gut geeignet erscheint (große Dämpfung, viele Gleichwellensender erforderlich).

Auf der anderen Seite ist es aber so, dass die Digitalisierung von Ton und Bild unaufhaltsam voranschreitet, sodass auch der Rundfunk früher oder später nur noch digital ausgestrahlt werden wird. Hierfür allerdings ist es nötig, für alle bestehenden Rundfunkstationen und für alle bestehenden Verbreitungsformen angemessene technische Verfahren zu finden. Denn, schon aus nahe liegenden politischen Gründen, wird sich nicht die Rundfunklandschaft den technischen Gegebenheiten anpassen, sondern umgekehrt werden technische Lösungen gefunden werden müssen, um die bestehenden Sender digital verbreiten zu können. Dabei sind auch die ökonomischen Randbedingungen zu berücksichtigen, sowie die regulatorischen Gegebenheiten, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Frequenzen.

Neben den erwähnten Systemen DAB und IBOC wurde in den letzten Jahren das DRM–System entwickelt, das zunächst den Rundfunk im Frequenzbereich unterhalb von 30 MHz, d.h. im Lang–, Mittel– und Kurzwellenbereich digitalisieren wollte. Im Frühjahr 2005 traf das DRM–Konsortium die Entscheidung, auch ein System für den UKW–Bereich zu entwickeln (DRM+). Zum jetzigen Zeitpunkt (Juli 2005) zeichnet sich dieses System allerdings erst in Konturen ab.

Gerade das DRM–System ist für den lokalen Hörfunk attraktiv, da es aufgrund der Kanalbandbreite, die in den bisherigen AM–Bereichen zur Verfügung steht (9 bzw. 10 kHz), primär für die Übertragung einzelner Hörfunk Programme mit geringfügigen Zusatzdiensten ausgelegt ist, obwohl durch die Bündelung mehrerer Kanäle auch ein Multiplex mehrerer

Programme möglich ist, insbesondere wenn benachbarte Kanäle gebündelt werden können. Daher erscheint das DRM-System für eine Übertragung lokaler Radioprogramme prädestiniert.

Es stellt sich daher die Frage, welcher Frequenzbereich für diese Anwendung in Frage kommt.

Da DRM zunächst auf den Frequenzbereich unterhalb 30 MHz beschränkt ist, bleiben für lokale Anwendungen nur zwei Wellenbereiche übrig, nämlich der Mittelwellenbereich, in dem bereits zahlreiche Sender kleiner Leistung lokale Rundfunkversorgung übernehmen, und das obere Ende des Kurzwellenbereichs, etwa oberhalb 20 MHz, in dem nur wenige Kurzwellen-Rundfunksender betrieben werden. Insbesondere wird das 11m-Band (25,7 – 26,1 MHz) nur selten für Fernversorgung benutzt. Die übrigen Kurzwellenbänder kommen praktisch nicht in Betracht, da sie von den internationalen Rundfunkanstalten sehr stark belegt sind und auch im Vergleich zum 26 MHz-Bereich erheblich höhere atmosphärische Störpegel aufweisen.

Der Mittelwellenbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass sehr viele Stationen auf demselben Kanal betrieben werden müssen, weil die zur Verfügung stehende Kanalanzahl im Vergleich zur Anzahl der Sender zu gering ist. Auf Grund der Ausbreitungseigenschaften, die insbesondere während der Nachtstunden große Reichweiten zulassen, ergibt sich die Problematik der Gleichkanalstörungen während der Nachtstunden. Daraus resultiert sich ein großer Unterschied in der Tag- und Nachtreichweite eines Mittelwellensenders<sup>2</sup>. Für lokale Sender bedeutet das, dass ihr Versorgungsgebiet während der Nacht wesentlich kleiner ist als während des Tags, wohingegen sie den Vorteil der großen Reichweite während der Nacht auf Grund ihrer geringen Sendeleistung nicht nutzen können.

Deshalb erscheint die Nutzung des 26 MHz-Bereichs für digitalen lokalen Rundfunk durchaus attraktiv, allerdings ist über die Nutzungsmöglichkeit dieses Bandes für diesen Zweck bisher wenig bekannt. In der Vergangenheit wurde dieses Band für die Fernversorgung selten eingesetzt, da es nur zu Zeiten maximaler Sonnenaktivität während des Winterhalbjahres stabile Fernversorgungsmöglichkeiten bietet, und auch dann nur für wenige Stunden des Tages für bestimmte Zielgebiete, da im allgemeinen die gesamte Übertragungstrecke auf der Tagseite der Erde liegen muss. Hinzukommt, dass viele einfachere „Welt-Empfänger“ aus für den Empfang dieses Bandes nicht ausgelegt sind, sodass seine Verwendung auch für die Rundfunkanstalten bisher nicht sonderlich attraktiv war. Auch Überlegungen, diesen Frequenzbereich für Satellitenrundfunk einzusetzen<sup>3</sup>, führten bisher zu keiner intensiveren Nutzung dieses Bandes.

### **1.3 Zielsetzungen der Studie**

Zur Untersuchung der Eignung des 26 MHz-Bereichs für den lokalen Rundfunk wurde das Projekt „Campus-Radio“ durchgeführt, das zum Ziel hatte, im Rahmen eines Feldversuchs alle relevanten Daten für die lokale Rundfunkübertragung mit DRM in diesem Frequenzbereich zu gewinnen. Eine zunächst angedachte Übertragung im Mittelwellenbereich wurde wegen Schwierigkeiten hinsichtlich der Frequenzuteilung, aber auch wegen der größeren Abmessungen der Sendeantenne verworfen. Die wichtigsten Untersuchungsziele waren:

<sup>2</sup> Michael Richter, Michael Thiele, Digitale Mittelwelle 531 digital, Schriftenreihe der Medienanstalt Sachsen-Anhalt, Band 5, Vistas-Verlag, Berlin 2004, S. 55

<sup>3</sup> John E. Miller, HF Satellite Sound Broadcasting – A Preliminary Assessment, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. SAC-3, NO. 1, p. 186 (1985)

1. Untersuchung, inwieweit ein DRM Signal mit geringem Aufwand erzeugt werden kann und auf eine für lokale Versorgung ausreichende Leistungen verstärkt werden kann, ohne dass dazu große Investitionen erforderlich sind.
2. Gewinnung von Erfahrungen beim Aufbau der Sender im Hinblick auf Senderstandort und Sendeanenne.
3. Untersuchung zur Verlässlichkeit des stationären Empfangs eines DRM-Signals im 26 MHz Bereich über längere Zeit hinweg.
4. Untersuchung spezieller Empfangssituationen: mobiler Empfang, Empfang in Gebäuden, Erfassung der Störsituation in der Stadt und im ländlichen Gebiet,
5. Eine Abschätzung der zum Empfang benötigten Feldstärke und damit Verbunden der erforderlichen Sendeleistung, um ein bestimmtes Gebiet abzudecken.
6. Untersuchung des Einflusses der ionosphärischen Fernausbreitung (Raumwellenausbreitung)

#### **1.4 Durchführung des Projekts**

Die genannten Zielsetzungen des Projekts sollten dadurch erreicht werden, dass ein Testprogramm, das zunächst als Internet-Radio betriebene Campus-Radio der FH, mit einem DRM-Sender kleiner Leistung über einen längeren Zeitraum, mindestens jedoch für ein Jahr, ausgestrahlt werden sollte.

Aus Kostengründen sollte die notwendige Signalverarbeitung möglichst auf einem PC erfolgen, sodass das fertige DRM-Signal nur noch über die Soundkarte auszugeben, auf die Sendefrequenzen umzusetzen und zu verstärken war.

Um eine größere Zahl von Testhörern zu gewinnen, war es erforderlich, einen Empfänger zu entwickeln, der zu einem niedrigen Preis (< ca. 50 €) an die interessierten Studierenden und andere Testhörer abgegeben werden konnte. Dies erforderte, dass die Signalverarbeitung selbst per Software auf einem bereits bei den Testhörern vorhandenen PC durchgeführt wurde – entsprechende Programme wurden vom DRM-Konsortium und der TU Darmstadt entwickelt und verfügbar gemacht. Die Schnittstelle zwischen Empfänger und PC bildet dabei der Eingang der Soundkarte, über den das vom Empfänger auf eine Zwischenfrequenz von ca. 12 kHz gemischte Empfangssignal digitalisiert wird.

Die erste Projektphase, die etwa von Sommer 2002 bis Frühjahr 2003 dauerte, hatte deshalb ihren Schwerpunkt auf der Entwicklung der Sendersoftware im Rahmen einer Diplomarbeit, sowie der Entwicklung und des Aufbaus der benötigten Komponenten für den Sender (Frequenzumsetzer, Filter) und Integration in einen vorhandenen Amateurfunksender sowie der Entwicklung des Empfängerbausatzes und der Vorbereitung der Zusammenstellung einer größeren Anzahl von Bausätzen. Parallel dazu wurden die regulatorischen Fragestellungen bearbeitet. Im März 2003 wurde von der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post die Frequenz 26.000 kHz mit einer Leistung von 10 Watt für die Versuche zugeteilt, sodass unmittelbar nach Fertigstellung des Senders der Versuchsbetrieb aufgenommen werden konnte, jedoch zunächst ohne Programminhalt. Die medienrechtlichen Voraussetzungen für die Aufnahme des Sendebetriebs mit dem Webradioprogramm der FH

wurden in einem öffentlich-rechtlichen Vertrag zwischen der bayerischen Landesmedienzentrale und der FH geschaffen, sodass ab Ende Mai 2003 der reguläre Sendebetrieb aufgenommen werden konnte.



*Abb.2 : Impressionen von der ersten Inbetriebnahme des DRM-Senders Nürnberg und der ersten Orientierungsfahrt zur Untersuchung der Reichweite am 27.2.2003.*

Ab dem Frühsommer 2003 wurde das Campusradio-Programm vom Sender auf dem FH-Gebäude kontinuierlich abgestrahlt, und auch die ersten Empfänger-Bausätze konnten an interessierte Testhörer abgegeben werden. Die Gewinnung von Testhören konnte dadurch unterstützt werden, das es möglich war, das Projekt im Rahmen der "Langen Nacht der Wissenschaft" im Oktober 2003 der interessierten Öffentlichkeit vorzustellen, dies wurde insbesondere von Kurzwellenhörern und Funkamateuren genutzt, von denen einige Empfängerbausätze erwarben. Ebenso diente diesem Zweck, dass über das Projekt bei Vortragsveranstaltungen des Kurzwellenring Süd und des Deutschen Amateur Radio Clubs berichtet wurde. Insgesamt konnten etwa 50 Testhörer gewonnen werden, die allerdings nicht alle während des gesamten Projektzeitraums für Empfangsberichte zur Verfügung standen.

Im Sommer 2003 ergab sich die Möglichkeit, das Versuchsgebiet auf den Landkreis Neumarkt in der Oberpfalz zu erweitern, mit tatkräftiger Unterstützung und Förderungen durch das dortige Landratsamt. Dadurch konnte ein zweiter DRM-Sender für das Campus-Radio auf dem Gelände der Station Dillberg des bayerischen Rundfunks errichtet werden. Diese „Außenversuchsstelle der FH Nürnberg“ wurde im Dezember 2003 eröffnet. Nachdem im Februar 2004 auch die erforderliche Standortbescheinigung der Regulierungsbehörde vorlag, konnte der Sendebetrieb am Dillberg aufgenommen werden (Abb. 3).

Um beide Sendungen mit dem entwickelten Empfänger Frontend empfangen zu können, wurden als Versuchsfrequenzen 26.000 kHz und 26.012 kHz beantragt und zugeteilt. Da die letztere Frequenz nicht im internationalen Raster liegt, wurde diese seither für den Sender Nürnberg, der nur mit 10 Watt betrieben wird, eingesetzt, während der Sender Dillberg, für den eine Sendeleistung von 100 Watt vorgesehen ist, auf der Frequenz 26.000 kHz betrieben wird.



*Abb. 3: Eröffnung der „Außenversuchsstelle Dillberg“ der FH Nürnberg im Stationsgebäude des Bayerischen Rundfunks durch Landrat Löhner und Prorektor Prof. Dr. Braun am 5. Dezember 2003 und Aufnahme des Sendebetriebs am 19. Februar 2004.*

Parallel zum Aufbau der Station Dillberg wurden im Versuchsgebiet im Stadtgebiet Nürnberg bereits eine Reihe von Messungen durchgeführt, insbesondere Langzeitmessungen und Vergleichsmessungen, wobei im Rahmen einer Messkampagne mehrere Empfänger an unterschiedlichen Standorten parallel betrieben wurden. Diese Untersuchungen konnten nach Inbetriebnahme der Station Dillberg auf das Gebiet zwischen Nürnberg und Neumarkt ausgedehnt werden. Mehrere Messkampagnen wurden über jeweils ein Wochenende durchgeführt und die Messergebnisse ausgewertet. Diese Art von Versuchen wurden auch nach Abschluss der Diplomarbeit weitergeführt. Im Januar 2005 ergab sich die Möglichkeit, den Sender Nürnberg ebenso wie bereits am Dillberg geschehen durch einen Transistorsender zu ersetzen, der im Frühjahr 2005 aufgebaut wurde. Parallel dazu konnte der mit der bayerischen Landesmedienzentrale geschlossene öffentlich-rechtliche Vertrag, der zunächst eine Projektlaufzeit von zwei Jahren, also bis Mai 2005, vorgesehen hatte, um weitere zwei Jahre verlängert werden. Dadurch ergeben sich weitere Untersuchungsmöglichkeiten, insbesondere im Hinblick auf Mobilempfang und Empfang in Gebäuden.

Der Zeitraum zwischen 2003 und 2007 ist auch insofern interessant, als sich während dieses Zeitraums die Sonnenaktivität kontinuierlich verringert, sodass deren Einfluss auf die Ausbreitungsverhältnisse gut untersucht werden kann.

Es sei auch erwähnt, dass das Projekt in der Fachöffentlichkeit viel Beachtung gefunden hat. Neben Besuchen von Delegationen der Arbeitsgemeinschaft Privater Rundfunk (APR), der Schule für Rundfunktechnik (Nürnberg), des Schweizer Anbieters Lokalradio Emme (Bern) des privaten Anbieters Radio 700 (Euskirchen, NRW), der Firma Starwaves an der Fachhochschule bestehen Kontakte zu mehreren Landesmedienzentralen und mehreren Kollegen an Universtäten und Fachhochschulen, die sich mit der digitalen Kurzwellenübertragung beschäftigen. Erste Ergebnisse konnten auf dem 5. Workshop Digitaler Rundfunk im Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Erlangen, 23./24.9.04 vorgestellt werden.

## 2 Das DRM-System

### 2.1 DRM-Entwicklungsziele

DRM (Digital Radio Mondiale) ist das Konsortium zur Entwicklung eines einzigen weltweiten Systems für digitalen Rundfunk in den Frequenzbändern unterhalb 30 MHz. Es wurde im März 1998 gegründet und hat als Mitglieder Rundfunkanstalten, Sender- und Empfängerhersteller und Forschungsinstitute. Bestand es Ende 1998 aus 38 Mitgliedern aus 24 Ländern, so waren es 2004 bereits über 86 Mitglieder aus 27 Ländern. Außerdem unterstützen mehr als weitere 30 Firmen und Organisationen die Einführung des DRM-Systems als "supporter". Das DRM-Konsortium ist ein Mitglied der ITU-R. Außer für das Konsortium wird "DRM" auch als Abkürzung für das vom ihm entwickelte digitale Rundfunksystem verwendet, das inzwischen international standardisiert ist.

Die Ziele des DRM-Konsortiums ergeben sich aus der großen Bedeutung, die der Rundfunk im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich in vielen Teilen der Welt aufgrund der besonderen Ausbreitungseigenschaften der Wellen in diesen Bereichen immer noch hat. Insbesondere war es das Ziel, trotz der bestehenden Einschränkungen durch die geringe Kanalbandbreite, die schwierigen Ausbreitungsverhältnisse und die vielfältigen Störungen eine qualitativ hochwertige Tonübertragung zu erzielen, die möglichst nahe an die vom UKW-Rundfunk bekannte Qualität heranreichen sollte.

Die Randbedingungen für die DRM-Entwicklung waren zu Beginn:

- die bestehenden Rundfunk-Frequenzbänder unterhalb von 30 MHz sollten weiter genutzt werden,
- der heutige Kanalabstand und die heutige HF-Bandbreite sollten beibehalten werden
- Simulcast, d.h. gleichzeitige analoge und digitale Ausstrahlung über den selben Sender, sollte möglich sein,
- bestehende Sendestationen sollten mit möglichst geringen Umrüstkosten weiter benutzt werden können,
- das selbe Zielgebiet sollte mit wesentlich weniger Sendeleistung versorgt werden können als mit AM,
- bessere Empfangsqualität sollte erreicht werden: keine Schwankungen, kein Rauschen und keine Interferenz mehr,
- bessere Tonqualität sollte erzielt werden: bis zu 15,2 kHz NF-Bandbreite, „FM-Qualität“,
- Bündelung von Kanälen sollte Stereoqualität möglich machen,
- Programmbegleitende oder unabhängige Daten für Text, Grafiken und Bilder sollten parallel zum Hörfunkprogramm übertragen werden können,
- die Empfänger sollten aufgrund mitübertragener Abstimminformation nach Eingabe der Stationsidentifikation selbst die entsprechende Frequenz finden,
- insbesondere im KW-Bereich sollte eine automatische Frequenzabstimmung auf die jeweils beste Frequenz möglich sein,
- mobiler, portabler und stationärer Empfang sollte in Gebäuden und außerhalb möglich sein.

### 2.2 Technische Herausforderungen und Lösungen

Die genannten Ziele der DRM-Entwicklung stellen außerordentliche technische Herausforderungen dar, die bei der Systementwicklung gelöst werden mussten. Die beiden entscheidenden Fragestellungen waren zweifellos die Entwicklungen

- eines Audiokodiersystems, das "fast-UKW-Qualität" bei einer Datenrate von etwa 20 kbit/s ermöglicht, und
- eines Übertragungssystems, das eine Nutzdatenrate von etwa 20 kbit/s in einem 9 bzw. 10 kHz breiten Kanal bei den typischen Übertragungsbedingungen im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich erlaubt.

Die technischen Lösungen zu den beiden Kernfragen der DRM-Entwicklung werden im Folgenden kurz dargestellt. Für ausführlichere Darstellungen des DRM-Systems sei auf die Systemspezifikation<sup>4</sup>, das DRM Broadcaster's User Manual<sup>5</sup> sowie eine Auswahl von Übersichtsartikeln verwiesen<sup>6</sup>.

### 2.2.1 Audiokodierung bei DRM

Für das DRM-System wurden drei verschiedene in MPEG-4 standardisierte Audiokodierverfahren ausgewählt. Während MPEG-4 CELP und MPEG-4 HVXC nur für Sprachübertragung bei Datenraten von 2 bis 12 kbit/s geeignet sind, ist MPEG-4 AAC (Advanced Audio Coding) mit "Spectral Band Replication" (SBR) das universelle System für alle Programminhalte, erfordert aber Datenraten über 8 kbit/s. CELP und HVXC sollen für Sprachkanäle parallel zum eigentlichen Hörfunkprogramm genutzt werden, z.B. um Nachrichten in mehreren Sprachen gleichzeitig über den selben Sender ausstrahlen zu können. Für das Hauptprogramm, das auch Musik enthalten kann, ist AAC mit SBR vorgesehen. MPEG-4 AAC ist für Mono- und Stereoübertragung geeignet und erreicht eine Audiobandbreite bis 15,2 kHz bei Bitrate von ca. 24 kbit/s.

Auf das AAC-SBR-System soll im Folgenden etwas genauer eingegangen werden.

Die Digitalisierung eines Audiosignals erfordert sowohl eine hohe Abtastrate (mindestens das doppelte der höchsten zu übertragenden Tonfrequenz) und eine hohe Auflösung (Anzahl der Quantisierungsstufen pro Abtastwert), um das Quantisierungsrauschen klein zu halten. Zur Datenreduktion macht man sich sogenannte psychoakustische Effekte zu Nutze. Der wichtigste davon ist der Verdeckungs- oder Maskierungseffekt: In der spektralen Umgebung eines lauten Tons werden leisere Geräusche nicht wahrgenommen. Dies kann man dahingehend nutzen, dass man Bereiche des Tonsignals in spektraler Nachbarschaft zu einem lauten Ton mit geringerer Auflösung quantisiert, da das dadurch entstehende Quantisierungsrauschen durch den lauten Ton verdeckt wird. Die Auflösung der einzelnen Spektralbereiche ("Teilbänder") wird dabei dynamisch an das Tonsignal angepasst, indem die "Verdeckungsschwelle" des jeweiligen Tonspektrums im Abstand von einigen Millisekunden jeweils neu berechnet wird und die Auflösung so grob eingestellt wird, dass das Quantisierungsrauschen im ganzen Spektrum unterhalb der Verdeckungsschwelle liegt. Dies führt zu einer bestimmten Datenrate. Will man die Datenrate weiter reduzieren, so bleiben nur zwei Möglichkeiten: entweder wird die Quantisierung gröber eingestellt, oder die Audio-Bandbreite wird beschnitten. Da im ersten Fall wahrnehmbare Störungen durch das Quantisierungsrauschen entstehen, das ja nun nicht mehr überall unter der Verdeckungsschwelle gehalten werden kann, entscheidet man sich meist für das zweite Verfahren. Durch die Reduktion der Audio-Bandbreite kann man die Abtastrate reduzieren

---

<sup>4</sup> ETSI, ETS 201 980, Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification

<sup>5</sup> DRM Broadcasters' User Manual, DRM Konsortium, 2004 (erhältlich als pdf auf <http://www.drm.org>)

<sup>6</sup> J. Stott, Digital Radio Mondiale: key technical features, ELECTRONICS & COMMUNICATION ENGINEERING JOURNAL. FEBRUARY 2002, p.4;

M. Dietz and S. Meltzer, CT-aacPlus — a state-of-the-art Audio coding scheme, EBU TECHNICAL REVIEW July 2002, p. 7

F. Hofmann, Ch. Hansen, and W. Schäfer, Digital Radio Mondiale (DRM) Digital Sound Broadcasting in the AM Bands, IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 49, NO. 3, SEPTEMBER 2003, p. 319

und dadurch die Anforderung an die Datenrate erfüllen. Dabei leidet zwar der Gesamteindruck, da das Audiospektrum z.B. auf eine Bandbreite von 10 kHz beschnitten werden muss, dafür wird aber der beschnittene Bereich ohne Störungen übertragen. Spectral Band Replication (SBR) bietet nun einen Ausweg, der es erlaubt, trotz reduzierter Datenrate eine große Audio-Bandbreite beizubehalten. Dazu wird z.B. die niederfrequente Hälfte des Audiospektrums normal kodiert, z.B. mit MPEG-4-AAC, es kann aber im Prinzip jedes Kodierverfahren verwendet werden. Zusätzlich wird Information übertragen, wie die obere Hälfte des Spektrums durch Transposition erhalten werden kann. Diese Zusatzinformation wird beim Dekodieren benutzt, um diesen Teil des Spektrums zu generieren, ohne dass er nach dem psychoakustischen Verfahren kodiert werden müsste.

Die Kombination von MPEG-4 AAC und SBR ermöglicht deshalb schon bei geringen Datenraten die Übertragung von bis zu 15 kHz breiten Audiosignalen mit subjektiv sehr gutem Klangeindruck. Bei DRM-Sendungen werden häufig Audio-Datenraten von ca. 18 kbit/s verwendet, mit denen eine Audio-Bandbreite von ca. 11 kHz möglich ist.

### 2.2.2 Übertragungskanäle, OFDM, QAM

Das Übertragungsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ist gegenüber Mehrwegeausbreitung robust, da der zu übertragende Datenstrom in viele parallele Datenströme mit geringer Datenrate und damit langen Symbolauern aufgeteilt wird. Die Einzelträger werden so im Frequenzbereich angeordnet, dass die Daten trotz Überlappung der Spektren dekodiert werden können („orthogonal“).

Bei DRM stellt sich das Problem, dass die Mehrwegeausbreitung bei der Übertragung durch ionosphärische Streuung sehr lange Wegdifferenzen und damit Laufzeitdifferenzen hervorrufen kann. Insbesondere in den Nachtstunden tritt im MW- und unteren Kurzwellenbereich die Situation auf, dass ein vom Sender senkrecht nach oben ausgestrahltes Signal von der Ionosphäre zurückgestreut wird, und danach beim Auftreffen auf die Erde wiederum nahezu senkrecht nach oben gestrahlt wird. Auf diese Weise überlagern sich beim Empfänger mehrere Signalkomponenten, die jeweils Wegunterschiede von etwa 200 – 600 km aufweisen, dies entspricht einem Laufzeitunterschied von etwa 0,7 – 2 Millisekunden. Daher muss das Schutzintervall bei DRM in der Größenordnung einiger Millisekunden gewählt werden, wenn Raumwellenübertragung vorgesehen ist. Für den Lang- und Mittelwellenbereich genügt ein kleineres Schutzintervall, wenn nur die Bodenwelle genutzt werden soll. Dann ist es aber immer noch sinnvoll, das Schutzintervall so groß zu machen, dass Gleichwellennetze mit Senderabständen von mehreren hundert Kilometern möglich sind. Tabelle 1 zeigt die Parameter der für DRM spezifizierten OFDM-Systeme, die in diesem Zusammenhang "Robustness Modes" genannt werden.

Um aber innerhalb der Bandbreite von nur 9 bzw. 10 kHz eine hinreichend große Datenrate zu ermöglichen, ist ein Modulationsverfahren erforderlich, bei dem mehrere Bits pro Symbol, übertragen werden. Die Brutto – Datenrate (inkl. Redundanz zur Fehlerkorrektur) z.B. beim Robustness Mode B, der auf Kurzwelle häufig verwendet wird, ist bei 10 kHz Bandbreite nämlich gegeben durch

$$N \cdot K \cdot Z = 207 \cdot K / 0,026666 = 7763 \text{ bit/s} \cdot K$$

mit

$N$ : Anzahl der Unterträger,

$K$ : Anzahl der übertragenen Bits pro Sekunde und Symbol,

$Z$ : Anzahl der Symbole pro Sekunde = 1 / Symboldauer.

Tabelle 1: OFDM-Parameter bei DRM<sup>7</sup>

"Robustness Mode"	A	B	C	D
Bandbreite [kHz]	typ. 9	typ. 10	typ. 10	typ. 10
Nutz-Symboldauer [ms]	24	21,333	14,667	9,333
Schutzintervall [ms]	2,666	5,333	5,333	7,333
Zulässige Wegdifferenz [km]	800	1600	1600	2200
Unterträgerabstand [Hz]	41,67	46,88	68,18	107,1
Anzahl der Unterträger	210	207	146	93
Anwendung	LW, MW, KW Bodenwelle	MW, KW Raumwelle	KW Raumwelle	KW Raumwelle

Da zur Fehlerkorrektur im Empfänger das Hinzufügen von redundanten Daten in der Größenordnung von 50% erforderlich ist, und eine Netto-Datenrate (nach der Fehlerkorrektur) von ca. 20 kbit/s erforderlich ist, muss eine Brutto-Datenrate von ca. 40 kbit/s erreicht werden, und das bedeutet  $K = 5$ , d.h., pro Symbol müssen mindestens 5 bit übertragen werden.

Um dies zu erreichen, muss jeder OFDM-Unterträger also mindestens  $2^5 = 32$  mögliche Zustände haben, die sich in Amplitude, Phase oder Frequenz unterscheiden.

Bei DRM verwendet man dafür die Quadratur-Amplitudenmodulation QAM mit 16 oder sogar 64 Zuständen (16-QAM bzw. 64-QAM). Bei dieser Modulationsart steckt die Information, d.h. das übertragene Bitmuster, sowohl in der Amplitude als auch in der Phase des jeweiligen Unterträgers.

Die geschickte Zuordnung der Bitfolge zu den Amplituden- und Phasenzuständen ermöglicht die sogenannte "Multi-Level"-Kodierung (MLC). Hierbei wird die Zuordnung so gemacht, dass sich zwischen zwei benachbarten Konstellationspunkten jeweils nur ein Bit ändert. Wenn man nun z.B. das erste Bit bereits dekodiert hat, ergibt sich für die beiden noch möglichen Zustände des zweiten Bits ein größerer Abstand. Deshalb kann für dieses Bit ein Kode mit größerer Koderate als für das erste Bit verwendet werden. Um die Amplituden- und Phasenwerte der Unterträger im Empfänger richtig zuordnen zu können, werden sie mit den bekannten Werten von Referenzträgern verglichen, die an verschiedenen Stellen in das Signal eingestreut sind.

Die hohe Dichte der Informationsübertragung bei DRM wird dadurch erkauft, dass man große Signal-Rausch-Abstände zur Dekodierung benötigt. Normalerweise wird ein Rauschabstand von etwa 16 – 20 dB zur Dekodierung eines DRM-Signals benötigt, in manchen Situationen können es aber auch 30 dB sein.

### 2.3 DRM-Systemüberblick

Abb. 4 zeigt die DRM-Signalerzeugung an Hand eines Blockschaltbildes. Die Tonsignale werden gemäß einem der beschriebenen Verfahren kodiert, wobei über einen DRM-Sender bis zu vier Kanäle übertragen werden können, natürlich unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Datenrate (Tabelle 2). Zusätzlich können Daten übertragen werden, z.B.

<sup>7</sup> ETSI, ETS 201 980, Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification

Textschlagzeilen, die nur sehr wenig Datenrate benötigen, aber interessante Hinweise z.B. auf Telefonnummern, eMail-Adressen, Web-Seiten, oder auch den Titel des gerade laufenden Programms bzw. Vorankündigungen späterer Programme enthalten können. Darüber hinaus können auch HTML-basierte Daten, kodierte Verkehrsmeldungen usw. übertragen werden. Diese Hörfunkprogramme und Daten werden zusammen gemultiplext und im "Main Service Channel" MSC übertragen.

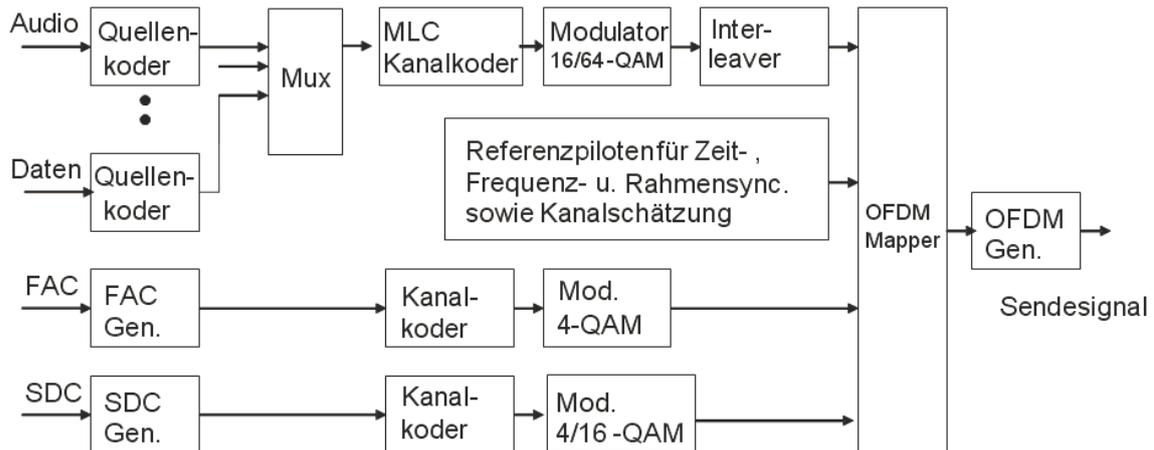


Abb. 4: Blockschaltbild der DRM – Signalerzeugung, nach Hofmann<sup>8</sup>.

Aufgrund der flexiblen Konfiguration des DRM-Systems ist es erforderlich, den Empfängern die tatsächliche Konfiguration mitzuteilen. Dazu dient zum einen der "Fast Access Channel" (FAC), der mit 4-QAM übertragen wird. Er enthält Angaben über die Modulation des MSC (16- oder 64-QAM), die Anzahl der Audio- bzw. Datenkanäle, einen maschinenlesbaren Programm-Identifizierer, sowie die Sprache des Programms. Da der FAC immer als erstes dekodiert wird, kann dadurch ein Suchlauf nach einem bestimmten Programm oder Programmen in einer bestimmten Sprache beschleunigt werden. Neben dem FAC gibt es den "Service Description Channel" (SDC), der mit höherer Datenrate weitere Informationen über die übertragenen Programme und Datendienste enthält. Er wird mit 4- oder 16-QAM übertragen und enthält z.B. die Aufteilung der Datenrate auf die verschiedenen Datenströme, den Sendernamen, Tabellen von Alternativfrequenzen, ggf. mit Zeit- und Zielgebietsangaben, Datum und Uhrzeit und Durchsagekennungen für Verkehrsmeldungen, Nachrichten, Wetterberichte, und Warnmeldungen. Da der SDC quasi-statische Daten enthält, die zyklisch wiederholt werden, kann der Empfänger diese Daten auch zur automatischen und unterbrechungsfreien Prüfung von Alternativfrequenzen verwenden. Ist der SDC auf einer Frequenz dekodiert, kann der Empfänger während der folgenden Übertragungen des SDC auf eine Alternativfrequenz umschalten und feststellen, ob dort tatsächlich dasselbe Programm übertragen wird und ob der Empfang dort besser ist. Dies setzt allerdings voraus, dass die Sender exakt denselben Datenstrom übertragen und rahmensynchronisiert sind, d.h. dass sie den SDC gleichzeitig senden.

Nach der Kanalkodierung und der QAM werden die Daten im Interleaver zeitlich verwürfelt, um Übertragungsfehler durch kurze Störungen oder Fading-Einbrüche besser korrigieren zu können. Die Daten werden schließlich zusammen mit den stärkeren Referenzsignalen, die zur Synchronisierung des Empfängers dienen, auf die einzelnen OFDM-Unterträger verteilt.

<sup>8</sup> F. Hofmann, DRM (Digital Radio Mondiale) – der neue digitale Mittel- und Kurzwellenrundfunk, Kleinheubacher Berichte, Bd. 44, 2001, S. 266

Daraus wird das Sendesignal im Zeitbereich durch eine Fast-Fourier-Transformation berechnet, Digital-/Analog-gewandelt, auf die Sendefrequenz umgesetzt und schließlich auf die erforderliche Leistung verstärkt.

*Tabelle 2: Verfügbare Netto-Datenrate (nach Fehlerkorrektur) in kbit/s bei DRM bei minimalem bzw. maximalem Fehlerschutz<sup>9</sup>.*

<b>Robustness Mode</b>	<b>9 kHz Bandbreite</b>	<b>10 kHz Bandbreite</b>	<b>20 kHz Bandbreite</b>
A/64-QAM	10,6 ... 16,7	22,1 ... 34,8	45,8 ... 72,0
A/16-QAM	7,1 ... 8,9	14,8 ... 18,5	30,6 ... 38,2
B/64-QAM	15,3 ... 24,1	17,5 ... 27,5	35,8 ... 56,1
B/16-QAM	10,2 ... 12,8	11,7 ... 14,6	23,8 ... 29,8
C/64-QAM	–	13,8 ... 21,6	29,0 ... 45,5
C/16-QAM		9,2 ... 11,5	19,3 ... 24,1
D/64-QAM	–	9,2 ... 14,4	19,5 ... 30,6
D/16-QAM		6,1 ... 7,6	13,0 ... 16,3

<sup>9</sup> nach DRM Broadcasters' User Manual, DRM Konsortium, 2004 (erhältlich als pdf-Datei auf <http://www.drm.org>)

## 3 Aufbau und technische Merkmale der DRM-Versuchssender und Empfänger

### 3.1 Überblick über die Entwicklung der Sender

Um mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ein DRM-Signal senden zu können, wurde für den Aufbau der Sender ein Ansatz gewählt, der es gestattet, mit möglichst einfachen Hilfsmitteln ein Sendesignal zu erzeugen.

Es wurde zunächst angestrebt, das DRM-Signal auf einem PC zu erzeugen. Dadurch konnte die Entwicklung eines digitalen Modulators, die längere Zeit in Anspruch genommen hätte, umgangen werden. Im Lauf der Softwareentwicklung stellte sich sogar heraus, dass es möglich sein würde, das DRM-Signal in Echtzeit auf einem hinreichend schnellen PC zu generieren. Dadurch wurde ein kontinuierlicher Sendebetrieb möglich und es konnte das Webradio-Programm, das von Mitarbeitern und Studierenden der FH, insbesondere des Fachbereichs Informatik, gestaltet wird, über die DRM-Sender abgestrahlt werden. Das im PC erzeugte DRM-Signal wird dazu über den analogen Ausgang der Soundkarte auf einer Zwischenfrequenz von üblicherweise 12 kHz ausgegeben. Zur Abstrahlung des Signals auf der 26 MHz-Frequenz wurde zunächst auf einen vorhandenen Amateurfunksender des Typs Collins zurückgegriffen, der entsprechend modifiziert werden musste. Dazu wurde eine Schaltung entwickelt, die das DRM Signal von 12 kHz auf die Zwischenfrequenz des Senders von 455 kHz umsetzt. Es erwies sich aber, dass der Collins-Sender auf Grund der Röhrentechnik sehr wartungsintensiv und störungsanfällig war. Deshalb wurde bereits für den Aufbau des Senders Dillberg auf eine kommerziell erhältliche Transistorendstufe zurückgegriffen, sodass nur noch ein Modulator aufgebaut werden musste, der das 12 kHz Signal auf die Sendefrequenz umsetzt und eine Leistung von etwa 1 mW erzeugte. Diese Kombination erwies sich als sehr zuverlässig und der Sender konnte im Dauerbetrieb mit Wartungsintervallen von mehreren Monaten betrieben werden.

Ausgehend von diesen positiven Erfahrungen wurde, als die Verlängerung des Projektes bis 2007 absehbar war, auch der Nürnberger Sender in ähnlicher Weise ausgeführt. Er besteht nun aus einem ähnlichen Modulator wie der am Dillberg und einer Transistor-Endstufe, die 10 Watt Ausgangsleistung erzeugt.

Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten auf dem Gebäude der FH wurde als Sendeantenne eine einfache Draht-Dipolantenne angebracht, deren beide Schenkel allerdings um etwa 90 Grad abgewickelt wurden, um annähernd die erwünschte Rundstrahlcharakteristik zu erreichen. Die Polarisation war hier gemischt horizontal-vertikal, da die beiden Geräte auch schräg nach unten aufgespannt wurden. Am Sender Dillberg konnte nur eine vertikale Antenne angebracht werden. Zunächst handelte es sich dabei um einen mit einem Breitbandübertrager angepassten nicht-resonanten Vertikalstrahler. Nachdem diese Antenne bei einem Sturm abgeknickt worden war, wobei auch der Breitbandübertrager zerstört wurde, wurde sie auf eine halbe Wellenlänge verkürzt und mit einer resonanten Anpassung (Fuchs-Kreis) versehen. Dadurch konnte eine erheblich größere Reichweite erzielt werden.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Studie verwendeten Sender.

Tabelle 3: Eigenschaften der DRM-Versuchssender

	Nürnberg–Keßlerplatz	Dillberg
Standort	49°27'10" N 11°05'40" O	49°19'28" N 11°22'55" O
Höhe über NN	300 m	600 m
Frequenz	26012 kHz	26000 kHz
Antenne	Halbwellendipol	Vertikaler Halbwellenstrahler
Höhe der Antenne über Grund	30 m	5 m
Sendeleistung EIRP	10 W	100 W
Betriebszeiten	Seit März 2003 Unterbrechung (Umbau) Januar – Juni 2005t	Seit Februar 2004

## 3.2 Software zur Signalerzeugung

### 3.2.1 Einführung

Das komplette DRM-Signal wird auf einem PC per Software erzeugt. Diese Software wurde im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt<sup>10</sup>. Es handelt sich um Java-Code, der insbesondere unter Linux lauffähig ist.

Die Software ist in der Lage, das DRM-Signal in Echtzeit zu erzeugen, d.h., ein über die Soundkarte eingespieltes Audiosignal in ein entsprechendes DRM-Signal umzuwandeln. Dieses liegt am Ausgang der Soundkarte analog mit einer Mittenfrequenz von z.B. 12 kHz vor.

Für die Signalzubringung zum Senderstandort wurde die Software dahin gehend erweitert, dass ein der Audiostream eines Webservers direkt als Eingangssignal verwendet werden kann. Für das Campus-Radio hat dies den Vorteil, dass eine parallele Verbreitung als Webradio und über die experimentellen Kurzwellensender leicht erreicht werden konnte.

### 3.2.2 Programm zur DRM-Signalerzeugung

Das Programm für die DRM-Signalerzeugung wurde in der Programmiersprache Java erstellt. Um die erforderliche hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit trotzdem zu erreichen, wurden die rechenintensiven Teile wie Audiokodierung (hierfür wurde eine Programmbibliothek der Firma Coding Technologies verwendet) und Erzeugung des OFDM-Signals (Verwendung der Programmbibliothek fftw) als so genannte native codes eingebettet. Dadurch entfällt nur etwa 25 Prozent der benötigten Rechenleistung auf den Java-Kode, während ca. 50 Prozent für die Audiokodierung und ca. 25 Prozent für die OFDM-Erzeugung benötigt werden. Insofern ist es also nicht der Java-Code, der die Verarbeitungsgeschwindigkeit limitiert.

