



**Fachhochschule
Kaiserslautern**
University of Applied Sciences



Landeszentrale für
Medien und Kommunikation
Rheinland-Pfalz

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Steil
Dipl.-Ing. (FH) Felix Schad
Martin Köhler**

**Abschlussbericht zum
DRM⁺-Feldversuch Kaiserslautern
Versuchszeitraum: Januar – August 2009**

November 2009

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand mit Unterbrechungen im Zeitraum August bis September 2009. Er bildet den Abschluss des groß angelegten Feldversuchs mit DRM⁺ im UKW-Band der Fachhochschule Kaiserslautern. Das vorliegende Dokument beschreibt ausführlich die zu Beginn des Jahres aufgenommenen Arbeiten.

Das bereits im Vorjahr [SS08] in Kaiserslautern aufgebaute, deutschlandweit einzigartige Szenario, das die Stadt und das Umland von Kaiserslautern zu einer riesigen „Testumgebung“ von zwei bzw. drei UKW-Rundfunksendern macht, ist keine Realisierung die von zwei Personen alleine mit all ihren Wartungs- und Materialanforderungen, dem Know-How und vor allem dem versuchsbedingten Messaufwand zeitlich und finanziell handhabbar ist. Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgehen, dass dieser Bericht aus der Feder von drei Personen stammt. Durch Herrn Köhler ist das Team an der FH Kaiserslautern angewachsen. Hr. Köhler absolviert im Rahmen dieses Versuchs sein praktisches Studiensemester an der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz und ist schon seit längerem direkt in die Aktivitäten dieses Projekts eingebunden.

Unser Dank gilt in erster Linie der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz, mit der die Fachhochschule eine langjährige intensive und fruchtbare Zusammenarbeit zum Thema Digitalisierung des UKW-Rundfunks pflegt. Eine ebenfalls herausragende Danksagung geht an das Ministerium des Inneren und Sport des Landes Rheinland-Pfalz, das im Rahmen seiner Multimediainitiative rlpinform dieses Projekt durch seine finanzielle Unterstützung fördert.

Trotz der Vergrößerung der Arbeitsgruppe blieb und bleibt der personelle und materielle und informationelle Bedarf immens. Die Autoren nutzen an dieser Stelle die Gelegenheit, allen Beteiligten zu danken, die ihnen mit Rat, Tat, personeller und materieller Unterstützung zur Seite standen und stehen. Ein besonderes Dankeschön ergeht an dieser Stelle an das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen, die Bundesnetzagentur (BNetzA), den Südwestrundfunk (SWR), der Rohde & Schwarz Vertriebs GmbH und der ATMEL Germany GmbH. All diese schafften durch Ihr Engagement die Voraussetzungen für das Projekt. Wertvolle Hilfe und Unterstützung des Vorhabens erhielten die Autoren darüberhinaus von den nachfolgend genannten Firmen und Institutionen: Robert Bosch GmbH, Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS), Dolby Laboratories, ARD.ZDF medienakademie, Ruoss AG, LfK Baden-Württemberg, BMW, Media Broadcast GmbH, SSB-electronic GmbH, PURE digital, NP Technologies Inc. und dem Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover. Diese Auflistung impliziert in keinsten Weise irgendeine Gewichtung. Die Autoren hoffen inständig, niemanden vergessen zu haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Michael Feilen [Fei], der nicht nur mit seiner Software „Spark“ den entscheidenden Grundbaustein des Unternehmens legte.

Zum Abschluß danken wir unseren Familien, Frauen, Freundinnen und auch Freunden dafür, daß sie es uns ermöglichen unserer Arbeit mit Engagement und Hingabe zum Preis vieler später Abende, verkürzten Wochenenden und mehr nachzugehen.

DRM – und ganz besonders DRM⁺ – war, ist und bleibt ein spannendes Thema.
In diesem Sinne: Viel Freude bei der Lektüre!

Kaiserslautern, November 2009

Andreas Steil

Felix Schad

Martin Köhler

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	7
2. Einleitung	9
2.1. Ausgangslage	9
2.2. Motivation und Zielsetzung	10
2.3. Inhaltsübersicht	11
2.4. Hinweise für den Leser	12
 I. Laboruntersuchungen	 13
3. Zielsetzung und Konzeption	15
4. Aufbau des DRM⁺-Senders- und Empfängers	17
5. Messungen am Empfänger	19
5.1. Rauschmaß des Frontends	19
5.2. Linearität des Frontends	19
5.3. ZF-Filter	21
5.4. Phasenrauschen	23
5.5. Phasenrauschen des gesamten Empfängersystems	24
5.6. Gesamtrauschmaß	24
6. Messungen am Sender	27
6.1. Linearität bei Ansteuerung mit OFDM-Signalen	27
6.2. Phasenrauschen	29
7. Messungen an der kompletten Übertragungsstrecke	31
7.1. Phasenrauschen	31
7.2. Ermittlung der BER-Performanz im AWGN-Kanal	31
8. Definition des DRM⁺-Empfangszustandes	35
9. Schutzabstandsmessungen	37
9.1. Störkriterium	37
9.2. Verwendete Signalformen	37
9.2.1. DRM ⁺ -Nutzsignal	37
9.2.2. FM-Störsignale	38
9.2.3. DRM ⁺ -Störsignal	42
9.3. Messaufbauten	42
9.3.1. Störsignal: FM	43
9.3.2. Störsignal: DRM ⁺	44
9.4. Messung FM stört DRM ⁺	44
9.4.1. 4-QAM-Variante	45

9.4.2. 16-QAM-Variante	46
9.5. Messung DRM ⁺ stört DRM ⁺	49
9.5.1. 4-QAM-Variante	49
9.5.2. 16-QAM-Variante	50
9.6. Vergleich der Ergebnisse	52
II. Feldmessungen	55
10. Zielsetzung und Konzeption	57
10.1. Grundgedanke	57
10.2. Sender	58
10.3. Empfänger	60
10.4. Messung der HF- und NF-Kenngrößen im Feld	61
10.4.1. HF-Parameter	61
10.4.2. NF-Parameter	61
10.5. Parameter der verwendeten Signale	63
10.5.1. Nutzsignal: DRM ⁺ (TX FH)	63
10.5.2. Nutzsignal: FM (TX FH)	65
10.5.3. Störsignal: FM (TX RB)	66
11. DRM⁺ im stationären Empfangsfall	67
11.1. Messeinrichtung	67
11.2. Wahl der Messorte	70
11.3. Ergebnisse	74
11.3.1. HF-Verhältnisse an den Empfangsorten	75
11.3.2. Fall (a): keine Störungen durch TX RB	78
11.3.3. Fall (b): Störung durch TX RB 87,6 MHz	81
11.3.4. Fall (c): Störung durch TX RB 87,7 MHz	84
11.3.5. Fall (d): Störung durch TX RB 87,8 MHz	87
11.3.6. Stabilität der Versorgung – ein Versuch	90
12. DRM⁺ im mobilen Empfangsfall	93
12.1. Messkonzepte und -verfahren	93
12.1.1. Messeinrichtung	94
12.1.2. Messroute	101
12.1.3. Auswerteverfahren	103
12.2. Ergebnisse	105
12.2.1. Allgemeines	105
12.2.2. Fall (a): keine Störungen durch TX RB	113
12.2.3. Fall (b): Störung durch TX RB 87,7 MHz	119
12.2.4. Fall (c): Störung durch TX RB 87,8 MHz	121
III. Gesamtbewertung	123
13. Zusammenfassung und Bewertung der Labor- und Feldphase	125
14. Ausblick	131
IV. Anhänge	135
15. Schutzabstandsmessungen	137

15.1. Spektrumsaufnahmen der verwendeten Signale mit hoher Dynamik	137
15.2. Messergebnisse in tabellarischer Form	139
15.2.1. Störsignal FM-Mono und FM-Stereo	139
15.2.2. Störsignal DRM ⁺	147
Literaturverzeichnis	155
Abbildungsverzeichnis	161
Tabellenverzeichnis	164

1. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Eignung von DRM⁺ als potentiellen Kandidaten zur Digitalisierung des VHF-Bandes II, genauer des UKW-Bandes (87,5 MHz – 108,0 MHz). Der Fokus dieses Dokuments liegt auf der mit DRM⁺ erreichbaren *Versorgung*¹. Die zu diesem Themenkomplex durchgeführten Arbeiten, die Grundlage des Berichts sind, fanden mit Unterbrechungen im Zeitraum Januar bis August 2009 statt. Im vorliegenden Bericht werden einerseits die durchgeführten Arbeiten ausführlich beschrieben und dokumentiert und andererseits die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert und bewertet.

Folgende Ziele wurden mit den durchgeführten Arbeiten angestrebt und erreicht:

1. Der DRM⁺-Sender und -Empfänger wurden sowohl einzeln und als auch als Übertragungskette in Bezug auf wesentliche Kernparameter, wie z. B. Linearität, Phasenrauschen, Rauschzahl und Dekodergüte, vermessen.
2. Auf der Basis dieser Kenntnisse wurden geeignete grundlegende Planungsparameter zum DRM⁺-Empfang abgeleitet und messtechnisch validiert.
3. Der zur Frequenzplanung wichtige Parameter „Schutzabstand“ von DRM⁺ gegenüber UKW-FM-Signalen und DRM⁺-Signalen wurde messtechnisch erfasst.
4. Eine auf dieser Datenbasis beruhende Versorgungsprognose für den DRM⁺-Sender der FH Kaiserslautern wurde erstellt.
5. Zur Erprobung und Validierung der o. g. Parameter und Prognosen wurden vielfältige Messungen im Rahmen eines Strahlungsversuchs (Feldversuch) durchgeführt und das Versorgungsgebiet des UKW-FM / DRM⁺-Hybridsenders der FH Kaiserslautern eingehend untersucht. Dies geschah sowohl im Hinblick auf *stationären* als auch auf den *mobilen* Empfang.

Nach eingehender Würdigung und Bewertung aller bisherigen Erkenntnisse zu DRM⁺ leiten die Autoren folgende Schlussfolgerungen für die DRM⁺-Versorgung im UKW-Band ab:

Im Vergleich zur UKW-FM-Versorgung hat DRM⁺

1. eine höhere Versorgung,
2. eine deutlich höhere Störresistenz, und zwar nahezu unabhängig von der Störmodulation (FM oder DRM⁺)
3. im Versorgungsgebiet einen deutlich stabileren mobilen Empfang.

Weiterhin stellen die Autoren fest, dass – wie bei anderen digitalen Rundfunksystemen auch – die Parameter „Versorgung“ (bzw. die Versorgungssicherheit) und „Sendeleistung“ im interferenzbegrenzten Fall gegeneinander austauschbar sind.

Zusammenfassend zeigt der vorliegende Versuch, daß DRM⁺ aufgrund seines Versorgungspotentials ein sehr gut geeigneter Kandidat zur Digitalisierung des VHF-Bandes II ist.

¹Auf die bereits abgeschlossenen Arbeiten zur Kompatibilität von DRM⁺ mit UKW-FM und anderen Funkdiensten wird im vorliegenden Dokument nicht eingegangen; der Leser sei diesbezüglich auf [Ber05, Leh06, SSR07, HSE07, SSL08, SSL08] verwiesen.

Während der Fertigstellung dieses Berichts wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IIS zahlreiche Verbesserungen insbesondere an der Kanalschätzung des DRM⁺-Decoders vorgenommen. Die in diesem Dokument beschriebenen Ergebnisse in Hinsicht auf die Empfangsqualität von DRM⁺ sind somit nicht falsch – sie wurden lediglich mit einem noch nicht ganz optimalen Empfänger durchgeführt. Die Performance im Feld bzw. in den Simulationen könnte somit noch besser sein als ermittelt.

2. Einleitung

2.1. Ausgangslage

Im Zuge der Umsetzung der Entwicklungsperspektiven für den regionalen Hörfunk in Rheinland-Pfalz ist es Ziel, im Rahmen praktischer Erprobungen zu untersuchen, ob die z. Zt. diskutierten neuen digitalen Übertragungstechniken für den Hörfunk auch zur Umsetzung der regionalen und lokalen Strukturen in Rheinland-Pfalz einsetzbar sind. Der Fokus liegt dabei auf der Digitalisierung des UKW-Bands, für das es zwar einen Abschaltzeitpunkt kraft Gesetz (TKG) im Jahr 2015 gibt aber weder technische noch marktregulative Lösungen. Zur digitalen Umstellung des UKW-Bereichs scheidet DAB aus, und auch für HD-RadioTM werden aus technischer Sicht kaum Chancen für eine Nutzung im europäischen Raum gesehen. Daher konzentrierten sich die technischen Untersuchungen auf die Weiterentwicklung des DRM-Systems [Ins09]. Das DRM-System bietet mit dem seit August 2009 standardisierten „Mode E“ – im Rahmen dieses Dokuments als DRM⁺ bezeichnet – einen vorzüglich geeigneten Kandidaten für ein digitales UKW-Hörfunksystem.

Die bisherigen Arbeiten zu DRM⁺, die von der FH Kaiserslautern in enger Kooperation mit der Landesanstalt für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz bzw. der Technischen Konferenz der Landesmedienanstalten (TKLM) durchgeführt wurden, haben erste richtungweisende Ergebnisse im Zuge der Standardisierung von DRM⁺ geliefert, die aufzeigen, unter welchen technischen Randbedingungen der UKW-Hörfunk mit DRM⁺ in einem Migrationsszenario mit FM-Sendern digitalisiert werden könnte. Zu diesen Arbeiten zählen insbesondere

- Technische Machbarkeitsuntersuchung zu DRM⁺ als Rundfunkübertragungsverfahren [Ber05, Leh06].
- Konzept und Implementierung der echtzeitfähigen DRM/DRM⁺-Modulators „Spark“ [Fei05, Fei].
- Ausführliche Laboruntersuchungen zum Thema „Verträglichkeit zwischen DRM⁺ und HD-RadioTM mit UKW-FM und angrenzenden Funkdiensten (BOS-Funkdienste, Flugfunk)“ [SSR07, HSE07].
- Aufbau des weltweit ersten echtzeitfähigen DRM⁺-Senders und Empfängers und Durchführung eines Feldversuchs mit DRM⁺ im UKW-FM-Frequenzbereich [SSL08, SSL08].

In der technischen Machbarkeitsuntersuchung [Ber05, Leh06, SKL⁺06] stand die Frage „Erfüllt DRM⁺ die Anforderungen an ein modernes Übertragungssystem als möglicher Ersatz für UKW-FM?“ im Vordergrund. Diese Frage konnte eindeutig mit „ja“ beantwortet werden. In der Laboruntersuchungen [SSR07, HSE07] stand die Frage nach der „Sozialverträglichkeit“ von DRM⁺ im Fokus, also die Frage „Unter welchen Bedingungen verträgt sich DRM⁺ mit seinen Nachbarn?“. Im Ergebnis der Laboruntersuchungen wurde festgestellt, dass

- die angrenzenden Funkdienste kein offensichtliches Verträglichkeitsproblem mit DRM⁺ haben.
- DRM⁺-Sender in das FM-Netz eingeplant werden können, wenn sie mit einer reduzierten Leistung im vgl. zu typischen, leistungsstarken FM-Sendern betrieben werden.

Als weiteres Ergebnis aus den Labormessungen zeigt sich, dass das Messen des Schutzabstands gemäß Richtlinie

- keine *hörbaren* Audiostörungen beim FM-Empfang bewirkt,
- mit FM-Nutz- und FM-Störsignalen erfolgt, die *nicht repräsentativ* für heutige MPX-Signale sind,
- eine *Empfangssituation* unterstellt, die so im realen Umfeld *nicht aufzufinden* ist. In den realen Empfangssituationen gibt es zum einen immer mehr als ein Störsignal, und zum anderen können die beteiligten Signale aufgrund von Mehrwegeausbreitung reflexionsbehaftet sein.

Die Frage nach der „Sozialverträglichkeit“ von DRM⁺ mit UKW-FM läßt sich demnach auf Basis der Labormessungen nicht uneingeschränkt mit „ja“ beantworten, so dass weitere Untersuchungen nötig sind. Unter diesem Gesichtspunkt wurde der Feldversuch im Vorjahr durchgeführt. Dieser bestätigte die oben genannten Thesen der Labormessungen und zeigte, daß unter Einbezug der realen Verhältnisse im Feld die verträgliche Einplanung eines DRM⁺-Senders einfacher ist, als die Labormessungen vermuten ließen. Der Feldversuch 2008 lieferte viele Erkenntnisse zu der Fragestellung inwiefern ein DRM⁺-Sender das bestehende analoge UKW-FM-Netzwerk beeinflusst. Gleichzeitig konnte im Rahmen dieses Versuchs weltweit erstmalig die komplette DRM⁺-Übertragungskette durch die Realisierung eines echtzeitfähigen Sender- und Empfängerpaars geschlossen werden. Die zeitliche Befristung der Versuchsfunklizenz lies es allerdings nicht zu, im Rahmen einer systematischen Untersuchung das Versorgungspotential des Senders der FH Kaiserslautern im DRM⁺-Modus messtechnisch zu erfassen.

2.2. Motivation und Zielsetzung

Aufgrund der im vorigen Abschnitt angesprochenen Tatsache, daß die Performanz des DRM⁺-System im realen Umfeld noch nicht bewertet werden konnte, konzentriert sich der in diesem Dokument beschriebene Feldversuch auf genau diesen Aspekt. Schliesslich konnte bisher nur lediglich gezeigt werden, daß es möglich ist einen DRM⁺-Sender unter bestimmten Bedingungen verträglich in das bestehende FM-Rundfunknetz zu integrieren. Der Nachweis des Nutzens dieser Massnahme wurde allerdings vor allem im praktischen Einsatz noch nicht erbracht.

Zur Gewinnung einer umfassenden Aussage über das Versorgungspotential der DRM⁺-Anlage der FH Kaiserslautern ist es notwendig, nicht nur die reine Systemperformanz im Feld zu bewerten. Vielmehr sind Feldmessungen nur dann sinnvoll verwertbar, wenn das komplette System in seiner Gänze betrachtet wird. Vor der Aufnahme weiterer Feldmessungen ist es notwendig, Sender und Empfänger messtechnisch zu charakterisieren. Zudem müssen geeignete Merkmale und Masszahlen festgestellt und verifiziert werden, die die Aussage „Empfang möglich“ bzw. „Empfang nicht möglich“ möglich machen.

Von Interesse ist nicht nur die alleinige Betrachtung des Versorgungspotentials des Systems. Viel entscheidender ist die Feststellung und Festlegung von Kriterien, anhand derer ein DRM⁺-Sender und sein Versorgungsgebiet mit den Mitteln der Funknetzplanung beschrieben werden kann. Daher wird in dieser Versuchsphase auch dieser Aspekt beleuchtet.

Anhand dieser gesteckten Ziele wurde der hier beschriebene Versuch mit folgender Zielsetzung durchgeführt:

1. Messtechnische Charakterisierung des Sender- und Empfängerpaars:

Zur Definition des Begriffs „DRM⁺-Versorgung“ ist es notwendig, die Einflüsse der verwendeten Komponenten auf die Güte des abgestrahlten DRM⁺-Signals sowohl Sender- als auch Empfängerseitig zu identifizieren. Auf dieser Basis kann festgelegt werden, welche notwendigen Feldstärken zur Versorgung eines Gebiets mit DRM⁺ notwendig sind.

2. Messtechnische Bestimmung der Schutzabstände des DRM⁺-Systems:

Mit den gewonnenen Kenntnissen der Übertragungskette und der Definition des Versorgungsbegriffs wird es möglich, die Schutzabstände für das DRM⁺-System messtechnisch zu erfassen.

Hierzu ist der Fall zu betrachten, daß der Empfang durch ein UKW-FM-Signal oder ein anderes DRM⁺-Signal gestört wird. Die auf diese Weise ermittelten Werte sind zwar nur für den verwendeten Empfänger gültig, zeigen aber – insbesondere durch die Detailkenntnis des Empfängersystems – die generelle Tendenz der notwendigen Schutzabstände für DRM⁺-Empfänger.

3. *Konzeption und Realisierung eines Strahlungsversuchs zur Validierung der Planungsparameter und Vergleich mit dem FM-System:*

Im Rahmen durch einen Strahlungsversuch sind die Erkenntnisse der beiden vorangegangenen Punkte zu verifizieren. Gleichermassen sollen durch systematische Messungen die Unterschiede der Versorgungsbereiche eines DRM⁺-Senders mit denen eines FM-Senders verglichen werden. Hierzu wird der Sender der FH Kaiserslautern entweder als DRM⁺-Sender oder als FM-Sender betrieben, der in beiden Fällen mit der gleichen Strahlungsleistung das jeweilige Signal durch die gleiche Antenne auf der gleichen Frequenz abstrahlt. Es sind sowohl Messungen im stationären, als auch im mobilen Empfangsfall durchzuführen. Durch die Nutzung eines zweiten UKW-FM-Senders an einem anderen Standort wird das Signal des Senders der FH Kaiserslautern gezielt gestört, um die Verhältnisse in einem kleinem Funknetz zu simulieren. Die Unterschiede der versorgten Fläche durch den Nutzsender FH Kaiserslautern sind sowohl im DRM⁺- als auch im FM-Modus zu erfassen.

2.3. Inhaltsübersicht

Der vorliegende Bericht gliedert sich in drei Teile. Teil I (S. 15 ff.) beschreibt ausführlich die Laboruntersuchungen und gliedert sich wie folgt:

Kapitel 3 beschreibt die wesentlichen Ziele dieser Phase.

Kapitel 4 stellt diejenigen Komponenten vor, auf die in diesem Teil des Berichts das Hauptaugenmerk gerichtet wird: Der verwendete DRM⁺-Sender und DRM⁺-Empfänger der FH Kaiserslautern.

Kapitel 5–8 beschreiben die Untersuchungen an den Komponenten der Sende- und Empfangskette. Dies beinhaltet sowohl die einzelnen Bestandteilen dieser als auch deren Eigenschaften als komplettes Übertragungssystem. Darauf basierend werden anschliessend die grundlegenden Parameter definiert, die zu einem quasi-fehlerfreien Empfang eines DRM⁺-Signals eingehalten werden müssen.

Kapitel 9 beschreibt die mit diesem System durchgeführten Schutzabstandsmessungen, basierend auf den Definitionen in Kapitel 8. Anhand der ermittelten Ergebnisse können erste Frequenzplanungen eines DRM⁺-Nutzsenders sowie erste Prognosen zur Empfangbarkeit des Signals vom Senderstandort FH Kaiserslautern unternommen werden. Diese Ergebnisse sind für die Planungen zur zweiten Versuchsphase, dem Strahlungsversuch, notwendig.

Teil II (S. 57 ff.) beschreibt die Phase des Strahlungsversuchs:

Kapitel 10 beschreibt die Zielsetzung dieser Versuchsphase, die Versuchskonzepte und die damit verbundenen Versuchsaufbauten.

Kapitel 11 dokumentiert die getätigten Messungen im stationären Empfangsfall.

Kapitel 12 beschreibt die Untersuchungen im mobilen Empfangsfall mit dem DRM⁺-System.


Im abschliessenden Teil III (S. 125 ff.) werden die Ergebnisse in einer abschliessenden Bewertung zusammengefasst. Diese gliedert sich wie folgt:

Kapitel 13 fasst die Resultate der Laborphase- und Feldphase zu einer zusammen und schliesst mit einer Gesamtbewertung ab.

Kapitel 14 gibt einen Ausblick über weiterführende Arbeiten mit DRM⁺.

2.4. Hinweise für den Leser

Dieses Dokument ist am besten in seiner digitalen Fassung zu lesen. Die farblich umrandeten Textstellen markieren Hyperlinks, mit denen bequem innerhalb des Dokuments zu den referenzierten Stellen gesprungen werden kann. Mit der „Zurück“-Taste des Anzeigeprogramms kann wieder zur ursprünglichen Lesestelle verzweigt werden. Zusätzlich steht in diesem Dokument eine besondere Kennzeichnung spezieller Links zur Verfügung:

Das Symbol  verweist auf eine externe Bilddatei. Insbesondere spezielle digitale Landkarten werden nach dem Anklicken von einem externen Anzeigeprogramm in einer höheren Auflösung als in der Druckversion zur Verfügung gestellt.

Hinweis: Externe Dateien können nur dann gefunden werden, wenn die Ordnerstruktur der Zusatzdaten dieses Berichts nicht verändert wurde.

Teil I.

Laboruntersuchungen

3. Zielsetzung und Konzeption

Dieser Teil des vorliegenden Berichts dokumentiert die durchgeführten Untersuchungen an den im Versuch verwendeten DRM⁺-Sender- und Empfängerkomponenten. Mit den Ergebnissen werden einige grundlegende Parameter zur Prognose der erzielbaren Versorgung des Senderstandorts FH Kaiserslautern mit den Mitteln der Funknetzplanung abgeleitet.

Hierzu wird gemäß folgender Systematik vorgegangen:

Zunächst wird die Grundstruktur des verwendeten DRM⁺-Senders und -Empfängers vorgestellt. Bei diesen Anlagen wird auf den bewährten Aufbau aus dem Jahr 2008 zurückgegriffen. Daher werden die Konzepte dieser Geräte im folgenden nur noch grob beschrieben. Weitere Details sind [SS08] zu entnehmen.

Im Anschluß an die Vorstellung der Übertragungskette wird diese anhand verschiedener typischer Gütekriterien messtechnisch charakterisiert. Ziel dieser Untersuchung ist die

- Kenntnis der mittleren Bitfehlerraten-Performance ($\overline{\text{BER}}$) unter Einbeziehung des DRM⁺-Senders und -Empfängers.
- Definition eines geeigneten Gütekriteriums zur Ermöglichung der Entscheidung „DRM⁺-Empfang möglich“ bzw. „DRM⁺-Empfang nicht möglich“.

Aus den oben genannten Punkten und der Kenntnis der Geräteeigenschaften werden im Anschluß die Mindestempfangsleistungs- und Mindestfeldstärkepegel für den DRM⁺-Empfang abgeleitet. Durch die Festlegung dieser Kennwerte ergeben sich die Parameter für die folgenden Schutzabstandsmessungen. Dies beinhaltet im wesentlichen die bei den Messungen zu nutzenden Empfängereingangsleistungen und das angestrebte Versorgungskriterium (z.B. eine Schwelle der akzeptablen Bitfehlerrate, Ausfall der Audiodecodierung oder eines anderen Dienstes). Mit den dort ermittelten Ergebnissen können erste Funknetzplanungen für die Versorgung des DRM⁺-Senders der FH Kaiserslautern durchgeführt werden, auf denen der zweite Versuchsteil – die Strahlungsphase (Teil II, S. 57 ff.) – aufbaut.

4. Aufbau des DRM⁺-Senders- und Empfängers

Die von der FH-KL realisierten Sender- und Empfängerprototypen, die in diesem Versuch verwendet werden, sind in den Abbildungen 4.1 (rechte Bildhälfte) bzw. 4.2 dargestellt. Weitere Details hierzu finden sich z.B. in [SS08].

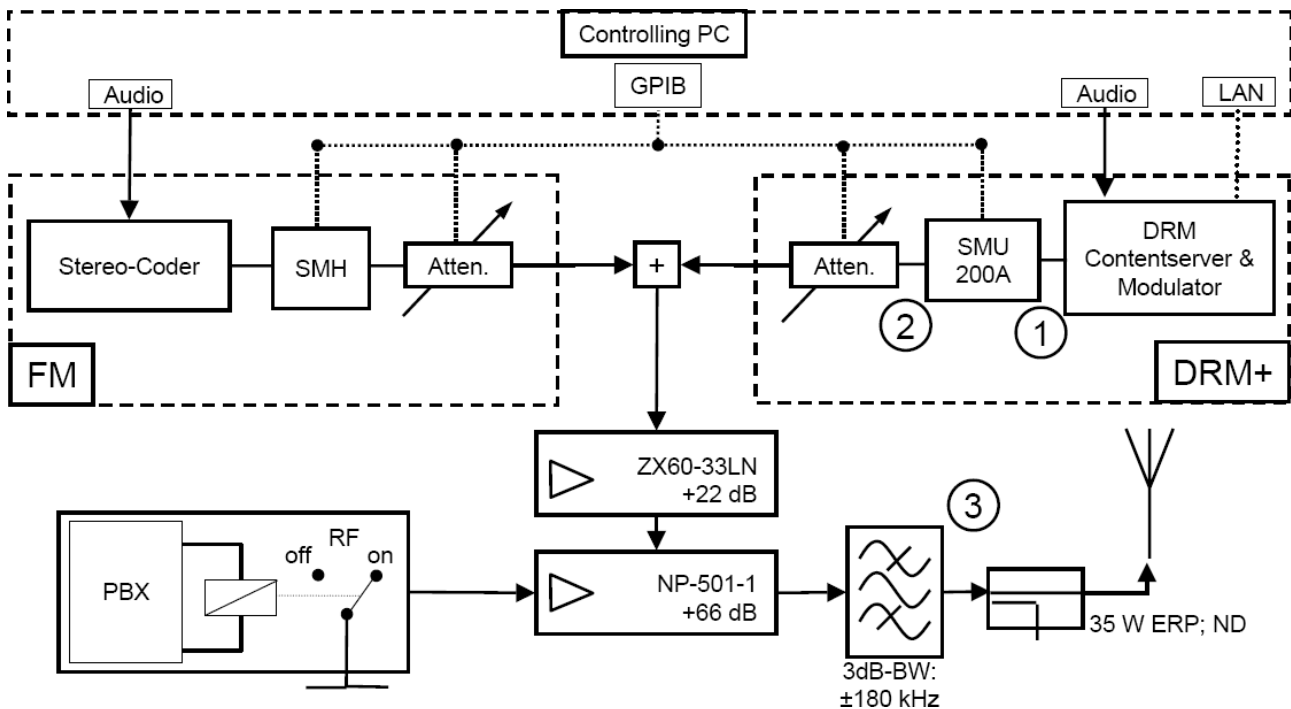
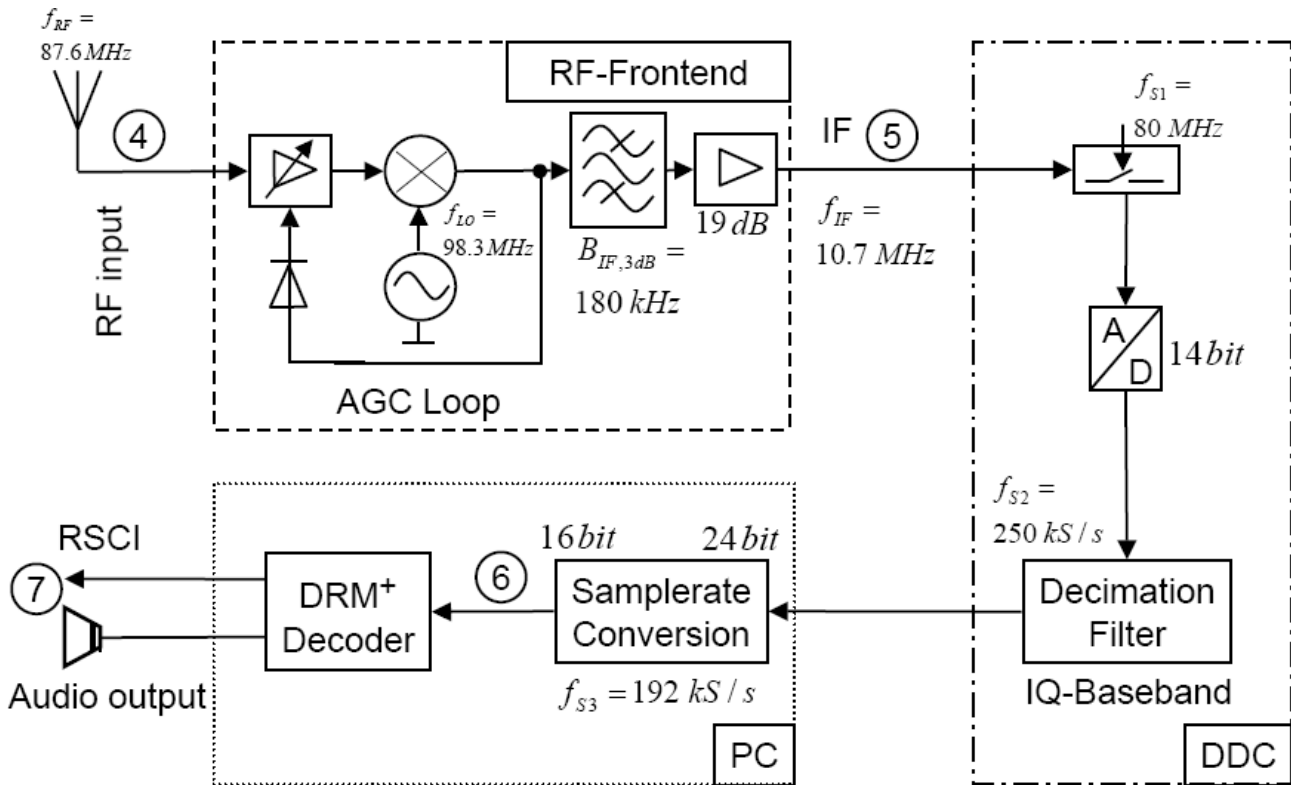


Abb. 4.1.: Blockschaltbild des Hybridsenders TX FH

Auf der Senderseite werden die zu übertragenden Datenströme (z.B. Musik, Sprache, Bilder, Hypertext, ...) vom Contentserver angenommen und in den DRM-Multiplex eingebettet. Nachfolgend führt die Sendersoftware Spark [Fei05, Fei] die OFDM-Modulation durch. Die sich am Ausgang dieser Softwarekette ergebenden komplexen Basisbandsignale (s. Referenzpunkt ① in Abb. 4.1) werden an den Vektorsignalgenerator Rohde&Schwarz SMU200A übertragen und in die Hochfrequenzebene gemischt (Referenzpunkt ②). Nach Verstärkung und Filterung (Referenzpunkt ③) wird das Signal über die Antenne abgestrahlt. Alle weiteren Komponenten in der Abbildung dienen zu Zwecken der Feldmessungen und werden an einer anderen Stelle dieses Berichts bzw. in [SS08] erläutert.

Abb. 4.2.: Blockschaltbild des DRM⁺-Empfängers

Empfängerseitig wird das hochfrequente Signal durch das Multiband, Multistandard-Frontend Atmel ATR4262 angenommen (Referenzpunkt ④ in Abb. 4.2). Seine Hauptaufgabe ist es, das Antenneneingangssignal von der Sendefrequenz 87,6 MHz auf die Zwischenfrequenz 10,7 MHz zu mischen. Das Frontend verfügt Eingangs über eine breitbandige Bandfilterung sowie ausgangsseitig eine schmalbandige Signalfilterung. Zusätzlich regelt das Frontend die notwendige Verstärkung in einem jeweils separatem breit- und schmalbandigem Regelkreis, um eine Übersteuerung der nachfolgenden Stufen zu vermeiden. Das Eingangssignal wird durch das Frontend auf die Zwischenfrequenz gemischt. Dieses ZF-Signal (Referenzpunkt ⑤) wird von dem A/D-Wandler und Digitalem Abwärtswandler Perseus [Mic] angenommen. Dieser tastet das Eingangssignal mit einer Samplefrequenz von 80 MHz mit einer Auflösung von 14 Bit ab und dezimiert diese zu einer Samplefrequenz von 250 kHz bei gleichzeitiger Konversion in das komplexe Basisband. Die digitalen IQ-Basisbandsamples werden über die USB-Schnittstelle einem PC / Laptop mit einer Auflösung von 24 Bits zur Verfügung gestellt. An dieser Stelle wird die Abtastrate und die Wortbreite der digitalen Daten an die Anforderungen des DRM⁺-Dekoders (192 kHz, 16 Bit) angepasst (Referenzpunkt ⑥). Hierzu ist an dieser Stelle ein weiteres Filter notwendig, welches die Eingangsdaten beim Übergang von $250/2 \text{ kHz} = 125 \text{ kHz}$ auf $192/2 \text{ kHz} = 96 \text{ kHz}$ bandgegrenzt. Der nachfolgende DRM⁺-Dekoder führt die Synchronisation, Demodulation und Wiederherstellung der DRM-Multiplexdaten durch. Der Multiplex wird an Referenzpunkt ⑦ an die passende Anwendung weitergegeben, z.B. einem Audiodecoder oder Bitfehlerratenmessgerät.

5. Messungen am Empfänger

5.1. Rauschmaß des Frontends

Zur Bestimmung des Eigenrauschens des Frontends wurde der in Abb. 5.1 dargestellte Aufbau verwendet. Das Rauschmaß wird mit der Y-Faktor-Methode (s. z.B. [MS91]) an Referenzpunkt ⑤, Abb. 4.2 bestimmt.

Während dieser Messungen wurden die Einstellungen des Frontends im vgl. zu denen in der Versuchsphase 2008 [SS08] verwendeten Parametern weiter angepasst und verbessert. Das Augenmerk hierbei lag insbes. in der Verbesserung der Anpassung an 50 Ω -Systeme, des Rauschmaßes und der Regelschwellen der AGC¹. Durch die Sicherstellung der Impedanzanpassung an 50 Ω -Systeme können die Ergebnisse des Rauschmessplatzes direkt ohne weitere Korrekturrechnungen verwendet werden.

Desweiteren wurde in Vorbereitung der Rauschmaßmessung geprüft, ob der Durchschlag des lokalen Oszillators bei der Ermittlung der Rauschzahl berücksichtigt werden muss: bei der Empfangsfrequenz 87,6 MHz und der Zwischenfrequenz $f_{zf} = 10,7$ MHz arbeitet der Oszillator des Frontends auf $f_{osc} = 196,6$ MHz. Der lokale Oszillator des eigentlichen Mischers schwingt bei $f_{lo} = f_{osc}/2 = 98,3$ MHz. Somit beträgt die Spiegelfrequenz $f_{sp} = f_{lo} + f_{zf} = 109$ MHz (Kehrlage). Am ZF-Ausgang konnten auf dieser Frequenz keine Signalanteile detektiert werden, so daß dieser Faktor bei der Rauschmaßmessung ebenfalls nicht zu berücksichtigen ist.

Mit dem Rauschmessplatzes R&S FSP inkl. Softwareoption "Noise Figure and Gain Measurement FS-K30" konnte die Verstärkung und das Rauschmaß direkt ermittelt werden, s. Abb. 5.1. Das Rauschmaß des Frontends mit seinen spezifischen Einstellungen für das verwendete Empfängergesamtsystem beträgt $NF_{front} = 11$ dB bei einer Verstärkung von 19 dB.

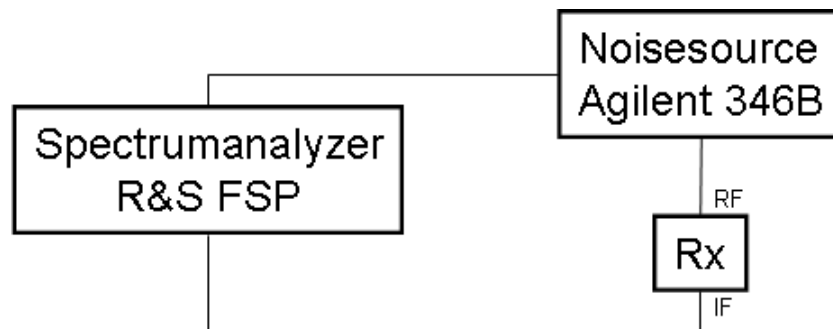


Abb. 5.1.: Messaufbau Rauschmaßmessung des Frontends

5.2. Linearität des Frontends

Zur Ermittlung des Amplitudengangs wurde am Eingang des Frontends ein Sinusträger variabler, bekannter Leistung eingespeist und seine Leistung am ZF-Ausgang ermittelt. Das Ergebnis ist in Abb. 5.2 dargestellt. Des weiteren zeigt diese Abbildung den Verlauf des Amplitudengangs bei einer linearen Verstärkung von 19 dB. Die AGC des Frontends wurde so eingestellt, daß der max. Ausgangspegel des Frontends den nachfolgenden DDC² nicht übersteuert. Der relativ geringe Gewinn des ZF-Verstärkers

¹Automatic Gain Control, engl.: autom. Verstärkungsregelung

²DDC, engl. kurz für: Digital Downconverter (Perseus)

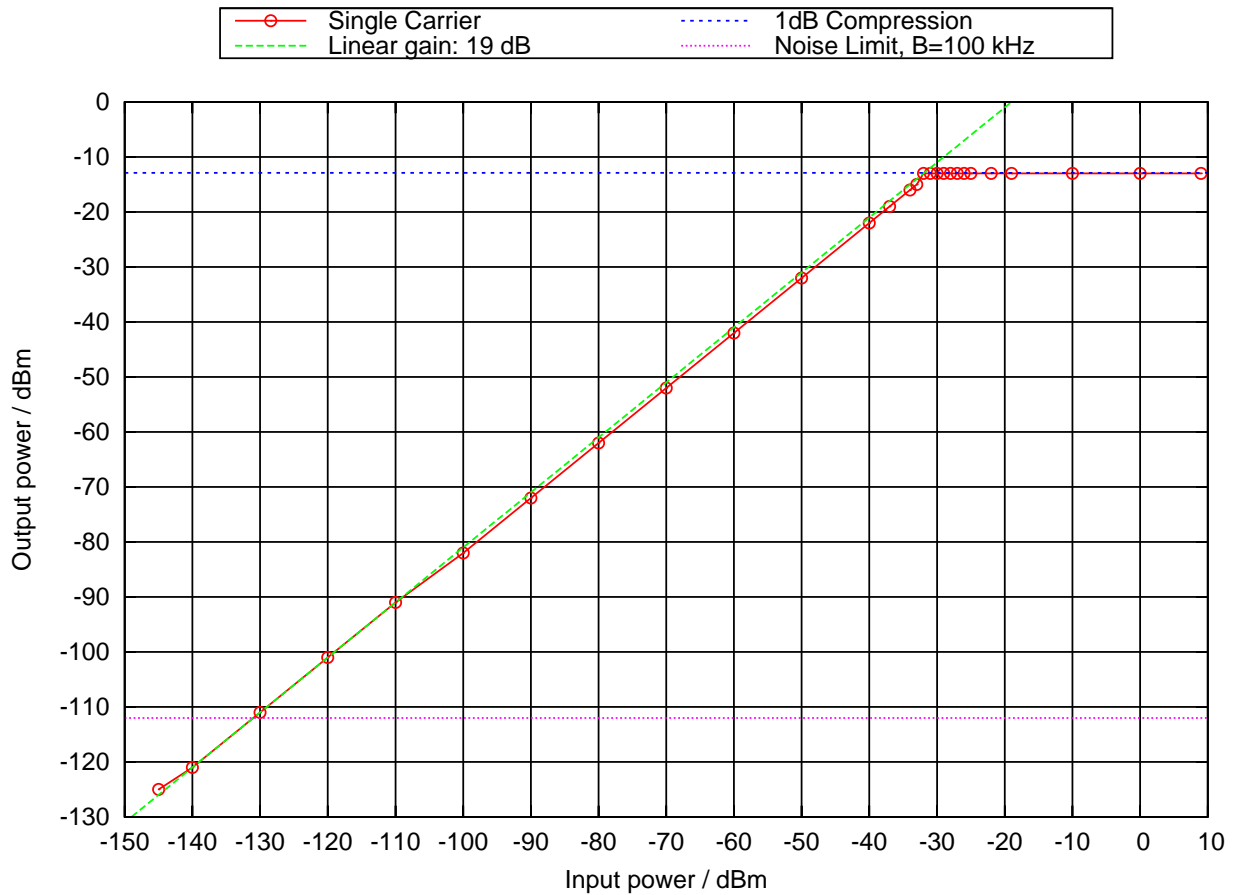


Abb. 5.2.: Amplitudengang des Frontends bei Eintonansteuerung

wurde bewusst so gewählt, um die Strecke möglichst linear zu halten. Dennoch wurde er so hoch angesetzt, daß das Empfängereigenrauschen durch die geringe Verstärkung nicht noch weiter erhöht wird. Zusätzlich ist in Abb. 5.2 der Empfängereigenrauschpegel innerhalb einer Bandbreite von 100 kHz eingetragen. Die Abbildung zeigt, daß die Anforderungen an die Linearität und den max. Ausgangspegel erfüllt sind.

Zur Prüfung der Intermodulationsfestigkeit des Frontends ist eine Zweitonmessung nur bedingt aussagekräftig, da das Ergebnis aufgrund der AGC stark von den verwendeten Eingangspegeln abhängt. Alternativ dazu kann als Maßzahl der Schulterabstand des DRM⁺-Signals am ZF-Ausgang verwendet werden. Im allg. gilt zwischen dem Ausgangsbezogenem Intermodulationspunkt 3ter Ordnung OIP3, dem Ausgangspegel P_{out} und dem Schulterabstand S rauschähnlicher, bandbegrenzter Signale (wie in diesem Fall vorhanden) folgender Zusammenhang:

$$S/\text{dB} \approx 2 \cdot (\text{OIP3} - P_{\text{out}}/\text{dBm}) - 2,5 \text{ dB} \quad (5.1)$$

Der Schulterabstand ist ein wichtiges Maß für die Signalgüte in Bezug auf die Amplitudenlinearität der Übertragungskette. Er ist weiterhin ein indirektes Maß für die unerwünschten Mischprodukte außer- und innerhalb der Signalbandbreite. Die Störprodukte innerhalb der Signalbandbreite verringern das Signal-zu-Rauschverhältnis im Dekoder: Sie wirken wie zusätzliche Störträger innerhalb des Nutzsignals. Bei geringen Eingangspegeln ist der erzielbare Schulterabstand indirekt ein Maß für das Empfängereigenrauschen.

Aus diesem Grunde wurde von der messtechnischen Bestimmung des IP3-Punktes abgewichen und der Schulterabstand bei unterschiedlichen Empfängereingangspegeln bestimmt, wie in Abb. 5.3 dargestellt.

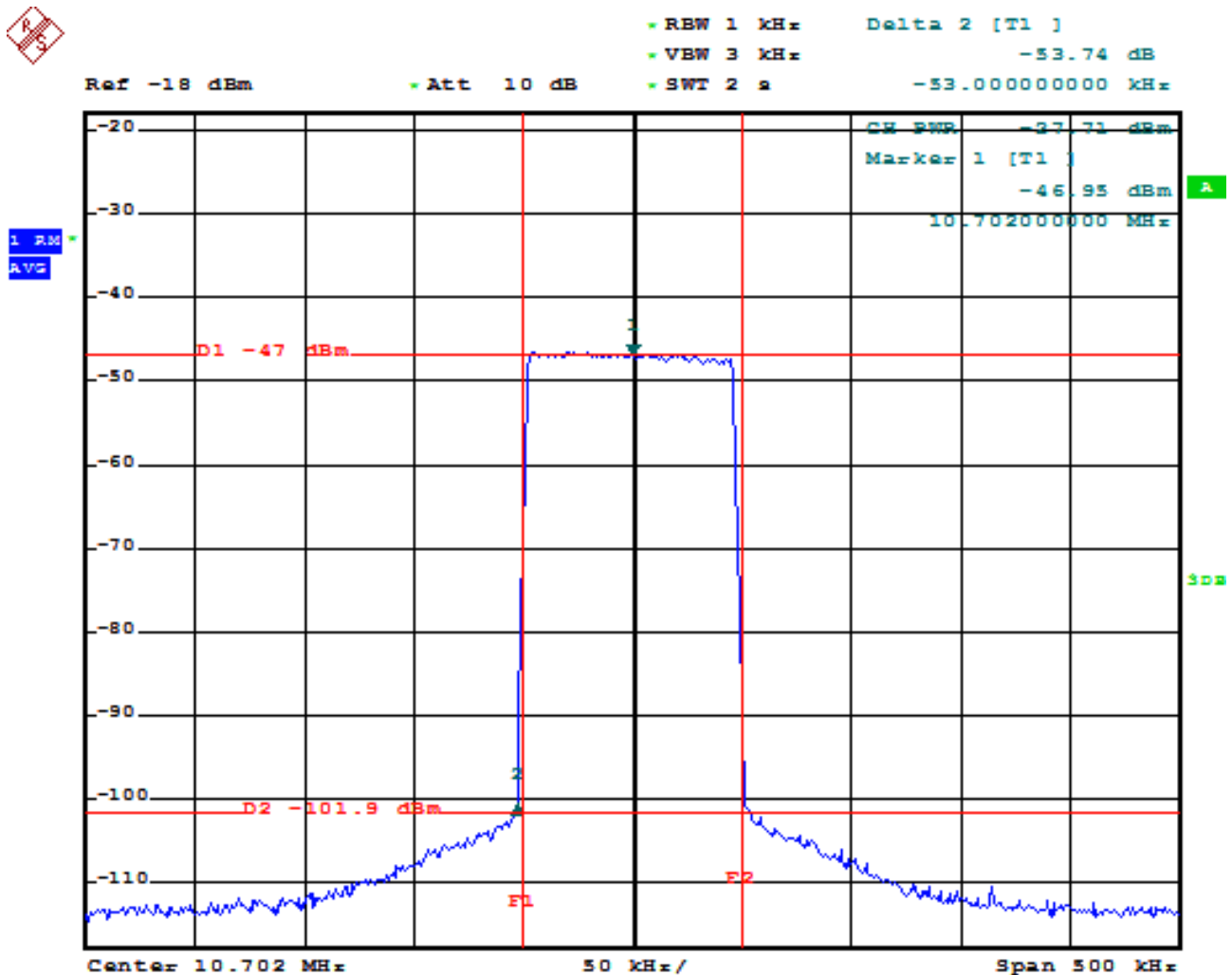


Abb. 5.3.: Bestimmung des empfängerseitigen Schulterabstands

In Tab. 5.1 sind für verschiedene Eingangsleistungspegel die jeweiligen Schulterabstände verzeichnet. Das Maximum von 54 dB wird ab Eingangsleistungspegeln von -59 dBm erreicht und bleibt auch beim Eingriff der AGC auf diesem hohen Niveau. Bei solch hohen Werten für S kann davon ausgegangen werden, daß bei einer hohen Empfängereingangsleistung die Signalgüte durch Sättigungseffekte nicht beeinflusst wird.

P_{in}/dBm	S/dB
-5	54
-70	43
-100	13

Tab. 5.1.: ZF-Schulterabstand als Funktion des Eingangspegels

5.3. ZF-Filter

Zur Ermittlung der ZF-Filterbandbreite wurde der Empfänger mit einem breitbandigem weißem Rauschen angesteuert und von der ZF-Mittenfrequenz aus die Frequenzen bestimmt, bei der der Ausgangspegel gegenüber dem Pegel der Mittenfrequenz um 3 dB abfällt. Hieraus ergibt sich eine 3 dB-Filterbandbreite von 180 kHz. Die äquivalente Rauschbandbreite des Filters beträgt 210 kHz. Der Betragsverlauf ist in den Abb. 5.4 und 5.5 dargestellt.

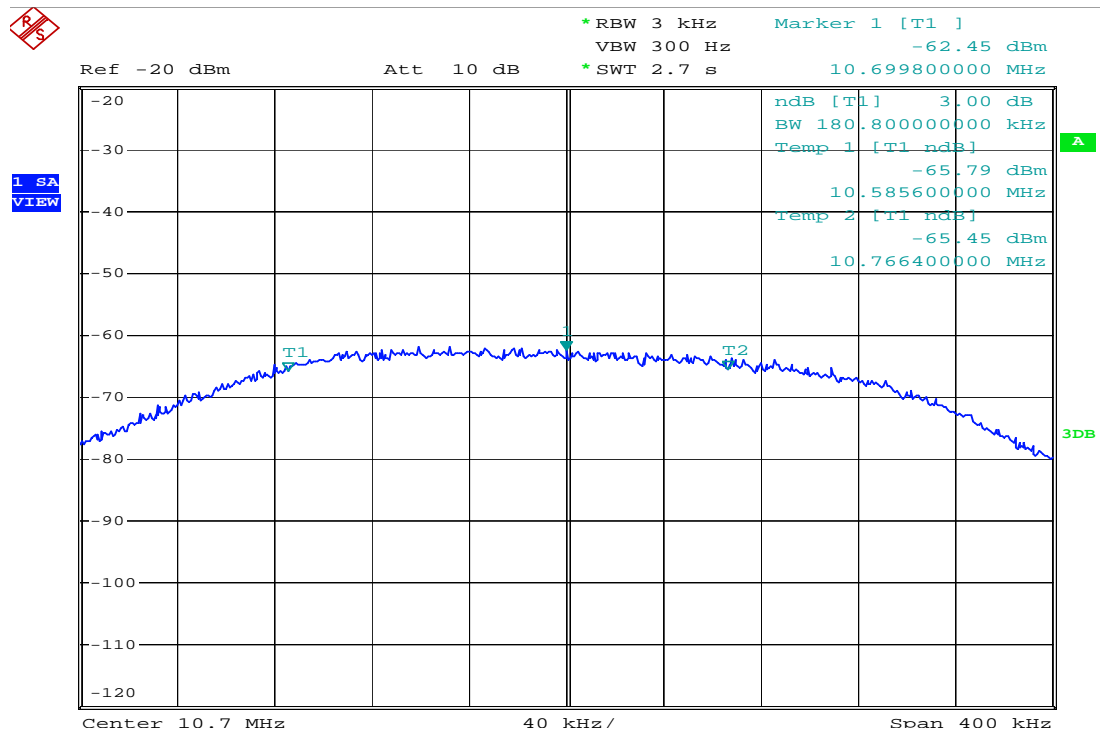


Abb. 5.4.: Nahbereichsaufnahme des ZF-Filters

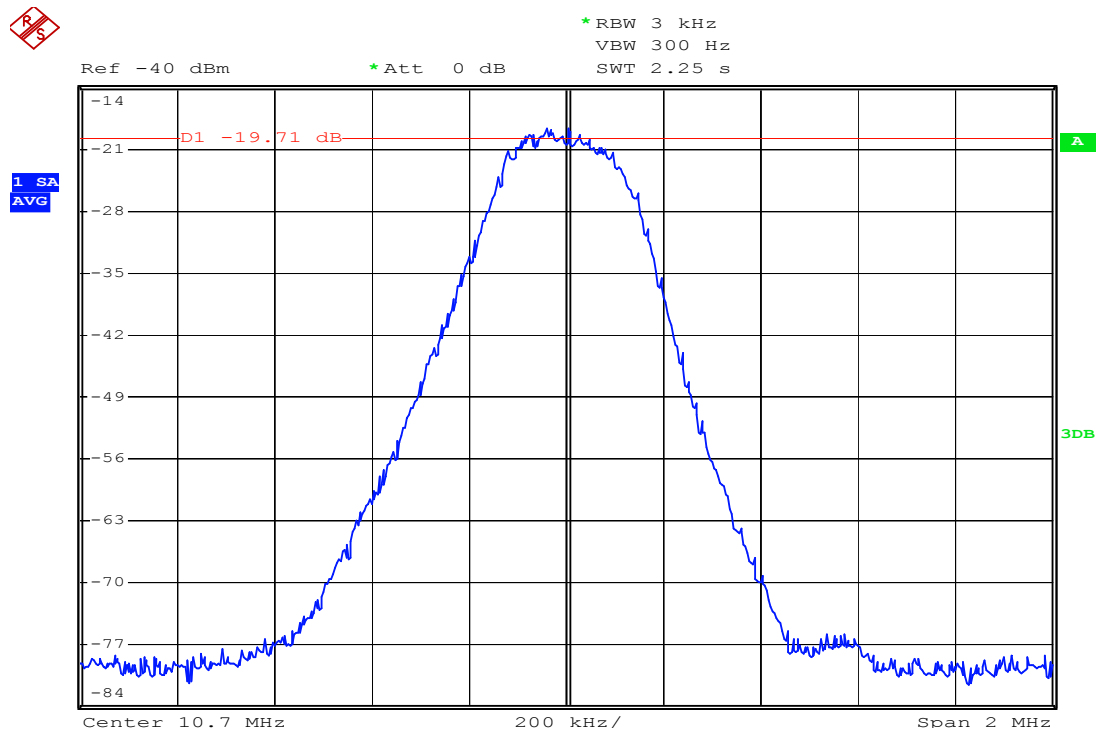


Abb. 5.5.: Breitbandige Darstellung des ZF-Filterverlaufs

5.4. Phasenrauschen

Das Phasenrauschen³ des Frontends kann nicht direkt bestimmt werden. Die in Abb. 5.6 verzeichneten Angaben beruhen auf den Angaben der Fa. Atmel.

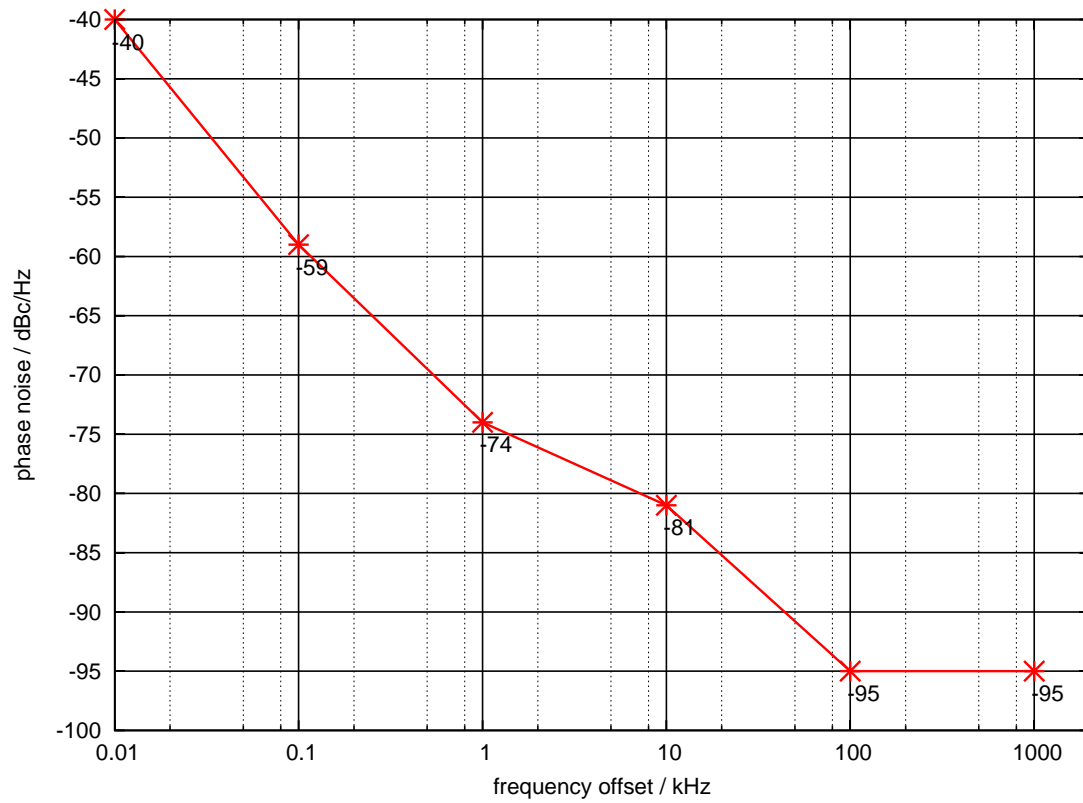


Abb. 5.6.: Phasenrauschen des Frontends

³Begriffsklärung: s. z.B. [Lee66, MS91]

5.5. Phasenrauschen des gesamten Empfängersystems

Zur Bestimmung des Phasenrauschens des gesamten Empfängersystems (Referenzpunkt ⑥) wurde das Gerät mit einem Einzelträger angesteuert, dessen Leistung so gewählt wurde, daß der Träger weit über dem Empfängerrauschen lag *ohne* das die AGC aktiv wurde. Aus den resultierenden Basisbandsamples wurde das Leistungsdichtespektrum ermittelt. Das Phasenrauschen kann direkt aus dem Ergebnis Abb. 5.7 abgelesen werden.