Die Struktur des Programms orientiert sich unmittelbar an dem in Abb. 4 wiedergegebenen Blockschaltbild. Die Software wurde "von hinten her" implementiert, um den jeweiligen Fortschritt gleich testen zu können.

<sup>10</sup> R. Zitzmann, Implementierung eines Softwaremodells der Übertragungskette beim digitalen Kurzwellenrundfunk DRM, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, 2003

### **3.2.2.1 OFDM-Erzeugung**

Die Abtastwerte des OFDM-Zeitsignals werden durch eine inverse Fast Fourier Transformation berechnet. Als Eingangsparameter werden so viele komplexe Vektoren generiert wie Unterträger vorhanden sind. Diese komplexen Werte bestimmen die Amplituden- und Phasenwerte jedes Trägers im Frequenzbereich. Wenn die Abtastwerte des entsprechenden Zeitsignals berechnet sind, kann durch einfaches Kopieren eines Teils vom Ende zum Anfang des jeweiligen Symbols das Schutzintervall erhalten werden. Dieser Teil wird vor die vorher berechneten Abtastwerte kopiert.

### **3.2.2.2 Senderrahmen-Erzeugung**

Zur Ansteuerung des OFDM-Generators werden die kodierten Modulationsinhalte benötigt. Bei DRM sind die Daten in 400 ms langen Transmission Frames organisiert, die die Daten des FAC, des SDC und das MSC enthalten. Außerdem werden an vorgegebenen Stellen so genannte Pilotzellen eingefügt, die der Empfänger zur Synchronisation und Kanalschätzung benötigt. Da die Inhalte der Pilotzellen festgelegt sind, können sie erzeugt werden, ohne dass eine Audio- oder Datenquelle vorhanden sein muss. An Hand des Synchronisationsverhaltens eines Empfängers kann an dieser Stelle bereits die korrekte Implementierung der OFDM-Erzeugung getestet werden.

### **3.2.2.3 Kanalkodierung und Interleaver**

In dieser Stufe werden die Eingangsdaten mit der Fehlerschutzkodierung versehen, wie sie in der DRM Systembeschreibung vorgesehen ist. Die zeitliche Reihenfolge der Daten wird entsprechend der Interleaver-Vorschrift verwürfelt. Die kodierten Daten werden in die für die Senderrahmen- und OFDM-Erzeugung benötigten Vektoren umgewandelt.

### **3.2.2.4 Erzeugung von FAC und SDC**

Die Inhalte dieser Informationskanäle müssen zumindest so weit erzeugt werden, dass der Empfänger das Signal korrekt dekodieren kann. Dazu werden die erforderlichen FAC – Datenfelder generiert, sowie für den SDC die Datentypen Multiplex-Beschreibung (Typ 0), Stationsname (Typ 1) und Audioinformation (Typ 9) erzeugt, die für die Dekodierung von Audioprogrammen im DRM-Multiplex erforderlich sind.

### **3.2.2.5 Erzeugung des MSC**

Für den MSC werden insbesondere die kodierten Audio-Daten benötigt. Diese werden mit der DRM-Bibliothek der Firma Coding Technologies erzeugt, die in das Programm eingebettet ist. Es können MPEG-4-AAC codierte Audio Signale mit SBR erzeugt werden. Die anderen Varianten für die Audiocodierung wurden nicht implementiert. Allerdings ist der ungleichmäßige Fehlerschutz vorgesehen, bei dem das kodierte Signal in zwei Teile aufgeteilt wird, die mit unterschiedlich starkem Fehlerschutz versehen werden. Zusätzlich zum Audiosignale kann ein kurzer Text übertragen werden. Bis zu vier Audiosignale können in einem Multiplexer zusammen gefügt werden.

### **3.2.2.6 Grafische Bedienoberfläche**

Zur Einstellung der Parameter des jeweiligen Senders wurde eine grafische Bedienoberfläche entwickelt. Über diese können alle relevanten Daten eingegeben werden sowie die Texte, die in einer Endlosschleife mit vorgegebener ungefähre Anzeigedauer beim Empfänger übertragen werden. Abb. 5 zeigt einen Screen Shot der grafischen Bedienoberfläche.

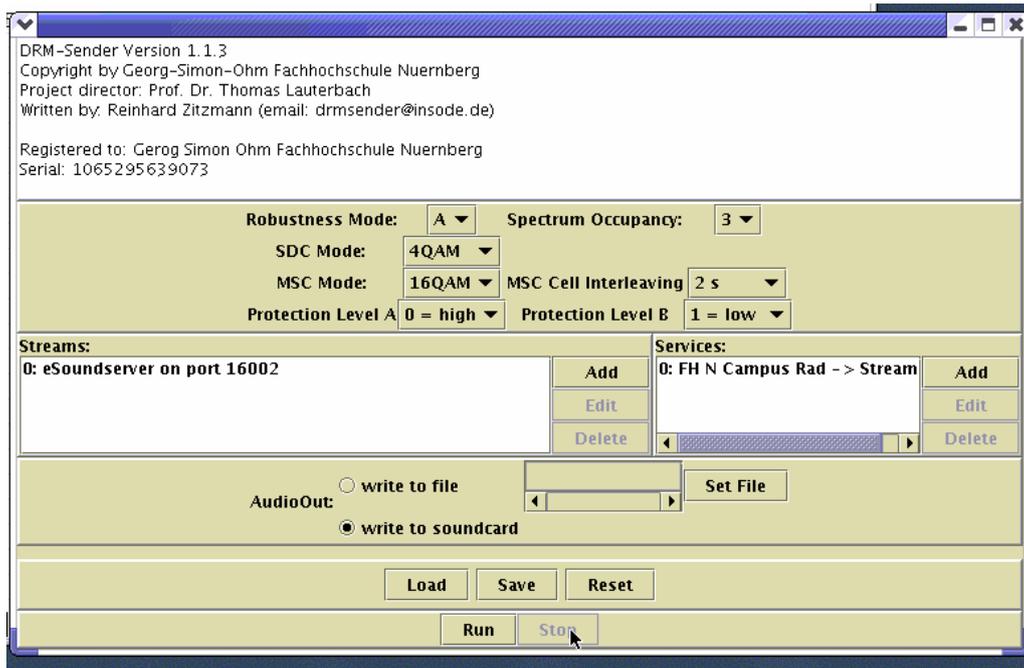


Abb. 5: Grafische Benutzeroberfläche zur Eingabe der DRM-Parameter.

Die Leistungsfähigkeit der Software im Hinblick auf Signal-zu-Rauschabstand S/N, Jitter, Frequenzstabilität etc. hängt entscheidend von der verwendeten Soundkarte ab. Im Kurzschlussbetrieb (direkte 12 kHz -Verbindung zwischen zwei PCs) wurde jedoch stets ein S/N von mehr als 40 dB erreicht (Abb. 6). Es stellte sich heraus, dass die Software sehr zuverlässig arbeitet. In mehr als 3 Jahren Betriebsdauer (in Nürnberg und am Dillberg zusammen) kam es zu keiner einzigen Senderunterbrechung, die durch einen Fehler der Software ausgelöst worden wäre.

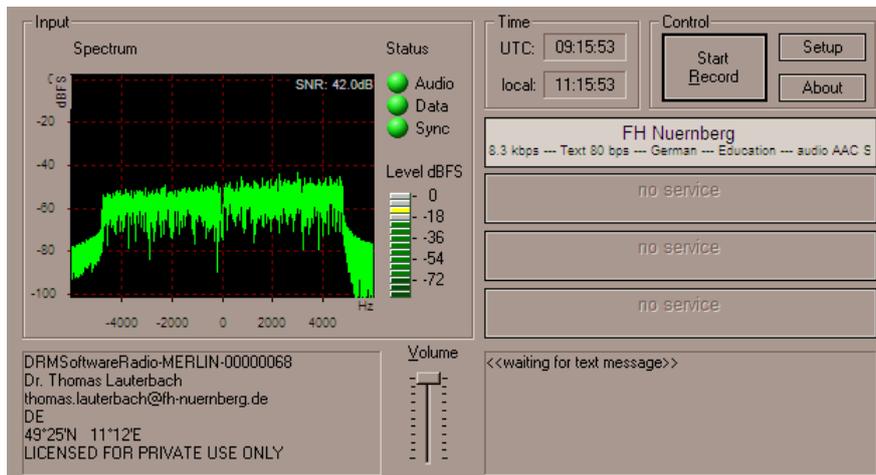


Abb. 6: DRM-Empfangsspektrum bei direkter Audioverbindung des Sende-PCs mit dem Empfangs-PC.

### 3.3 DRM-Versuchssender Nürnberg – 1. Generation

Als DRM-Kleinsender wurde zunächst ein modifizierter Kurzwellen-Amateurfunksender Collins 32S-3 eingesetzt, der ursprünglich für AM-Einseitenbandmodulation (SSB) ausgelegt war.

#### 3.3.1 Modifikation eines Amateurfunksenders zur DRM-Signalgenerierung

Das 12-kHz – DRM – Signal wird durch eine im Rahmen des Projekts entwickelte Schaltung auf eine Zwischenfrequenz von 455 kHz umgesetzt, die der Collins-Sender benutzt. Die SSB-Signalaufbereitung und Filterung werden dabei nicht benötigt. Die weiteren Bausteine des Senders (Mischer, Oszillator, Verstärker) bleiben unverändert, mit Ausnahme eines Misch-Oszillators, der durch Austausch eines Quarzes so modifiziert wurde, dass die Sendefrequenz von 26,000 bzw. 26,012 MHz erreicht wird (Abb. 7).

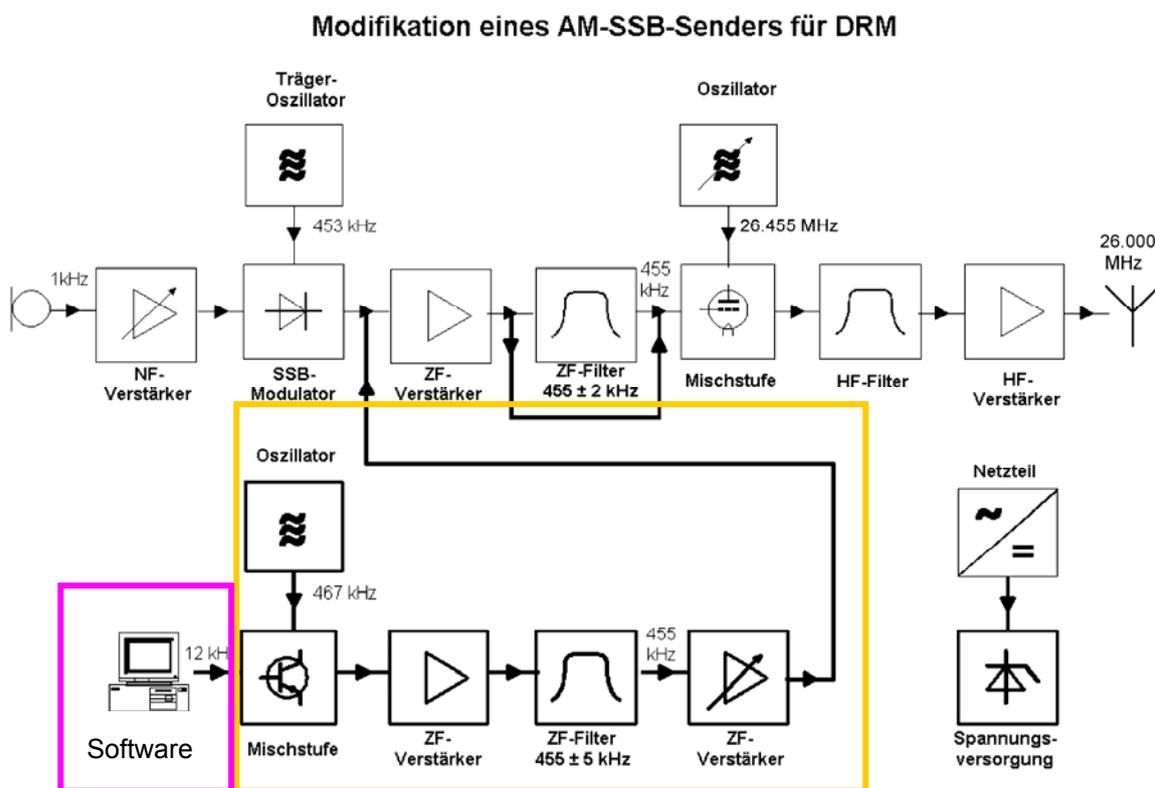


Abb. 7: Blockschaltbild des modifizierten Senders. Die farbig gekennzeichneten Komponenten wurden im Rahmen des Projekts entwickelt.

Die folgenden Fotos (Abb. 8 und Abb. 9) zeigen die bereits fertig entwickelte Schaltung zur Signalaufbereitung und den modifizierten Sender.

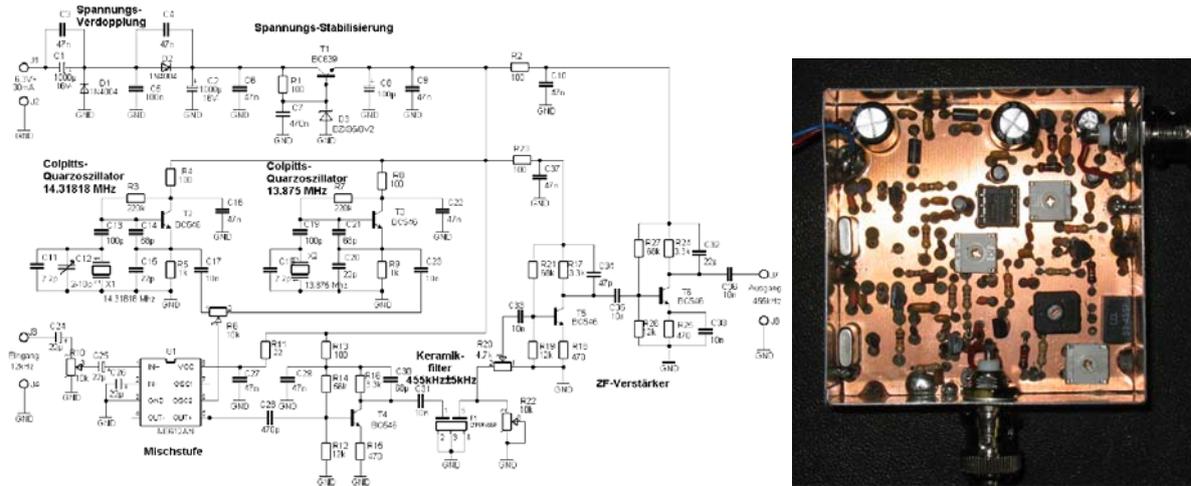


Abb. 8: Schaltplan und Realisierung der in Abb. 7 gelb umrahmten Komponenten.

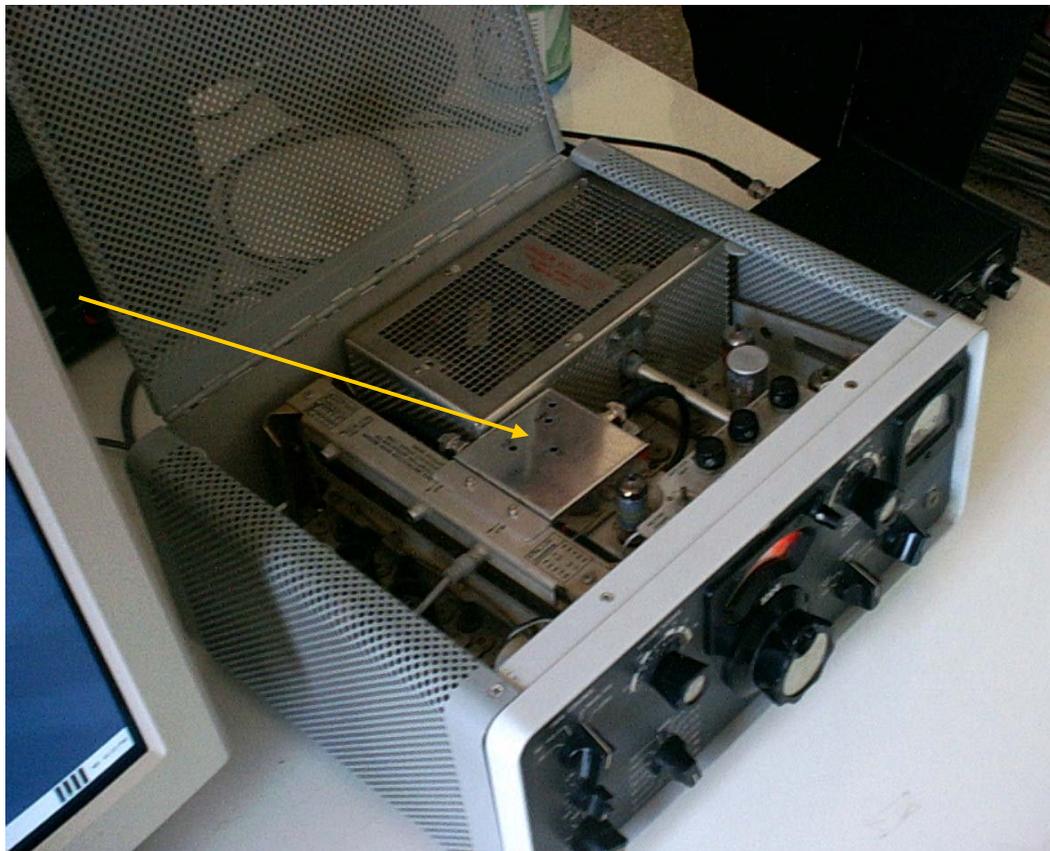


Abb. 9: Foto des modifizierten Senders. Die entwickelte Komponente ist durch den gelben Pfeil gekennzeichnet.

Die komplette Anordnung des Senders mit PC und Antennenanpassgerät zeigt Abb. 10.



*Abb. 9: Komplette Anordnung des Senders: PC, modifizierter Sender, Antennenanpaßgerät*

### **3.3.2 Labormessungen am Sender**

Um die Eigenschaften des modifizierten Senders zu untersuchen, insbesondere im Hinblick auf entstehende Intermodulationsprodukte und Nebenaussendungen, wurden umfangreiche Messungen angestellt. Die Intermodulation wurde an Hand des In-Band Signal-Störabstands charakterisiert. Dieser Wert wird vom Software-Empfänger geliefert.

Für diese Messungen wurde die in Abb. 11 gezeigte Konfiguration verwendet.

Als Resultat ergab sich der Signal-Störabstand S/N, der vom Software-Radio angezeigt wird, in Abhängigkeit von der Sendeleistung. Der Anodenstrom wurde durch ein im Sender eingebautes Instrument gemessen, um die Einstellungen reproduzieren zu können, ohne dass weitere Messgeräte erforderlich sind. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Man erkennt, dass der Sender bis zu einer Leistung von etwa 20 W brauchbar ist. Darüber kommt es zu Verzerrungen bei der Verstärkung, die dazu führen, dass sich der gemessene Signal-Rausch-Abstand verschlechtert. Dies erkennt man auch gut am Spektrum des verstärkten Signals.

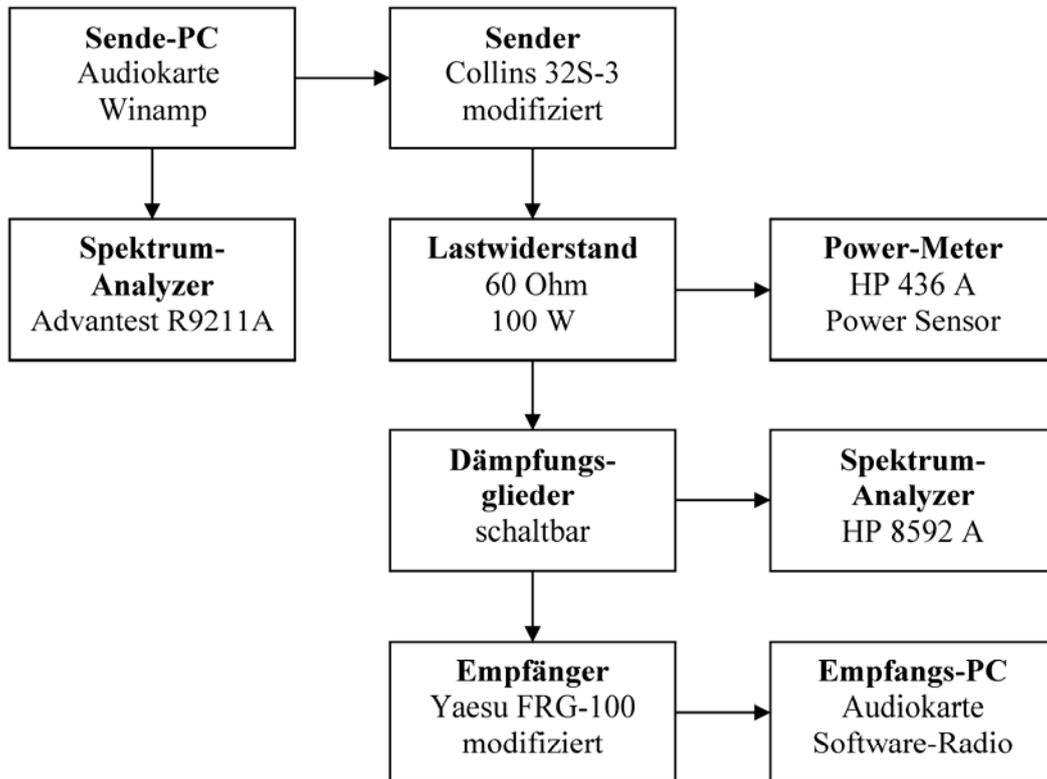


Abb. 10: Messkonfiguration

Tabelle 4: Messergebnisse am Röhrensender

Sendeleistung	Anodenstrom	DRM-S/N	Meßdämpfung
5 W	75 mA	26,5 dB	112 dB
10 W	92 mA	26,5 dB	112 dB
15 W	110 mA	26,5 dB	112 dB
20 W	125 mA	26,2 dB	118 dB
25 W	140 mA	24,2 dB	136 dB
30 W	150 mA	22,3 dB	148 dB
35 W	160 mA	20,0 dB	158 dB
40 W	175 mA	18,0 dB	158 dB

Abb. 12 zeigt das gemessene Spektrum bei einer Leistung von 10 W. Man erkennt hierbei die entstehenden Intermodulationsprodukte auf Grund der nichtlinearen Verstärkung des OFDM-Vielträger-Signals. Die für DRM vorgesehene Spektrumsmaske wird aber ohne Probleme eingehalten (rote Linie).

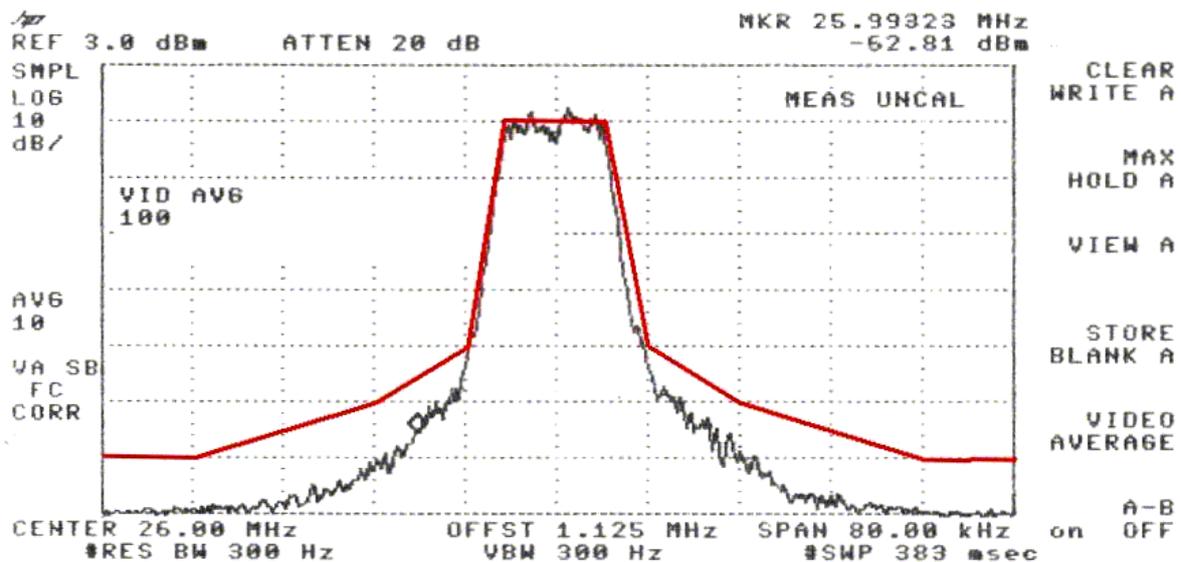


Abb. 12: Spektrum des Senders bei 10 W Ausgangsleistung.

Das Sendesignal ist nach Einbau eines Lüfters in das Sendergehäuse zeitlich stabil und eine Nachregelung ist auch bei stärkeren Temperaturschwankungen nicht erforderlich. Ein Dauerbetrieb des Senders ist problemlos möglich und wurde von März 2003 bis Januar 2005 praktiziert. Allerdings mussten wiederholt Röhren gewechselt werden und andere kleinere technische Defekte behoben werden. Dies ist bei einem über 40 Jahre alten Gerät wohl nicht vermeidbar.

### 3.4 DRM-Versuchssender Nürnberg – 2. Generation

Als sich abzeichnete, dass das Projekt eine Fortsetzung über das Jahr 2005 hinaus erfahren würde, wurde für den Senderstandort Nürnberg ein Halbleitersender aufgebaut. Hierfür stellte uns die SAT-Service Schneider GmbH im Austausch gegen eine Lizenz der DRM-Sendersoftware eine Leistungsstufe des ehem. Funkwerks Köpenik zur Verfügung, ebenso Schaltungsvorschläge für Vortreiber- und Treiberstufe. Zusammen mit einem Modulator, der aus dem für den Sender Dillberg hervorgegangen war, wurde der Sender im Frühjahr 2005 aufgebaut und ist seit Juli 2005 in Betrieb.

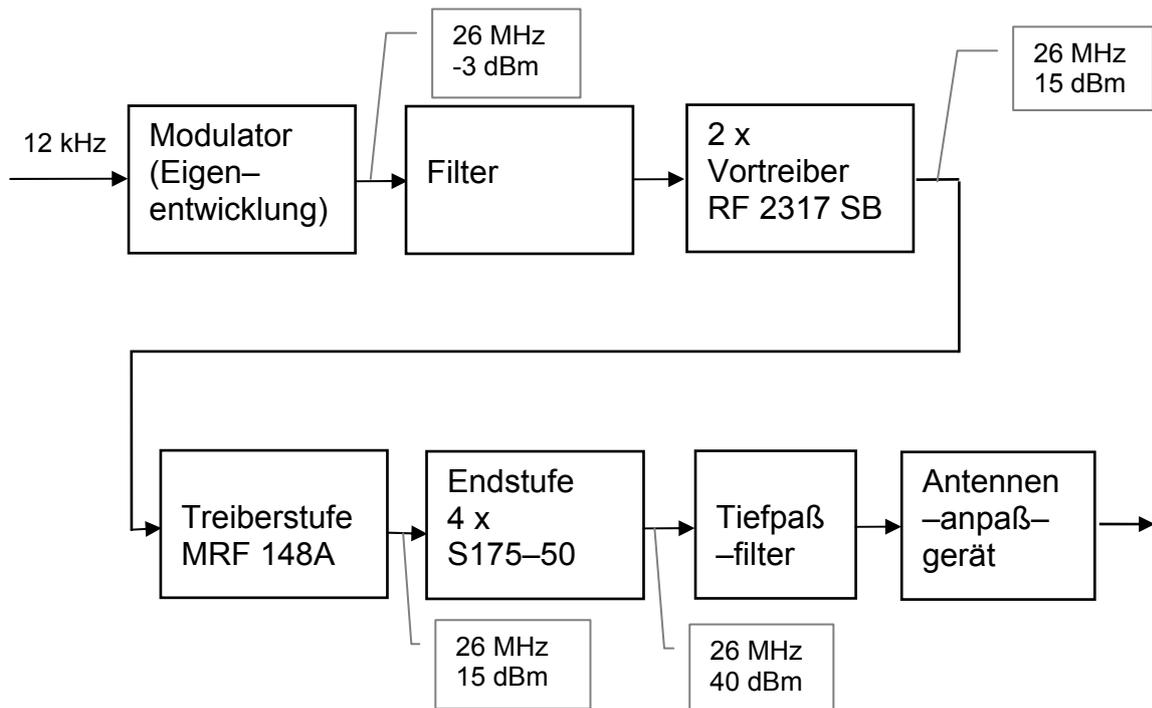


Abb. 13: Blockschaltbild des Halbleitersenders



Abb. 14: Der Halbleitersender am Standort Nürnberg

Das Panoramabild (Abb. 15) zeigt die freie Sicht vom Senderstandort, der deutlich über die Dächer der meisten umliegenden Gebäude hinausragt. Lediglich in Richtung Nordwesten sind viele Gebäude zu sehen, die höher liegen und deshalb eine nur eingeschränkte Sicht zulassen.

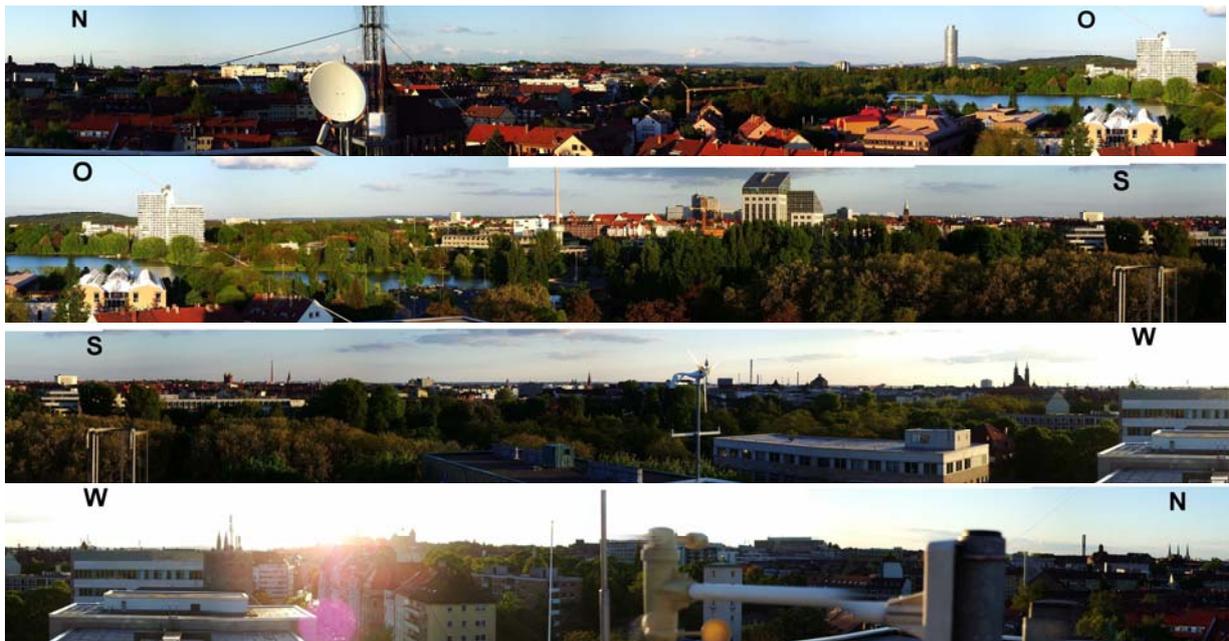


Abb. 15: Panoramablick vom Standort des Senders Nbg.–Keßlerplatz

Abbildung 16 zeigt ein Luftbild des Senderstandorts, auf dem die Gebäude der Fachhochschule und die Position der Sendeantenne gut erkennbar sind.



Abb. 16: Luftbild des Senderstandorts Nbg. –Keßlerplatz. Der gelbe Pfeil markiert die Position der Sendeantenne<sup>11</sup>.

Als Sendeantenne wird eine Dipolantenne an einem Antennenmast auf dem höchsten Gebäudeteil der Fachhochschule (Abb. 17, Höhe über dem Straßenniveau etwa 30 m) verwendet, deren beiden Hälften etwa im 120°-Winkel von einem Mast schräg nach unten aufgespannt sind (Abb. 19). Auf dem Mast befinden sich außerdem Antennen der Amateurfunkstation der Fachhochschule.

<sup>11</sup> Quelle: Bayerische Vermessungsverwaltung, <http://www.geodaten.bayern.de>



Abb. 18: FH-Gebäude mit dem Antennenmast

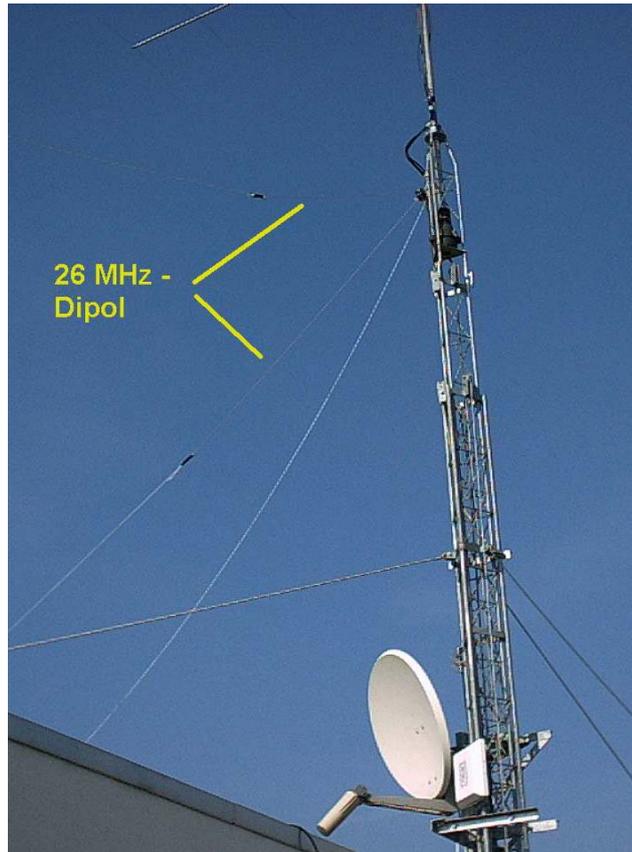


Abb. 19: Sendeantenne auf dem FH-Gebäude

Diese Antennenanordnung wurde gewählt, um eine annähernde Rundstrahl-Charakteristik zu erreichen. Allerdings zeigt eine Simulation mit der Software NEC, dass auf Grund des Mastes, der Abspannseile und der Abdeckung der Dachkanten mit Metall das Diagramm eine Vorzugsrichtung nach Nordosten hat (Abb. 20).

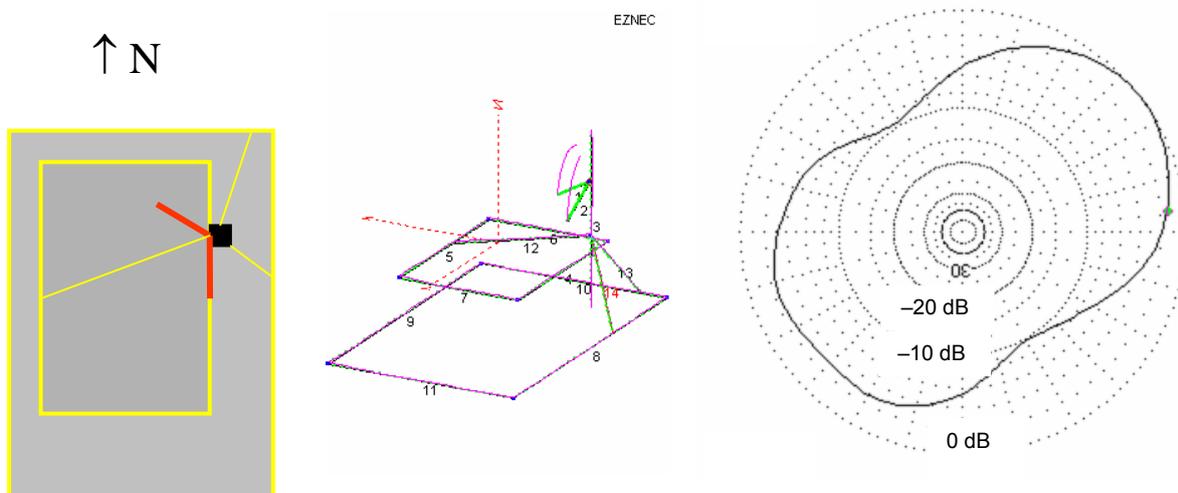


Abb. 20: Simulationsergebnis für die Richtcharakteristik der Sendeantenne

Weiterhin getestet wurde eine kommerziell erhältliche Kurzwellensendeantenne mit einer Länge von ca. 5,5m, die als Vertikalstrahler ausgeführt ist. Es ergaben sich geringfügige Verbesserungen gegenüber der Dipolantenne bei Mobilempfang, da dabei die Empfangsantenne ebenfalls vertikal polarisiert ist. Bei stationärem Empfang ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Antennen. Der Vertikalstrahler wurde später für den Sender am Dillberg verwendet.

### **3.5 DRM-Versuchssender Dillberg**

Für die Signalerzeugung am Dillberg wurde ein anderes Konzept gewählt, da wegen der geringeren Wartungsintensität von vornherein nur ein reiner Transistorsender verwendet wurde. Aus den Fördermitteln des Landkreises Neumarkt konnte von der Firma Sat-Service Schneider GmbH das Entwicklungsmuster eines für DRM geeigneten Transistorverstärkers mit einer Spitzenleistung von 1 kW erworben werden, der eine Ansteuerleistung von nur 1 mW benötigt. Zur Ansteuerung des Senders wurde ausgehend von der oben erwähnten Schaltung zur Umsetzung des PC-Signals auf 455 kHz ein Steuersender entwickelt. Das 455 kHz – Signal wird dazu zunächst auf 10,7 MHz umgesetzt und gefiltert. Anschließend erfolgt die Umsetzung auf 26 MHz, danach eine Verstärkerstufe auf 1 mW und eine weitere Filterstufe. Das so erzeugte Signal wird in den Transistorverstärker eingespeist. Abb. 21 zeigt den Sender am Dillberg.

Um über den Sender Dillberg das Tonsignal des Campus-Radio ausstrahlen zu können, wurde ein Telefonanschluß mit DSL-Internetzugang eingerichtet. Über dieses Modem kann das Tonsignal, das von einem Server in der FH als Webstream bereitgestellt wird, abgerufen werden und zur weiteren Verarbeitung an die Sendersoftware weitergegeben werden. Dieselbe Art der Modulationszubringung wurde übrigens auch für den Nürnberger Sender verwendet, so dass gewährleistet ist, dass beide Sender stets dasselbe Signal abstrahlen. Außerdem ergab sich durch die permanente Verbindung zum Internet die Möglichkeit der Fernbedienung beider Sender über VNC-Serverdienste. Diese Fernbedienmöglichkeit erwies sich insbesondere im Rahmen von Versuchen als sehr nützlich, da die Betriebsparameter des Senders geändert werden konnten, ohne am Senderstandort präsent sein zu müssen. Außerdem konnte bei Störungen des Audiosignals, z.B. bei Problemen mit dem Server des Webradios oder mit dem Player auf dem Senderechner schnell und ohne großen Aufwand eingegriffen werden, ebenso konnten die übertragenen Textmeldungen während des Betriebs leicht über die grafische Benutzeroberfläche geändert werden.



Abb. 21: Der DRM-Sender auf dem Dillberg. Links der PC zur Signalerzeugung, darauf das DSL-Modem, mit dem das Signal des Campus Radio vom Webserver der FH abgerufen wird. Rechts oben das Antennenanpassgerät, links davon der Steuersender, darunter die Transistorendstufe.

Abb. 22 zeigt das Ausgangsspektrum (über Antenne gemessen) des Transistorsenders bei einer Leistung von ca. 50W, wie sie im Rahmen des Dauerbetriebs verwendet wurde. Ein Schulterabstand von etwa 30 dB wurde erreicht.

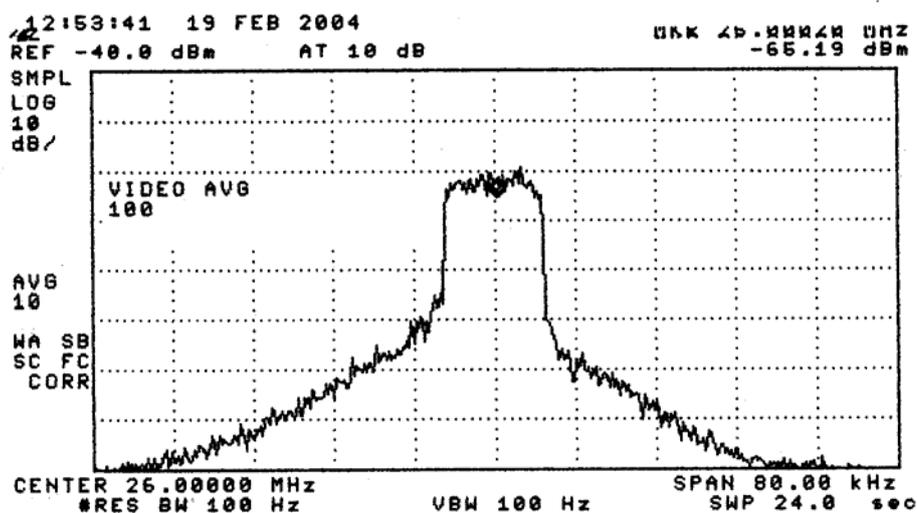


Abb. 22: Das Spektrum des Ausgangssignals des Transistorsenders am Dillberg.

Als Sendeantenne wurde am Dillberg ein vertikaler Halbwellenstrahler verwendet, der am Stationsgebäude in nur etwa 6 m Höhe über Grund montiert wurde. Abb. 23 zeigt das Luftbild des Geländes am Dillberg mit dem gekennzeichneten Antennenstandort und den Panoramablick vom Ort der Sendeantenne, Abb. 24 die Sendeantenne selbst.

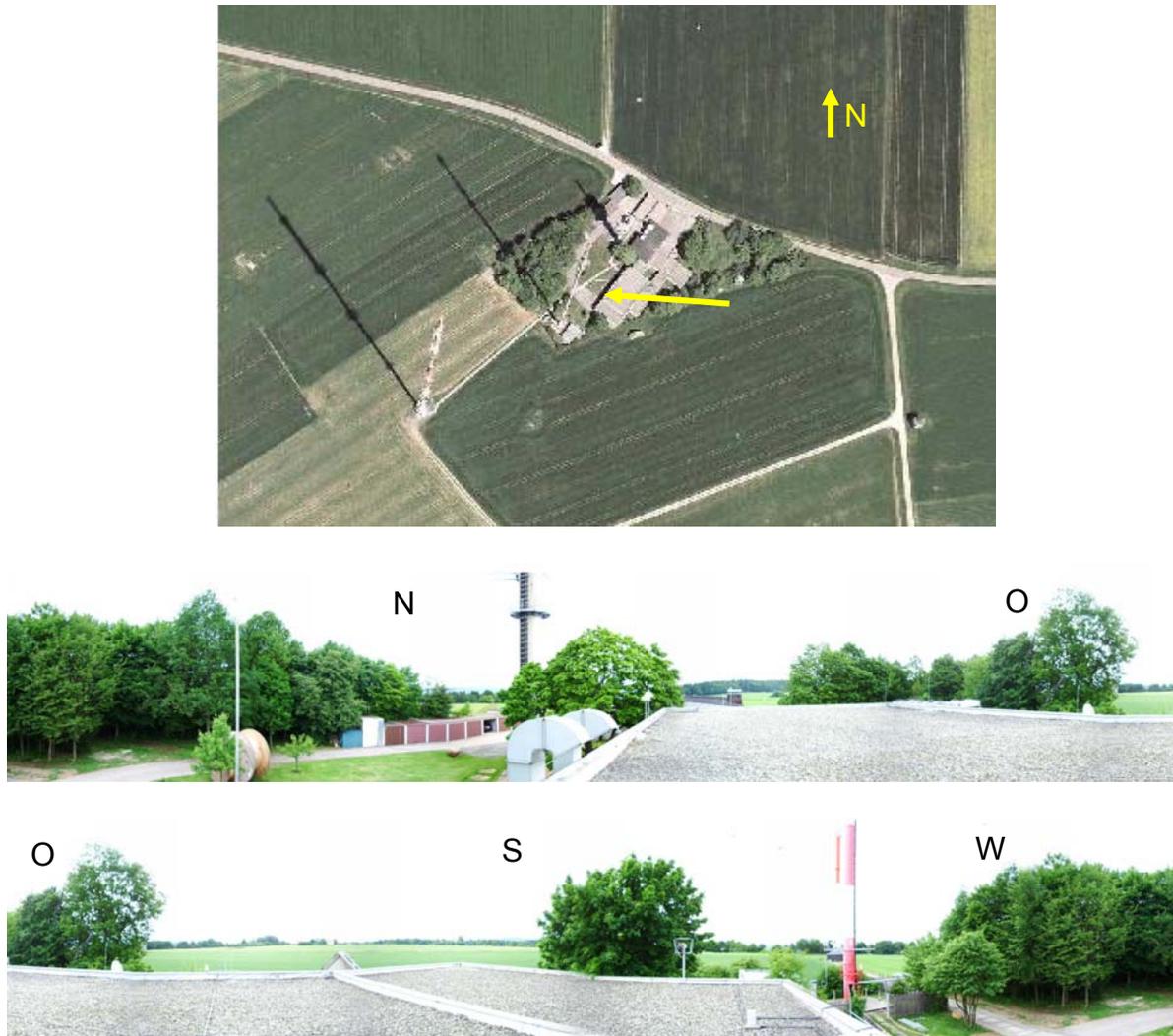


Abb. 23: Luftbild<sup>12</sup> und Panoramablick vom Standort des Senders Dillberg

Die Anpassung des vertikalen Halbwellenstrahlers erfolgte zuerst wie vom Hersteller vorgesehen mit einem breitbandigen Impedanzübertrager. In Folge eines Sturmes brach jedoch der Strahler ab, und es kam zu einer groben Fehlanpassung, die zur Zerstörung des Übertragerkerns führte. Im Rahmen der notwendigen Reparaturen wurde sowohl der Strahler durch ein eingefügtes weiteres Rohr verstärkt, als auch eine resonante Anpassung mit einem so genannten Fuchs-Kreis, einem Parallelschwingkreis, dessen Spule als Autotransformator zur Impedanzübertragung genutzt wird, angebracht (Abb. 25). Die Kapazität des Schwingkreises wurde durch ein Stück offenes Koaxialkabel realisiert. Nach dieser Reparatur wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad der Antenne nun deutlich besser war und sich die Reichweite des Senders entsprechend vergrößert hatte.

<sup>12</sup> Quelle: Bayerische Vermessungsverwaltung, <http://www.geodaten.bayern.de>

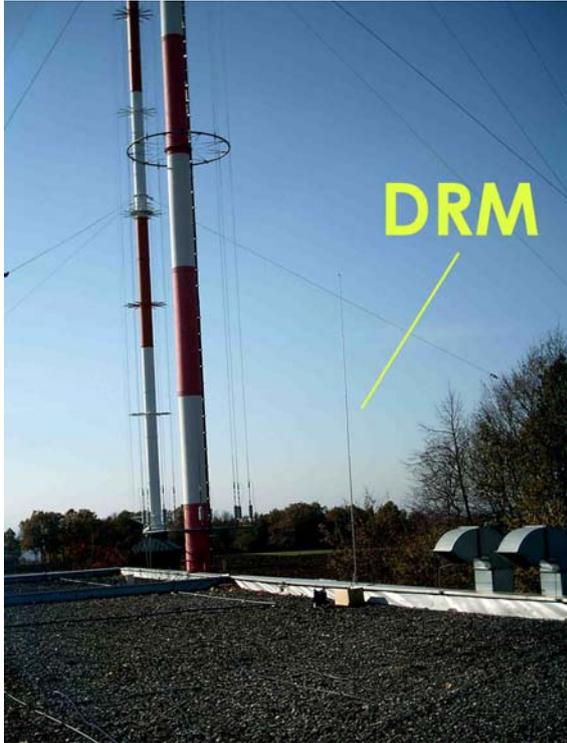


Abb. 24: Die DRM-Sendeantenne auf dem Stationsgebäude, im Hintergrund die Masten der Rundfunk- und Fernsehsender des Bayerischen Rundfunks.



Abb. 25: Die Parallelkreis-Anpassung des vertikalen Halbwellenstrahlers nach der Reparatur, Abdeckung entfernt.

Aufgrund der geringen Höhe der Sendeantenne über Grund ergibt sich ein Vertikaldiagramm, das im Hinblick auf die lokale Rundfunkversorgung nicht ideal ist, da das Maximum der Abstrahlung unter einem vertikalen Erhebungswinkel von etwa  $12^\circ - 45^\circ$  auftritt. Bei Montage einer solchen Antenne in 30 m Höhe wird sowohl ein um 4 dB höherer Gewinn als auch eine flachere Abstrahlung, nämlich in  $4^\circ$ -Richtung erreicht.

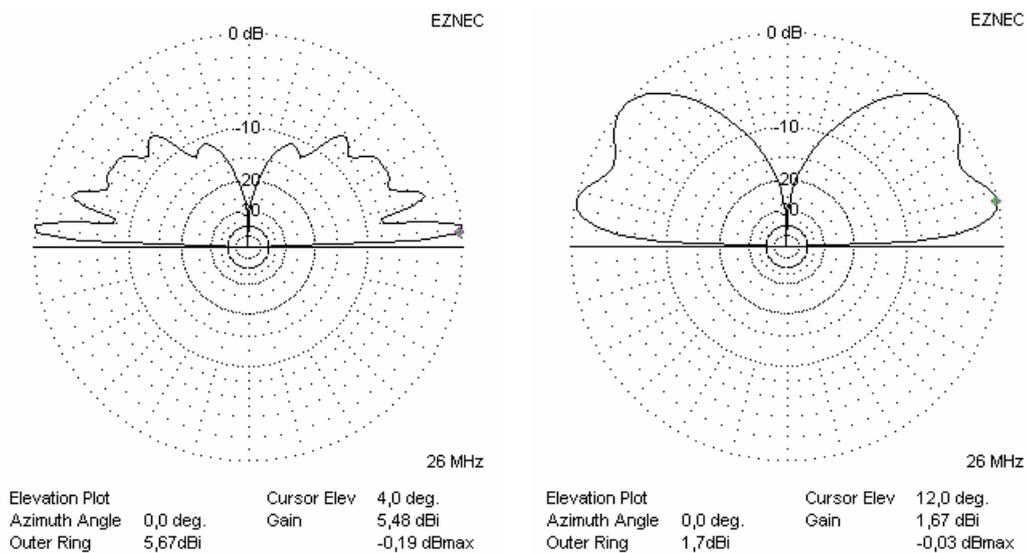


Abb. 26: Simulation des Vertikaldiagramms des vertikalen Halbwellenstrahler. Links: Höhe 30m über Grund (entspricht FH-Gebäude), rechts: Höhe 5m über Grund (entspricht Dillberg).

### 3.6 DRM-Parameter der Sender

So weit nichts anderes angegeben ist, beziehen sich alle Ergebnisse dieses Berichts auf den Betrieb der Sender mit folgenden DRM-Parametern:

Robustness Mode A  
 SDC Mode 4 QAM  
 MSC Mode 16 QAM  
 Spectrum Occupancy 3 (10 kHz Bandbreite)  
 MSC Cell Interleaving 2 s  
 Equal Error Protection, Koderate 0,62.

Gelegentlich wurden für Versuche auch andere Betriebsarten eingestellt, dies ist bei den jeweiligen Ergebnissen sofern zutreffend vermerkt.

### 3.7 Die im Rahmen des Projekts eingesetzten DRM-Empfänger

Aufgabe des Empfängers (Front End) ist es, das Empfangssignal auf eine Zwischenfrequenz von ca. 12 kHz umzusetzen und mit einem angemessenen Pegel zu liefern, da dieses Signal dem Eingang der Soundkarte eines PC zugeführt wird (Abb. 27). Für die Digitalisierung und Signalverarbeitung auf dem PC konnten zwei Software-Varianten eingesetzt werden.

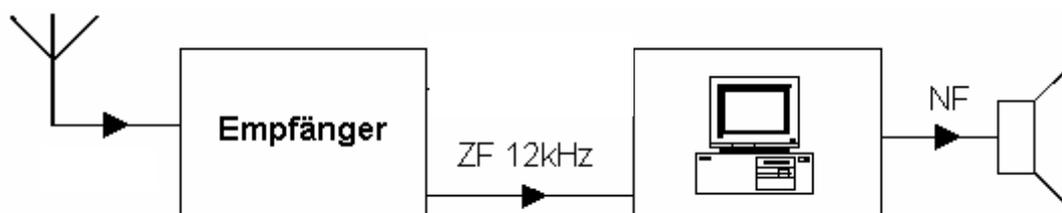


Abb. 27: DRM-Empfang mit Dekodierung auf dem PC

Zur Dekodierung des DRM Signals auf einem PC wurde eine komplette Software unter der Bezeichnung „DRM Software Radio“ vom DRM-Konsortium angeboten. Lizenzen konnten über das Internet erworben werden. Eine Software mit der Bezeichnung „DREAM“ ist als „open-code“ von der TU Darmstadt erhältlich, ebenfalls über das Internet. Häufig waren jeweils die aktuellen Programmversionen in fertig kompilierter Form im Internet verfügbar. Während der Projektlaufzeit wurde die Dream-Software stetig weiterentwickelt, sodass eine Reihe von Messungen damit möglich wurden, die mit dem DRM Software Radio nicht möglich waren. Deshalb wurde ab etwa Anfang 2005 überwiegend die Dream-Software zum Empfang eingesetzt, lediglich für Langzeit-Versuche wurde weiterhin das DRM Software Radio verwendet, um sicherzustellen, dass keine Veränderungen des Empfangsverhaltens auf Grund einer Software-Umstellung erfolgen.

### 3.8 Kommerziell erhältliche Geräte

Als Referenz für die Entwicklung eines eigenen Empfängers und für verschiedene Miss Aufgaben dient ein modifizierter kommerzieller Empfänger mit 12 kHz Ausgang (Yaesu FRG 100), Abb. 28.

Dieser Empfänger verfügt über eine serielle Schnittstelle, über die unter anderem die AGC-Regel-Spannung und damit ein Maß für die Eingangsleistung an der Antennenbuchse ausgelesen werden kann. Dieser Zusammenhang wurde durch eine Kalibrierung im Labor untersucht, sodass die über die Schnittstelle ausgegebenen Werte in Eingangsleistung (dBm) umgerechnet werden können. Hierzu wurde der Empfänger an einen Messsender (Rhode&Schwarz SMY02) angeschlossen.

Abb. 29 zeigt die gewonnene Kalibrierkurve, die in einem weiten Leistungsbereich näherungsweise durch eine Gerade beschrieben werden kann.

Im Verlauf des Projektes kamen auch erste DRM-Empfänger auf den Markt, u.a. der von der Firma Coding Technologies angebotene „Digital World Traveller“, eher über einen USB-Anschluss mit dem PC verbunden wird. Die Steuerung des Empfängers (Empfangs Frequenz) und die Dekodierung des Signals erfolgen auch hier auf einem PC.



Abb. 28: Modifizierter Yaesu FRG 100- Empfänger, Dekodierung mit DRM-Software Radio auf dem Notebook-PC.

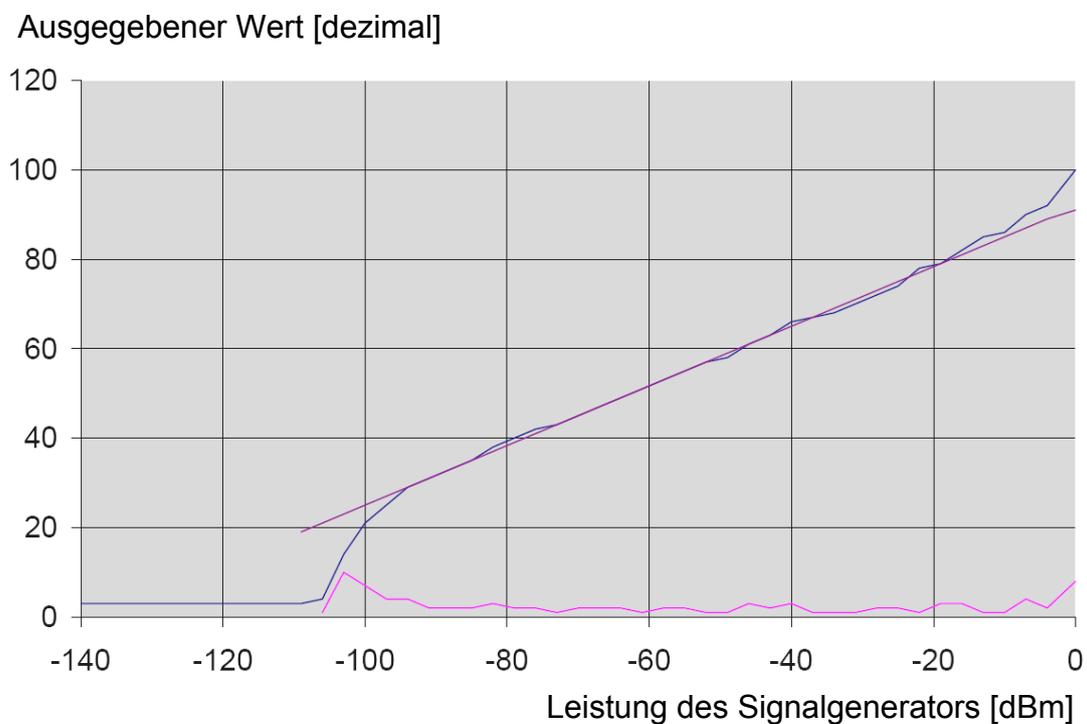


Abb. 29: Kalibrierkurve des Yaesu FRG-100 Empfängers<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Sven Günther, Entwicklung und Erprobung von Antennen für DRM-Empfang bis 30 MHz, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg 2004

### 3.9 Eigene Entwicklung eines DRM-Frontends

Um eine größere Zahl von Testhörern, insbesondere unter den Studierenden, gewinnen zu können, war es erforderlich, ein kostengünstiges Front End zu entwickeln, das sich aber nicht wesentlich von den typischen Eigenschaften eines späteren Consumer-Gerätes unterscheiden sollte, um realistische Daten zu den Empfangsverhältnissen zu erhalten. Hinsichtlich des Frequenzbereichs und der Bedienung konnte jedoch eine eingeschränkte Funktionalität akzeptiert werden, um die Kosten zu reduzieren.

Neben der HF-technischen Eignung waren auch folgende Gesichtspunkte wichtig:

- Beschränkung auf eine feste Empfangsfrequenz
- Stromversorgung vom PC aus
- Empfangsantenne: kurzer Draht bzw. Außenantenne
- Zusammenstellung eines nachbausicheren Bausatzes

Das Empfängerkonzept, das schließlich realisiert wurde, beruht auf zwei integrierten Schaltungen, mit denen der Empfang und die Umsetzung auf 12 kHz realisiert werden (Abb. 30). Dieses Konzept konnte nur mit preisgünstigen Standard-Bauteilen für die Frequenzumsetzung realisiert werden. Insbesondere für die Quarzoszillatoren bringt die Verwendung von Standardfrequenzen erhebliche Kostenvorteile im Vergleich zu Spezialanfertigungen (ca. 0,5 € im Gegensatz zu ca. 25 €). Der Nachteil dieses Konzepts ist, dass die Zwischenfrequenz des Empfängers auf 1 MHz gelegt werden musste. Dadurch konnte nicht auf im Handel erhältliche ZF-Filter zurückgegriffen werden. Durch Verwendung eines LC-Filters konnte aber zumindest eine gewisse Spiegelfrequenzunterdrückung erreicht werden. Das Konzept erwies sich als sehr flexibel im Hinblick auf die Erweiterung des Empfangs auf zwei Frequenzen. Da uns die Regulierungsbehörde mit der Frequenzuteilung sehr entgegen kam, konnte die Umschaltung einfach durch Umstecken eines Jumpers realisiert werden.

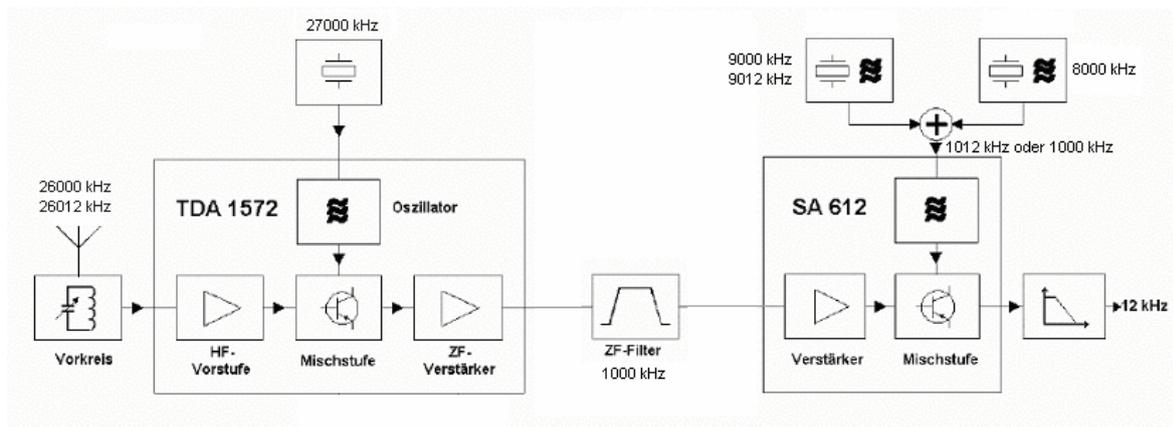


Abb. 30: Blockschaltbild des Front-Ends für den Campus-Radio-Empfang.

Abb. 31 zeigt das Schaltbild des Empfänger-Front-Ends. Das HF-Signal gelangt von der Antenne über das aus L3 und C7 bestehende Vorfilter an den HF-Eingang von IC3, das einen geregelten Vorverstärker und die Mischstufe auf die erste Zwischenfrequenz enthält. Diese beträgt 1000 kHz beim Empfang von 26000 kHz. Der IC-interne Oszillator ist mit dem 27-MHz-Obertonquarz X1 und dem Oberwellen-Selektionskreis aus C15 und L4 bestückt. Die Oszillatorfrequenz kann am Punkt „OSZ“ gemessen werden. Die am Pin 1 von IC3 anliegende Zwischenfrequenz wird über das Bandfilter aus L1, L2 und C2 bis C5 auf den symmetrischen ZF-Verstärkereingang im IC gekoppelt und die verstärkte Zwischenfrequenz

an Pin 10 des IC abgenommen. Die zur Regelung der HF- und ZF-Verstärkerstufen gebildete Regelspannung liegt an Pin 11 des ICs an und kann beim Abgleichen am Punkt „AGC“ gemessen werden. Die Zeitkonstante der Verstärkungsregelung ist durch C20 und C21 vorgegeben.

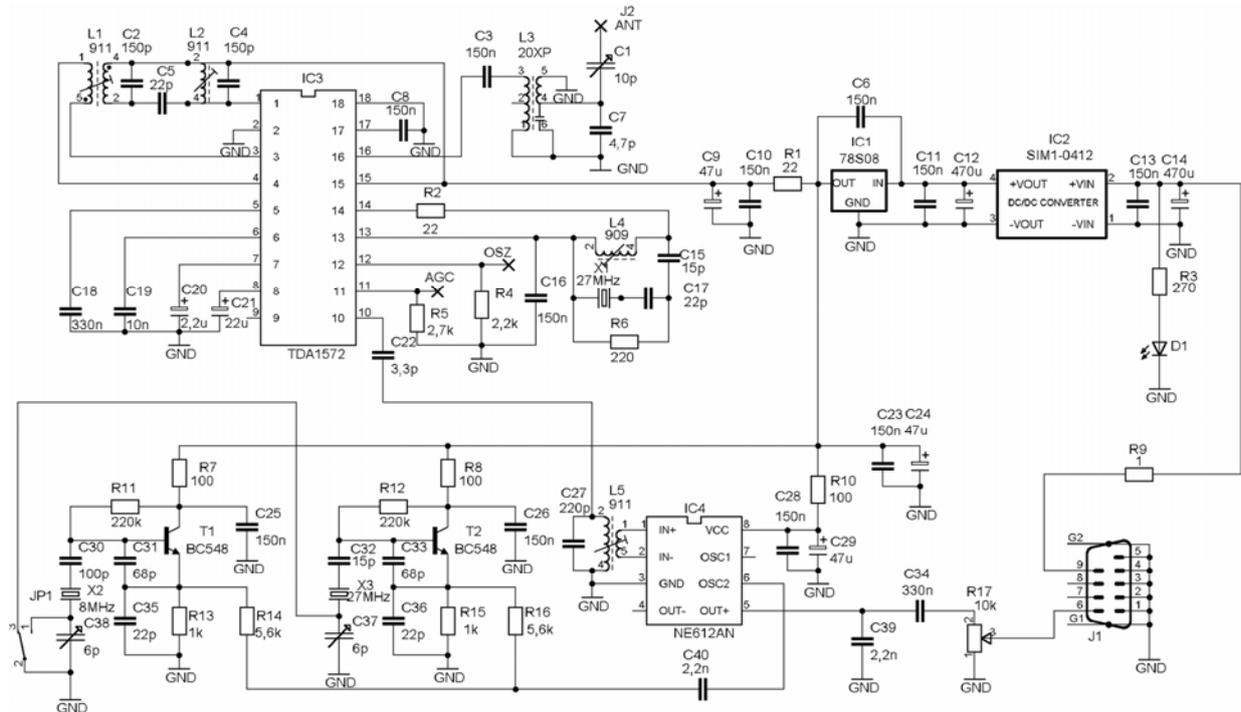


Abb. 31: Schaltbild des DRM-Front-Ends

Die aus IC3 entnommene Zwischenfrequenz gelangt über den Filterkreis L5, C27 auf den symmetrischen Eingang von IC4, in welchem die zweite Umsetzung von 1 MHz auf 12 kHz erfolgt. Die für die Mischung erforderliche Frequenz von 1012 kHz wird durch Überlagerung der Ausgangssignale zweier Quarzoszillatoren (T1 und T2) und deren Mischung am internen Oszillatortransistor in IC4 gebildet. Der 27-MHz-Obertonquarz X3 schwingt aufgrund der Beschriftung ohne Selektionskreis hier auf 9 MHz. In Abhängigkeit von der Stellung des Jumpers JP1 (1 für 26012 kHz und 2 für 26000 kHz) kann die Frequenz eines der beiden Oszillatoren erhöht und damit die Ausgangsfrequenz des Mischers in IC4 auf 12 kHz eingestellt werden. Zur Anpassung des Ausgangspegels an den Mikrofon- oder LINE-Eingang der an J1 angeschlossenen Soundkarte dient R17.

Die Spannungsversorgung des Empfängers erfolgt über die USB-Schnittstelle des PCs, an der +5V zur Verfügung stehen. Da diese Spannung zur Versorgung von IC3 zu gering ist, wird sie im Gleichspannungswandler IC2 auf 12 Volt erhöht und mit IC1 auf 8 Volt stabilisiert.

Ausgehend von dieser Schaltung wurde eine Leiterplatte entworfen und fertigen lassen. Abb. 32 zeigt den Bestückungsplan und ein fertig aufgebautes Gerät. Aus Kostengründen wurden alle Anschlüsse zum PC (USB, 12 kHz-Signal) über eine gemeinsame 9-polige Sub-D-Buchse geführt, für den Antennenanschluss wurde eine Chinch-Buchse verwendet.

Für die Testhörer wurden komplette Bausätze inklusive Leiterplatte, aller Bauteile, Stecker, Kabel und des Metallgehäuses sowie einer ausführlichen Aufbau- und Abgleichanleitung zusammengestellt. Die Gesamtkosten aller benötigten Komponenten betragen 26 € und zu diesem Preis wurden die Bausätze auch an die Interessenten abgegeben. Insgesamt wurden etwa 80 Bausätze abgegeben, darunter viele an Studierende der Fachhochschule, Funkamateure und eine Klasse der Berufsschule in Neumarkt in der Oberpfalz.

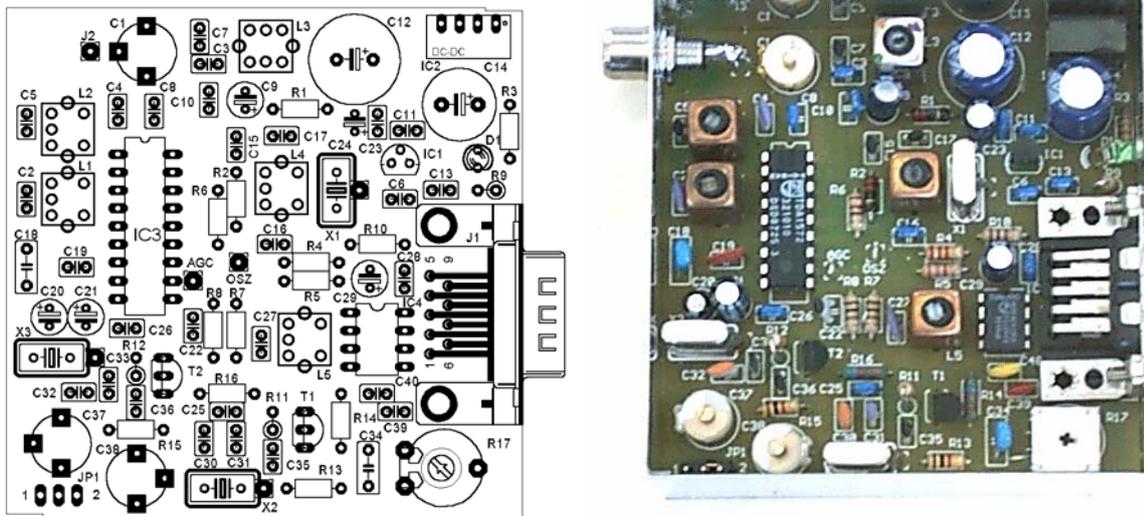


Abb. 32: Bestückungsplan für die Leiterplatte und ein aufbautes Gerät.

Abb. 33 zeigt das Front End in der Metallbox im Betrieb zusammen mit einem Notebook-Computer, auf dem das zur Dekodierung benötigte Software-Radio läuft.

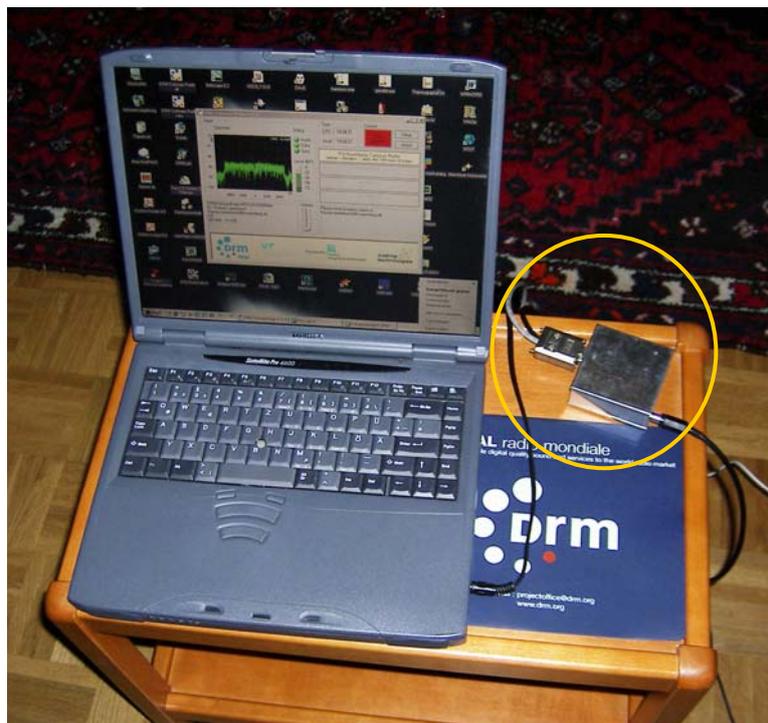


Abb. 33: 26 MHz-Front End (rechts) und DRM Software Radio in Betrieb.

### 3.10 Empfangsantennen für stationären und mobilen Empfang

Für stationären Empfang wurden je nach Entfernung von Sender und je nach Anbringungsmöglichkeiten sowohl kurze Draht- oder Stabantennen als auch Dipolantennen

z.B. auf dem Dachboden, vertikale Antennen usw. verwendet. Teilweise konnten Funkamateure auch auf größere Antennenanlagen zurückgreifen.

Bei mobilen Empfangsversuchen, die insbesondere zur Orientierung bezüglich der Reichweite der Sender durchgeführt wurden, stellte sich heraus, dass normale Autoradioantennen nicht besonders gut geeignet waren, da sie den Frequenzbereich um 26 MHz nicht abdecken.

Für diese Versuchsfahrten wurde deshalb eine verkürzte vertikale Dipolantenne mit Drahtwicklungen auf einem Kunststoffträgerrohr aufgebaut, die an der Dachreling eines Fahrzeugs angebracht werden konnte (Abb. 34). Mit dieser Antenne konnten sehr gute Empfangsergebnisse erzielt werden.

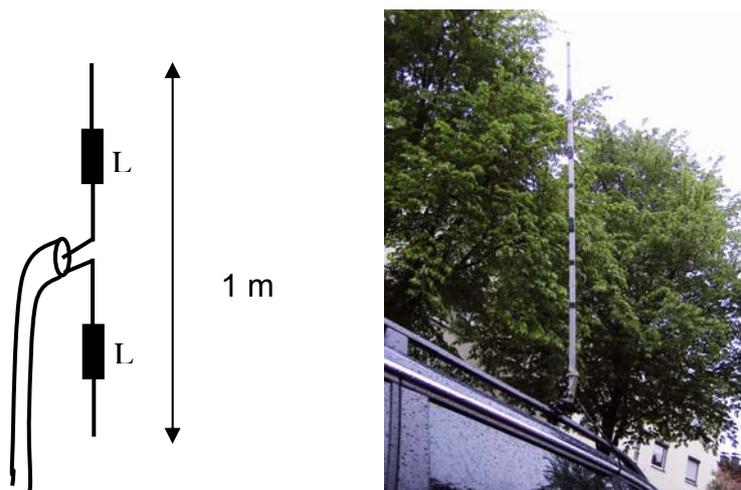


Abb. 34: Verkürzter vertikaler Dipol für 26 MHz – Mobilempfangsversuche.

Beim Mobilempfang war es entscheidend, darauf zu achten, dass alle Geräte so angebracht und verkabelt waren, dass sie den Empfang nicht zusätzlich beeinträchtigt werden. Hierzu wurde der Empfänger auf eine freie Frequenz in der Nähe der Empfangsfrequenz eingestellt. Der Reihe nach wurden die weiteren benötigten Komponenten zugeschaltet, wobei stets überprüft wurde, dass keine zusätzlichen Störungen entstanden. Falls Störungen auftauchen, wurde die Verkabelung bzw. Stromversorgung so umgestellt, dass diese unterhalb eines gewissen Niveaus gehalten werden konnten. Erst wenn alle Komponenten entsprechend störungsarm angebracht und miteinander verbunden waren, wurde der Motor angelassen, um sicherzustellen, dass auch durch die Zündung keine zusätzlichen Störungen entstanden. Es stellte sich heraus, dass störungsarmer Empfang nur möglich war, wenn der Empfänger und der Notebook-Computer vom Fahrzeugnetz unabhängige Stromversorgungen hatten. Außerdem konnten Empfänger und Notebook nicht aus derselben Batterie betrieben werden. Auch ein Spannungswandler für den Betrieb des Notebook-Computers am 12 Volt Bordnetz verursachte erhebliche Störungen, sodass das Notebook schließlich nur mit dem eingebauten Akku beziehungsweise direkt an einer 12 Volt Batterie betrieben werden konnte.

Nach Durchführung dieser Entstörungsmaßnahmen konnten auch noch schwache DRM-Signale empfangen werden, sodass davon auszugehen ist, dass die mit unseren mobilen Messungen erzielten Reichweiten des Senders als Obergrenze für den mobile Empfang anzusehen sind, zumal zu erwarten ist, dass spätere DRM-Autoradios und Autoantennen insgesamt eine schlechtere Empfangsleistung aufweisen werden als der Yaesu – Empfänger mit der speziell konzipierten Antenne und bei sorgfältiger Entstörung.

## 4 Messungen und Ergebnisse

### 4.1 Orientierungsfahrten zur Ermittlung der Reichweite der Sender

Nach Inbetriebnahme der jeweiligen Sender wurden zu einer ersten Orientierung über ihre Reichweite Testfahrten unternommen. Da der Antennenfaktor der in 3.10 beschriebenen Empfangsantenne unbekannt war, wurde der Schwerpunkt auf die Audiowiedergabe gelegt. Dem entsprechend wurde jeweils ermittelt, in welchen Bereichen die Audiorahmen zu 100 Prozent bzw. zu mehr als 75 Prozent richtig dekodiert werden konnten, sowie die Bereiche, in denen dies zwischen 50 und 75 Prozent bzw. unter 50 Prozent der Fall war.

Die Ergebnisse dieser Orientierungsfahrten sowohl in Nürnberg als auch im Raum Dillberg/Neumarkt in der Oberpfalz sind auf Karten bzw. Stadtplänen dargestellt, in denen die abgefahrenen Strecken farblich gekennzeichnet sind: grün: mehr als 75 Prozent der Audiorahmen korrekt dekodiert; Gelb: zwischen 74 und 50 Prozent der Audiorahmen korrekt dekodiert; rot: kein Empfang beziehungsweise weniger als 49 Prozent der Rahmen korrekt dekodiert.

Die Ergebnisse im Stadtgebiet Nürnberg, in der Umgebung des Dillbergs und im Stadtgebiet Neumarkt in der Oberpfalz zeigen die Abbildungen 35 bis 37.

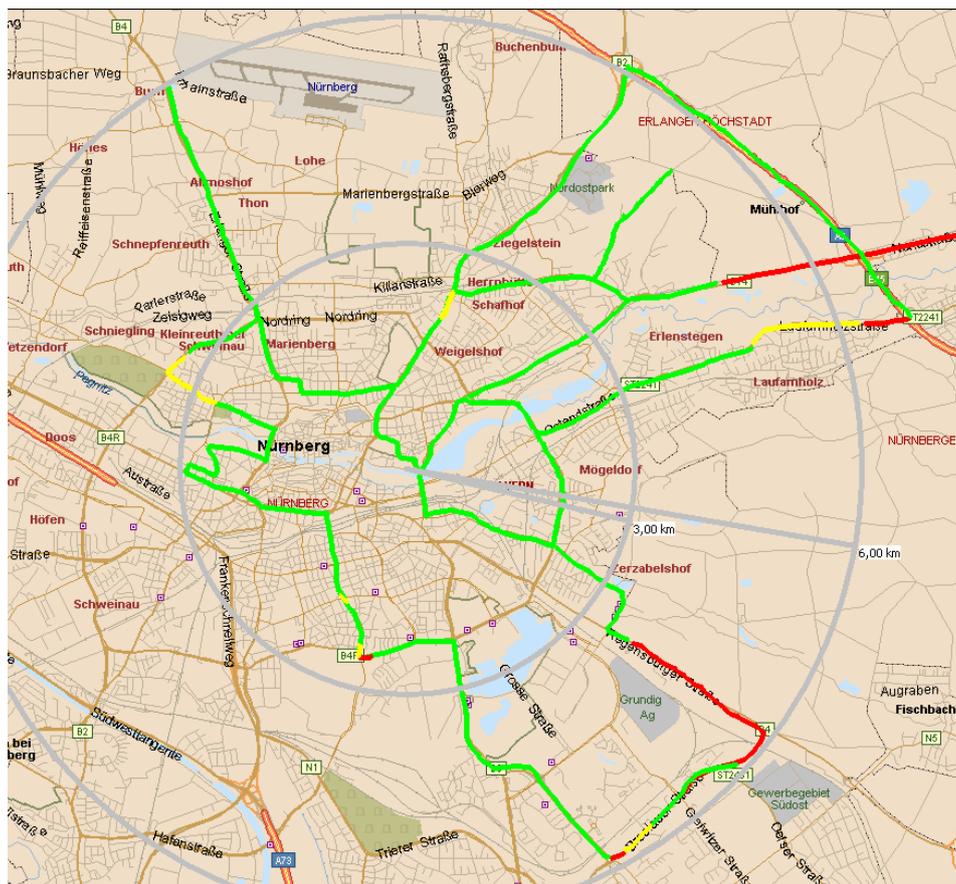


Abb. 35: Ergebnis der Orientierungsfahrt zum Empfang im Stadtgebiet Nürnberg, siehe Text.