Das Phasenrauschen nahe am Träger liegt demnach im Bereich von $[-90 \text{ dBc/Hz} \dots -85 \text{ dBc/Hz}]$.

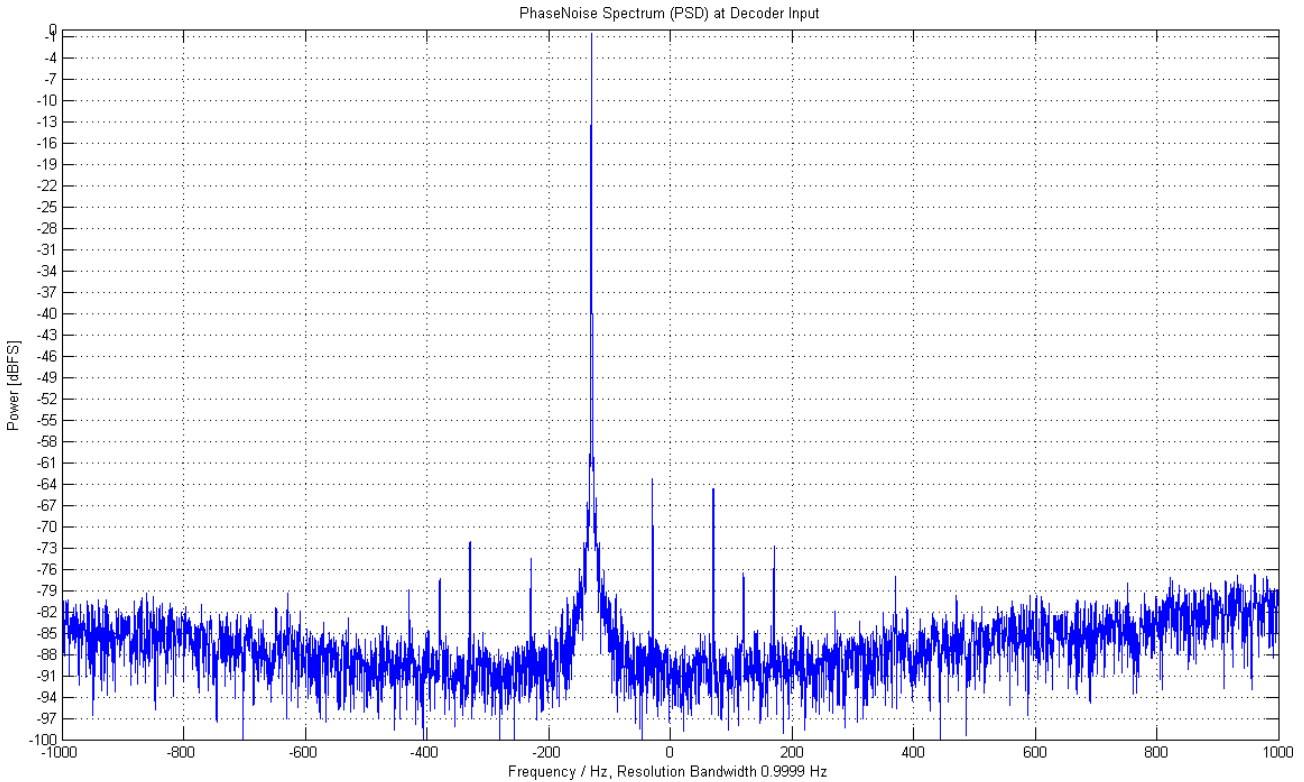


Abb. 5.7.: Phasenrauschen des gesamten Empfängersystems, Nahaufnahme

5.6. Gesamtrauschmaß

Zur Ermittlung des Gesamtrauschmaßes wurde folgendes Verfahren angewandt [MF73, Kap. 14-1]:

1. Erfassen der Basisbanddaten an Referenzpunkt ⑥ (s. Abb. 4.2) bei Ansteuerung mit einem schwachen Sinuston.
2. Erfassen der Basisbanddaten an Referenzpunkt ⑥ (s. Abb. 4.2) bei Abschluss des Frontends mit 50Ω .

Aus den Basisbanddaten wurde im Anschluss in Matlab[©] das Leistungsdichtespektrum ermittelt. Aus dieser Betrachtung ergibt sich für den Signalanteil (des Sinustons) bei einem Eingangsleistungspegel von -100 dBm ein Ausgangsleistungspegel von -55.3 dBFS^4 . Der mittlere Rauschleistungspegel ergibt sich bei gleichem Vorgehen zu -118.5 dBFS in einer Bandbreite von jeweils 1 Hz . Somit kann durch den Ansatz

$$\text{Rauschzahl: } F = \frac{(S/N)_{\text{in}}}{(S/N)_{\text{out}}} \quad (5.2)$$

$$\text{Rauschmaß: } NF = 10 \log(F) \text{ dB} \quad (5.3)$$

⁴kurz für: Dezibel Full Scale. 0 dBFS kennzeichnet die Volllaussteuerung eines A/D-Wandlers

das Rauschmaß des Gesamtsystems angegeben werden.

Für $(S/N)_{\text{in}}$ – das Signal-zu-Rauschverhältnis am Eingang des Empfängers ④ (s. Abb. 4.2) – gilt:

$$\begin{aligned}(S/N)_{\text{in|dB}} &= -100 \text{ dBm} - (-174 \text{ dBm}) \\ (S/N)_{\text{in|dB}} &= 74 \text{ dB}\end{aligned}$$

Die Angabe -174 dBm beziffert den Rauschleistungspegel an einem Widerstand bei 50Ω in einer Bandbreite von 1 Hz bei einer Standardraumtemperatur von 290 K unter der Voraussetzung, dass der Empfängereingang eine Eingangsimpedanz von 50Ω aufweist. Zur Kontrolle der Abbildung der Eingangsleistung zur Ausgangsleistung – und somit der Verstärkung des Frontends inkl. der digitalen „Verstärkung“ wurde die Messung bei unterschiedlichen Eingangsleistungen wiederholt und bestätigt. Sinngemäß entsprechend zu der obigen Rechnung gilt für das Signal-zu-Rauschverhältnis am Dekodereingang ⑥ $(S/N)_{\text{out}} = \text{SNR}_{\text{Dec}}$:

$$\begin{aligned}(S/N)_{\text{out|dB}} &= -55,3 \text{ dBFS} - (118,5 \text{ dBFS}) \\ (S/N)_{\text{out|dB}} &= 63,2 \text{ dB}\end{aligned}$$

Mit diesen beiden Angaben kann schlussendlich gem. Gl. (5.3) das Rauschmaß des gesamten Empfängersystems ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\text{NF} &= (S/N)_{\text{in|dB}} - (S/N)_{\text{out|dB}} \\ \text{NF} &= 74 \text{ dB} - 63,2 \text{ dB} \\ \text{NF} &= 10,8 \text{ dB} \approx 11 \text{ dB}\end{aligned}$$

Dies bedeutet, daß das Rauschmaß des Frontends nicht durch das typischerweise hohe Rauschmaß des A/D-Wandler beeinflusst wird; die Kombination aus Verstärkung und Rauschmaß der Empfängerkette ist gemäß der Friis'schen Gleichung (s. z.B. [MF73]) ausreichend, um die Einflüsse der höheren Rauschzahl des Wandler im Gesamtsystem nicht zum Tragen zu bringen.

6. Messungen am Sender

6.1. Linearität bei Ansteuerung mit OFDM-Signalen

Der erzielbare Schulterabstand kann hier durch Messung des OIP3-Punktes und Anwendung von Gl. (5.1) abgeschätzt werden. Zur Ermittlung des OIP3-Punktes des Senders wurde die in Abb. 6.1 skizzierte Anordnung verwendet. Der Abstand der beiden Träger wurde dem DRM⁺-Subträgerabstand entsprechend zu 444 Hz gewählt.

Somit ergeben sich mit der Mittenfrequenz $f_0 = 87,6$ MHz folgende Frequenzen:

$$f_1 = f_0 + 444 \text{ Hz}/2 = 87,600222 \text{ MHz}$$

$$f_2 = f_0 - 444 \text{ Hz}/2 = 87,599778 \text{ MHz}$$

Somit ergeben sich für die Intermodulationsprodukte 3ter Ordnung die folgenden Frequenzen (die Produkte der Summenfrequenzen $2 \cdot f_2 + f_1$ bzw. $2 \cdot f_1 + f_2$ sind hierbei nicht von Interesse, da sie weitab des Nutzbandes bei 262,8 MHz entstehen):

$$f_{3,1} = 2 \cdot f_2 - f_1 = 87,599334 \text{ MHz}$$

$$f_{3,2} = 2 \cdot f_1 - f_2 = 87,600666 \text{ MHz}$$

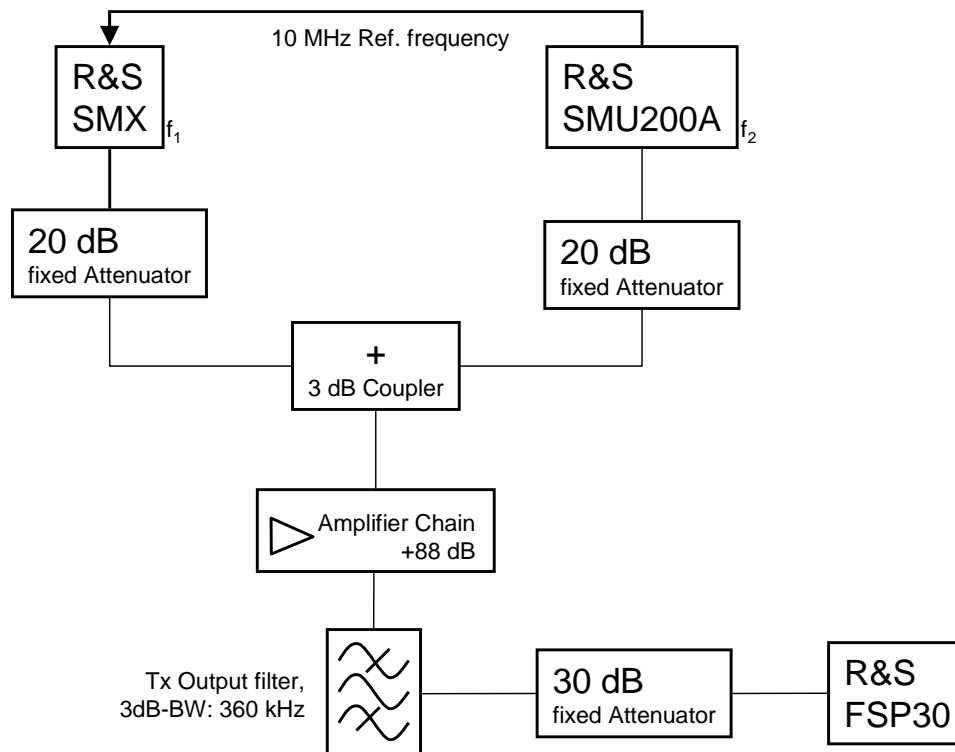


Abb. 6.1.: Messaufbau zur Messung des senderseitigen IP3-Punktes

Die Pegel der einzelnen Töne wurden so gewählt, daß die resultierende Summenleistung am Senderausgang der Ausgangsleistung im DRM⁺-Betrieb am Antennenfußpunkt entspricht. Diese beträgt

unter Berücksichtigung der Leitungsdämpfung vom Senderausgang zur Antenne 45,6 dBm. Demnach muß jeder Testton alleine so gepegelt werden, daß er einen Ausgangsleistungspegel von 42,6 dBm hat. Aufgrund der Schmalbandigkeit der Messung verfälscht das ausgangsseitige Filter das Meßergebnis nicht; seine Durchgangsdämpfung wird damit automatisch in der Messung berücksichtigt und muß bei der Berechnung der Senderausgangsleistungen somit nicht beachtet werden.

Um Intermodulationen zwischen den Signalquellen selbst zu vermeiden wurde zur Steigerung der Isolation beider Generatoren jeder Ausgang mit einem zusätzlichem 20 dB-Dämpfungsglied beschaltet, wie in Abb. 6.1 dargestellt.

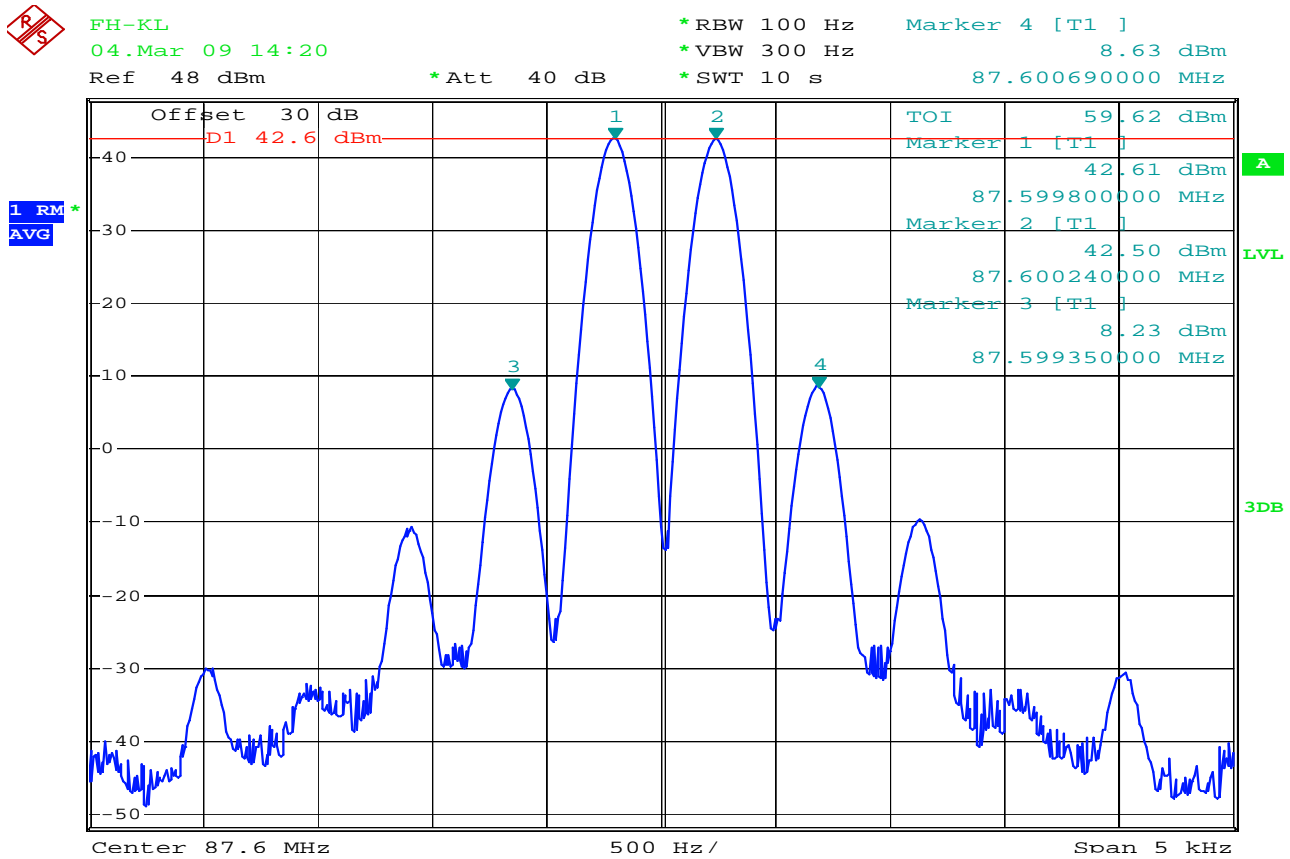


Abb. 6.2.: Intermodulationsspektrum am Senderausgang bei voller Leistung

Das IM-Spektrum am Senderausgang ist in Abb. 6.2 dargestellt. Der Abbildung kann direkt der ausgangsbezogene IP3-Punkt (OIP3) anhand des TOI¹-Markers entnommen werden:

$$\text{OIP}_{3,\text{tx}} = 60 \text{ dBm}$$

Die TOI-Angabe wird hierbei mit $n = 3$ gem. Gl. 6.1, s. z.B. [Mäu88] berechnet.

$$\text{OIP}_n = \frac{n \cdot P_{\text{out}} / \text{dB} - P_{\text{IM},n} / \text{dB}}{n - 1} \quad (6.1)$$

Für den OIP5 gilt mit den Werten aus Abb. 6.2:

$$\text{OIP}_{5,\text{tx}} = \frac{5 \cdot 42,5 \text{ dBm} - (-10 \text{ dBm})}{4} = 55 \text{ dBm}$$

Mit Kenntnis des OIP3 und der Senderausgangsleistung im DRM⁺-Betrieb kann gem. Gl. (5.1) auf den Schulterabstand S_{Tx} geschlossen werden:

$$S_{\text{Tx}} = 2 \cdot (60 \text{ dBm} - 45,6 \text{ dBm}) - 2,5 \text{ dB} = 26,3 \text{ dB} \quad (6.2)$$

¹Third Order Intercept Point

In Abbildung 6.3 ist das Ausgangsspektrum des DRM⁺-Senders bei voller Ausgangsleistung dargestellt. Anhand der Marker 2 und 3 kann der mittlere Schulterabstand zu 26 dB ermittelt werden, was obiges Ergebnis bestätigt. Gleichzeitig bedeutet dies, daß in der konkreten Senderrealisierung die dominierenden Nebenaussendungen in direkter Nähe des Trägers hauptsächlich nur den Intermodulationsprodukten 3ter Ordnung geschuldet sind.

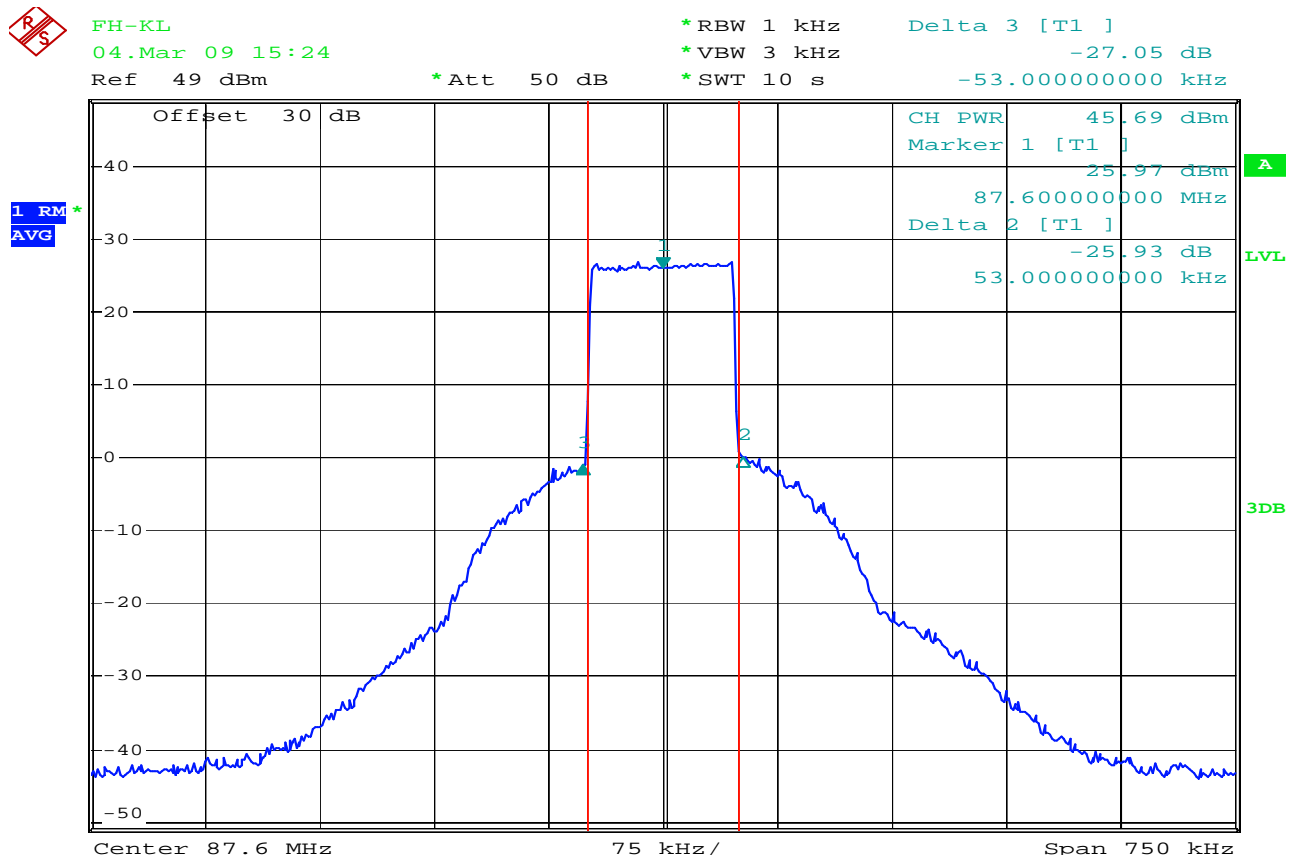


Abb. 6.3.: Schulterabstand am Senderausgang bei voller Ausgangsleistung

6.2. Phasenrauschen

Zur Bestimmung des Phasenrauschens wurde die Modulation des Senders ausgeschaltet und das Phasenrauschen bei voller Trägerausgangsleistung an Referenzpunkt ③ (s. Abb. 4.1) ermittelt. Der Senderausgang wurde über ein 30 dB-Dämpfungsglied mit einem Spektrumanalyzer verbunden.

Am Spektrumanalyzer (R&S FSP) wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

Parameter	Wert
RBW	100 Hz
VBW	10 Hz
Sweep-Time	52 s
Detektor	Sample
Tracemittelung	25 mal
Vordämpfung	30 dB
Referenzpegel	47 dBm

Die detektierten Rauschpegel lagen in allen Fällen über dem Eigenrauschen des Analyzers.

Aus dem resultierenden Tracedatensatz (Frequenz; Pegel/ dBm) ergibt sich mit dem Trägerpegel L_c und dem frequenzabhängigem Rauschpegel $L_n(f)$ das Phasenrauschen $N_c(\Delta f)$ in dBc/Hz mit dem

Frequenzoffset Δf relativ zur Trägerfrequenz zu:

$$N_c(\Delta f) / (\text{dBc} / \text{Hz}) = L_n(f) / \text{dBm} - L_c / \text{dBm} - 10 \cdot \log(\text{RBW} / \text{Hz}) \quad (6.3)$$

Das Ergebnis ist in Abb. 6.4 dargestellt. Darüberhinaus wurde in der Darstellung das Phasenrauschen des SMU gem. den Datenblattangaben [Roh05] zum Vergleich eingezeichnet.

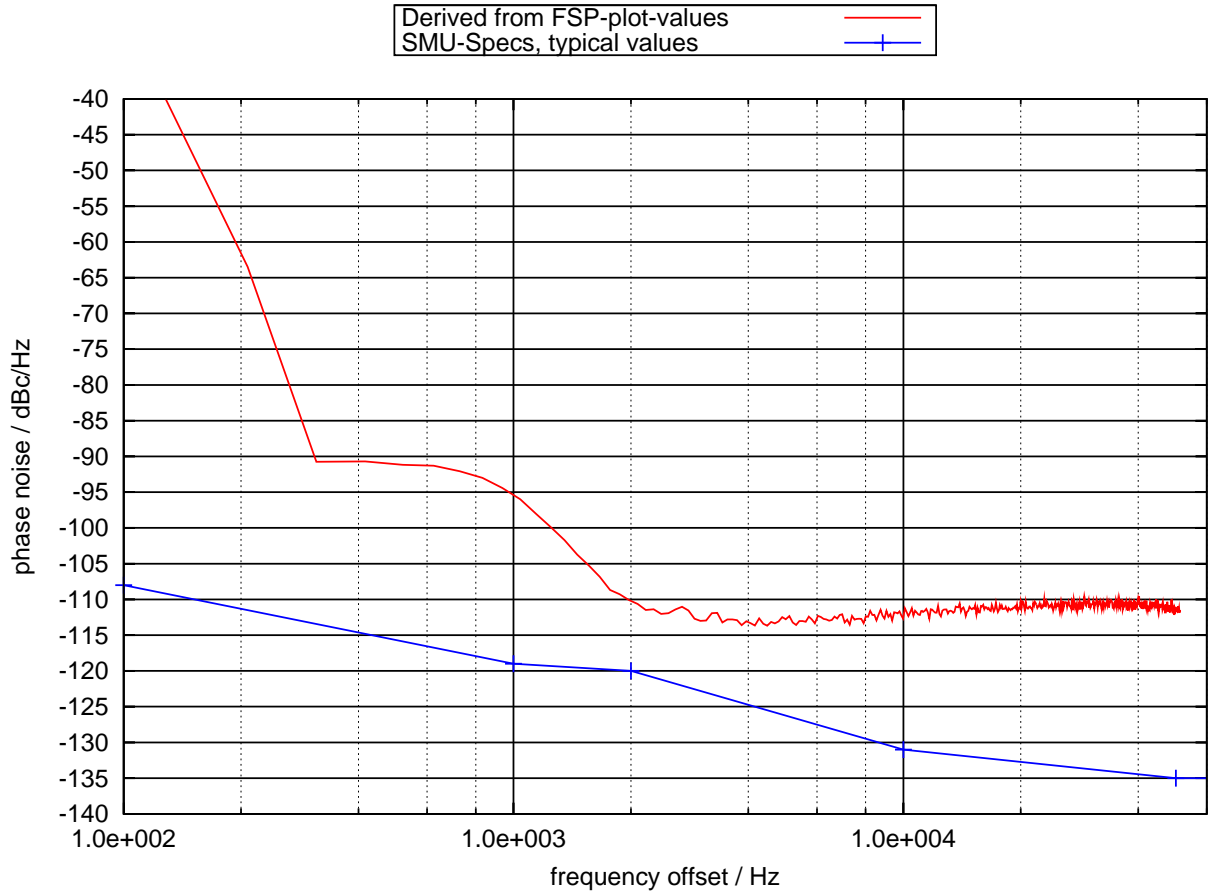


Abb. 6.4.: Phasenrauschen am Senderausgang

Man erkennt aus Abb. 6.4, daß das Phasenrauschen auf dem ersten Subträger (4444/9 Hz Offset) $-90 \text{ dBc} / \text{Hz}$ beträgt und rasch auf mindestens $-110 \text{ dBc} / \text{Hz}$ ab dem dritten Subträger und darüber hinaus abfällt. Es kann bei insbes. bei größeren Frequenzabständen davon ausgegangen werden, daß das Eigenrauschen des Leistungsverstärkers weit über dem tatsächlichen Phasenrauschen liegt.

7. Messungen an der kompletten Übertragungsstrecke

7.1. Phasenrauschen

Zur Ermittlung des Gesamtphasenrauschens wurden Sender und Empfänger miteinander verbunden und die Messung analog zu Kap. 5.5 ausgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 7.1 dargestellt. Abb. 7.1 zeigt, daß das Verbundphasenrauschen nahe am Träger im Bereich $[-85 \text{ dBc/Hz} \dots -80 \text{ dBc/Hz}]$ liegt.

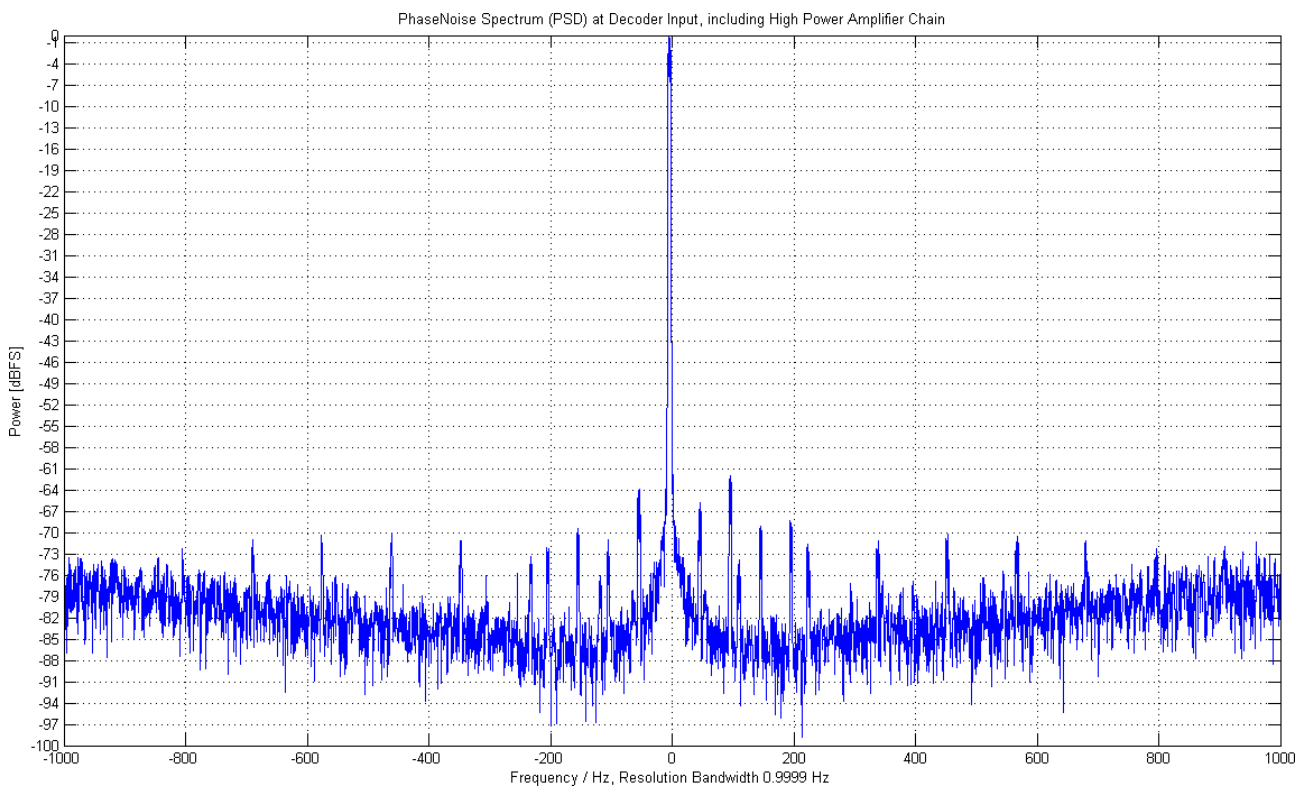


Abb. 7.1.: Verbundphasenrauschen von Sender und Empfänger

7.2. Ermittlung der BER-Performanz im AWGN-Kanal

Das wichtigste Maß der Güte einer Übertragungsstrecke ist die Bitfehlerrate (BER). In den folgenden Untersuchungen wurden zwei Punkte bei einer Übertragung im AWGN-Kanal betrachtet:

- Mittlere Bitfehlerrate $\overline{\text{BER}}$.
- Mittlere Rate der erfolgreich (fehlerfrei) dekodierten Rahmen des MSC¹, $\overline{\text{MSC-FDR}}$.

Als Parameter wurde jeweils die Größe SNR_{Dec} herangezogen. SNR_{Dec} bezeichnet das Inband-SNR, d.h. das Signal-zu-Rauschverhältnis innerhalb der Bandbreite des DRM⁺-Kanals.

Die Messungen wurden schrittweise in drei Stufen ausgeführt:

¹MSC: Main Service Channel

- M1:** Offlinesimulation im Basisband. Hierzu wurden die Ausgangsdaten an Referenzpunkt ① (Abb. 4.1) abgegriffen, in Matlab[©] mit weißem Rauschen überlagert, dem DRM⁺-Dekoder übergeben und die resultierende mittlere Bitfehlerrate ermittelt.
- M2:** Simulation unter Einbezug des Sendekerns und Empfängersystems². Hierzu wurden die Referenzpunkte ② und ④ miteinander verbunden.
- M3:** HITL-Simulation unter Einbezug der kompletten Übertragungsstrecke. Hierzu wurden die Referenzpunkte ③ und ④ miteinander verbunden.

Die Simulationszeit betrug bei Messmethode M1 und M2 je eine Stunde, bei M3 20 min für die einzelnen Signal-zu-Rauschabstände SNR_{Dec} . Im Falle von M2 und M3 wurde der AWGN-Generator des SMU200A automatisiert betrieben. Dies heisst, das nach Ablauf der Simulationszeit eines Messpunktes die Messung nach Änderung des SNR_{Dec} neu gestartet wurde. In diesen beiden Fällen wurde der Dekoder bzw. Empfänger mit einer konstanten Nutzeingangsleistung betrieben, die weit über dem Eigenrauschen des Empfängers lag (-45 dBm).

Nach Ablauf der Messzeit wurde der Abbruch und der Neustart einer Messung sowie die Änderung des SNR_{Dec} vollautomatisch durchgeführt. Als weiterer Automatisierungsschritt wurde – aufgrund der Reduktion der Wortbreite am Ausgang des Resamplers von 24 bit (Perseus) zu 16 bit (Eingangsdatenformat des DRM⁺-Dekoders) – eine Regelung innerhalb des Resamplers implementiert. Mit dieser wird bei variabler Eingangsleistung am Empfängereingang die Ausgangsleistung des Resamplers konstant gehalten. Diese Maßnahme verbessert zudem die Performance des Empfängers im mobilen Einsatz erheblich, da Eingangspegelschwankungen ausgeglichen werden.

Anhand dieses Messverfahrens ist es möglich, die $\overline{\text{BER}}$ und $\overline{\text{MSC-FDR}}$ -Performanz der einzelnen Komponenten aufeinander aufbauend zu erfassen. Aufgrund der Messsystematik zeigt M1 die reine Performanz des Dekoders (insbes. Kanalschätzung und Synchronisation). M2 stellt darüberhinaus die Effekte der Empfängerhardware dar, M3 zeigt die additiven Effekte durch die Verstärkerstufen des Senders sowie des Ausgangsfilters³ – und somit der gesamten Übertragungskette. Die Messungen wurden für zwei ausgewählte DRM⁺-Übertragungsmodi gem. Tab. 7.1 durchgeführt, die auch in der Strahlungsphase dieses Feldversuchs (s. Teil II) verwendet werden:

Modulation	Coderate SDC	Coderate MSC	Protection Level MSC
4-QAM	0,25	0,4	2
16-QAM	0,25	0,33	0

Tab. 7.1.: DRM⁺-Signalparameter zur $\overline{\text{BER}}$ -Messung

Die Coderate 0,25 für den SDC ist in [Ins09, Abs. 7.5.2, Abs. 6.3.3] für eine 16-QAM-modulierten MSC nicht explizit aufgeführt, aber dennoch gültig. Davon abgesehen ist der SDC immer stärker als der MSC zu schützen (selbst bei einer niederwertigeren Modulation des SDC im vgl. zu dem MSC), da dessen erfolgreiche Dekodierung Grundbedingung zur MSC-Dekodierung ist. **Im folgenden werden die in obiger Tabelle genannten Signalparameter im weiteren Verlauf dieses Dokuments mit den Begriffen „4-QAM-Variante“ bzw. „16-QAM-Variante“ bezeichnet.**

Die Ergebnisse der Simulationen und Messungen im AWGN-Kanal sind in Abb. 7.2 dargestellt. Hierbei gilt folgende Symbologie:

Die durchgezogenen Linien beschreiben den Verlauf der $\overline{\text{BER}}$. Gestrichelte Linien beschreiben den Verlauf der $\overline{\text{MSC-FDR}}$. Die 4-QAM-Variante ist in blau, die 16-QAM-Variante in rot dargestellt. Die Art der Messung (M1, M2, M3) wird durch die Symbole \blacktriangledown , \blacktriangle und \blacklozenge differenziert. Die Ordinate beschreibt das Inband-S/N SNR_{Dec} (die Rauschleistung ist bezogen auf die DRM⁺-Signalbandbreite).

²Hardware-in-the-Loop-Simulation, kurz: HITL

³z.B. nichtlineare Phasenverläufe

Die linke Abszisse bezieht die $\overline{\text{BER}}$, die rechte Abszisse die $\overline{\text{MSC-FDR}}$. Alle Resultate basieren auf einer synchronen PRBS, d.h. die erfolgreiche Dekodierung des MSC-Rahmens ist die Grundvoraussetzung zur Ermittlung der momentanen BER.

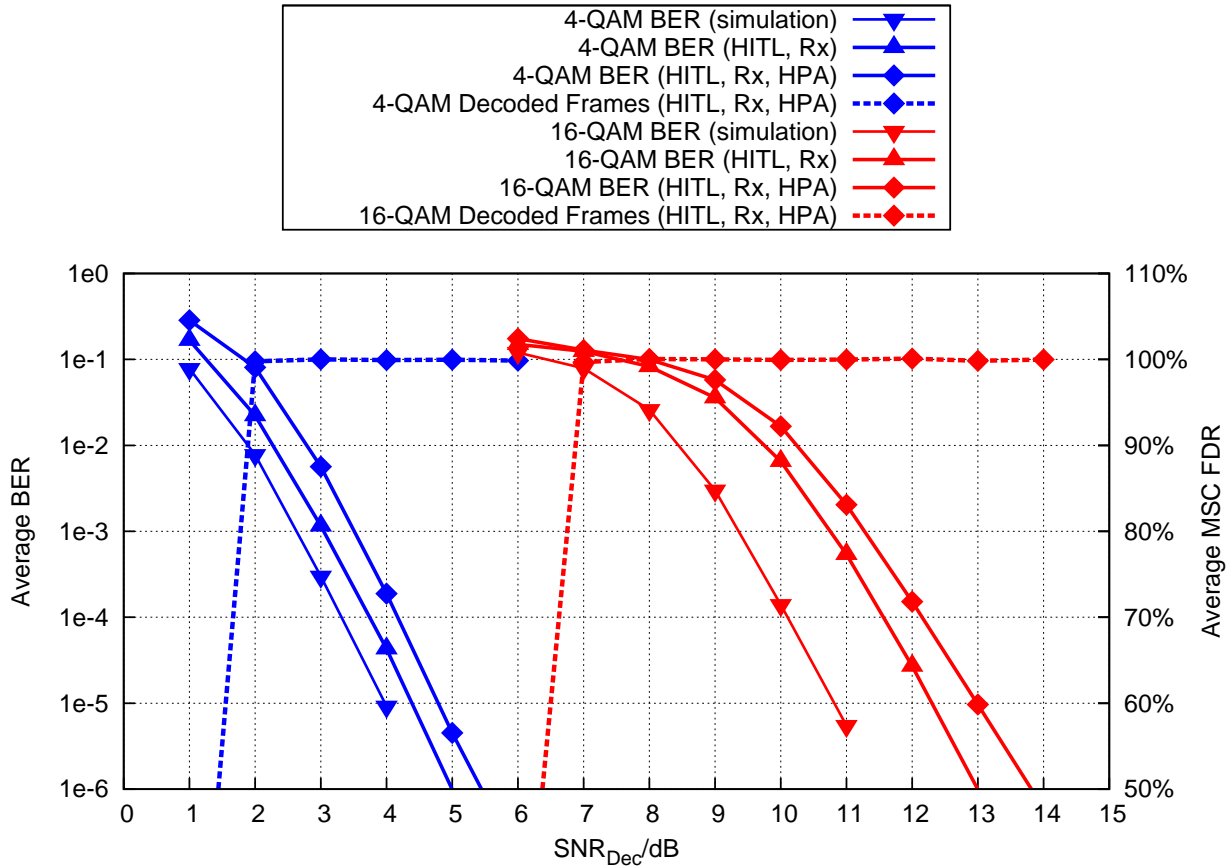


Abb. 7.2.: Ergebnisse der $\overline{\text{BER}}$ - und $\overline{\text{MSC-FDR}}$ Simulationen im AWGN-Kanal

Abb. 7.2 zeigt das typische wasserfallartige Verhalten von $\overline{\text{BER}}$. Der Einfluß der Hardware auf den Dekodierungsprozess ist an dem jeweiligen Versatz der Kurven untereinander zu erkennen. Der Empfänger selbst verringert die Empfindlichkeit des Dekoders um ca. 0,5 dB (4-QAM) bzw. 1,5 dB (16-QAM). Zusätzlich sind weitere 0,5 dB (beide Symbolwertigkeiten) Verlust auf der Senderseite zu sehen. In Anbetracht des prototypenartigen Charakters der eingesetzten Systeme ist dies ein nur sehr geringer Verlust.

Setzt man als Empfangsbedingung den typischen Wert von $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ (s. z.B. [Küh08]), der auch in den bisherigen DRM-Modi als Empfangsgrenze festgesetzt ist [Ins09], so ergibt sich anhand von Darstellung 7.2 für die hier vorhandene Übertragungsstrecke ein notwendiges Mindest- SNR_{Dec} von ≈ 4 dB (4-QAM) bzw. ≈ 12 dB (16-QAM). In diesen beiden genannten Bereichen ist der Verlauf der $\overline{\text{MSC-FDR}}$ sehr steil, und bereits der Bruchteil eines Dezibels höheres SNR_{Dec} führt zu einer 100%-igen Dekodierung. Dabei ist zu beachten, daß je nach übertragenem Dienstetyp und der Güte des jeweiligen Datendekoders bereits diese Fehlerrate zu einer quasi-fehlerfreien Dekodierung führen kann, s.a. [SSF⁺09].

Eine weiterer Ansatz zur Auswertung der Simulationsdaten liegt in der Interpretation des Wertes der mittleren Bitfehlerrate $\overline{\text{BER}}$ als *Erwartungswert* der *Zufallsvariablen* Bitfehlerrate (BER):

$$\overline{\text{BER}} = E\{\text{BER}\} \quad (7.1)$$

Dieser Standpunkt führt zur Abschätzung der Quantile im AWGN-Kanal als eine weitere Maßzahlen. Die Forderung

$$x \stackrel{!}{=} P(\mathcal{A}) = P(\text{BER} \leq \text{BER}_x), \quad x \in [0 \dots 1] \quad (7.2)$$

definiert für eine geforderte Wahrscheinlichkeit x die (Schranken)Bitfehlerrate BER_x (Quantil) derart, dass das Ereignis \mathcal{A} , in dem die Bitfehlerrate BER kleiner oder gleich BER_x ist, genau $x = P(\mathcal{A})$ beträgt. Das System fällt aus, wenn das Komplement $\overline{\mathcal{A}}$ des Ereignisses \mathcal{A} eintritt, die (Schranken)Bitfehlerrate mithin überschritten wird. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls, die Ausfallwahrscheinlichkeit, errechnet sich zu

$$P_{\text{outage}} = P(\overline{\mathcal{A}}) = P(\text{BER} > \text{BER}_x) = 1 - P(\text{BER} \leq \text{BER}_x) \quad (7.3)$$

Nachfolgende Tabelle 7.2 stellt die geschätzten Quantile $\text{BER}_{0,5}$, $\text{BER}_{0,90}$, $\text{BER}_{0,95}$, $\text{BER}_{0,99}$ in Prozent dar, die sich aus Messung M3 ergeben. Der Wert der mittleren Bitfehlerrate $\overline{\text{BER}}$ ist zu Vergleichszwecken mit angegeben. Beispielsweise beträgt für die Ausfallswahrscheinlichkeit $P_{\text{outage}} = 0.01$ (das $\text{BER}_{0,99}$ -Quantil) das erforderliche $\text{SNR}_{\text{Dec}} \approx 5 \text{ dB}$ (4-QAM) bzw. $\gtrsim 13 \text{ dB}$ (16-QAM), um eine Bitfehlerrate $\text{BER} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ mit einer 99%-igen Wahrscheinlichkeit zu erreichen.

Modulation	4-QAM			16-QAM		
SNR_{Dec}	3 dB	4 dB	5 dB	11 dB	12 dB	13 dB
$\text{BER}_{0,50}/\%$	5, 2	—	—	1, 8	—	—
$\text{BER}_{0,90}/\%$	10, 0	0, 7	—	4, 0	0, 6	—
$\text{BER}_{0,95}/\%$	14, 0	1, 3	—	5, 0	0, 9	—
$\text{BER}_{0,99}/\%$	99, 0	2, 0	0, 1	6, 3	1, 7	0, 4
$\overline{\text{BER}}/\%$	5, 7	0, 19	0, 005	2, 0	0, 15	0, 01

Tab. 7.2.: Geschätzte Quantile (in Prozent) im AWGN-Kanal der 4- und 16-QAM-Variante auf Basis von Messung M3. Ein „—“ bedeutet, dass das Quantil zu klein ist, um auf Basis der 20-minütigen Simulationszeit abgeschätzt zu werden.

Wie zu Beginn dieses Berichts erwähnt, wurde während der Fertigstellung dieses Dokuments eine verbesserte Dekoderversion verfügbar. Dies heißt, daß die hier dargestellten Ergebnisse durch zukünftige Entwicklungen noch verbessert werden können.

8. Definition des DRM⁺-Empfangszustandes

Zur Erfassung der Schutzabstände für das DRM⁺-System ist die Definition des Begriffs „DRM⁺-Empfang möglich“ bzw. „DRM⁺-Empfang nicht möglich“ notwendig.

In der Regel liegt bei digitalen Systemen hierzu ein typisches Fehlerkriterium von z. B. $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ vor. Dies ist auch ein typischer Wert bei der dienstunabhängigen Auswertung der Performanz der DRM-Modi A...D [Ins09]. Somit wird aus Gründen der Dienstunabhängigkeit, Erkenntnisse der vorigen Kapitel sowie der Konsistenz innerhalb des DRM-Standards folgende Definition vorgenommen:

Definition 8.0.1 (*Dekodierbarkeit*)

Ein DRM⁺-Signal gilt als korrekt dekodiert, wenn die Nutzdaten des MSC nach der Viterbidecodierung eine mittlere Bitfehlerrate $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ aufweisen.

Der Mindesteingangsleistungspegel des Empfängers zur Erfüllung obiger Definition ergibt sich anhand der Signalbandbreite B und des Empfängerrauschmaßes NF. Das minimal detektierbare Signal (MDS) ergibt sich hieraus unter Berücksichtigung der Eigenschaften der kompletten Übertragungsstrecke wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{MDS} &= -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \lg(B/1 \text{ Hz}) + \text{NF} + \text{SNR}_{\text{Dec}} \\ \text{MDS} &= -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \lg(96 \text{ kHz}/1 \text{ Hz}) + 11 \text{ dB} + \text{SNR}_{\text{Dec}} \\ \text{MDS} &= -113,2 \text{ dBm} + \text{SNR}_{\text{Dec}} \end{aligned} \tag{8.1}$$

Mit den Werten für SNR_{Dec} gem. Abb. 7.2 und der Forderung, dass die $\overline{\text{BER}}$ in 99% der Fälle kleiner als $1 \cdot 10^{-4}$ ist (Tab. 7.2), ergeben sich die in Tab. 8.1 angeführten Werte für MDS_4 bzw. MDS_{16} .

MDS_4 bzw. MDS_{16} geben somit diejenigen Mindestleistungspegel an, die zur Dekodierung eines DRM⁺-Signals unter Nutzung der in dieser Arbeit verwendeten Übertragungskette am Empfängereingang in der jeweiligen Modulationsvariante notwendig sind. Diese Werte wurden meßtechnisch bestätigt. Dies läßt den Schluß zu, daß der einzig entscheidende Parameter auf die Gesamtempfindlichkeit des verwendeten Empfängers sein Rauschmaß ist; die Einflüsse des Phasenrauschens und der Linearität sind indirekt in der Messung des Verlaufs von $\overline{\text{BER}}$ (Kap. 7.2) berücksichtigt worden. Anhand der Tatsache, daß der gemessene Mindesteingangspegel $\text{MDS}_{4|16}$ mit dem rechnerisch ermittelten übereinstimmt kann darauf geschlossen werden, daß das Phasenrauschen der Kette an dieser Stelle vernachlässigbar ist.

Zur Umrechnung der Mindesteingangsleistungspegel des Empfängers zum Erreichen einer $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ in die korrespondierenden Mindestfeldstärken gilt (ohne Einbezug von Leitungsdämpfungen, Man-made-Noise, Höhenkorrektur, etc.) allg.:

$$\frac{E}{\text{dB}\mu\text{V/m}} = \frac{\text{MDS}_{4|16}}{\text{dBm}} + 124,6 \text{ dB} - 20 \lg\left(\frac{\lambda}{\text{m}}\right) - G_A \tag{8.2}$$

Als Empfangsantenne wird ein $\lambda/2$ -Dipol ($G_A = 0 \text{ dBd}$, Fußpunktwiderstand: 73Ω) angenommen. Gem. [Deu98] wird die Mittenfrequenz des UKW-Rundfunkbandes mit 98 MHz angesetzt ($\lambda = 3,06 \text{ m}$).

Somit ergibt sich mit Gl. (8.2) der Mindestfeldstärkepegel $E_{\lambda/2}$ / dB μ V/m zu:

$$\begin{aligned}\frac{E_{\lambda/2}}{\text{dB}\mu\text{V/m}} &= \frac{\text{MDS}_{4|16}}{\text{dBm}} + 124,6 \text{ dB} - 20 \lg(3.06) - 10 \lg\left(\frac{73 \Omega}{50 \Omega}\right) \\ \frac{E_{\lambda/2}}{\text{dB}\mu\text{V/m}} &= \frac{\text{MDS}_{4|16}}{\text{dBm}} + 113,2 \text{ dB}\end{aligned}\tag{8.3}$$

Wird alternativ die zumutbare UKW-Empfangsantenne gem. [Gem82] mit einem Mindestgewinn von 4 dBd verwendet, so ergibt sich analog aus Gl. 8.2 die Mindestempfangsfeldstärkepegel E_{zr} / dB μ V/m zu:

$$\frac{E_{zr}}{\text{dB}\mu\text{V/m}} = \frac{\text{MDS}_{4|16}}{\text{dBm}} + 108,9 \text{ dB}\tag{8.4}$$

Die sich ergebenden Feldstärkepegel sind in Tab. 8.1 aufgeführt und gelten im *rauschbegrenzten* Empfangsfall.

Variante	SNR _{Dec} / dB	MDS/ dBm	$E_{\lambda/2}$ / dB μ V/m	E_{zr} / dB μ V/m
4-QAM	5	-108	5	1
16-QAM	13	-100	13	9

Tab. 8.1.: Mindestempfangsleistungspegel und -feldstärkepegel am Antennenfußpunkt

9. Schutzabstandsmessungen

Ein weiterer für die Funknetzplanung entscheidender Aspekt ist die Kenntnis der Schutzabstände des DRM⁺-Systems gegenüber bestehenden FM-Rundfunksendern. Diese werden in diesem Kapitel in Abhängigkeit von verschiedenen Nutz- und Störsignalen messtechnisch erfasst.

Im Allgemeinen bezeichnet der Begriff Schutzabstand diejenige Leistungsdifferenz zwischen einem Nutz- und Störsignalpegel, bei der ein definiertes Störkriterium am Ausgang des Nutzsignalempfängers gerade noch eingehalten wird.

Generell wird eine Messung dieser Art durchgeführt, indem ein Nutz- und ein Störsender zusammen auf einen Empfänger für das Nutzsignal einwirken. Frequenz und Pegel des Störsenders sind hierbei i. allg. einstellbar. Nach Herstellung einer definierten Empfangsbedingung des Nutzsysteams – die z. B. in den einschlägigen Standards festgelegt sind – wird in unterschiedlichen Frequenzabständen der Störsender in seiner Leistung soweit erhöht, bis das definierte Störkriterium gerade noch erfüllt ist. Der Schutzabstand in dieser Situation ist eine Funktion der Frequenzdifferenz. Er ergibt sich wie oben erläutert aus der Differenz der Leistungspegel von Nutz- und Störsender.

Alle Ergebnisse im Detail sind in den Anhängen verzeichnet.

9.1. Störkriterium

Gemäß dem Ergebnis aus Kap. 7.2 wird im Rahmen dieser Messung das Störkriterium so angesetzt, daß die mittlere Bitfehlerrate BER nicht überschritten werden darf, s. Def. 8.0.1.

Wie zu Beginn dieses Berichts erwähnt, wurde während der Fertigstellung dieses Dokuments eine verbesserte Dekoderversion verfügbar. Dies heißt, daß die hier dargestellten Ergebnisse noch steigerungsfähig sind und – aus der Sicht des Dekoders – eine Worst-Case-Annäherung an die systembedingten Schutzabstände sind.

9.2. Verwendete Signalformen

Bei den durchgeführten Messungen wurden zwei Klassen von Störfällen untersucht:

- Störung des DRM⁺-Signals durch einen FM-Rundfunksignal
- Störung des DRM⁺-Signals durch ein DRM⁺-Signal

Spektrumsaufnahmen der verwendeten Signale mit hoher Dynamik sind im Anhang ab S. 137 dargestellt.

9.2.1. DRM⁺-Nutzsinal

Als Nutzsignal wurde ein DRM⁺-Signal mit den in Tab. 7.1 angegebenen Parametern verwendet. Die im MSC vorhandene Nutzdatenkapazität wurde komplett mit einer synchronen PRBS-Sequenz belegt. Das Signal wurde an Referenzpunkt ② abgegriffen. Der Signalpegel am Empfängereingang wurde anhand der in Kap. 8 angegebenen Mindestnutzpegel gewählt und danach um 10 dB erhöht. Somit wird sichergestellt, daß die Ergebnisse nicht durch das Empfängereigenrauschen beeinflusst werden, der

Pfadnr.	Verzögerung/ μs	Dämpfung/dB	Pfadtyp
1	0,0	-2	Classical Jakes / Rayleigh
2	0,2	0	dto.
3	0,5	-3	dto.
4	0,9	-4	dto.
5	1,2	-2	dto.
6	1,4	0	dto.
7	2,0	-3	dto.
8	2,4	-5	dto.
9	3,0	-10	dto.

Tab. 9.1.: Bei den Schutzabstandsmessungen verwendetes Kanalprofil

Empfänger gleichzeitig aber weit vom Eintritt in einen nichtlinearen Betriebszustand entfernt ist. Darüberhinaus wurde teilweise bei den folgenden Untersuchungen beispielhaft der Effekt eines bewegten DRM⁺-Empfängers auf die Schutzabstände untersucht. Hierzu wurde der Kanalsimulator des SMU-Nutzsignalgenerators verwendet und mit folgenden Einstellungen betrieben, die eine Bewegung eines Fußgängers mit 2 km/h bzw. KFZ mit 60 km/h [Zim05, Ins09] simulieren. Versuche vor den Messungen haben gezeigt, daß die Simulationszeit (> 3 min) keinen signifikanten Einfluß auf das Ergebnis hatte, solange der Empfänger im Bereich der Grenzbithfehlerrate gem. Def. 8.0.1 betrieben wurde. Weitere Kanalprofile wurden im Rahmen dieser Messungen aus Zeitgründen nicht betrachtet.

9.2.2. FM-Störsignale

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der FM-Störsender mit zwei unterschiedlichen Signalen moduliert, die in den folgenden Abschnitten dokumentiert werden.

9.2.2.1. Monostörer

Hierbei handelt es sich um einen monophon modulierte FM-Signal, das gem. [ITU02b] aus einem gefärbtes Rauschen besteht. Aus diesem Grund wird dieses Signal auch im folgenden mit dem Begriff „Normstörer“ bezeichnet. Der Spitzenhub betrug hierbei 45 kHz bei einer Multiplexleistung von $-2,8$ dBr. Die Hubverteilung zeigt in Abb. 9.1, die dazugehörigen Spektren stellt Abb. 9.2 dar.