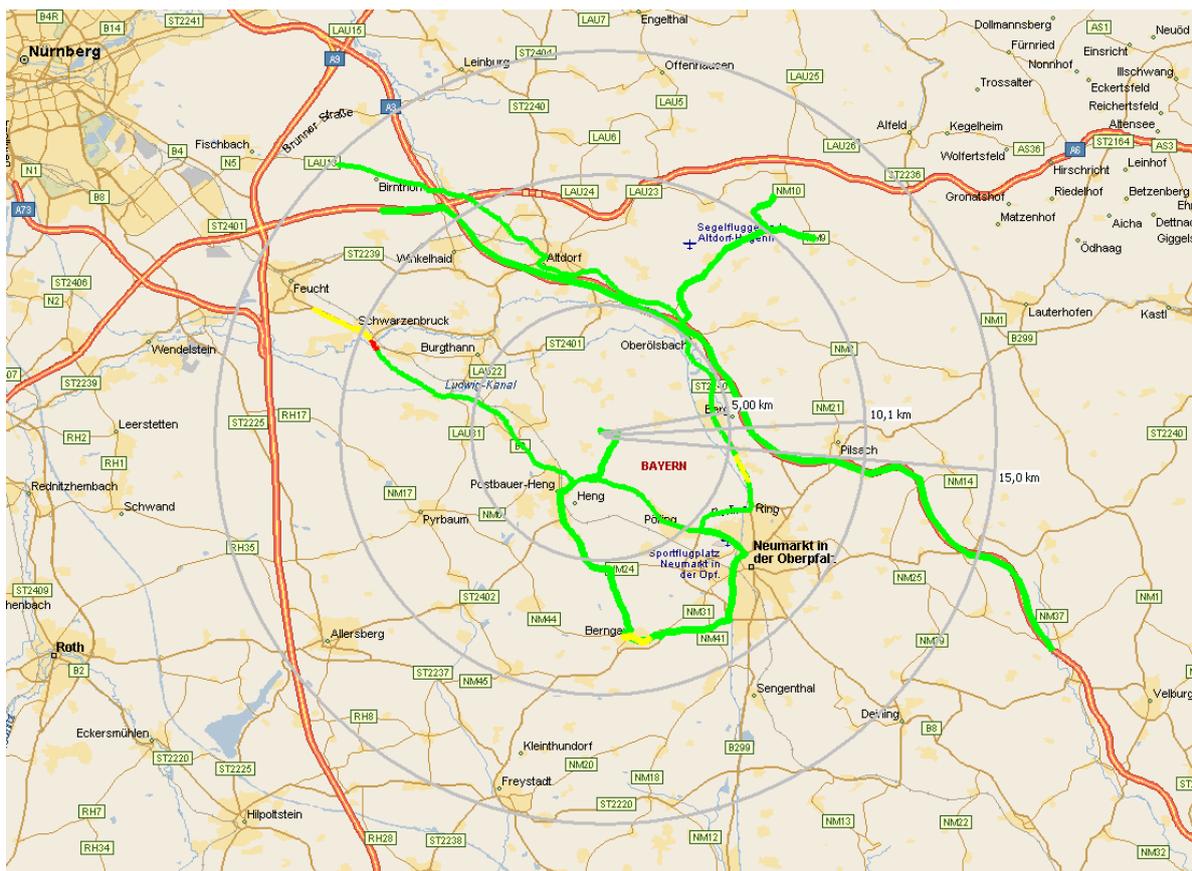


Abb. 36: Ergebnis der Orientierungsfahrt zum Empfang in der Umgebung des Dillberg, siehe Text.

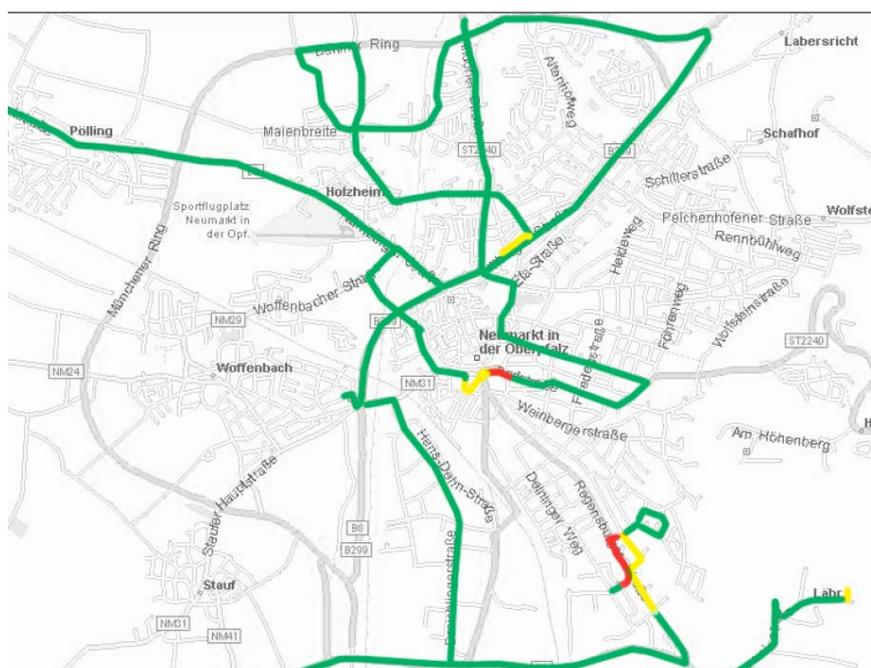


Abb. 37: Ergebnis der Orientierungsfahrt zum Empfang im Stadtgebiet Neumarkt in der Opf., siehe Text.

Die Orientierungsfahrten ergaben, dass in einem Umkreis von etwa drei Kilometern um den 10 Watt-Sender auf der Fachhochschule mobiler Empfang ohne größere Unterbrechungen möglich war. In günstigen Ausbreitungsrichtungen wurden sogar mobile Reichweiten von bis zu sechs Kilometern erreicht, allerdings ist bei Entfernungen von mehr als etwa drei Kilometern zum Sender kein lückenloser Empfang mehr gegeben.

Bedingt durch die höhere Sendeleistung und die Topografie rund um den Dillberg konnte hier eine erheblich größere Reichweite erzielt werden.

Das lückenlose Versorgungsgebiet hat hier einen Radius von etwas mehr als zehn Kilometern, auch die vom Dillberg acht Kilometer entfernte Stadt Neumarkt in der Oberpfalz war bis auf kleine Lücken gut versorgt, obwohl keine direkte Sichtverbindung zum Sender gegeben ist.

Die Herren Widdau und Held von der Deutschen Welle führten am 5./6.Juni 2004 ebenfalls mobile Messungen im Stadtgebiet Nürnberg und im Gebiet um den Dillberg durch<sup>14</sup>. Als Antenne wurde eine kurze vertikale Aktivantenne verwendet (Rohde & Schwarz HE010), als Empfänger ein Rohde & Schwarz EB 200 – Messempfänger. Dadurch konnten neben den Audiodaten auch Feldstärke Messwerte gewonnen werden. Die Ergebnisse für das Stadtgebiet Nürnberg (Abb. 38) stimmen im Wesentlichen mit den eigenen Messungen überein.



Abb. 38: Ergebnisse von Testfahrten der Herren Widdau und Held, Deutsche Welle, im Stadtgebiet Nürnberg. Grün: 100% Audio-Empfang, weiß: kein Empfang. (Deutsche Welle).

Abb. 39 zeigt die gemessenen Feldstärken längs der befahrenen Strecken.

<sup>14</sup> Stefan Widdau, Frank Held, Deutsche Welle, Testbericht vom Juni 2004, diesem Bericht sind auch die Abbildungen 38 – 42 entnommen.

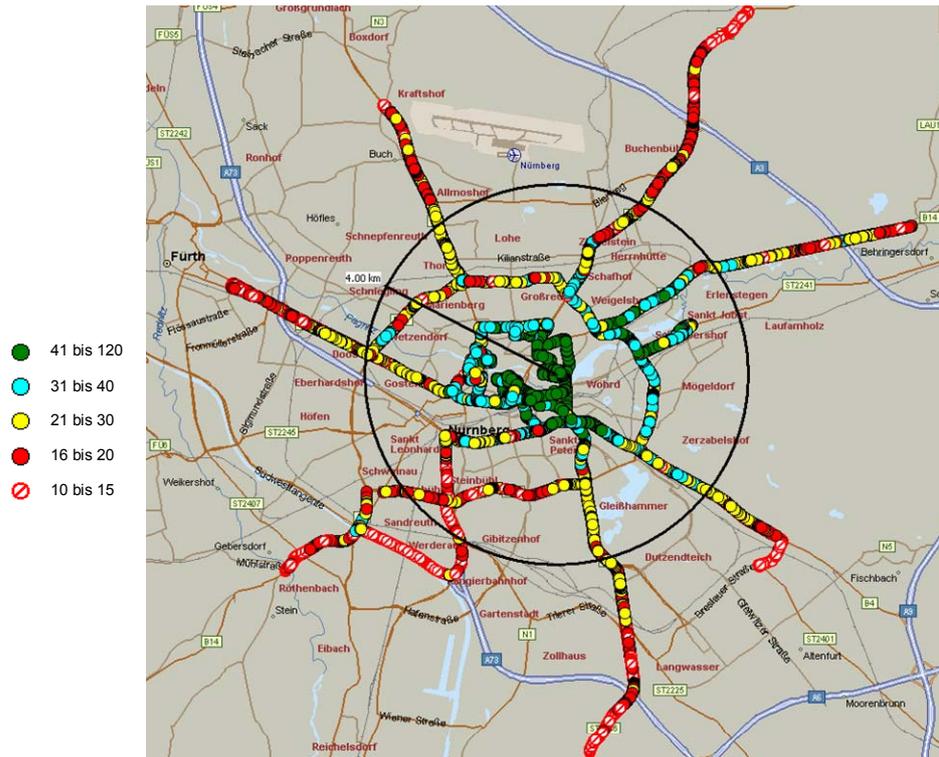


Abb. 39: Gemessene Empfangsfeldstärken im Stadtgebiet Nürnberg. Die Messwerte in dB bezogen auf  $1 \mu\text{V}/\text{m}$  sind farbig kodiert. (Deutsche Welle).

Auch im Gebiet um den Dillberg wurden Messungen von der Deutschen Welle durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen die Abbildungen 40 und 41. Auch hier konnten die eigenen Messungen im Wesentlichen bestätigt werden.

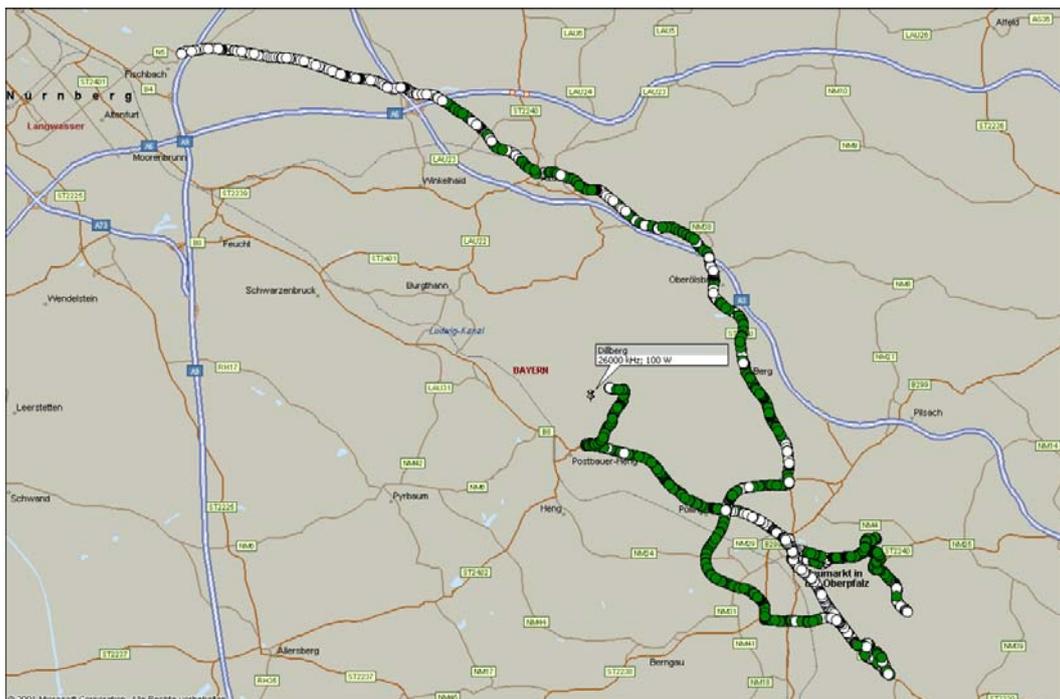


Abb. 40: Ergebnisse von Testfahrten in der Umgebung des Dillberg.. Grün: 100% Audio-Empfang, weiß: kein Empfang. (Deutsche Welle).

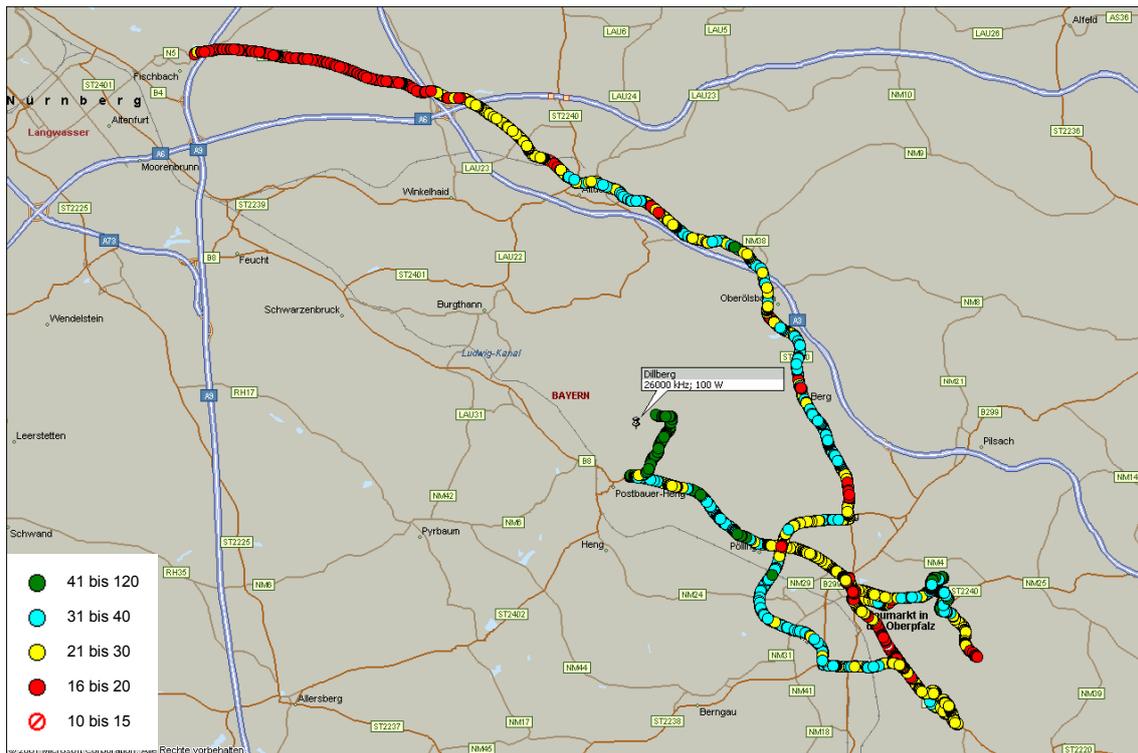


Abb. 41: Gemessene Empfangsfeldstärken im Gebiet um den Dillberg und im Stadtgebiet Neumarkt. Die Messwerte in dB bezogen auf  $1 \mu\text{V}/\text{m}$  sind farbig kodiert. (Deutsche Welle).

Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Messungen im Gebiet des Dillberg zu einem Zeitpunkt durchgeführt wurden, an dem die Senderantenne nicht-resonant mit der breitbandigen Anpassung betrieben wurden, also vor dem Ersatz durch die Fuchs-Anpassungen. Aus heutiger Sicht ist daher zu erwarten, dass die Feldstärken in diesem Gebiet dank der angepassten Antenne um bis zu etwa 10 dB höher liegen. Die neueren Messungen zeigen auch eine erheblich größere Reichweite des Senders (vgl. Abb. 36 und 40).

Aus den Messungen der Deutschen Welle wurde auch der Zusammenhang zwischen der erforderlichen Empfangsfeldstärke für Audioempfang ermittelt.

Aus den grafischen Darstellungen (Abb. 42) ergaben sich Schwellenwerte von 23 beziehungsweise 26 dB bezogen auf  $1 \mu\text{V}/\text{m}$ .

Es ist zunächst unklar, wodurch diese Diskrepanz von 3 dB entsteht, mögliche Erklärungen dafür sind, dass die Sender unterschiedliche Restbitfehlerraten erzeugen (auf Grund unterschiedlich starker Aussteuerung und damit unterschiedlich starken Intermodulationsprodukten innerhalb der Nutzbandbreite). Außerdem lagen auf Grund der städtischen beziehungsweise ländlichen Umgebung unterschiedliche Empfangsbedingungen vor, insbesondere unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten. Der Mobil-Empfang ist vermutlich auch die Erklärung dafür, dass insgesamt höhere Feldstärken erforderlich waren, als es den Planungsparametern der ITU Empfehlung Rec. ITU-R BS.1615 entspricht, in der eine Mindestfeldstärke von  $17,6 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  angegeben sind.

**Campus Radio FH: 23 dB $\mu$ V/m      Campus Radio Dillberg: 26 dB $\mu$ V/m**

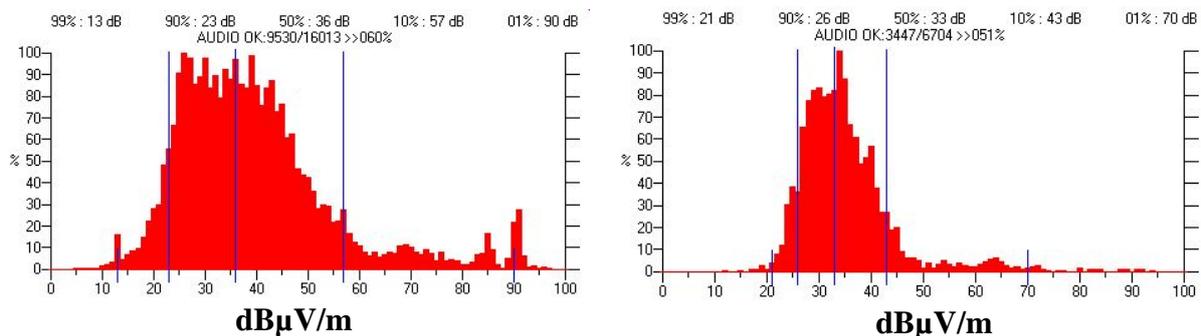


Abb. 42: Aus den Messungen abgeleiteter Zusammenhang zwischen Empfangsfeldstärke und Audioqualität. Angegeben ist der Schwellenwert für 60% korrekt dekodierte Audiorahmen (Deutsche Welle).

## 4.2 Untersuchungen zum stationären Empfang

### 4.2.1 Einzelmessungen in Nürnberg–Altenfurt

Seit Beginn der Sendungen im März 2003 wurden immer wieder während kürzerer und längere Zeitintervalle stationäre Empfangsbeobachtungen durchgeführt. Hierbei kamen sowohl die eigenentwickelten Empfänger Front-Ends als auch der Yaesu – Empfänger zum Einsatz. Als Empfangsstandort bot sich zunächst die Wohnung des Verfassers in Nürnberg–Altenfurt, mit 8 Kilometer Abstand zum Sender Nürnberg und 18 km Abstand zum Sender Dillberg an. Auf dem Dachboden eines zweistöckigen Wohnhauses wurde etwa 13 Meter über dem Straßenniveau eine Draht-Halbwelldipolantenne und zeitweise auch die verkürzte Vertikaldipolantenne wie in 3.10 beschrieben angebracht, die über ein ca. 10 Meter langes Koaxialkabel RG 213 mit dem jeweiligen Empfänger verbunden wurde. Der Empfang wurde auf einem Notebook PC mit dem DRM-Softwareradio vorgenommenen.

Während dieser Messungen konnten bereits eine Reihe von Hinweisen auf Empfangsprobleme und deren Ursache gewonnen werden. Dazu gehören insbesondere:

- Störungen durch andere Sender, die auf derselben Frequenz betrieben werden, infolge ionosphärischer Fernausbreitung der Raumwelle,
- Störungen durch andere Sender, infolge Raumwellenausbreitung über sporadische E-Schicht,
- Störungen durch Haushaltsgeräte und andere elektrische Einrichtungen.

Zu diesen Erscheinungen sind im Folgenden einige typische Ergebnisse angegeben.

#### 4.2.1.1 Störungen durch ionosphärische Fernausbreitung (F-Schicht)

Es wurde wiederholt beobachtet, dass insbesondere während der Wintermonate 2003 / 2004 Störungen des Empfangs über längere Zeit hinweg, insbesondere während des Tages, auftraten. Ein typisches Beispiel zeigt Abbildung 43.

Während diese Störungen auftraten, zeigte sich in der Spektrums-Anzeige des DRM-Softwareradios (Abb. 44), dass ein Störsignal bei 26015 kHz auftrat. Mit einem FM-Empfänger konnte dieses Störsignal als ein Sprechfunk-Signal in einer osteuropäischen Sprache identifiziert werden. Es handelte sich also vermutlich um ein Signal aus 1000 – 2000

Kilometer Entfernung, wobei zu vermuten ist, dass es von einem Sprechfunk-Netz ausgeht, das mit vergleichsweise geringer Sendeleistung und einfachen Antennen arbeitet, ähnlich dem CB-Funk.

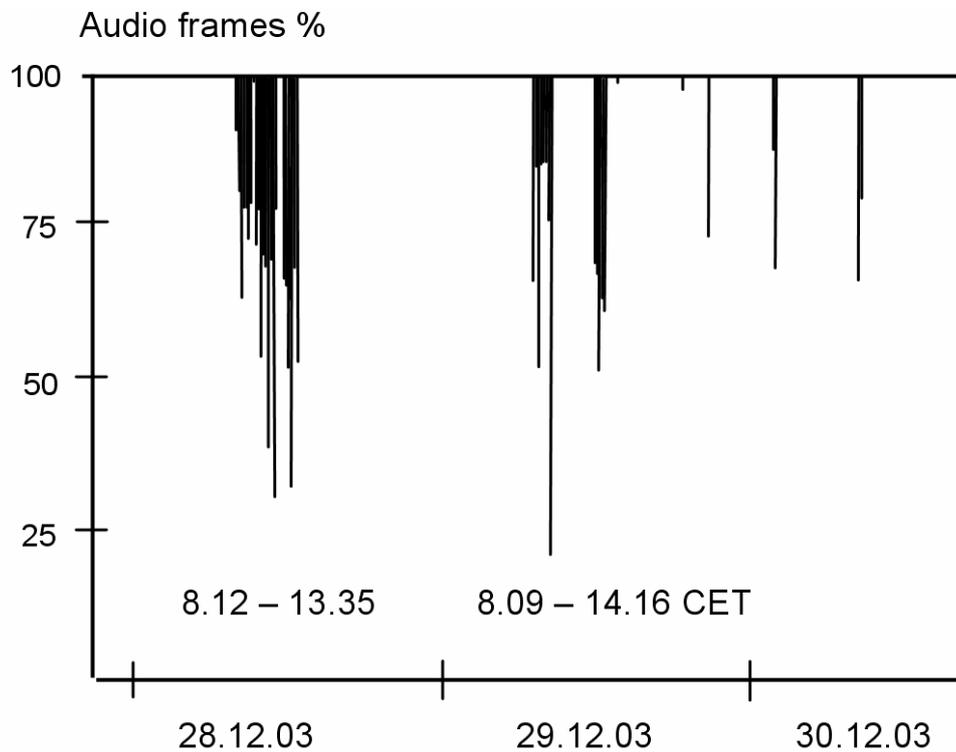


Abb. 43: Prozentsatz der korrekt empfangenen Audio-Rahmen pro Minute während dreier Tage im Dezember 2003. Frequenz: 26012 kHz, Empfangsort Nürnberg-Altenufurt. Entfernung zum Sender: 8 km.

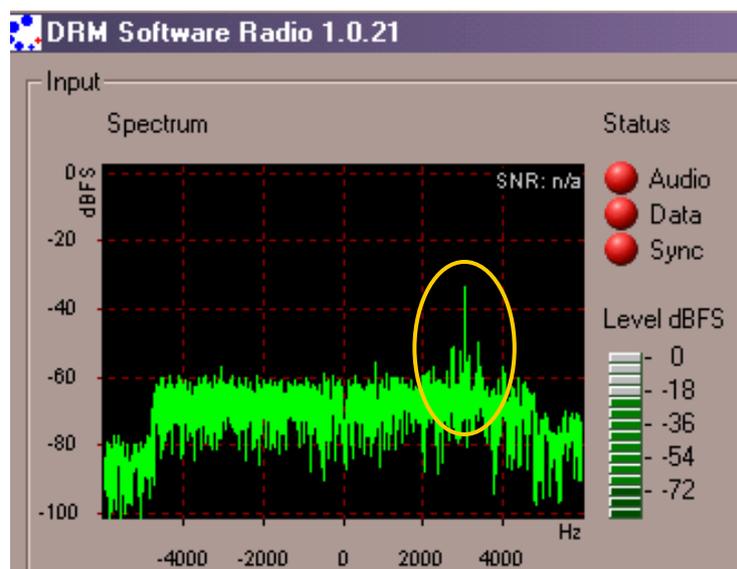


Abb. 44: DRM-Empfangssignal bei 26012 kHz und FM-Sprechfunk-Störsignal bei 26015 kHz.

#### 4.2.1.2 Störungen durch die Ausbreitung über sporadische E-Schicht

Diese Ausbreitungsart ist dadurch gekennzeichnet, dass während der Tagesstunden in den Sommermonaten (Mai bis Juli) sporadisch eine Reflexion der Kurzwellen von der ionosphärischen E-Schicht möglich ist.

Einen typischen Verlauf der Störungen durch Fernausbreitung infolge sporadischer E-Schicht, zeigt Abb. 45.

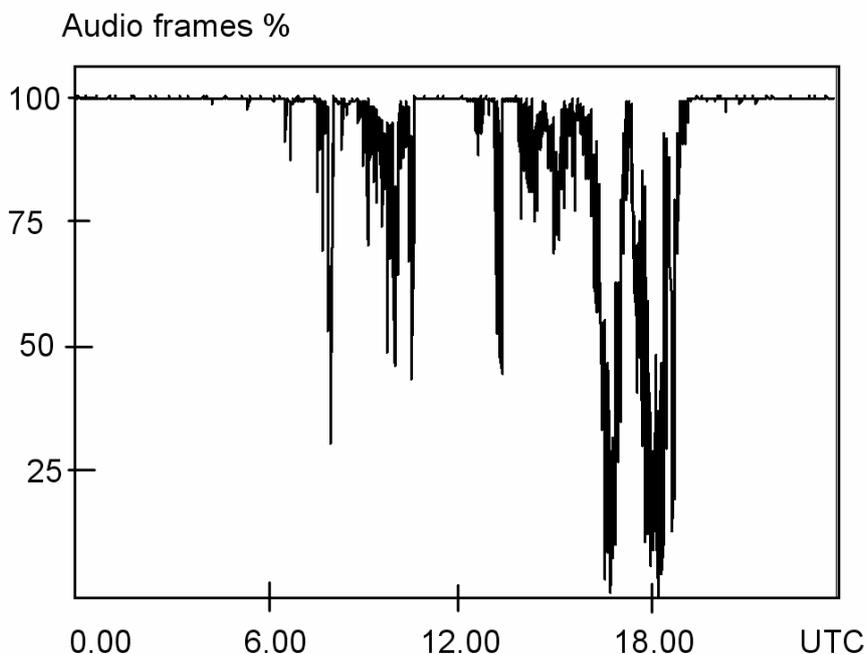


Abb. 45: Prozentsatz der korrekt empfangenen Audio-Rahmen pro Minute am 25.5.2003.  
Frequenz: 26012 kHz, Empfangsort Nürnberg-Altenfurt. Entfernung zum Sender: 8 km.

#### 4.2.1.3 Störungen durch Haushaltsgeräte etc.

Gelegentlich wurde beobachtet, dass, ohne dass Störungen im Signalspektrum erkennbar gewesen wären, der von der Dekodier-Software angezeigte Signal/Rausch-Abstand des Empfangssignals sich schlagartig verschlechterte und nach einiger Zeit sich auch schlagartig wieder verbesserte. Solche Ereignisse deuten darauf hin, dass ein elektrisches Gerät, das einen entsprechenden Störpegel erzeugt, ein- und wieder ausgeschaltet wurde (Abb. 46).

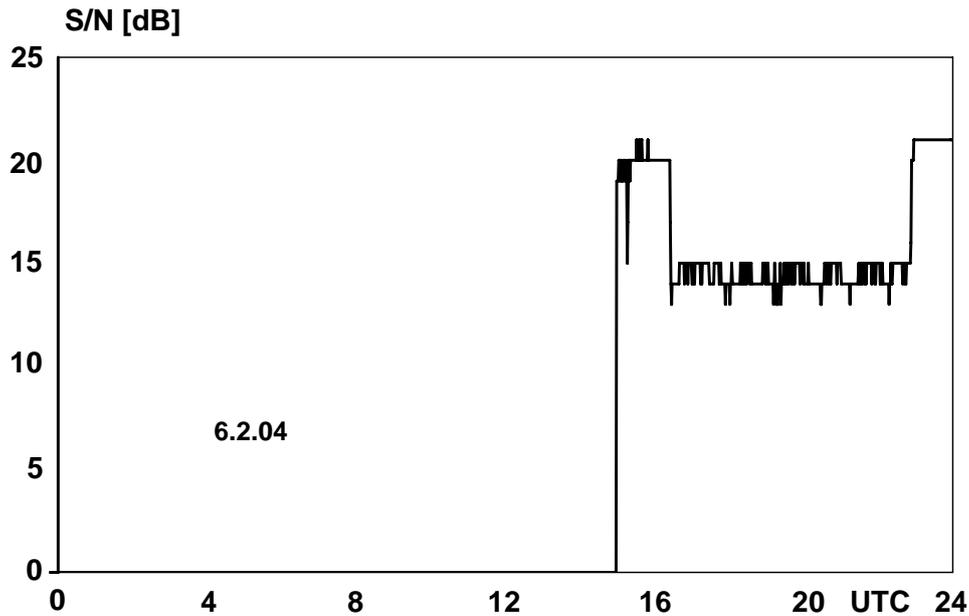


Abb. 46: Signal–Rausch Abstand des empfangenen Signals am Abend des 6.2.2004.  
Frequenz: 26012 kHz, Empfangsort Nürnberg–Altenfurt. Entfernung zum Sender: 8 km.

Wie in den Einzelmessungen beobachteten Effekte wurden in einer Anzahl von Messkampagnen weiter untersucht, um einschätzen zu können, ob es sich um seltene Einzelereignisse oder um häufiger auftretende Phänomene handelt.

#### 4.2.1.4 Messkampagnen im Frühjahr 2004

in der Zeit von Januar bis Mai 2004 wurden eine Reihe von Messkampagnen durchgeführt, bei denen die Testhörer jeweils gebeten wurden, ihre Empfänger über ein Wochenende in Betrieb zu halten und die Daten zur Auswertung an die FH zu übermitteln. An diesen Tests beteiligten sich mehrere Studierende und einige Funkamateure. Die Durchführung und Auswertung erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit<sup>15</sup>.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Messkampagnen.

Tabelle 5: Messkampagnen Januar bis Mai 2004

Messkampagne	Sender
09.-11. Januar 2004	GSO-FH
27.-29. Februar 2004	Dillberg
27.-29. Februar 2004	GSO-FH
19.-21. März 2004	Dillberg
19.-21. März 2004	GSO-FH
14.-16. Mai 2004	Dillberg
14.-16. Mai 2004	GSO-FH

<sup>15</sup> Konrad Blomeier, Untersuchung zur digitalen Lokalrundfunkversorgung mit Sendern kleiner Leistung im Kurzwellenbereich, Diplomarbeit, Georg–Simon–Ohm–Fachhochschule Nürnberg, Juni 2004

Die Zielsetzung dieser Messkampagnen war es insbesondere, durch Vergleich der Ergebnisse von verschiedenen Empfängerstandorten zwischen lokalen Störquellen und Störungen durch aus größerer Entfernung einfallende Störsignale unterscheiden zu können. Außerdem sollte ab der geschätzt werden, wie verlässlich der DRM-Empfang im 26 MHz Bereich insgesamt ist, das heißt, für welchen Prozentsatz der Zeit das Empfangssignal bei den verschiedenen Empfängern verfügbar war.

Einige exemplarische Ergebnisse dieser Messkampagnen werden im Folgenden dargestellt.

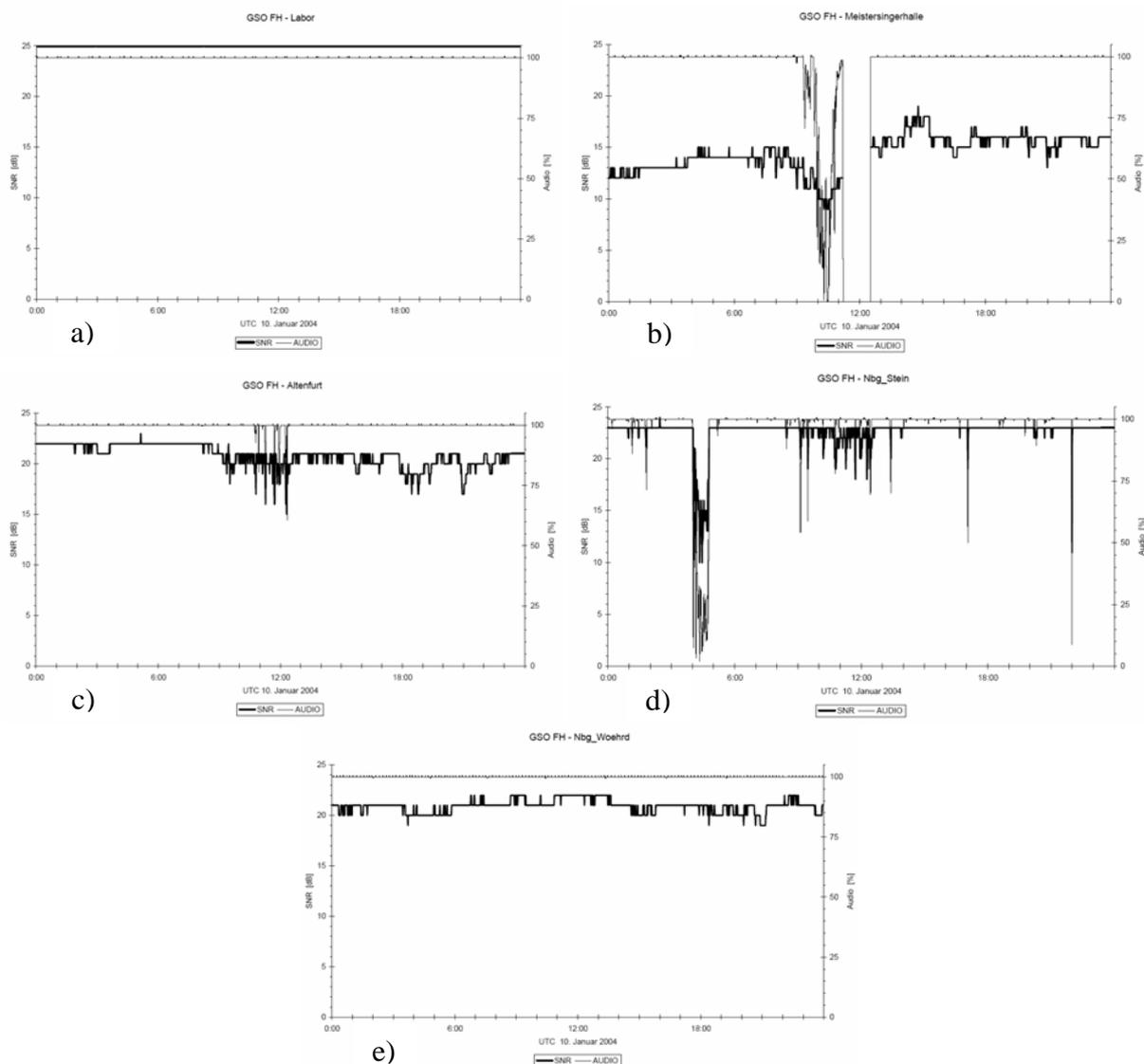


Abb. 47: Ergebnisse der Empfangsbeobachtungen an fünf Standorten am 10. Januar 2004, Sender Nürnberg, 26012 kHz

Die in Abb. 47 dargestellten Ergebnisse lassen erkennen, dass die Empfangsqualität in einigem Abstand vom Sender lokal sehr verschieden ist. Abb. 47 a) zeigt das Protokoll des Empfängers im Hochfrequenztechnik-Labor der FH, in ca. 200 Meter Entfernung vom Sender. Hier war der Signal- zu Rauschabstand konstant bei 25 dB, 100 Prozent der Audiodaten konnten dekodiert werden. Diese Messung diente als Referenz, um sicher zu sein, dass der Sender während der gesamten Messkampagnen in einwandfreiem Betriebszustand war.

Ein ähnliches Resultat zeigte die Messung am Empfängerstandort Wöhrd (Abb. 47 e), ebenfalls im Abstand von nur wenigen 100 Metern zum Sender. Die Daten der anderen Empfangsorte (in der Nähe der Meistersingerhalle, ca. 1,5 Kilometer Abstand zum Sender, Abb. 47 b; Altenfurt, ca. 8 Kilometer Abstand zum Sender, Abb. 47 c, Stein, ca. 8 Kilometer Abstand zum Sender, Abb. 47 d) zeigen einheitlich Störungen zwischen etwa 9 und 13 Uhr UTC, von denen daher anzunehmen ist, dass sie durch ein über ionosphärische Ausbreitung in das Empfangsgebiet gelangtes Störsignal hervorgerufen wurden, wahrscheinlich durch das FM-Sprechfunksignal (Abb. 44). Offensichtlich war dieses Störsignal allerdings so schwach, dass es in unmittelbarer Nähe des Senders den Empfang nicht beeinträchtigte, sondern nur bei den Empfangsstationen, die weiter entfernt waren. Insbesondere in Stein trat zwischen 4 und 5 Uhr UTC eine starke Störung auf, die jedoch an den anderen Empfängerstandorten nicht beobachtet wurde. Dies deutet auf eine lokale Störquelle als Ursache hin.

Ähnliche Ergebnisse sind bei der Auswertung der Messkampagne vom Mai 2004 zu erkennen, bei der gleichzeitig Empfänger im Bereich des Senders Dillberg und des Senders Nürnberg betrieben wurde und weitere Empfängerstandorte hinzugekommen waren. Im Bereich des Senders Nürnberg ist ein zweiter Empfängerstandort in Wöhrd (Abstand zum Sender einige 100 Meter) hinzugekommen.

Die neu hinzugekommenen Empfangsorte im Bereich des Senders Dillberg sind Berg (Abstand zum Sender ca. 4 Kilometer), Riebling (Abstand zum Sender ebenfalls ca. 4 Kilometer) und Stauf (Abstand zum Sender ca. 7,5 km).

Abb. 48 zeigt die gleichzeitigen Empfangsergebnisse im Bereich des Senders Nürnberg und des Senders Dillberg.

Im Bereich Nürnberg ist auffällig, dass bei dem einen Empfänger in Wöhrd zwischen etwa 8 und 10 Uhr UTC starke Störungen auftraten (Abb. 48 c), die jedoch bei dem nur wenige hundert Meter entfernten zweiten Empfänger in Wöhrd und an den anderen Nürnberger Empfängerstandorten (Abb. 48 a, b, d) nicht zu beobachten waren. Auch die am Empfängerstandort Meistersingerhalle (Abb. 48 a) beobachtete Störung kurz nach 10 Uhr UTC trat an den anderen Empfängerstandorten nicht auf.

Ähnlich verhält es sich im Bereich des Senders Dillberg: die Störungsmuster an den drei Empfängerstandorten sehen sehr unterschiedlich aus, es sind kaum Korrelationen erkennbar. Insbesondere ist auffällig, dass die Störungen nicht unbedingt an dem am weitesten vom Sender entfernten Empfängerstandort auftreten, sondern durchaus auch dort, wo ein starkes Empfangssignal vorhanden ist.

Auch diese Ergebnisse stützen den Eindruck, dass hauptsächlich lokale Störquellen für gelegentlich auftretende Empfangsprobleme verantwortlich sind.

Im Rahmen der Messkampagnen im Frühjahr 2004 wurden an insgesamt elf Tagen an bis zu sieben Empfängerstandorten kontinuierlich Empfangsdaten aufgezeichnet. Tabelle 6 zeigt die Zusammenstellung der Verfügbarkeit des Audiosignals von den jeweiligen Sendern an diesen Standorten. Insgesamt lagen Aufzeichnungen mit einer Dauer von 1434 Stunden vor. Während 1004 Stunden war das Audiosignal zu 100 Prozent verfügbar, während der restlichen Zeit im Mittel zu 96,2%. Dies ergibt eine Verfügbarkeit über den gesamten Zeitraum und an allen Standorten von 99,2%. Der Empfang ist nur während der Tagesstunden gestört, nachts wurden fast immer 100% der Audiodaten korrekt empfangen.

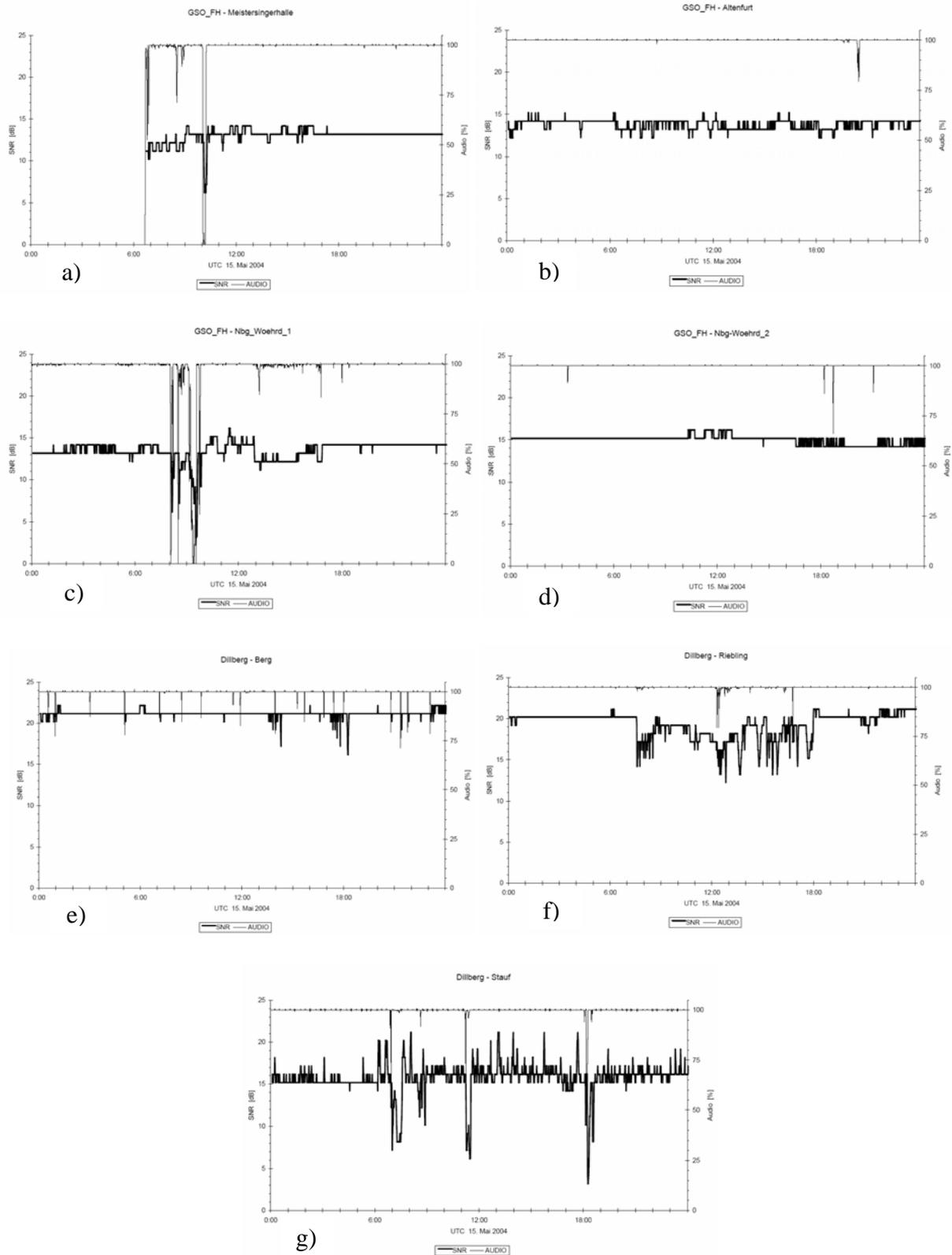


Abb. 48: Ergebnisse der Empfangsbeobachtungen an sieben Standorten am 15. Mai 2004, a–d: Sender Nürnberg, 26012 kHz, e–g: Sender Dillberg 26000 kHz

Tabelle 6: Zusammenstellung der Verfügbarkeit des Audiosignals während der Messkampagnen

## Sender Nürnberg

Datum	Uhrzeit	Altenfurt	M.halle	N.-Stein	N.-Wöhrd
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
10.01.04	0 - 6	100	100	90	100
	6 - 12	100	87	99	100
	12 - 18	100	100	100	100
	18 - 24	100	100	100	100
11.01.04	0 - 6	100	100	98	100
	6 - 12	100	99	99	100
	12 - 18	100	100	99	100
	18 - 24	94	100	100	100

## Sender Dillberg

Datum	Uhrzeit	Altenfurt	N.-Stein	N.-Wöhrd 1	N.-Wöhrd 2
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
27.02.04	0 - 6	100	—	100	—
	6 - 12	99	—	100	—
	12 - 18	99	100	100	—
	18 - 24	99	100	100	100
28.02.04	0 - 6	100	100	100	100
	6 - 12	99	100	97	100
	12 - 18	100	100	100	100
	18 - 24	100	100	100	100
29.02.04	0 - 6	100	100	—	100
	6 - 12	100	100	100	100
	12 - 18	100	100	98	100
	18 - 24	95	100	100	100

Datum	Uhrzeit	Berg	Riebling
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]
27.02.04	0 - 6	100	99
	6 - 12	100	98
	12 - 18	95	91
	18 - 24	100	95
28.02.04	0 - 6	100	100
	6 - 12	100	99
	12 - 18	99	99
	18 - 24	100	99
29.02.04	0 - 6	100	99
	6 - 12	100	99
	12 - 18	100	98
	18 - 24	100	97

Datum	Uhrzeit	Altenfurt	M.halle	N.-Wöhrd 1	N.-Wöhrd 2
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
19.03.04	0 - 6	—	100	100	—
	6 - 12	100	100	100	—
	12 - 18	100	100	100	100
	18 - 24	100	96	100	100
20.03.04	0 - 6	100	100	100	100
	6 - 12	99	91	100	100
	12 - 18	100	66	100	100
	18 - 24	100	100	100	100
21.03.04	0 - 6	100	100	100	100
	6 - 12	100	98	100	100
	12 - 18	99	99	99	99
	18 - 24	100	100	100	100

Datum	Uhrzeit	Berg	Riebling	Stauf
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
19.03.04	0 - 6	100	100	—
	6 - 12	99	100	—
	12 - 18	100	91	99
	18 - 24	100	100	100
20.03.04	0 - 6	100	100	100
	6 - 12	100	91	100
	12 - 18	98	93	98
	18 - 24	100	100	100
21.03.04	0 - 6	100	100	—
	6 - 12	100	90	100
	12 - 18	100	99	100
	18 - 24	100	100	100

Datum	Uhrzeit	Altenfurt	M.halle	N.-Wöhrd 1	N.-Wöhrd 2
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
14.05.04	0 - 6	—	—	—	—
	6 - 12	—	—	—	—
	12 - 18	100	—	99	100
	18 - 24	100	—	100	100
15.05.04	0 - 6	100	—	100	100
	6 - 12	100	96	92	100
	12 - 18	100	100	99	100
	18 - 24	100	100	100	100
16.05.04	0 - 6	100	100	100	100
	6 - 12	100	100	100	100
	12 - 18	100	100	100	100
	18 - 24	100	100	100	100

Datum	Uhrzeit	Berg	Riebling	Stauf
	von - bis	Audio [%]	Audio [%]	Audio [%]
14.05.04	0 - 6	—	100	—
	6 - 12	100	100	—
	12 - 18	100	100	—
	18 - 24	100	100	90
15.05.04	0 - 6	100	100	100
	6 - 12	100	100	100
	12 - 18	100	100	100
	18 - 24	100	100	100
16.05.04	0 - 6	100	100	100
	6 - 12	100	100	98
	12 - 18	100	100	99
	18 - 24	100	100	100

#### **4.2.1.5 Messkampagne Dezember 2004 – Januar 2005**

Eine weitere Messkampagne wurde nach der Erneuerung der Anpassung der Senderantenne am Dillberg durchgeführt. Hierfür bot sich die Zeit der Weihnachtsferien 2004/2005 an. Wiederum konnten eine Reihe von Testhörern gewonnen werden.

Die Testhörer wurden im Rahmen dieser Messkampagnen gebeten, die Empfänger vom 22.12.04 bis zum 10.1.05 wenn möglich durchgehend zu betreiben.. Dadurch sollten zufällige Ergebnisse, wie sie bei kürzeren Messkampagnen unvermeidlich sind, ausgeschlossen werden und auch seltenere Ereignisse erfasst werden. Die Zielsetzungen waren gegenüber den Messkampagnen im Frühjahr 2004 praktisch unverändert: es ging darum, herauszufinden, inwieweit systematisch alle Empfänger durch Störungen aus größerer Entfernung betroffen sind bzw. welche Signalverfügbarkeit insgesamt gegeben ist.

Abb. 49 zeigt die Standorte der Empfänger im Abstand von 4 bis etwa 40 Kilometer zum Sender Dillberg. Abb. 50 zeigt die Verfügbarkeit des Audiosignals des Senders Dillberg an verschiedenen Empfängerstandorten im Lauf des 28.12.04. Deutlich ist erkennbar, dass zu bestimmten Zeiten (rot gekennzeichnet) alle Empfängerstandorte gleichzeitig Störungen erkennen lassen, mit Ausnahme von Neumarkt, wo offensichtlich die Empfangsqualität sehr gut war, und Nürnberg–Freyjastraße, wo um diese Zeit kein Empfang möglich war bzw. keine Aufzeichnung vorlag. Solche Korrelationen deuten darauf hin, dass durchaus auch Störungen aus großer Entfernung auftreten. Allerdings ist auch hier wieder deutlich erkennbar, dass der überwiegende Anzahl der Störereignisse nicht korreliert ist und deshalb wohl auf lokale Einflüsse zurückzuführen ist.

Besonders deutlich wird dies am Empfängerstandort Tennenlohe, wo während des gesamten Zeitraums der Messkampagne täglich starke Störungen jeweils von 4 bis 6.30 Uhr UTC und von 15 bis 23 Uhr UTC auftraten. Es könnte sich dabei zum Beispiel um Störungen handeln, die durch Beleuchtungseinrichtungen hervorgerufen werden, die während der entsprechenden Zeit eingeschaltet waren. Allerdings konnte eine direkte Ursache für diese Störungen nicht ermittelt werden.

In ähnlicher Weise wurde nur am Empfänger Standort Nürnberg–Altenfurt beobachtet, dass während mancher Tage das Audiosignal zu praktisch 100 Prozent verfügbar war, es aber an anderen Tagen zu keinem Zeitpunkt zu 100 Prozent zur Verfügung stand, sondern permanent länger andauernde Störungen auftraten (Abb. 51). Auch hier kann nur spekuliert werden, dass dies lokal durch eine entsprechende elektrische Einrichtung, vielleicht ein Fernsehgerät, hervorgerufen wurde. Auch hier gelang es aber nicht, die Quelle diese Störungen ausfindig zu machen.

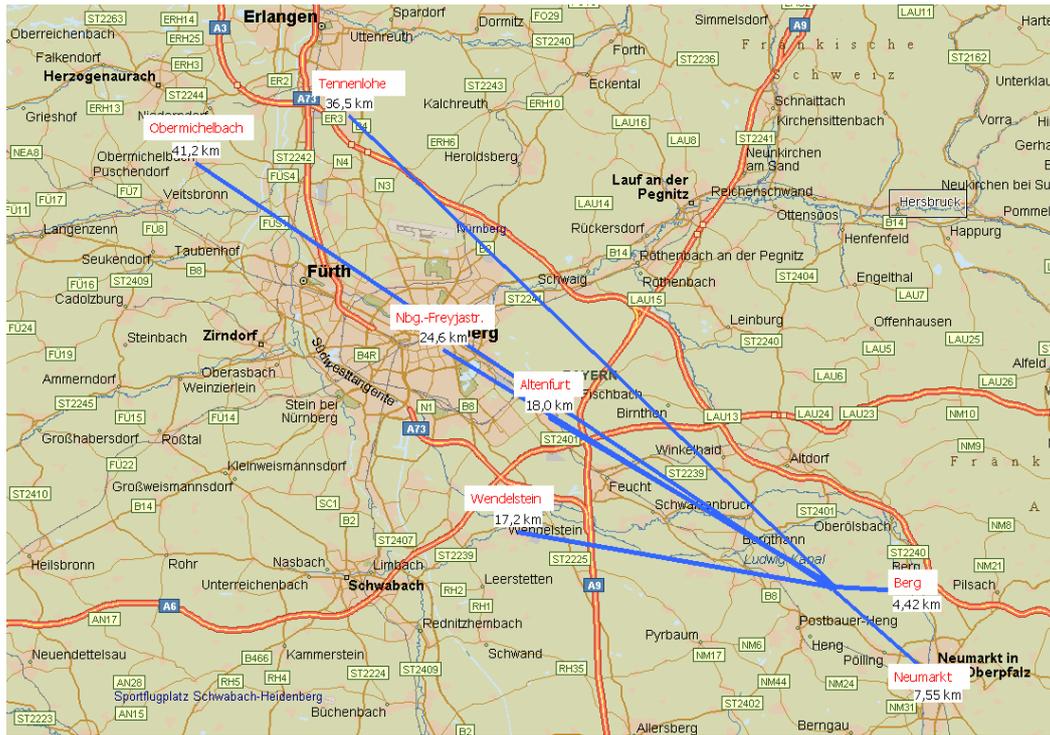


Abb. 49: Empfängerstandorte, an denen das Signal des Senders Dillberg während der Messkampagne empfangen wurde.

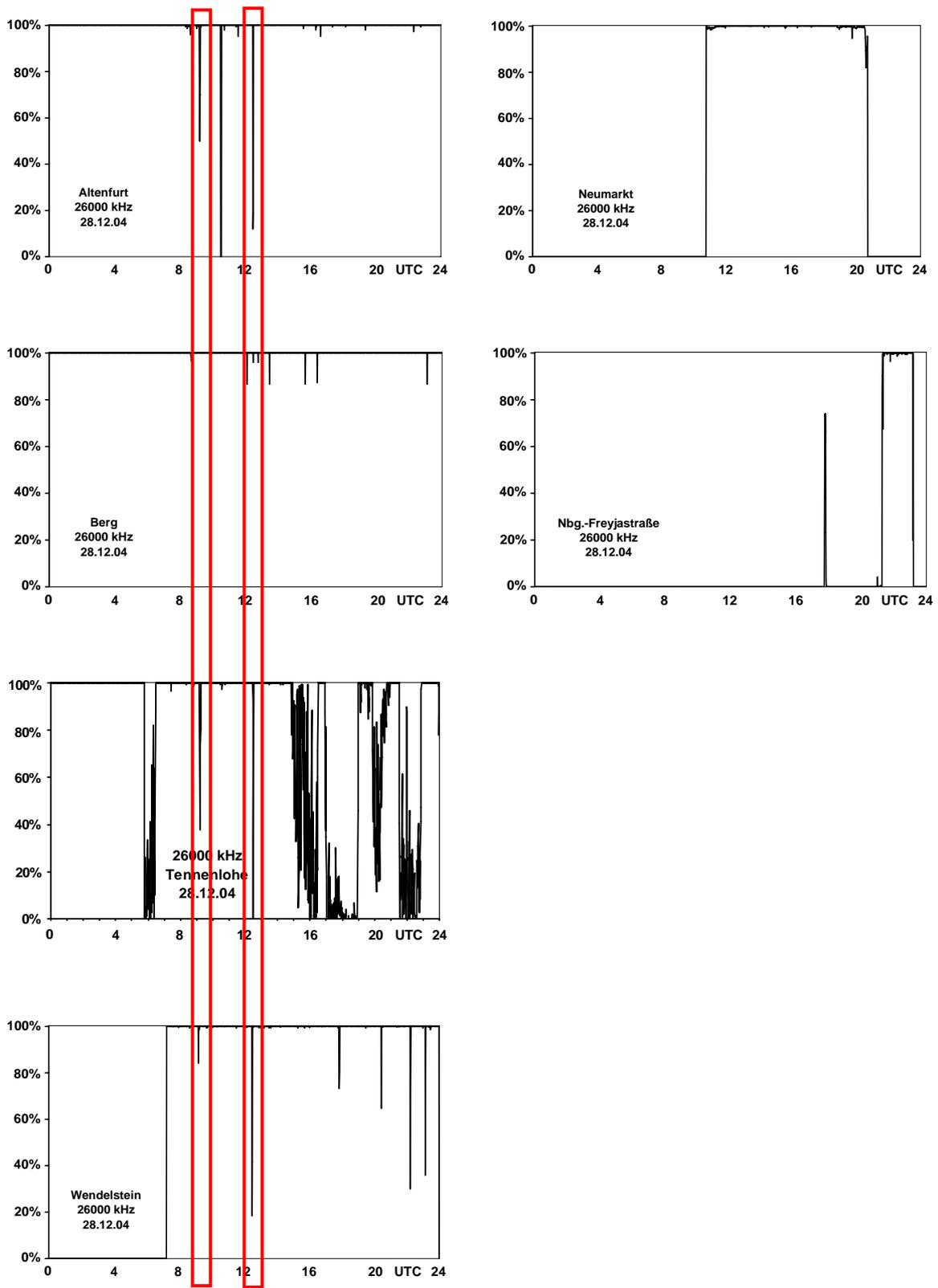


Abb. 50: Audioverfügbarkeit des Signals des Senders Dillberg am 28.12.04 an verschiedenen Empfängerstandorten

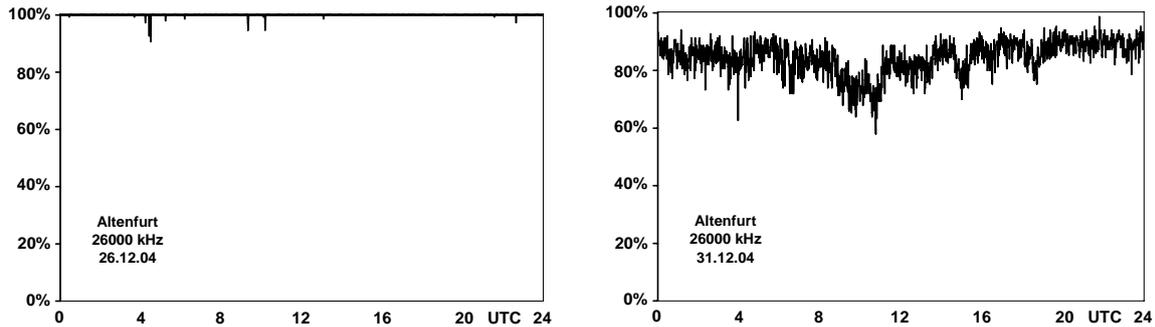


Abb. 51: Audioverfügbarkeit während zweier Tage in Altenfurt

#### 4.2.1.6 Vergleich des Empfangs in städtischer und ländlicher Umgebung

Während einer zweiwöchigen Periode im Mai 2005 wurden zwei Empfänger parallel in Nürnberg–Altenfurt und Pleinfeld–Stirn betrieben (Abb. 52), die beide das Signal des Senders Dillberg empfangen. Diese Messungen sollten dazu dienen, herauszufinden, ob beim Empfang in städtischer und ländliche Umgebung signifikante Unterschiede auftreten würden, bzw. um auch hier wieder während der Periode der sporadischen Geschichten zwischen lokalen und durch seine Ausbreitung verursachten Störungen unterscheiden zu können.

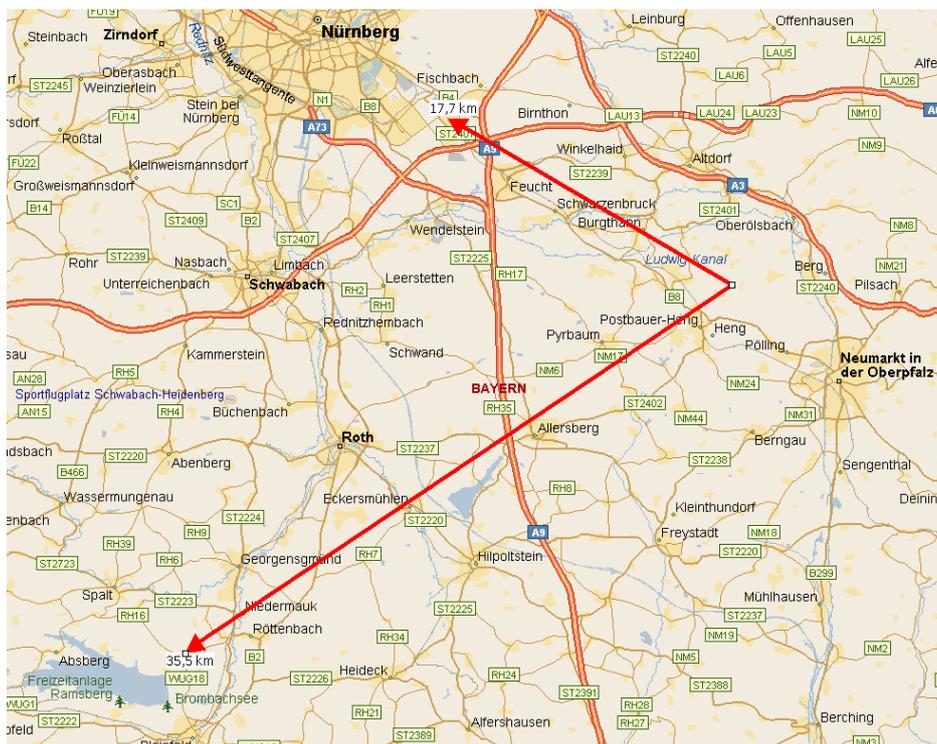


Abb. 52: Empfangsorte für den Vergleich zwischen städtischer und ländliche Empfangsumgebung

Im Rahmen dieser Messkampagne, die in einem Zeitraum stattfand, in dem häufig sporadische E – Schichten auftreten, konnten in größerem Umfang gut korrelierte Störungen an beiden Empfängerstandorten festgestellt werden. Abb. 53 zeigt ein Beispiel dafür.

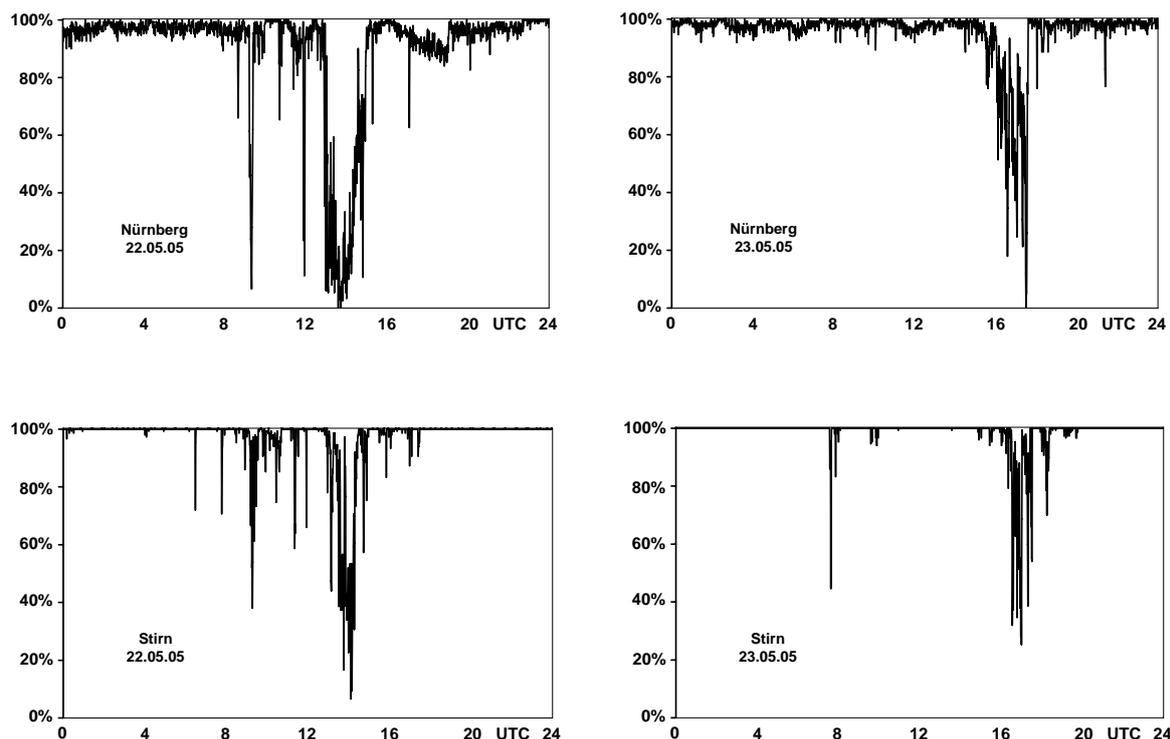


Abb. 53: Audioverfügbarkeit des Signals vom Sender Dillberg während zweier Tage in städtischer und ländlicher Empfangsumgebung.

An diesen Tagen zeigt sich deutlich, dass die Störungen überwiegend an beiden Empfangsorten gleichzeitig aufgetreten sind. Dies deutet darauf hin, dass es sich dabei um Störungen durch Raumwellen-Signale aus größerer Entfernung handelt. Diese Interpretation wird auch dadurch nahe gelegt, dass alle gleichzeitig beobachteten Störungen nur während des Tages auftraten. Abb. 53 lässt auch erkennen, dass sich die Störungen in Nürnberg jeweils etwas stärker bemerkbar machen als in Stirn. Dies liegt offenbar daran, dass der Signalpegel in Stirn mit direkter Sicht zum Sender und einer 6,5m hohen Vertikalantenne stärker war als in Nürnberg.

Wie Abb. 54 erkennen lässt, traten aber auch während dieser Messkampagne unkorrelierte Störungen auf, die jeweils nur einen Empfangsort betrafen. Dabei konnten beide möglichen Effekte, nämlich dass nur der Empfänger in Nürnberg bzw. nur der Empfänger in Stirn gestört war, beobachtet werden.

Inwieweit auch diese Störungen durch ionosphärische Fernausbreitung hervorgerufen wurden, da sie von ihrem zeitlichen Verlauf von ihrer Struktur den in Abb. 53 gezeigten Störungen sehr endlich sind, kann nicht geklärt werden, es könnte zum Beispiel sein, dass die Störungen aus einer bestimmten Richtung einfallen, die am jeweils anderen Empfängerstandort abgeschirmt ist, da die an der ionosphärischen E-Schicht gestreuten Signale unter sehr flachen Einfallswinkeln beim Empfänger auftreffen. Andererseits kommen aber natürlich auch andere Störquellen lokaler Art in Frage, da auch deren Signatur sich nicht wesentlich von den Bildern der Abb. 54 unterscheidet (man vergleiche damit z.B. die Aufzeichnung aus Tennenlohe in Abb. 50).

Abgesehen von diesen Effekten konnte kein signifikanter Unterschied zwischen dem Empfang mit einer Antenne auf dem Dachboden eines Mehrfamilienhauses in einem Vorort von Nürnberg und mit einer Antenne im Garten eines Ferienhauses am Ortsverband eines Dorfes dem fränkischen Seenland festgestellt werden (Abb. 55), abgesehen davon, dass in

Nürnberg die bereits während der Messkampagnen im Dezember 2004/Januar 2005 beobachteten Störungen durch ein Elektrogerät o.ä. zeitweise wieder auftraten (Abb. 54, 55).

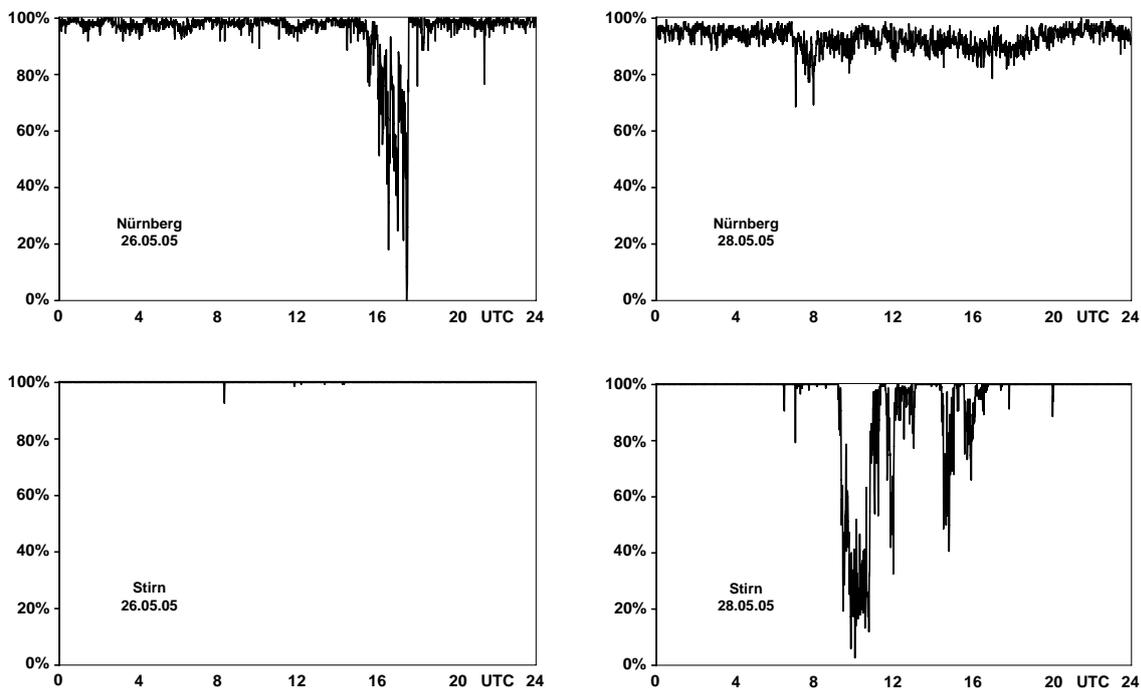


Abb. 54: Audioverfügbarkeit des Signals vom Sender Dillberg während zweier Tage in städtischer und ländlicher Empfangsumgebung.

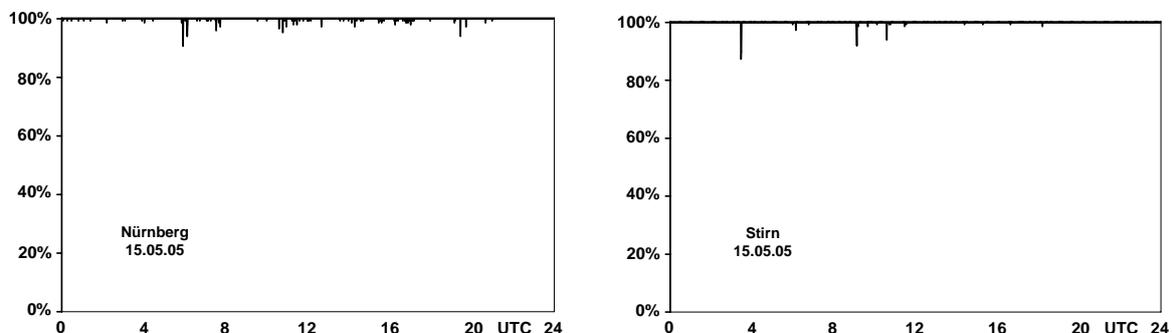


Abb. 55: Audioverfügbarkeit des Signals vom Sender Dillberg während zweier Tage in städtischer und ländlicher Empfangsumgebung

#### 4.2.1.7 Langzeitbeobachtungen

Von Dezember 2004 bis Juli 2005 wurden am Empfängerstandort Nürnberg–Altenfurt kontinuierliche Empfangsaufzeichnungen sowohl des Senders Dillberg als auch des Senders Nürnberg, soweit er nicht wegen des Umbaus außer Betrieb war, durchgeführt. Insgesamt wurden Empfangsdaten ab dem Zeitpunkt, an dem am Dillberg die Antennenanpassung erneuert worden war, kontinuierlich aufgezeichnet. In Tabelle 7 sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengestellt. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Ursachen für die entsprechenden Verfügbarkeiten des Signals durchaus unterschiedlich sind: im Januar und Februar 05 wurden die Empfangsprobleme hauptsächlich durch das bereits mehrfach erwähnte Störsignal (Abb. 51), das kontinuierlich vorhanden war, verursacht, während im Mai

und Juni Störungen ähnlich wie in Abb. 53 und 54 gezeigt, die nur zeitweise an einigen Tagen vorhanden waren, zu der niedrigen Verfügbarkeit des Empfangs Signals beitragen.

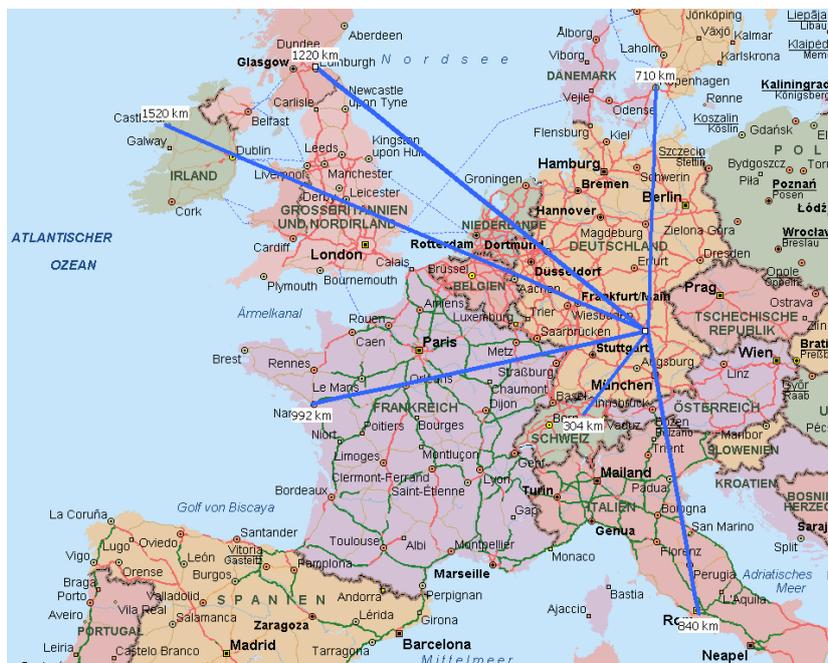
*Tabelle 7: Verfügbarkeit der Signale der Sender Nürnberg und Dillberg in Nürnberg–Altenfurt*

Zeitraum	Aufzeichnung Sender Nürnberg (Stunden)	Verfügbarkeit	Aufzeichnung Sender Dillberg (Stunden)	Verfügbarkeit
Dezember 2004	239	99,9%	315	97,6%
Januar 2005	315	98,6%	455	91,3%
Februar 2005	–	–	558	90,6%
März 2005	–	–	354	92,9%
April 2005	–	–	497	99,5%
Mai 2005	–	–	605	97,3%
Juni 2005	–	–	427	93,9%
Juli 2005	206	99,6%	381	97,0%

#### 4.2.1.8 Empfangsberichte aus größerer Entfernung

Während des gesamten Sendebetriebs wurde als Textmeldung immer wieder die E-Mailadresse des Projektleiters eingeblendet, mit der Bitte, Empfangsberichte einzusenden. Darüber hinaus wurden die Sendungen auch auf der Liste der Test-Sendungen auf der Internetseite des DRM-Konsortiums aufgeführt. Dadurch konnten DRM-Hörer, die die Testsendungen empfangen konnten, dies über E-Mail zurückmelden.

Während der Laufzeit der Versuche gingen insbesondere in den Monaten Mai Juni und Juli eine Anzahl von Empfangsberichten ein, die Lage und Entfernungen zu den Empfangsorten sind in Abb. 56 gekennzeichnet.



*Abb. 56: Orte, aus denen Empfangsberichte für den Campusradio-Sender Dillberg jeweils in den Monaten Mai bis Juni 2004 und 2005 erhalten wurden.*

### 4.3 Mobilempfang

Bisher wurden nur in der Umgebung des Senders Nürnberg ausführliche Untersuchungen zur mobilen Empfangbarkeit des DRM-Signals im 26 MHz Bereich unternommen. Ziel war es, zu untersuchen, wie sich die durch die Bewegung des Empfängers entstehende Zeitspektivität des Übertragungskanals auf den Empfang auswirkt.

Durch Reflexion der Welle an Hindernissen kommt es zu Mehrwegeempfang. Dadurch, dass sich die einfallenden Wellen mit unterschiedlicher Phasenlage überlagern, entstehen frequenzselektive Pegelbrüche und eine zeitliche Fluktuation der empfangenen Leistung.

Das DRM-System ist für die Ausbreitungsverhältnisse bei ionosphärischer Streuung im Kurzwellenbereich ausgelegt. Dabei tritt die Mehrwegeausbreitung durch Reflexion an unterschiedlichen ionosphärischen Schichten und die Mehrfachsprünge auf, wobei die Wegdifferenzen der Signalpfade einige hundert Kilometer betragen. Dies führt entsprechend zu Signalverzögerungen im Millisekunden-Bereich. Innerhalb der Bandbreite des DRM-Signals von typisch 10 kHz tritt deshalb bereits frequenzselektiver Schwund auf, d.h. es werden nur einige wenige der ca. 200 Träger des Spektrums ausgelöscht, während andere gut übertragen werden. Typische Beispiele für Empfangssignale bei solchen Ausbreitungssituationen zeigt Abb. 57. An Hand der von der DREAM-Software berechneten Kanalimpulsantworten erkennt man gut, dass bei zwei dominierenden Signalpfaden der Abstand der ausgelöschten Bereiche im Spektrum dem Kehrwert der Laufzeitdifferenz der Signale entspricht.

Im Empfangsbereich der Bodenwelle eines 26 MHz-Senders hingegen treten durch die lokalen Reflexionen Wegunterschiede von nur wenigen km auf. Dies bedeutet, dass der Abstand der Auslöschungsbereiche und deren Breite etwa 100 mal größer sind als in den Beispielen der Abb. 57, d.h., die Abstände betragen etwa einige 100 kHz und die Breite etwa einige 10 kHz. Daher wird der Fall eintreten, dass das komplette DRM-Spektrum ausgelöscht wird. Man spricht in diesem Fall von "flat fading". Wenn sich der Empfänger in einer solchen Position befindet, z.B. bei Portabelempfang ("Kofferradio") mit einer kurzen Stabantenne oder beim Halt eines Autos vor einer Ampel, ist trotz der Fehlerkorrektur und des Zeitinterleavings des DRM-Systems kein Empfang mehr möglich.

Ohne auf ein Kanalmodell der Mobil-Funkübertragung näher eingehen zu müssen, können einige Abschätzungen im Hinblick auf die zu erwartenden Effekte vorgenommen werden. Die Überlagerung der verschiedenen einfallenden Wellen erzeugt ein räumliches Muster maximaler und minimaler Empfangsleistungen. Der Abstand von Orten minimaler Empfangsleistungen liegt in der Größenordnung einer halben Wellenlänge (dies entspricht dem Abstand der Knoten einer stehenden Welle). Bei einer Frequenz von 26 MHz entspricht dies einem Abstand von  $\lambda/2 = 5,75$  Meter. Wenn sich ein Fahrzeug mit Geschwindigkeit  $v$  durch diese räumliche Leistungsverteilung bewegt, ergibt sich eine zeitabhängige Empfangsleistung, wobei der zeitliche Abstand  $\Delta t$  der Schwundeinbrüche durch

$$\Delta t = (\lambda/2) / v$$

gegeben ist. Mit einer Fahrzeitgeschwindigkeit von zehn Kilometern pro Stunde (2,8 m/s) ergibt sich ein Wert von etwa 2 Sekunden. Dieser zeitliche Abstand reicht aus, um die Schwundeinbrüche mit dem Yaesu FRG 100 – Empfänger, der eine AGC-Zeitkonstante von etwa einer Sekunde hat, beobachten zu können.