Mit dem max. Hub von 45 kHz und einer max. Modulationsfrequenz von 15 kHz ergibt sich eine 99%-Carsonbandbreite von:

$$\begin{aligned} B_{99} &= 2(\Delta f + 2f_{s,\max}) \\ B_{99,\text{mono}} &= 2(45 \text{ kHz} + 2 \cdot 15 \text{ kHz}) \\ B_{99,\text{mono}} &= 150 \text{ kHz} \end{aligned} \tag{9.1}$$

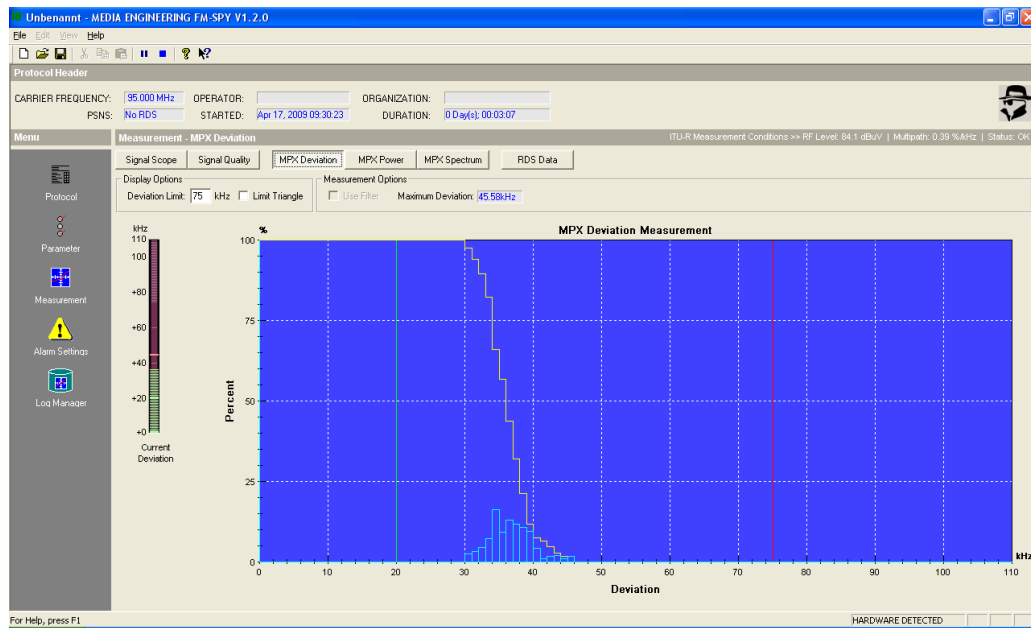


Abb. 9.1.: Histogramm der Spitzenhubverteilung (Monostörer). Blau: Verteilung; Gelb: Max-Hold (jeweils über die komplette Messzeit)

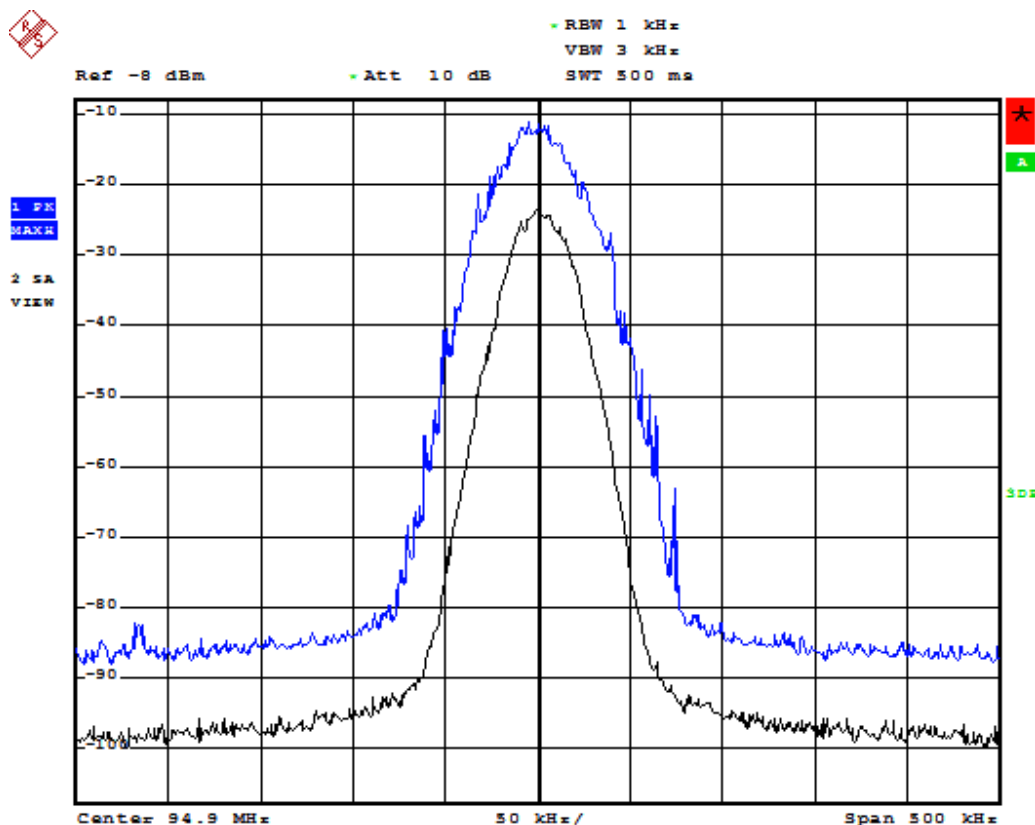


Abb. 9.2.: Blau: Leistungsdichtespektrum, Schwarz: Max-Holdspektrum des Monostörers

9.2.2.2. Stereostörer

Das Stereosignal wurde frei definiert. Hierbei wurde der Sender so moduliert, daß ein Spitzenhub von 75 kHz bei Einhaltung einer Multiplexleistung von 0 dB_r erzeugt wird. Um einen heutigen realen Sender zu simulieren, wurde darüberhinaus der Dynamikumfang des modulierenden Signals durch einen Kompressor komprimiert. Ausgangsbasis des Signals ist das gefärbte Rauschen, das zur Erzeugung

des Monostörers verwendet wurde. Das Rauschen des rechten Audiokanals war hierbei unkorreliert von dem linken Kanal (und umgekehrt). Es wurde lediglich die Lautstärke und die Kompression des Signals beeinflusst. Abbildung 9.3 stellt die Hubverteilung der verwendeten Signalform dar. Zur Plausibilitätskontrolle wurde ein Vergleich mit den gemittelten und MaxHold-spektren von Titeln aus dem Bereich „Classic Rock“ sowie „Heavy Metal“ durchgeführt, die völlig unterschiedliche Eigenschaften (Produktionszeitraum, Kompression, spektrale Energiedichte) aufweisen.

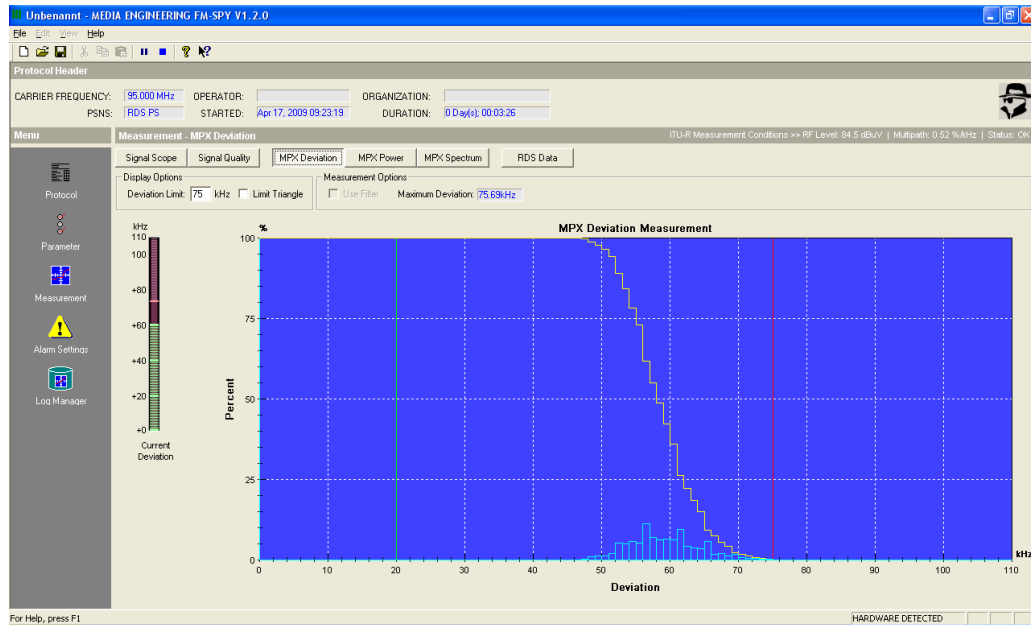


Abb. 9.3.: Histogramm der Spitzenhubverteilung (Stereostörer). Blau: Verteilung; Gelb: Max-Hold (jeweils über die komplette Messzeit)

Die Abbildungen 9.4 sowie 9.5 stellen das mittlere bzw. das max. Spektrum dieser Modulations-signale dar (blauer Trace: zur Messung verwendetes Rauschsignal; schwarzer Trace: „Classic Rock“; grüner Trace: „Heavy Metal“). Die Spektren weisen insbes. im Bereich nahe am Träger eine hohe Ähnlichkeit auf; die mittleren Spektren unterscheiden sich insgesamt nur minimal. Zusätzlich wurde dem Stereosignal RDS beigefügt.

Somit ergibt sich eine Carsonbandbreite gem. Gl. 9.1:

$$B_{99,\text{stereo}} = 2 (75 \text{ kHz} + 2 \cdot 60 \text{ kHz})$$

$$B_{99,\text{stereo}} = 390 \text{ kHz}$$

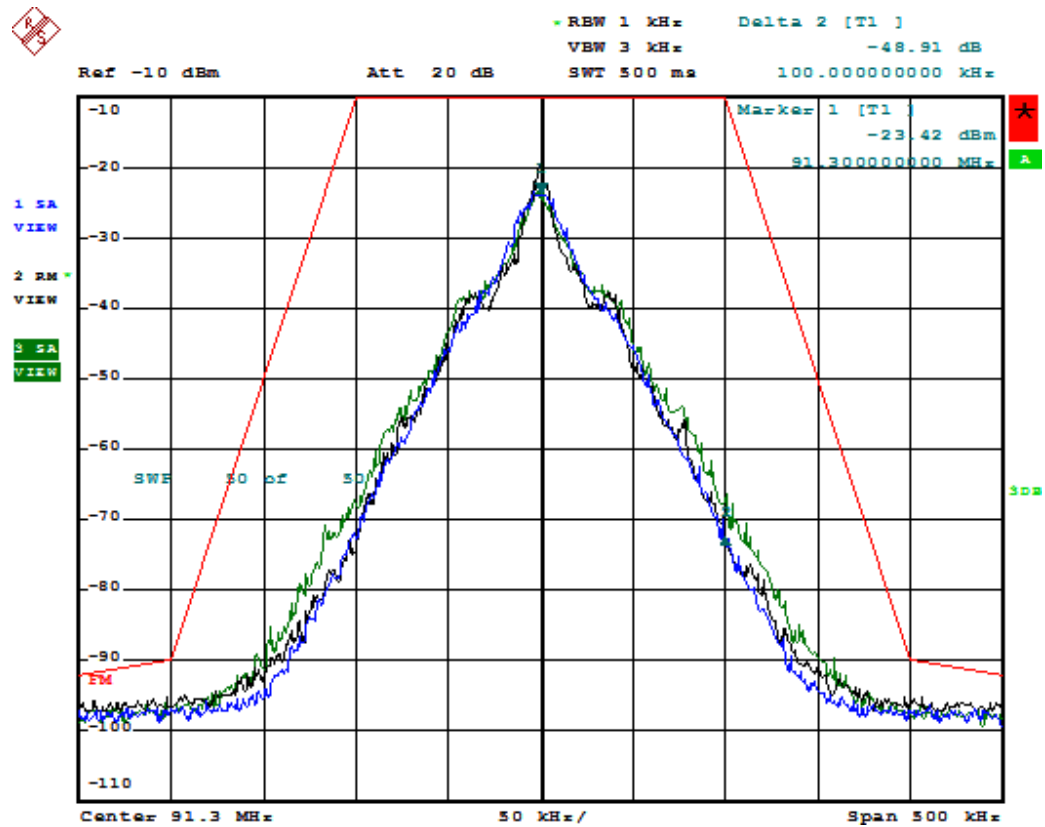


Abb. 9.4.: Gemittelte Leistungsdichtespektren verschiedener Stereomodulationen

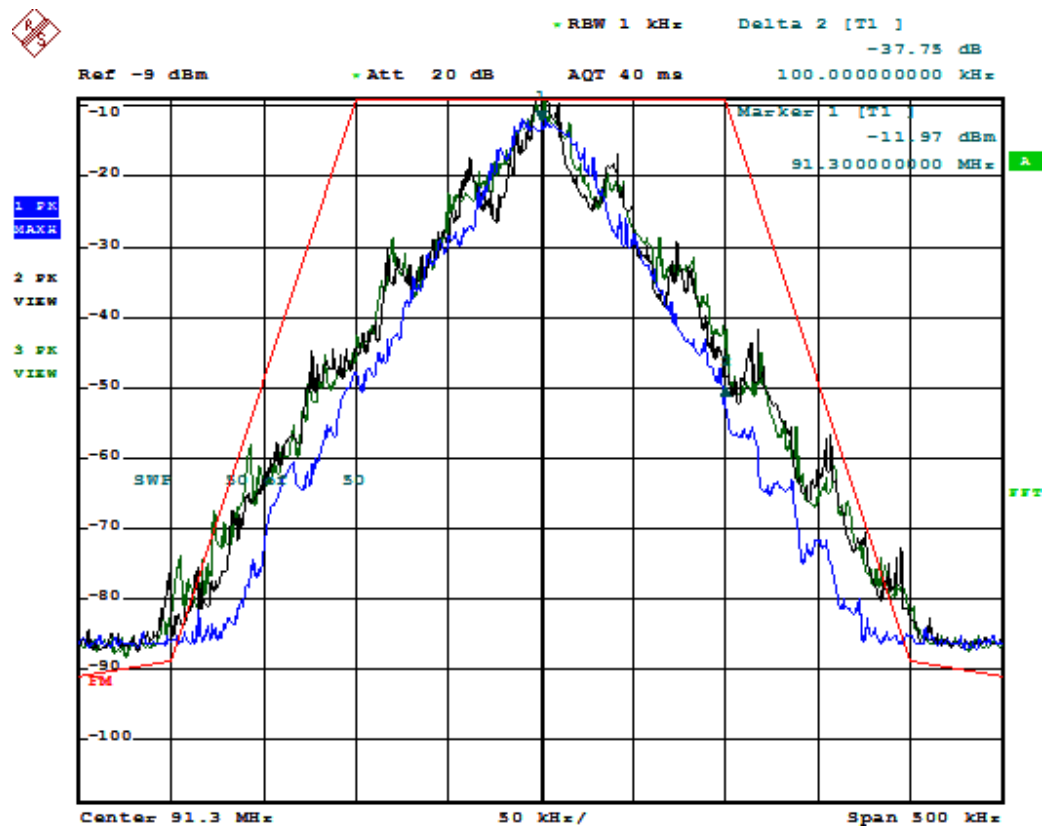


Abb. 9.5.: MaxHold-Spektren verschiedener Stereomodulationen

9.2.3. DRM⁺-Störsignal

Zur Simulation eines DRM⁺-Störsenders wurde mit dem ARB-Generator des SMU ein Signal erzeugt, daß den Worst-Case eines DRM⁺-Senders (bei Einhaltung der FM-Spektrumsmaske) repräsentiert, s. Abb. 9.6.

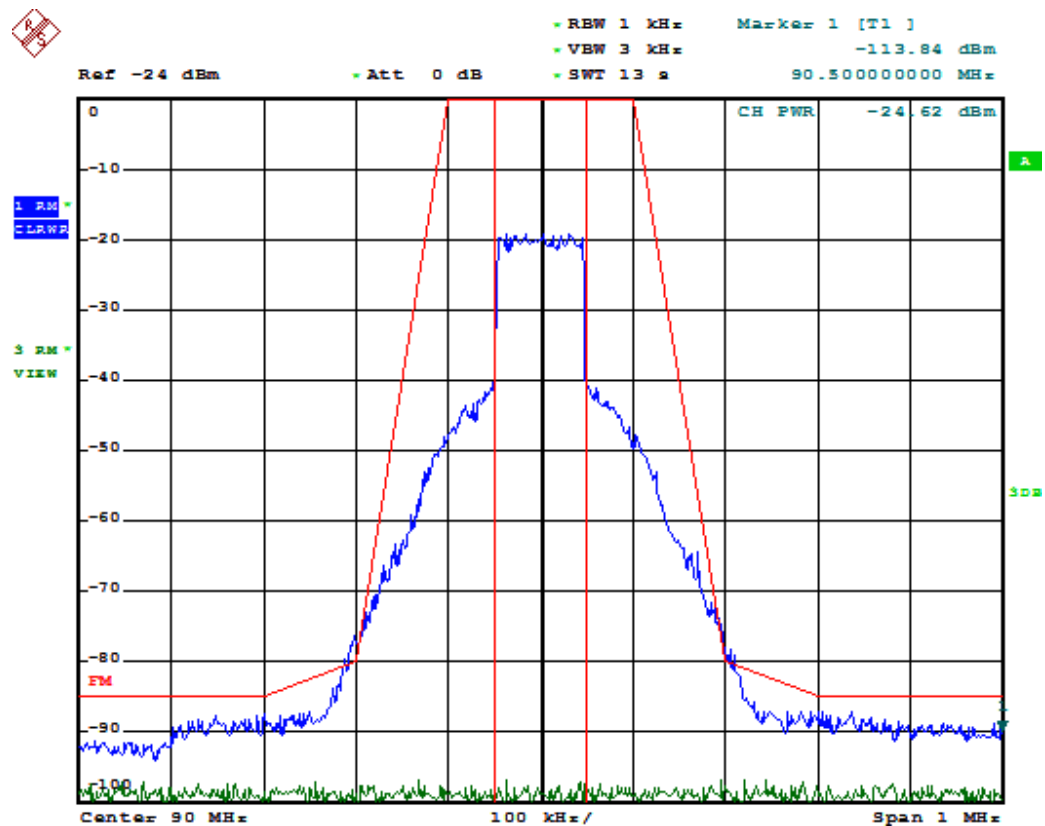
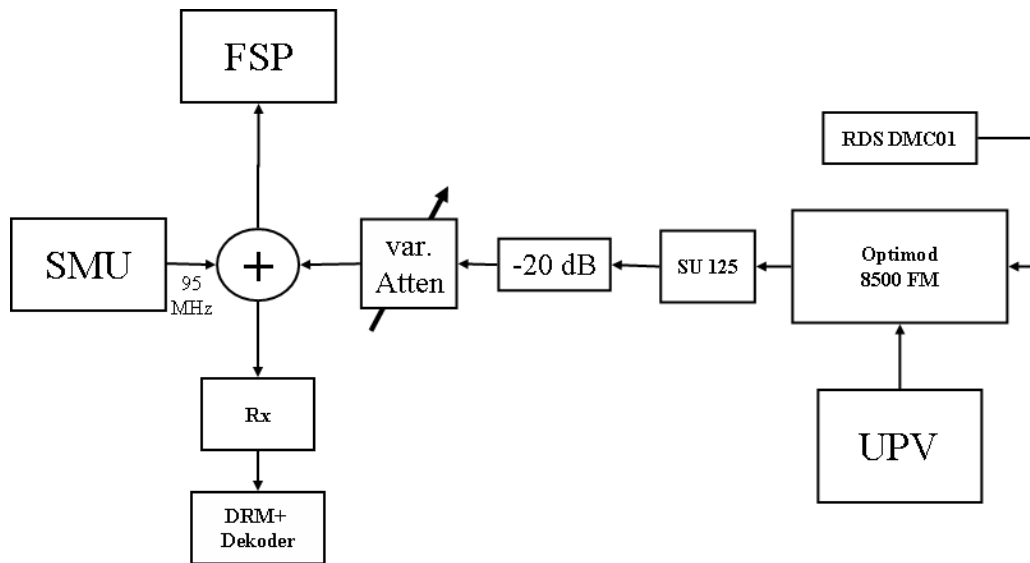


Abb. 9.6.: Leistungsdichtespektrum des verwendeten DRM⁺-Störsignals. Blauer Trace: LDS; Grüner Trace: Rauschgrenze des Spektrumanalyzers

9.3. Messaufbauten

Die beiden folgenden Abschnitte beschreiben die zu den Messungen notwendigen Schaltungen und Geräte.

9.3.1. Störsignal: FM

Abb. 9.7.: Schaltbild: Schutzabstandsmessung FM stört DRM⁺

Zur Erzeugung des Störsignals wird das modulierende Signal (Mono oder Stereo) aus einer Datei vom UPV Audio Generator/Analyzer abgespielt und in den Orban Optimod-8500 eingespeist. Dieser erfüllt im Monofall nur die Funktion des Preemphasefilters. Beim Fall „Stereo“ übernimmt er zusätzlich die Rolle des Stereocoders und Kompressors. Zusätzlich wird im Stereofall das vom RDS-Coder R&S DMC01 erzeugte RDS-Signal dem Multiplex hinzugefügt. Der FM-Steuersender R&S-SU125 frequenzmoduliert das Multiplexsignal auf einer einstellbaren Trägerfrequenz bei einer Trägersendeleistung von 0,4 W. Im Anschluß an ein festes 20 dB-Dämpfungsglied am Senderausgang¹ wird ein stufenloses, variables Dämpfungsglied mit einem Dämpfungsbereich von 6 dB bis 60 dB angekoppelt.

Das DRM⁺-Nutzsignal wird gemäß den Angaben in Kap. 4 erzeugt. Soweit nicht anders vermerkt, entsprechen die Coderaten bei den jeweiligen Subträgermodulationen den Angaben in Tabelle 7.1.

Nutz- und Störsignal werden mittels eines 10 dB-Kopplers verbunden. Das Summensignal wird zur Beobachtung an den Spektrumanalysator FSP sowie an den DRM⁺-Empfänger verteilt.

¹Überbrückt bei Messungen, zu denen eine höhere Störleistung notwendig war.

9.3.2. Störsignal: DRM⁺

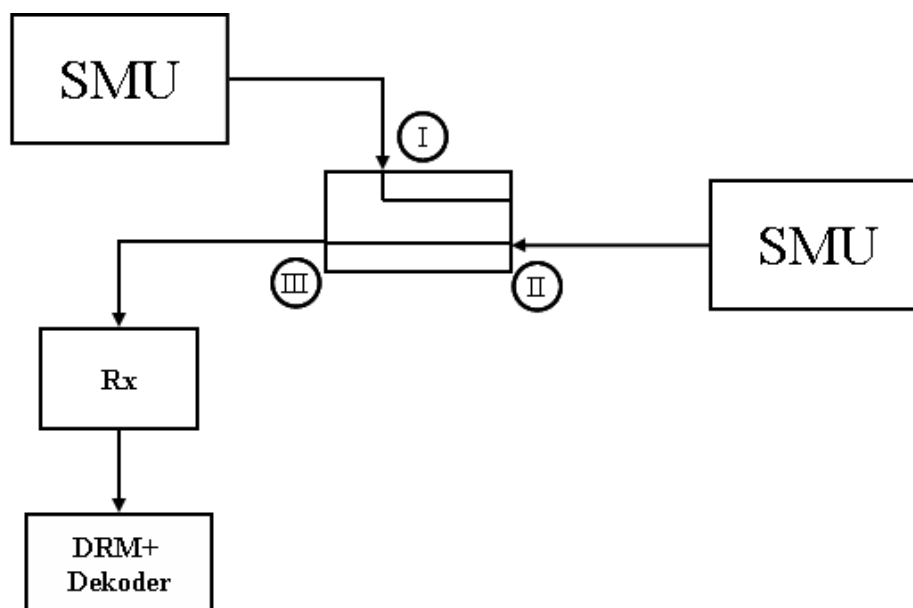


Abb. 9.8.: Schaltbild: Schutzabstandsmessung DRM⁺ stört DRM⁺. Die Bezeichnungen an den Toren des Richtkopplers beziehen sich auf Tab. 9.2.

Das Störsignal wird mittels des ARB-Generators eines SMU200A bei einer frei wählbaren Frequenz zur Verfügung gestellt. Über ein stufenloses, variables Dämpfungsglied 6...60 dB wird es mittels eines Richtkopplers (Koppelmaße: s. Tab. 9.2) dem Empfänger zugeführt.

Das Nutzsignal wird analog zu dem oben beschriebenen Aufbau erzeugt und mittels des Richtkopplers dem Empfänger zugeführt.

Zur Überwachung des Summensignals wurde der Empfänger bei Bedarf durch einen Spektrumanalyzer ersetzt.

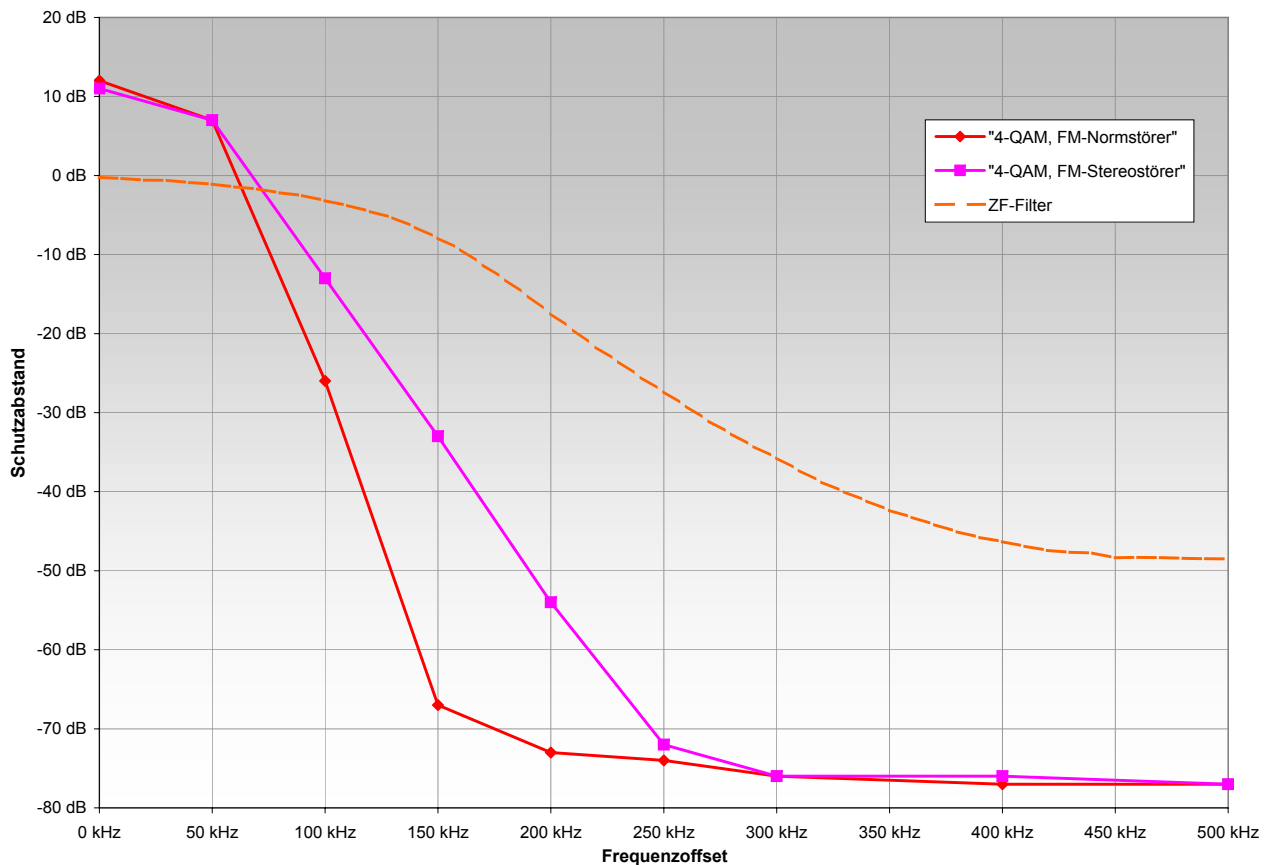
Port A	Port B	Atten/dB
I	III	20
II	III	1
I	II	> 40

Tab. 9.2.: Koppelmaße des Richtkopplers, Messaufbau DRM⁺ stört DRM⁺

9.4. Messung FM stört DRM⁺

Zu dieser Messung wird der Aufbau gem. Abb. 9.7 verwendet. Die Einstellungen des Audiogenerators, Optimod sowie die Addition des RDS-Signals wurden jeweils beim Wechsel zwischen Mono- und Stereostörer angepasst. Die Bezeichnungen „4-QAM-Variante“ bzw. „16-QAM-Variante“ beziehen sich auf die Modulation des DRM⁺-MSC. Falls nicht anders angegeben, wurden standardmäßig die in Tab. 7.1 aufgeführten Coderaten verwendet.

9.4.1. 4-QAM-Variante



Frequenzoffset / kHz	0	50	100	150	200	250	300	400	500
PR 4QAM, FM-Normstörer/dB	12	7	-26	-67	-73	-74	-76	-77	-77
PR 4QAM, FM-Stereostörer/dB	11	7	-13	-33	-54	-72	-76	-76	-77

Abb. 9.9.: Schutzabstände für die 4-QAM-Variante gegen FM-Rundfunk, Mono- und Stereostörer.
Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$.

Für die beiden in Kap. 9.2.2 angegebenen FM-Signalvarianten ergeben sich die in Abb. 9.9 dargestellten Schutzabstände. Zusätzlich ist in der Abbildung der normierte Frequenzgang des ZF-Filters eingetragen.

Anhand der Abbildung ist erkennbar, daß die 4-QAM-Variante im Gleichkanal – unabhängig von der Störmodulation – einen Schutzabstand von ca. 11 dB benötigt. Dies entspricht demjenigen Leistungsverhältnis des unmodulierten und modulierten FM-Trägers. Bei Frequenzabständen ≥ 250 kHz ist der Schutzabstand in beiden Fällen nur durch den Effekt bestimmt, daß der Empfänger durch die hohen Störpegel am Eingang desensibilisiert wird: das Frontend des Empfängers regelt die Eingangsverstärkung ab, SNR_{Dec} am Dekodereingang sinkt bis zur Dekodierungsgrenze ab (Rauschbegrenzung). Die HF-Dynamik des Störsignals ist größer als der Dynamikbereich der Schutzabstände (ca. 100 dB vs. 85 dB), was die These der Desensibilisierung stützt.

In dem Bereich zwischen Gleichkanal und dem dritten Nachbarkanal ist der Verlauf der Schutzabstände durch die jew. Störmodulation geprägt. Für den Monostörer gilt, daß der Übergangspunkt zwischen dem Bereich „Störung durch Signalform“ und „Beginn der Desensibilisierung“ insbes. durch die Bandbreite des Signals (s. Abschnitt 9.2.2.1) geprägt ist.

Im Falle des Stereostörers ist der zusätzliche Einfluß des ZF-Filters zu erkennen – die Signalbandbreite ist in diesem Fall größer als der Übergangsbereich.

9.4.2. 16-QAM-Variante

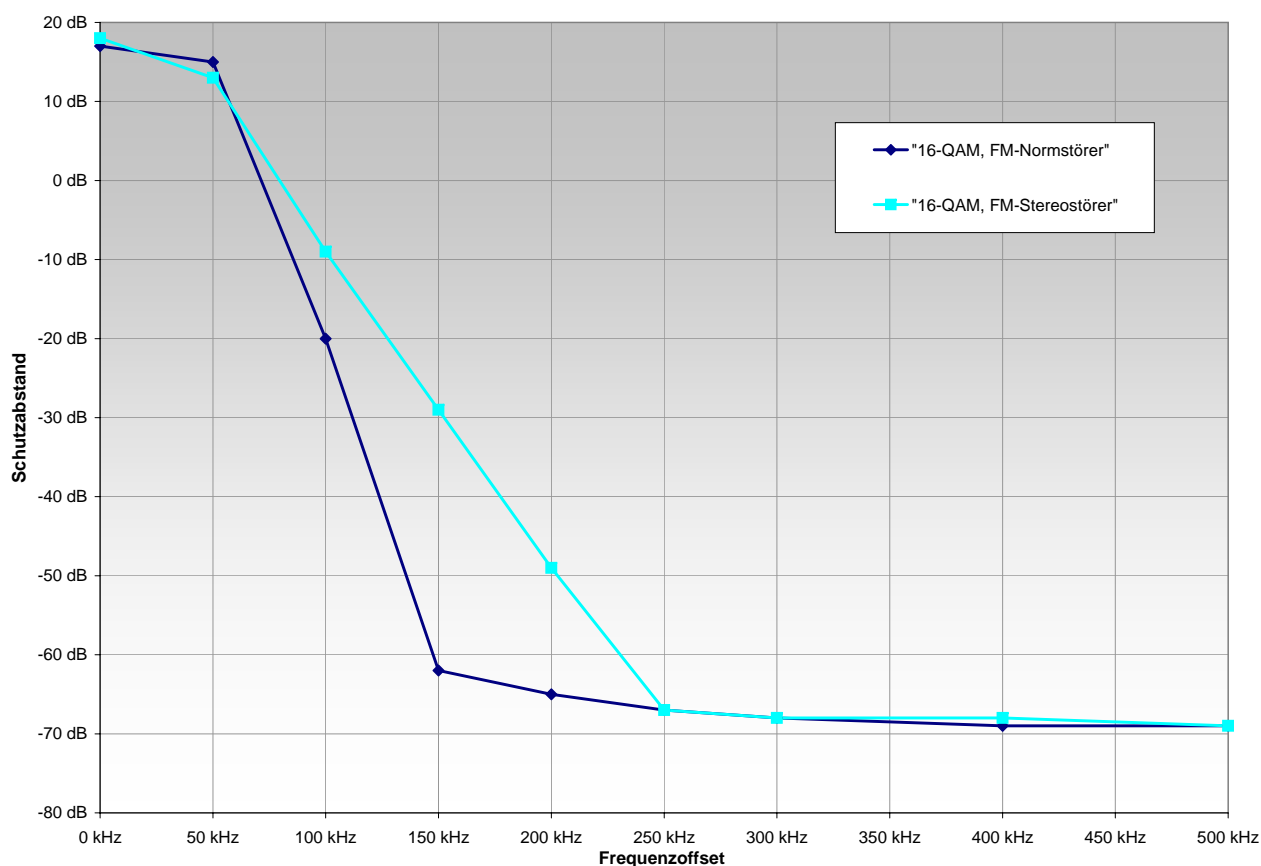


Abb. 9.10.: Schutzabstände für die 16-QAM-Variante gegen FM-Rundfunk, Mono- und Stereostörer.
Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$.

Für die beiden angegebenen FM-Signalvarianten ergeben sich die in Abb.9.10 dargestellten Schutzabstände. Man kann erkennen, daß sich ein Verhalten ähnlich der 4-QAM-Variante zeigt. Auch hier gibt es ab einem Frequenzoffset von 250 kHz und aufwärts den Bereich, in dem der Empfänger in die Sättigung getrieben wird. Zur Überprüfung des Messergebnisses wurde der Nutzsignalpegel um 35 dB erhöht und die vorige Messung wiederholt. Das Ergebnis konnte mit einer Genauigkeit von ± 1 dB wiederholt werden. Dies bedeutet, daß die Messungen an sich reproduzierbar und nicht durch das Rauschen und Nichtlinearitäten des Empfängers beeinflusst sind.

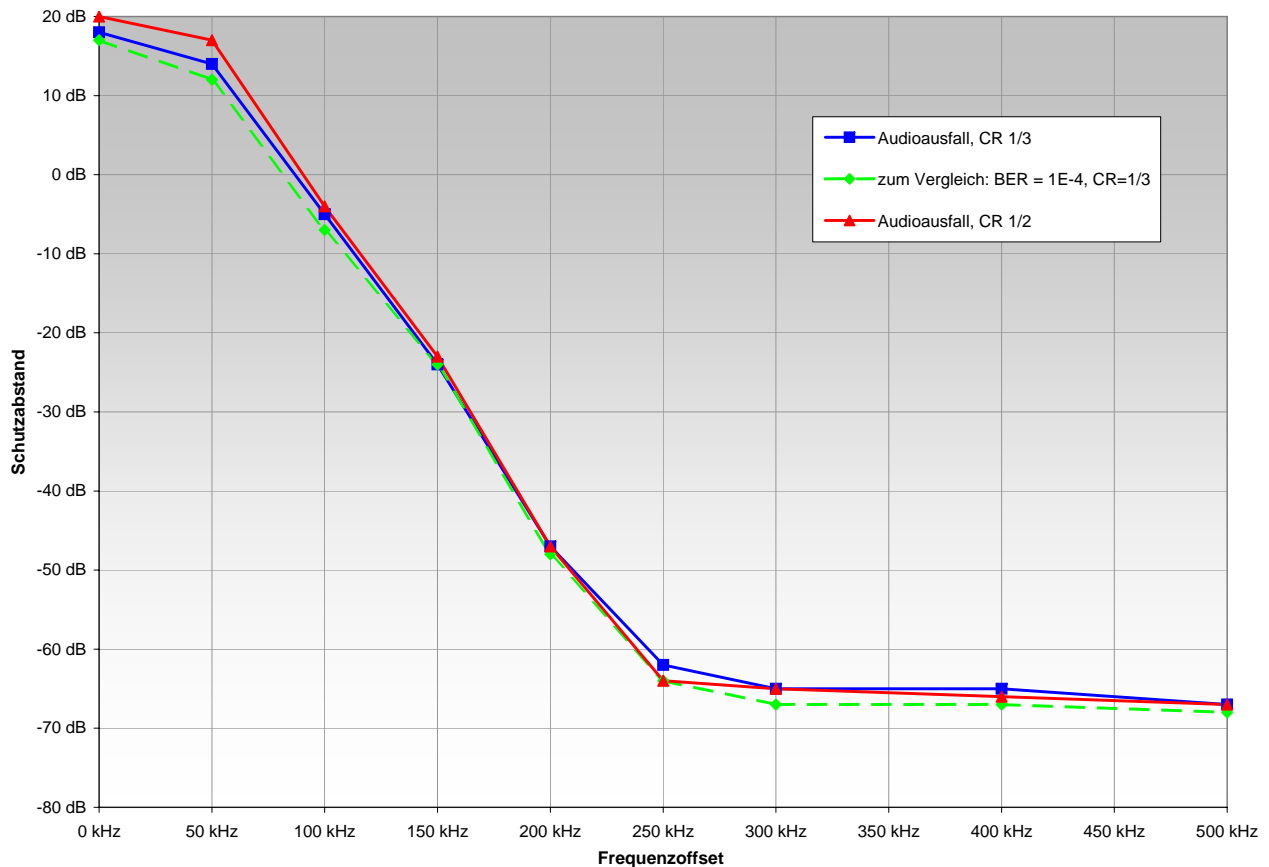
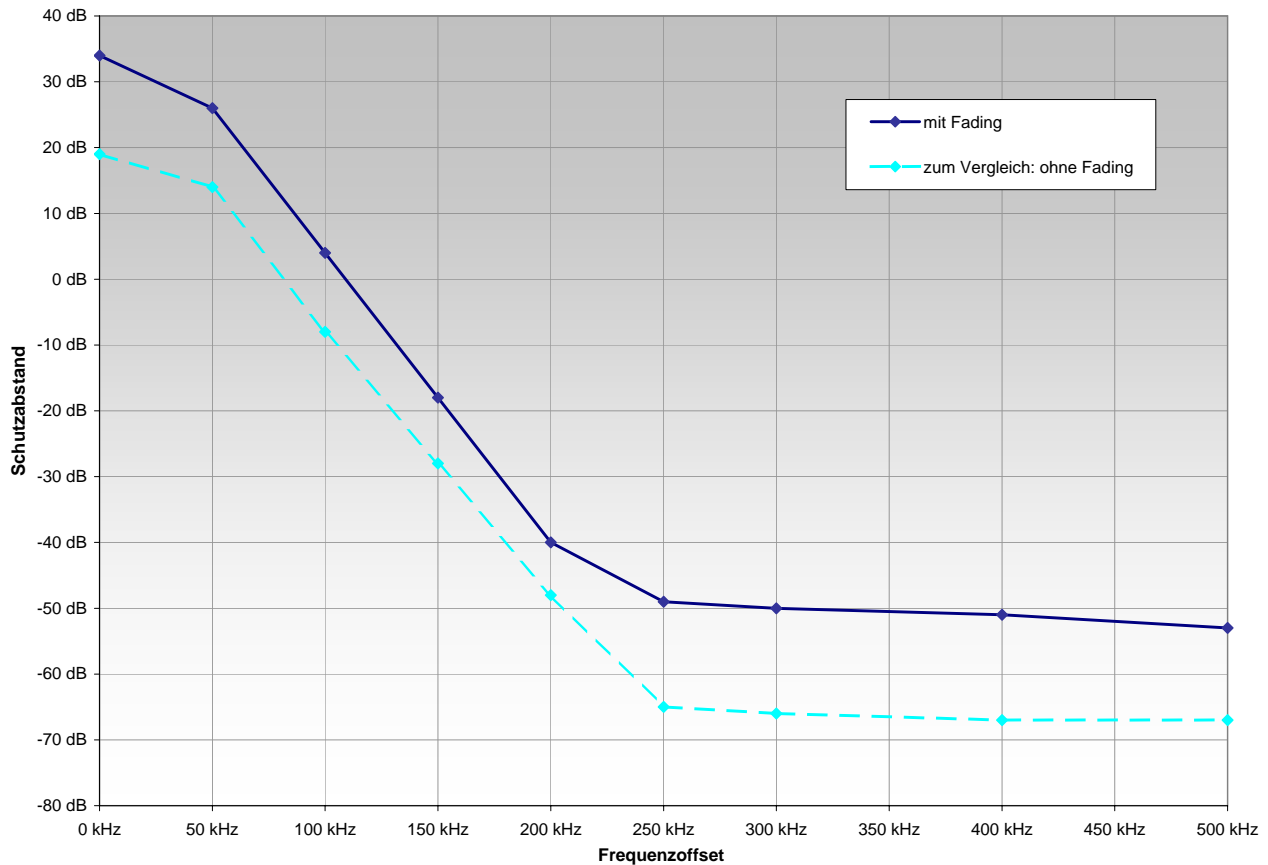


Abb. 9.11.: Schutzabstände für die 16-QAM-Variante gegen FM-Stereorundfunk; Störkriterium: Audioausfall

Von weiterem Interesse im Rahmen dieser Messreihe stand die Frage, wie nahe das diensteunabhängige Störkriterium $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ und der Ausfall der Audiodekodierung stehen. Hierbei ist zu beachten, daß in Zukunft die MPEG4-HE-AAC-Familie bzw. die verwendeten Dekoder selbst immer noch Verbesserungen im Bereich der Fehlerresistenz gewinnen können. Zu dieser Messung wurde die PRBS-Sequenz im MSC komplett durch einen MPEG4-HE-AAC-Datenstrom ersetzt. Das Ergebnis ist in Abb. 9.11 (blau) dargestellt. Zum Vergleich ist die vorhergehende Messung aus Abb. 9.10 (grün) wiederholt dargestellt. Weiterhin wurde bei der Untersuchung des Audioausfalls der Einfluss der Coderate miteinbezogen (rot). Der Unterschied zwischen dem Störkriterium „ $\overline{\text{BER}}$ “ und „Audioausfall“ liegt bei 1 dB, was zusätzlich durch die Ergebnisse in Abb. 7.2 gestützt wird.

Bei der Wiederholung dieser Messung mit einer erhöhten Coderate von 1/2 statt den bisherigen 1/3 stellt man fest, daß hierzu ein Aufschlag von ca. 3 dB notwendig ist. Bei Frequenzabständen $\Delta f \geq 150$ kHz verschwindet dieser Unterschied. Die Betrachtung dieser beiden Varianten wurde mit dem Störertyp „FM-Stereostörer“ durchgeführt.



Frequenzoffset / kHz	0	50	100	150	200	250	300	400	500
PR 16QAM ohne Fading /dB	19	14	-8	-28	-48	-65	-66	-67	-67
PR 16QAM mit Fading /dB	34	26	4	-18	-40	-49	-50	-51	-53

Abb. 9.12.: Schutzabstände für die 16-QAM-Variante mit Fading gegen FM-Stereorundfunk; Störkriterium: Audioausfall

Im Anschluss an diese Betrachtungen wurde bei dieser Variante der Mehrwegeempfangsfall simuliert. Das Nutzsignal wurde mit dem Kanalsimulator des SMU (Nutzsignalgenerator) dem in Tab. 9.1 angegebenen Mehrwegeausbreitungsmodell unterworfen. Das Störsignal blieb weiterhin statisch. Dies simuliert den Fall, daß das Nutzsignal den Empfänger auf verschiedenen Wegen, das Störsignal den Empfänger auf einem direktem Weg erreicht. Somit stellt dies eine Simulation des Worst-Case dar. Um zu vermeiden, daß das Nutzsignal aufgrund der Eingangspegelschwankungen unterhalb die Empfindlichkeitsgrenze des Empfängers sinkt wurde der Nutzpegel auf einen RMS-Wert von -56 dBm erhöht. Das Ergebnis ist in Abb. 9.12 dargestellt. In der Abbildung ist zusätzlich als Referenz das Ergebnis aus Abb. 9.10 (Stereostörer) eingetragen. Für Frequenzdifferenzen im Intervall $0 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 250 \text{ kHz}$ ist demnach ein Aufschlag der Schutzabstände im vgl. zu der statischen Empfängersituation im ca. 10 dB notwendig. Bei größeren Frequenzabständen scheint dieser Aufschlag sich zu vergrößern. Tatsächlich wird hier aber der Effekt der Reduktion des SNR_{Dec} durch das Abregeln der Verstärkung innerhalb des HF-Frontends wiedergespiegelt, so daß auch in diesem Bereich der Frequenzdifferenzen ein Aufschlag von 10 dB anzusetzen ist.

9.5. Messung DRM⁺ stört DRM⁺

Zu dieser Messung wird der Aufbau gem. Abb. 9.8 verwendet. Die Bezeichnungen „4-QAM-Variante“ bzw. „16-QAM-Variante“ beziehen sich auf die Modulation des DRM⁺-MSC. Falls nicht anders angegeben, wurden die in Tab. 7.1 aufgeführten Coderaten verwendet. Das Nutzsignal beinhaltete eine synchrone PRBS-Sequenz.

9.5.1. 4-QAM-Variante

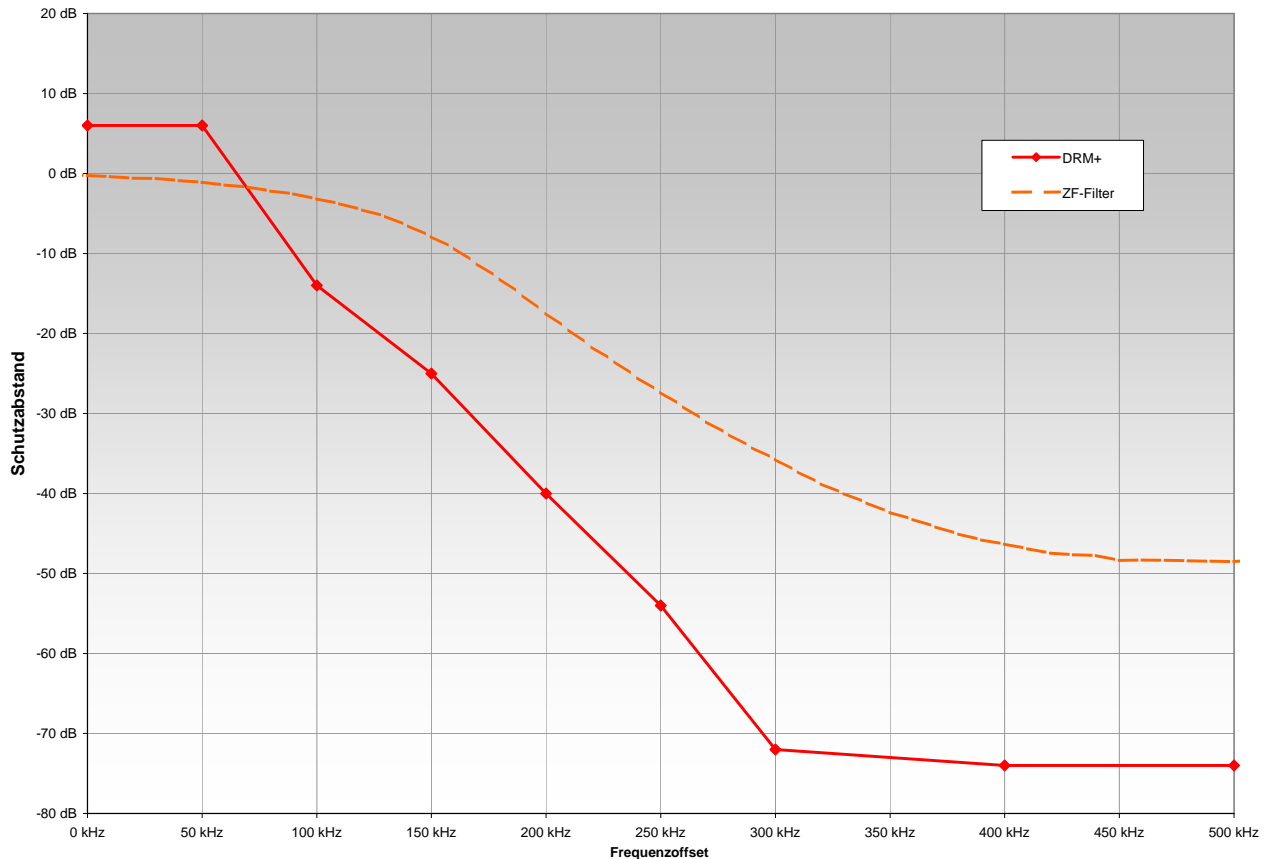
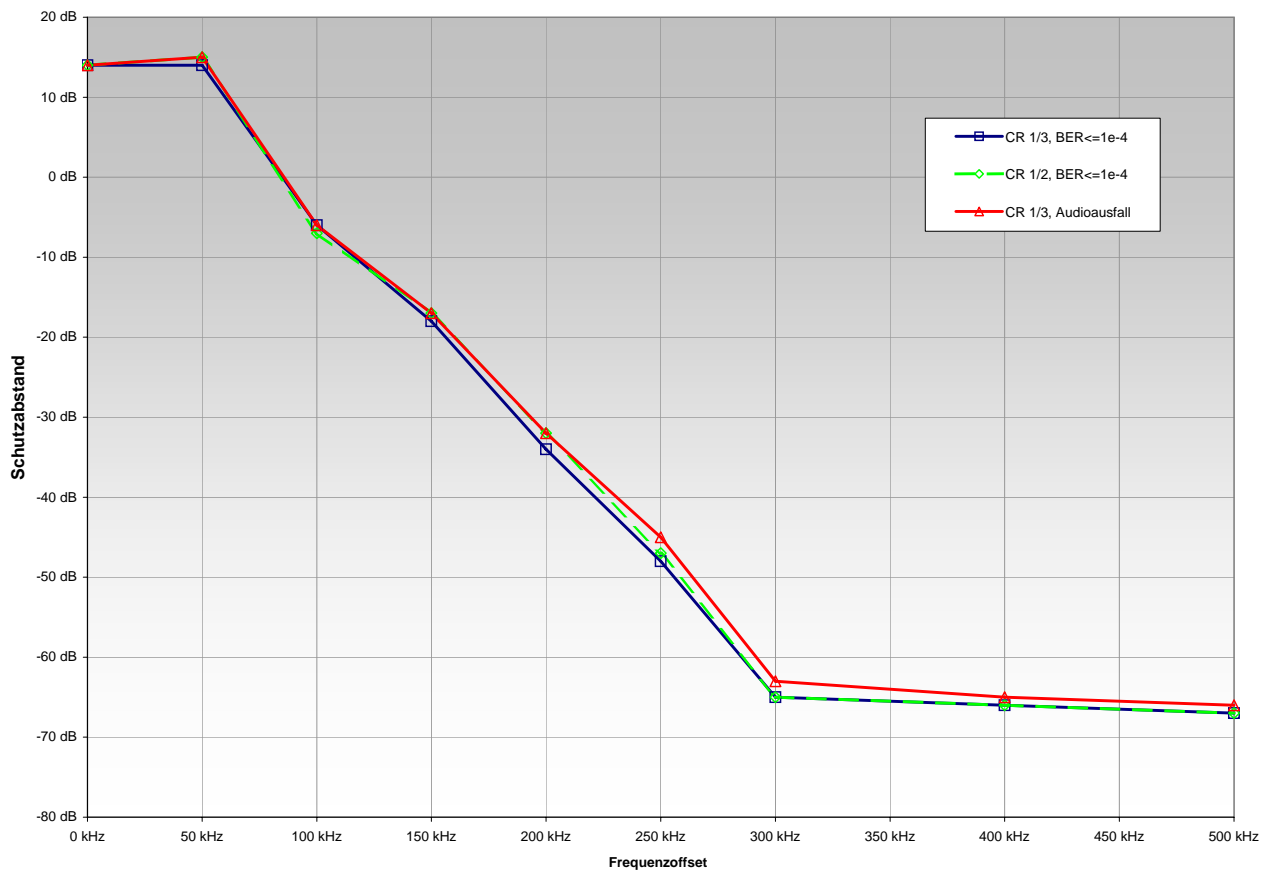


Abb. 9.13.: Schutzabstände der 4-QAM-Variante gegenüber DRM⁺; Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$.

In Abb. 9.13 sind die Messergebnisse zum Schutz der 4-QAM-Variante gegenüber einem DRM⁺-Signal sowie der Verlauf des ZF-Filters dargestellt. Im Gleichkanal beträgt der notwendige Schutzabstand zum Einhalten des Störkriteriums $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ ungefähr dem notwendigen SNR_{Dec} im AWGN-Kanal zum Erreichen von $\overline{\text{BER}}$. Der weitere Verlauf der Kurve wird durch den spektralen Verlauf des Störsignals bestimmt. Das Abfallen der Kurve im ersten Nachbarkanal entspricht dem Schulterabstand des störenden DRM⁺-Signals. Für Frequenzabstände von 300 kHz und aufwärts ist das Verhalten von der Desenibilisierung des Empfängers geprägt.

9.5.2. 16-QAM-Variante

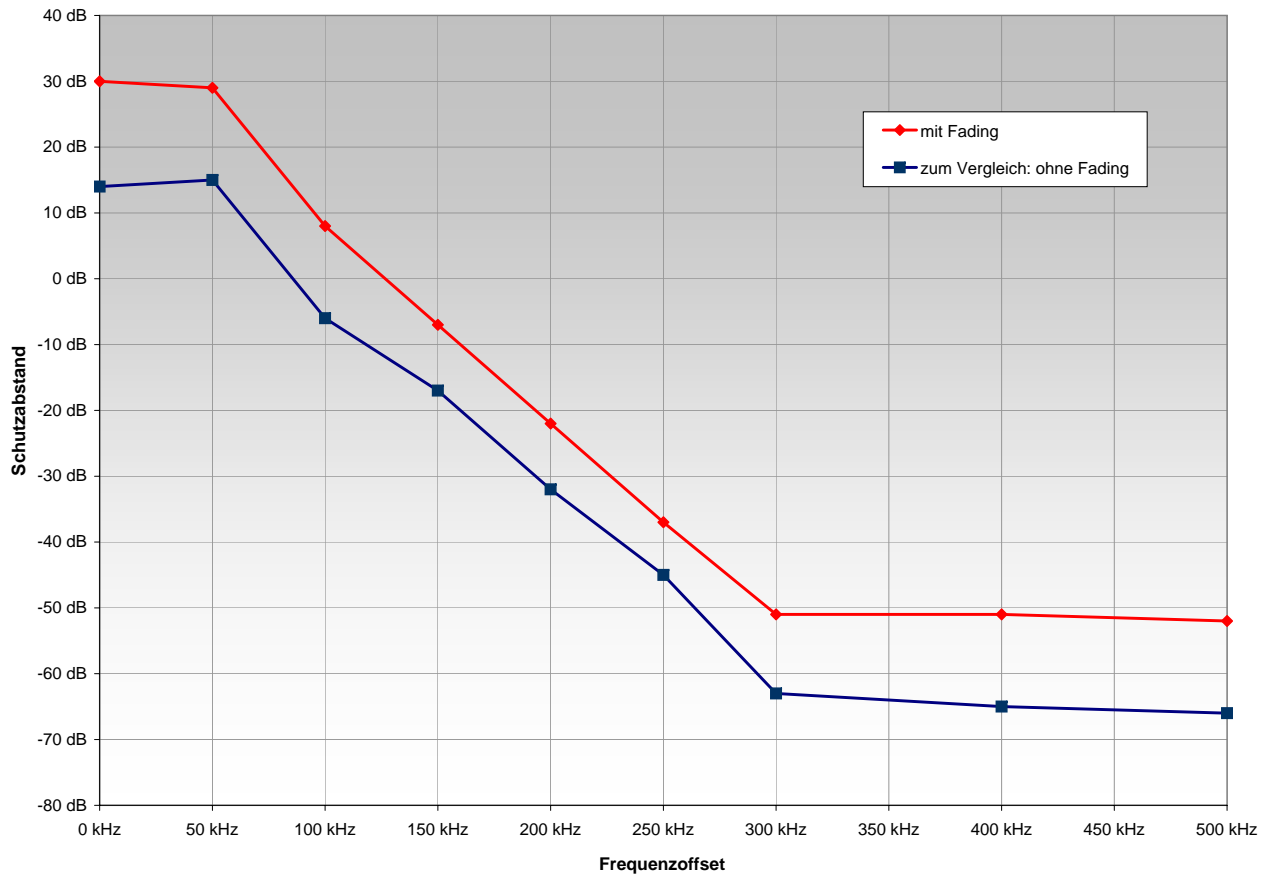


Frequenzoffset / kHz	0	50	100	150	200	250	300	400	500
PR CR 1/3, $\overline{\text{BER}}$ /dB	14	14	-6	-18	-34	-48	-65	-66	-67
PR CR 1/2, $\overline{\text{BER}}$ /dB	14	15	-7	-17	-32	-47	-65	-66	-67
PR CR 1/3, Audioausfall/dB	14	15	-6	-17	-32	-45	-63	-65	-66

Abb. 9.14.: Schutzabstände der 16-QAM-Variante gegenüber DRM⁺ inkl. Variation von Störkriterium und Coderate

Abb. 9.14 stellt die Messergebnisse bei Störungen der 16-QAM-Variante durch ein DRM⁺-Signal dar. Desweiteren ist der Einfluss des Wechsels der Coderate 1/3 zu einem niedrigeren Schutz mit Coderate 1/2 dargestellt. Zusätzlich wurde als alternatives Störkriterium der Abriss der Audiodenkodierung untersucht.