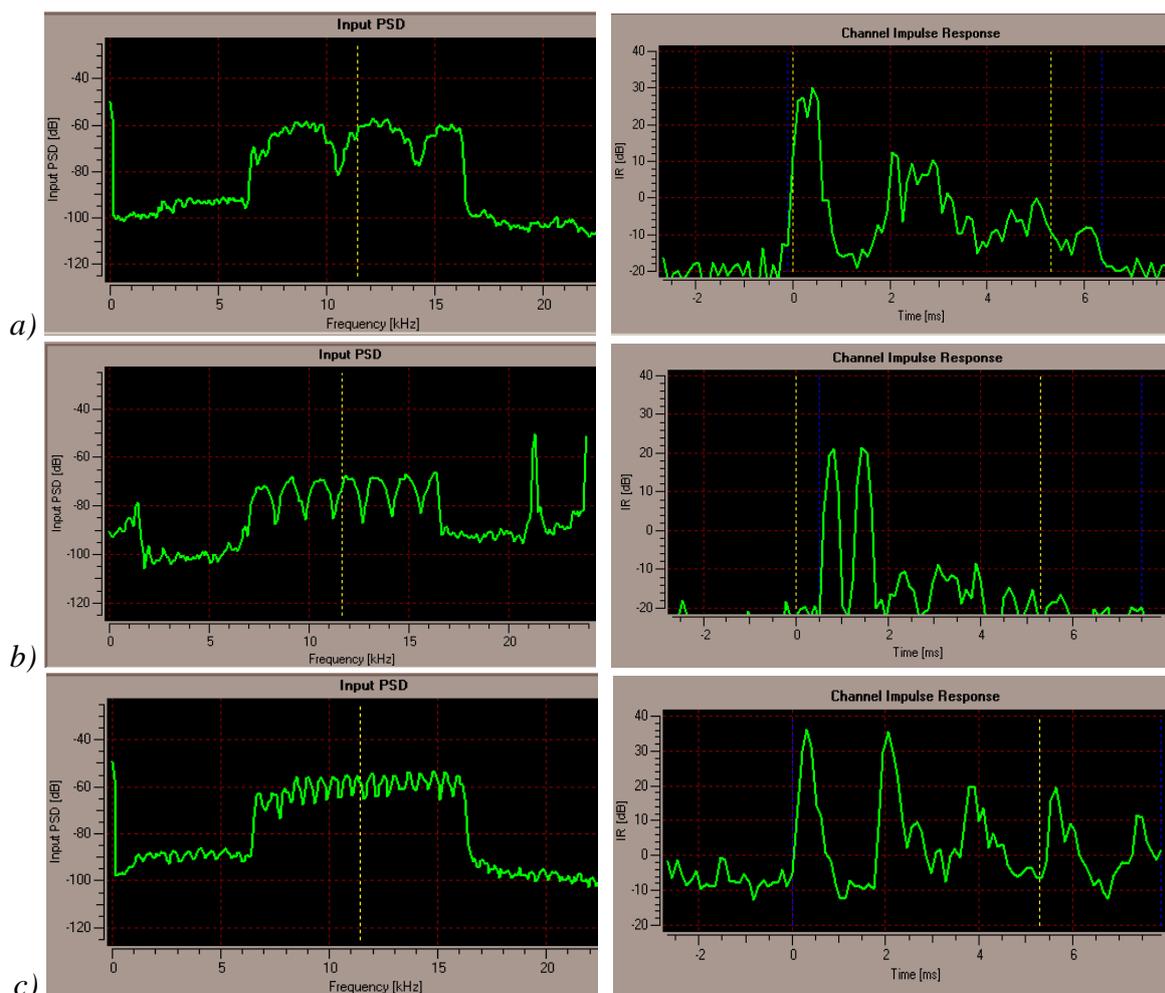


Abb. 57: In Nürnberg beobachtete Empfangsspektren(links) und Kanalimpulsantworten (rechts) von DRM – Sendungen (Screen shots der DREAM-Software.. a) RTL 6095 kHz am 15.3.05 um 8.44, b) Deutsche Welle, 6140 kHz am 29.3.05 um 14.35, c) Deutsche Welle, 3995 kHz am 20.3.05 um 18.29 (jeweils Ortszeit).

Um zu untersuchen, ob flat fading tatsächlich auftritt, wurden eingehende Messungen in mehreren Nürnberger Straßen in verschiedenen Abständen zum Sender unternommen<sup>16</sup> (Abb. 58). Diese Straßen wurden mehrfach mit Schrittgeschwindigkeit durchfahren und dabei sowohl das Empfangsspektrum beobachtet als auch der Empfangspegel aufgezeichnet. Die ausführlichsten Messungen wurden in der Komotauer Straße in Nürnberg – Zerkabelshof vorgenommen. Sie befindet sich in etwa 2 km Abstand zum Sender Nürnberg in einer Gegend, die bei normaler Fahrgeschwindigkeit gut versorgt erscheint.

In Abb. 59 ist der Verlauf der Empfangsleistung bei einer Messfahrt im Schritttempo auf dem Club-Parkplatz in Nürnberg dargestellt. Die Fahrt dauerte 90 Sekunden, der dargestellte Bereich entspricht einer gefahrenen Strecke von ungefähr 200 Metern.

<sup>16</sup> Konrad Blomeier, Untersuchung zur digitalen Lokalrundfunkversorgung mit Sendern kleiner Leistung im Kurzwellenbereich, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, Juni 2004

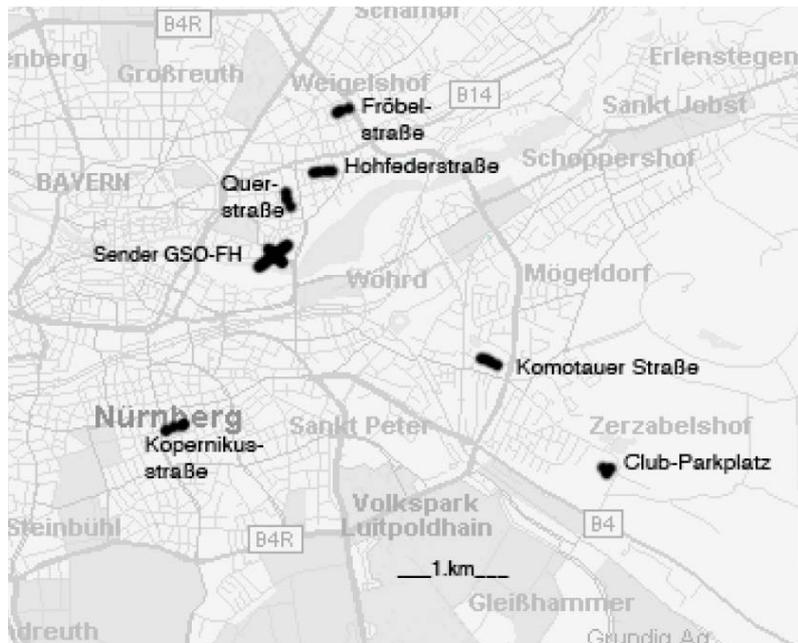


Abb. 58: Straßen, in denen Untersuchungen zum Mobilempfang gemacht wurden.

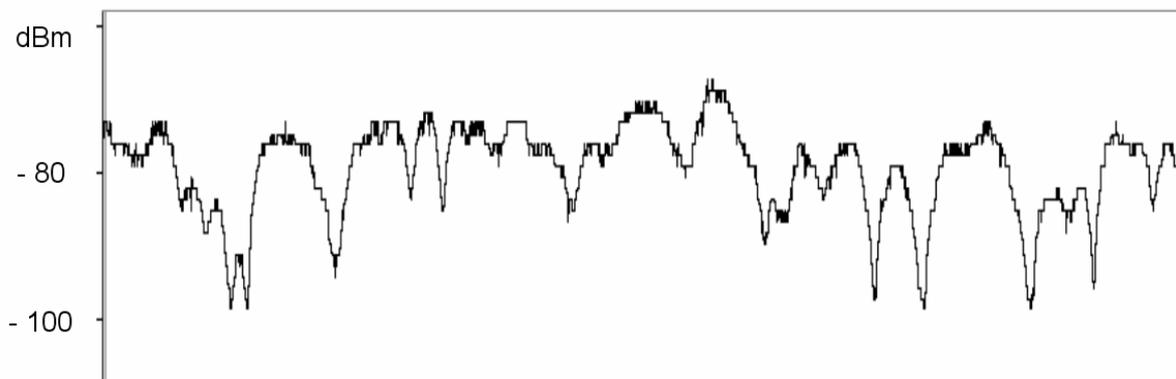


Abb. 59: Empfangsleistung längs einer Fahrstrecke von ca. 200 m auf dem Club-Parkplatz.

Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch in den anderen Straßen, und zwar unabhängig vom Abstand des Senders.

Nach Schulze<sup>17</sup> können die Mobilfunkkanäle durch die statistische Verteilung der Amplitude charakterisiert werden. Bei einem Rayleigh – Kanal ist kein direkter Pfad vom Sender zum Empfänger vorhanden, sondern der Empfang erfolgt nur durch die Überlagerung der gestreuten, reflektierten und gebeugten Wellen, die aus zufälligen Richtungen, mit statistisch verteilten Amplituden und zufälligen Phasen beim Empfänger eintreffen. Je nach Einfallrichtung relativ zur Fahrzeuggeschwindigkeit haben sie auch unterschiedliche Dopplerverschiebungen. In dieser Situation ergibt sich, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Empfangsleistung einen bestimmten Wert unterschreitet, näherungsweise gleich diesem Wert

<sup>17</sup> Henrik Schulze, Digital Audio Broadcasting: Das Übertragungssystem im Mobilfunkkanal, Ausarbeitung für ein Seminar vom 19. bis 21. September 1995 in Meschede. <http://www.fh-meschede.de/public/schulze/docs/dab-seminar.pdf>

ist. In einer doppelt-logarithmischen Darstellung (Abb. 60) ergibt sich für kleine Werte deshalb eine Gerade.

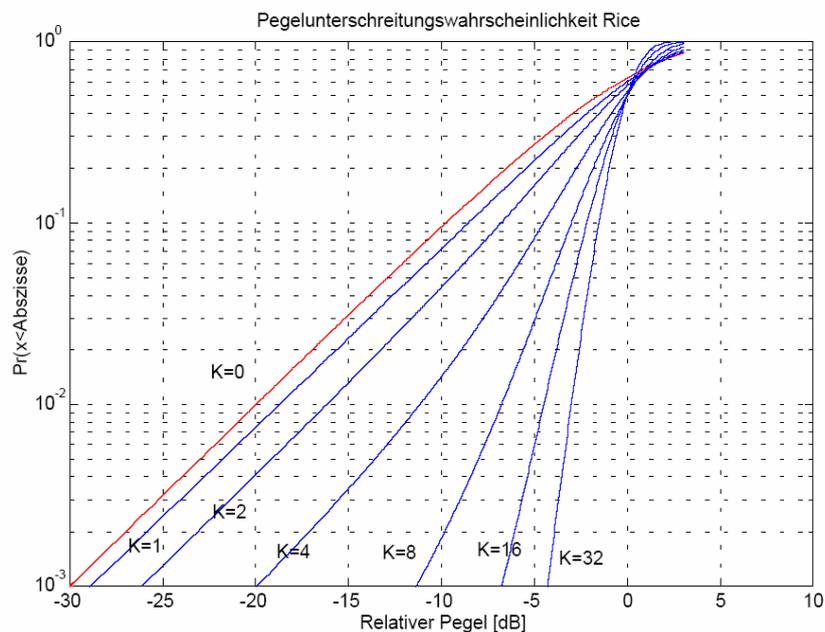


Abb. 60: Theoretische Pegelunterschreitungswahrscheinlichkeit bei Rayleighkanal (rot) und Rice-Kanälen (blau).  $K$  ist das Verhältnis der Leistung der direkten Komponente zu den Streukomponenten<sup>18</sup>.

Wenn eine direkte Signalkomponente vorhanden ist, verändert sich diese Statistik. Sie kann dann z. B. durch eine Rice-Verteilung beschrieben werden. Im Gegensatz zur Rayleigh-Verteilung ist die Pegelunterschreitungswahrscheinlichkeit bei der Rice-Verteilung deutlich geringer (Abb. 60).

Für die in den verschiedenen Straßen gemessenen Empfangsleistungen wurde deshalb eine statistische Auswertung durch die doppelt-logarithmische Darstellung des Rayleigh-Plot vorgenommen.

Für die in Abb. 59 dargestellte Situation ergab sich, dass es sich dabei um einen fast reinen Rayleigh-Kanal handeln könnte. Dies entspricht auch der Erwartung, da die direkte Sicht zum Sender auf dem Club-Parkplatz durch Gebäude abgeschaltet ist. In der Komotauer Straße hingegen, die in einer Richtung radial vom Sender weg verläuft, sowie in anderen Straßen, die sich näher am Sender befinden, wurden Pegelunterschreitungswahrscheinlichkeiten beobachtet, die mehr auf eine Rice-Verteilung hindeuten, wobei allerdings in allen Fällen keine sehr starken Direktkomponenten auftraten (Abb. 61). Dies ist angesichts der geringen Höhe der Sendeantenne auch nicht zu erwarten.

<sup>18</sup> H. Schulze, a.a.O., S. 12

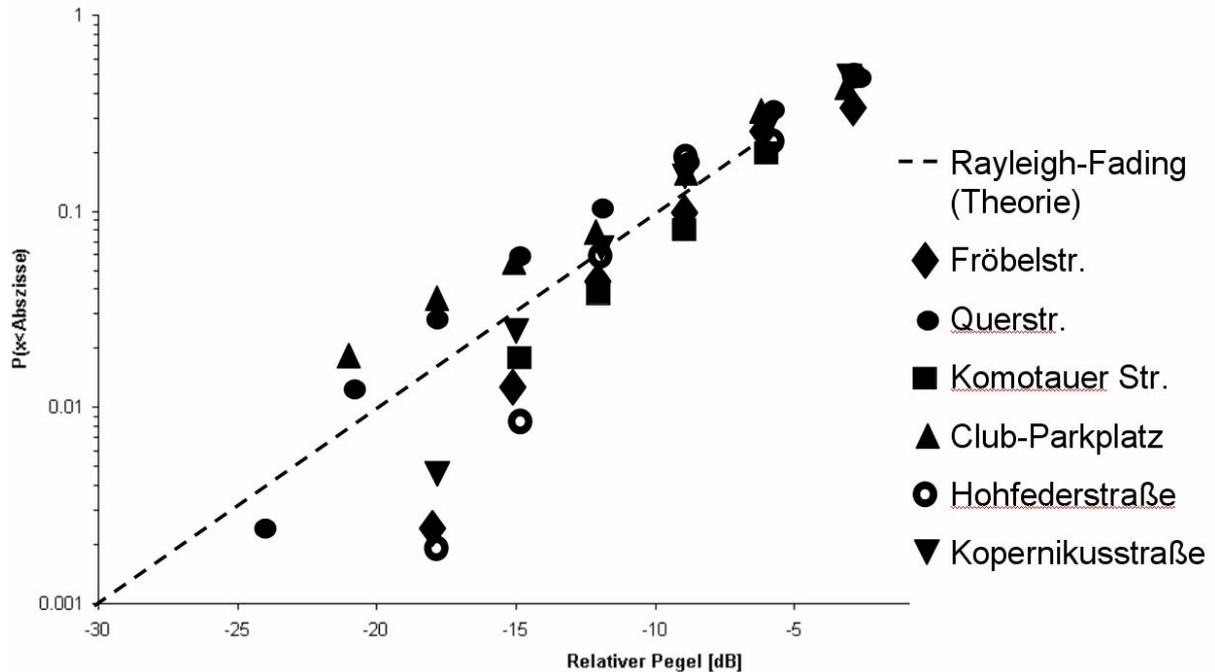


Abb. 61: Beobachtete Pegelunterschreitungswahrscheinlichkeiten bei den Messungen in verschiedenen Straßen im Rayleigh-Plot.

Im Zusammenhang mit diesen Messungen wurde auch untersucht, ob es sich bei den Schwundeinbrüchen tatsächlich um „Flat fading“ handelt, d.h., ob tatsächlich das Spektrum über die gesamte Bandbreite gleichzeitig ausgelöscht wurde. Hierfür wurde der zunächst der Verlauf der Empfängereingangsleistung mit verschiedenen Bandbreiten gemessen, so dass einmal das ganze Spektrum, einmal nur ein etwa 2 kHz breiter Ausschnitt am oberen bzw. unteren Ende des Spektrums zur Empfangsleistung beitrug. Es ergab sich, dass der räumliche Pegelverlauf in allen drei Fällen praktisch gleich war. Weiterhin wurde das 12 kHz-Zwischenfrequenzsignal des Empfängers als Audiodatei aufgezeichnet und anschließend mit einer Audioanalysesoftware ausgewertet. Eine geeignete Darstellung hierfür ist das so genannte Wasserfall-Diagramm (Abb. 62), in dem die Pegelwerte frequenzabhängig durch Farben kodiert sind. Es zeigt sich, dass tatsächlich jeweils das Spektrum über die gesamte Bandbreite ausgelöscht wird.

Ein weiterer Gegenstand der Untersuchungen beim Mobil-Empfang war, inwieweit die Verfügbarkeit des Audiosignals von den DRM-Parametern des Senders und von Empfängereinstellungen, insbesondere der AGC-Zeitkonstante abhängt. Dazu wurde eine Referenzstrecke definiert, die in Abb. 63 gezeigt ist. Diese Teststrecke wurde mehrfach in gleicher Richtung und mit ähnlicher Geschwindigkeit durchfahren, wobei der Sender Nürnberg jeweils auf verschiedene Parameter eingestellt wurde.

Für jede Fahrt wurde der Durchschnitt der fehlerfrei empfangenen Audio-Frames pro Minute anhand der dabei aufgezeichneten Logfiles berechnet. Tabelle 8 zeigt die verschiedenen Parameter-Einstellungen und den jeweils erzielten Audio-Durchschnitt.

Zwischen den DRM-Modes A und B war kein signifikanter Unterschied festzustellen, hinsichtlich des Zeit-Interleaving erwies sich die Einstellung 2s als deutlich besser als 0.4s. Die Einstellung der AGC-Zeitkonstante am YAESU-Empfänger spielte keine große Rolle.

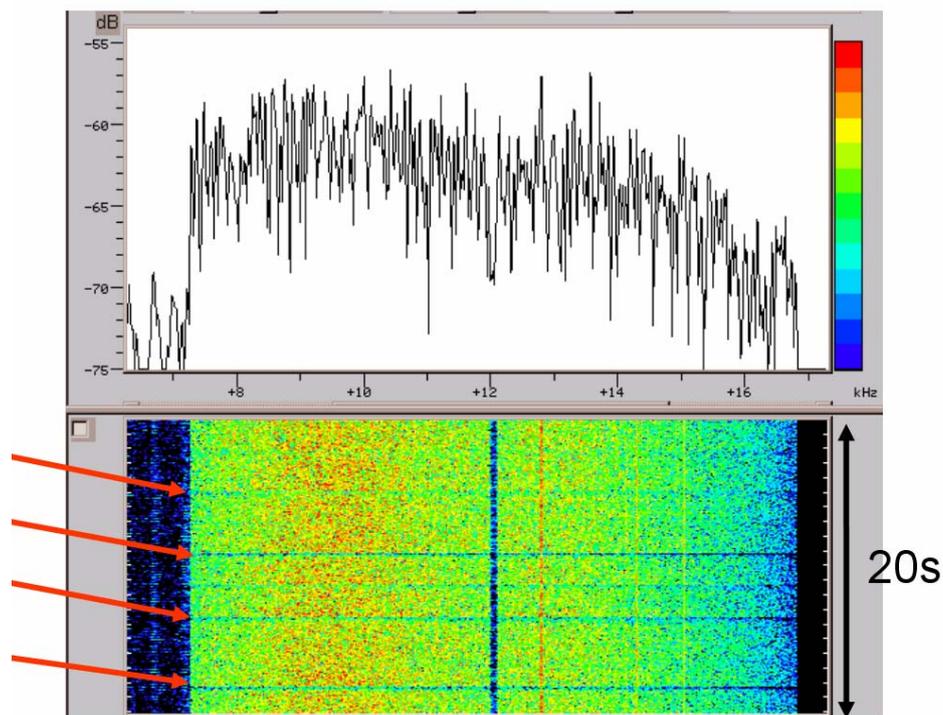


Abb. 62: Wasserfalldiagramm zum Nachweis des Flat fading. Messung in der Fröbelstraße.

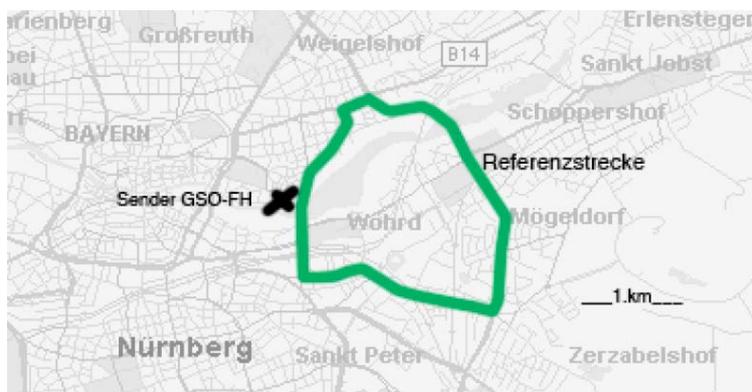


Abb. 63: Referenzstrecke für den Test der Parameterabhängigkeit des DRM-Mobil-Empfanges.

Tabelle 8: Ergebnisse der Fahrten auf der Referenzstrecke mit verschiedenen Parametern.

AGC-FAST	Inter-leaving	DRM MODE	Audio-Frames Durchschnitt
mit	2s	A	1471
ohne	2s	A	1462
mit	0.4s	A	1403
ohne	0.4s	A	1443
mit	2s	B	1457
ohne	2s	B	1474

## 5 Ableitung von Planungsparametern im Hinblick auf die Eignung des 26 MHz – Bereichs für digitales Lokalradio mit DRM

### 5.1 Vorhersage der Reichweite von Sendern

Aufgrund der vorgenommenen Messungen kann eine Abschätzung erfolgen, wie groß die Empfangsfeldstärke von Sendern im 26 MHz–Bereich ist. Dieser Parameter ist für die Vorhersage der Reichweite von Sendern von entscheidender Bedeutung.

Häufig ist es erforderlich, den Effektivwert der elektrischen Feldstärke in Signalleistung am Empfängereingang umzurechnen beziehungsweise umgekehrt. Für die Frequenz von 26 MHz ergibt sich hierfür folgende Beziehung:

$$\frac{P}{dBm} = \frac{E_{eff}}{dB\mu V/m} - 105,5 + G$$

wobei  $G$  den isotropen Gewinn der Empfangsantenne bezeichnet.

Da für DRM–Empfang ein gewisses Signal– zu Rauschverhältnis erforderlich ist, das bei den verwendeten Parametern in der Größenordnung von 15 dB liegt, ist zunächst der Rausch– beziehungsweise Störpegel abzuschätzen, der die Reichweite eines Senders in diesem Frequenzbereich bestimmt.

Die Leistung des thermischen Rauschens innerhalb einer Bandbreite  $B$  ist gegeben durch

$$P_{N, th}/dBm = -174 + 10 \log (B/Hz).$$

Für eine Bandbreite von 10 kHz ergibt sich daraus eine thermische Rauschleistung von –134 dBm, dies entspricht nach obiger Umrechnungsformel einem Feldstärkepegel von –28,5 dB $\mu$ V/m. Der atmosphärische Störpegel bei 26 MHz und 10 kHz Bandbreite liegt in der Größenordnung von –20 bis –30 dB $\mu$ V/m (je nach Jahres– und Tageszeit<sup>19</sup>). Allerdings beträgt der auf 10 kHz Bandbreite bezogene Feldstärkepegel des „Man made Noise“ in städtischem Gebiet bei 26 MHz etwa 8 dB $\mu$ V/m. In ländlicher Umgebung (Dorf) ist dieser Pegel um etwa 10 dB niedriger, also etwa –2 dB $\mu$ V/m. Hierbei ist jeweils  $G = 0$  dBi gesetzt. Insgesamt kann deshalb angenommen werden, dass der Empfang durch den lokalen Störpegel begrenzt ist und nicht durch das atmosphärische oder thermische Rauschen. Dann spielt auch der Antennengewinn und die Empfängerempfindlichkeit nur eine untergeordnete Rolle und die Reichweite eines Senders ist allein durch den Abstand gegeben, in dem der Feldstärkepegel gerade etwa 15 dB über dem Störpegel liegt.

Für den Rand des Versorgungsgebietes ergibt sich aus den oben angeführten Überlegungen in städtischem Gebiet eine Mindestfeldstärke von etwa 23 dB $\mu$ V/m. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen der Testfahrten, die von der Deutschen Welle im Bereich des Senders Nürnberg durchgeführt wurden (Abb. 42). Allerdings ist zunächst erstaunlich, dass auch die Messwerte im Bereich des Senders Dillberg auf eine ähnliche Mindestfeldstärke hindeuten. Es ist aber zu beachten, dass die meisten Messungen auf stark befahrenen Straßen und im Stadtgebiet Neumarkt in der Opf. gemacht wurden.

Ausgehend von diesen Überlegungen kann überprüft werden, ob für die Abschätzung der Reichweite eines DRM–Senders auf 26 MHz im Bereich der Bodenwelle auf Planungskurven für den UKW–Bereich, z.B. die der ITU–R Empfehlung 370 zurückgegriffen werden kann.

<sup>19</sup> diese und die folgende Angabe aus: Erich Vogelsang, Wellenausbreitung in der Funktechnik, R. Oldenburg Verlag München 1979, S. 86

Abb. 64 zeigt die dafür relevante Kurvenschar. Die Höhe der Sendeantenne, die als Parameter  $h_s$  angegeben ist, ist auf ein mittleres Niveau in Entfernungen zwischen 3 und 15 Kilometer vom Sender bezogen. Die Kurven für eine Ortswahrscheinlichkeit von 99% liegen um etwa 18 dB unter den dargestellten 50%–Kurven<sup>20</sup>.

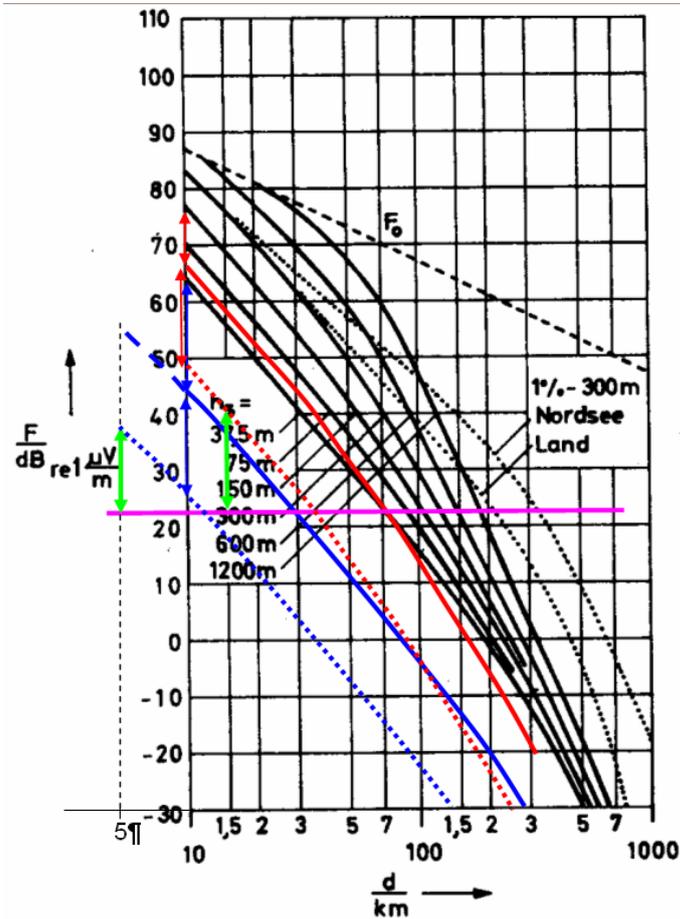


Abb. 64: Feldstärkepegel im Bereich 30 – 250 Megahertz bei Ausbreitung über Land und Nordsee, Ortswahrscheinlichkeit 50 %, Zeitwahrscheinlichkeit 50 %, Sendeleistung 1 kW, Empfangsantenne in 10 Meter Höhe.<sup>21</sup> Blau bzw. rot: verschobene Kurven für die DRM-Sender Nürnberg und Dillberg, siehe Text. Grün: zusätzliche Dämpfung für Mobilempfang (Antennenhöhe 1,5m).

Angewandt auf den Sender Nürnberg ist davon auszugehen, dass die 37,5 Meter-Kurve für eine Abschätzung in etwa geeignet ist, für den Sender Dillberg hingegen die 150 Meter-Kurve, da das umgebende Gebiet zumindest in Richtung Nürnberg eine Höhe von unter etwa 400 Meter aufweist und sich der Sender in einer Höhe von 605 Metern befindet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Sendeleistung des Senders Nürnberg 20 dB und die des Senders Dillberg 10 dB unter ein Kilowatt liegt. Die entsprechenden verschobenen Kurven sind farbig in Abb. 63 gekennzeichnet (blau: Sender Nürnberg, rot: Sender Dillberg; durchgezogene Linien: 50 % Ortswahrscheinlichkeit, punktierte Linien: 99 Prozent Ortswahrscheinlichkeit). Unter der Annahme, dass ein Empfangspegel von 23 dBμV/m erforderlich ist (violette Linie), ergeben sich Reichweiten von etwa 30 Kilometer für den Sender Nürnberg und etwa 70 Kilometer für den Sender Dillberg für 50 Prozent Ortswahrscheinlichkeit und etwa zwölf beziehungsweise 35 Kilometer für 99 Prozent Ortswahrscheinlichkeit und Empfang mit

<sup>20</sup> E. Vogelsang, a.a.O., S. 88

<sup>21</sup> Aus: E. Vogelsang, a.a.O., S. 87

Dachantenne. Diese Werte sind durchaus realistisch (Abb. 49). Bei mobilen Empfangsversuchen wurden allerdings nur Reichweiten von etwa drei bis fünf Kilometer (Sender Nürnberg, Abb. 35, 38) beziehungsweise etwa 10 – 15 Kilometer (Sender Dillberg, Abb. 36, 40) erreicht, wobei in diesen Entfernungen aber noch praktisch störungsfreier Empfang gegeben war, so dass dort von 99 Prozent Ortswahrscheinlichkeit auszugehen ist. Dies deutet darauf hin, dass beim Mobil-Empfang mit einer Antennenhöhe von nur etwa 1,5 Meter eine zusätzliche Dämpfung von etwa 13 bis 17 dB in Betracht zu ziehen ist. Dieser Wert stimmt gut mit der Größenordnung der bei der Planung anderer Rundfunksysteme, z.B. DAB<sup>22</sup>, angewandten Korrekturen überein.

Als Resultat dieser Überlegungen ergibt sich, dass für die Planung von DRM-Lokalsendern im wesentlichen wie bei der Planung von UKW-Sendern<sup>23</sup> vorgegangen werden kann, sofern lediglich die Ausbreitung über die Bodenwelle im Bereich rund um den Sender in Betracht gezogen wird. Bei Verwendung von 1 kW-Sendern mit z.B. 150m Antennenhöhe würde die Reichweite knapp 100 km und die Entfernung, bei der ihre Störwirkung auf das Maß des Man-made-noise abgenommen hat, etwa 250 km betragen. Solche Sender könnten also etwa in 350 km Entfernung voneinander auf derselben Frequenz betrieben werden. Auch dies entspricht etwa den Gegebenheiten bei der Planung der UKW-Rundfunk- und Fernsehensendernetze.

## 5.2 Überreichweiten durch ionosphärische Fernausbreitung

Im Hinblick auf die ionosphärische Fernausbreitung sind zwei Effekte zu unterscheiden: die "normale" Ausbreitung durch Reflexion der Wellen an der Ionosphäre, insbesondere der E- und F-Schicht sowie die Reflexion an sporadischen E-Schichten. Die Häufigkeit des Auftretens der beiden Effekte unterscheidet sich dadurch, dass die „normale“ Ausbreitung sehr stark von der Sonnenaktivität und deren elfjährigem Zyklus abhängt, wohingegen das Auftreten der sporadischen E-Schicht davon praktisch unabhängig ist, aber (in Europa) praktisch nur in den Monaten Mai bis August eine nennenswerte Rolle spielt.

Beide Ausbreitungsarten spielen im Hinblick auf die Verwendung des 26 MHz-Bereichs für den lokalen Rundfunk vor allem dadurch eine wichtige Rolle, dass sie zu Störungen des Nutzsignals durch Gleichkanal-DRM-Sender in großer Entfernung vom Sender führen können. Für die Versorgung selbst spielen sie keine Rolle.

Zum besseren Verständnis der Effekte, die bei der ionosphärischen Ausbreitung auftreten, seien zunächst deren Grundlagen kurz dargestellt.

### 5.2.1 Grundlagen der Kurzwellen-Ausbreitung

Als Ionosphäre wird der Teil der Erdatmosphäre bezeichnet, in dem freie Ladungsträger vorhanden sind. Es sind dies vor allem Schichten in Höhen zwischen 60 und 500 km, in denen die atmosphärischen Restgase durch die Sonneneinstrahlung teilweise ionisiert werden. Es bildet sich ein Plasma. Die Ionisierung und die Elektronendichte in den ionosphärischen Schichten hängen sowohl vom Zustand der Sonne (z. B. charakterisiert durch die Anzahl der Sonnenflecken bzw. die daraus abgeleitete Sonnenfleckenrelativzahl  $R$ ), von der Jahres- und Tageszeit und von der geografischen Lage ab. Sie verlaufen dabei mehr oder weniger periodisch.

Die unterste Ionosphärenschicht ist die D-Schicht (60 bis 90 Kilometer Höhe). Von dieser Schicht werden nur Langwellen reflektiert, wohingegen Mittelwellen stark und Kurzwellen i.a. nur schwach absorbiert werden. Die D-Schicht ist nur am Tag vorhanden.

<sup>22</sup> Wolfram Titze, Gerald Chouinard, Stephen Baily, The Broadcast Side. In: Wolfgang Hoeg, Thomas Lauterbach (Eds.), Digital Audio Broadcasting, Wiley, Chichester 2003<sup>2</sup>, S. 246

<sup>23</sup> Horst Werle, Technik des Rundfunks, R. v. Decker's Verlag, Heidelberg 1989, S. 247ff.

Die E-Schicht (90 bis 130 Kilometer Höhe) wirkt bei allen Frequenzen gut reflektierend und wenig dämpfend. Am Tag ist sie für die Ausbreitung der Kurzwellen von Bedeutung, bei Nacht auch für die Mittelwellenausbreitung.

Die F-Schichten (170 bis 300 Kilometer) sind ständig vorhanden (wobei die Aufteilung in F1 und F2-Schicht nur am Tag relevant ist) und spielt für den weltweiten Funkverkehr im Kurzwellenbereich die entscheidende Rolle.

Die Eigenschaften der Schichten, insbesondere ihre Höhe und Elektronendichte, sind sehr stark von der Sonnenflecken-Anzahl und der Tages- und Jahreszeit abhängig, da je nach Sonnenaktivität, Tages- und Jahreszeit die Elektronendichte  $n_e$  in den Schichten schwankt.

Eine wichtige Größe in diesem Zusammenhang ist die Plasmafrequenz  $f_p$  der Elektronen

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n \cdot q_e^2}{m_e \cdot \epsilon_0}} \approx 9 \text{ MHz} \cdot \sqrt{n_e / 10^{12} \text{ m}^{-3}}$$

mit  $q_e$ : Elementarladung,  $m_e$ : Elektronenmasse,  $\epsilon_0$ : elektrische Feldkonstante.

Die Bedeutung der Plasmafrequenz ist die, dass eine senkrecht auf die ionosphärische Schicht auftreffende elektromagnetische Welle mit  $f < f_p$  praktisch vollständig reflektiert wird, während sich eine Welle mit  $f > f_p$  durch das Plasma hindurch ausbreiten kann.

Im Zusammenhang mit der Kurzwellenausbreitung wird die Plasmafrequenz meist als kritische Frequenz  $f_0$  bezeichnet, wobei zur genauen Kennzeichnung noch der Buchstabe der reflektierenden Ionosphärenschicht (E, F1, F2) hinzukommt. Die kritischen Frequenzen betragen für die E- und F-Schicht einige MHz, für die D-Schicht nur einige 100 kHz.

Besonders wichtig ist die höchste dieser kritischen Frequenzen, die kritische Frequenz der F2-Schicht  $f_0F_2$ . Sie korreliert im Mittel gut mit der Sonnenfleckenrelativzahl und liegt im Sonnenfleckenmaximum (–minimum) im Jahresmittel mittags bei 10–12 MHz (5–7 MHz), und um Mitternacht bei ca. 5–7 MHz (3–4 MHz). Es gibt allerdings auch eine starke jahreszeitliche Schwankung, wobei der Mittagswert der  $f_0F_2$  im Winter am höchsten ist und im Sonnenfleckenmaximum dann bei bis auf etwa 15 MHz ansteigen kann.

Wenn die Welle nicht senkrecht auf die ionosphärische Schicht auftrifft, sondern vom Sender unter dem Winkel  $\varphi$  gegenüber dem Horizont abgestrahlt wird, werden auch Wellen mit höheren Frequenzen als  $f_0$  reflektiert.

Die maximale Frequenz, die unter einem bestimmten Winkel reflektiert wird und damit für eine bestimmte Funkstrecke die höchst mögliche ist, wird als  $f_{\text{MUF}}$  oder nur MUF (maximum usable frequency) bezeichnet.

Der Zusammenhang zwischen  $f_0F_2$  und  $f_{\text{MUF}}$  ist gegeben durch

$$f_{\text{MUF}} = \frac{f_0F_2}{\sqrt{1 - \left( \frac{\cos \varphi}{1 + h/r_E} \right)^2}}$$

Hierbei ist  $h$  die (virtuelle) Höhe, bei der die Reflexion stattfindet und  $r_E$  der Erdradius (6370 km bzw 8790 km, wenn auch die Brechung durch die atmosphärische Schichtung berücksichtigt werden soll). Zwischen dem Winkel  $\varphi$  und der Großkreisentfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger besteht allgemein der Zusammenhang

$$d = 2r_E \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \varphi - \arcsin \left( \frac{r_E}{r_E + h} \cdot \cos \varphi \right) \right]$$

wobei alle Winkel im Bogenmaß einzusetzen sind.

Die größte MUF (ca.  $3 f_0$  bei der F-Schicht bzw. ca.  $5,5 f_0$  bei der E-Schicht) ergibt sich bei einem flachen Abstrahlungswinkel ( $\varphi = 0$ ). Dabei wird auch die größte Reichweite erzielt, die bei der Übertragung durch die E-Schicht bis zu etwa 2600 km bzw. bei der Übertragung durch die F-Schicht bis zu etwa 5000 Kilometer für einen Einfachsprung beträgt.

Die von der Ionosphäre zur Erde zurück gestreute Welle kann von der Erdoberfläche erneut in Richtung Ionosphäre gestreut werden, sodass eine Mehrfach-Sprung-Ausbreitung möglich ist. Dadurch werden weltweite Funkverbindungen im Kurzwellenbereich möglich.

Zur Vorhersage der Empfangsfeldstärke im Kurzwellenbereich bei ionosphärischer Ausbreitung gibt es einige empirische Funktionen, mit denen man die Zusatzdämpfung zur Freiraumausbreitung abschätzen kann. Diese sind in Software-Paketen zur Erstellung von Ausbreitungsprognosen enthalten, die auch im Internet als Freeware oder Demoverionen verfügbar sind.

### 5.2.2 Normale ionosphärische Ausbreitung bei 26 MHz

Um einen Eindruck von der ionosphärischen Ausbreitung unter normalen Umständen, d.h. unter der Annahme, dass keine sporadische E-Schicht vorhanden ist, zu gewinnen, wurde mit dem Ausbreitungsprognose-Programm "Funk – Prognose Version 3.3.2" von Uwe Runte die Empfangsfeldstärke eines fiktiven 26 MHz-Senders in Süddeutschland mit einer Sendeleistung von einem Kilowatt an einer Antenne mit vertikalem Abstrahlwinkel  $10^\circ$  (entsprechend einer vertikalen Dipolantenne in zehn Meter Höhe, vergleiche auch Abb. 26) für verschiedene Sonnenflecken-Relativzahlen, Jahres- und Tageszeiten berechnet. Die Prognoseergebnisse sind die Feldstärken, die an den verschiedenen Orten für 50% der Zeit überschritten werden. Abb. 65 zeigt ein Beispiel für ein solches Prognoseergebnis. Die vollständigen Prognoseergebnisse sind im Anhang 1 enthalten.

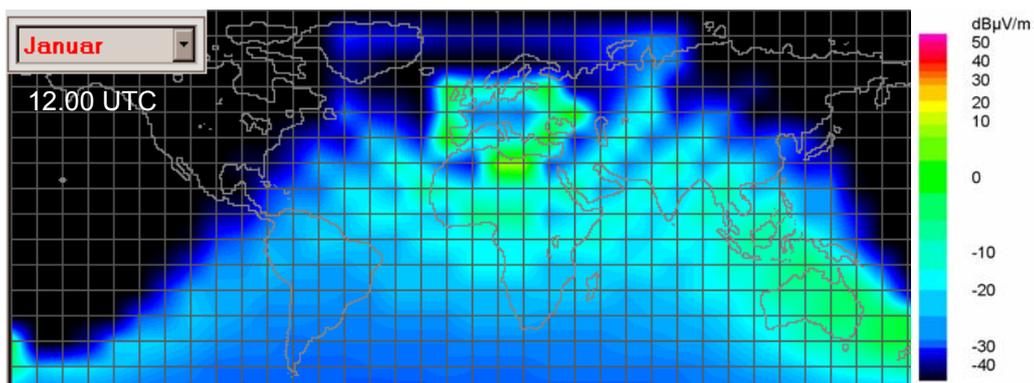


Abb. 65: Feldstärkeprognose für einen 1 Kilowatt-Sender bei 26 MHz in Süddeutschland für 12:00 UTC im Januar bei einer Sonnenflecken-Relativzahl von 150 (typischer Wert während des Sonnenfleckenmaximums).

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die größte Feldstärke in einem ringförmigen Gebiet um den Sender herum in einem Abstand von etwa 1500 bis 2500 Kilometer erreicht wird, wenn die MUF so groß ist, dass die 26 MHz – Welle von der Ionosphäre reflektiert werden kann. Dies ist das Gebiet, in der die vom Sender abgestrahlte Raumwelle nach dem ersten Sprung wieder

auf die Erdoberfläche auftrifft. Weitere Gebiete mit zwei und drei Sprüngen sind erkennbare, schließlich wird auch im Raum Australien/Neuseeland eine relativ hohe Feldstärke erreicht. Geht man davon aus, dass zum DRM-Empfang eine Feldstärke von über 20 dB $\mu$ V/m erforderlich ist, so spielt nur eine Störfeldstärke oberhalb von etwa 0 dB $\mu$ V/m eine signifikante Rolle. Für die grafischen Darstellungen der Feldstärkeprognosen auf der Weltkarte bedeutet dies, dass durch den fiktiven DRM-Sender alle DRM-Sender auf derselben Frequenz, die sich in Gebieten befinden, die hellgrün, gelb, orange oder rot gefärbt sind, gestört werden. In den blauen bzw. schwarzen Gebieten hingegen ist die Feldstärke so gering, dass keine Störungen des lokalen DRM-Empfangs zu erwarten sind, da die störende Feldstärke durch den Gleichkanal-Sender geringer ist als der allgemeine Störpegel durch Man-made-noise in diesem Gebiet. Da die Funkwellenausbreitung reziprok ist, d.h. in beide Richtungen gleich gut funktioniert, können die Karten auch so interpretiert werden, dass alle Gleichkanalsender, die sich in einem hellgrünen, gelben, orangen oder roten Gebiet befinden im Versorgungsgebiets des Senders in Süddeutschland als Störquellen wirken würden, während solche in den anderen Gebieten sich nicht auswirken würden.

Tabelle 9 stellt die Ergebnisse dieser Prognoseberechnungen zusammen. Es zeigt sich insbesondere, dass in fast allen Fällen, in denen Fernausbreitung auftritt, also insbesondere in den fünf Jahren um das Sonnenfleckenmaximum herum in den Tagesstunden, bei den angenommenen Senderleistungen von etwa 1 kW nur der ersten Sprung der ionosphärischen Wellenausbreitung relevant ist. Allerdings zeigen die Prognoseergebnisse, dass bereits bei niedriger Sonnenaktivität Fernausbreitung möglich ist. Dies bestätigt die Beobachtung solcher Störungen (Abb. 43). Die Tageswerte der Sonnenfleckenrelativzahlen betragen an den gezeigten Tagen (28.12.– 30.12.03) jeweils 34, 26 bzw. 17<sup>24</sup>. Es ist also damit zu rechnen, sich, dass schon bei  $R \approx 25 \dots 30$  Fernausbreitung auftritt.

*Tabelle 9: Zeiträume, in denen die durch ionosphärische Fernausbreitung hervorgerufene Feldstärke eines 1 kW-DRM-Senders im 26 MHz-Bereich zu relevanten Störfeldstärken führt.*

UTC	Januar						April						Juli						Oktober					
	0	4	8	12	16	20	0	4	8	12	16	20	0	4	8	12	16	20	0	4	8	12	16	20
R=150			■	■	■				■	■	■	■			■	■					■	■	■	
R=100				■					■	■	■					■					■	■	■	
R=50										■	■											■		
R=15																								

Zur Orientierung zeigt Abb. 66 den Verlauf der Sonnenfleckenrelativzahlen (Jahresmittel) in den letzten etwa 100 Jahren.

Ausgehend von den Feldstärkeprognosen für verschiedene Jahres- und Tageszeiten und verschiedene Sonnenaktivität (Anhang 1) kann man ein Planungsszenario für 26 MHz-Lokalsender entwickeln. Sender innerhalb eines Gebiets mit etwa 1500 Kilometer Durchmesser können im Abstand von etwa 150 km denselben Kanal benutzen, da sie gegenseitig immer innerhalb der toten Zone der Raumwellenausbreitung liegen, zumindest so lange die Ausbreitung über sporadische E-Schicht vernachlässigt wird, siehe 5.2.3. Außerhalb dieses Gebiets schließt sich ein ringförmiges Gebiet von etwa 2500 km Durchmesser an, in dem der Kanal nicht verwendet werden kann, da dort die Raumwellen nach dem ersten Sprung mit hoher Feldstärke auftreffen. Außerhalb dieses Rings schließt sich eine weitere tote Zone an, in der weitere Sender den entsprechenden Kanal verwenden können.

<sup>24</sup> National Geophysical Data Center, [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA)

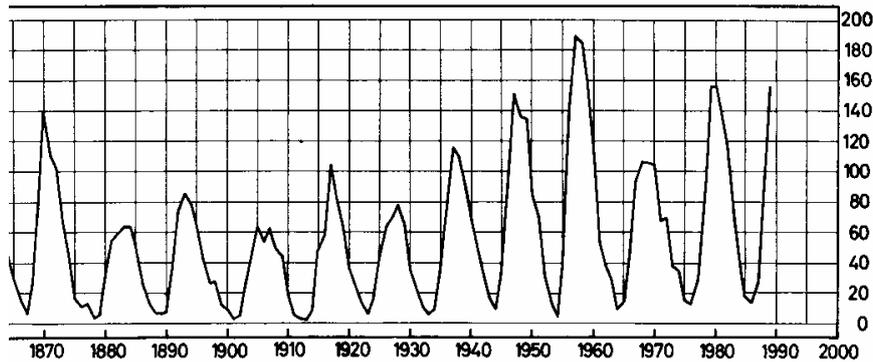


Abb. 66: Jahresmittel der Sonnenfleckenrelativzahlen 1870 bis 1990<sup>25</sup>.

Abb. 67 zeigt ein Beispiel für eine auf diesem Prinzip basierende Frequenzplanung. Ein Kanal des 26 MHz-Bandes, der z.B. in Deutschland benutzt wird, kann z.B. erst wieder im westlichen Sibirien, auf der arabischen Halbinsel, in Westchina, in Nigeria usw. verwendet werden.

Eine Planung müsste deshalb ähnlich wie im UKW-Rundfunk und Fernsehen auf Rautennetzen aufsetzen, die in diesem Frequenzbereich allerdings einen Maschenabstand von ca. 4000 km haben müssten. Innerhalb jeder Masche können die vierzig DRM-Kanäle, die das 26 MHz-Band bei jeweils 10 kHz Bandbreite bietet, jeweils in einem Gebiet von etwa 1500 km Durchmesser verwendet werden. Allerdings muss beachtet werden, dass Gesamtleistung der Sender in jedem Gebiet 1 Kilowatt nicht überschreitet. Andernfalls ist nicht mehr gewährleistet, dass die im nächsten Verbreitungsgebiet hervorgerufene Feldstärke unter 0 dB $\mu$ V/m bleibt.

Abb. 68 zeigt eine mögliche Raute mit den gekennzeichneten 1500 km-Gebieten und 4000 km Seitenlänge.

Es zeigt sich, dass zur Füllung der Raute, wie sie in Abb. 68 gezeigt ist, nur 9 verschiedene Frequenzen benötigt werden. Damit können in jedem Gebiet mindestens 4, in vier Gebieten sogar 5 Frequenzen des 26 MHz-Bereichs verwendet werden, da insgesamt 40 Kanäle (bei 10 kHz Bandbreite) vorhanden sind. Innerhalb jedes Gebiets ist eine weitere Planung erforderlich, die verhindert, dass sich die Bodenwellen der Sender gegenseitig stören. Diese Planung verläuft analog zu der der UKW-Sendernetze.

Insgesamt kann daher davon ausgegangen werden, dass in jeder Region der Erde nur 5 Frequenzen für DRM-Lokalsender zur Verfügung stehen werden, wenn gegenseitige Störungen durch Raumwellenausbreitung weitgehend vermieden werden sollen. Diese müssen innerhalb jeder Region nochmals entsprechend koordiniert werden.

<sup>25</sup> Lexikon der Astronomie, Spektrum akademischer Verlag Heidelberg 1995, Bd. 2, S. 248



Abb. 67: Gebiete, in denen ein Kanal des 26 MHz-Bereichs verwendet bzw. nicht verwendet werden kann, wenn gegenseitige Störungen der Sender untereinander vermieden werden sollen.

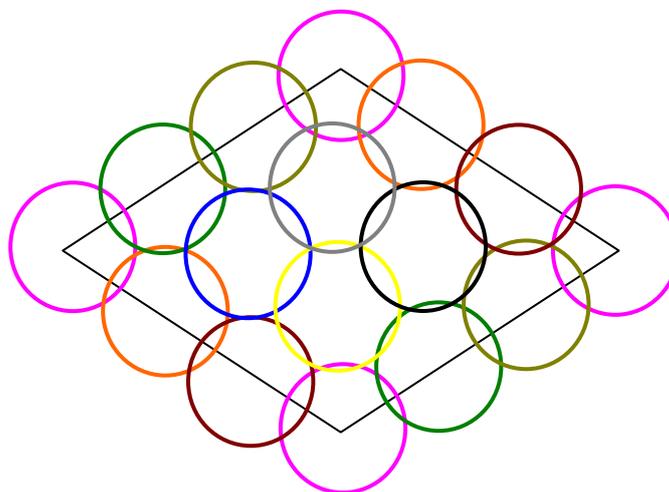


Abb. 68: Mögliche Raute zur 26 MHz – Frequenzplanung mit 4000 km Netzgröße und 2500 km Mindestabstand für Gleichkanalsender.

### 5.2.3 Ausbreitung über sporadische E-Schicht

Wiederholt wurde beobachtet, dass während der Sommermonate Mai bis Juli verstärkt Störungen des Empfangs der Campus-Radio-Sender auftraten. In diesem Zeitraum wurden auch am Empfangsberichte aus größeren Entfernung erhalten, die vom zeitweisen Empfang der Sender berichteten (Abb. 56).

Der Grund für diese Fernausbreitung ist im Auftreten der so genannten sporadischen E-Schicht in der Ionosphäre zu sehen. Dabei bilden sich unterhalb der normalen E-Schicht in etwa 100 Kilometer Höhe Wolken intensiver Ionisation, die in der Lage sind, Signale hoher Frequenzen zu reflektieren. Diese Wolken haben begrenzte Ausmaße von bis etwa 150 Kilometer und sind nur jeweils für einige Stunden vorhanden. Diese sporadischen E-Schicht-Wolken treten am häufigsten in den Sommermonaten (Mai bis August) während der späten Vormittagsstunden und am späten Nachmittag auf. Im Gegensatz zur normalen Ausbreitung über die normale E- und F-Schicht konnten bisher kaum Zusammenhänge mit der Sonnenaktivität hergestellt werden<sup>26</sup>.

Die tages- und jahreszeitliche Verteilung des Auftretens der sporadischen E-Schicht zeigt Abbildung 69 für die Jahre 1955 bis 1959. Aufgetragen ist der tages- und jahreszeitliche Verlauf des Medianwerts der kritischen Frequenz der sporadischen E-Schicht in Freiburg im Breisgau. Dieser Verlauf ist typisch für die gemäßigten Zonen auf der Nordhalbkugel, wobei das Gebiet mit den häufigsten sporadischen E-Schichten und den höchsten kritischen Frequenzen  $f_0ES$  über Japan liegt. In der Äquatorzone treten sporadische E-Schichten das ganze Jahr über auf, über der Südhalbkugel entsprechend in den dortigen Sommermonaten.

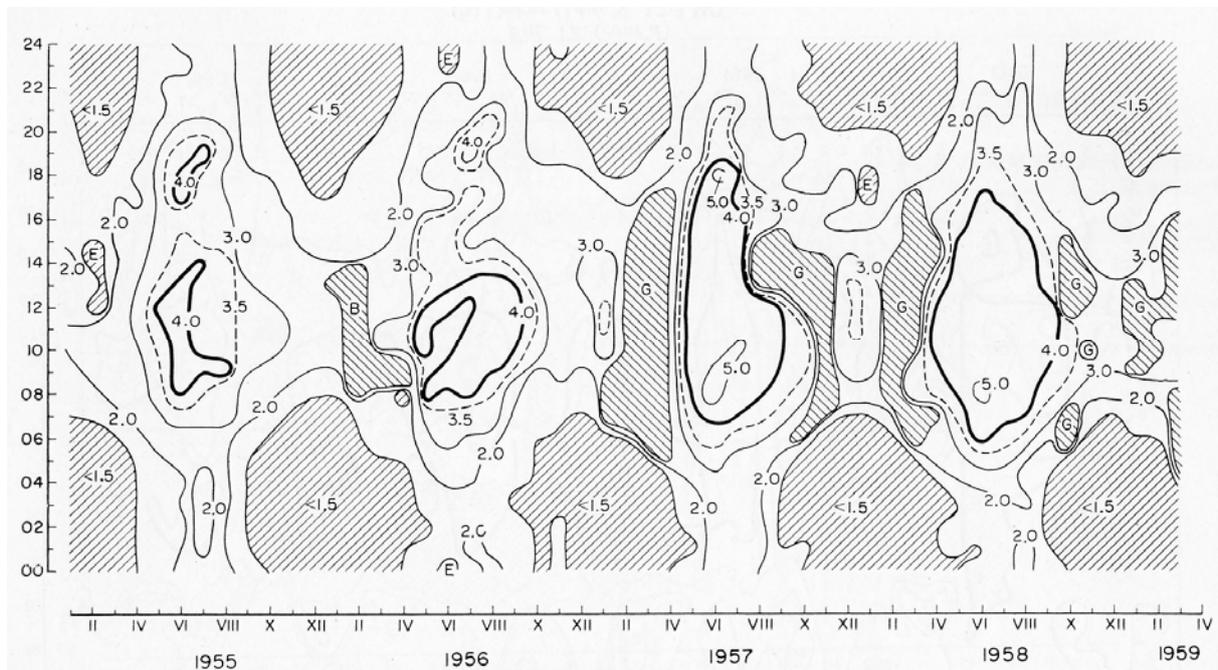


Abb. 69: Medianwert der kritischen Frequenz der sporadischen E-Schicht in Freiburg im Breisgau<sup>27</sup>.

Ungeachtet dessen, dass das tatsächliche Auftreten der sporadischen E-Schicht nicht vorhergesagt werden kann, können statistische Aussagen darüber gemacht werden, das heißt, es kann angegeben werden, für wie viel Prozent der Zeit ein bestimmter Wert der kritischen Frequenz  $f_0ES$  überschritten wird. Ausgehend davon kann die Feldstärke bei der Ausbreitung über die sporadische E-Schicht abgeschätzt werden. Das entsprechende Verfahren ist in der ITU-R Empfehlung 534<sup>28</sup> beschrieben.

<sup>26</sup> Hans Art. Rohrbacher, Theodore J. Cohen, George Jacobs, Kurzwellen – Ausbreitung. Frech-Verlag, Stuttgart, 1985, S. 157ff.

<sup>27</sup> K. Rawer, Structure of E<sub>s</sub> in Temperate Latitude. In: Ernest K. Smith, Sadami Matsushita (Eds.), Ionospheric Sporadic E, Pergamon Press, 1962, S. 309

<sup>28</sup> Recommendation ITU-R P.534-4, Method for calculating sporadic – E field strength.

Mit Hilfe dieses Verfahrens kann abgeschätzt werden, welche Feldstärke ein 1 kW – Sender bei Ausbreitung über sporadische E-Schicht in einer bestimmten Entfernung erzeugt. Diese Feldstärke hängt von der Entfernung und dem Verhältnis der Betriebsfrequenz zur kritischen Frequenz der sporadischen E-Schicht ab. Die ITU-R Empfehlung 534 enthält eine Abbildung, der man die Zusatzdämpfung gegenüber der Freiraumausbreitung in Abhängigkeit von diesen beiden Größen entnehmen kann. Weiterhin enthält sie eine Darstellung der Zeithäufigkeit, für die die sporadische E-Schicht eine bestimmte kritische Frequenz erreicht oder überschreitet. Zusammen mit der bekannten Beziehung für die Freiraumausbreitung kann man daraus die Feldstärke bei Ausbreitung über sporadische E-Schichten berechnen.

Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt Abb. 70. Man erkennt, dass bereits bei einer kritischen Frequenz der sporadischen E-Schicht von 7 MHz, die immerhin in den Monaten Mai bis August tagsüber für etwa fünf Prozent der Zeit erreicht oder überschritten wird, eine Feldstärke von bis zu etwa 30 dB $\mu$ V/m in einem Abstand von 1400 bis etwa 1800 Kilometer von einem 1 kW – Sender erreicht wird. Diese Feldstärke reicht aus, um den Sender zu empfangen. Wenn er hingegen als Gleichkanal-Störsignal im Versorgungsgebiet eines 1 kW-Senders mit 150 m Antennenhöhe aufgefasst wird, bedeutet dies, dass sich während des Auftretens der sporadischen E-Schicht dessen Reichweite von etwa 100 km auf etwa 40 km verringert, da nun statt 23 dB $\mu$ V/m eine Feldstärke von 45 dB $\mu$ V/m erforderlich wäre, um einen Signal-Störabstand von 15 dB zu erreichen (Abb. 64).

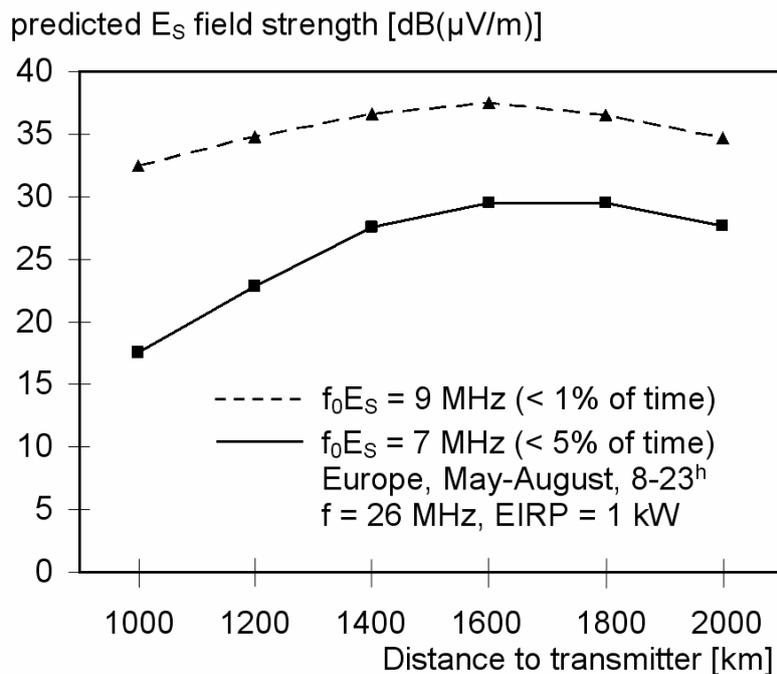


Abb. 70: Vorhergesagte Feldstärke bei Ausbreitung über sporadische E-Schicht nach ITU-R Empfehlung 534.

Aus der Empfehlung 534 lässt sich auch abschätzen, wie weit zwei 1 kW – Sender maximal auseinanderliegen dürfen, ohne dass sie sich für mehr als ein Prozent der Zeit gegenseitig durch sporadische E-Schicht-Ausbreitung während der Sommermonate tagsüber stören. Das Ergebnis liegt bei etwa 400 Kilometern. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den im folgenden dargestellten Beobachtungen.

Die sehr hohen vorhergesagten Feldstärken sind zunächst in guter Übereinstimmung mit der Tatsache, dass die Campus Radio – Sender trotz der geringen Sendeleistung insbesondere in

den Monaten Mai – Juli mehrfach an verschiedenen Orten in Europa empfangen werden konnten (Abb. 56).

Ebenso konnte ein DRM-Sender aus Rennes (Frankreich) auf 25775 kHz mehrmals in Nürnberg empfangen werden, wobei dessen Leistung in der Tabelle der DRM-Testsendungen ebenfalls mit 100 Watt angegeben war (Abb. 71).

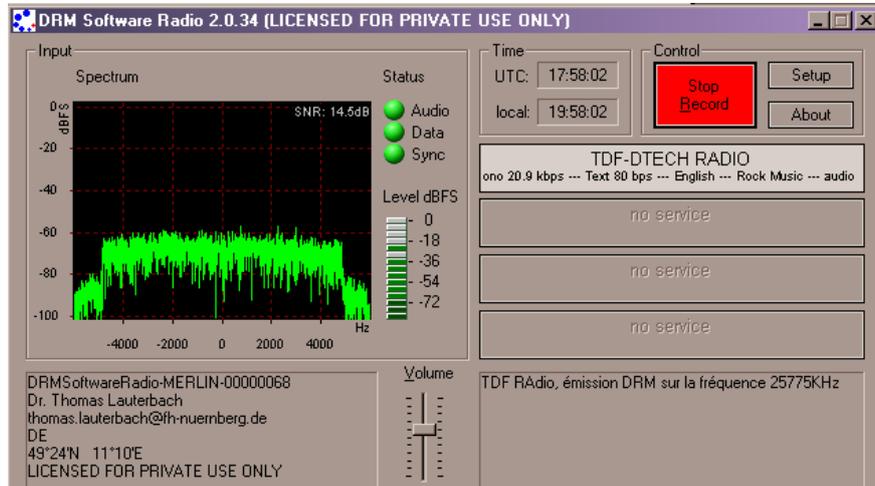


Abb. 71: Empfang des DRM-Sender Rennes auf 25775 kHz in Nürnberg am 27. Juni 2004 (Screen Shot) mit dem Yaesu FRG – 100-Empfänger an einem Dipol.

Einen interessanten Einblick in die Ausbreitungsverhältnisse über die sporadische E-Schicht vermittelt auch die Abb. 72. Es handelt sich dabei um die grafische Darstellung der Amateurfunkstationen, die während der Kurzwellen-Weltmeisterschaft der Internationalen Amateur Radio Union IARU am 11. Juli 2004 innerhalb von nur 40 Minuten im Raum Nürnberg im 28 MHz – Amateurfunkband empfangen werden konnten. Da an diesem Wettbewerb weltweit sehr viele Funkamateure teilnehmen, kann davon ausgegangen werden, dass aus den Gebieten, aus denen keine Stationen empfangen werden konnten, nicht etwa niemand sendete, sondern dass während dieser Zeit keine Ausbreitung zwischen diesen Regionen und dem Raum Nürnberg möglich war. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass die Sendeleistung der meisten Stationen etwa ein Kilowatt nicht überschritt und überwiegend mit geringen Antennenhöhen gearbeitet wurde.

Es zeigen sich vier Sektoren, aus denen die Ausbreitung jeweils über unterschiedliche Entfernung möglich war: während aus Richtung Osten (Russland) Stationen aus Entfernungen von 1500 bis 3000 Kilometer empfangen wurden, wurden aus Richtung Süd-Südost (Österreich, Ungarn, Italien, Slowenien usw.) Stationen schon ab Entfernungen von etwa 400 und bis etwa 1500 Kilometer Entfernung empfangen, Aus den Richtung Nordwest (England) und Südwest (Südfrankreich, Spanien) domierten hingegen Stationen aus Entfernungen zwischen etwa 700 und 1.000 Kilometern. Aus Richtung Westen (Nordfrankreich), Norden (Finnland) und Nordosten (z.B. St. Petersburg und Umgebung) konnten hingegen keine Stationen empfangen werden.



Abb. 72: Empfangene Amateurfunk-Stationen während der IARU Kurzwellenmeisterschaft, 11. Juli 2004, 12.50–13.30 UTC, Raum Nürnberg

Im Hinblick auf die vorgeschlagene Frequenzplanung für Lokalsender in 26 MHz-Bereich, wie sie im Abschnitt 5.2.2 auf Grundlage der „normalen“ Raumwellenausbreitung entwickelt wurde, ist nun auch die Ausbreitung über sporadische E-Schichten einzubeziehen. Um auch während der Sommermonate tagsüber gegenseitige Störungen der Sender auf eine Zeitwahrscheinlichkeit von unter ein Prozent zu begrenzen, darf das Gebiet, in dem eine Frequenz benutzt wird, nur eine maximale Ausdehnung von etwa 400 Kilometer haben. Das bedeutet aber, dass jedes der Gebiete mit etwa 1500 Kilometer Durchmesser, das der Planung zu Grunde gelegt wurde (Abb. 67) wiederum in vier Teilgebiete mit jeweils etwa 400 Kilometer Durchmesser aufgeteilt werden müsste, wobei jede Frequenz nur innerhalb eines Teilgebietes verwendet werden kann. Da bei der Planung nach Abb. 67 und Abb. 68 jeweils vier oder fünf Frequenzen für jedes der Gebiete mit 1500 km Durchmesser zur Verfügung stehen, bedeutet dies, dass letztlich in jedem der 400 Kilometer großen Teilgebiete nur noch eine Frequenz im 26 MHz-Bereich verfügbar ist. Somit käme in einem solchen Gebiet entweder ein Gleichwellennetz oder nur einige wenige Einzelsender mit ausreichendem Abstand (etwa 300 km für 1 kW-Sender) in Frage.

Alle anderen Strategien der Frequenzplanung würden dazu führen, dass während des Auftretens der sporadischen E-Schichten erhebliche Störungen in Kauf genommen werden müssen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts Campus-Radio wurde die Eignung des 26 Megahertz-Bereichs für lokalen Rundfunk mit dem DRM-Übertragungsverfahren im Rahmen von Feldversuchen, Messungen und theoretischen Überlegungen untersucht.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. DRM – Kleinsender mit Leistungen bis etwa 100 Watt lassen sich mit geringem Aufwand errichten und über längere Zeit betreiben.
2. Die Reichweite solcher Sender beträgt für mobilen Empfang etwa drei bis fünf Kilometer (10 Watt) und bis etwa 15 Kilometer (100 Watt bei exponiertem Senderstandort), bei Empfang mit Dachantennen können Reichweiten von bis zu 40 km erwartet werden.
3. Die erreichbare Tonqualität ist für das meiste Programmmaterial ausreichend. Es werden bei Mono-Betrieb und etwa 18 kbit/s Audiodatenrate etwa 11 kHz NF-Bandbreite möglich.
4. Empfang, insbesondere auch mobiler Empfang ist bei den gewählten Parametern (10 kHz Bandbreite, 16 QAM, Koderate 0,62) bei Feldstärken ab etwa 23 dB $\mu$ V/m möglich. Allerdings treten auch innerhalb des Radius, in dem diese Feldstärke überschritten ist, Empfangslücken auf, die durch „flat fading“ infolge von Mehrwegeausbreitung verursacht werden.
5. Der Empfang ist im allgemeinen durch den „man made noise“ begrenzt, häufig treten an einzelnen Empfangsorten Störungen für begrenzte Zeit auf, die den Empfang auch bei sonst ausreichender Feldstärke unmöglich machen.
6. In der Zeit des Sonnenfleckenmaximums tritt im 26 Megahertz – Frequenzbereich ionosphärische Fernausbreitung auf, insbesondere im Winter während der Tagesstunden. Dadurch treten erhebliche Feldstärken auch im Abstand von etwa 1500 bis 3000 Kilometer um einen Sender auf (in dem Gebiet, das durch einen Einfachsprung über die E- bzw. F-Schichten erreicht wird).
7. Während der Tagesstunden der Sommermonate kommt es – unabhängig von der Sonnenaktivität – zu Fernausbreitung über die dann häufig auftretende sporadische E-Schicht. Durch diesen Ausbreitungsmechanismus werden hohe Feldstärken in Entfernungen von etwa 400 bis 2500 Kilometer vom Sender erreicht.

Fasst man die vorgestellten Ergebnisse zusammen, so zeigt sich, dass der 26 MHz-Bereich nur mit großen Einschränkungen für den lokalen Rundfunk genutzt werden kann. Diese Einschränkungen beziehen sich insbesondere auf folgende Gesichtspunkte:

1. Die Empfangbarkeit mit mobilen und tragbaren Empfängern ist eingeschränkt. Auf Grund der ausgeprägten Mehrwegeausbreitung treten mehr oder weniger große "Funk-Löcher" auf. Dies kann bei Wellenlängen im Bereich von 11 Metern auch nicht leicht durch Empfangsantennen-Diversity ausgeglichen werden, insbesondere nicht bei tragbaren Geräten. Eine mögliche Abhilfe dagegen sind Gleichwellennetze oder andere Diversity-Verfahren, die eventuell im Rahmen der Entwicklung des DRM+ – Systems erarbeitet werden, das für den UKW-Bereich entwickelt wird, in dem ähnliche Ausbreitungsverhältnisse vorherrschen.

2. Aufgrund der zu erwartenden lokalen Störungen an vielen Empfangsorten, sowohl im städtischen als auch im ländlichen Umfeld, ist eine gewisse Leistungsreserve einzuplanen.

3. Sofern auch während Zeiten, in denen Raumwellenausbreitung über die normale E- bzw. F-Schicht oder die sporadische E-Schicht möglich ist, weitgehend ungestörter Empfang im Versorgungsgebiet eines Senders angestrebt wird (Zeitverfügbarkeit 99%), ist eine Frequenzplanung erforderlich, die international großräumig koordiniert sein muss. Nach einer Abschätzung wird nur die Verwendung von jeweils einem Kanal im 26 MHz-Bereich in einer Region von etwa 400 Kilometern Ausdehnung möglich sein. Dieser kann durch mehrere Sender in genügendem gegenseitigen Abstand genutzt werden. Die Summe der Leistungen der Einzelsender darf einige wenige kW nicht überschreiten.

4. Wenn man mehrere Kanäle in einem Gebiet benutzen möchte oder keine internationale Koordinierung erfolgreich zu Stande kommt, müssen erhebliche Einschränkungen der Versorgung im Hinblick auf die zeitliche Verfügbarkeit in Kauf genommen werden. Dies kommt eventuell für lokale Stationen in Frage, deren Versorgungsgebiet entweder sehr klein ist, sodass dort immer eine ausreichende Feldstärke auch bei kleinen Senderleistungen erreicht werden kann (z.B. im vorliegenden Fall des Campus-Radios einer Hochschule, siehe Abb. 47 a) oder die aufgrund ihres nicht-kommerziellen Charakters eine stark schwankende Reichweite und zeitweise Empfangsstörungen hinzunehmen bereit sind, wenn sie dadurch überhaupt eine Sendelizenz erhalten können. Wenn eine Vielzahl solcher Stationen lizenziert wird, ist allerdings auch dafür eine internationale Koordinierung erforderlich, um zu vermeiden, dass in anderen Ländern, die etwa ein Versorgungskonzept nach Punkt 3 realisieren möchten, die erzeugte Störfeldstärke unterhalb des dort vorherrschenden man made noise bleibt. Ebenso wie in diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die zulässige Gesamtleistung in einem Gebiet von etwa 400 Kilometer Erstreckung in der Größenordnung von einigen wenigen Kilowatt liegen wird. Aufgeteilt auf 100 Watt-Sender wären dann etwa 10 Sender auf einem Kanal in jedem Gebiet mit gegenseitigen Abständen von jeweils ca. 200 Kilometer möglich.

Insgesamt kann aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie nur zu einem vorsichtigen Vorgehen im Hinblick auf die Nutzung des 26 MHz-Bereichs für lokale DRM-Sender geraten werden, insbesondere, weil die Mechanismen, die zu Störungen durch Fernausbreitung führen, stark jahres- und tageszeitlich schwanken. In den nächsten Jahren (bis etwa 2008) ist die Sonnenaktivität gering, sodass viele der in diesem Zusammenhang störenden Fernausbreitungseffekte nicht oder nur sehr selten auftreten. Keinesfalls sollte daraus geschlossen werden, dass die Nutzung dieses Frequenzbereichs problemlos möglich sein wird.

Insofern ist die Entscheidung des DRM-Konsortiums, das System auch für die VHF-Bänder I und II zu erweitern, aus der Sicht des Lokalfunks durchaus zu begrüßen. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Problematik der sporadischen E-Schicht auch das Band I betrifft, wie von den Problemen mit Fernseh-Überreichweiten bekannt ist. Inwieweit sich die Problematik des flat fading bei Mobil- und Portabel-Empfang für diese Frequenzbereiche mit vertretbarem Aufwand lösen lässt, bleibt abzuwarten. Für lokale Sender, die eine hohe Versorgungssicherheit anstreben oder benötigen, wird der UKW-Bereich weiterhin vorzuziehen sein.

Als Empfehlung für Rundfunkanbieter, die Regulierungsbehörde und die Medienanstalten kann deshalb aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nur gegeben werden, dass Frequenzen im 26 MHz-Bereich nur an Anbieter lizenziert werden sollten, die sich der oben genannten

Einschränkungen bewusst sind und ausdrücklich einen Betrieb unter diesen Bedingungen wünschen.

Hinsichtlich der genannten Einschränkungen der Nutzung ist es fraglich, ob die Empfängerindustrie den 26 MHz–Frequenzbereich in DRM–Empfängern implementieren wird. Im Hinblick auf die Einführung von DRM wäre es sicher vorteilhaft, wenn auch eine lokale Komponente einen zusätzlichen Anreiz zum Kauf eines Empfängers geben würde, da der Empfang der internationalen Rundfunksender allein wohl nicht zu großen Empfängerstückzahlen führen würde. Wenn allerdings aufgrund der ausgeführten Einschränkungen an einem Ort nur jeweils ein Sender im 26 MHz–Band empfangbar ist, oder, wenn es mehrere sind, ihr Empfang zeitweise gestört sein kann, ist dieser Aufwand wohl kaum für alle DRM–Empfänger zu rechtfertigen. Allerdings ist es, wie ebenfalls im Rahmen dieses Projekts gezeigt wurde, kein großer Aufwand, ein Vorsatzgerät zu entwickeln, das in der Lage ist, den 26 MHz–Bereich zum Beispiel in das Mittelwellen–Band umzusetzen, so dass einzelne Lokalsender, die für bestimmte Hörergruppen besonders interessant sind, auf diese Weise empfangen werden könnten. Aufgrund der digitalen Übertragung ergibt sich dabei – abgesehen von einer vielleicht geringfügigen Verschlechterung der Empfänger–Empfindlichkeit – auch keine Einschränkung der Tonqualität. Sofern die Senderleistungen allerdings auf die Größenordnung von 10 bis 100 Watt begrenzt bleiben, kann nur bei Empfang mit einer Antenne in einer Höhe von mindestens 10m, zum Beispiel auf dem Dachboden oder auch über dem Dach mit einer einigermaßen zufrieden stellenden Reichweite gerechnet werden. Es bleibt auch zu befürchten, dass Fahrzeugantennen weiterhin nicht für den 26 MHz–Frequenzbereich optimiert sein werden, wodurch sich zusätzlich zu den durch das flat fading verursachten Empfangsproblemen erhebliche Einschränkungen bei der Reichweite für Mobilempfang ergeben werden.

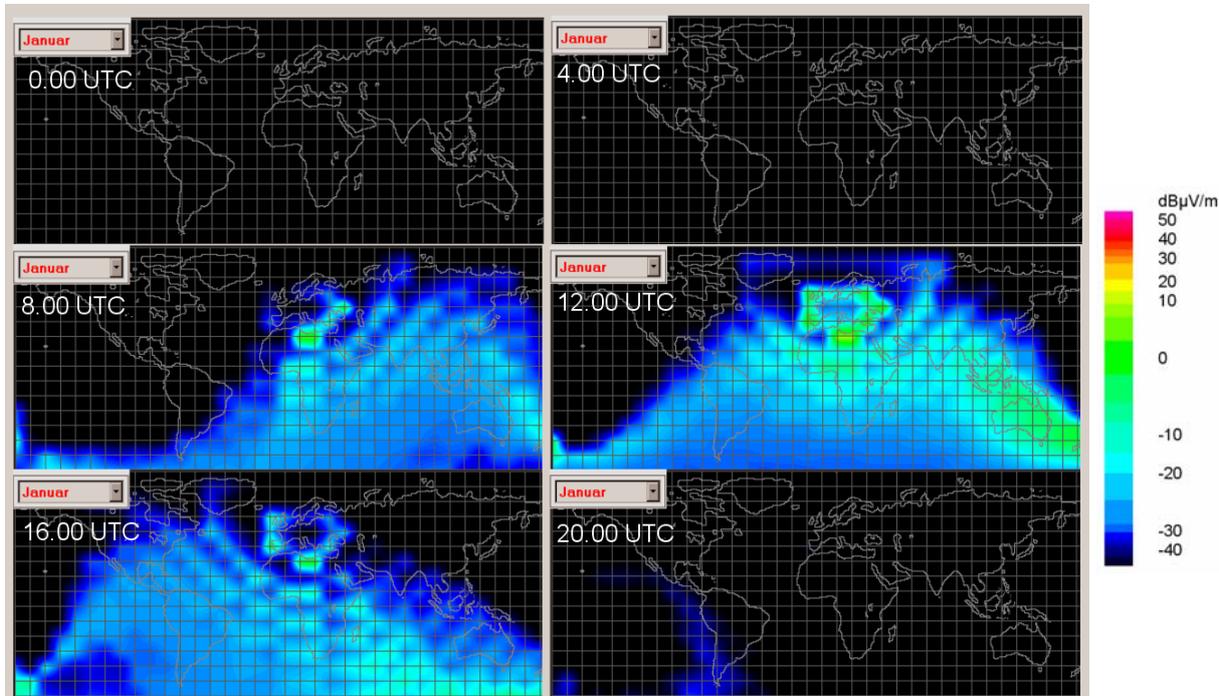
Es bleibt zu hoffen, dass dennoch die – wenn auch bescheidenen – Chancen, die der 26 MHz–Bereich für den lokalen Rundfunk bietet, in einer sinnvollen Weise genutzt werden können, so dass die gegenseitigen Störungen minimiert werden, und, so weit es aufgrund der Ausbreitungsverhältnisse möglich ist, den Sendern eine angemessene Reichweite ermöglicht wird. Dann können in diesem Frequenzbereich Stationen lizenziert werden, für die bisher eine Ausstrahlung im UKW–Bereich wegen des Mangels an Frequenzen und der Kosten nicht in Frage kommt, die aber bereit sind, Einschränkungen ihrer Reichweite, die zeitlich und örtlich beschränkt auftreten, hinzunehmen.