Der Schutzabstand im Gleichkanal entspricht dem SNR_{Dec} , das der Empfänger zum Erreichen von $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ im AWGN-Kanal benötigt. Dies bedeutet, daß ein störendes DRM⁺-Signal für den Empfänger wie ein weisses Gaussrauschen wirkt. Im ersten Nachbarkanal entspricht die Differenz des Schutzabstandes zum Gleichkanal dem Schulterabstand des Störsignals. Der weitere Verlauf der Kurve wird durch den spektralen Verlauf des Störsignals bestimmt. Das Abfallen der Kurve im ersten Nachbarkanal entspricht dem Schulterabstand des störenden DRM⁺-Signals. Für Frequenzabstände von 300 kHz und aufwärts ist das Verhalten von der Desensibilisierung des Empfängers geprägt. Der Wechsel der Coderate beeinflusst die notwendigen Schutzabstände in diesem Fall kaum; die Variation der Ergebnisse liegt im Bereich von 1 dB. Der Wechsel des Störkriteriums beeinflusst das Messergebnis ebenfalls nur marginal, was durch Abb. 7.2 gestützt wird.

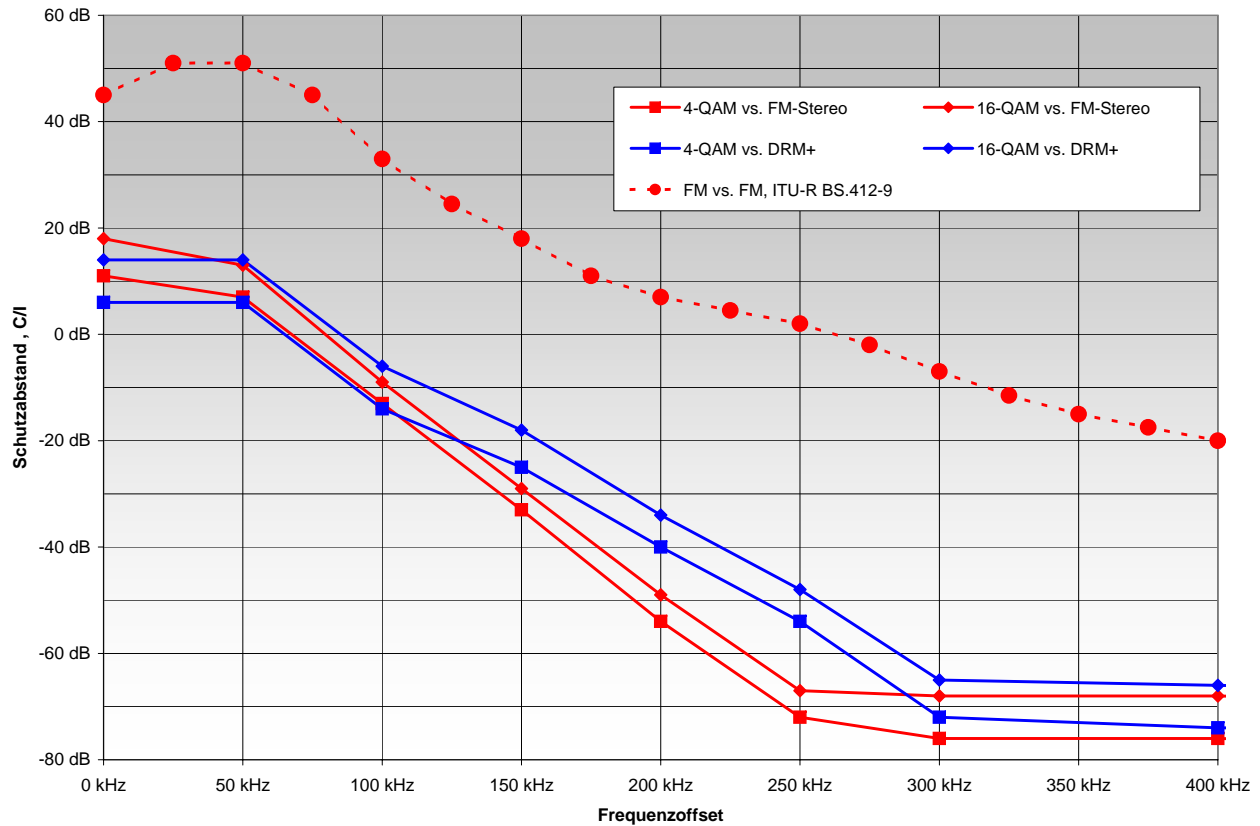


Frequenzoffset / kHz	0	50	100	150	200	250	300	400	500
PR mit Fading / dB	30	29	8	-7	-22	-37	-51	-51	-52
PR ohne Fading / dB	14	15	-6	-17	-32	-45	-63	-65	-66

Abb. 9.15.: Schutzabstände der 16-QAM-Variante gegenüber DRM⁺ bei Mehrwegeempfang; Störkriterium: Audioausfall

Im Anschluss an diese Betrachtungen wurde bei dieser Variante der Mehrwegeempfangsfall durchgespielt. Das Nutzsignal wurde mit einem Kanalsimulator dem in Tab. 9.1 angegebenen Mehrwegeausbreitungsmodell unterworfen. Das Störsignal blieb hierbei weiterhin statisch. Dies simuliert den Fall, daß das Nutzsignal den Empfänger auf verschiedenen, das Störsignal den Empfänger auf einem direktem Weg erreicht. Dies heißt, das damit der Worst-Case simuliert wird. Um zu vermeiden, daß das Nutzsignal aufgrund der Eingangspegelschwankungen unterhalb des Empfängereigenrauschens sinkt, wurde der Nutzpegel auf einen RMS-Wert von -56 dBm erhöht. Das Ergebnis ist in Abb. 9.15 (Code rate 1/3) dargestellt. Hierbei ist zur Referenz das Ergebnis aus Abb. 9.14 (Stereostörer) sowie die Differenz der Messung mit Fading zu dem statischen Empfangsfall eingetragen (orange). Im Mittel sind die unter diesen Bedingungen ermittelten Aufschläge der Schutzabstände um 13 dB höher als im statischen Empfangsfall. Innerhalb der Messfehlergrenze von ± 1 dB deckt sich dieses Ergebnis mit dem Resultat dieser Messung bei Verwendung des FM-Störsignals.

9.6. Vergleich der Ergebnisse



Frequenzoffset / kHz	0	50	100	150	200	250	300	400
PR 4QAM vs. FM-Stereo / dB	11	7	-13	-33	-54	-72	-76	-76
PR 16QAM vs. FM-Stereo / dB	18	13	-9	-29	-49	-67	-68	-68
PR 4QAM vs. DRM ⁺ / dB	6	6	-14	-25	-40	-54	-72	-74
PR 16QAM vs. DRM ⁺ / dB	14	14	-6	-18	-34	-48	-65	-66
PR FM vs. FM, ITU-R / dB	45	51	33	18	7	2	-7	-20

Abb. 9.16.: Zusammenfassung der Schutzabstände für DRM⁺, Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$. Zum Vergleich: Schutzabstände für den FM-Stereorundfunk gem. [ITU02a].

In Abb. 9.16 sind die Ergebnisse der Abschnitte 9.4 und 9.5 zusammengefasst. In der Abbildung wird der jeweilige Störertyp farblich angezeigt (FM-Stereo: rot; DRM⁺: blau). Die Symbole ■, ◆ bzw. ● repräsentieren das jeweilige Nutzsignal (DRM⁺-MSC: 4-QAM; DRM⁺-MSC: 16-QAM; FM-Stereorundfunk).

Im Falle eines FM-Störers hängt der Kurvenverlauf von der jew. mittleren Leistungsdichte der Seitenbänder des Störsignals ab. Der Gleichkanalschutzabstand ist durch das Verhältnis der unmodulierten Trägerleistung zu der mittleren Leistung auf der Trägerfrequenz sowie dem vom DRM⁺-Empfänger benötigten S/N abhängig.

Im Falle eines DRM⁺-Störers ist der Gleichkanalabstand im wesentlichen nur abhängig von dem vom DRM⁺-Empfänger benötigten S/N. Bei größeren Frequenzabständen ist der Schutzabstand insbes. durch das Verhalten der Regelung des Empfängerfrontends geprägt und – in den hier untersuchten Fällen – von der Desensibilisierung des Empfängers aufgrund der hohen Eingangspegel bestimmt.

Der Effekt der Desensibilisierung – und somit der Reduktion des SNR_{Dec} in Präsenz starker Störsignale – ist leicht zu erkennen, wenn man den Unterschied des Mindest- SNR_{Dec} der 4-/16-QAM-Variante z.B. in Tab. 8.1 betrachtet. Vergleicht man die Differenzen der gemessenen Schutzabstände für Fre-

quenzabstände $\Delta f \geq 400$ kHz, so lässt sich dort genau dieser Unterschied direkt in den Tabellen wiederfinden.

Für Frequenzabstände $|\Delta f| \geq 400$ kHz wurden keine Abweichungen von den Ergebnissen z.B. für $\Delta f = 500$ kHz festgestellt. Auf die Betrachtung, daß das Störsignal im Abstand der ZF-Frequenz zum Nutzsignal liegt, wurde verzichtet.

In allen Fällen ist zu beachten, daß die Ergebnisse sich aufgrund von Verbesserungen des DRM⁺-Dekoders im positiven Sinne (geringere Schutzabstände) ändern können. Dies gilt insbes. für diejenigen Messwerte, bei denen das Resultat unabhängig von der Störmodulation vom notwendigen SNR_{Dec} abhängt. Trotzdem zeigen die Ergebnisse das Verhalten des DRM⁺-Systems in Präsenz von FM-Störsignalen sehr gut dar.

Teil II.

Feldmessungen

10. Zielsetzung und Konzeption

In diesem Abschnitt werden die im Zeitraum Mai – August durchgeführten Strahlungsversuche dokumentiert und bewertet.

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Ziele dieser Versuchsphase beschrieben. Anschliessend wird das in Kaiserslautern für diesen Versuchs vorhandene Szenario vorgestellt. Die messtechnische Umsetzung der Versuchsziele wird dargelegt, woraus sich die nachfolgend dokumentierten Parameter der verwendeten Sendesignale ergeben.

Anschliessend werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse dargestellt und erläutert. Dies gliedert sich in die Arbeiten im stationären Empfangsfall (S. 67 ff.) sowie die vorgenommenen Untersuchungen im mobilen Empfangsszenario (S. 93 ff.).

Der Strahlungsversuch im Vorjahr stand maßgeblich im Rahmen der Untersuchung der Verträglichkeit von DRM⁺ im Band II mit dem UKW-FM-Rundfunk [SS08]. Das Ergebnis zeigte, dass es möglich ist, DRM⁺ auch in einer Migrationsphase vom analogen zum digitalen Rundfunk verträglich in die bestehende Senderlandschaft in Deutschland zu integrieren. Die diesjährigen Untersuchungen stehen somit im Zeichen der Frage, welche Perspektive DRM⁺ im Sinne seines Versorgungspotentials im Vergleich zu dem UKW-FM-System bietet.

10.1. Grundgedanke

Während im Vorjahr die Frage der Sozialverträglichkeit von DRM⁺ im UKW-FM-Umfeld untersucht wurde und erste Empfangsversuche mit dem DRM⁺-System aus Zeitgründen nur allgemeine Eindrücke liefern konnten, widmet sich dieser Strahlungsversuch voll und ganz der Fragestellung, was DRM⁺ im realen Umfeld leistet. Darüberhinaus besteht ein wesentliches Augenmerk in der Frage, ob die mit den grundlegenden Planungsansätzen aus Teil I vorhergesagte potentielle Versorgungsfläche eines DRM⁺-Senders gut modelliert werden kann.

Hierzu wird auf den bewährten Senderaufbau des Vorjahres [SS08] zurückgegriffen. Der Sender der FH Kaiserslautern (Standort „Am Kaiserberg“) agiert hierbei als Nutzsender, der mit der jeweils gleichen Strahlungsleistung über die gleiche Sendeantenne entweder ein DRM⁺- oder ein UKW-FM-Signal auf der gleichen Mittenfrequenz 87,6 MHz abstrahlen kann. Darüberhinaus wird ein zweiter UKW-FM-Sender (Standort: „Am Rotenberg“) verwendet. Mit diesem kann ein gezieltes, vollständig kontrollierbares Störszenario aufgebaut werden.

Der Kern der Philosophie des Versuchs liegt in dem ständigen Vergleich zwischen dem analogen System und seinem potentiellen Nachfolger DRM⁺. Somit wird in jeder Messreihe die Reaktion der Empfangsgüte eines FM-Signals vom Standort „Am Kaiserberg“ bewertet. Anschliessend wird das Sendesignal auf DRM⁺ umgeschaltet, die Empfangsgüte erneut bewertet und mit dem vorhergehenden Fall verglichen. Der Zweisender-Aufbau vor Ort erlaubt es zudem, diese Prozedur für verschiedene Störsituationen, die durch den Senderstandort „Rotenberg“ künstlich zur Simulation eines kleinen Funknetzes erzeugt werden können, zu wiederholen.

	TX FH	TX RB
Standort	„Am Kaiserberg“	„Rotenberg“
Position (WGS-84; Dezimalgrad)	49,4506N;7,76316E	49,459579N;7,771260E
Position (GK3; Rechts-/Hochwert)	3410383;5480035	3410954;5481026
	260 m ü.NN, 30 m ü.Gr.	310 m ü.NN, 50 m ü.Gr.
Modulation	FM & DRM ⁺	FM
Frequenz	87,6 MHz	(87,6 ··· 88,1) MHz
ERP	jew. 32 W	35 W
Antennendiagramm	ND	D, 4-Element Yagi
Polarisation	Vertikal	Vertikal

Tab. 10.1.: Standortdaten der im Rahmen des Versuchs zur Verfügung stehenden Sender

10.2. Sender

Die Standortdaten sind in Tab. 10.1 aufgelistet. Ein Überblick über die nähere Umgebung der Standorte, ihre jeweilige Lage sowie über die Antennenausrichtungen gibt Abb. 10.1. Im Folgenden werden – der Tabelle entsprechend – die **Sender** jeweils durch ihr **Kürzel TX FH (Standort „Am Kaiserberg, FH“)** bzw. **TX RB (Standort „Rotenberg“)** referenziert.

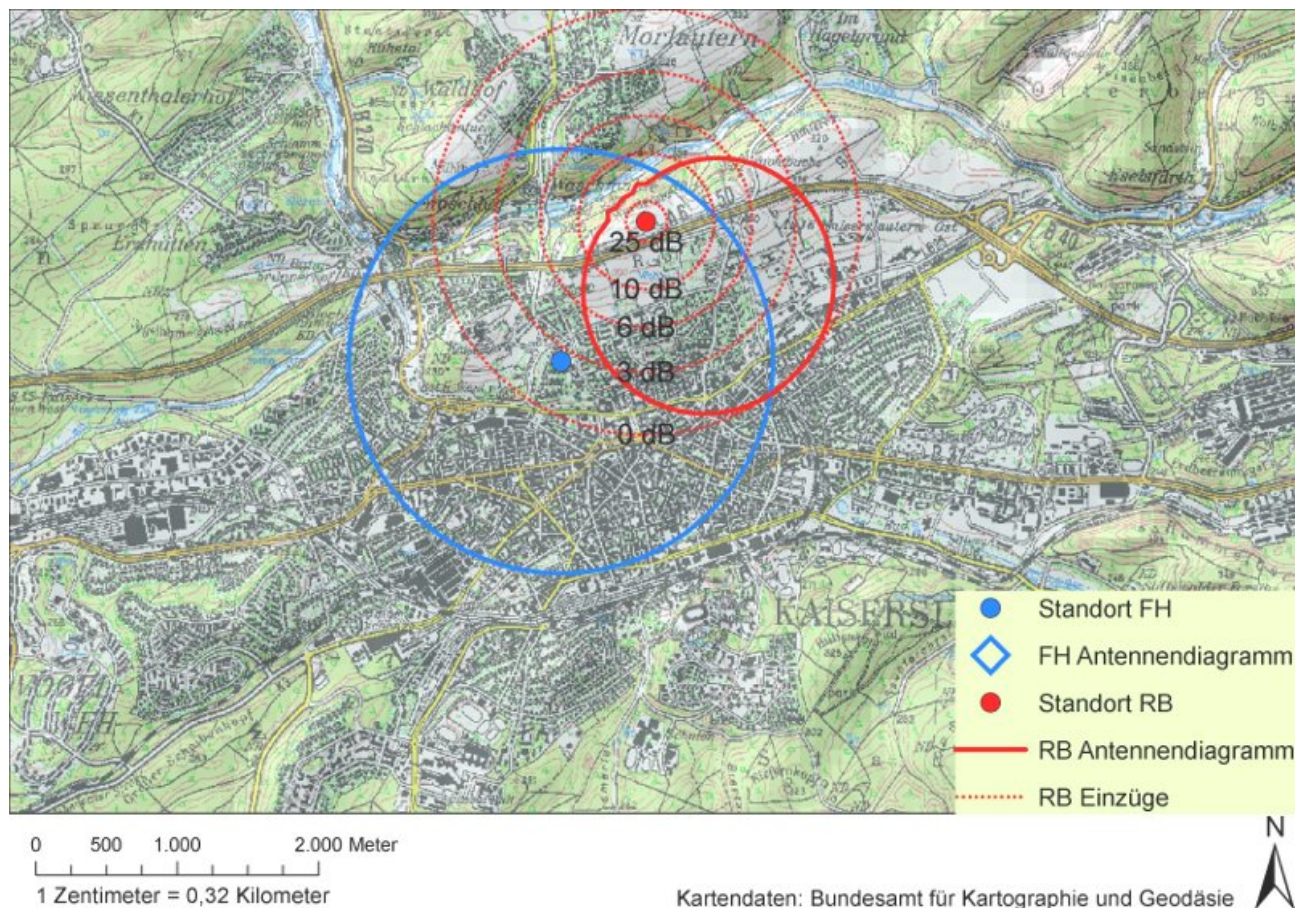
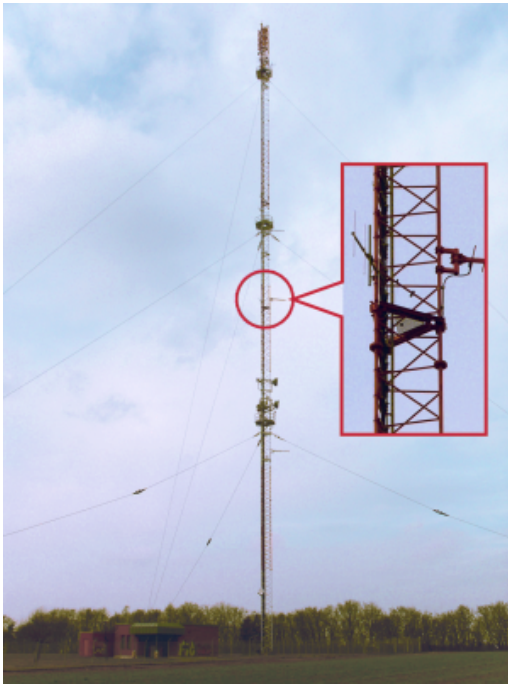


Abb. 10.1.: Lage und Antennendiagramme der Sender in Kaiserslautern 🔍



(a) Südansicht des Senders „Rotenberg“ mit Antenne des Testsenders



(b) Blick nach Westen vom dem Dach der Fachhochschule, mit markierter Sendeanenne des Hybridsenders „Am Kaiserberg“

Abb. 10.2.: Fotos der Senderstandorte

Bei TX FH handelt es sich um einen Hybridsender, der entweder DRM⁺- oder FM-Signale auf der Frequenz 87,6 MHz abstrahlen kann. Sein Blockschaltbild ist in Abb. 4.1 dargestellt. Es besteht hierbei aus den Hauptzweigen „FM“ (linke Bildhälfte), „DRM⁺“ (rechte Bildhälfte) sowie dem hochfrequenten Signalfad.

Im FM-Zweig wird ein Audiosignal von dem Steuerrechner erzeugt und dem Stereocoder (2WCOM S02) zugeführt. Der Signalmultiplex wird durch die Beimischung eines RDS-Signals im Stereocoder (nicht dargestellt; RDS-Coder: RE532) vervollständigt. Mithilfe des Signalgenerators R&S SMH wird der hochfrequente Träger (87,6 MHz) frequenzmoduliert und dem HF-Pfad zugeführt.

Im DRM⁺-Zweig werden die Nutzdaten durch den Fraunhofer IIS Contentserver enkodiert. Der resultierende MDI-Datenstrom [Eur05] wird an den Modulator Spark [Fei05, Fei] weitergeleitet. Nach der OFDM-Modulation werden die Basisbandkomponenten auf die Trägerfrequenz 87,6 MHz gemischt. Mit einem Combiner wird das jeweils zu sendende Signal an die nachfolgenden Verstärkerstufen sowie das Ausgangsfilter zur Antenne – eine eigens angefertigte Groundplane (vertikale Polarisation) – geleitet.

Die jeweilige RMS-Senderausgangsleistung der beiden Zweige ist gleich. Sie kann durch die Verwendung der variablen Dämpfungsglieder separat variiert werden. Zur Steuerung des Senders kann über eine Netzwerkverbindung mithilfe einer Steuerungssoftware die Signalart (FM oder DRM⁺) sowie der jeweilige Sendepegel beeinflusst werden. Durch ein Relais der Labor-Telefonanlage kann eine Notabschaltung der Anlage ausgeführt werden. Die Inhalte, die dem jeweiligen Sender zugeführt werden, sind ebenfalls über eine Netzwerkverbindung zum Steuerrechner bzw. dem Contentserver variierbar. Durch die Nutzung eines UMTS-Internetzugangs ist es vom jeweiligen Messort aus möglich, gezielt das Nutzsignal dem gewünschten Meßszenario anzupassen.

Bei TX RB handelt es sich um einen Aufbau, der aus einem handelsüblichen PC, einem Stereocoders (R&S MSC2) sowie einem UKW-FM-Sender (Telefunken VHF/FM-Umsetzer TP3280 mit ausgeschaltetem Empfangsmodul) besteht. Der Sender ist – nach einem ausgangsseitigem Tiefpass – direkt mit einer 4-Elementigen Yagiantenne (Kathrein K 52 4017) verbunden. Dies ist ebenfalls vertikal polarisiert

und so ausgerichtet, das die Hauptkeule in den östlichen Bereich von Kaiserslautern-Stadt strahlt. Die Trägerfrequenz ist über ein Steuerungsprogramm in den in Tab. 10.1 angegebenen Grenzen in 100 kHz-Schritten variierbar. Die Modulationsinhalte können auf dem mit dem Stereocoder verbundenen PC variiert werden.

Durch die Nutzung eines UMTS-Internetzugangs kann vom jeweiligen Messort aus TX RB an- bzw. eingeschaltet werden sowie in seiner Mittenfrequenz dem gewünschten Meßszenario entsprechend angepasst werden.

10.3. Empfänger

Zum Empfang der von TX FH ausgesendeten Nutzsignale werden – je nach Modulationsart – zwei unterschiedliche Empfänger benötigt:

- ein DRM⁺-Empfänger
- ein FM-Empfänger

Der DRM⁺-Empfang wird mittels des in Abb. 4.2 dargestellten, in Kap. 4 erläuterten Empfängers realisiert, s. auch [SS08, Kap. 3.5.2]. Hierbei handelt es sich um eine Zusammenstellung des Atmel HF-Frontends, einem Analog-Digital-Wandler mit Abwärtsmischung ins komplexe Basisband (Perseus), einer Softwarekomponente zur Anpassung der Samplerate und Wortbreite der digitalisierten Basisbanddaten, dem Fraunhofer IIS DRM⁺-Dekoder sowie den nachgeschalteten Dekodern der empfangenen Bitströme (z.B. zur Audiodekodierung oder Bitfehlerratenangabe).

Zum FM-Empfang wird – im Gegensatz zum Vorjahr – der Empfänger Microgen TS9085 [Mic09] verwendet. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen FM-Rundfunk-Messempfänger, der aus einem Frontend und einer Softwareapplikation besteht. Das Frontend kann sowohl HF- als auch ZF-Signale (jeweilige Eingangsimpedanz: 50 Ω) verarbeiten und in digitalisierter Form an die Software übergeben. Die Software übernimmt die komplette Steuerung, Zerlegung des FM-Multiplexes und Auswertung der empfangenen Daten (z.B. Feldstärke, Hubverteilung, MPX-Leistung etc.). Der demodulierte Audioanteil des empfangenen FM-Signals ist über verschiedene Ausgänge verfügbar. Weitere Eingangs-/Ausgangsmöglichkeiten bestehen, wurden allerdings im Rahmen dieses Versuchs nicht genutzt.

Die vielfältigen Ein- / Ausgänge des Empfängers ermöglichen die Erfüllung des bereits in 2008 gehegten Wunsches, *sowohl den DRM⁺-Empfänger als auch den FM-Empfänger über das gleiche Frontend zu betreiben*. Dies heisst, das das ZF-Signal des DRM⁺-Empfangsfrontends (⑤ in Abb. 4.2) anstatt an den A/D-Wandler Perseus dem TS9085 zugeführt wurde. Somit wird in beiden Empfangssituationen das Signal durch das identische ZF-Filter, die identischen Verstärker und die identischen Regelschleifen beeinflusst, bevor die jeweilige Demodulation durchgeführt wird. Diese Maßnahme fördert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander.

Zur Vervollständigung der Kenntnisse über die Eigenschaften des Empfangssystems, die für DRM⁺ in Teil I herausgearbeitet wurden, ist an dieser Stelle eine Untersuchung des FM-Empfangssystems notwendig. Wie später erläutert wird, ist die Messgröße SINAD das im Rahmen dieses Versuchs wesentliche Merkmal zur Bewertung des FM-Empfangs. Aus diesem Grunde wurde das FM-Empfangssystem hinsichtlich seines Verhaltens $\text{SINAD} = f(\text{Eingangsleistung})$ im Labor vermessen. Als Eingangssignal wurde hierbei das Signal verwendet, das von TX FH im FM-Modus abgestrahlt wird. Das Ergebnis ist in Abb. 10.3 dargestellt. Die – im weiteren Verlauf des Berichts eingeführten – SINAD-Farbskala (s. Tab. 11.2) ist zur leichteren Referenzierung gekennzeichnet. Das Ergebnis zeigt das Verhalten des Empfängers im rauschbegrenzten Empfangsfall. Man sieht, daß der Empfänger über keine automatische Stummschaltung verfügt. Der maximale SINAD beträgt 51 dB, der auch bei höheren Eingangspegeln unverändert bleibt.

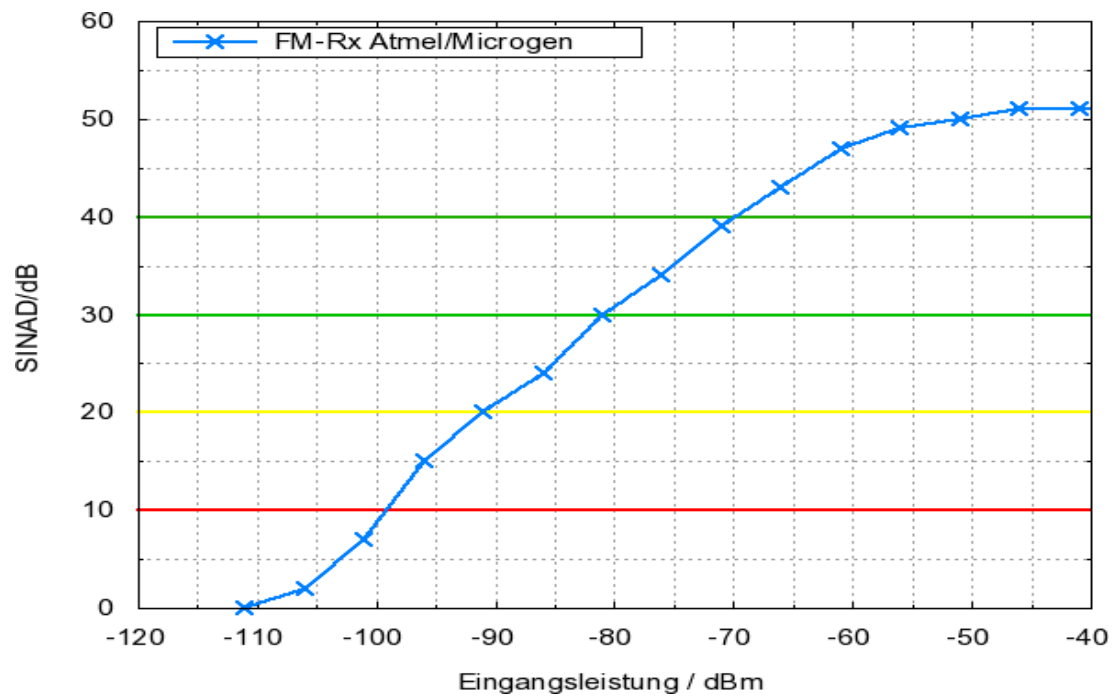


Abb. 10.3.: SINAD über Eingangsleistungspegel von TX FH des verwendeten FM-Empfängers

10.4. Messung der HF- und NF-Kenngrößen im Feld

Das zentrale Ziel dieser Versuchsphase ist es, die Versorgung des Senders TX FH im Feld zu erfassen. In jedem Fall wird dabei auf die relative Bewertung der jeweiligen Systeme zurückgegriffen, sprich: die Empfangssituation wird – bei jeweils gleicher Strahlungsleistung über die gleiche Antenne von TX FH für den Fall einer analogen sowie einer digitalen Sendung bewertet. Nur so ist es möglich, einen fairen Vergleich des FM-Rundfunksystems mit dem DRM⁺-System durchzuführen. Darüberhinaus wird in beiden Fällen (analoge bzw. digitale Sendung) durch die Zuschaltung des FM-Senders TX RB die jeweils gleiche Störsituation simuliert. Auch in diesem Fall wird die Empfangsqualität von TX FH für die unterschiedlichen Modulationen bewertet. Demnach ist die Rollenverteilung der beiden aktiv an diesem Versuch beteiligten Sender im Vergleich zu dem Vorgehen des Vorjahres vertauscht.

10.4.1. HF-Parameter

Das UKW-FM-Rundfunkband ist aus planerischer Sicht sehr belegt. Bedingt durch die Vielzahl an Sendern ist – unabhängig von der jeweiligen Versorgungssituation – das Netz als interferenzbegrenzt anzusehen. Sowohl bei dem FM-System als auch bei DRM⁺ ist der Signal-zu-Störabstand C/I (Carrier-to-Interference-ratio) ein wesentliches Charakterisierungsmerkmal der Empfangssituation auf der HF-Ebene. Das allgemeine Grundrauschen kann – aufgrund der dichten Frequenzbelegung – somit ebenfalls als Überlagerung verschiedener anderer FM-Sender angesehen werden.

10.4.2. NF-Parameter

Die Bewertung des empfangenen Nutzsignals am Empfängeranfang ist im analogen Fall (FM-Rundfunk) am einfachsten und schnellsten durchzuführen wenn das Nutzsignal ein definiertes Testsignal (z.B. Sinussignal mit einer fixen Frequenz) ist. Unabhängig von der Frage, inwiefern Messwerte die breitgefächerte, durch viele unterschiedliche Faktoren wie z.B. das jeweilige Empfinden des Rundfunkhörers, Abhörumgebung (Kopfhörer, leise Hintergrundbeschallung bei geöffnetem Fenster während einer Fahrt entlang einer Autobahnbaustelle) und dem jeweiligem Programmmaterial auf den Störeindruck schließen lassen – sind hierfür zwei unterschiedliche, bewährte Verfahren zur messtechnischen Erfassung von Störungen geeignet, die als Maßzahl für „potentiell guten Empfang“ oder „schlechtes

Empfangssignal“ herangezogen werden können: die Erfassung des S/N (Signal-zu-Rauschabstand) und die Erfassung des SINAD (Signal, Rauschen und Verzerrung).

Das S/N gibt hierbei – analog zum C/I auf der HF-Ebene – die maximale Dynamik eines Testsignals in Bezug auf den Rauschpegel an. Hierzu wird durch einen definierten Prüftone der „S“-Anteil erfasst. Nach Abschalten des Prüftons wird das Restrauschen – und somit auch der Grad der Störbelastung – am Empfängerausgang psophometrisch gewichtet erfasst („N“-Anteil) und anschliessend das Verhältnis gebildet. Hierbei gilt: Hohe Werte $\hat{=}$ hohe Signaldynamik, Signal ist mit geringem Rauschen / Störungen behaftet. Das S/N-Verfahren wird implizit durch die Schutzabstandskurve „FM stört FM“ [ITU02a, Gem82] abgebildet.

Ist der Schutzabstand eingehalten wird davon ausgegangen, dass ein psophometrisch gewichtetes S/N von mindestens 50 dB am Empfangsort erreicht werden kann. Dabei handelt es sich um einen Spitzenwert, der einen senderseitigen Hub von 75 kHz voraussetzt. Im Falle einer Stereoübertragung bedeutet dies, dass der Spitzenhub des Tonanteils 66,2 kHz beträgt, wenn man für den Stereopiloten einen Spitzenhub von 6,7 kHz, für den RDS-Anteil einen Spitzenhub von 2,1 kHz ansetzt. Im Sinne des realen Senderbetriebs führt das dauerhafte Abstrahlen eines Signals mit einem solchen Spitzenhub zu einer Multiplexleistung von

$$p_{\text{mpx}} = 20 \log_{10} (66,2 \text{ kHz} / 19 \text{ kHz}) = 10,8 \text{ dBr},$$

was deutlich jenseits der zulässigen 0 dBr-Grenze ist. Ein FM-Sender im Regelbetrieb, der – gemäß der Definition der Multiplexleistung – im Betrachtungsintervall von 60 s einen *mittleren* Spitzenhub von 19 kHz haben muss, um die regulatorischen Auflagen einzuhalten, würde somit im Empfänger ein mittleres gewichtetes S/N von bestenfalls 50 dB – 10,8 dBr \approx 39 dB erreichen, also deutlich weniger, als bei der Messung des Schutzabstands durch das Messverfahren erzeugt wird. Allerdings gilt es auch zu beachten, dass sich die Nachrichtensignale unterscheiden: Im Falle der Schutzabstandsmessungen handelt es sich um einen Ton von 500 Hz, im Falle des Senders im Regelbetrieb um zufällige Audiosignale. Des weiteren sind Spitzenhub und MPX-Leistung nicht voneinander unabhängig: Erhöht man die MPX-Leistung, dann steigt auch der Spitzenhub. Insofern sind die obigen Umrechnungen eher als „grob“ und „überschlägig“ zu betrachten.

Das SINAD-Verfahren („Signal with Noise and Distortion“) wird bei einem dauerhaft angeschaltetem Prüftone angewandt. Es bewertet nicht nur den prinzipiellen Signal-zu-Rauschabstand alleine, sondern auch die Verzerrungen des Prüftons in Form von Oberwellen durch ein schmalbandiges Bandsperrenfilter, dass die Grundwelle des Prüftons stark bedämpft. Auf diese Weise wird neben der Rauschbewertung noch ein Maß für den Klirrfaktor des empfangenen Signals geliefert, so dass eine umfangreichere Aussage als beim reinen S/N-Test alleine möglich ist. Auch bei diesem Verfahren gilt: Hohe Werte $\hat{=}$ hohe Signalgüte. Der SINAD ist definiert als [Mäu88, S. 118 ff.]:

$$\text{SINAD} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{U_{\text{sig}}^2 + U_r^2 + U_d^2}{U_r^2 + U_d^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (10.1)$$

Falls gewünscht, kann die Bewertung der Fremdspannungen U_r und U_d durch die Verwendung verschiedenster Filter gewichtet werden, um den Frequenzgang des menschlichen Ohres zu berücksichtigen. Hieraus ergibt sich die Spannung U_1 durch die Messung der Empfängerausgangsspannung im Frequenzbereich von 0 kHz ... 15 kHz, die Spannung U_2 durch die Wiederholung der ersten Messung bei schmalbandiger Ausblendung der Prüftonefrequenz. Solange Sender und Empfänger im linearen Betriebsbereich arbeiten, gilt zwischen dem psophometrisch gewichteten S/N und dem SINAD ein statistisch hochsignifikanter, linearer Zusammenhang, s. [SS08, Kap. 5.4]. Ungeachtet davon zeigt bereits Gl. (10.1) einen hohen Verwandtschaftsgrad beider Verfahren.

Aufgrund der Tatsache, dass das Funkfeld am jeweiligen Testpunkt nur bedingt als zeitlich stabil anzusehen ist, ist es auch bei der Erfassung der NF-Parameter notwendig, eine geeignete Mittelung

durchzuführen. Im Rahmen dieses Versuchs wurden im Falle der Tätigkeiten an den stationären Messpunkten in schneller Folge 30 Proben des NF-Signals genommen und die jeweiligen Messergebnisse im Anschluss (auf der logarithmischen Skala) arithmetisch gemittelt. Dies bedeutet, das – unter Vorraussetzung einer Gleichverteilung der einzelnen Messwerte – der Medianwert des SINAD gebildet wird. Zur Kontrolle dieser Vorraussetzung wurde der mittlere Messfehler während der Messung geschätzt. Bei einer starken bzw. unsymmetrischen Abweichung der jeweiligen Fehlergrenzen wurde die Messung wiederholt. Im Vergleich dazu wird bei der SINAD-Erfassung im mobilen Empfangsfall der direkte Messwert ohne Mittelung übernommen.

In den hier beschriebenen Versuchen wurde ausschliesslich das SINAD-Verfahren angewandt. Der hohe Grad der Korrelation des SINAD mit dem S/N im stationären Empfangsfall wurde in [SS08, Kap. 5.4] nachgewiesen, so das diese beiden Werte gegeneinander austauschbar sind.

Ähnliches gilt für die SINAD-Erfassung im mobilen Szenario. In [SS08, Kap. 6.4] wurde der hohe Grad der Abhängigkeit und Korrelation zwischen dem SINAD-Verfahren und der automatischen Qualitätsbewertung durch das Audemat-System [Aud] gezeigt, so das die alleinige Verwendung des SINAD-Verfahrens zur Qualitätsbewertung auch im mobilen Empfangsfall im Rahmen dieses Versuchs geeignet ist.

Sowohl im stationären, aber auch insbes. im mobilen Empfangsfall ist eine verzerrungsfreie, ideale Rekonstruktion des Nachrichtensignals grundsätzlich nur dann möglich, wenn der Übertragungskanal *reflexionsfrei* ist. In allen anderen Fällen, also insb. auch bei einem als linear zu betrachteten Mehrwegekanal, entstehen bei der FM-Demodulation neben den linearen Verzerrungen grundsätzlich auch *nichtlineare* Verzerrungskomponenten im demodulierten Nachrichtensignal [Kam08]. Dieser nichtlineare Anteil wird durch das S/N-Verfahren nicht erfasst, wohl aber durch das SINAD-Verfahren.

10.5. Parameter der verwendeten Signale

10.5.1. Nutzsignal: DRM⁺ (TX FH)

Der DRM⁺-Multiplex wurde gemäß den Angaben in Tab. 10.2 aufgebaut. Er bestand aus zwei Diensten¹: Service A beinhaltet nur Pseudozufällige Bitfolgen (PRBS), Service B dient zur Audioübertragung (HE-AAC, Stereo, SBR). Die Bitrate des Audiokanals wurde in beiden Fällen nur aufgrund der Coderatenvariation verändert. Der PRBS-Kanal wurde mit zusätzlichen Bits im Fall der 16-QAM-Variante aufgefüllt. Es wurden die gleichen Coderaten wie während der Laborphase (s. Tab. 7.1) verwendet.

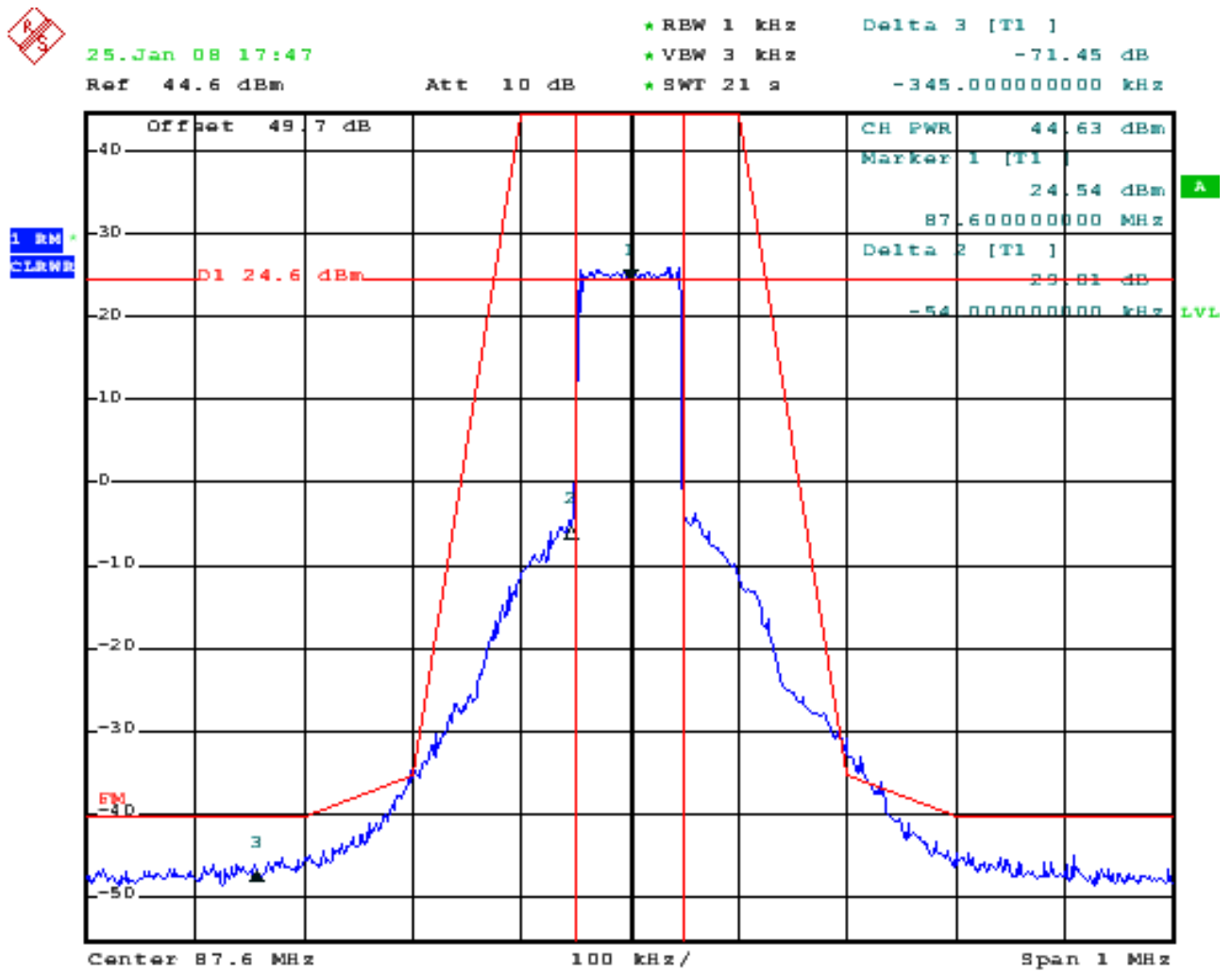
Somit kann am Empfangsort sowohl eine Messung der Bitfehlerrate stattfinden als auch eine subjektive Beurteilung der Stabilität der Audiodekodierung vorgenommen werden. Aufgrund der Verteilung und Verwürfelung der Nutzbits auf unterschiedlichste Subträger ist davon auszugehen, daß die Bitfehlerrate gleich derjenigen im Audiodienst zu setzen ist.

Das Ausgangsspektrum von TX FH im DRM⁺-Modus ist in Abb. 10.4 dargestellt. Die Leistungsangaben sind bezogen auf die Leistung am Antennenfußpunkt. Zusätzlich ist als Referenz die eingehaltene FM-Sendermaske [Eur06b] eingezeichnet. Neben dem markierten Schulterabstand (Marker 2) ist der Abstand zu den Restaussendungen im in Kaiserslautern genutzten BOS-Kanal verzeichnet (Marker 3).

	Bitrate Service A	Bitrate Service B	Coderate SDC	Coderate MSC (EEP)	PL (MSC)
4-QAM	10000 bps	49600 bps	0,25	0,4	2
16-QAM	50320 bps	49040 bps	0,25	0,33	0

Tab. 10.2.: Multiplexaufbau der DRM⁺-Signale

¹engl.: Services

Abb. 10.4.: DRM⁺-Ausgangsspektrum an TX FH

10.5.2. Nutzsignal: FM (TX FH)



Abb. 10.5.: Multiplexspektrum, -leistung und Spitzenhubverteilung von TX FH

Durch die Abstrahlung eines Dauersinus von TX FH mit einer Frequenz von 500 Hz (Stereo, L=R) wird die SINAD-Messung am jeweiligen Empfangsort bzw. im mobilen Empfangsfall ermöglicht. Des weiteren enthält Multiplex einen RDS-Anteil. Die Multiplexleistung betrug 0 dBm. Somit beträgt der Spitzenhub des Testtones 19 kHz. Der Spitzenhub des Multiplexes beträgt 27 kHz. Die weiteren Signalparameter sind in Abb. 10.5 dargestellt.

10.5.3. Störsignal: FM (TX RB)

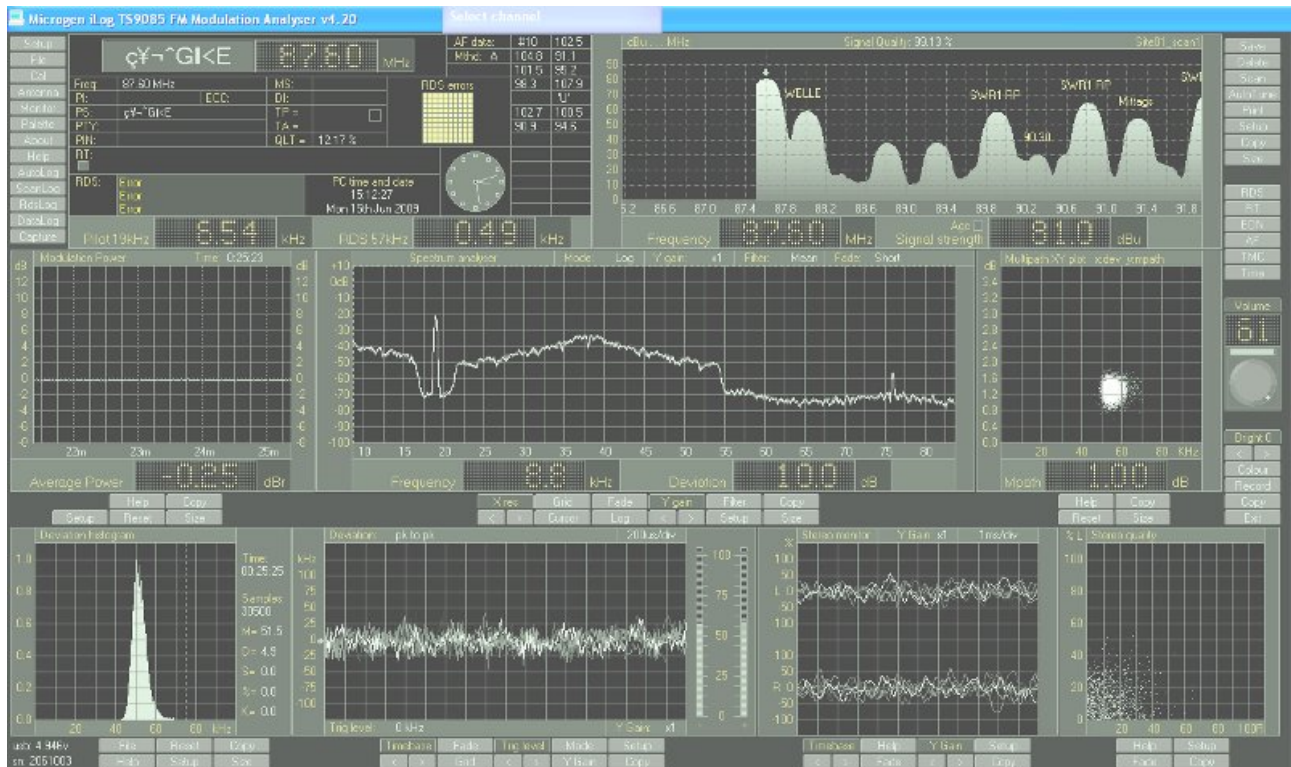


Abb. 10.6.: Multiplexspektrum, -leistung und Spitzenhubverteilung von TX RB

TX RB übernimmt in dieser Versuchsphase die Rolle des Störsenders. Dieser wird mit einem gefärbtem Rauschen gem. [ITU02b] Rauschen moduliert. Im Gegensatz zu [ITU02b] ist das Rauschsignal stereophon. Der linke und rechte Kanal sind mit der jeweils gleichen (RMS-)Amplitude eingepegelt; die Signale der beiden Kanäle sind voneinander unkorreliert. RDS steht an diesem Sender nicht zur Verfügung. Die Multiplexleistung von 0 dBm sowie ein Spitzenhub von 75 kHz sind eingehalten worden.

11. DRM⁺ im stationären Empfangsfall

Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung der Versorgung von TX FH im stationären Empfangsfall.

Eingangs werden die angewandten Messkonzepte- und verfahren inklusive der verwendeten Messeinrichtung diskutiert. Im Anschluss werden die Messorte festgelegt.

Die Ergebnisse werden wie folgt dargestellt: zunächst wird die für jeden Empfangsfall gleich bleibende HF-Situation an den jeweiligen Orten erläutert. Nachfolgend werden die Untersuchungen des Empfangsverhaltens des FM- und DRM⁺-Systems in Abhängigkeit nach der jeweiligen Störsituation – die am Empfangsort jeweils „künstlich“ durch TX RB hergestellt wurde – beschrieben.

11.1. Messeinrichtung

Der stationäre Empfangsfall beschreibt im Rahmen dieser Arbeit die Situation eines Rundfunkteilnehmers, der seinen Empfänger an eine Antenne in 10 m Höhe über Grund mit der in [Gem82] geforderten Richtcharakteristik (Abb. 11.1) zum UKW-Stereoempfang betreibt. Die Anwendung dieses Empfangsfalls – sprich: die Umsetzung dieses Messaufbaus – liegt aus folgenden Gründen nahe und wurde daher in dieser Versuchsphase angewandt:

- Die beschriebene Empfangssituation ist die Planungsgrundlage in UKW-Netzen. Gerade durch die Nutzung einer Richtantenne in der beschriebenen Höhe über dem Erdboden werden definierte Verhältnisse hergestellt, z.B. im Sinne von Reflektionen am Boden, umgebenden Gebäuden, dem passierendem Verkehr und der Topologie.
- Die Vergleichbarkeit zum Vorgehen der vorherigen Versuchsphase [SS08] wird gewahrt. Dies ist insbes. ein wichtiger Punkt bei der Bewertung der Empfangsqualität im Falle des analogen Empfangs.

Erfasst wurden hierbei:

- die Leistungspegel des empfangenen Nutzsignals.
- die Leistungspegel des empfangenen Störsignals.
- die Leistungspegel des Grundrauschens auf der Nutzfrequenz.
- der SINAD im Falle einer FM-Sendung.
- die $\overline{\text{BER}}$ im Falle einer DRM⁺-Sendung (Mittelungszeit: min. 60 s).
- Prüfung, ob die stabile Dekodierung des Audiostroms möglich ist.

Zur Herstellung verschiedener Störsituationen wurde TX RB jeweils auf den Frequenzen 87,6 ... 87,8 MHz betrieben bzw. komplett abgeschaltet.

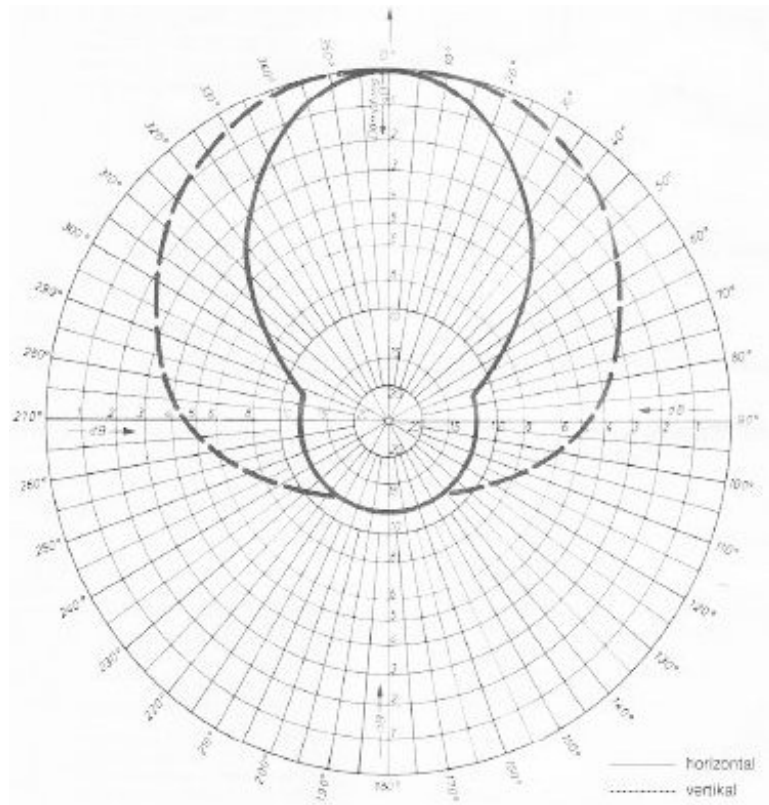


Abb. 11.1.: Richtdiagramm der bei den stationären Messungen eingesetzten Antenne, aus: [Gem82]

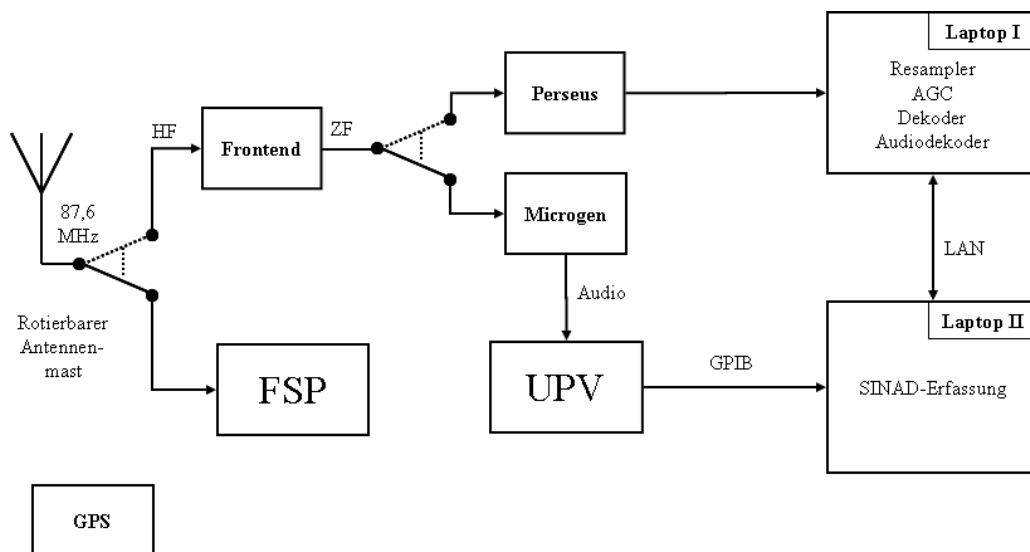


Abb. 11.2.: Messaufbau bei den stationären Messungen

In Abb.11.2 ist die verwendete Messeinrichtung dargestellt. Die Funktion der dort gezeichneten Komponenten ergibt aus der nachfolgenden Beschreibung des Messablaufs von Ort:

Bei Ankunft am Messpunkt wurde die Position über das GPS-System festgestellt. Im Anschluss wurde die ausfahrbare, drehbare Richtantenne vertikal polarisiert und auf eine Höhe von 10 m über Grund ausgefahren. Die Kenntnis des momentanen Standorts und des Standorts von TX FH wurde zur Winkelbestimmung genutzt, so daß die Antenne auf TX FH ausgerichtet werden konnte. Im Anschluss wurde die Empfangsleistung von TX FH, TX RB sowie der Rauschpegel (alle eigenen Sender ausgeschaltet) mit dem Spektrum Analyzer FSP gemessen. Für TX FH im FM-Betrieb wurde für jede

mögliche Störsituation der SINAD durch das Zusammenspiel zwischen dem Audio Analyzer UPV (zur Messung) und Laptop II (Datenerfassung und Mittelung) erfasst. Als Empfänger wurde hierzu das Frontend mit dem Microgen-Meßempfänger kombiniert.



Abb. 11.3.: Stationäre Messung an Messpunkt 20

Im Anschluß an die FM-Erfassungen wurde TX FH in den DRM⁺-Betrieb versetzt und die Empfangskette als DRM⁺-Empfänger geschaltet. Für die verschiedenen Modulationsstufen und Störsituationen wurde die $\overline{\text{BER}}$ erfasst. Parallel dazu wurde die Stabilität der Audioübertragung geprüft. Die Bewertung, ob der Punkt mit DRM⁺ versorgt ist, findet mithilfe des Kriteriums $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ statt.

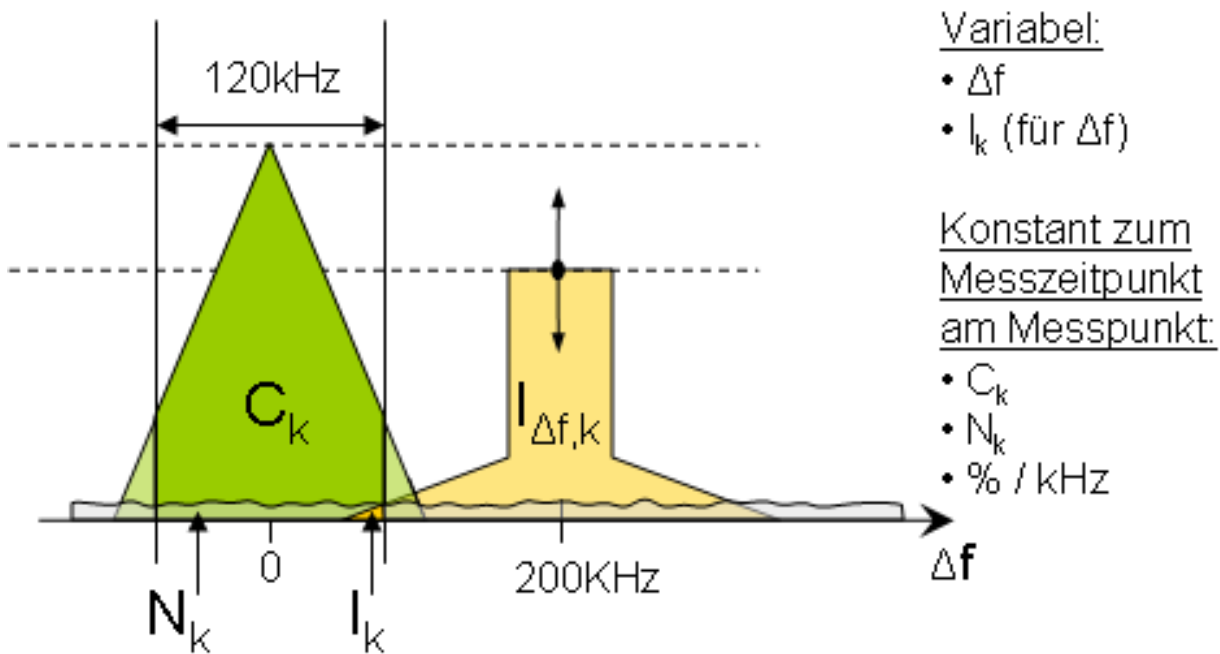


Abb. 11.4.: HF-Größen bei stationären Messungen – Prinzipdarstellung

Die gemessenen HF-Parameter stellen die in Abb. 11.4 skizzierte Situation dar: Die jeweiligen mittleren RMS-Signalleistungspegel werden in einer Bandbreite von 120 kHz an 50 Ω erfasst. Dies gilt – wie oben angedeutet – für die Kanalleistung von TX FH, TX RB und dem Grundrauschen auf der Frequenz 87,6 MHz. Das S/N am DRM⁺-Dekodereingang (SNR_{Dec}) ergibt sich aus diesen Größen wie folgt:

$$\text{SNR}_{\text{Dec}} = 10 \cdot \log \left(10^{\text{Pegel}_{\text{FH}}/10} - 10^{\text{Pegel}_{\text{Rauschen}}/10} \right) - L_{\text{Rauschen},100} \quad (11.1)$$



In Gl. 11.1 bezeichnet $\text{Pegel}_{\text{Rauschen}}$ der gemessene Rauschleistungspegel in einer Bandbreite von 100 kHz. Dieser Wert ergibt sich aus dem im Feld gemessenen Rauschleistungspegel durch die Beziehung:

$$L_{\text{Rauschen},100} / \text{dBm} = L_{\text{Rauschen,gemessen}} / \text{dBm} + 10 \cdot \log \left(\frac{100 \text{ kHz}}{120 \text{ kHz}} \right)$$

Anhand der HF-Messungen kann aus dem resultierenden SNR_{Dec} in Verbindung mit der Einhaltung des Schutzabstandes PR ($\text{Pegel}_{\text{FH}} - \text{Pegel}_{\text{RB}} \geq \text{PR}(\Delta f)$) bewertet werden, ob der DRM⁺-Empfang entsprechend des Versorgungsdefinition möglich wäre oder nicht. Dies ist durch die Messung der $\overline{\text{BER}}$ zu verifizieren.

11.2. Wahl der Messorte

Abb. 11.5 stellt die Lage der Orte dar, an denen stationäre Messungen durchgeführt wurden. Da die nachfolgende Symbolik im weiteren Verlauf dieses Berichts ständig wiederkehrt, werden die Darstellungselemente anhand des folgenden Beispiels erläutert:

- Senderstandort TX FH (Nutzsender) ist mit dem Symbol  markiert.
- Senderstandort TX RB (Störsender) ist mit dem Symbol  markiert.
- Die Versorgungsprognose des DRM⁺-Senders TX FH für die 4-QAM-Variante ist in hellblau dargestellt. TX RB ist in diesem Fall nicht aktiv.
- Die Versorgungsprognose des DRM⁺-Senders TX FH für die 16-QAM-Variante ist in dunkelblau dargestellt. TX RB ist in diesem Fall nicht aktiv.

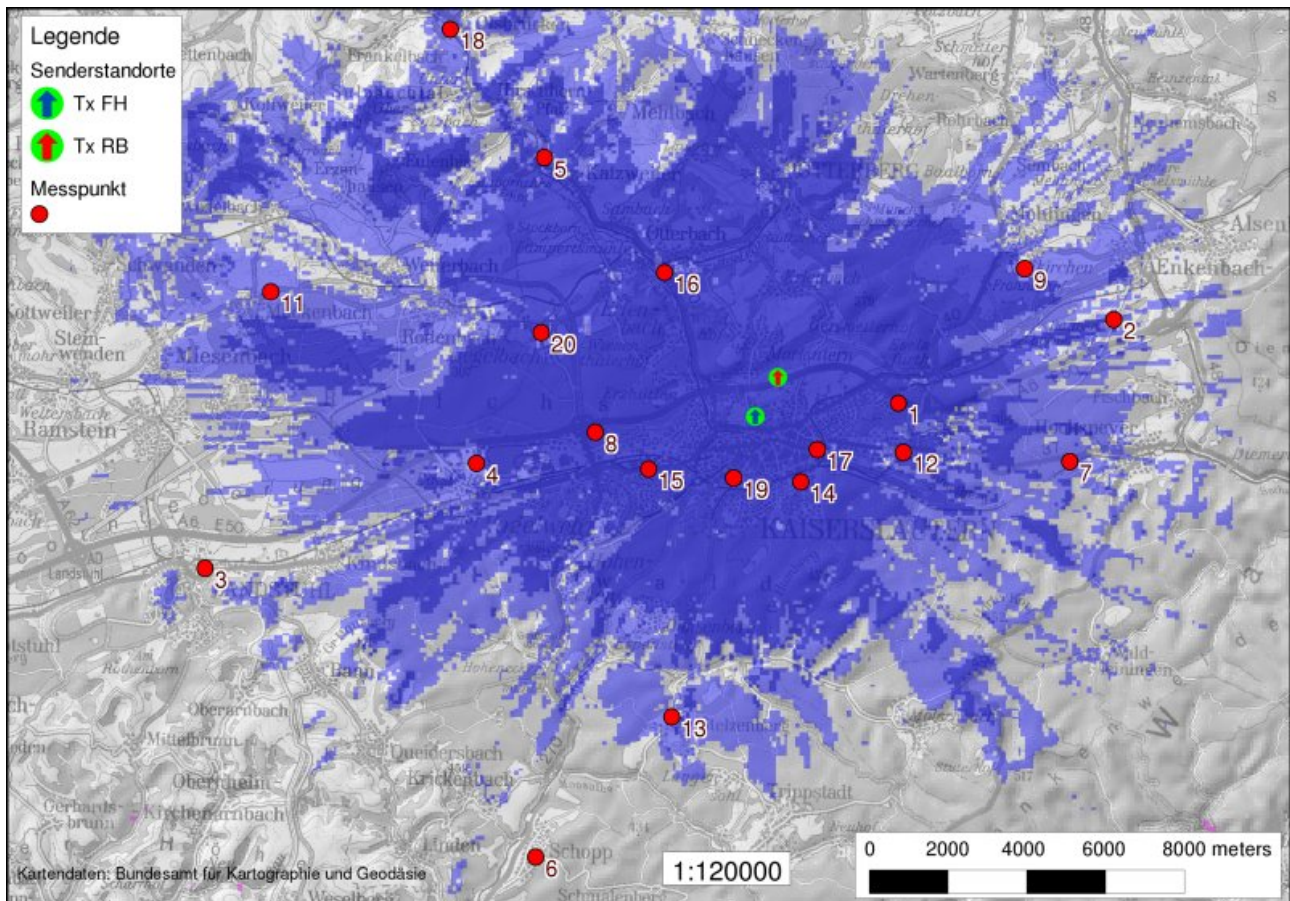


Abb. 11.5.: Versorgungsprognose 4/16-QAM (TX RB: Nicht aktiv) und Lage der Messpunkte. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent

- Die einzelnen Messpunkte sind rot markiert und mit ihrer jeweiligen Ordnungszahl gekennzeichnet. Eine grobe Beschreibung des Ortes ist in Tab. 11.1 verzeichnet.
- Diejenigen Stellen, die *nicht* mit mindestens einer der beiden blauen Farbvarianten gekennzeichnet sind, sind – planerisch – als *gestört* gekennzeichnet. Gelegentlich auftauchende rote Flecken bedeuten, daß der Bereich als unversorgt – aufgrund mangelnder Nutzfeldstärke – zu betrachten ist. Sprich: Befindet sich ein Ort ausserhalb der blauen Bereiche, so bedeutet dies nicht zwangsläufig, daß er nicht versorgt ist. Sie sind aber auch nicht zwangsläufig als versorgt zu betrachten. Planungsbasis hierbei sind die Frequenzanalysen mit der Planungssoftware Fransy [IRT09], die anhand der Ergebnisse der Laboruntersuchungen (Empfängerkennwerte, Schutzabstände) durchgeführt wurden. Das verwendete Wellenausbreitungsmodell ist das IRT-2D-Modell. Zur Störanalyse wurden die 20 stärksten Sender innerhalb des Planungsgebiets herangezogen. Die Empfängersituation hierbei wurde als stationär, mit einer Richtantenne in 10 m Antennenhöhe über Grund [ITU02a] angenommen, was dem hier verwendeten Messaufbau entspricht. Die Betrachtung der Versorgungsprognosen in Abb.11.5 zeigt, das das potentielle Versorgungsgebiet von TX FH – unabhängig von dem künstlich durch TX RB hergestelltem Störszenario – interferenzbegrenzt ist. Wäre es rauschbegrenzt, so würden die blauen Bereiche mehrheitlich in rote Flächen übergehen.

Bei der Auswahl der Messorte wurden folgende Aspekte beachtet:

- Als Versorgungsreferenz dient immer die Prognose des Falls, daß TX RB ausgeschaltet ist.
- Es sind Messungen sowohl am Rande des Gebietes mit ungestörtem Empfang als auch Messungen innerhalb des Versorgungsgebietes durchzuführen. Die Randpunkte tasten sich hierbei an die

Grenzen der Prognosen und somit auch der ihr zugrundeliegenden Statistik heran. Die Punkte innerhalb des Versorgungsgebiets dienen zur Sicherung / Verifikation der Planung innerhalb des versorgten Gebiets, insbes. in dem Fall, daß TX RB aktiv ist.

- Für die Simulation einer Störsituation durch TX RB sind verschiedene Pegelverhältnisse zu untersuchen. Durch die Richtwirkung der dortigen Sendeantenne (s. Abb. 10.1) entstehen drei verschiedene Zonen:
 - In der ersten Zone ist der Pegel von TX RB dominant gegenüber TX FH. Dies ist im Bereich der Hauptstrahlrichtung von TX RB gegeben, sowie auch allgemein – aufgrund der Abschattung von TX FH durch Dachaufbauten Richtung Osten, welche nicht in den Versorgungsprognose berücksichtigt werden kann – im Bereich östlich des Standorts von TX FH.
 - In der zweiten Zone ist der Pegel von TX RB vergleichbar mit dem von TX FH. Dies ist im Bereich der zentralen Innenstadt sowie in Richtung Universität der Fall.
 - In der dritten Zone ist der Pegel von TX RB geringer als der Pegel von TX FH. Dies ist insbes. im Bereich westlich / nordwestlich des Standorts FH der Fall.
 - Eine allgemeine Übersicht über die die Ausbreitungssituation der beiden Sender ist in [SS08, Kap. 3.6] gegeben. Diese wird auch durch die Messungen in Kap. 12 weiter ausgebaut.
- Aufgrund der Ergebnisse der Schutzabstandsmessungen ist es angebracht, in der Regel höhere Empfangspegel von TX RB als von TX FH am Messort zu haben.

Bei der Betrachtung der Messpunkte ist zu beachten, daß Punkt Nr. 10 (Hohenecken) ausgeschlossen wurde. Aufgrund von Softwareproblemen konnte an diesem Ort während der stationären Messungen der DRM⁺-Empfang nicht untersucht werden. Eine Nachkontrolle mithilfe des Messbusses der FH an dieser Stelle ergab, daß an der entsprechenden Stelle der DRM⁺-Empfang möglich ist.

Eine kleine Besonderheit stellt Messpunkt 16 dar. Dieser ist in unmittelbarer Nähe zum örtlichem Umspannwerk lokalisiert. Auch bei längerer Beobachtung der $\overline{\text{BER}}$ und Audiodekodierung (16-QAM-Variante) konnten trotz des erhöhten Störpegels aufgrund der Oberwellen in den Hochspannungsnetzen keine ungewöhnlichen Effekte im Empfangsverhalten festgestellt werden.

Alle Visualisierungen in diesem Kapitel wurden mithilfe des Open-Source GIS-Pakets Quantum-GIS [Qua09] angefertigt.

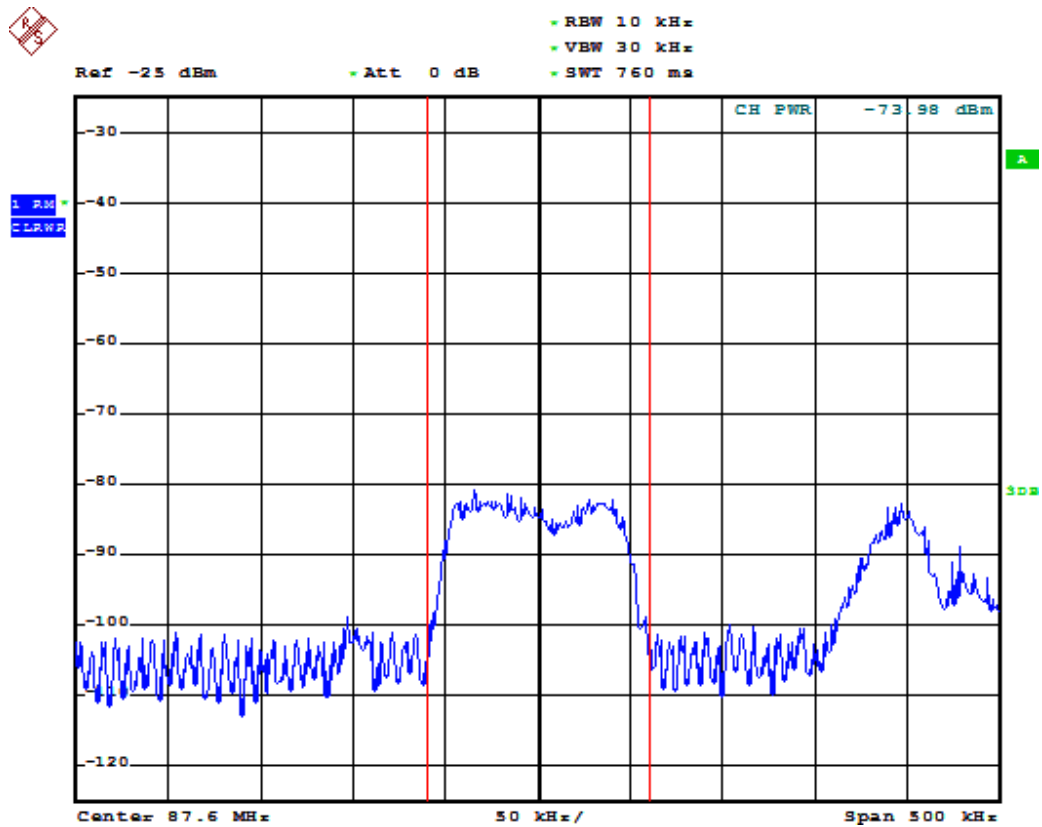


Abb. 11.6.: HF-Situation an Messpunkt 16 (neber Umspannwerk Otterberg). Zur besseren Darstellung der Oberwellen im Energienetz wurde die sonst angewandte Sweepzeit von 8 s reduziert

Nummer	Name	Höhe/m	Abstand TX FH/km	Abstand TX RB/km
1	KL Monte Mare	312	3,6	3,1
2	Enkenbach Polizei	323	9,4	8,6
3	Landstuhl Post	245	14,4	15,3
4	KL E-Hof Zoll	242	7,1	7,9
5	Katzweiler Bühne	211	8,4	8,1
6	Schopp Waldstr.	367	12,4	13,6
7	Hochspeyer I-Gebiet	301	8,0	7,7
8	KL Truck Center	261	4,1	4,8
9	Mehlinger Heide	307	7,8	6,8
11	Mackebach Ortsrand	266	12,6	13,0
12	KL Einkaufszentrum Ost	250	3,9	3,7
13	Stelzenberg	376	7,9	9
14	KL Betzenberg	294	2	2,7
15	KL Bahnheim	252	3,0	4,0
16	Otterberg Aral	221	4,3	3,9
17	KL Messeplatz	234	1,8	2,1
18	Olsbrücken Bahnhof	202	12,5	12,1
19	KL Königsstr	241	1,6	2,8
20	Siegelbach Dorfanger	246	5,8	6,1

Tab. 11.1.: Name, Nummer, Höhe über normal Null und Senderabstände der stationären Messpunkte

11.3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die durchgeführten Arbeiten der Untersuchungen im stationären Empfangsfall beschrieben.

Zunächst werden die Verhältnisse auf der hochfrequenten Signalebene an den jeweiligen Messpunkten beschrieben.

Anschliessend werden für die jeweilige Empfangssituation die Messwerte am Empfängeranfang angegeben. Diese werden zur leichten Übersicht in einer kartographischen Form präsentiert. Hierbei werden die Versorgungsprognosen – wie im vorigen Abschnitt erläutert – den Messwerten gegenübergestellt. Diese werden durch ein ineinander verschachteltes Symbol angegeben, das die Ergebnisse der 4- bzw. 16-QAM-Variante bzw. dem SINAD im Falle einer FM-Übertragung kombiniert darstellt:

- Das Symbol \diamond repräsentiert die 16-QAM-Variante. Das Symbol wird grün gefärbt wenn die Bedingung $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ erfüllt ist, sonst rot.
- Das Symbol \square repräsentiert die 4-QAM-Variante. Das Symbol wird grün gefärbt wenn die Bedingung $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ erfüllt ist, sonst rot.
- Durch das Symbol \bigcirc wird die Güte des FM-Empfangs anhand des SINAD klassiert. Die Symbolfarbe richtet sich nach einer fünfstufigen Farbskala. Diese basiert auf den Erfahrungen aus [SS08] und orientiert sich an den Messwerten des SINAD wie in Tab. 11.2 beschrieben. Diese Klassierung wird auch zur Auswertung der Werte im mobilen Empfangsfall (S. 93 ff.) angewandt.


SINAD-Intervall	Qualitätsstufe S	Subjektive Bewertung	Farbe
$(-\infty < 10 \text{ dB})$	1	kaum verständlich, inakzeptabel	Schwarz
$[10 \text{ dB} \dots 20 \text{ dB})$	2	gerade verständlich, häufige Störung	Rot
$[20 \text{ dB} \dots 30 \text{ dB})$	3	gut, seltene Störung	Gelb
$[30 \text{ dB} \dots 40 \text{ dB})$	4	sehr gut, äußerst seltene Störung	Grün
$[40 \text{ dB} \dots \infty)$	5	exzellent	Dunkelgrün

Tab. 11.2.: Zuordnung von SINAD-Klassen zu Messwerten und subjektive Beurteilung

An dieser Stelle sei explizit darauf hinzuweisen, daß diese Klassierung auf der subjektiven Bewertung der Autoren beruht, die im Laufe des Feldversuches 2008 anhand von Hörproben und Vergleichen mit anderen Systemen entstanden ist. Würde man sich an den Kriterien einer FM-Stereo-Versorgungsmessung orientieren, würde lediglich die Qualitätsstufe 5 zu dem Ergebnis „FM-Versorgung gewährleistet“ führen, s. hierzu auch [SS08, Kap. 5.4] in Verbindung mit [ITU02b]. Dies ist jedoch sicherlich nicht gerechtfertigt, da der Qualitätsstufe ein gewichtetes S/N von 50 dB aufgrund des Schutzabstandsmessverfahrens entspricht; dies wird aber durch die Vorgaben an den Regelbetrieb auf ca. 39 dB reduziert, vgl. die Diskussion in Abschnitt 10.4.2. Weiterhin sollte die Erkenntnis aus [SS08, Kap. 5.4, Abb. 5.37] Berücksichtigung finden, dass zwischen SINAD und gewichtetem S/N etwa 6 dB Unterschied besteht (solange der Empfänger nicht übersteuert): Einem SINAD-Wert von 33 dB entspricht ein gewichtetes S/N von ca. $33 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 39 \text{ dB}$, oder anders herum: 50 dB „Schutzabstands“-S/N reduzieren sich bei Empfang eines regelkonformen UKW-Senders auf ca. 33 dB SINAD.

Weiterhin sei angemerkt, dass das SINAD-Messverfahren – genau wie das S/N-Verfahren – sicherlich nicht der subjektiven psychoakustischen Wahrnehmung des Menschen entspricht. Dies wird durch die vorgenommene Klassierung auf Basis realer FM-Signale mit bis zu 75 kHz Spitzenhub und 0 dB_r-MPX-Leistung (z.B. basierend auf Audiosamples aus [SS08]) berücksichtigt.

Somit ist der SINAD in Kombination mit der vorgenommenen Klassifizierung ein sinnvolles Hilfsmaß, mit dem auch im mobilen Fall eine reproduzierbare Kontrolle der subjektiven (Audio)Empfangsgüte realisiert werden kann. Aufgrund der Tatsache, daß im Falle des Mehrwegeempfangs der nichtlineare Anteil des Funkkanals sich im demodulierten Audiosignal zwangsläufig durch Obertöne des ursprünglich gesendeten Tonsignals bemerkbar macht, wird die Empfangssituation in dieser Hinsicht durch SINAD besser repräsentiert als dies durch ein S/N-Verfahren möglich wäre. Die Ergebnisse dieser Messstrategie korrelieren in hohem Maße mit den Ergebnissen des Monitoring-Systems von Audemat [Aud], welches als Bewertungsparameter unter anderem den Hub des Stereopiloten bewertet – welcher einen wesentlich geringeren Hub und somit weniger Meßdynamik aufweist.

Beispielsweise bedeutet das Symbol , das für die 16-QAM-Variante die Bedingung $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ erfüllt ist, für die 4-QAM-Variante nicht. Der gemessene SINAD-Wert im FM-Modus von TX FH entspricht der Qualitätsstufe 3 und somit gem. Tab. 11.2 einem SINAD im Bereich [20 dB ... 30 dB).

Ergänzend zu der kartographischen Darstellung werden die Messwerte in einer Tabelle aufgelistet. Diese gibt für die 4 (16)-QAM-Variante an, ob das Kriterium $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ erfüllt war (Kennzeichnung durch eine „1“ für „Kriterium erfüllt“ „0“ für „Kriterium nicht erfüllt“. Des weiteren ist der Messwert des SINAD in Dezibel angegeben.

Zur Ergänzung der Laboruntersuchungen wird im abschließenden Schritt der Empfangsuntersuchungen anhand der gemessenen HF-Situation beurteilt, ob der DRM⁺-Empfang möglich wäre oder nicht. Diese Vorhersage wird den Messwerten am DRM⁺-Empfängerausgang gegenübergestellt. Dies geschieht durch einen tabellarischen Vergleich der vorhergesagten Werte anhand der HF-Parameter in Kombination mit den bekannten Empfängerparametern und Schutzabständen der jeweiligen Modulationsvariante: für jeden der Messpunkte wird das SNR_{Dec} gem. Gl. (11.1) angegeben. In der Spalte „ $\text{SNR}_{\text{Dec}} \geq \min$ “ wird geprüft, ob das SNR_{Dec} ausreichend zur Dekodierung der jeweiligen Modulationsvariante ist. In der Spalte „PR ok“ wird geprüft, ob der Schutzabstand gegenüber TX RB bzw. im Gleichkanal gegenüber anderen Stationen (wesentlich bei MP9) eingehalten wird. Die Spalte „ SNR_{Dec} & PR ok“ verknüpft die beiden vorigen Spalten. Die Spalte „Gemessen“ repräsentiert die Reaktion des DRM⁺-Empfängers (Bitfehlerratenkriterium erfüllt bzw. nicht erfüllt). Schliesslich vergleicht die Spalte „Vergleich“ die Spalte „ SNR_{Dec} & PR ok“ mit der Spalte „Gemessen“.

Die Ergebnisse der Aussagen der Überprüfungsspalten sind binär kodiert: eine „1“ in den jeweiligen Spalten steht für ein „Ja, Bedingung erfüllt“, eine „0“ für ein „Nein, die Bedingung ist nicht erfüllt“. Somit kann der Spalte „Vergleich“ direkt entnommen werden, ob der Schluss von der HF-Situation auf die DRM⁺-Dekodierung richtig war. Eine Häufung der richtigen Vorhersagen spricht dafür, daß die Modellierung der Planungsparameter gut zu der realen Situation passt und eine möglichst einfache und praxistaugliche Verwendung in der Funknetzplanung ermöglicht.

11.3.1. HF-Verhältnisse an den Empfangsorten

Abb. 11.7 stellt die Empfangsspannungspegel von TX FH und TX RB an den unterschiedlichen Messpunkten dar. Darüberhinaus wird die mittlere Rauschspannung in einer Bandbreite von 100 kHz sowie das resultierende Signal-zu-Rauschverhältnis SNR_{Dec} analog zu Kap. 7.2 dargestellt. Die Empfangsspannung von TX RB ist konstant über den verschiedenen Sendefrequenzen. Die Darstellung in dBµV dient lediglich der Skalierung. Über die Beziehung zwischen Spannungspegel und Leistungspegel in einem 50 Ω-System

$$L/\text{dBm} = U/\text{dB}\mu\text{V} - 107\text{ dB}$$

können diese Werte wieder umskaliert werden. Zur Orientierungshilfe sind in der Darstellung die Dekodiergrenzen zur Erfüllung des Bitfehlerratenkriteriums für die jeweilige Modulationsvariante eingetragen.

Darüberhinaus sind die einzelnen Meßwerte und das SNR_{Dec} gem. Gl. 11.1 in Tab. 11.3 aufgelistet. Hiermit wird erkennbar, daß an den meisten Messpunkten der Empfang unter der Vorraussetzung, dass das Grundrauschen Gauss'scher Natur ist, möglich sein sollte.

MP Nr.	MP Name	L(TX-FH)	L(TX-RB)	L(Noise) in 100 kHz	SNR _{Dec}	L(TX FH)- L(TX-RB)
1	Monte-Mare	-58 dBm	-44 dBm	-45 dBm	32 dB	-14 dB
2	Enkenbach Polizeischule	-79 dBm	-71 dBm	-72 dBm	14 dB	-8 dB
3	Landstuhl Post	-75 dBm	-73 dBm	-74 dBm	19 dB	-2 dB
4	E-Hof I-Gebiet	-70 dBm	-63 dBm	-64 dBm	29 dB	-7 dB
5	Katzweiler Freilichtbühne	-83 dBm	-88 dBm	-89 dBm	16 dB	5 dB
6	Schopp Waldstr.	-78 dBm	-70 dBm	-71 dBm	13 dB	-8 dB
7	Hochspeyer I-Gebiet	-78 dBm	-67 dBm	-68 dBm	17 dB	-11 dB
8	P A6-KL West	-62 dBm	-56 dBm	-57 dBm	37 dB	-6 dB
9	Einfahrt Mehlingen	-78 dBm	-68 dBm	-69 dBm	9 dB	-10 dB
11	Mackenbach Ortseingang	-81 dBm	-80 dBm	-81 dBm	11 dB	-1 dB
12	KL-Ost Realmarkt	-58 dBm	-57 dBm	-58 dBm	40 dB	-1 dB
13	Stelzenberg Sportplatz	-69 dBm	-63 dBm	-64 dBm	25 dB	-6 dB
14	Betzenberg	-35 dBm	-37 dBm	-38 dBm	54 dB	2 dB
15	altes Bahnwerk	-65 dBm	-55 dBm	-56 dBm	34 dB	-10 dB
16	Otterbach Aral Tankstelle	-75 dBm	-80 dBm	-81 dBm	19 dB	5 dB
17	Messeplatz	-42 dBm	-36 dBm	-37 dBm	50 dB	-6 dB
18	Olsbrücken Bahnhof	-90 dBm	-83 dBm	-84 dBm	6 dB	-7 dB
19	Königsstr. Aldi	-45 dBm	-38 dBm	-39 dBm	52 dB	-7 dB
20	Siegelbach Dorfanger	-80 dBm	-80 dBm	-81 dBm	15 dB	0 dB

Tab. 11.3.: Empfangsleistungspegel, Pegeldifferenz zwischen den beiden Sendern sowie SNR_{Dec} an den Messorten

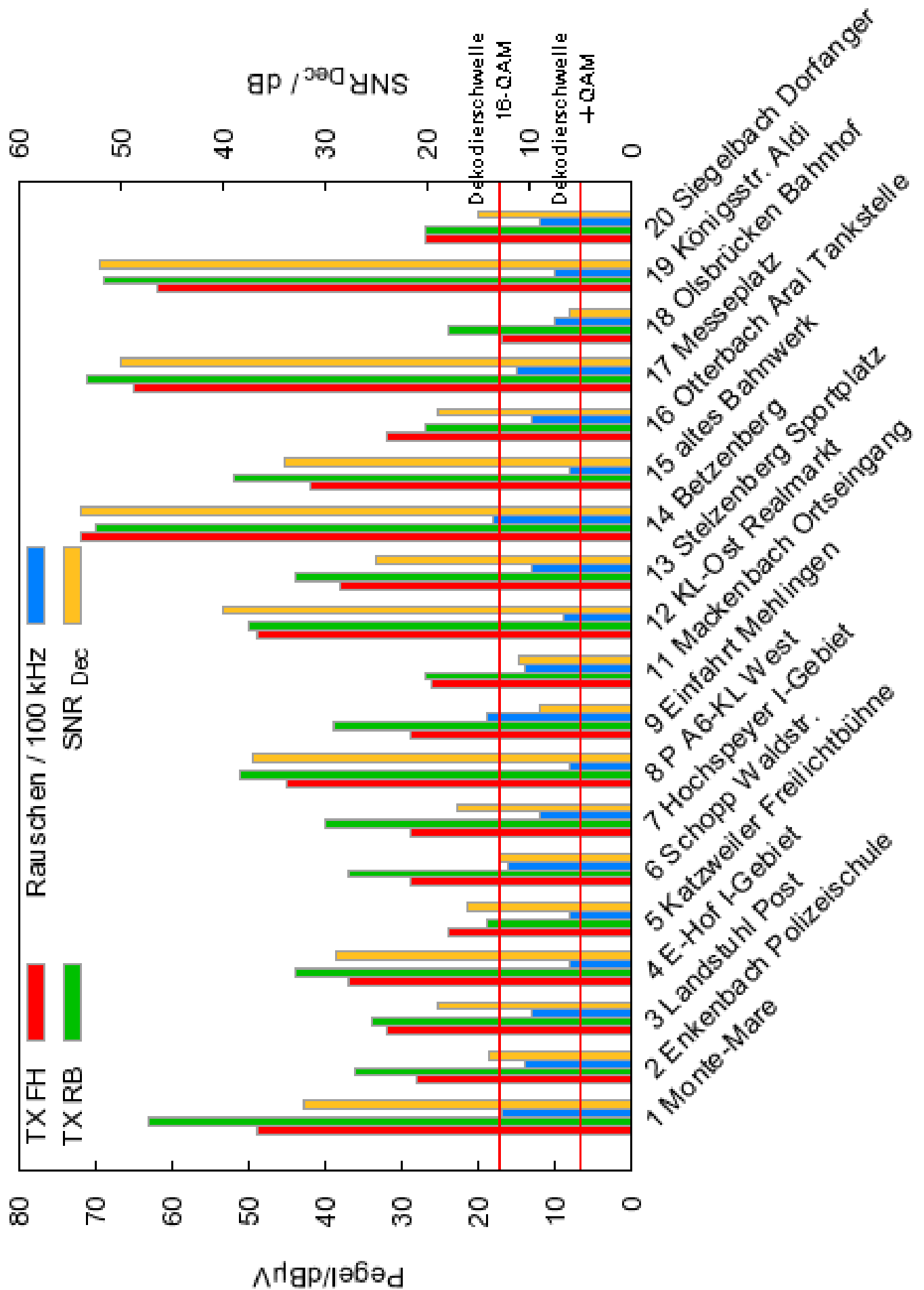


Abb. 11.7.: Empfangsspannungspegel und Signal-zu-Rausch-Abstände an den Meßpunkten

11.3.2. Fall (a): keine Störungen durch TX RB

Dieser Fall beschreibt die Empfangssituation von TX FH ohne zusätzliche Beeinflussung durch TX RB. Die Versorgungsreichweite von TX FH ist gemäß den Versorgungsplot (in Abb. 11.8 blau unterlegt) interferenzbegrenzt. Abb. 11.8, daß der Stadtbereich von Kaiserslautern und das nähere Umland planerisch versorgt sein sollte. Anhand der in Abschnitt 11.3 erläuterten Symbologie der jeweiligen Empfangsgüten für FM und DRM⁺ in Abb. 11.8 ist erkennbar, daß die prognostizierte Versorgungssituation erfüllt wurde. An allen Messpunkten ist sowohl die 4- als auch 16-QAM-Variante nutzbar, mit Ausnahme von MP 9 (Störung durch HR1 im Gleichkanal) und MP 11 (SNR_{Dec} zu gering zur Dekodierung der 16-QAM-Variante, der Planung entsprechend). MP 6 liegt zwar ausserhalb der Versorgungsprognose, aber immer noch innerhalb des als planerisch gestörten Gebiets. Durch die topographischen Gegebenheiten und der Entkopplung der Richtantenne von Sender Metz (Gleichkanal) ist an diesem Ort der Empfang möglich.

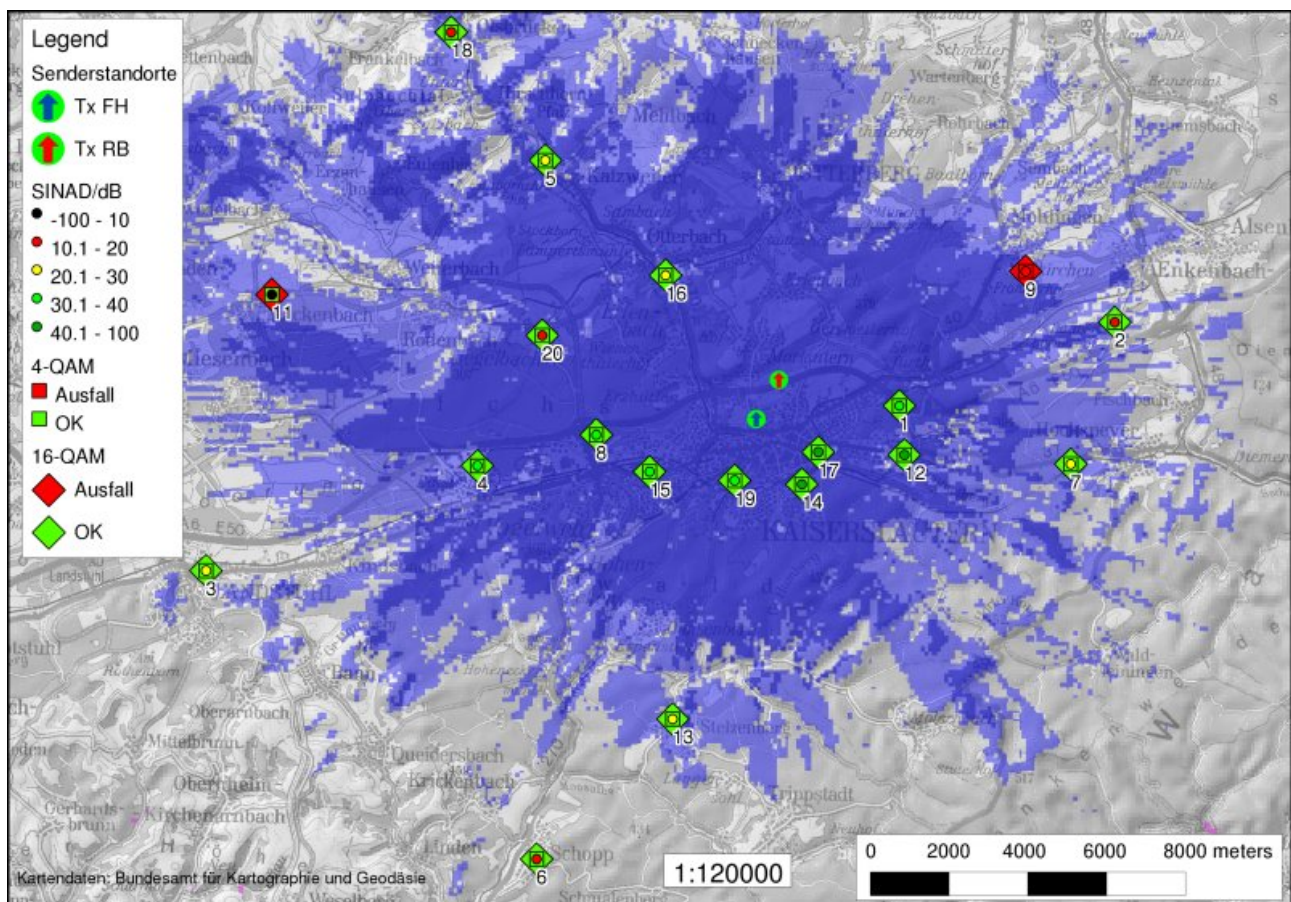


Abb. 11.8.: Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im ungestörten Fall. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent

Während die Dekodierung des Audiostroms an den mit DRM⁺ versorgt markierten Punkten stabil war, konnte im Fall einer FM-Ausstrahlung von TX FH an vielen Punkte nur noch ein grenzwertiger Empfang (SINAD-Qualitätsstufe 2 und schlechter) durch die Kombination aus niedrigem Empfangspegel und Störungen durch andere Sender aufgrund des höheren Schutzabstandes für die FM-Übertragung verzeichnet werden. An 18 (17) Punkten konnte die 4 (16)-QAM-Variante dekodiert werden. An 13 Punkten wurde der FM-Empfang mit einer SINAD-Qualitätsstufe größer als 2 kategorisiert. Die Ergebnisse sind zusätzlich in Tab. 11.5 aufgelistet.

Messpunkt-Nr.	4-QAM	16-QAM	SINAD/ dB
1	1	1	37
2	1	1	19,1
3	1	1	22,3
4	1	1	30,1
5	1	1	20,4
6	1	1	16,7
7	1	1	23,4
8	1	1	38,4
9	0	0	14,2
11	1	0	9,9
12	1	1	41,4
13	1	1	28,8
14	1	1	48
15	1	1	34,1
16	1	1	22
17	1	1	43,3
18	1	1	11,3
19	1	1	39,7
20	1	1	17,7

Tab. 11.4.: Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten im ungestörten Fall

Die Tabellen 11.5 und 11.6 stellen wie auf Seite 75 erläutert die Vorhersage der DRM⁺-Dekodierbarkeit anhand der HF-Parameter dar. Ausser an Messpunkt 18 treffen die Annahmen in allen Punkten zu.

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32 dB	1	1	1	1	1
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	1	1
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	1	0	0	0	1
11	11 dB	1	1	1	1	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	1	1	1	1	1
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.5.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante ohne TX RB

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32 dB	1	1	1	1	1
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	1	1
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	0	0	0	0	1
11	11 dB	0	1	0	0	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	0	1	0	1	0
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.6.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante ohne TX RB

11.3.3. Fall (b): Störung durch TX RB 87,6 MHz

Dieser Fall beschreibt die Empfangssituation von TX FH mit einer zusätzlichen Beeinflussung durch TX RB im Gleichkanal (87,6 MHz). Die Versorgung von TX FH sollte laut den Versorgungsprognosen (in Abb. 11.8 blau unterlegt) zusammenbrechen, was die Messergebnisse eindeutig bestätigen. Im Sinne der DRM⁺-Dekodierung bestätigen die Messdaten der HF-Situation die Prognose der DRM⁺-Empfangsbedingungen. In keinem Fall konnte aufgrund des nicht eingehaltenen Schutzabstandes das DRM⁺-Signal dekodiert werden. Auch der FM-Empfang lag vollständig brach; an keinem Messpunkt konnte der SINAD mit der Qualitätsstufe 2 und höher bewertet werden. Dies ist einleuchtend, wenn man den wesentlich höheren Schutzabstand einer FM-Übertragung bei Störungen im Gleichkanal im Vgl. zu DRM⁺ in Betracht zieht (s. Kap. 9). In allen Fällen lies die Beurteilung der HF-Empfangsverhältnisse einen korrekten Schluß auf die Versorgungssituation der 4-/16-QAM-Variante zu.

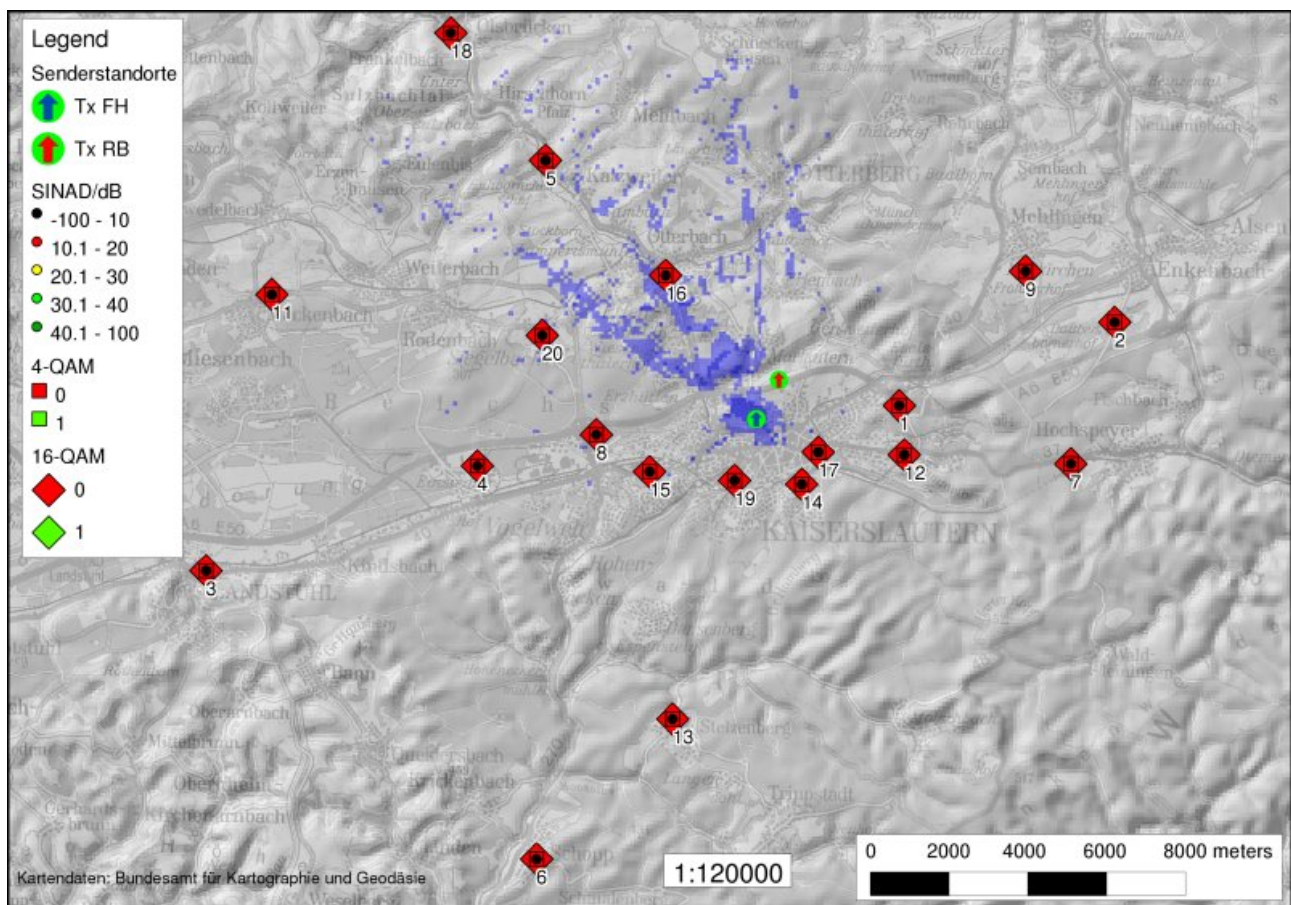


Abb. 11.9.: Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall 87,6 MHz. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent

Messpunkt-Nr.	4-QAM	16-QAM	SINAD/ dB
1	0	0	1,2
2	0	0	1,3
3	0	0	0,6
4	0	0	1,2
5	0	0	9,9
6	0	0	1,1
7	0	0	1,1
8	0	0	1,3
9	0	0	1,1
11	0	0	0,9
12	0	0	1,2
13	0	0	1,4
14	0	0	7,4
15	0	0	1,4
16	0	0	9,5
17	0	0	0,9
18	0	0	1,3
19	0	0	1,2
20	0	0	3,5

Tab. 11.7.: Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im Gleichkanal

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} \geq min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32 dB	1	0	0	0	1
2	14 dB	1	0	0	0	1
3	19 dB	1	0	0	0	1
4	29 dB	1	0	0	0	1
5	16 dB	1	0	0	0	1
6	13 dB	1	0	0	0	1
7	17 dB	1	0	0	0	1
8	37 dB	1	0	0	0	1
9	9 dB	1	0	0	0	1
11	11 dB	1	0	0	0	1
12	40 dB	1	0	0	0	1
13	25 dB	1	0	0	0	1
14	54 dB	1	0	0	0	1
15	34 dB	1	0	0	0	1
16	19 dB	1	0	0	0	1
17	50 dB	1	0	0	0	1
18	6 dB	1	0	0	0	1
19	52 dB	1	0	0	0	1
20	15 dB	1	0	0	0	1

Tab. 11.8.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87,6 MHz

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} \geq min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32	1	0	0	0	1
2	14 dB	1	0	0	0	1
3	19 dB	1	0	0	0	1
4	29 dB	1	0	0	0	1
5	16 dB	1	0	0	0	1
6	13 dB	1	0	0	0	1
7	17 dB	1	0	0	0	1
8	37 dB	1	0	0	0	1
9	9 dB	0	0	0	0	1
11	11 dB	0	0	0	0	1
12	40 dB	1	0	0	0	1
13	25 dB	1	0	0	0	1
14	54 dB	1	0	0	0	1
15	34 dB	1	0	0	0	1
16	19 dB	1	0	0	0	1
17	50 dB	1	0	0	0	1
18	6 dB	0	0	0	0	1
19	52 dB	1	0	0	0	1
20	15 dB	1	0	0	0	1

Tab. 11.9.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB: 87,6 MHz

11.3.4. Fall (c): Störung durch TX RB 87,7 MHz

Dieser Fall beschreibt die Empfangssituation von TX FH mit einer zusätzlichen Beeinflussung durch TX RB im ersten Nachbarkanal (87,7 MHz). Die Versorgungsprognose zeigt klare Einbußen in den Bereichen der Hauptstrahlrichtung von TX RB. Diese Prognose stellte sich gem. den Messresultaten als etwas zu pessimistisch heraus. An 18 (14) Messpunkten konnte die 4 (16)-QAM Variante stabil dekodiert werden. Im Fall einer FM-Ausstrahlung von TX FH konnte an 3 Punkten die Qualitätsstufe 2, an einem die Stufe 3 gemessen werden. Dieser immense Unterschied bestätigt die Robustheit des OFDM-Verfahrens, die sich auch in den ermittelten Schutzabständen widerspiegelt.

Die Tabellen 11.11 und 11.12 stellen die Prognose der Empfangssituation anhand der gemessenen HF-Parameter dar. In 1 (2) der 19 Fälle war diese korrekt für die 4 (16)-QAM-Variante. Im 16-QAM-Fall an MP 6 ist dies auf Rundungseffekte zurückzuführen: es wurde eine $\overline{\text{BER}}$ von $7 \cdot 10^{-4}$ erfasst, was knapp über dem $1 \cdot 10^{-4}$ -Schwellwert liegt.

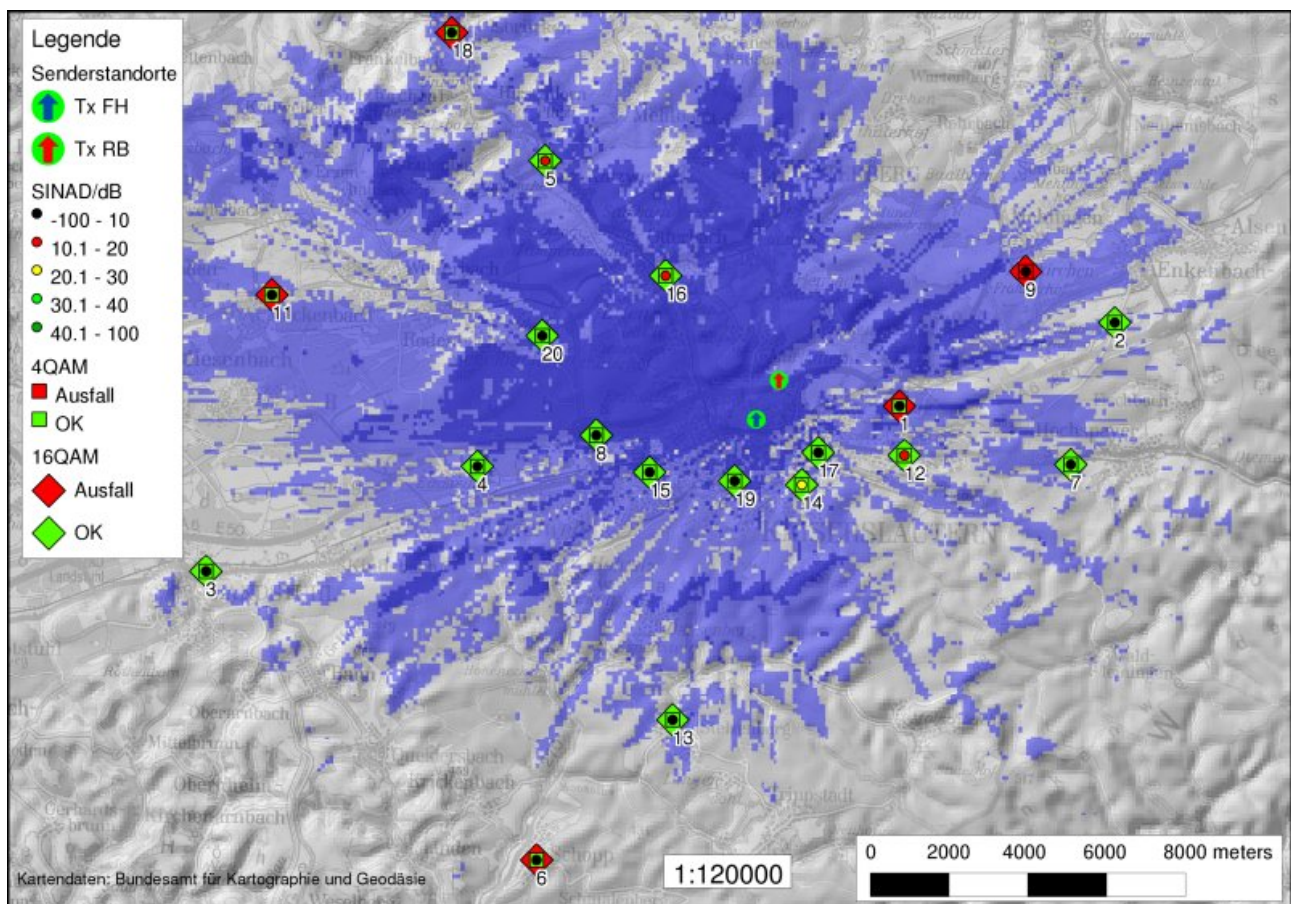


Abb. 11.10.: Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall TX RB 87,7 MHz. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent

Messpunkt-Nr.	4-QAM	16-QAM	SINAD/ dB
1	1	0	1,4
2	1	1	0,9
3	1	1	0,9
4	1	1	1,4
5	1	1	15,8
6	1	0	1,5
7	1	1	1,1
8	1	1	1
9	0	0	0,9
11	1	0	1
12	1	1	19,8
13	1	1	1
14	1	1	21,6
15	1	1	1,5
16	1	1	12,8
17	1	1	1,2
18	1	0	1,2
19	1	1	0,9
20	1	1	2,4

Tab. 11.10.: Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im ersten Nachbarkanal

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32	1	0	0	1	0
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	1	1
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	1	0	0	0	1
11	11 dB	1	1	1	1	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	1	1	1	1	1
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.11.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87,7 MHz

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32	1	1	1	0	0
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	0	0
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	0	0	0	0	1
11	11 dB	0	1	0	0	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	0	1	0	0	1
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.12.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB:
87,7 MHz

11.3.5. Fall (d): Störung durch TX RB 87,8 MHz

Dieser Fall beschreibt die Empfangssituation von TX FH mit einer zusätzlichen Beeinflussung durch TX RB im zweiten Nachbarkanal (87,8 MHz). Die Versorgungsprognose (Abb. 11.11) zeigt, daß der Unterschied zum ungestörten Fall (Abb. 11.8) minimal ist. Die Messungen ergeben, daß der DRM⁺-Empfang wieder genauso gut wie im unbelasteten Fall möglich ist. Im FM-Modus entspricht die Verteilung der SINAD-Klassen fast derjenigen des Ausgangszustandes (TX RB ausgeschaltet).

Das hohe Maß an Überdeckung der aus den HF-Messwerten vorhergesagten DRM⁺-Empfangsgüte mit der tatsächlichen Empfangsgüte zeigt, daß die Modellierung auch in diesem Fall gut mit der an den Messpunkten vorhandenen Realität Rechnung trägt.

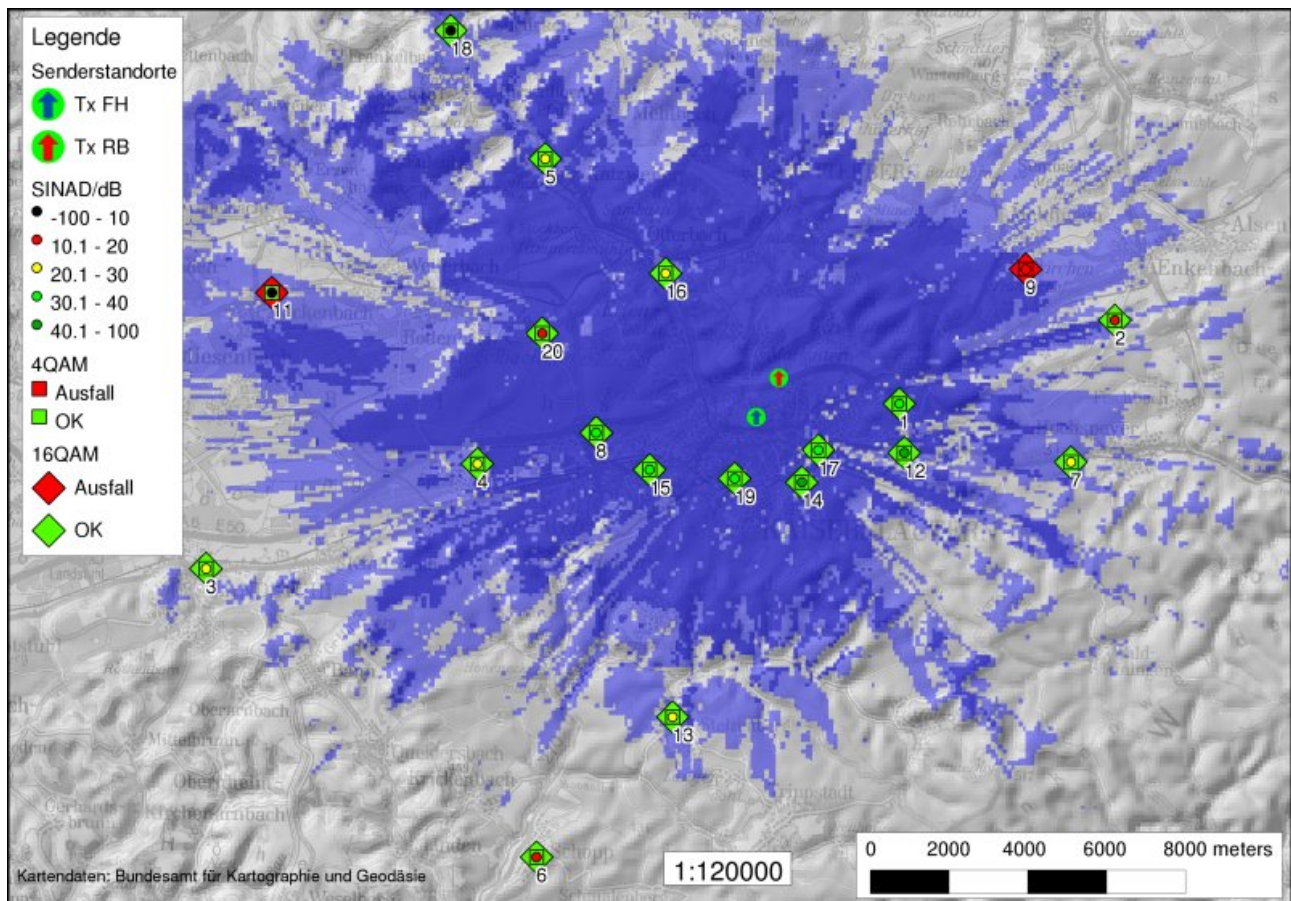


Abb. 11.11.: Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall TX RB87,8 MHz. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent

Messpunkt-Nr.	4-QAM	16-QAM	SINAD/ dB
1	1	1	35,9
2	1	1	16,8
3	1	1	22
4	1	1	27,5
5	1	1	21
6	1	1	16,3
7	1	1	20,5
8	1	1	38,4
9	0	0	14,2
11	1	0	9,1
12	1	1	41,4
13	1	1	28,1
14	1	1	47,3
15	1	1	33,2
16	1	1	21,9
17	1	1	39,6
18	1	1	9,8
19	1	1	38,9
20	1	1	17,2

Tab. 11.13.: Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im zweiten Nachbarkanal

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32	1	1	1	1	1
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	1	1
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	1	0	0	0	1
11	11 dB	1	1	1	1	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	1	1	1	1	1
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.14.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87,8 MHz

MP-Nr.	SNR _{Dec}	SNR _{Dec} ≥ min	PR ok	SNR _{Dec} & PR ok	Gemessen	Vergleich
1	32	1	1	1	1	1
2	14 dB	1	1	1	1	1
3	19 dB	1	1	1	1	1
4	29 dB	1	1	1	1	1
5	16 dB	1	1	1	1	1
6	13 dB	1	1	1	1	1
7	17 dB	1	1	1	1	1
8	37 dB	1	1	1	1	1
9	9 dB	0	0	0	0	1
11	11 dB	0	1	0	0	1
12	40 dB	1	1	1	1	1
13	25 dB	1	1	1	1	1
14	54 dB	1	1	1	1	1
15	34 dB	1	1	1	1	1
16	19 dB	1	1	1	1	1
17	50 dB	1	1	1	1	1
18	6 dB	0	1	0	1	0
19	52 dB	1	1	1	1	1
20	15 dB	1	1	1	1	1

Tab. 11.15.: Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB:
87,8 MHz

11.3.6. Stabilität der Versorgung – ein Versuch

Um einen Eindruck zu gewinnen, welche Reserve im stationären Szenario in Bezug auf die Sendeleistung von TX FH im analogem bzw. digitalem Betrieb vorhanden ist wurde folgender Versuch durchgeführt: an Messpunkt 19 (Kaiserslautern Königsstraße, s. auch [SS08, Messpunkt 7]) wurde nach Feststellung einer guten Versorgung für beide Systeme sowie einer geringen Grundbelastung (Rauschen) die Sendeleistung von TX FH in 5 dB-Schritten bis zur an TX FH maximal möglichen Dämpfung von 45 dB abgesenkt und für die unterschiedlichen Störszenarien die jeweiligen Empfangsgüten festgehalten.