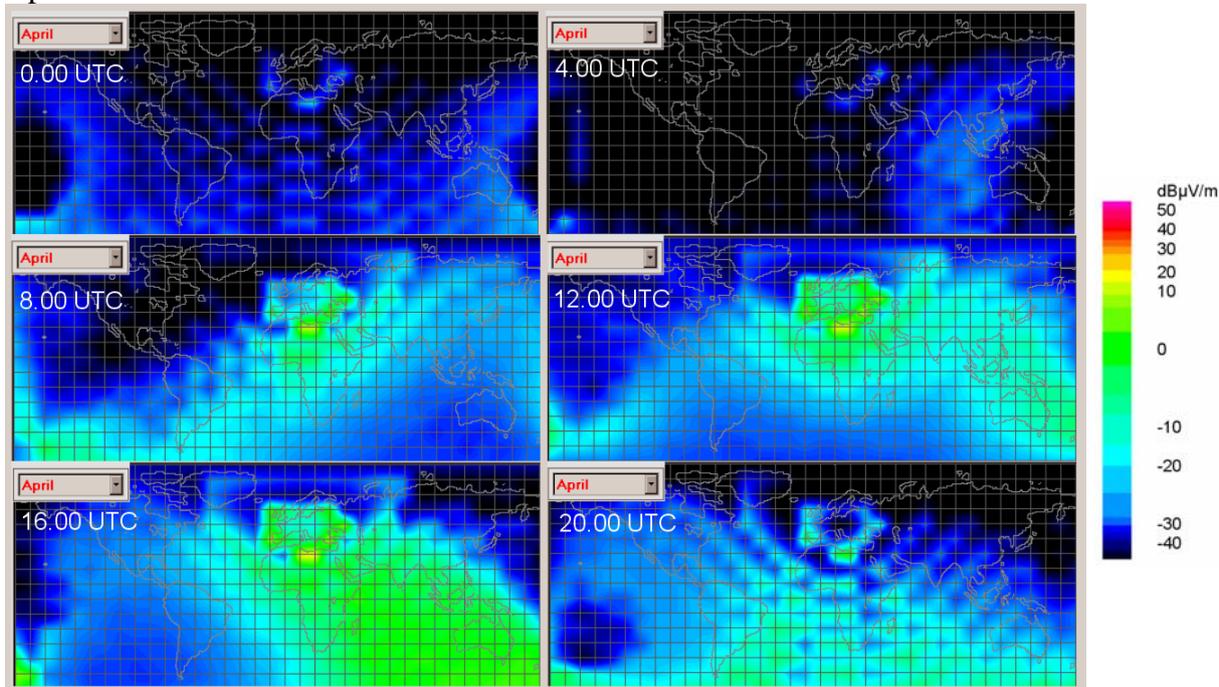
# Anhang 1: Feldstärkeprognosen für einen 1kW-Sender auf 26 MHz in Süddeutschland

*Im Sonnenfleckennmaximum, R = 150*

Januar

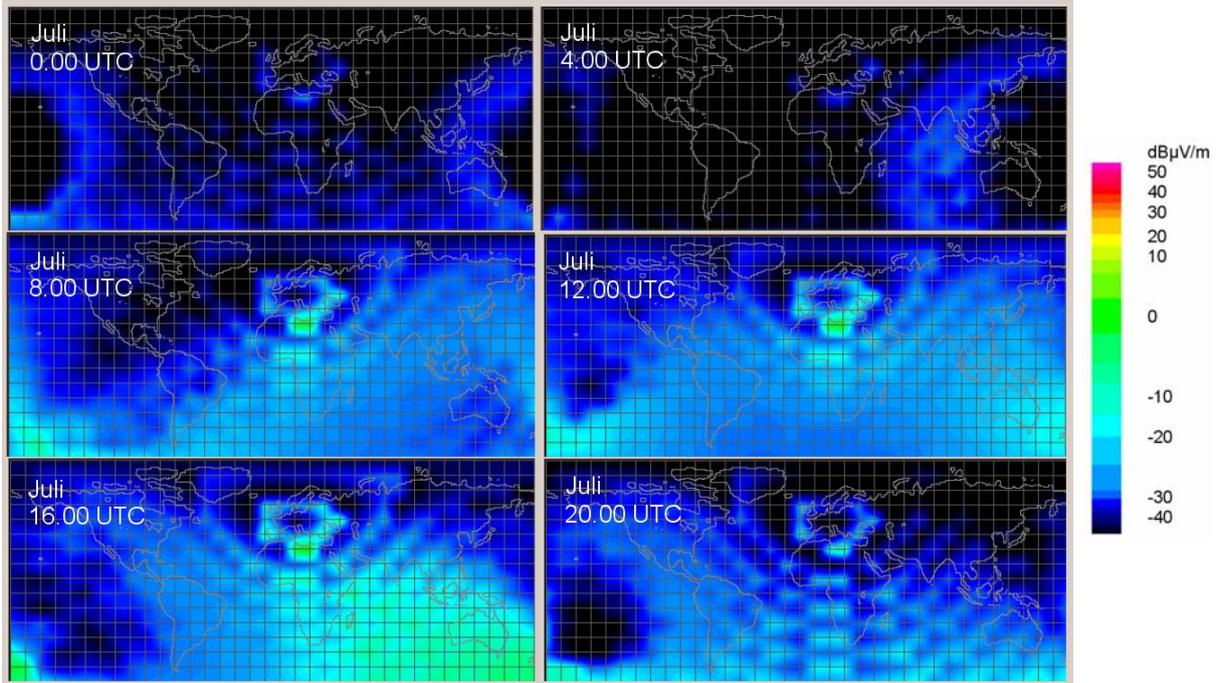


April

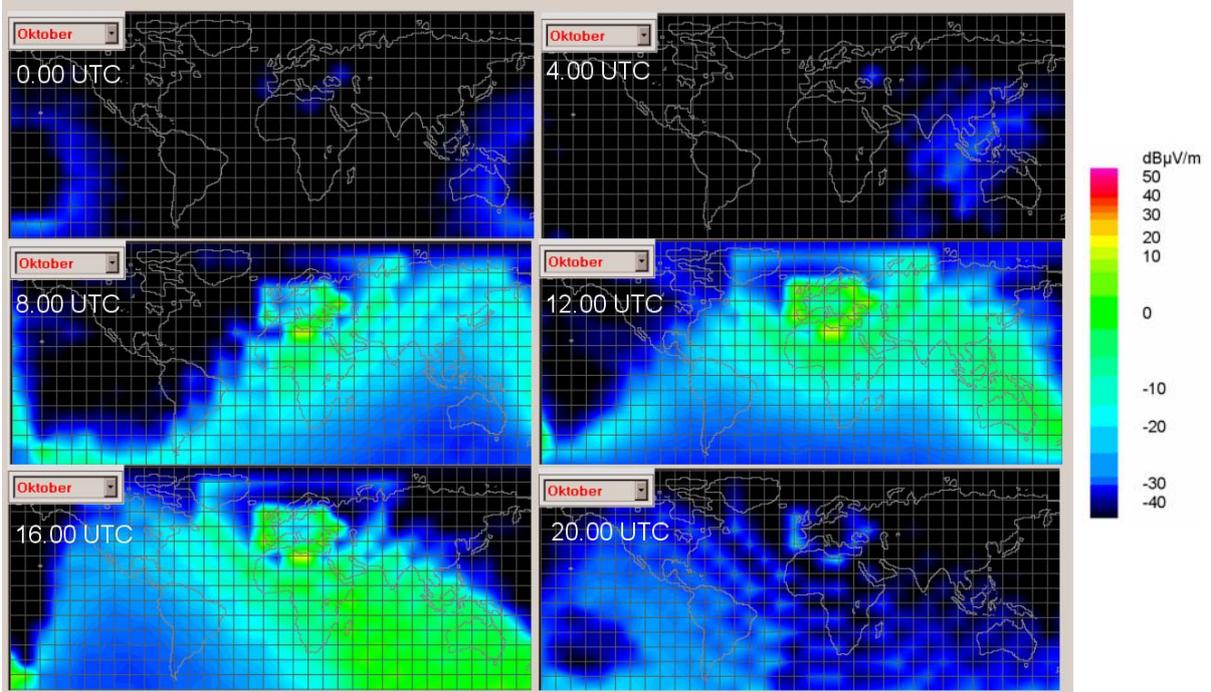


## Im Sonnenfleckenmaximum, $R = 150$

Juli

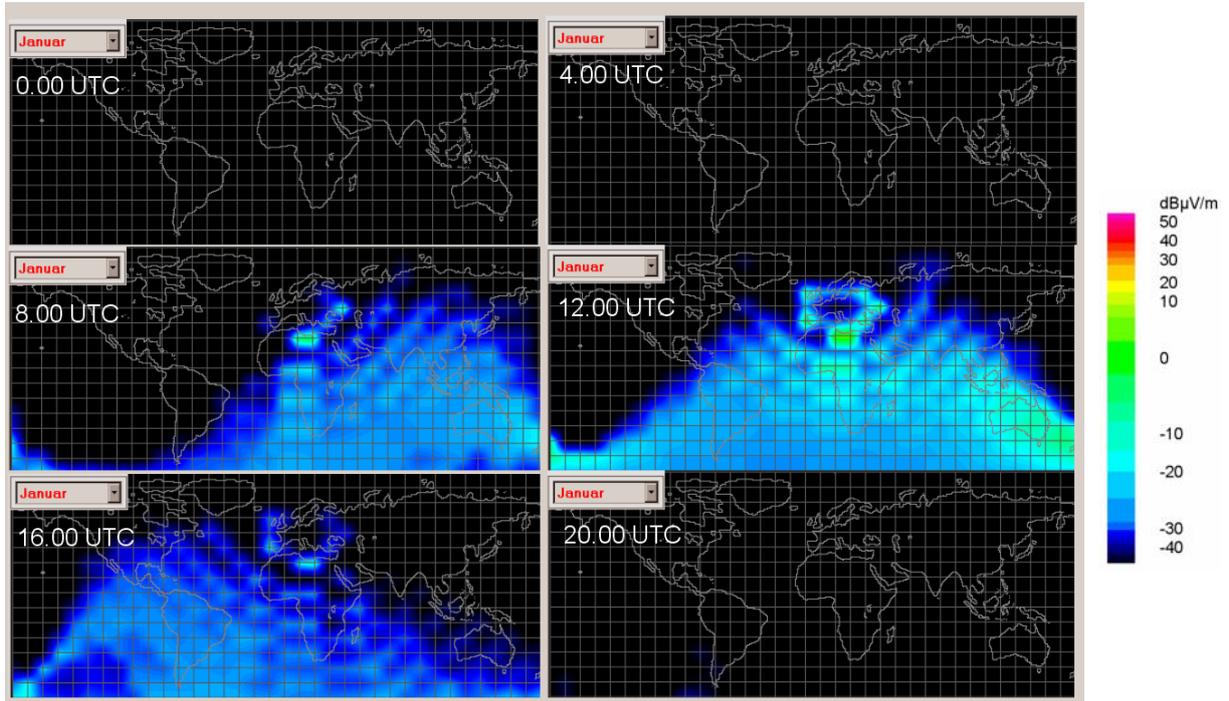


Oktober

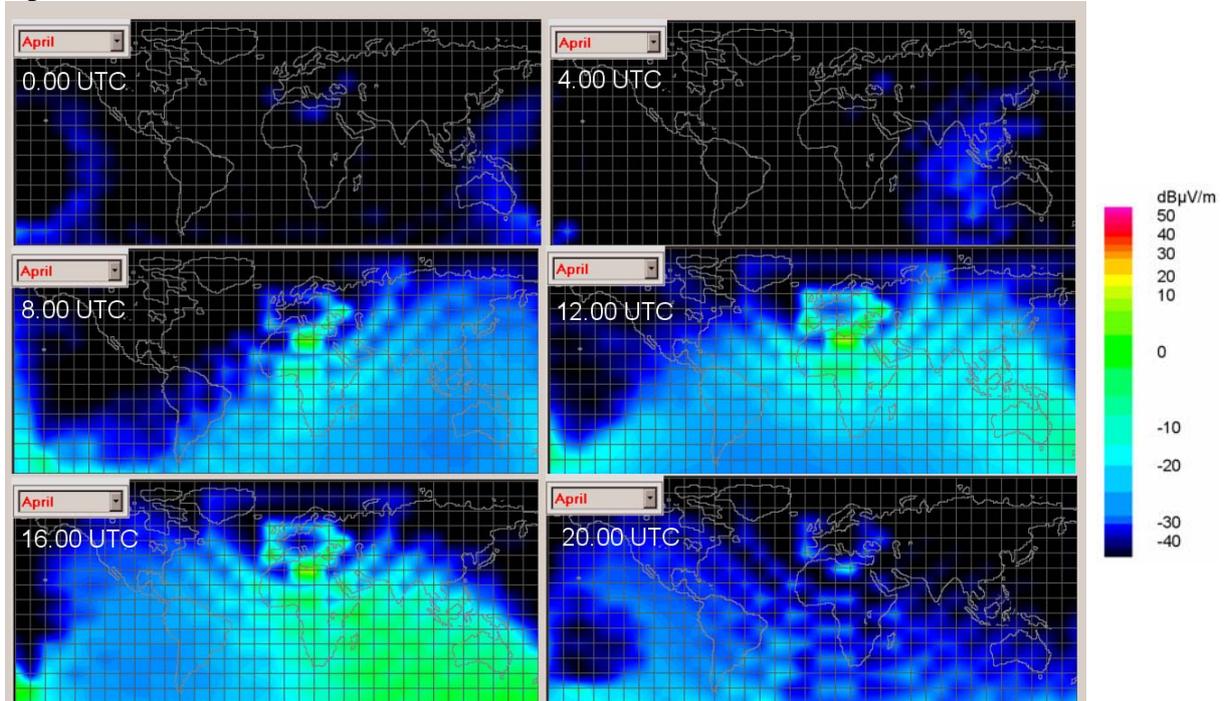


### In den ca. fünf Jahren um das Sonnenfleckenmaximum ( $R = 100$ )

Januar

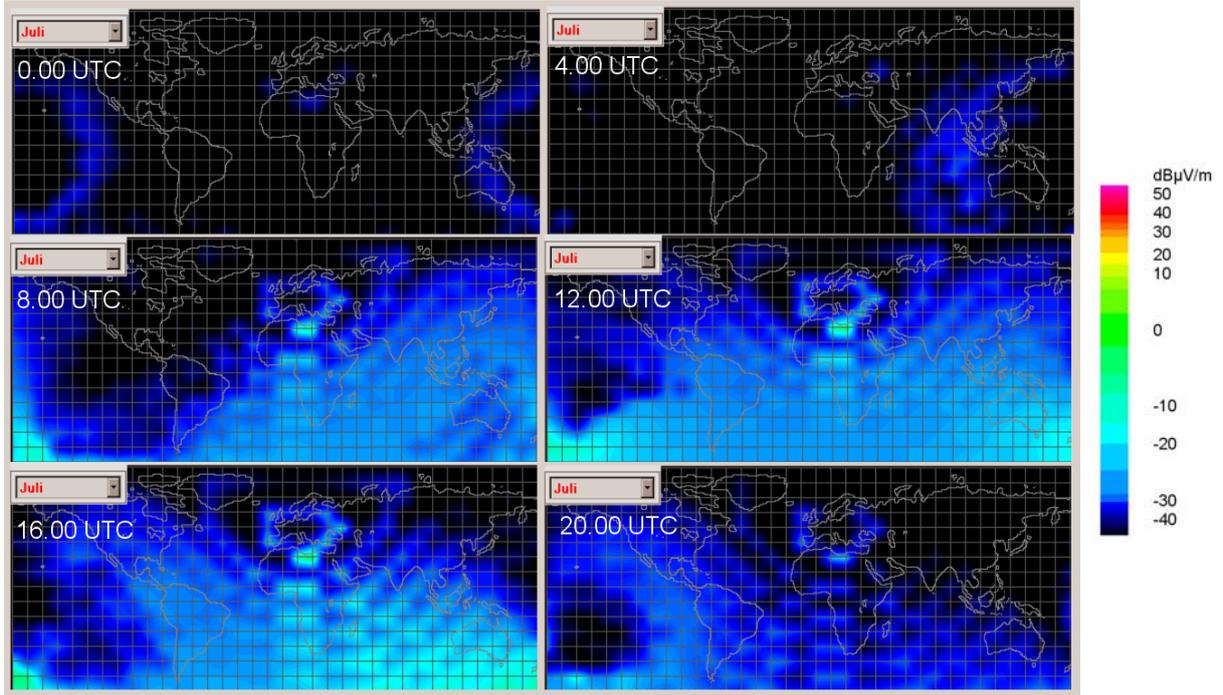


April

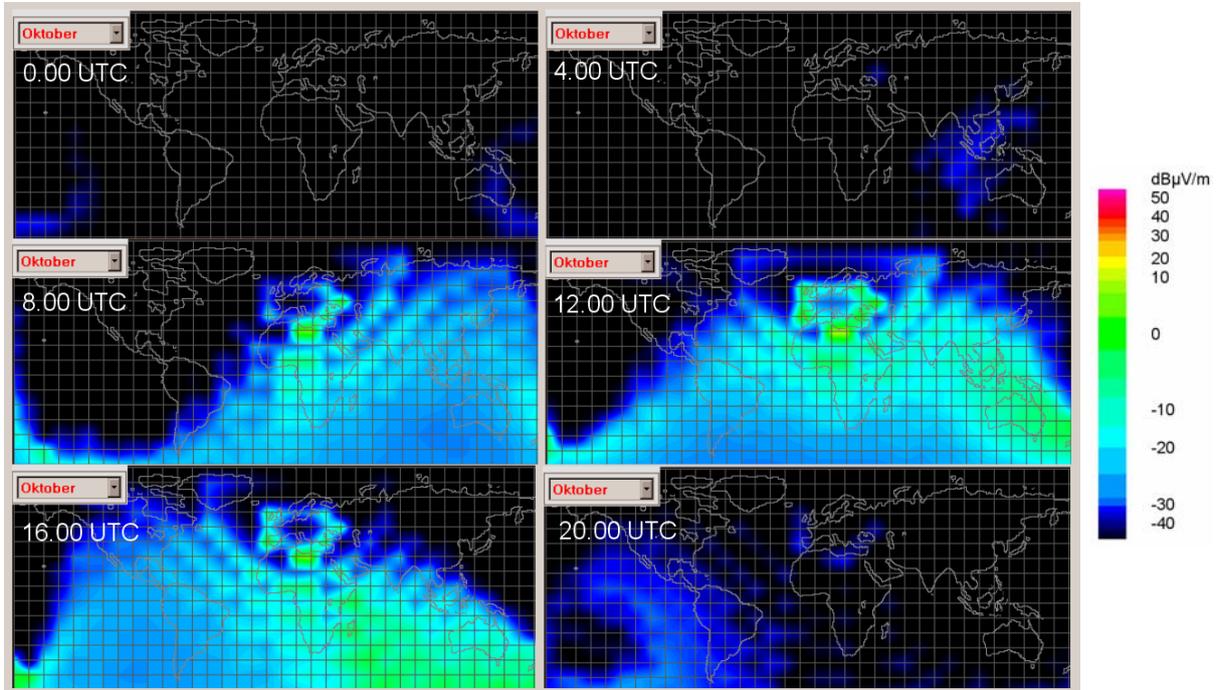


## In den ca. fünf Jahren um das Sonnenfleckenmaximum (R = 100)

Juli

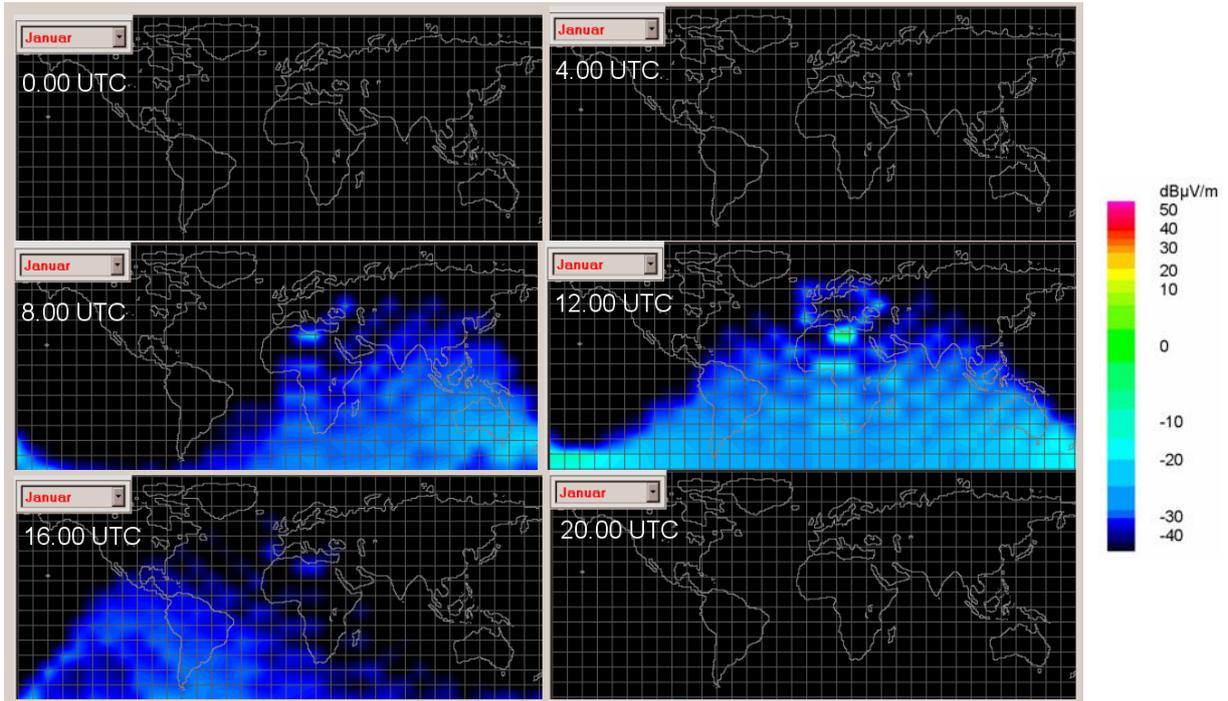


Oktober

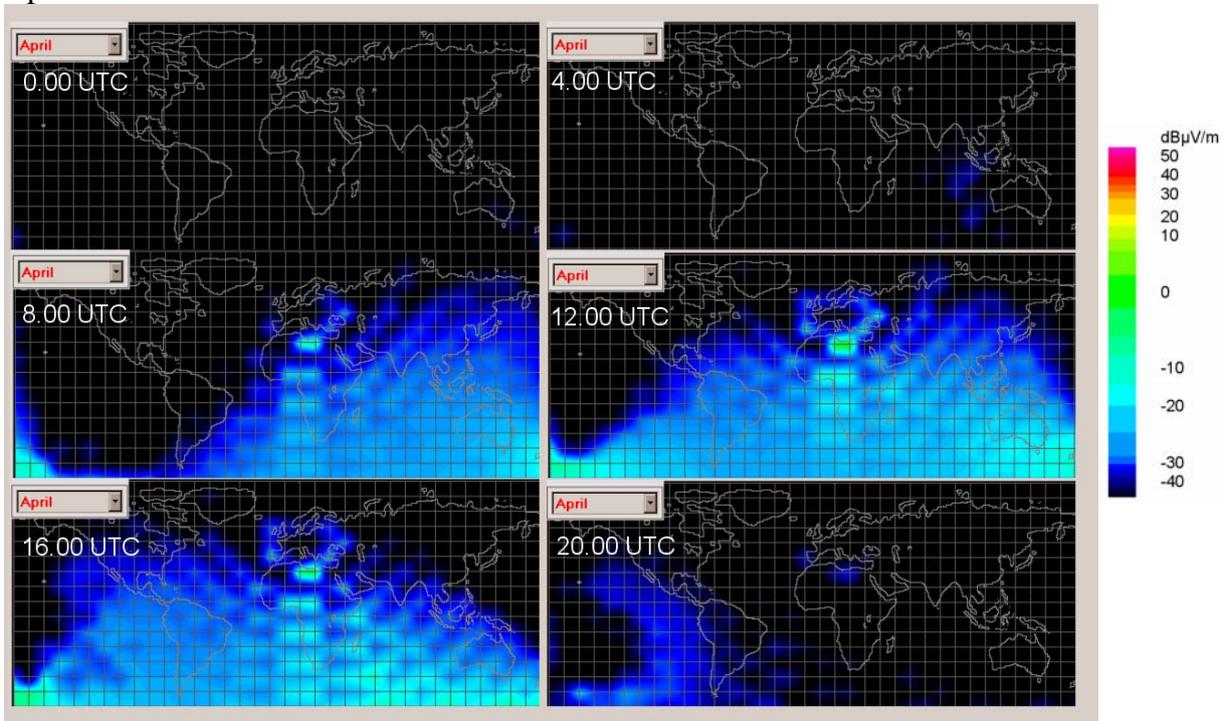


### In den ca. fünf Jahren um das Sonnenfleckenminimum ( $R = 50$ )

Januar

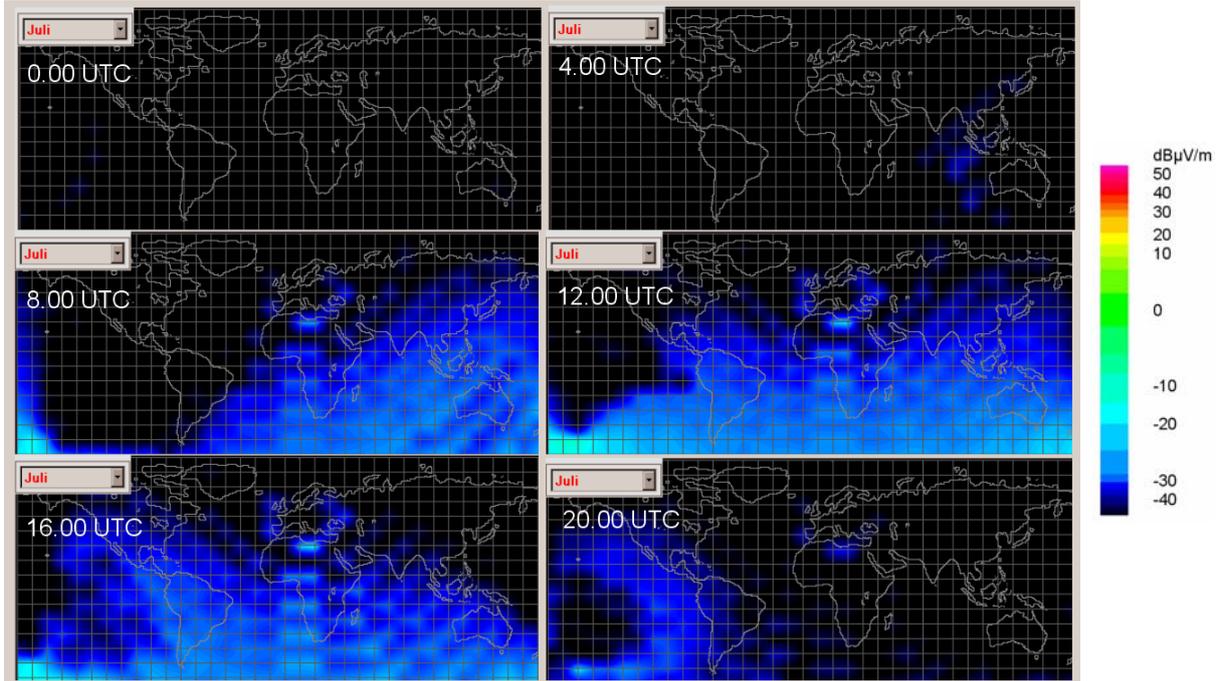


April

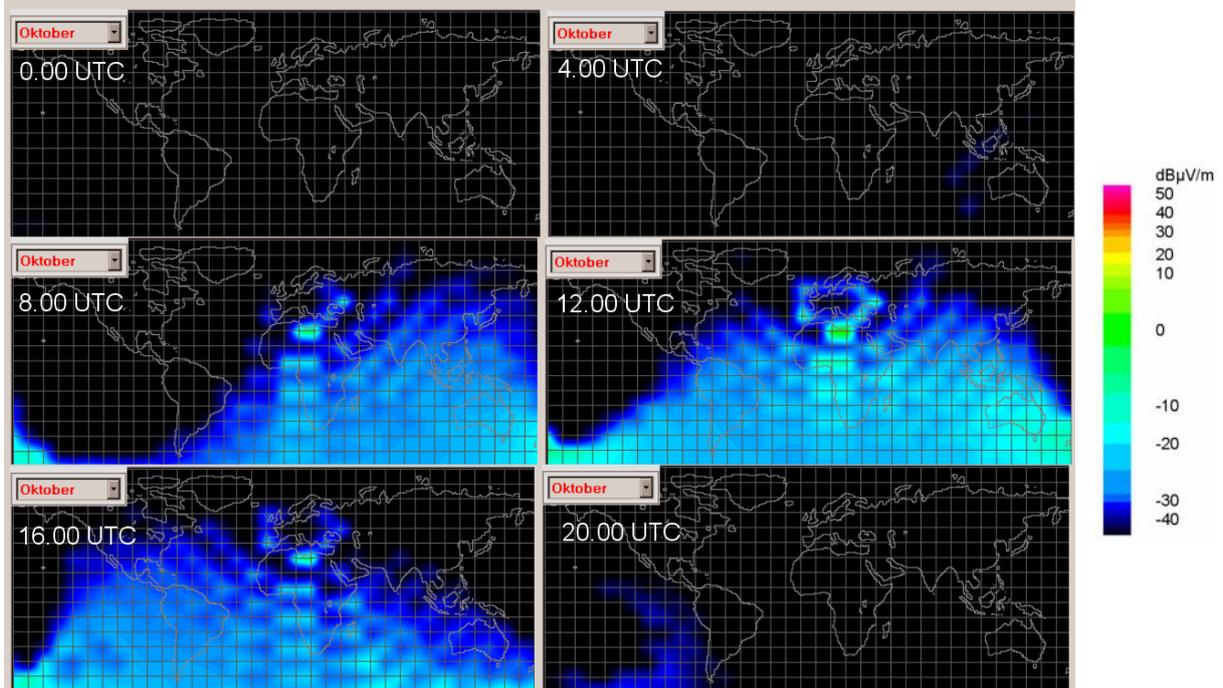


## In den ca. fünf Jahren um das Sonnenfleckenminimum ( $R = 50$ )

Juli

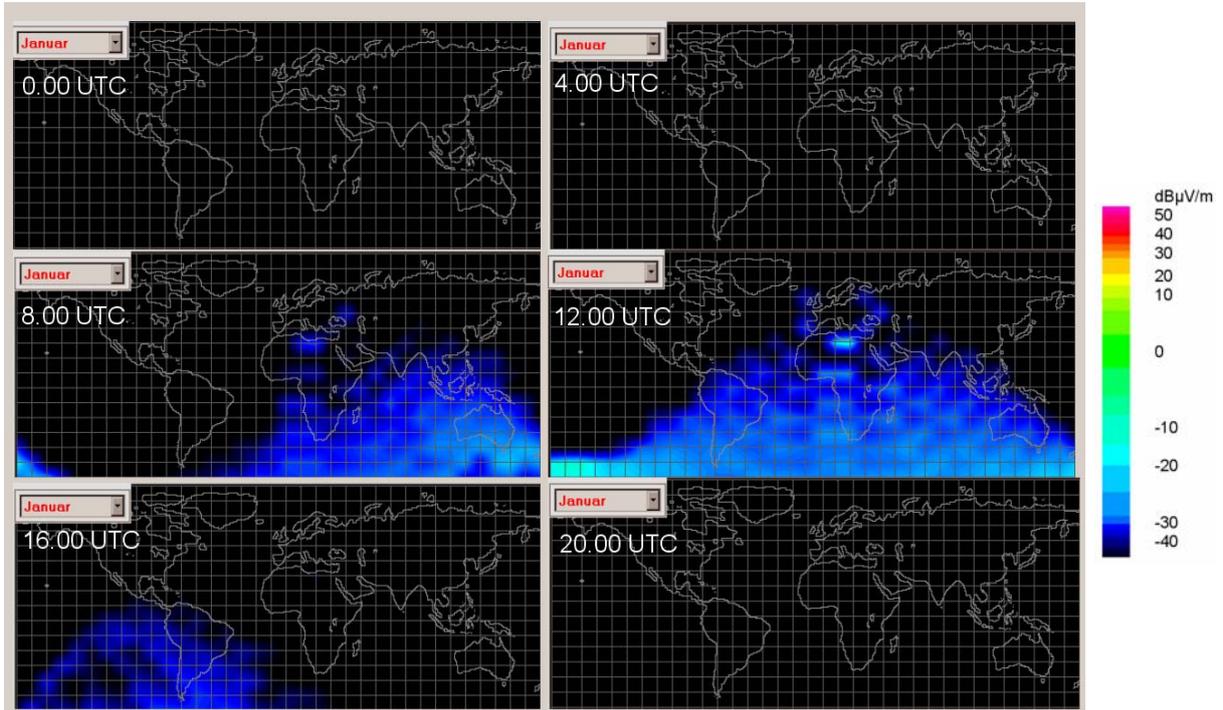


Oktober

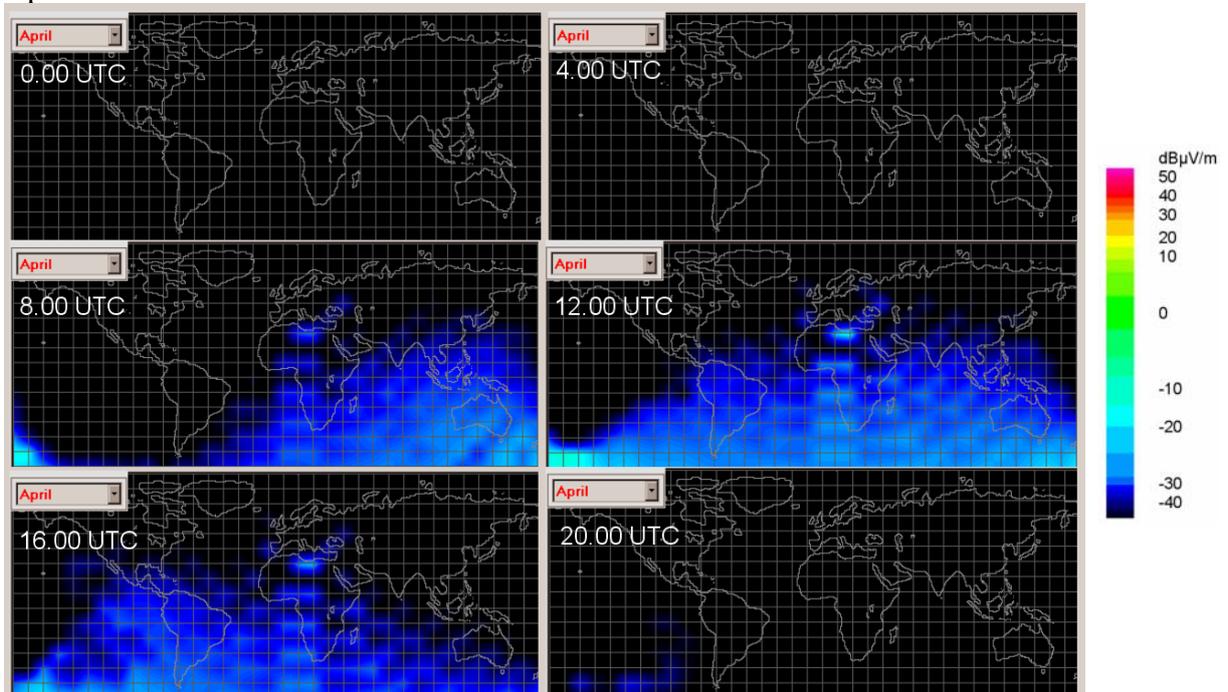


## Im Sonnenfleckennminimum, $R = 15$

Januar

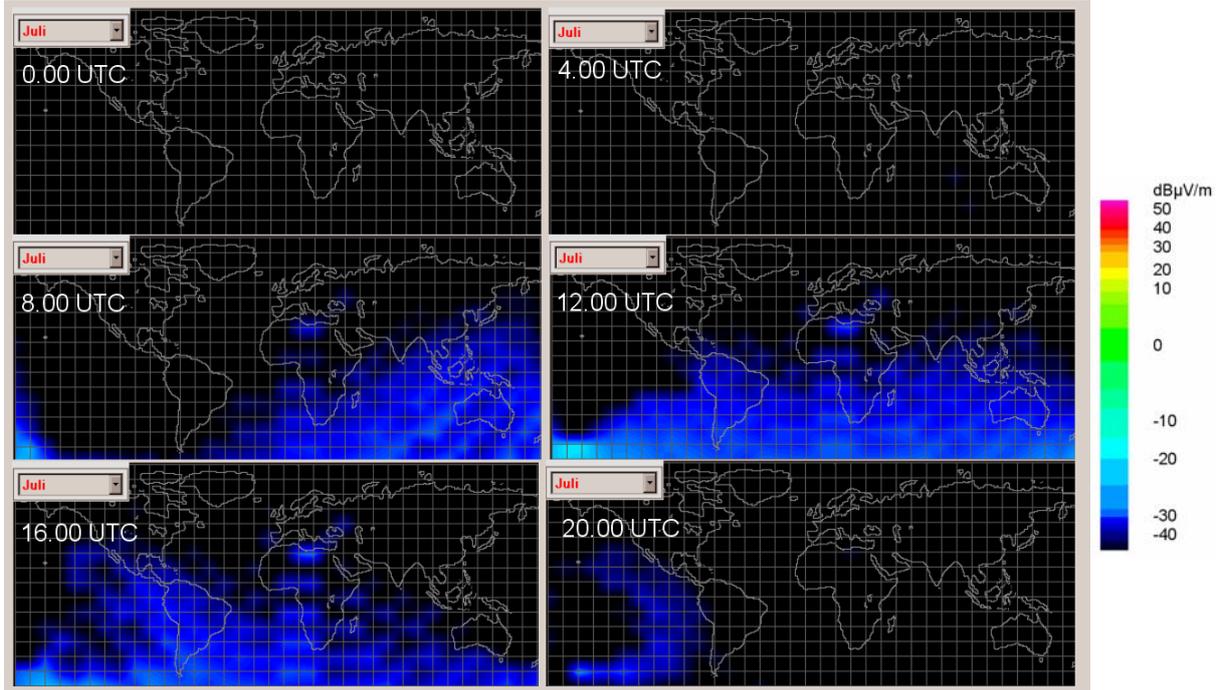


April

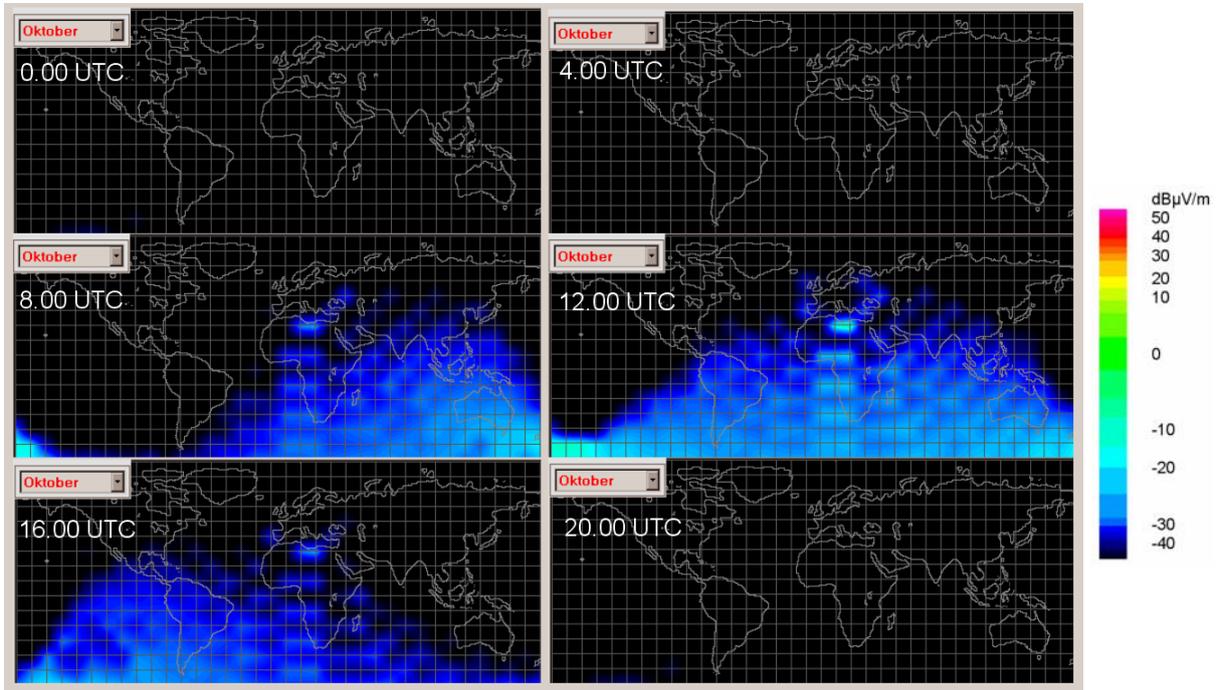


## Im Sonnenfleckennminimum, $R = 15$

Juli



Oktober



## Literatur- und Quellenverzeichnis

Blomeier, Konrad, Untersuchung zur digitalen Lokalrundfunkversorgung mit Sendern kleiner Leistung im Kurzwellenbereich, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, Juni 2004

Dietz, M. and S. Meltzer, CT-aacPlus — a state-of-the-art Audio coding scheme, EBU Technical Review July 2002, p. 7

DRM Broadcasters' User Manual, DRM Konsortium, 2004 (erhältlich als pdf auf <http://www.drm.org>)

ETSI, ETS 201 980, Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification

Günther, Sven, Entwicklung und Erprobung von Antennen für DRM-Empfang bis 30 MHz, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg 2004

Henrik Schulze, Digital Audio Broadcasting: Das Übertragungssystem im Mobilfunkkanal, Ausarbeitung für ein Seminar vom 19. bis 21. September 1995 in Meschede. <http://www.fh-meschede.de/public/schulze/docs/dab-seminar.pdf>

Hoeg, Wolfgang, Thomas Lauterbach (Eds.), Digital Audio Broadcasting, Wiley, Chichester 2003, 2. Auflage

Hofmann, F., Ch. Hansen, and W. Schäfer, Digital Radio Mondiale (DRM) Digital Sound Broadcasting in the AM Bands, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 49, No. 3, September 2003, p. 319

Hofmann, F., DRM (Digital Radio Mondiale) – der neue digitale Mittel- und Kurzwellenrundfunk, Kleinheubacher Berichte, Bd. 44, 2001, S. 266

Hörfunk- und Fernsehsender in der Bundesrepublik Deutschland, Stand 1. Januar 2003, hrsg. vom Norddeutschen Rundfunk

Lexikon der Astronomie, Spektrum akademischer Verlag Heidelberg 1995

Miller, John E., HF Satellite Sound Broadcasting – A Preliminary Assessment, IEEE Journal on selected Areas in Communications, Vol. SAC-3, No. 1, January 1985, p. 186

National Geophysical Data Center, [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA)

Rawer K., Structure of E<sub>s</sub> in Temperate Latitude. In: Ernest K. Smith, Sadami Matsushita (Eds.), Ionospheric Sporadic E, Pergamon Press, 1962

Recommendation ITU-R P.534-4, Method for calculating sporadic – E field strength

Richter, Michael, Michael Thiele, Digitale Mittelwelle 531 digital, Schriftenreihe der Medienanstalt Sachsen-Anhalt, Band 5, Vistas-Verlag, Berlin 2004, S. 55

Rohrbacher, Hans A., Theodore J. Cohen, George Jacobs, Kurzwellen-Ausbreitung. Frech-Verlag, Stuttgart, 1985

Stott, J., Digital Radio Mondiale: key technical features, Electronics & Communications Engineering Journal, February 2002, p.4

Vogelsang, Erich, Wellenausbreitung in der Funktechnik, R. Oldenburg Verlag München 1979

Werle, Horst, Technik des Rundfunks, R. v. Decker's Verlag, Heidelberg 1989

Widdau, Stefan, Frank Held, Deutsche Welle, Testbericht vom Juni 2004

Zitzmann, Reinhard, Implementierung eines Softwaremodells der Übertragungskette beim digitalen Kurzwellenrundfunk DRM, Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, 2003