Die Abbildungen 11.12 – 11.15 zeigen die Messwerte gestaffelt nach dem Störszenario (ohne bzw. mit TX RB, betrieben auf den Mittenfrequenzen 87,6 MHz \cdots 87,8 MHz). Die Abbildungen sind jeweils so gehalten, daß auf der Abszisse die Dämpfung von TX FH aufgetragen ist. Die Übertragungsgüte im FM-Fall wird anhand des SINAD entlang der linken Ordinate angegeben. Im Falle der DRM⁺-Übertragung im 4- bzw. 16-QAM-Modus wird die Empfangsgüte durch die mittlere Bitfehlerrate $\overline{\text{BER}}$ (beschnitten auf eine $\overline{\text{BER}}$ von $1 \cdot 10^{-8}$) entlang der rechten Ordinate angegeben. Der Rauschleistungspegel an diesem Ort betrug –96 dBm, der Empfangsleistungspegel von TX FH bzw. TX RB –45 dBm bzw. –36 dBm.

Abb. 11.12 zeigt, das in beiden digitalen Varianten die fehlerfreie Dekodierung auch dann noch möglich ist, wenn die Bewertung des FM-Signals bereits unterhalb der 2ten Qualitätsstufe (≤ 20 dB) liegt. Im Fall einer Gleichkanalstörung (Abb. 11.13) war in keinem Fall der Empfang von TX FH möglich. Bei Störungen im ersten Nachbarkanal war der DRM⁺-Empfang im 16-QAM-Fall im Grenzbereich, der bei der 4-QAM-Variante entsprechend den Schutzabstandsmessungen bei ca. 5 dB verringerter Sendeleistung von TX FH erreicht wurde. Für den FM-Fall trifft dies allerdings nicht zu: Dieser war in der beschriebenen Situation aufgrund der Nachbarkanalstörungen schlichtweg nicht möglich.

Dieses Verhalten ist auch bei Störungen im zweiten Nachbarkanal zu erkennen: Der Dämpfungsunterschied zwischen dem vollständigen Zusammenbrechen der FM-Versorgung und dem Ausfall der DRM⁺-Dekodierung – an dem Messpunkt nur für die 16-QAM-Variante zutreffend – beträgt mindestens 30 dB.

Dieser an diesem Messpunkt durchgeführte Versuch bestätigt die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte. Es ist klar ersichtlich, daß der Punkt des vollständigen Zusammenbruchs des FM-Empfangs am Messpunkt – ungeachtet der SINAD-Qualitätsklassen – insbes. bei Störungen im ersten und zweiten Nachbarkanal – weit von dem Moment entfernt ist, an denen der DRM⁺-Empfang nicht mehr möglich ist.

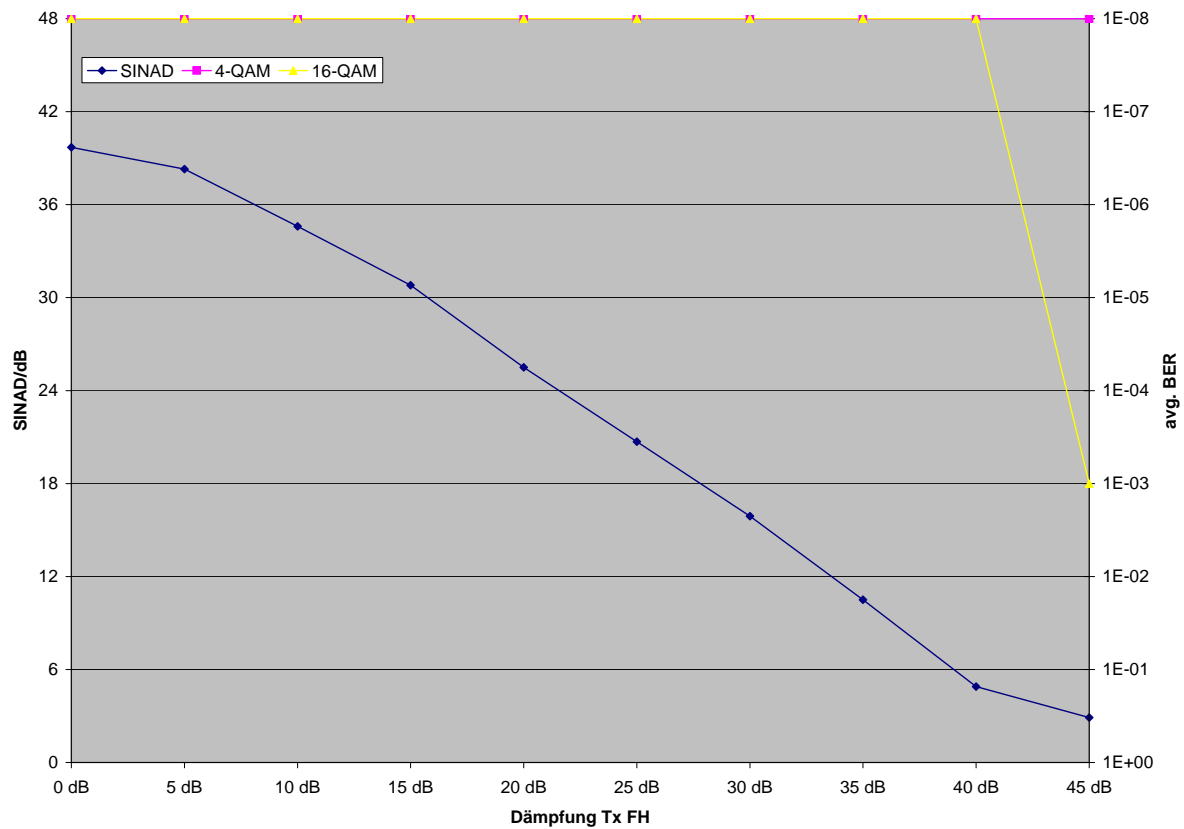


Abb. 11.12.: Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: aus

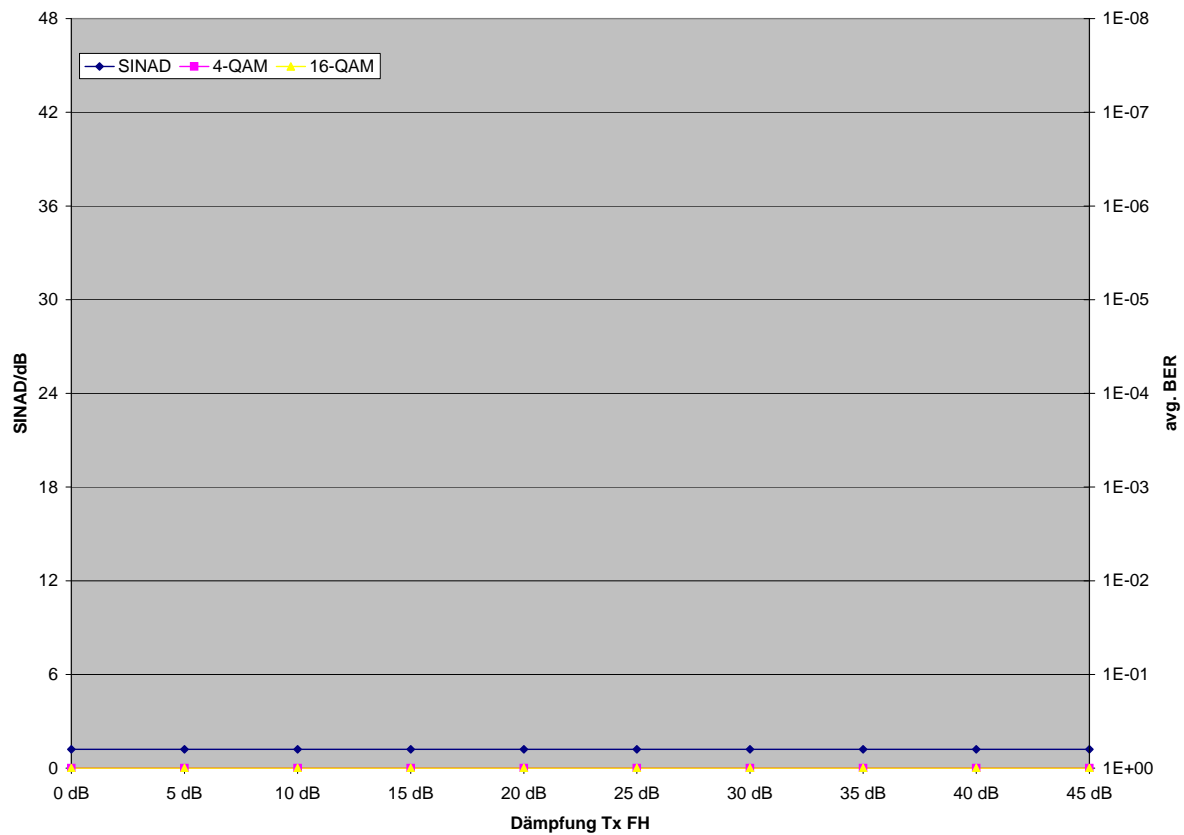


Abb. 11.13.: Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,6 MHz

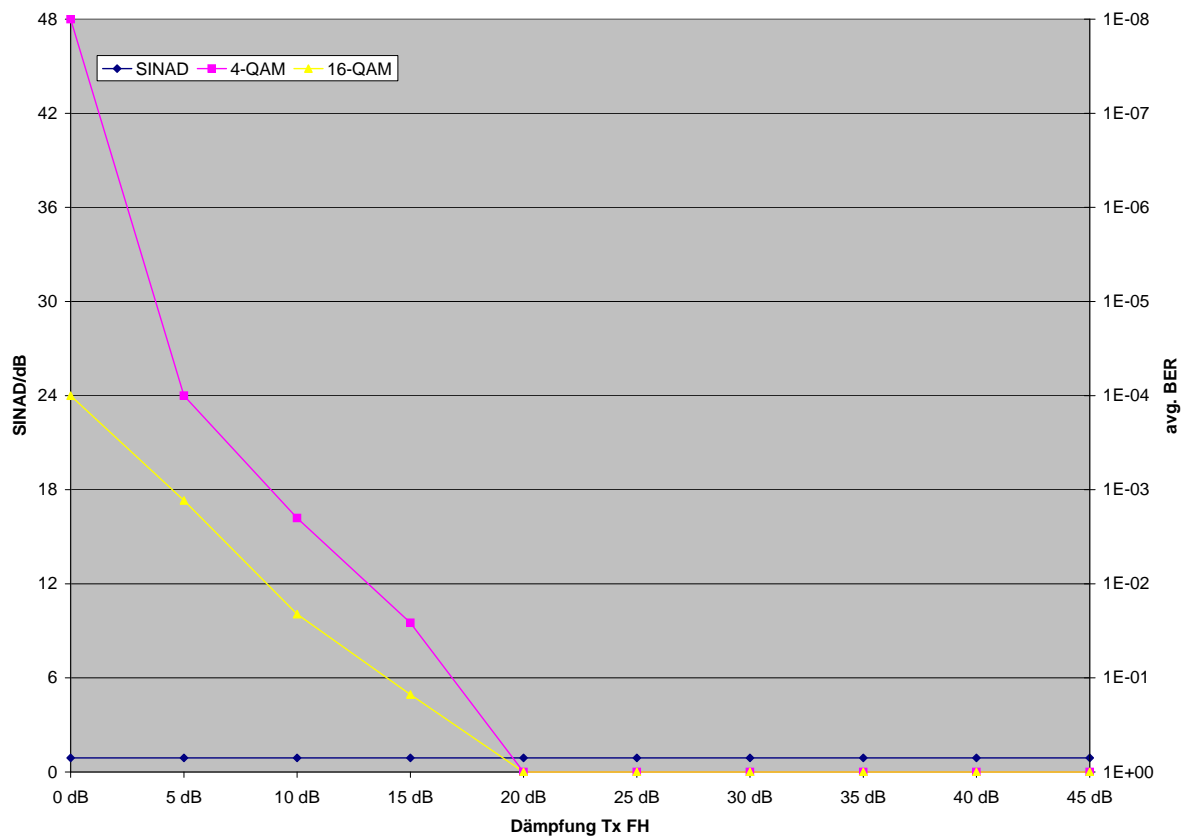


Abb. 11.14.: Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,7 MHz

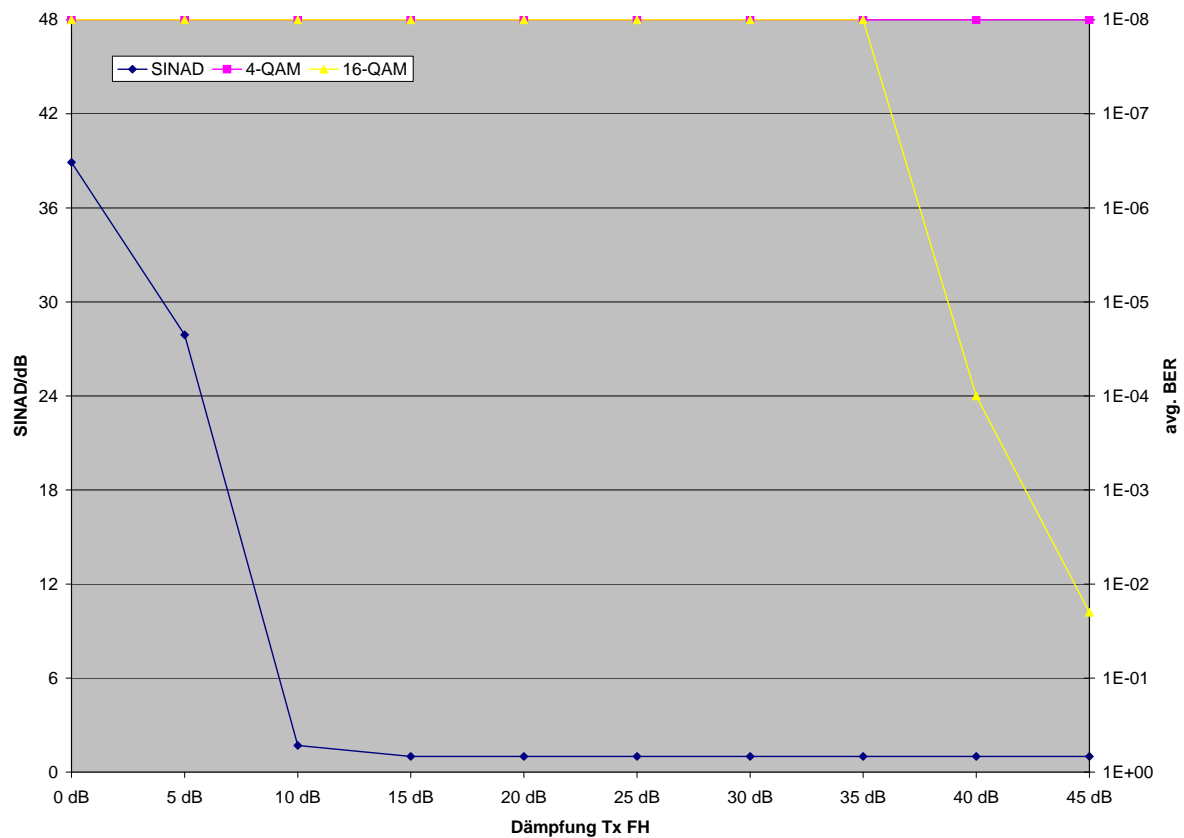


Abb. 11.15.: Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,8 MHz

12. DRM⁺ im mobilen Empfangsfall

Ein wesentlicher Aspekt für ein modernes Rundfunksystem ist der mobile Empfangsfall. Somit ist es neben den stationären Situationen – wie im vorigen Kapitel dargelegt – von wesentlichem Interesse, eine vergleichende Bewertung zwischen dem FM- und DRM⁺-System im Hinblick auf die Versorgung von TX FH auf messtechnischer Basis anzustellen. Eine gute mobile Versorgung stellt hohe Ansprüche an ein digitales System, z.B. die Überbrückung von kurzen Feldstärkeeinbrüchen durch eine gut gewählte Interleaverzeit. Insbesondere für ein schmalbandiges System wie DRM⁺ ist dieser Effekt kritisch, da durch ein kurzzeitiges Flat-Fading das Signal über seiner kompletten Bandbreite ausgelöscht werden kann.

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieses Versuchs durchgeführten Untersuchungen der mobilen Empfangsgüte von TX FH bei – wie auch im stationären Fall – gleicher Sendeleistung beschrieben. Das Messkonzept und die verwendete technische Umsetzung werden vorgestellt. Nach Auswahl der Messroute und der Auswertestrategie werden die Messergebnisse erläutert.

12.1. Messkonzepte und -verfahren

Auch im mobilen Empfangsfall steht die vergleichende Bewertung der Empfangsqualität von TX FH im digitalen und analogen Modus im Vordergrund. Wie auch im vorigen Kapitel wird die Wirkung von TX RB, der auf verschiedenen Mittenfrequenzen als Störsender betrieben wird, auf die Empfangsqualität von TX FH untersucht.

Für den Fall einer FM-Ausstrahlung wird die Empfangsgüte anhand des SINAD klassifiziert und von den Fahrern während der Fahrt abgehört. Im Falle einer DRM⁺-Übertragung wird parallel zu der Erfassung der momentanen Bitfehlerrate der Audiostrom während der Fahrt durch die Fahrer abgehört. Parallel wird in beiden Fällen die HF-Eingangleistung des Empfängers protokolliert. Bei dieser Messreihe kommen die gleichen Empfänger wie im stationären Fall zur Anwendung, s. Abs. 10.3. Durch eine Vielzahl von Messfahrten werden folgende Situationen erfasst:

- FM-Performanz ohne / mit TX RB (87,7; 87,8 MHz).
- DRM⁺-Performanz der 4-QAM-Variante ohne / mit TX RB (87,7; 87,8 MHz).
- DRM⁺-Performanz der 16-QAM-Variante ohne / mit TX RB (87,7; 87,8 MHz).
- Empfangsleistungspegel von TX FH.
- Empfangsleistungspegel von TX RB.
- Rauschleistungspegel entlang der Route.

Auf diese Weise können die Empfangsgüten der unterschiedlichen Systeme miteinander verglichen werden. Darüberhinaus können analog zu dem Vorgehen bei den stationären Messungen die Planungsparameter auf Basis der erfassten HF-Situation überprüft werden.

12.1.1. Messeinrichtung

Zur Erfassung der Empfangssituation wurde ein Messsystem aufgebaut, das die gleichzeitige Erfassung der Empfängereingangsleistung und des Empfängerzustandes inkl. des Messortes als geographische Ortsangabe ermöglicht. Dieses System sowie die in dieser Phase des Feldversuchs zugrundeliegenden Messstrategien werden im Laufe dieses Abschnitts vorgestellt. Da im Rahmen dieser Arbeit die Bewertung des Empfangs aus Sicht der Funknetzplanung stand, wurde das Messsystem so ausgelegt, daß der Empfängerzustand nicht auf der Zeitbasis der DRM⁺-Transmissionframes, sondern auf Basis des zurückgelegten Weges erfasst wird. Dies heisst, daß im Abstand von 80% der Wellenlänge λ eine Messung durchgeführt wird [Lee93]. Durch diese Methode wird gewährleistet, daß die gemessenen HF-Leistungspegel von Ort zu Ort unkorreliert sind. Befindet sich das Messfahrzeug beispielsweise an einem Punkt A an dem die reflektierte Welle große Teile der direkten Welle auslöscht (Flat Fading), so bestehen am folgenden Messpunkt B zwei Möglichkeiten in Bezug auf den reflektierten Anteil: entweder sind aufgrund der Ausbreitungssituation die Reflektionsverhältnisse völlig anders, oder z.B. aufgrund eines ausgedehnten Gebäudekomplexes unverändert. In jedem Fall ist – aufgrund des abstandsorientierten Ansatzes – die Auslöschungsbedingung an Punkt A durch die Unkorreliertheit aufgehoben, so daß eine neue Situation an Punkt B erfasst wird. Zudem ist diese Art der Erfassung ein wesentliches Kriterium, das in [ITU05] an mobile Funküberwachungssysteme gestellt wird. Auch allen anderen in dieser Recommendation angesprochenen Punkt können von dem im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Messsystem erfüllt werden.

Im vorliegenden Fall ergibt sich aufgrund der betrachteten Wellenlängen λ ein Abstand d zwischen den einzelnen Wegpunkten von:

$$\begin{aligned}d &= 0.8 \cdot c / f_{\text{FH}} && [\text{Lee93, Kap. 2.2.2}] && (12.1) \\d &= 0.8 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{87,6 \text{ MHz}} \\d &= 2.74 \text{ m}\end{aligned}$$

Dennoch ist es wichtig und unabdingbar, den Empfang kontinuierlich zu überwachen. Hierzu wurde der Messbus der FH-KL mit einem zusätzlichen Lautsprecher- und Monitorsystem inkl. Touchscreen aufgerüstet, so daß die Geräte während der Fahrt in der Fahrerkabine überwacht und bedienbar sind. Auf diese Weise kann z.B. die Audioausgabe des DRM⁺-Audiodecoders kontinuierlich abgehört werden. Ein wichtiger Effekt dieser Anlage ist es, daß der / die Fahrer während der Messfahrt aus der Sicht eines Nutzers den Empfang bewerten können, insbes. in Bezug auf die Stabilität / Aussetzverhalten von DRM⁺. Verschiedene Rechner können über ein KVM-Switch fernbedient auf den vorderen Bildschirm geschaltet werden. Das komplette Messsystem ist in Abb.12.1 für den Betriebsmodus DRM⁺, in Abb.12.2 für den Betriebsmodus FM dargestellt.

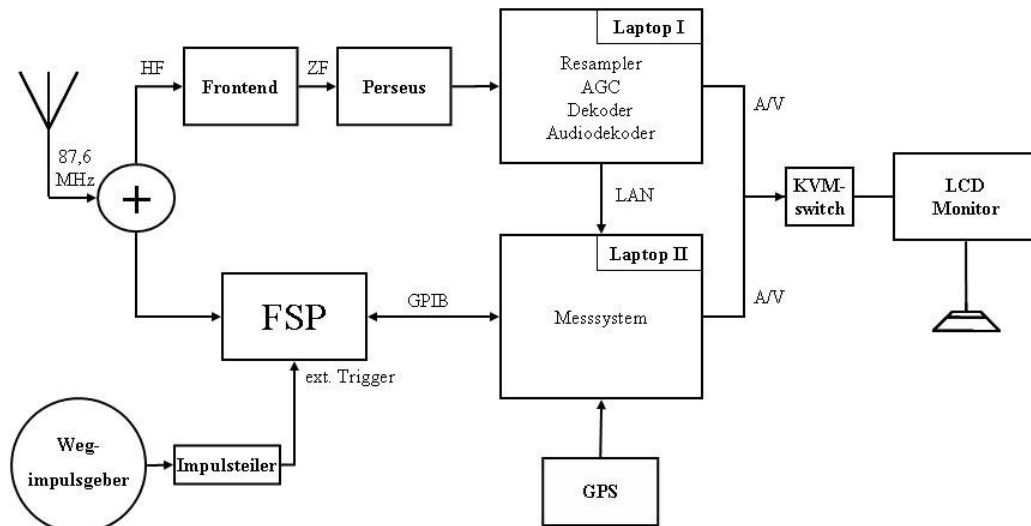
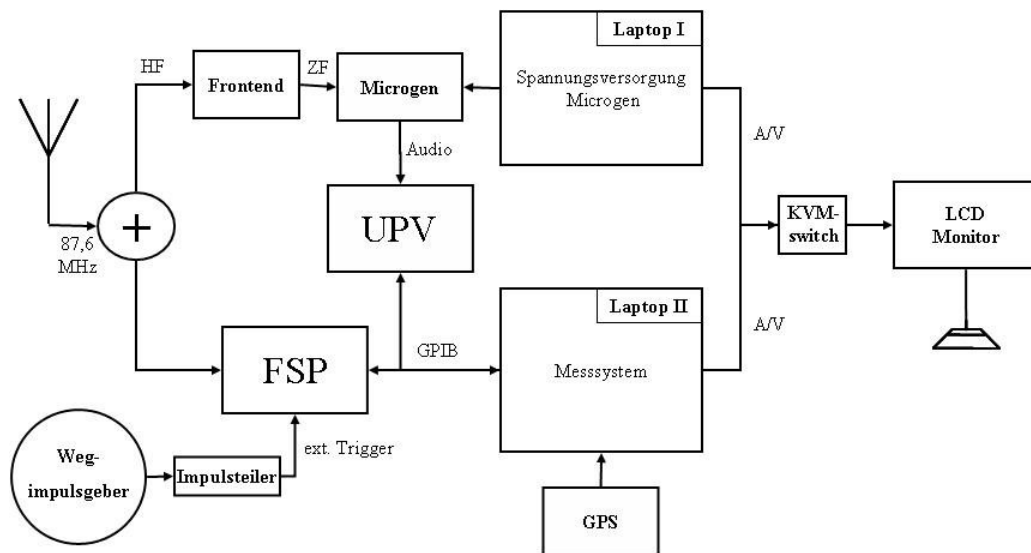
Abb. 12.1.: Aufbau mobiles Messsystem im Messbus der FH-KL, DRM⁺-Modus

Abb. 12.2.: Aufbau mobiles Messsystem im Messbus der FH-KL, FM-Modus

Das mobile Messsystem ist wie folgt aufgebaut: Ein Wegimpulsgeber erfasst die zurückgelegte Fahrstrecke. Wenn die gewünschte Distanz d zurückgelegt wurde, wird eine Pegelmessung vorgenommen. Dieser Pegel wird zusammen mit den anderen in diesem Moment aktuellen Messdaten (Ort, Zeit, SINAD oder BER, ...) als ein Datensatz abgespeichert und auf das erneute Verstreichen der Wegstrecke d gewartet.

Der Wegimpulsgeber besteht aus der Kombination einer Peiseler Platte mit einem dazugehörigem Impulsgeber Peiseler MT500 KFZ-RS mit einer Nennimpulszahl $k = 500$ Pulse / Umdrehung. Der Geber wird an einen selbst entwickelten, einstellbaren Impulsteiler angeschlossen. Durch Kenntnis der Nennimpulszahl und zu überwachenden Wellenlänge wird dieser Teiler so eingestellt, dass nur dann der Impuls des Weggebers an weitere Geräte verteilt wird, wenn die gewünschte Wegstrecke zurückgelegt worden ist. Diese Bedingung stößt die Pegelmessung durch den Spektrumanalyzer R&S FSP30 an („triggern“).

Da der Impulsteiler, der den FSP triggert, flexibel einstellbar ist, können aufgrund der Kombination aus Weglänge, Nennimpulszahl des Weggebers, Radumfang anhand der Einstellung des 12-bittigen Teilers Frequenzen im Bereich von 17,95 MHz ... 36,7 GHz überwacht werden. Die untere Grenze kann hierbei durch die Nachschaltung weiterer Teiler verschoben werden; die obere Grenze ist eher als ein theoretischer Wert anzusehen; die Messgeschwindigkeit des FSP, die Geschwindigkeit des IEC/GPIB-

Busses und des weiter unten vorgestellten Messprogramms selbst bilden hier die reale Obergrenze des Messsystems. Obwohl es nicht in anderen Frequenzbereichen getestet worden ist, ist davon auszugehen, daß der Einsatz in den Rundfunkbändern problemlos möglich ist. Da das Antennensignal sowohl an den FSP, als auch an den FM bzw. DRM⁺-Empfänger verteilt wird, stehen gleichzeitig zu den Pegelmessungen die Daten des Empfangssignals zur Verfügung. Die Empfänger sind genauso aufgebaut wie im Falle der stationären Messungen (ein gemeinsames Frontend; FM-Empfang durch den Microgen TS9085 Meßempfänger; DRM⁺-Empfang mittels des in Teil I beschriebenen Systems).

Im FM-Fall (Abb. 12.2) wird das Empfängerausgangssignal mittels des Audioanalyzers R&S-UPV durch den SINAD charakterisiert.

Im DRM⁺-Fall wird der RSCI-Ausgangsdatenstrom [Eur06c] des Empfängers via UDP durch das Messbussnetzwerk an die verschiedenen Systeme verteilt. Zur Datenaufteilung entstand im Rahmen dieses Projekts eine kleine Software, die diese Aufteilung vornimmt. Auf diese Weise können beliebig viele Datensinken (z.B. Audiodecoder, Multimediabetrachter, Messdatenerfassungssysteme) mit den Zustandsinformationen und empfangenen Nutzdaten des DRM⁺-Empfängers versorgt werden. Diese Eigenschaft ist insbes. dann wichtig, wenn der Datenstrom beispielsweise in verschiedenen Subnetzen aufgrund von Routereinstellungen u.ä. nicht an eine UDP-Broadcast-Adresse versandt werden können.



Abb. 12.3.: Messbus der FH-KL mit montierter Antenne, Aussenansicht.



Abb. 12.4.: Messbus der FH-KL, Innenansicht. Links: Arbeitsbereich mit aktivem Messsystem; Rechts: Fahrerkabine mit Überwachungsbildschirm des DRM⁺-Dekoders.

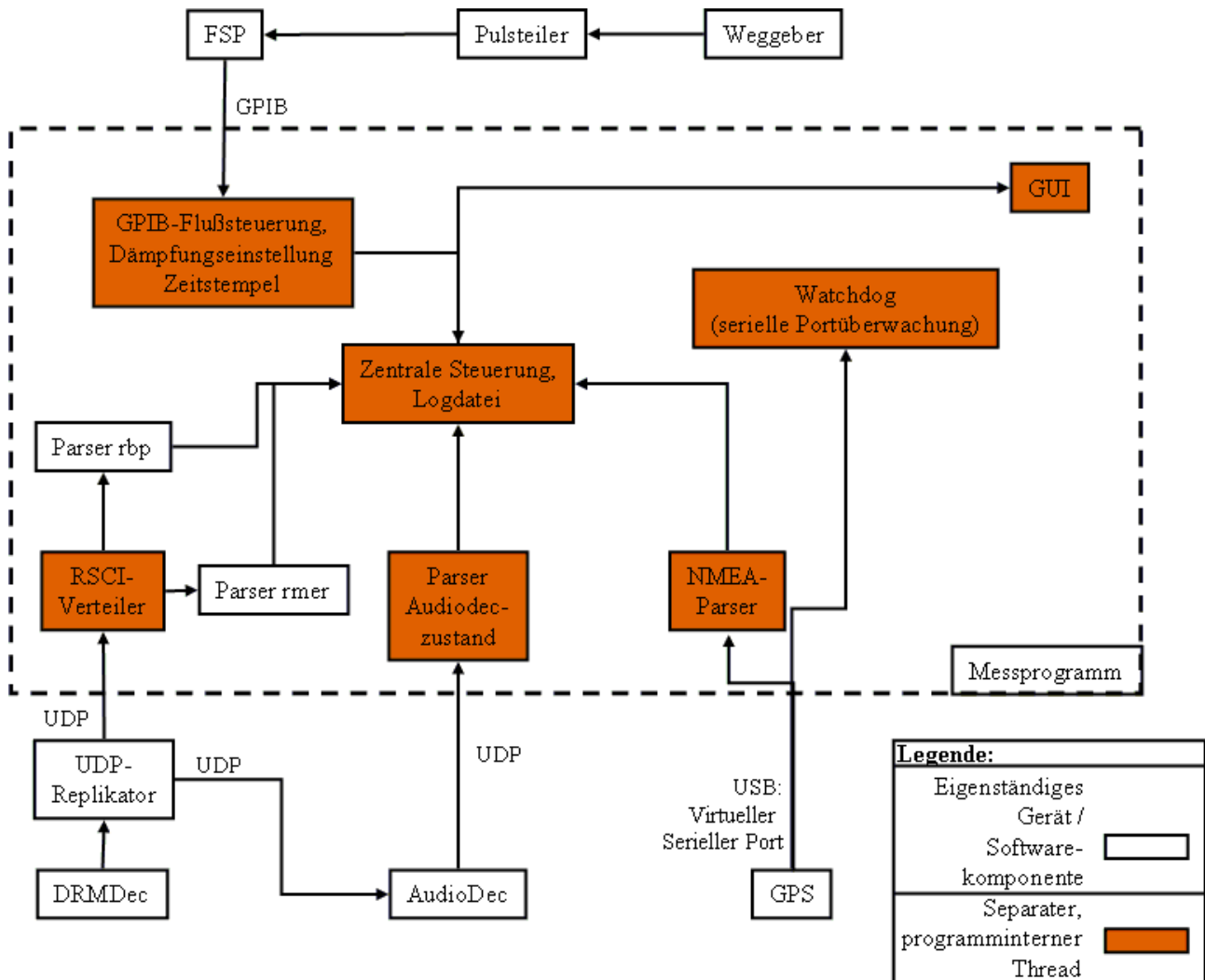


Abb. 12.5.: Schematischer Schaltplan des Messprogramms

Das Messsystem wurde in Python [The09] implementiert und ist vollständig losgelöst von der im Vorjahr implementierten (VisualBasic)-Lösung für die mobilen Untersuchungen [SS08, Kap. 6.2]. Innerhalb des Programms arbeiten alle Module die die verschiedenen Datenquellen analysieren und Geräte steuern parallel in separaten Threads¹. Der grundsätzliche Programmablauf ist wie folgt s. a. Abb. 12.5:

- Initialisierung des Programms, Verbindungsaufnahme zu allen angeschlossenen Quellen (FSP, UPV, Audiodecoder, DRM⁺-Dekoder, handelsübliche GPS-USB-Maus mit SIRF III-Chipsatz (Navilock NL302-U)). Der FSP und UPV sind über die VISA-Softwareschnittstelle [Nat] mittels eines GPIB-Busses an den Messrechner angebunden, auf die mit dem pyVisa-Paket [Bro06] zugegriffen wird.
- Initialisierung der Logdatei und GUI.
- Parallele Verarbeitung aller ankommenden Daten.
- Berücksichtigung des Wegimpulsgebers durch den FSP: Sobald dieser durch das externe Impulsgebersignal getriggert wird, führt dieser eine Messung durch und meldet dies dem Programm durch den Service-Request Mechanismus des GPIB-Standards (SRQ). Dieses liest das Ergebnis der Pegelmessung ein, versieht es mit einem Zeitstempel und schreibt diese Werte zusammen mit allen aktuellen Zuständen der Datenquellen in die Logdatei.

¹Softwaremodule mit unabhängigen Handlungssträngen innerhalb einer Programms

- Die ausgewerteten Parameter des RSCI-Stroms sind: Empfangene Bits, fehlerhafte Bits (RSCI-Tag: RBP); Modulationsfehlerrate des momentanen DRM⁺-Frames (RSCI-Tag: RMER).
- Die im vorhergehenden Jahr aufgetretenen, damals nicht umgehbbare USB-Probleme (gelegentliches Abkoppeln des GPS-Empfängers bedingt durch sporadische Hardwareprobleme des verwendeten Laptops) wurden durch drei Workarounds gelöst:
 - Einsatz eines anderen Laptops.
 - Die serielle Python-Bibliothek pyserial [Lie09] bietet – im Gegensatz zur im Vorjahr verwendeten Softwareschnittstelle in VisualBasic – die Möglichkeiten solche Fehler abzufangen, anstatt das Programm zum Absturz zu bringen.
 - Durch diese Erkennung des Fehlerfalls wird die Implementierung eines Software-Watchdogs ermöglicht, der im Fehlerfall automatisch eine neue Verbindung zu einem GPS an den seriellen Schnittstellen des Rechners sucht. Da die Datenerfassung in separate Threads aufgeteilt ist, wird der Messprozess selbst dabei nicht beeinflusst.

Abb. 12.6 stellt einen Screenshot der Messoberfläche des Systems im DRM⁺-Modus dar. Die oberen Bildteile stellen diverse Messwerte (Eingangsleistung, Zeitstempel, BER, MER, Audiodekodierung, GPS-Daten) dar. Ausser der Anzeige der Empfangsleistungspegel sind alle diese Werte immer auf dem aktuellsten Stand – die zugrundelegenden Quellen liefern ständig, z.B. auf Zeitbasis der DRM⁺-Frames neue Werte. Lediglich der Wert des Empfangsleistungspegels ist von der Triggerung durch den Weggeber abhängig, welcher – wie bereits dargestellt – die Erfassung der aktuellen Werte in die Logdatei auslöst.

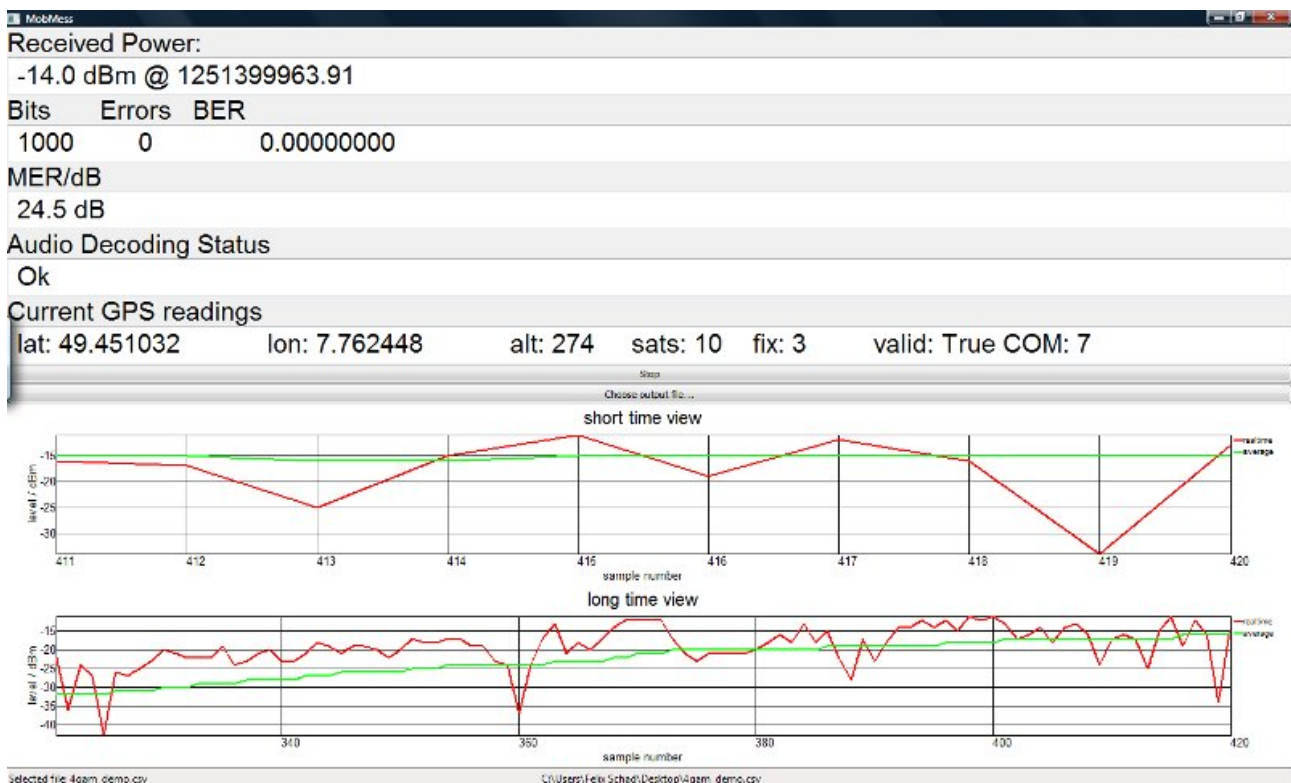


Abb. 12.6.: Oberfläche des mobilen Messsystems im DRM⁺-Modus

Unterhalb der numerischen Anzeigen in Abb. 12.6 sind Buttons zum Starten und Stoppen des Messvorgangs sowie zur Auswahl der Logdatei verfügbar. Im unteren Anzeigebereich werden die gemessenen Empfangsleistungspegel dargestellt. Der obere der beiden Anzeigen bietet eine Sicht auf die letzten 10 Abtastwerte, während der untere eine Darstellung der letzten 100 Abtastwerte bietet. Die roten Linien markieren hierbei die Messwerte, die grünen eine gleitende Mittelung des Darstellungsintervalls.

Im FM-Modus werden die Datenquellen ausgetauscht. Der Audioanalyzer R&S-UPV führt hierbei eine Dauermessung des SINAD durch. Dieses Ergebnis wird ständig von dem Programm eingelesen und beim Auftreten des Wegimpulses inkl. aller anderen erwähnten Rahmendaten in die Logdatei übertragen.

Es ist zu beachten, dass die protokollierten Werte – insbes. die Messdaten an den Empfängerausgängen – immer eine Stichprobe der betrachteten Messgrößen sind. Somit wird z.B. nicht die $\overline{\text{BER}}$, sondern die momentane BER erfasst.

Bei der Verarbeitung der GPS-Daten stellen sich drei Hürden:

1. Handelsübliche GPS-Empfänger bieten in der Regel eine zeitliche Auflösung von 1 s: Neue Positionsdaten sind somit nur im Sekundentakt verfügbar. Auch die aktive Anforderung an das Gerät die aktuelle Position auszugeben liefert immer die letzte bekannte Lösung der Positionsermittlung, nicht die momentane. Bei der notwendigen Wegeauflösung d (s. Gl. (12.1)) würde dies bedeuten, den Messwagen mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 30 km/h zu bewegen. Dies ist nicht akzeptabel.
2. Selbst wenn der GPS-Empfänger eine höhere zeitliche Auflösung hätte², so müsste dieser für jeden Messpunkt synchron zum Zeitpunkt der Pegelmessung eine Lösung der Positionsbestimmung liefern. Dies heisst, daß das System eine Anzahl n mit $n \rightarrow \infty$ Korrelatoren zur Berechnung der Phasenlagen der GPS-Satelliten haben müsste. Dies ist offensichtlich nicht möglich.
3. Handelsübliche GPS-Empfänger bieten – systembedingt – eine zu geringe Genauigkeit in Bezug auf die hier geforderte Anwendung. Die örtliche Trennung von zwei aufeinanderfolgenden Punkten ist nicht immer garantiert. Darüberhinaus sollen auch Tunnelunterfahrten und ähnliche Empfangssituationen, bei denen der GPS-Rx keine Sicht zum Himmel hat, mit dem System möglich sein.

Aus diesem Grunde wird das nachfolgend beschriebene Verfahren angewandt, das gleichermassen simpel wie effektiv ist. Hierbei baut der Lösungsansatz auf die Existenz des Weggebers auf. Die Kenntnis der Wegstrecke zwischen aufeinanderfolgenden Abtastwerten wird nach Abschluss der Messung zur „Entzerrung“ der Positionsdaten genutzt. Von einem Messpunkt aus wird die Fahrtrichtung anhand der nachfolgenden Abtastwerte ermittelt. Im Abschluss wird richtungsgerecht der aktuelle Messpunkt derart im Raum verschoben, daß er zu seinem Vorgänger und Nachfolger den gewünschten Abstand hat. Dies löst alle oben angesprochenen Hindernisse der GPS-Erfassung. Zur Erleichterung der Ausgleichsrechnung und aufgrund der Tatsache, daß die Positionsdaten im Anschluss ohnehin in einem Gauss-Krüger-Koordinatensystem benötigt werden (welche eine äquidistante Abbildung einer geographischen Region ist) werden diese mithilfe der 7-Parametrischen Helmert-Transformation aus dem WGS-84-System überführt. Nach Abschluss der Entzerrung werden alle Messdaten zur weiteren Verarbeitung in einer ESRI-Shapedatei gespeichert. Die einzige Unwägbarkeit, die bei diesem Verfahren bleibt ist die Tatsache, daß der Abstand aufgrund von Faktoren wie beispielsweise der Volumenänderung des Reifens durch Wäremeausdehnung niemals absolut äquidistant sein kann. Die Messungen haben gezeigt, daß dieser Faktor vernachlässigbar ist und entlang der Messstrecke – aufgrund der hohen Anzahl an Stichproben (ca. 19000/Fahrt, je nachdem wie Kurven angefahren und Spuren gewechselt wurden) – untergeht.

Die in den Shape-Dateien vorhandenen Felder (die Protokolle der Fahrten) lassen sich in drei Kategorien aufteilen: Allgemeine Informationen, Messwerte bei Empfang des digitalen Signals, Messwerte bei Empfang des analogen Signals.

Die Felder der Kategorie „Allgemeine Informationen“ sind:

²Solche Systeme sind durchaus am Markt verfügbar; militärisch genutzte Systeme können bis zu 50 Positionsdaten pro Sekunde berechnen. Im Consumer-Segment sind Empfänger mit einer Auflösung von bis zu 5 Neuberechnungen pro Sekunde vorzufinden.

- SampleNum: Kontinuierlich fortlaufende Nummer der Stichprobe.
- Altitude: Höhe über dem WGS-84-Ellipsoiden in Meter an dem Ort der Stichprobe.
- Timestamp: Zeitstempel im POSIX-Format, der die Zeit der Stichprobenaufnahme angibt.
- Koordinate (internes Feld): Rechts- und Hochwert des Ortes der Stichprobe. Koordinatensystem: Gauss-Krüger Streifen 3, Bessel 1841-Ellipsoid (EPSG³-Code: 31467).
- RF-Power: Gemessene Kanalleistung in dBm, wie oben beschrieben.

Im DRM⁺-Modus sind folgende Felder zusätzlich zu den allgemeinen Angaben vorhanden:

- Errors: Anzahl der als fehlerhaft erkannten Bits
- Bits: Gesamtanzahl der nominellen Nutzbits im PRBS-Kanal
- BER: Momentane, am Ort der Stichprobe ermittelte Bitfehlerrate
- MER: Modulationsfehlerrate in dB gem. [Eur06c]

Im FM-Modus sind folgende Felder zusätzlich zu den allgemeinen Angaben vorhanden:

- SINAD: der momentane SINAD in dB.

Da kein analoges, selektives Pegelmessgerät zur Verfügung steht, wurde die Bestimmung der Empfangsleistungspegel – wie bereits oben erwähnt – mit dem Spektrumanalyzer R&S FSP30 durchgeführt. Dieser wurde im Zerospan-Modus mit dem RMS-Detektor betrieben. Die benötigte Selektivität wurde durch Verwendung des steilflankigen 100 kHz-Kanalfilters hergestellt. Die Sweepzeit orientiert sich an der angestrebten maximalen Geschwindigkeit des Messsystems (120 km/h zu 120 μ s. Die Videobandbreite orientiert sich an der Sweepzeit und wurde zu 10 kHz gewählt. Auf diese Weise werden die modulationsbedingten Hüllkurvenschwankungen des HF-Signals nicht erfasst, wohl aber die kanalbedingten Schwankungen. Pro Messung wurde die RMS-Leistung des Sweeps ausgelesen. Die Wahl der max. Geschwindigkeit ergibt sich aus der Tatsache, daß in dem lokalen Autobahnabschnitt die Geschwindigkeiten meistens keine schnellere Fahrt zulässig ist. Zwar bedeutet der Durchlauf eines Sweeps gleichzeitig auch, daß der ermittelte Pegel nicht exakt den Pegel eines Ortes repräsentiert, was aber insbes. bei typischen Stadt- und Überlandfahrten einer Bewegung von wesentlich weniger als der Hälfte der Triggerdistanz entspricht und somit eine hinreichend genaue Messung darstellt. In allen Fällen gilt, daß diese Einschränkung nur auf die Erfassung des Eingangsleistungspegels zutrifft – die überwachten Empfängerenausgangsdaten (BER, SINAD, etc.) repräsentieren in jedem Fall die aktuellen Empfängerzustände. Da der Spektrumanalyzer über keine vollautomatische Anpassung seiner Vordämpfung in Abhängigkeit der Eingangsleistung verfügt, wird diese Steuerung ebenfalls durch die Software vorgenommen, um den Dynamikbereich der Pegelmessung zu vergrößern und den Analyzer in Sendernähe nicht zu übersteuern. Eine Umstellung der Dämpfungsglieder geschieht lediglich nur 2-3 mal pro Messfahrt, so daß die zeitliche Beeinflussung des Messsystems durch den Schaltvorgang minimal ist und keine Auswirkungen auf das Gesamtergebnis hat.

Als Empfangsantenne kam ein $\lambda/4$ -Dipol mit einem k-Faktor von 10 dB (inkl. Leitungsdämpfung) zum Einsatz. Zusammen mit dem verwendeten 3 dB-Splitter ergibt sich für die Empfänger eine Absenkung der Empfindlichkeit um 13 dB. Somit ergeben sich in diesem Szenario für den DRM⁺-Empfang die in Tab. 12.1 angegebenen Mindesteingangsleistungspegel (MDS, vgl. Abschnitt 8). Die Antenne hat eine Höhe von 2 m über Grund. Alle Messfahrten wurden in den Abend- und Nachtstunden im Hochsommer durchgeführt (trockene Luft, wolkenloser Himmel). Der Leistungsverlust durch den Splitter am Empfängereingang wurde aus den Messdaten nicht herausgerechnet, da dem Spektrumanalyzer in jedem Fall die gleiche Leistung wie dem Empfänger zugeführt wird.

³European Petroleum Survey Group Geodesy; <http://www.epsg-registry.org/>

Variante	MDS	E _{min}
4-QAM	−96 dBm	15 dBμV/m
16-QAM	−87 dBm	28 dBμV/m

Tab. 12.1.: Mindestleistungspegel am DRM⁺-Empfängereingang im AWGN-Kanal im mobilen Empfangsfall (Messbus FH-KL). Die Feldstärken beziehen sich auf einen $\lambda/4$ -Rundstrahler, k-Faktor: 13 dB (inkl. Splitter am Empfängereingang).

Zur Komplettierung der Messdaten wurde sowohl den Grundrauschleistungspegel der Frequenz 87,6 MHz als auch die Empfangsleistungspegel von TX RB mit diesem System zu bestimmen. Hierzu wurde der Empfängerzweig abgetrennt und der Splitter an diesem Punkt mit einem 50 Ω -Widerstand abgeschlossen. Im Anschluss wurden für diese beiden Fälle die Messfahrten durchgeführt.

12.1.2. Messroute

Die ca. 53 km lange Strecke wurde nach verschiedenen Gesichtspunkten gewählt:

- Sowohl im 4-, als auch im 16-QAM-Modus sollte die Grenze des Versorgungsgebiets überschritten werden.
- Wenn möglich sollten die stationären Punkte nahe der Strecke liegen oder von der Route möglichst nahe umschlossen werden. Umwege und z.B. doppeltes Abfahren von Streckenteilen sollten vermieden werden. Weit aussenliegende Messorte wurden – aufgrund der geringeren Antennenhöhe – nicht weiter beachtet.
- Es sollten typische Fahrscenarien (Stadtverkehr, Überlandfahrt, Autobahn) erfasst werden.
- Verschiedene Gebiete wie Gegenden mit leichter / dichter / hoher Bebauung etc. sollten enthalten sein.
- Die Fahrt sollte die Zonen berücksichtigen, in denen sowohl die Hauptkeule als auch der nicht bzw. nur gering bestrahlte Bereich von TX RB liegt.

Aufgrund dieser Forderungen wurde die in Abb.12.7 dargestellte Route mit einer Gesamtlänge von ca. 54 km gewählt. In der Darstellung sind darüberhinaus die Senderstandorte und die stationären Messpunkte eingetragen. Der Routenverlauf ist farblich auf Basis der Stichprobennummer abgestuft gekennzeichnet. Diese Abstufung ermöglicht die Zuordnung von Wegabschnitten in Darstellungen, welche Messergebnisse in Abhängigkeit der Stichprobennummer anstatt des Ortes abbilden.

Gelegentliche Abweichungen der Route vom Straßenverlauf der zugrundeliegenden Straßenkarte sind kein systematischer Fehler, sondern die Folge straßenbaulicher Maßnahmen – die Karte ist nicht auf dem aktuellsten Stand, dient aber ohnehin schlicht nur zur Orientierung.

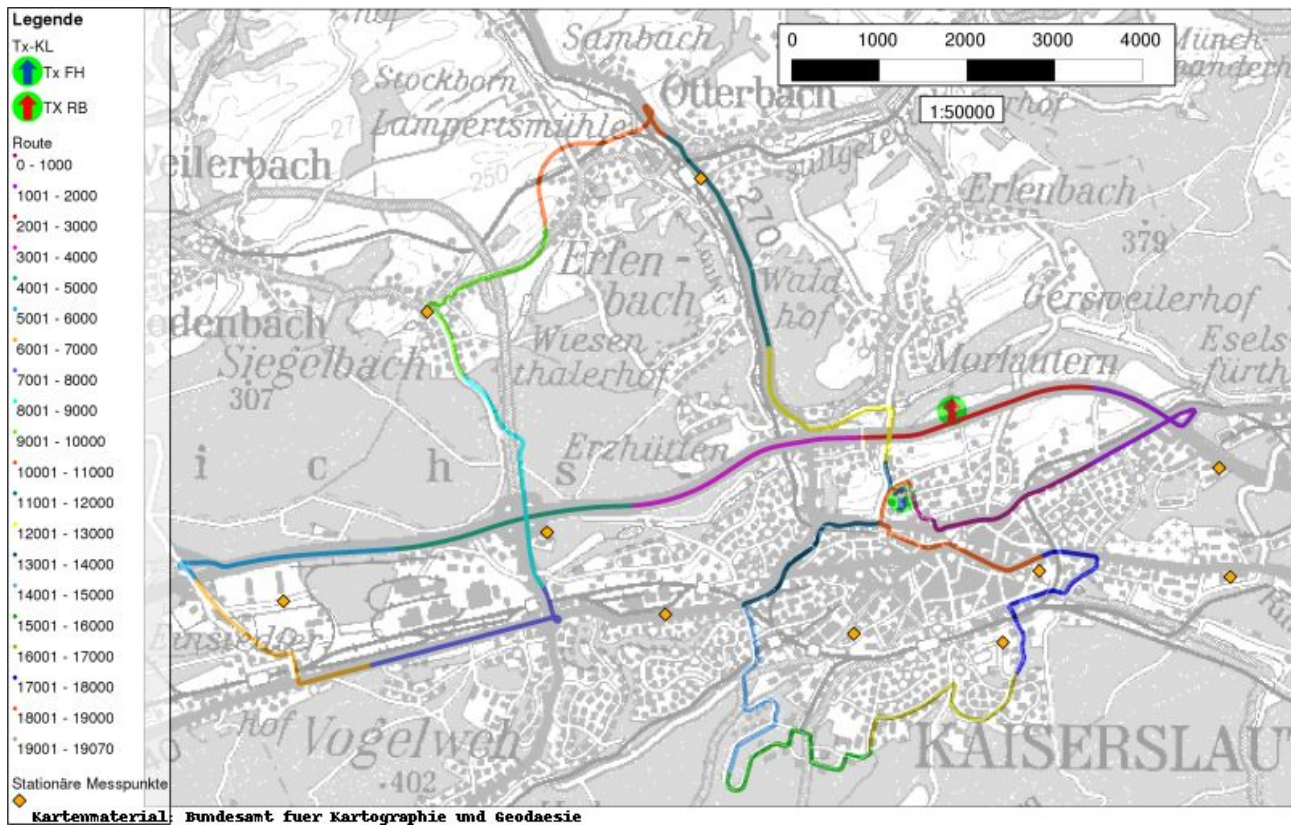


Abb. 12.7.: Mobile Messroute inkl. Samplenummer entlang verschiedener Routenabschnitte

Die Route startet an der FH-KL. Von dort aus wird die A6 von KL-Ost bis zu KL-Einsiedlerhof durchfahren, wobei auch TX RB in verschiedenen Abständen passiert wird. Es folgt eine Überlandfahrt von KL-Einsiedlerhof über KL-Siegelbach und Otterbach. Über Morlautern führt die Route aus der Senke des Lautertals heraus, passiert die FH-KL und führt über das Universitätswohngebiet, den Betzenberg und durch die Innenstadt wieder zurück zum Startpunkt.

Die nachfolgend dargestellte Abb. 12.8 verdeutlicht die topographische Situation des Kaiserslauterer Beckens und der umliegenden Westpfälzer Hügellandschaft. Die Abbildung entspricht der in Abb. 11.5 dargestellten Schummerung mit dem Unterschied, daß die Höhenschichten zur besseren Erkennbarkeit farblich hervorgehoben sind. Die in der Legende vermerkten Höhenangaben geben die Höhe über normal Null an. Zusätzlich sind die Senderstandorte und die Messroute markiert.

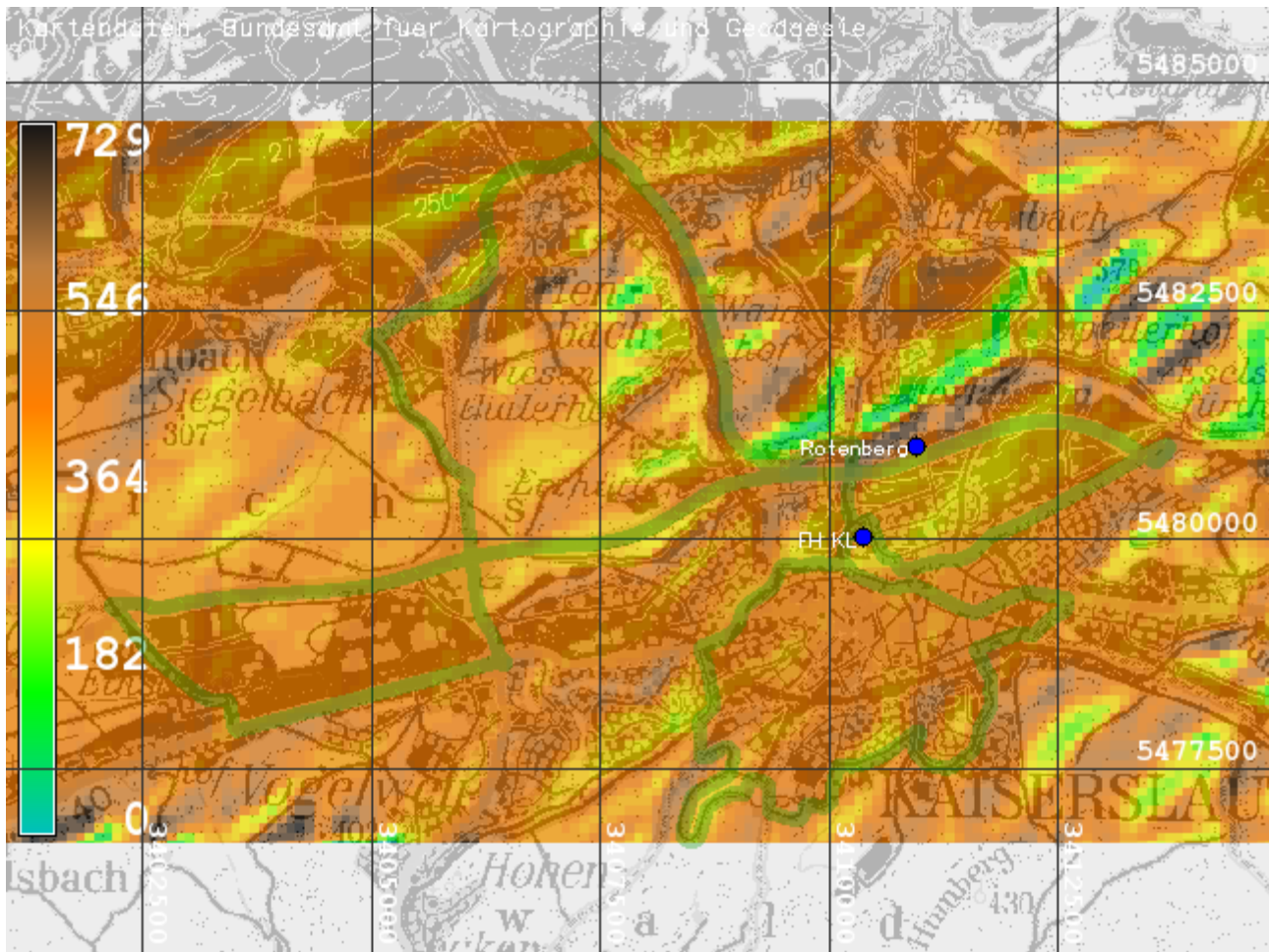


Abb. 12.8.: Topographische Übersicht der Umgebung von Kaiserslautern. Nur das Rechteck, das die Messroute einschliesst ist farblich markiert.

12.1.3. Auswerteverfahren

Die durchgeführten Messungen bieten eine riesige Vielfalt an möglichen Auswertestrategien. Im folgenden werden diejenigen Analysen vorgestellt, die die interessantesten Einblicke in die DRM⁺ und FM-Performanz im Mobilfunkkanal bieten.

Neben den üblichen Parametern wie Empfängereingangsleistungspegel der beiden beteiligten Sender, des Rauschteppichs und der Pegeldifferenz der beiden Sender sind selbstverständlich die Daten am Empfängeranfang die wesentliche Größe der folgenden Betrachtungen.

Hierzu wird folgendes Verfahren angewandt: Die in Fransy [IRT09] durchgeführten Versorgungsprognosen, welche auch für den Fall der Nutzung einer Rundantenne mit einer Antennenhöhe von 2 m über Grund vorliegen, gehen von einem Berechnungsraster von 100 m × 100 m aus. Entsprechend werden die HF-Messwerte (Pegel TX FH, Pegel TX RB, Rauschpegel sowie Pegeldifferenz der beiden Sender) zu einem Raster der gleichen Größe zusammengefasst. Aufgrund der äquidistanten Messwerterfassung liegen somit pro Rasterzelle mindestens 36 Abtastpunkte innerhalb der jeweiligen Zelle, bei mehrfacher Passage des Gebiets entsprechend mehr. Der Verbundwert, der die Rasterfläche stellvertretend für die Einzelmesswerte kennzeichnet, entspricht dem Median der Einzelmesswerte.

Dieses Verfahren wird auch für die Ermittlung des SINAD innerhalb einer Zelle angewandt. Die anschließende Klassifikation des SINAD geschieht auch in diesem Fall entsprechend den in Tab.11.2 definierten Qualitätsstufen.

Zellenfarbe	Bedeutung
Rot	4-QAM: fail; 16-QAM: fail
Gelb	4-QAM: ok; 16-QAM: fail
Blau	4-QAM: fail; 16-QAM: ok
Grün	4-QAM: ok; 16-QAM: ok

Tab. 12.2.: Farbkodierung bei kombinierter Rasterdarstellung der momentanen Bitfehlerrate der 4-/16-QAM-Variante im mobilen Szenario

Zur Darstellung und Auswertung der Bitfehlerrate BER wird ein ähnliches Verfahren bei der Rasterung angewandt. Hierbei ist zu beachten, daß es sich bei den Messdaten um die *momentane* Bitfehlerrate handelt. Es ist ein erheblicher Unterschied in der Wertigkeit, innerhalb der Fläche einer Zelle einen Wert mit hoher Fehlerrate bei ansonsten fehlerfreien Paketen arithmetisch zu mitteln: das Resultat würde die Realität zu pessimistisch bewerten und sie auch nicht widerspiegeln. Aus diesem Grunde wird zur Bewertung des DRM⁺-Empfangs in diesem Szenario folgendermassen vorgegangen: aus denjenigen Messpunkten die sich innerhalb eines betrachteten Flächenelements⁴ befinden wird das 75%-Quartil q_3 (auch: Quartil 3ter Ordnung) ermittelt. In Anlehnung an Def. 8.0.1 gilt nun, daß das Flächenelement als „versorgt“ (kurz: „ok“) markiert wird, wenn die Bedingung $q_3 \leq 1 \cdot 10^{-4}$ erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, so gilt das betrachtete Flächenelement als „nicht versorgt / gestört“ (kurz: „fail“).

Dieses Vorgehen ist insofern sinnvoll, als das der hörbare Eindruck, den die Autoren im Laufe der Messfahrten beim Abhören des Audiokanals und Beobachten des Messprogrammbildschirms (Abb. 12.6) hatten, davon geprägt war, daß einzelne Fehler schlicht durch den Zeitinterleaver und das Audiodekompressionsverfahren verdeckt werden, obwohl sie messbar sind. Ein tatsächlich gestörter Bereich lässt sich auch reproduzierbar hörbar ermitteln und ist davon geprägt, das eine erhebliche Bündelfehlerrate – sowohl bei Betrachtung der angezeigten, momentanen Bitfehlerrate am Dekoderausgang, als auch bei den äquidistant erfassten momentanen Bitfehlerraten – messbar ist. Dies gilt ebenfalls für Bereiche, in denen die Dekodierung des Audiosignals „schwammig“ ist, also nur sporadisch einzelne Fetzen des Datenstroms dekodiert werden können. Die auf diese Weise entstandenen Ergebnisse repräsentieren damit sehr wohl auch die Wahrnehmung des Nutzers.

Das Messprogramm kann darüberhinaus den internen Zustand des Audiodekoders erfassen. Allerdings hat es sich gezeigt, daß diese Angaben nicht mit der Realität übereinstimmen: Wird z.B. in einem kurzen Abschnitt schlechten oder schwammigen Empfangs innerhalb des Audiodekoders der Ausgang stummgeschaltet („Error Concealment“) zeigt der Statusindikator, daß das letzte Audioframe dekodiert werden konnte. Dies ist insofern korrekt, als das die Dekodersteuerung auch die Ausgabe einer „Nullfolge“ veranlasst hat. Diesen Umstand kann der Kern der Dekodierungssoftware allerdings nicht von einer tatsächlichen Nutzdatenfolge unterscheiden und geht somit davon aus, das die Eingangsdaten den gewollten Nutzdaten entsprechen. Daher ist das Ausweichen auf die statistische Auswertung der gemessenen Momentanbitfehlerrate notwendig. Durch diese Methode werden keine Versorgungslücken herausgerechnet, da in denjenigen Bereichen, in denen Bitfehler bei gleichzeitigem Ausfall des Audiodienstes festgestellt wurden, die momentane Bitfehlerrate ohnehin wesentlich größer als die Grenzbithfehlerrate von $1 \cdot 10^{-4}$ war.

Zur Darstellung wird in den Auswertungsgrafiken der BER für jede untersuchte Frequenzsituation eine kombinierte Darstellung der 4- und 16-QAM-Variante genutzt. Hierbei sind die Rasterzellen entsprechend der Zuordnung in Tabelle 12.2 farblich markiert. Alle Operationen, die sich mit der Messdatenaufbereitung auf Basis der Messorte entlang der Route befassen, wurden im dem Open-Source-GIS Grass [GRA08] durchgeführt. Zur individuellen Behandlung von Messdatensätzen auf Basis der jeweiligen Samples anstatt der absoluten Position wurden individuelle Python-Skripte erstellt, die die Daten innerhalb der Shapedateien der Messfahrten verarbeiten. In der Regel wird bei den Darstellungen der

⁴Rasterzelle

Rasterkarten zur Erhöhung der Übersicht darauf verzichtet, die Senderstandorte explizit einzutragen, diese sind z.B. in den Abbildungen 12.7,12.8 zu finden.

12.2. Ergebnisse

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse und Analysen der Mesfahrten bzw. deren Auswertungen dar. Nach der Darstellung der HF-Verhältnisse der beteiligten Sender, des Grundrauschens und einigen allgemeinen Angaben zu dem Verlauf der Messroute selbst wird zu den Untersuchungen der Empfangssituationen übergegangen. Hierbei werden für die FM-, 4-QAM und 16-QAM-Variante die Situationen

- TX RB ausgeschaltet,
- TX RB sendet auf der Frequenz 87,7 MHz,
- TX RB sendet auf der Frequenz 87,8 MHz

untersucht.

12.2.1. Allgemeines

Im folgenden werden die typischen Empfangsleistungspegel von TX FH, TX RB sowie das Leistungsverhältnis zwischen beiden Sendern dargestellt. Des weiteren wird der Verlauf der effektiven Antennenhöhe sowie ein beispielhaftes, typisches Geschwindigkeitsprofils entlang der Route aufgezeigt.

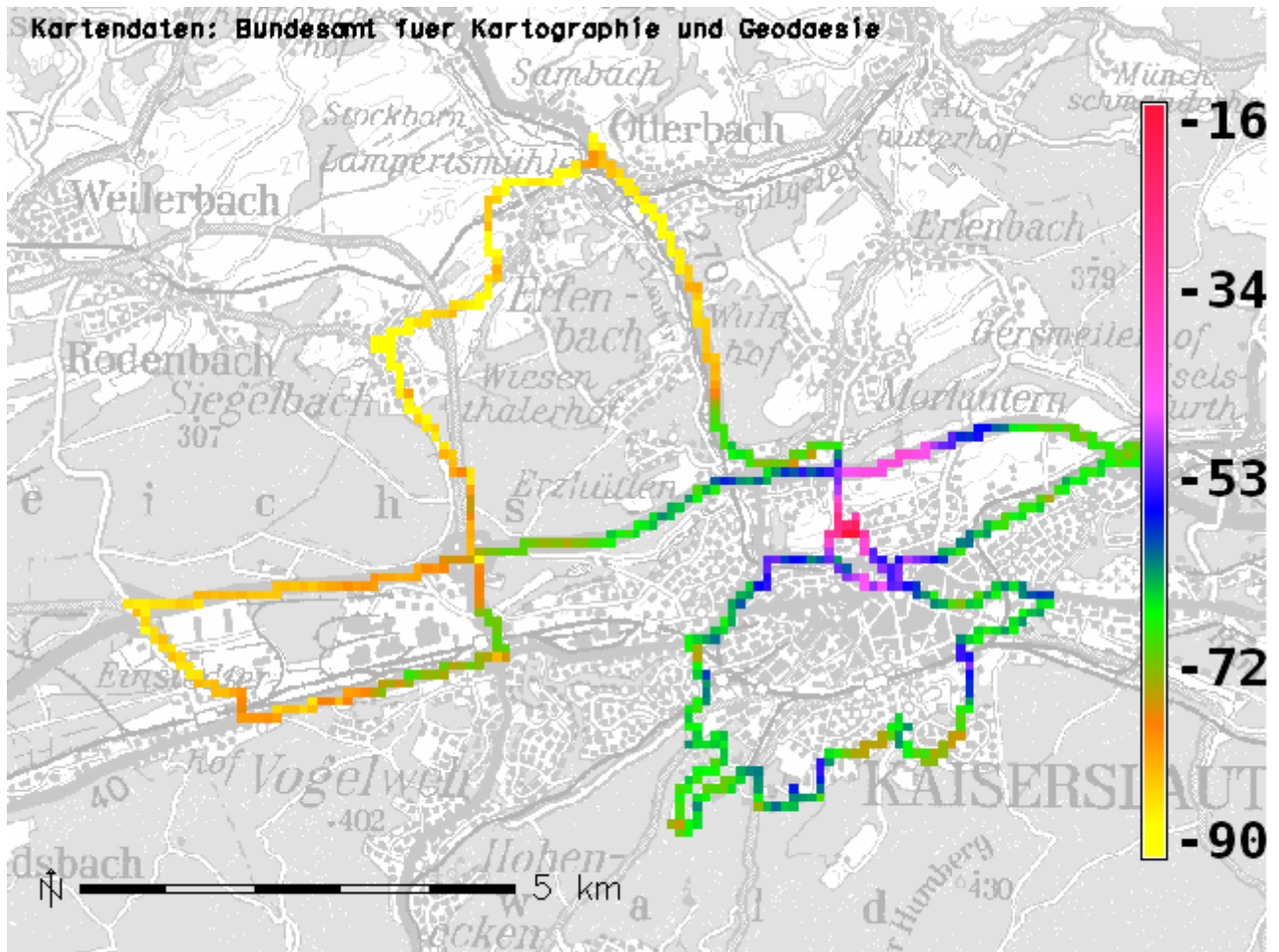


Abb. 12.9.: Mittlerer Empfangsleistungspegel in dBm von TX FH entlang der Messroute (ohne Einfluss von TX RB)

Abb.12.9 zeigt den Verlauf der Empfängereingangsleistungspegel auf der Frequenz 87,6 MHz von TX FH entlang der Route (TX FH eingeschaltet; TX RB ausgeschaltet). Die Farbskala ist auf den minimalen bzw. maximalen Pegel (−90 dBm bzw. −17 dBm) beschnitten. Geht man von den in Tab. 12.1 angegebenen Schwellen zur Dekodierung des DRM⁺-Signals aus bedeutet dies, daß die Mindestleistung zum Empfang des 4-QAM-Modus nie unterschritten wurde. Auf der Farbskala ist die Schwelle zur 16-QAM-Dekodierung (−86 dBm) durch die hellste Gelbschattierung markiert.

Die Abbildung zeigt, daß in den äußeren Gebieten (Einsiedlerhof, Siegelbach) erwartungsgemäß nur noch eine geringe Leistung verfügbar ist. Im Bereich der Universität und dem angeschlossenen Wohngebiet (südlicher Routenabschnitt) ist die Bebauungsbedingte hohe Dynamik der Leistungsschwankungen anhand der vielen Farbstufenwechsel gut erkennbar.

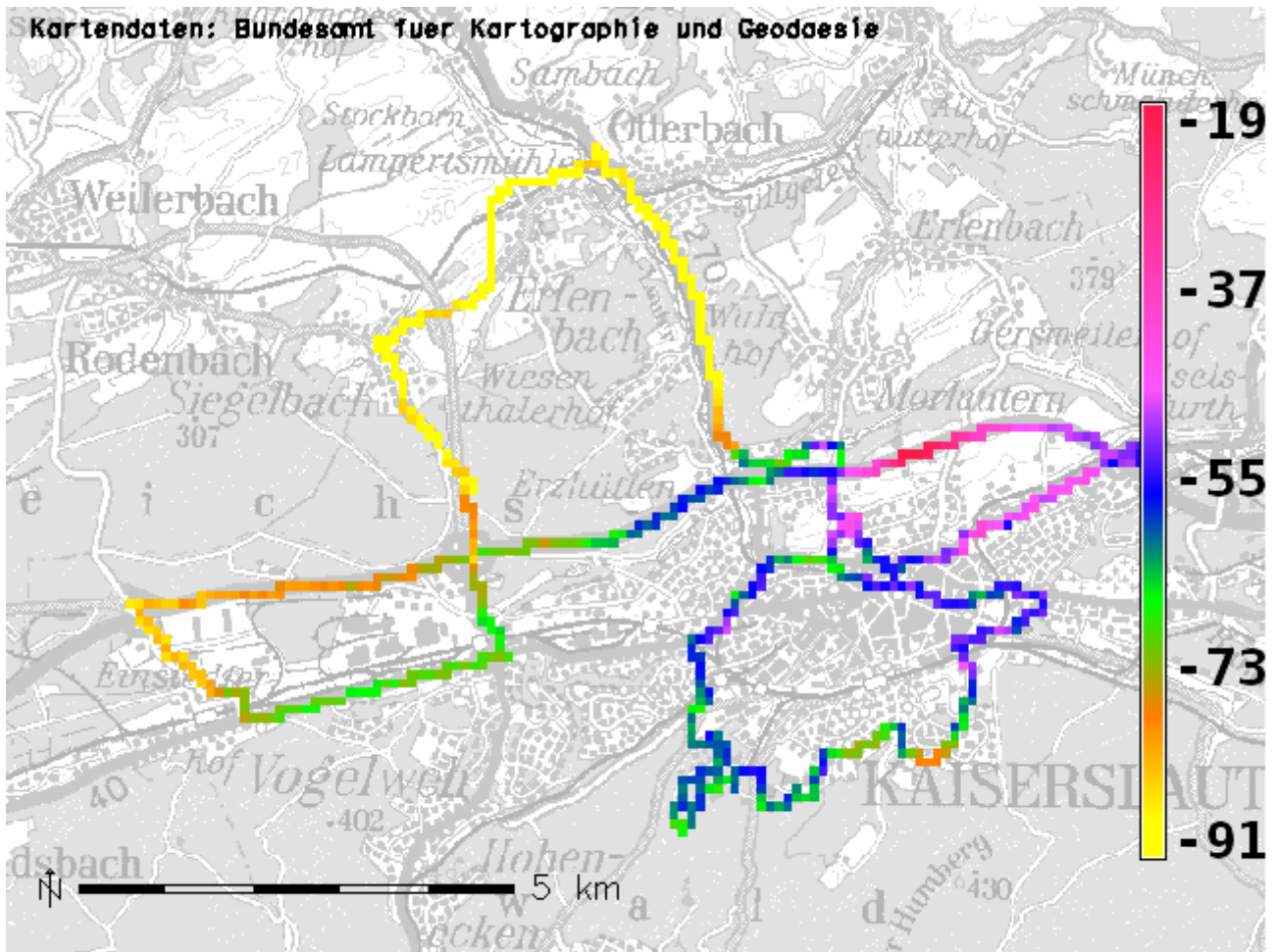


Abb. 12.10.: Mittlerer Empfangsleistungspegel in dBm von TX RB entlang der Messroute (ohne Einfluss von TX FH)

Abb. 12.10 zeigt den Verlauf der Empfängereingangsleistungspegel auf der Frequenz 87,6 MHz von TX RB entlang der Route (TX FH ausgeschaltet; TX RB eingeschaltet (87,6 MHz)). Die Farbskala ist auf den minimalen bzw. maximalen Pegel (−91 dBm bzw. −18 dBm) beschnitten und in der gleichen Farbgebung wie Abb. 12.9 gehalten.

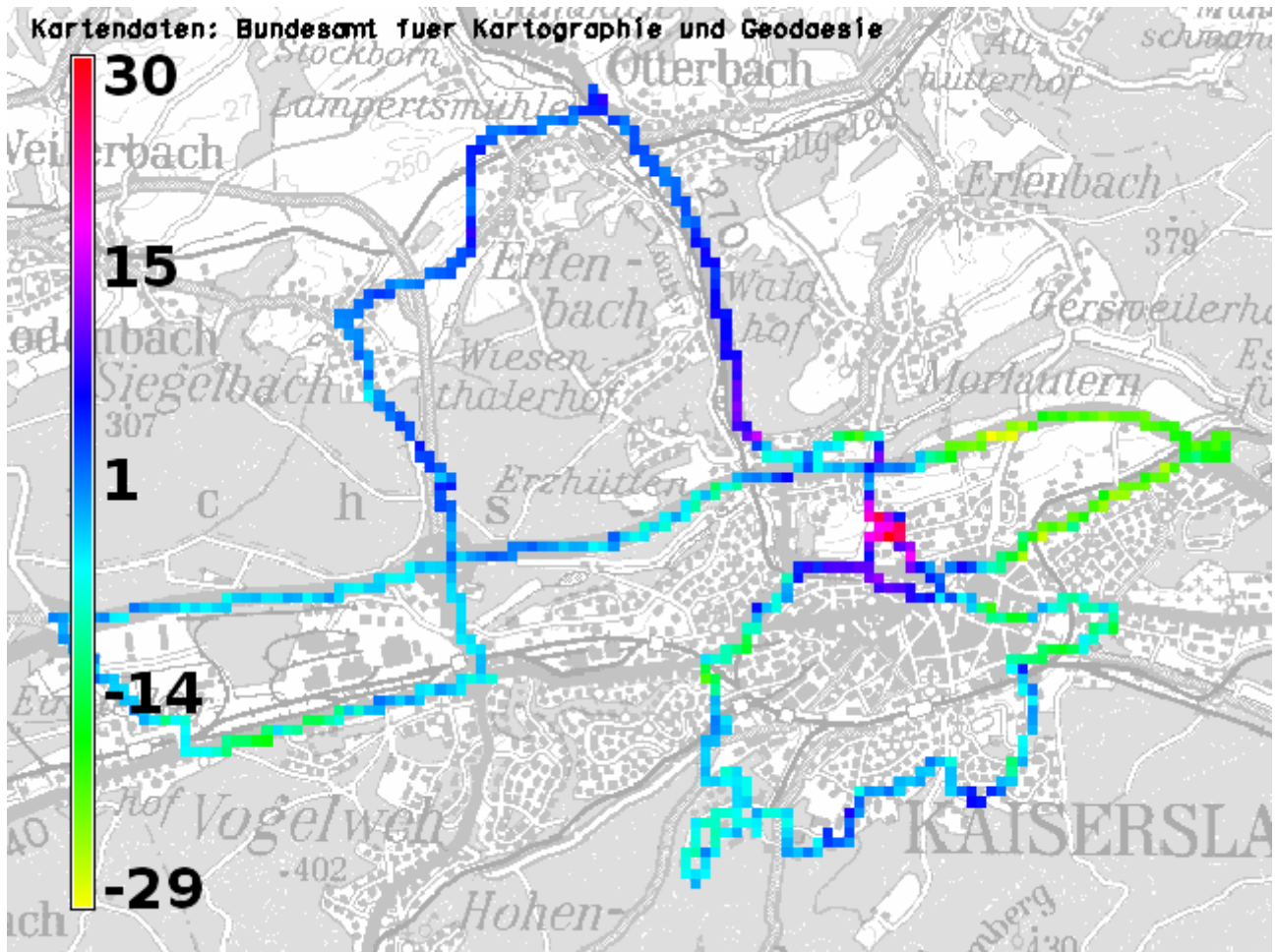


Abb. 12.11.: Mittlere Empfangsleistungspegeldifferenz in dB zwischen TX FH und TX RB auf Basis von Abb. 12.9 und Abb. 12.10

Abb. 12.11 stellt den Pegelunterschied zwischen TX FH und TX RB ($\Delta_L = \text{Pegel}_{FH} - \text{Pegel}_{RB}$) in Dezibel dar. Δ_L ist positiv, wenn TX FH stärker als TX RB ist und negativ, wenn TX FH schwächer als TX RB ist. Die Farbskala ist auf das Minimum / Maximum der Werte beschnitten.

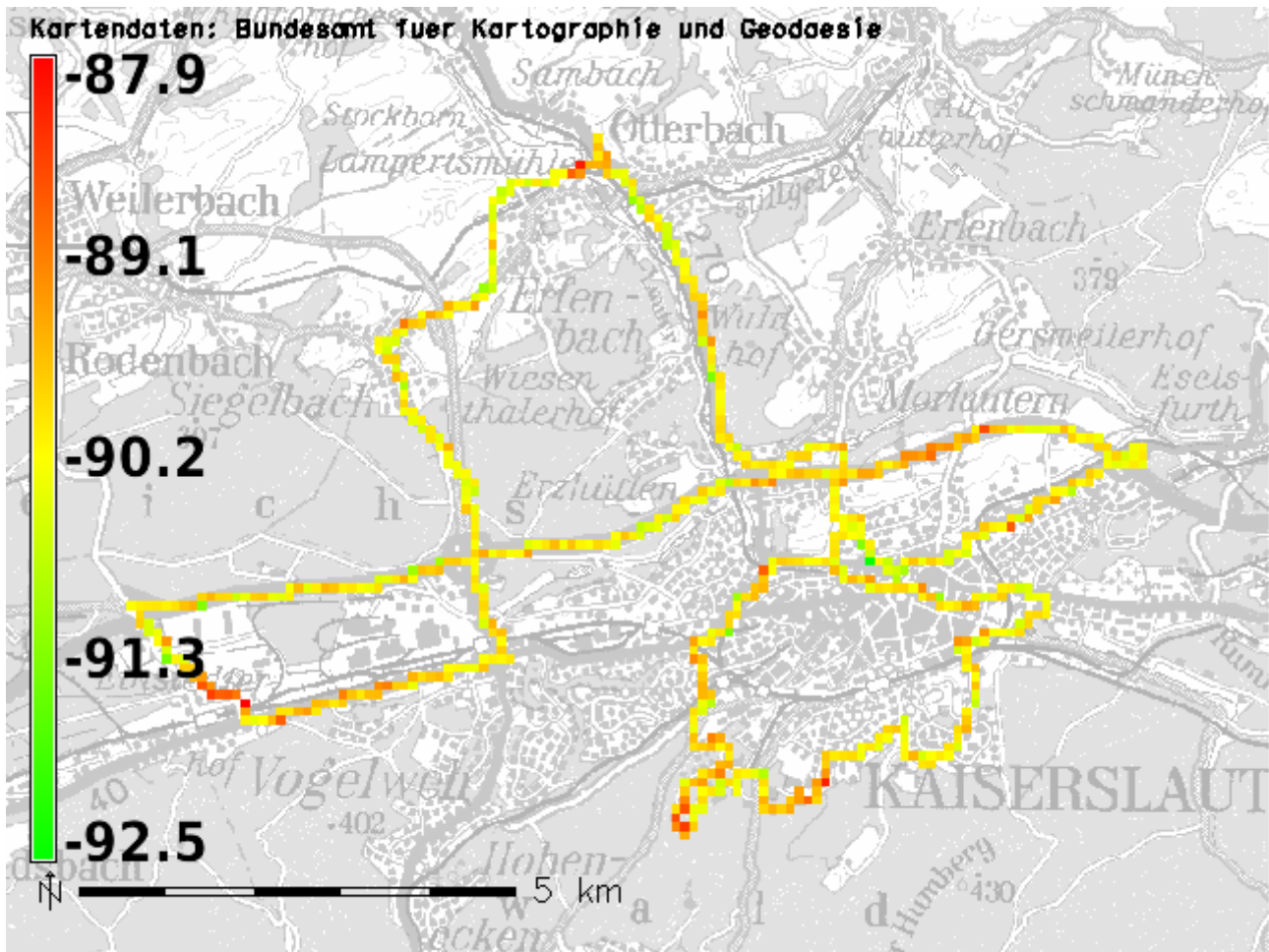


Abb. 12.12.: Mittlerer Empfangsrauschleistungspegel in dBm entlang der Route, TX FH und TX RB inaktiv

Als weiterer Parameter wurde das Grundrauschen – bzw. die Empfangsleistung der Reststrahlung von fremden Sendern im Untersuchungsgebiet – innerhalb des Empfangskanals 87,6 MHz aufgezeichnet. Dies ist in Abb. 12.12 dargestellt. Die Farbskala ist auf das Minimum bzw. Maximum des Wertebereichs beschnitten. Man kann erkennen, dass die Rauschleistungspegel in den Außenbezirken der Route sich in dem Wertebereich befindet, der der Empfangsleistung von TX FH entspricht. Der mittlere Rauschleistungspegel entlang der gesamten Strecke beträgt -90 dBm. Man kann erkennen, daß insbes. im Bereich des Einsiedlerhofs (linker Rand der Strecke) aufgrund der Kombination aus geringem Empfangsleistungspegel von TX FH und überdurchschnittlich hohem Rauschen nur ein geringes SNR_{Dec} zu erwarten ist. Naturgemäß kann man im innerstädtischen Bereich einen überdurchschnittlich hohen Rauschpegel auch in den Abendstunden verzeichnen, was auch in diesem Fall durch ein leicht erhöhtes Grundrauschen z.B. im Uniwohngebiet zu sehen ist. In allen Fällen lag der gemessene Rauschpegel über dem Eigenrauschen des Analyzers. Diese Analyse bildet die Grundlage zu der nachfolgenden Abb. 12.13.

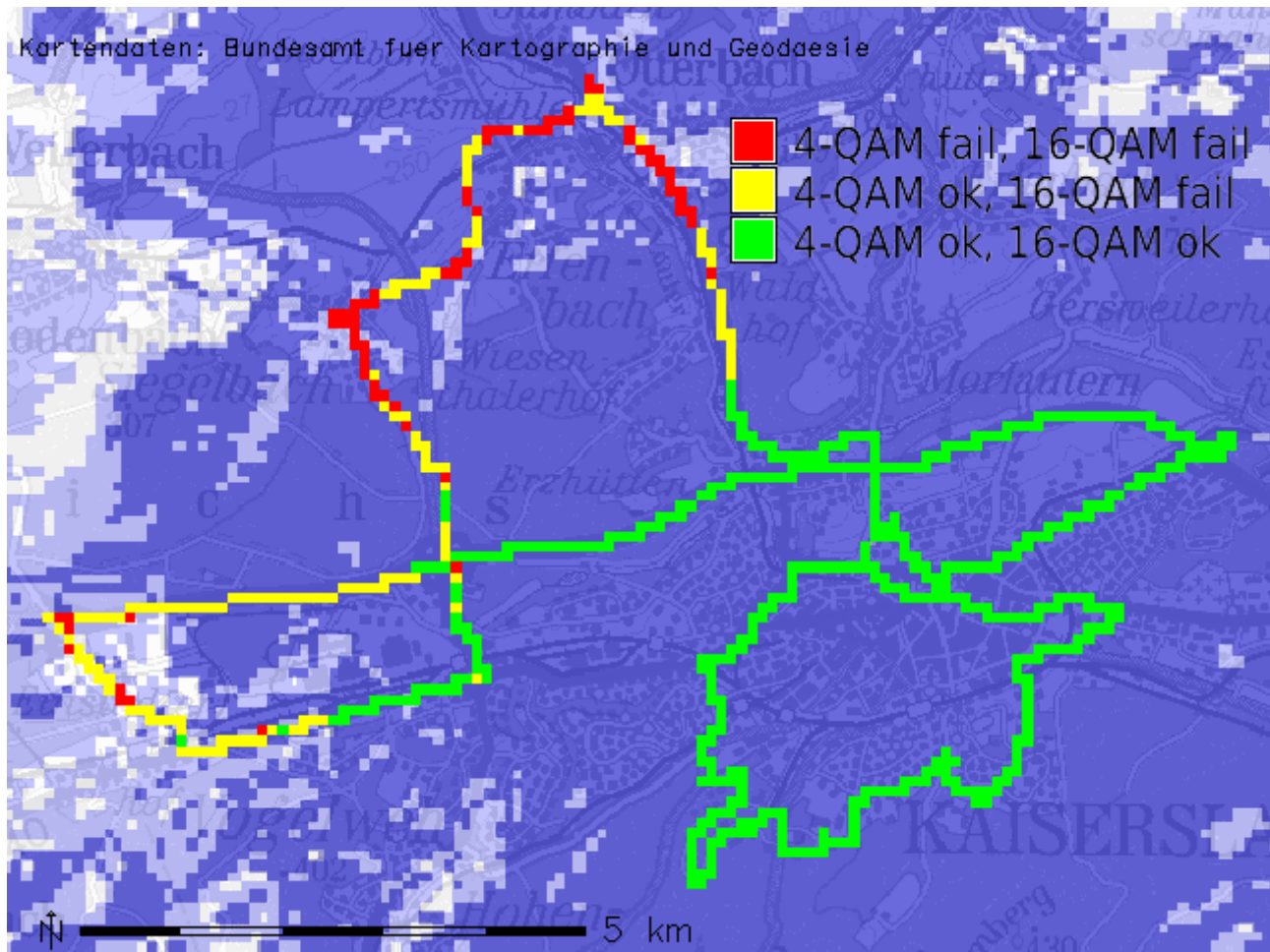


Abb. 12.13.: Vorhersage der DRM⁺-Signaldekodierungschance anhand des benötigten Mindest-Signal-zu-Rauschabstands SNR_{Dec} entlang der Messroute auf Basis der gemessenen, mittleren HF-Leistungen. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent.

Abb. 12.13 zeigt eine Prognose der DRM⁺-Dekodierung in dem Farbschema gem. Tab. 12.2. Das zugrundeliegende Rechenverfahren, das keine Zuschläge zur Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit berücksichtigt, basiert auf dem Median der Empfangsleistungspegel von TX FH (Abb. 12.9) und dem Median der Rauschleistungspegel gem. Abb. 12.12. Anhand dieser Datenbasis wird das SNR_{Dec} wie folgt gebildet:

$$\text{SNR}_{\text{Dec}} = \text{Pegel}_{\text{FH}} - \text{Pegel}_{\text{Rauschen } 87,6\text{ MHz}}$$

Setzt man für das ermittelte SNR_{Dec} die notwendigen Signal-zu-Rauschabstände gem. Tab. 8.1 (Spalte SNR_{Dec}) als Entscheidungsschwelle an, so kann man für die jeweilige Modulationsvariante die Aussage „Dekodierung möglich“ bzw. „Dekodierung nicht möglich“ treffen. Die auf diese Weise klassierten Werte des SNR_{Dec} werden im Anschluss gem. Tabelle 12.2 eingefärbt. Diese Darstellung prognostiziert, daß im Routenbereich Einsiedlerhof, B270 und dem nördlichen Routenabschnitt (L389) die 16-QAM-Variante nicht mehr dekodiert werden kann. Der Ausfall der 4-QAM-Variante ist entlang des Abschnitts L389 ebenfalls zu erwarten.

Zusätzlich wurde dieser alleine auf gemessenen HF-Verhältnissen basierenden Auswertung die Versorgungsprognose der Funknetzplanung (ohne Berücksichtigung des Mobilfunkkanals) gegenübergestellt. Auf Basis dieser Darstellung ist erkennbar, das die Prognose der 4-QAM-Variante recht gut zu der anhand des SNR_{Dec} angenommenen Versorgung passt; die 16-QAM-Variante scheint allerdings zu optimistisch bewertet worden zu sein.

Die Versorgungsprognosen basieren auf dem Verfahren das in Abschnitt 11.2, S. 71 erläutert wurde.

Im Gegensatz zu der dortigen stationären Empfangsantenne (Antennenhöhe 10 m, Richtantenne mit 4 dBd Gewinn) wurde hierbei als Empfangsantenne ein $\lambda/4$ -Dipol (Gewinn: 0 dBi) in einer Höhe von 2 m über Grund angesetzt.

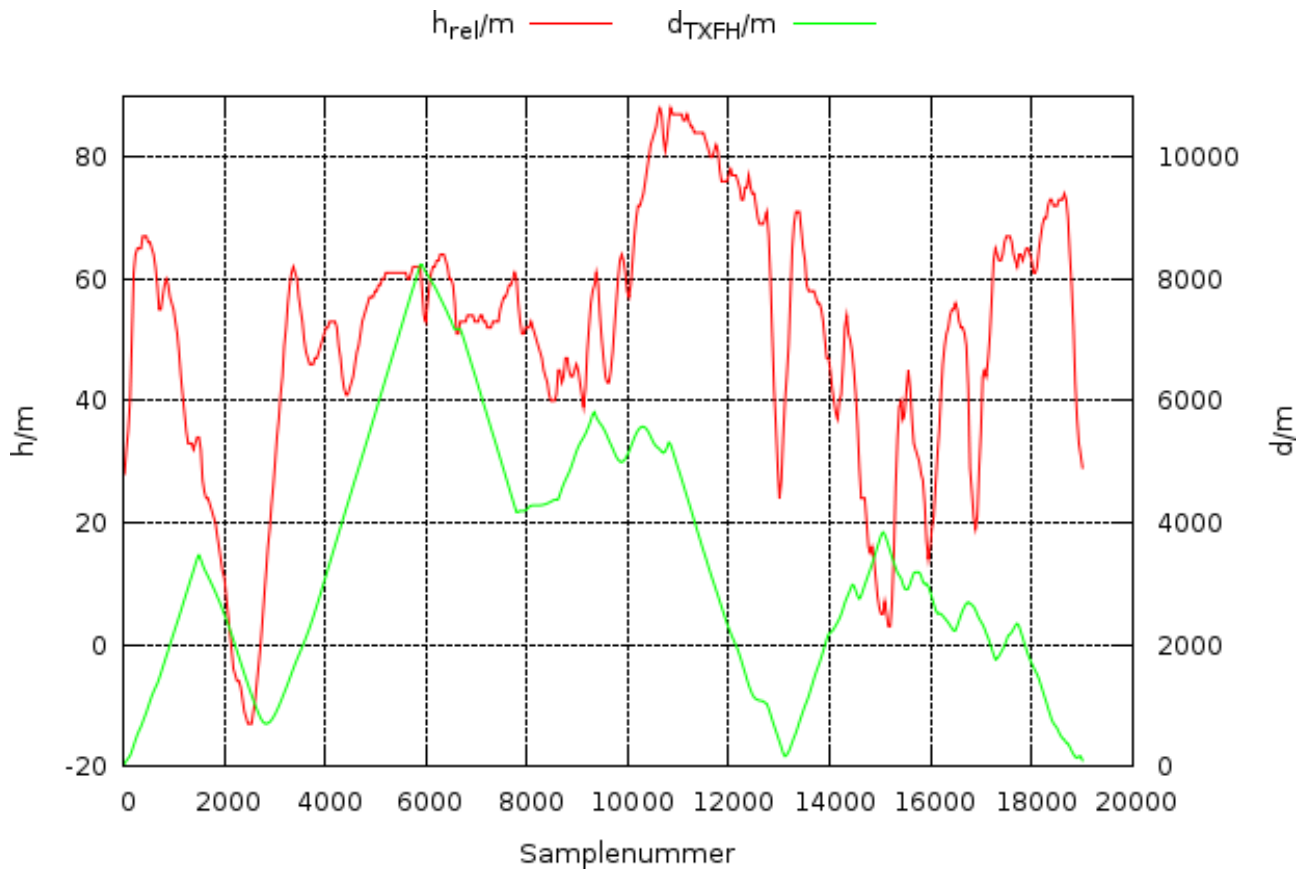


Abb. 12.14.: Mittlere relative Höhendifferenz der Empfangs- und Sendeantennen sowie Profil des mittleren Luftlinienabstandes zwischen Empfänger und Sender entlang der Route. Das Mittelungsintervall entspricht der Stichprobenanzahl einer Fahrstrecke von 100 m.

Die rote Linie in Abb. 12.14 zeigt die mittlere Höhendifferenz der Empfangs- und Sendeantenne $h_{\text{rel}} = h_{\text{Tx}} - h_{\text{Rx}}$ in einem Mittelungsintervall von 100 m entlang der Route. Die Skalierung der rel. Höhe befindet sich an der linken Ordinate.

Die grüne Linie in Abb. 12.14 stellt die mittlere Entfernung (Luftlinie) zwischen Sender und Empfänger d_{TXFH} in einem Mittelungsintervall von 100 m entlang der Route dar. Die Skalierung der Entfernung ist der rechten Ordinate zu entnehmen.

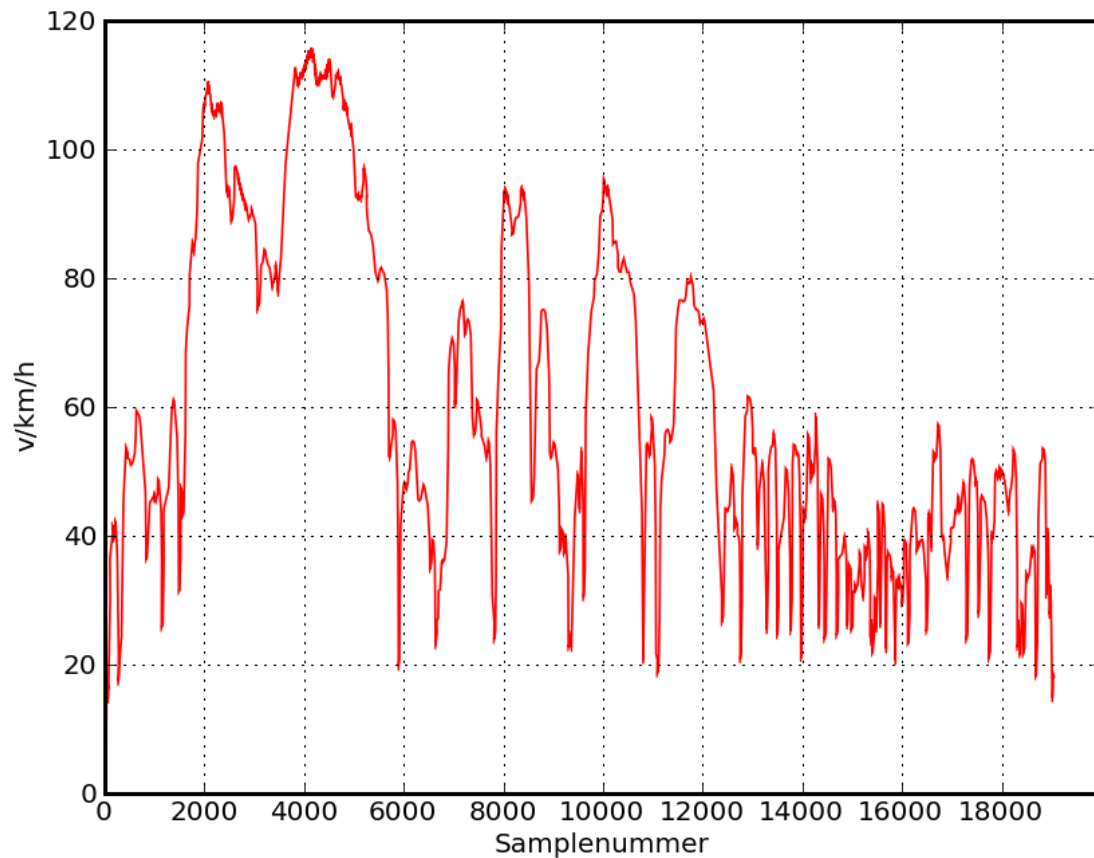


Abb. 12.15.: Profil der mittleren Fahrgeschwindigkeit entlang der Route

Abb. 12.15 stellt das Profil der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit entlang der Route dar. Auch hier wurde das Mittelungsintervall so gewählt, daß eine Strecke von 100 m innerhalb des Mittelungsfensters repräsentiert wird.

12.2.2. Fall (a): keine Störungen durch TX RB

Dieser Abschnitt beschreibt die Messfahrten, in der TX FH im DRM⁺ bzw. FM-Modus betrieben wurde und TX RB ausgeschaltet war. Neben der Auswertung der gemessenen Bitfehlerraten bzw. SINAD-Werte gem. des erläuterten Auswertungsverfahrens, Vgl. Abschnitt 12.1.3 werden einige weiterführende Betrachtungen über die Empfangssituation vor Ort angestellt.

Desweiteren wird exemplarisch eine Darstellung vorgestellt, die auf den Rohdaten des Messsystems basiert, ohne jegliche Mittelungen bzw. Entscheidungsschwellen anhand der momentanen Bitfehlerrate anzuwenden.

Darüberhinaus werden an dieser Stelle einige allgemeine Aussagen über die grundsätzlichen Empfangsverhältnisse getroffen die auch in den später dargestellten Störszenarien zutreffen.

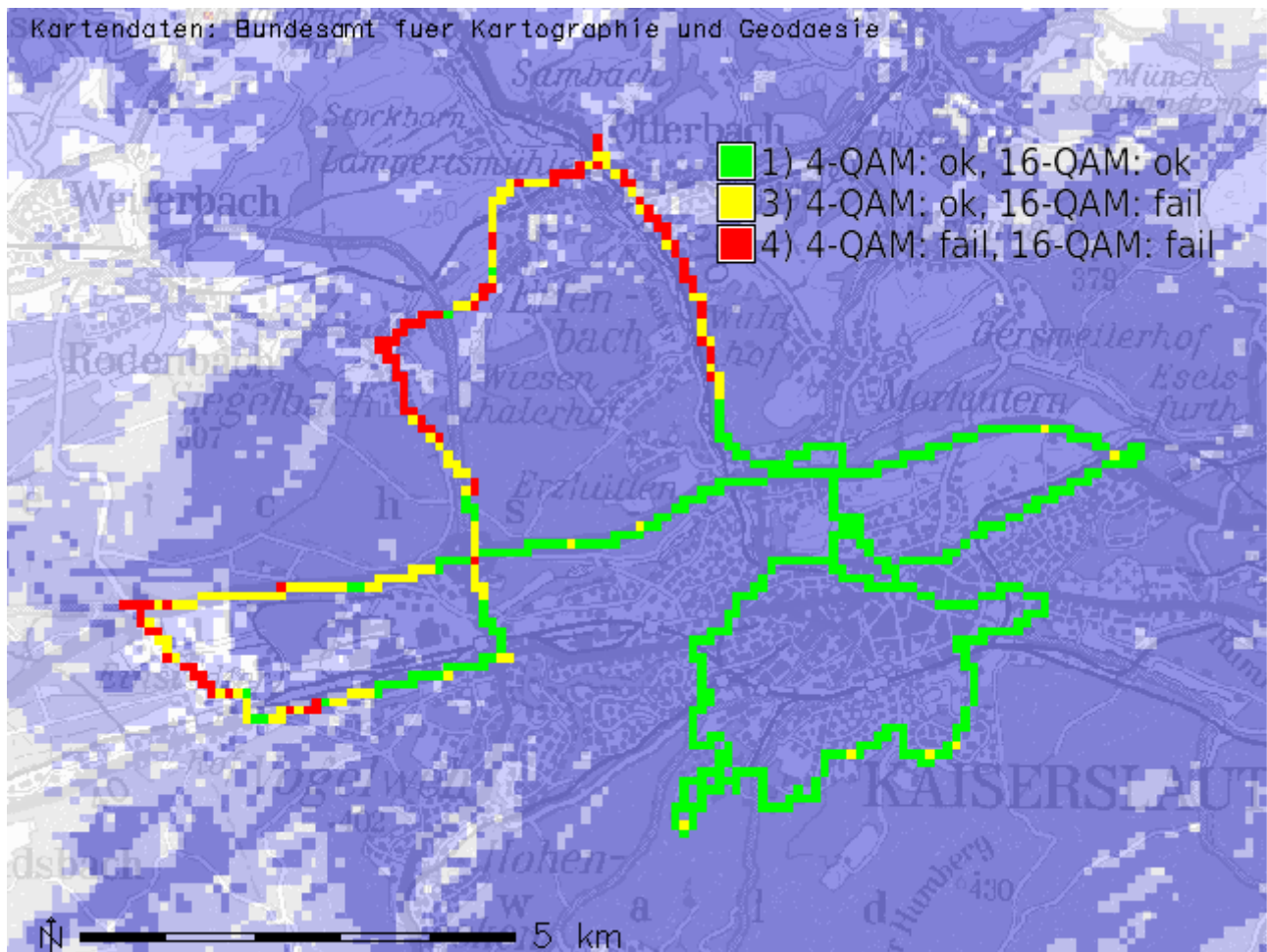


Abb. 12.16.: Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate, TX RB: aus. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent.

Abbildung 12.16 stellt anhand des in Abschnitt 12.1.3 erläuterten Verfahrens die gemessene Empfangssituation der 4- bzw. 16-QAM-Variante dar. Die Darstellung zeigt, daß der Stadtbereich in beiden Modi versorgt ist. In den Randbezirken beginnt die Dekodierung der 4-QAM-Variante nach Verlust des 16-QAM-Empfangs ebenfalls schnell auszusetzen. Der Vergleich mit der in blauen Schattierungen dargestellten Versorgungsprognose der Funknetzplanung zeigt, daß in beiden Fällen die Prognose etwas zu optimistisch ist. Die Betrachtung von Abb. 12.13 zeigt, daß die dort getroffenen Annahmen ein hohes Maß an Übereinstimmung mit der tatsächlich gemessenen Versorgung zeigen, was die Anwendbarkeit der Messdatenauswertung und Richtigkeit der Messdatenerfassung bestätigt.

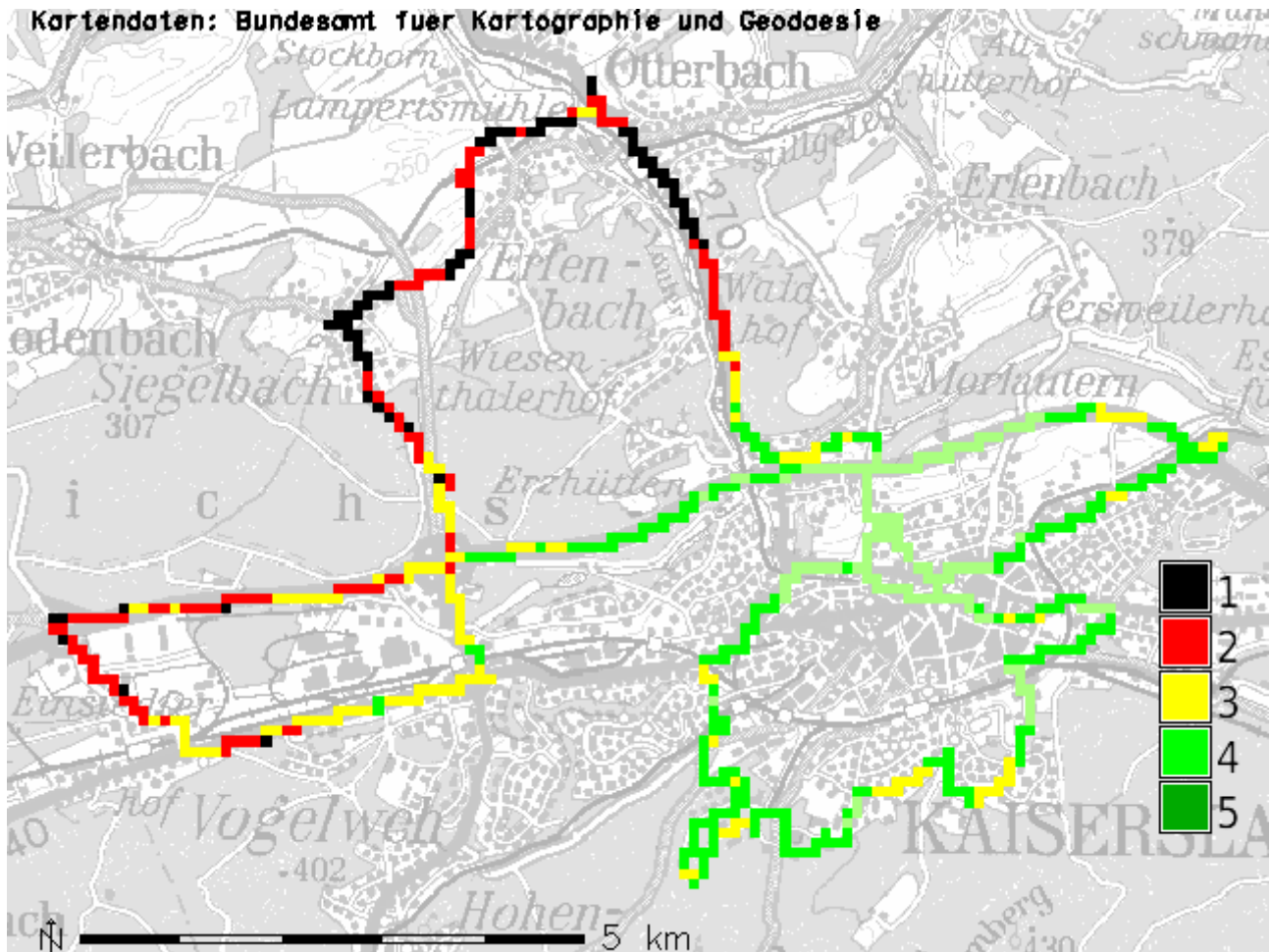


Abb. 12.17.: Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: aus

Abbildung 12.17 stellt die gemittelten, gemäß Tab. 11.2 klassierten SINAD-Messwerte entlang der Route dar. Es ist erkennbar, daß im Stadtbereich überwiegend eine gute Versorgung vorhanden ist. Im Bereich des Universitätswohnviertels kommt es aufgrund der Abschattungen durch hohe Gebäude und verstärktem Mehrwegeempfang zu leichten Einbußen. In dem westlichen und nördlichem Randgebiet der Strecke bricht der Empfang zusammen. Unterstellt man wie bereits im stationären Szenario, daß ab der Qualitätsstufe 2 (rot) nicht mehr von akzeptablen Empfangsbedingungen ausgegangen werden kann so stellt sich heraus, daß im Sinne der Reichweite in der in Kaiserslautern vorherrschenden Frequenzsituation die 16-QAM-Variante zu gleichen Ergebnissen führt – allerdings hierbei durchgängig dem Hörer eine uneingeschränkt hohe Qualität bringt.

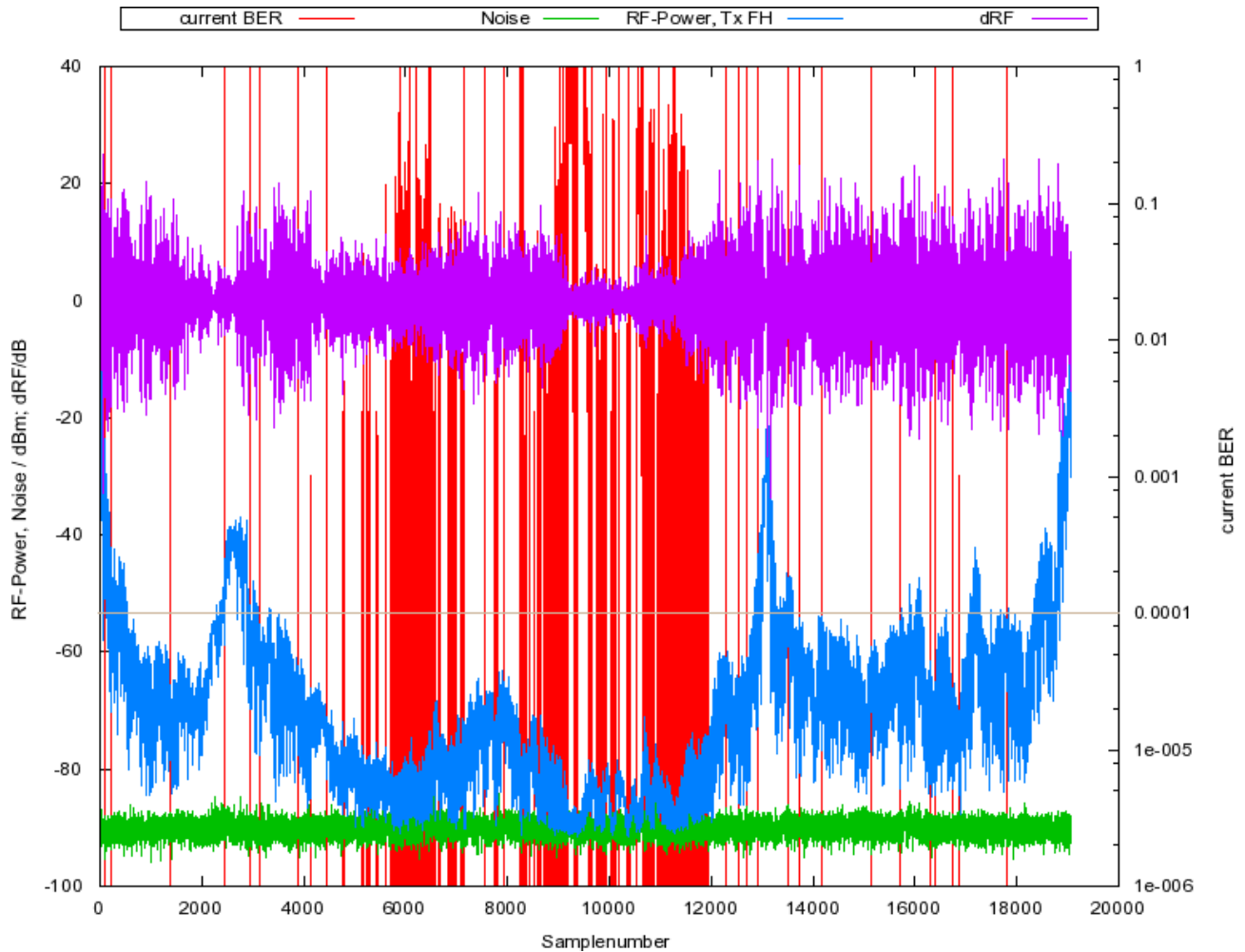


Abb. 12.18.: Darstellung von Empfangs- und Rauschleistungspegel, momentaner Bitfehlerrate und der Differenz der Empfangsleistungspegel zwischen 2 aufeinanderfolgenden Abtastwerten am Beispiel der 4-QAM-Variante; TX RB: aus.

Der Performanzeindruck des DRM⁺-Systems ändert sich nicht, wenn man Abb. 12.18 betrachtet: Diese Darstellung zeigt die unbewerteten Messdaten als Funktion der Stichprobennummer (also des Weges) bei der Messung der 4-QAM-Variante. Auf der linken Ordinate sind Empfangsleistungspegel (Reihe „RF-Power, TX FH“, blau) und Rauschleistungspegel (Reihe „Noise“, grün) in dBm verzeichnet. Auf der linken Ordinate ist ebenfalls die Differenz des momentanen Empfangsleistungspegels zu dem Wert der vorhergehenden Stichprobe in dB eingezeichnet (Reihe „dRF“, violett). Die momentane Bitfehlerrate (Reihe „current BER“, rot) ist auf der rechten Ordinate in logarithmischer Teilung aufgetragen. Die durchgezogene, lachsfarbene Linie markiert die Grenzbitfehlerrate von $1 \cdot 10^{-4}$.

Es ist zu beachten, daß die Messdynamik der Reihe „dRF“ durch den Rauschleistungspegel nach unten hin begrenzt ist (z.B. im Bereich von Samplenummer 10000).

Die Darstellung liefert einen guten Einblick in das Geschehen während einer Messfahrt:

- Der Zusammenhang zwischen SNR_{Dec} und Empfangsausfällen ist teilweise leichter zu überblicken als in den kartographischen Darstellungen.
- Man sieht, daß beim Auftreten von Bitfehlern die Wertigkeit der Momentanbitfehlerrate meistens bei einem Wert, der wesentlich größer als $1 \cdot 10^{-4}$ ist, liegt. Einzelne Fehlerstellen sind für den Nutzer nicht wahrnehmbar (z.B. die ersten fünf Stichproben mit Bitfehlern im Bereich der ersten 3000 Samples, eine Störung der Audiodekodierung an dieser Stelle wurde während der Fahrt nicht wahrgenommen). Bündelfehler hingegen sind wahrnehmbar. Dieser Umstand sorgt dafür, daß die auf Quartilen basierende Auswertungsstrategie zu einer korrekten Interpretation der

Empfangssituation führt. Deshalb wird auch eine stotternde Audiodekodierung nicht zu einer falschen Bewertung der Situation führen.

- Die Dynamik der Empfangsleistungsschwankungen liegt typischerweise in einem Bereich von bis zu 40 dB. In Kombination mit der Schmalbandigkeit des Systems gewinnt das Flat Fading einen besonderen Stellenwert an den Grenzen des Versorgungsgebietes. Dort sinkt SNR_{Dec} bedingt durch die Dynamik des Funkkanals mit gesteigerter Häufigkeit unter die Dekodierungsschwelle. An vielen Stellen lassen sich hohe, aber sporadisch auftretende Fehlerraten gut mit den Einbrüchen der HF-Leistung in Verbindung bringen.

Bei Betrachtung der Empfangssituation – unabhängig vom verwendeten Übertragungsverfahren – fällt auf, daß trotz einer niedrigen Grundbelastung durch fremde Sender im Gleichkanal und der Verwendung eines Rundstrahlers auf der Senderseite die Versorgungsreichweite bzw. Pegelverhältnisse in nordwestlicher Richtung sich entgegen des Antennendiagramms zu verhalten scheinen. Dieser Effekt ist leicht zu erklären, wenn man sich mit der lokalen Topographie auseinandersetzt, die in Abb. 12.8 angedeutet ist.

Im folgenden werden die örtlichen Gegebenheiten räumlich dargestellt, vgl. Abb. 12.19 – 12.22. In diesen sind die Senderstandorte durch blaue Kugeln markiert. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Höhenebenen in den meisten Fällen bewusst leicht überzeichnet dargestellt. In den Abbildungen 12.19, 12.20 sind die Empfangsleistungspegel von TX FH entlang der Wegstrecke unter Nutzung der gleichen Farbskala wie in Abb. 12.9 dargestellt. Zusätzlich wurde zur Gewinnung eines groben Überblicks in Abb. 12.20 eine räumliche Splineinterpolation [MH93] der Messdaten auf die Fläche des Rechtecks durchgeführt, welches die Messroute einfasst. Da eine sinnvolle Darstellung eines Stadtplans in dieser Darstellungsvariante leider nicht möglich ist, dienen als Orientierungshilfen die Senderstandorte und der Nordpfeil in Zusammenhang mit einer der in diesem Dokument zahlreich abgebildeten Stadtpläne anderer Darstellungen (z.B. Abb. 12.11, 10.1). Desweiteren wird auch Abb. 12.16 (DRM⁺-Empfangsgüte anhand der BER) mit Beschränkung auf die 4-QAM-Variante dargestellt (grün: Empfang in Ordnung; rot: Empfang nicht in Ordnung). Die vier nachfolgenden Darstellungen sind notwendig, um einen Rundumblick der Region zu verwirklichen.

Die Darstellungen der Empfangsleistung (sowohl gemessen als auch interpoliert) zeigen, daß aufgrund der Lage des Senders der nördliche Bereich der Strecke abgeschattet wird (Vorderer Rotenberg; Mühlberg). Man sieht, daß die Route in dieser Gegend durch einige Anhöhen und Senken führt, welche zu sporadisch höheren Empfangspegeln – und damit auch Dekodierungserfolgen – führen. Die interpolierte Darstellung zeigt das insbesondere der westlich von der FH gelegene Bereich aufgrund der Geländeöffnung und der geringeren Abschattung eine gleichmässige Ausbreitung ermöglicht. Allerdings ist dieser Bereich auch von der westlichen Seite kommend ebenso geöffnet, so daß z.B. der FM-Sender aus Metz in Gleichkanal in dieser Richtung „durchbrechen“ kann, was auch der Grund für den gesteigerten Rauschpegel in diesem Bezirk sein könnte. Die Darstellungen der Bitfehlerrate (Abb. 12.21, 12.22) arbeiten die Einschränkungen des Empfangs im nördlichen Bezirk sehr anschaulich heraus: Stellt man sich eine Verbindungslinie zwischen einem der von der Fahrt erfassten Pixel zu TX FH vor, so erkennt man schnell, dass in diesem Bezirk der Empfang oft wahrscheinlich über die Beugung und Reflektion der Welle an den von der vom nördlichen Routenzipfel umfassten Hügelkette zustande kam. Der Empfangsausfall am nördlichsten Routenpunkt selbst erscheint dann logisch wenn man erkennt, dass dieser nur eine schlechte Sicht auf TX FH bietet und keinen nahegelegene Reflektionsfläche weiter im Norden bietet. Ein Blick von TX FH aus in den östlichen und südlichen Routenabschnitt enthüllt keine solch starken Einschränkungen durch die Geländebeschaffenheit, ausser am Betzenberg (s. Markierung in Abb. 12.21). In diesem Bereich ist gut erkennbar, wie durch den topographisch bedingten Einbruch des Empfangspegel in einer NLOS-Situation der DRM⁺-Empfang stabil bleibt (rauschbegrenzter Bereich), während die Qualität des FM-Empfangs einbricht, vgl. Abb. 12.17.

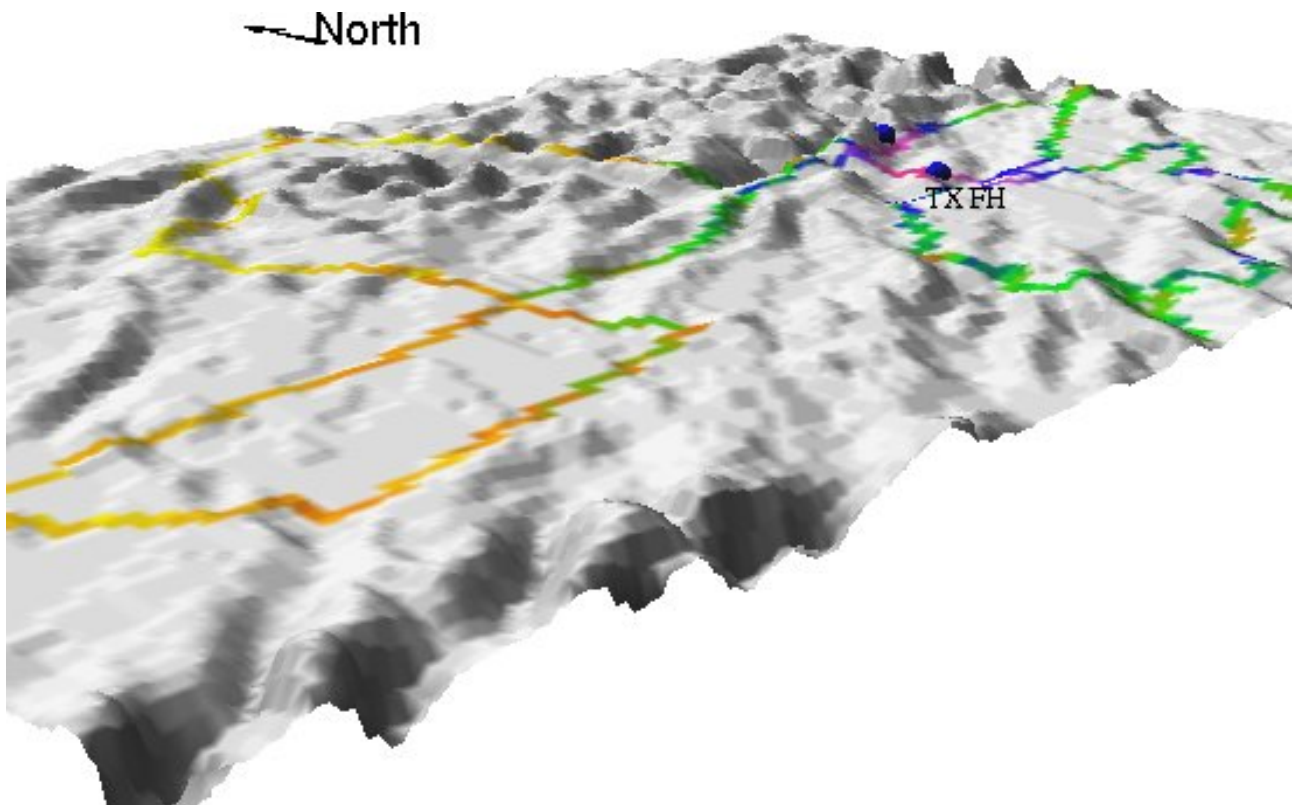


Abb. 12.19.: Topographische Darstellung des Verlaufs der abgestrahlten Leistung von TX FH, Ansicht 1 🔍.

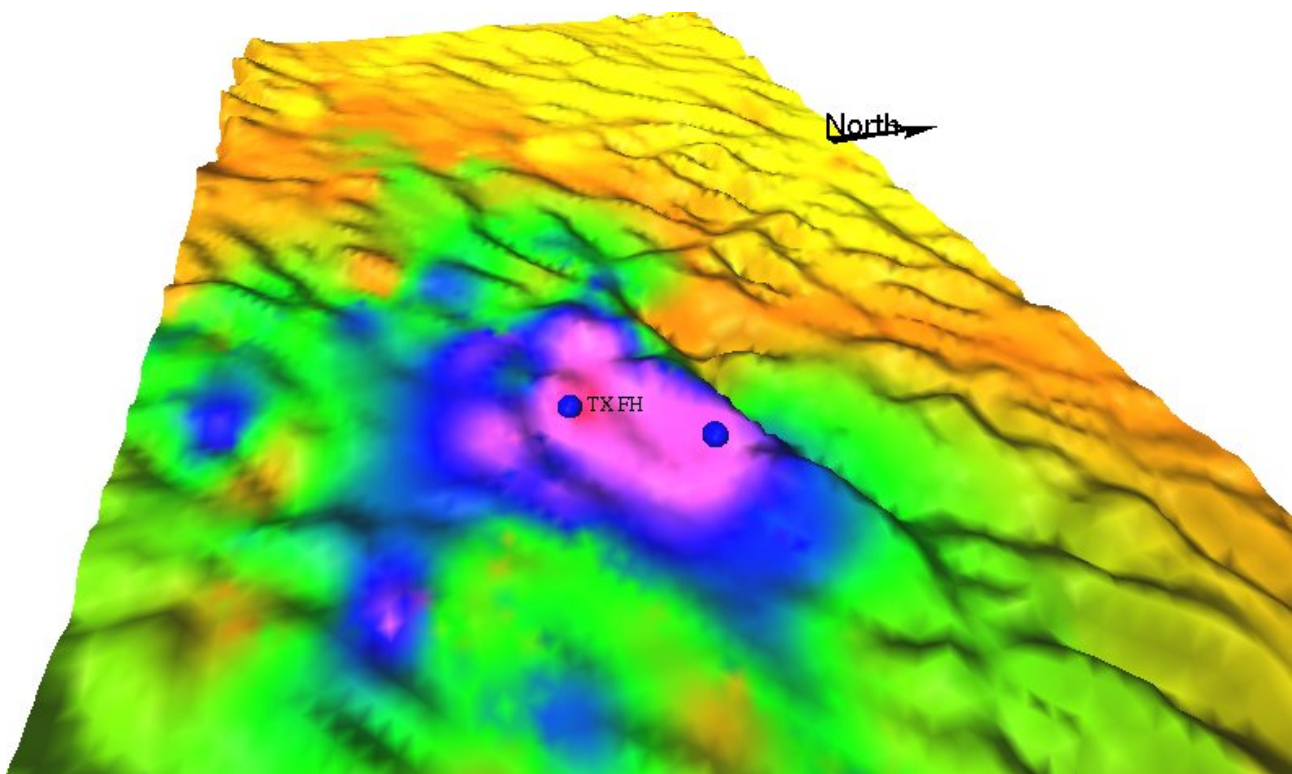


Abb. 12.20.: Topographische Darstellung des Verlaufs der abgestrahlten Leistung von TX FH, Ansicht 2 🔍.

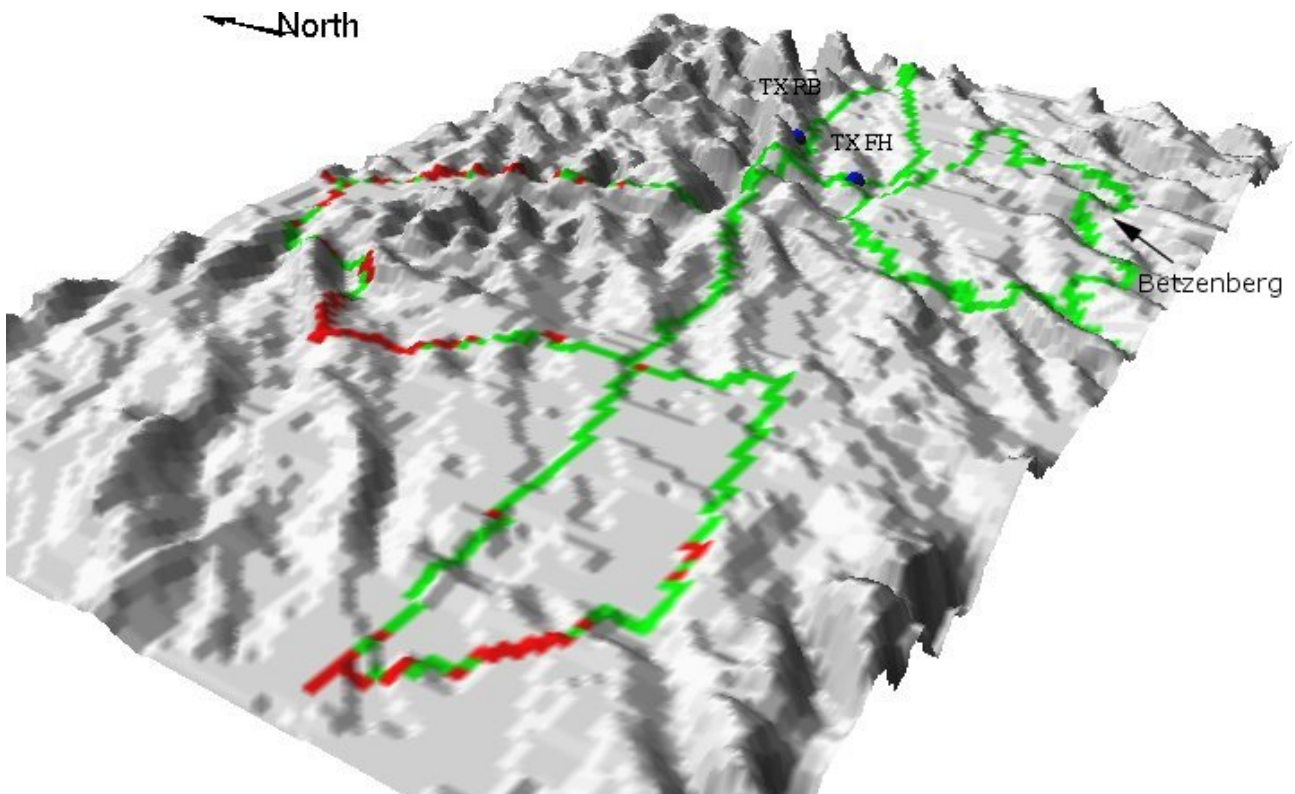


Abb. 12.21.: Topographische Darstellung des Verlaufs der Bitfehlerrate (4-QAM), Ansicht 1 🔍.

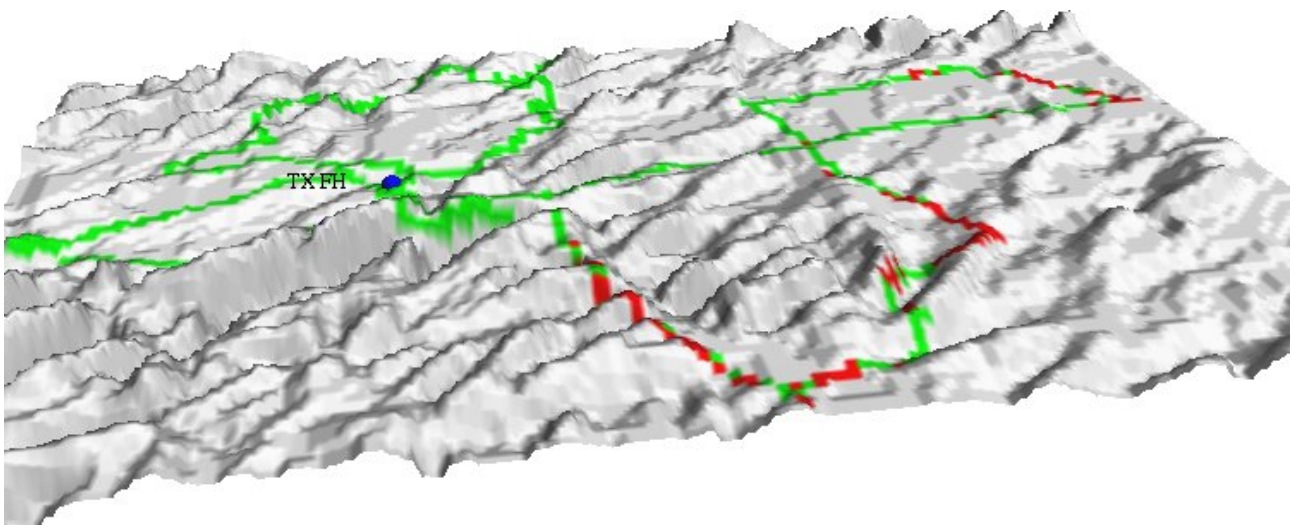


Abb. 12.22.: Topographische Darstellung des Verlaufs der abgestrahlten Leistung von TX FH, Ansicht 2. Geogr. Nord zeigt aus der Bildebene hinaus auf den Betrachter 🔍.

12.2.3. Fall (b): Störung durch TX RB 87,7 MHz

Dieser Abschnitt beschreibt die Simulation eines kleinen Funknetzes, bei dem der Störsender TX RB im ersten Nachbarkanal zu TX FH betrieben wird. Die in Abschnitt 12.2.1 durchgeführten allgemeinen Betrachtungen der Fahrtroute bleiben weiterhin gültig.

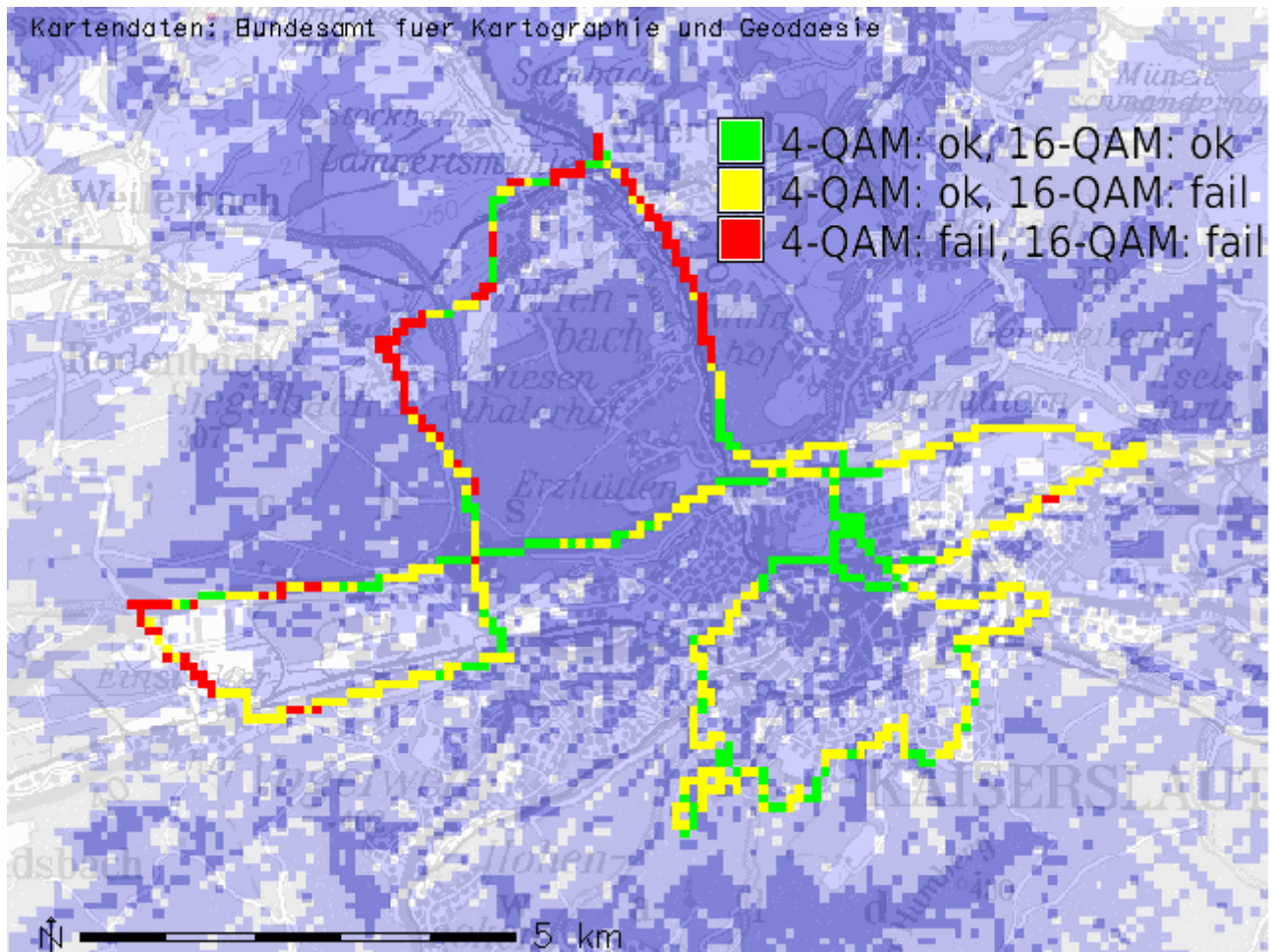


Abb. 12.23.: Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate TX RB: 87,7 MHz

Abbildung 12.23 stellt in kombinierter Darstellung die gemessene Empfangssituation der 4- und 16-QAM-Variante von DRM⁺ dar. Wie direkt aus dieser Darstellung ersichtlich ist, zeigt sich die 4-QAM-Variante als äusserst robust: Gegenüber dem ungestörten Fall bestehen quasi keine Unterschiede in der Versorgungssituation entlang der Wegstrecke. Der höhere Schutzbedarf der 16-QAM-Variante im vgl. zur 4-QAM-Variante (−13 dB vs. −9 dB), spiegelt sich direkt in dem Messergebnis wieder: viele in Abb. 12.16 grün dargestellten Raster sind mit gelb (nur 4-QAM-Dekodierung möglich) markiert. Dies bestätigt die Ergebnisse, die in dieser Situation bei den stationären Messungen gewonnen wurden, s. Abschnitt 11.3.4. In den Bereichen der Stadt und des Universitätswohngebiets sind einige Bereiche vorhanden, in denen die Versorgungsprognose (Ausfall der 16-QAM-Variante) sich hervorragend mit den gemessenen Verhältnissen deckt.

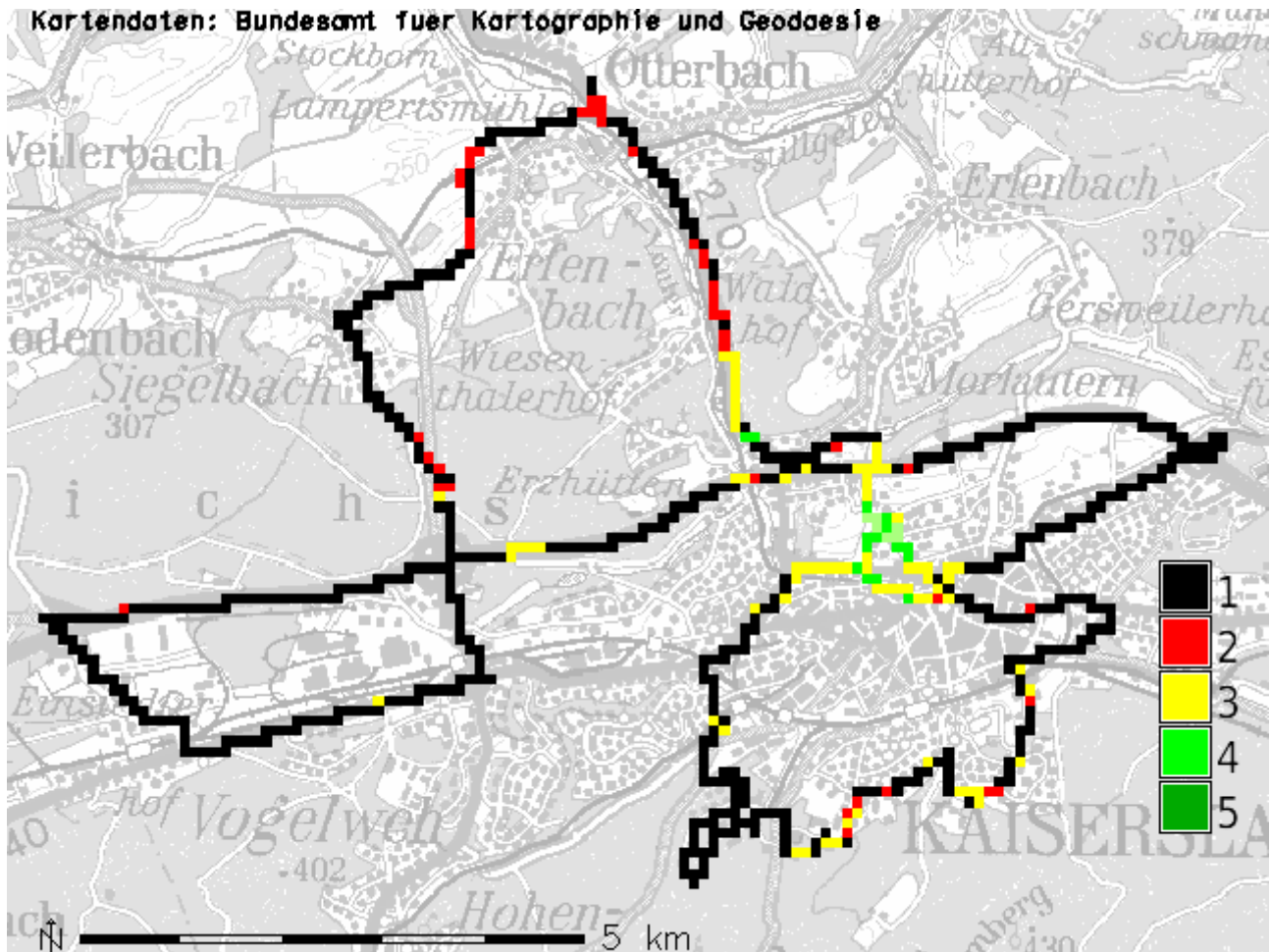


Abb. 12.24.: Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: 87,7 MHz

Ändert man das Nutzsignal von TX FH zu FM, so ändert sich die Versorgungssituation schlagartig, s. Abb. 12.24. Außer im nahen Umfeld von TX FH und im Bereich des gelben Streifens zwischen Erzhitzen und Morlautern ist kein FM-Empfang möglich. Aufgrund des höheren Schutzabstandes für eine FM-Übertragung relativ zu dem DRM⁺-System zeigen sich in dieser Situation besonders deutlich die Stärken des digitalen Verfahrens.

12.2.4. Fall (c): Störung durch TX RB 87,8 MHz

Dieser Abschnitt beschreibt die Simulation eines kleinen Funknetzes, bei dem der Störsender TX RB im zweiten Nachbarkanal zu TX FH betrieben wird. Die in Abschnitt 12.2.1 durchgeführten allgemeinen Betrachtungen der Fahrtroute bleiben weiterhin gültig.

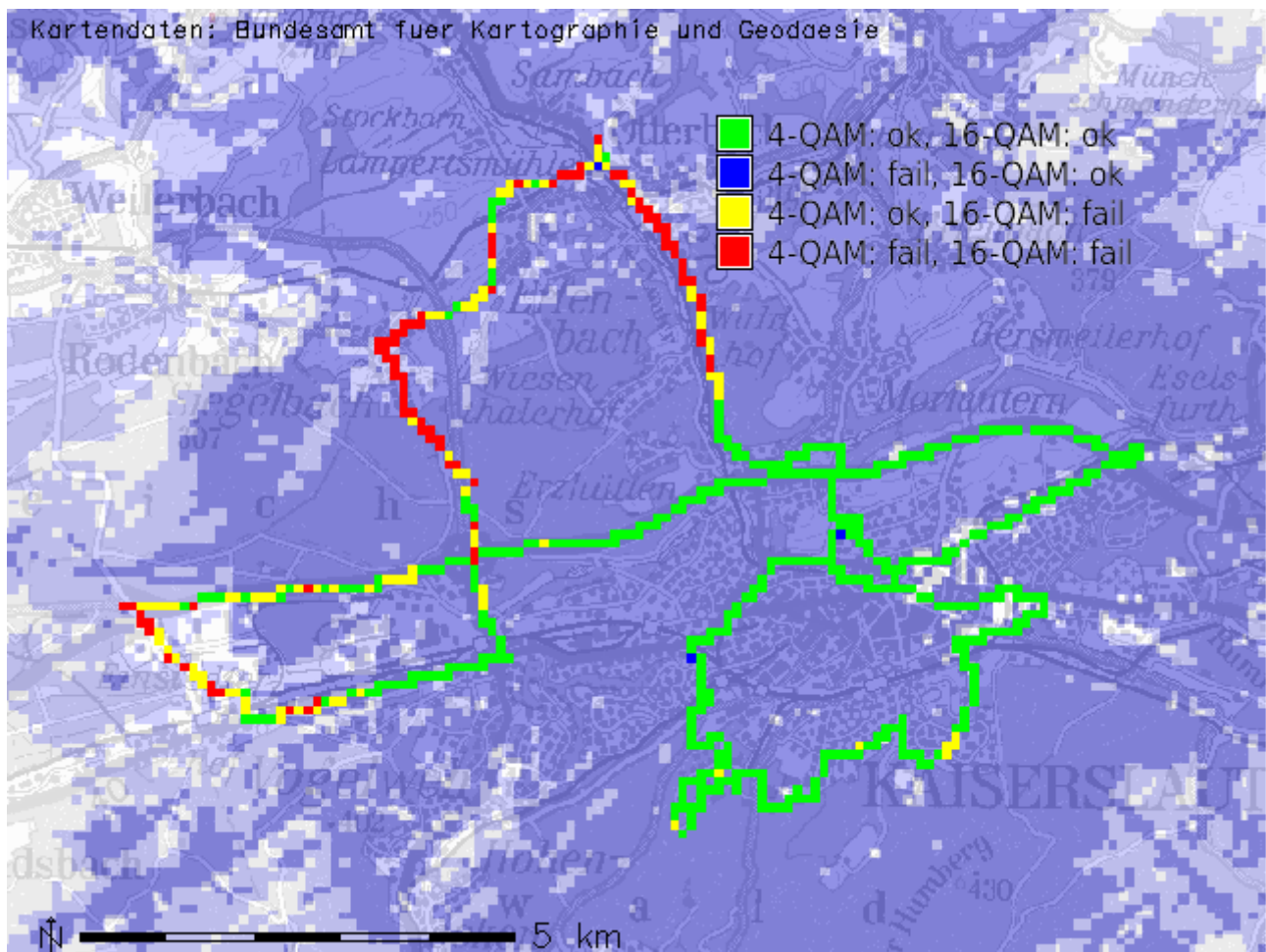


Abb. 12.25.: Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate TX RB: 87,8 MHz

Abbildung 12.25 stellt in kombinierter Darstellung die gemessene Empfangssituation der 4- und 16-QAM-Variante von DRM⁺ dar. Sie zeigt, daß für beide Modulationsvarianten die ursprüngliche Versorgungssituation wiederhergestellt wurde. Die durch die Schutzabstandsmessungen abgeleitete Annahme, daß die Leistung von TX RB schlichtweg nicht ausreichend ist, um eine Störleistung hervorzurufen, die zur Degradation der 16-QAM-Variante notwendig wäre wird somit bestätigt. Die planerische Versorgungsprognose für den 4-QAM-Fall bildet – von den nördlichen Bereichen abgesehen – eine recht gut Modellierung im Vergleich zu den realen Verhältnissen. Gleiches gilt für die 16-QAM-Variante.

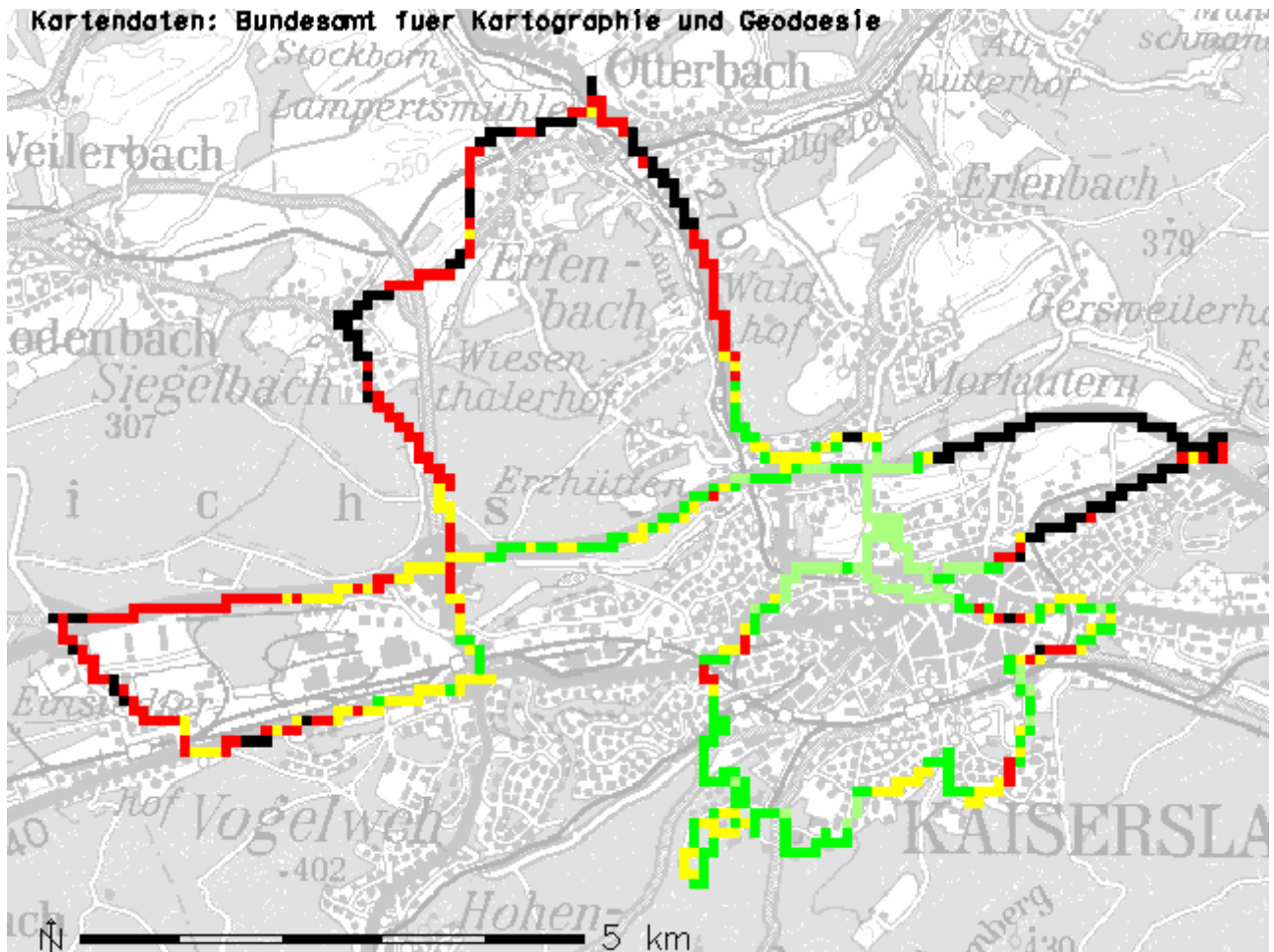


Abb. 12.26.: Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: 87,8 MHz

Ein anderes Bild hingegen zeigt sich bei Betrachtung einer FM-Ausstrahlung von TX FH, s. Abb. 12.26: Die leichten Einbussen der FM-Versorgung, die sich an den Messpunkten im stationären Szenario gezeigt haben, äußern sich hier aufgrund der wesentlich höheren Stichprobenanzahl und der ungerichteten Empfangsantenne wesentlich deutlicher. Im Bereich der Umgebung der Hauptstrahlrichtung von TX RB bricht der FM-Empfang völlig zusammen. Ein Vergleich mit den Werten aus Abb. 12.11 zeigt, daß der verwendete Empfänger bei diesem Frequenzversatz eine höhere Selektivität aufweist, als der zur Funknetzplanung angenommene – und somit einen geringeren Schutzabstand zum FM-Empfang benötigt: der FM-Empfang erholt sich schon an Stellen, an denen der planerische 7 dB Schutzabstand [ITU02a] noch nicht eingehalten wird.

Teil III.

Gesamtbewertung

13. Zusammenfassung und Bewertung der Labor- und Feldphase

Die umfangreichen Untersuchungen, die in der Laborphase (S. 15 ff.) bzw. Strahlungsphase (S. 57 ff.) durchgeführt wurden, liefern ein umfassendes Bild der vor Ort verwendeten Systeme und des Versorgungspotentials des Senders TX FH. Die vorliegende Arbeit schliesst hiermit alle in Kap. 2.2 genannten Ziele und offenen Arbeiten ab.

Die Arbeiten konzentrierten sich auf zwei Modulationsvarianten des MSC mit einer SDC-Coderate von 1/4: Den 4-QAM-Modus mit der gewählten MSC-Coderate 4/10 sowie den 16-QAM-Modus mit der gewählten MSC-Coderate 1/3.

Nach einer Reihe von Messungen und Simulationen konnte für das vor Ort verwendete Sender-/ Empfänger-System die Aussage getroffen werden, dass ein Empfänger ein DRM^+ -Signal dann als korrekt dekodiert werten kann, wenn eine mittlere Bitfehlerrate von $1 \cdot 10^{-4}$ nicht überschritten wird. Nach Ausschluss weiterer Effekte konnte eine Mindesteingangsempfindlichkeit von -108 dBm (-100 dBm) für die 4 (bzw. 16)-QAM-Variante angegeben werden, s. auch Tab. 8.1. Darüberhinaus wurde im Laufe dieser Phase der Empfänger gegenüber dem Stand des Vorjahres noch in einigen Details verbessert.

Da das UKW-FM-Rundfunknetz (nicht nur) in Deutschland ein interferenzbegrenztes Netz darstellt, ist es zur Planung der Versorgungsfläche eines DRM^+ -Senders notwendig, die Schutzabstände des DRM^+ -Signals gegenüber anderen UKW-Sendern in diese Planungen miteinzubeziehen. Auf Basis der oben angesprochenen grundlegenden Vorarbeiten konnte der Begriff „ DRM^+ -Versorgung“ definiert werden. Diese Definition bildet die Grundlage zur Ermittlung der benötigten Schutzabstände für dieses System. Hierzu wurden FM-Störsignale verwendet, die einerseits die planerische Welt durch Verwendung eines FM-Monostörsignals gemäß [ITU02b], andererseits die reale Welt durch die Verwendung eines komprimierten FM-Stereostörsignals inkl. dem RDS-Datendienst abdecken. Das FM-Monostörsignal ist somit klar definiert, wirft aber immer mehr Fragen auf seinen heutigen realen Bezug auf. Gerade durch die heutzutage in vielen Fällen genutzten mannigfaltigen Möglichkeiten der Signalverarbeitung am Ausgang eines Sendestudios in Bezug auf Equalizer, Kompressoren und insbes. der jeweiligen Modulationsinhalte selbst ist es nicht leicht, ein repräsentatives Störsignal zu erzeugen. Dennoch stellt das hier präsentierte Ergebniss eine gute Näherung an das typische Mittelmaß der auf diese Weise resultierenden heutigen UKW-FM-Senderspektren. Zur Komplettierung dieser Messreihe wurden ebenfalls die Schutzabstände gegenüber einem DRM^+ -Signal untersucht. Da es keine offizielle Sendermaske für DRM^+ -Systeme im UKW-Band gibt, wurde von dem Worst-Case ausgegangen, d.h. die Spektrumsmaske für UKW-FM-Sender wurde so weit wie möglich ausgeleuchtet. Unter der Annahme, dass zukünftige DRM^+ -Sender eine wesentlich höhere spektrale Reinheit als angenommen aufweisen, werden sich die tatsächlich ergebenden Schutzabstände in gleichem Maße erniedrigen. Die Ergebnisse sind in Tab. 13.1 zusammengefasst.

Störsignal	FM Stereo		DRM ⁺	
Frequenzabstand	Variante		Variante	
	4-QAM	16-QAM	4-QAM	16-QAM
0 kHz	11 dB	18 dB	6 dB	14 dB
100 kHz	-13 dB	-9 dB	-14 dB	-6 dB
200 kHz	-54 dB	-49 dB	-40 dB	-34 dB
300 kHz	-76 dB	-68 dB	-72 dB	-65 dB
≥ 400 kHz	-77 dB	-69 dB	-74 dB	-67 dB

Tab. 13.1.: Zusammenfassung der Schutzabstände für DRM⁺

Die Schutzabstandsmessungen sind nur an einem Empfänger durchgeführt worden. Aufgrund der Tatsache, dass zu den dafür notwendigen Eckdaten bisher keine typischen Planungswerte insbes. in Bezug auf die Empfängeranforderungen und des anzuwendenden Störkriteriums existieren, wurden gemeinsam mit den vorbereitenden Arbeiten möglichst realistische Annahmen solcher Werte getroffen. Da vorbereitend zu den Schutzabstandsmessungen das komplette Sender-/ Empfängersystem eingehend charakterisiert wurde, sind die Ergebnisse in Bezug auf mögliche zukünftige Empfängergenerationen verwertbar. Der prototypische Empfänger ist weit mehr als ausreichend gut genug, um das *Potential* von DRM⁺ eindeutig und unter definierten Verhältnissen zu untersuchen.

Zur Ergänzung und Validierung der Laborphase wurde ein Strahlungsversuch unternommen. Hierbei wurde der Hybridsender der FH Kaiserslautern TX FH ein Sender realisiert, der entweder FM- oder DRM⁺-Signale mit der gleichen effektiven Strahlungsleistung auf der gleichen Frequenz (87,6 MHz) abstrahlen kann. Dieser Nutzsender wurde in dieser Phase gezielt durch einen weiteren, kontrollierbaren FM-Sender mit den Sendefrequenzen (87,6; 87,7; 87,8) MHz am Standort Kaiserslautern Rotenberg (TX RB) gestört. Im Vordergrund dieser Untersuchungen stand die Fragestellung nach der effektiven Versorgungsreichweite des Senders TX FH, sowohl im ungestörten als auch im gestörten Fall. Vorbereitend zu diesem Versuch wurden anhand der Laborergebnisse erste Funknetzplanungen durchgeführt, welche anhand der Versuchsergebnisse zum Vergleich der Planungskriterien mit den realen Verhältnissen dienten.

Die Feldmessungen konzentrierten sich hierbei auf zwei Szenarien: den stationären Empfang mit einer Richtantenne in 10 m Höhe über Grund, so wie es die Planungs- und Messtechnische Basis zum UKW-FM-Empfang vorschreibt [ITU02a, Gem82] und den mobilen Empfang.

Im stationären Empfangsfall hat sich gezeigt, daß das Versorgungsgebiet des DRM⁺-Modus erheblich größer als das FM-Senders ist. Dies liegt an der Tatsache, daß

- bei analogem Empfang die Empfangsqualität graduell schwindet, während im DRM⁺-Betrieb der Empfang entweder möglich ist oder nicht. Insbes. durch den niedrigeren Schutzbedarf von DRM⁺ sowie des geringen Mindesteingangspegels für eine stabile digitale Dekodierung ist eine großflächigere Versorgung als im analogem Fall möglich.
- im Falle eines gestörten Szenarios durch TX RB ebenfalls der geringere Schutzbedarf von DRM⁺ zu einer enormen Verbesserung des Empfangsverhaltens gerade bei Störungen im ersten Nachbarkanal führt. Auch bei Störungen im zweiten Nachbarkanal sind die stellenweise auftretenden Empfangsqualitätsminderungen im analogen Fall völlig irrelevant.

Diese Aussagen werden – neben den Analysen in Kapitel 11.3 – durch den Vergleich der Abbildungen 13.1 und 13.2 gestützt.

Abb. 13.1 zeigt die Verteilung der FM-Empfangsqualität an den 19 stationären Messpunkten anhand des gemessenen SINAD gemäß der Klassierung in Tab. 11.2 für die verschiedenen untersuchten Szenarien.

Im Falle keiner weiteren Störungen durch TX RB (rot) zeigt sich, daß die Grenze des Versorgungsgebiet des Senders in 6 von 19 Fällen erreicht bzw. überschritten war (Qualitätsstufe zwei und geringer). Dieses bricht im Fall einer Gleichkanalstörung vollständig zusammen, und erholt sich graduell bei wachsenden Frequenzabständen zwischen TX FH und TX RB. Auch bei einem Frequenzabstand von 200 kHz sind noch Beeinträchtigungen im Vergleich zur Ausgangslage feststellbar.

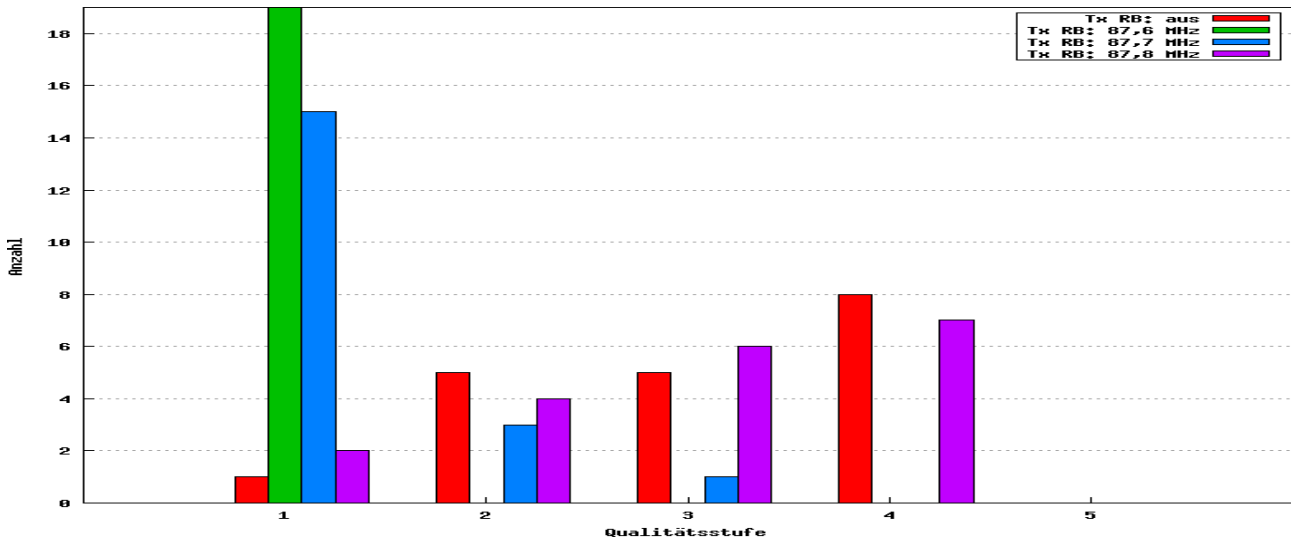


Abb. 13.1.: Histogramm der klassierten SINAD-Werte an allen stationären Messpunkten, für alle untersuchten Frequenzsituationen

Abb. 13.2 zeigt die Verteilung der DRM⁺-Empfangsqualität an den stationären Messpunkten anhand der gemessenen $\overline{\text{BER}}$. Von den 19 angefahrenen Messpunkten konnte an 18 Punkten das Signal im 4-QAM-Modus unabhängig von der Störsituation (Ausnahme: Gleichkanalstörungen durch TX RB) mit der geforderten Mindestqualität dekodiert werden.

Die 16-QAM-Variante konnte an 17 der 19 angefahrenen Messpunkten dekodiert werden. Abgesehen vom Gleichkanalfall konnte nur an drei Punkten eine Beeinträchtigung der Versorgung durch die zusätzliche Einwirkung von TX RB festgestellt werden.

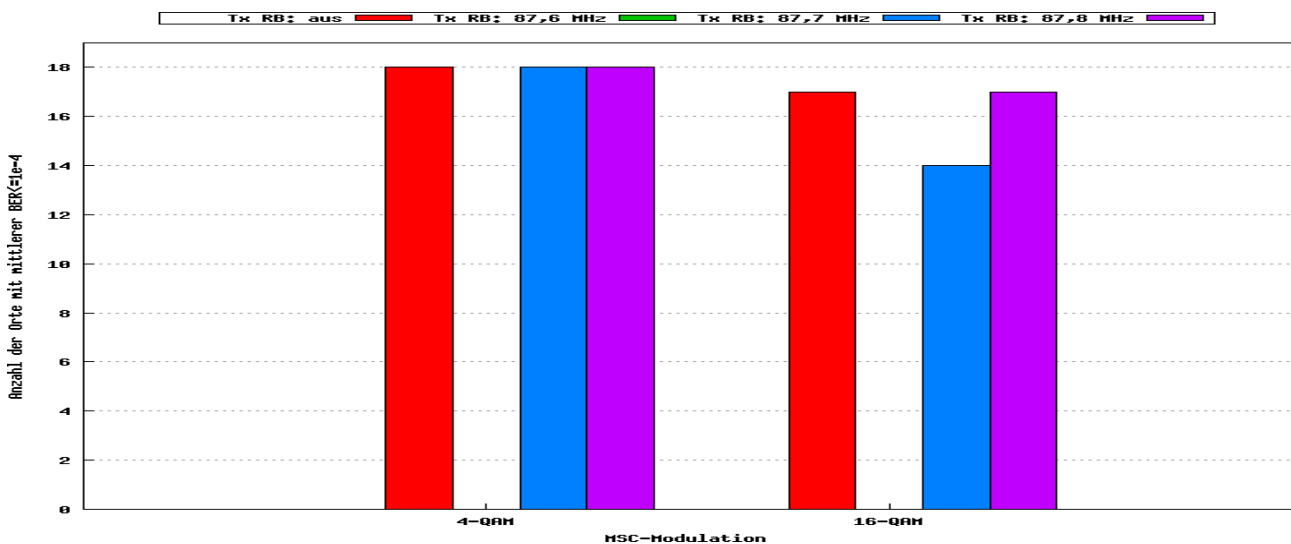


Abb. 13.2.: Histogramm der $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ an allen stationären Messpunkten, für alle untersuchten Frequenzsituationen

Auch im mobilen Empfangsfall zeigt sich, daß die Versorgungsreichweite und die Durchgängigkeit einer qualitativ hochwertigen Versorgungsgüte von TX FH mittels DRM⁺ höher ist als im Falle einer FM-Ausstrahlung gleicher Leistung.

Zu dieser Messreihe wurde ein Messsystem für den mobilen Einsatz aufgebaut und für jede Kombination von Nutzsignal und Störsituation eine Messfahrt unternommen.

Ergänzend zu den Abbildungen in Kapitel 12 stellen die folgenden Abbildungen 13.3 und 13.4 nicht die Verteilung der Messdaten nach der Quantisierung zu einem Raster von 100 m × 100 m dar, sondern repräsentieren die Urmenge der Messdaten in Abtastschritten der Messroute von 2.74 m (s. Gl. Gl. (12.1)).

Beide Abbildungen bilden eine Zusammenfassung der in Kap. 12 Abb. 13.3 stellt hierbei die Häufigkeiten der SINAD-Klassen entlang der Messroute in den verschiedenen Störsituationen durch TX RB dar. Abb. 13.4

Im Fall einer FM-Übertragung von TX FH ist in Abb. 13.3 bestätigen sich die Tendenzen, die sich im stationären Fall gezeigt haben. Im ungestörten Falle sind ca. 28% der Messwerte im Bereich der Qualitätsstufe 2 und geringer und somit als ausserhalb des als versorgt zu betrachtenden Bereichs anzusiedeln. Bei einer Störung durch TX RB im ersten Nachbarkanal steigen die als unversorgt betrachteten Messwerte um 62%, d.h. nur noch 10% der Messroute sind als versorgt anzusehen. Im Falle einer Störung im zweiten Nachbarkanal sind ca. 44% der Messpunkte als unversorgt anzusehen, d.h. die Versorgungsfläche ist immer noch geringer wie im ungestörten Fall.

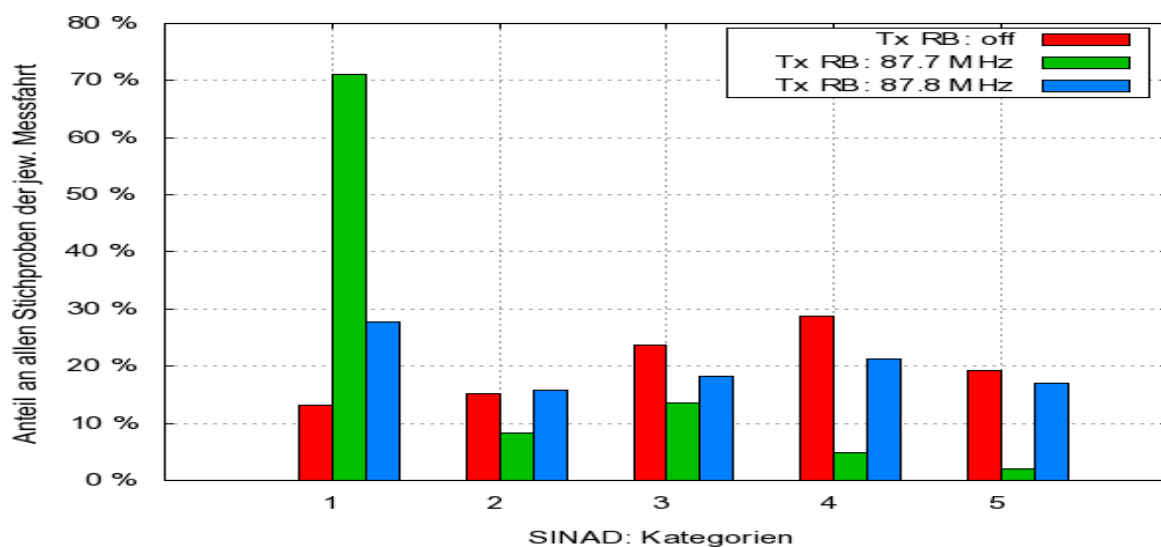


Abb. 13.3.: Prozentuale Verteilung der klassierten SINAD-Werte im mobilen Fall für alle untersuchten Frequenzsituationen

Wechselt man an TX FH die Modulation zu DRM⁺, so zeigt sich im Fall der 4-QAM-Variante, das nur ca. 9% der Messpunkte entlang der gleichen Route wie im FM-Fall als unversorgt zu betrachten sind. Bei einer Beeinflussung durch TX RB ändert sich in allen untersuchten Störfällen die Anzahl der gestörten Messpunkt um max. ca. 2%.

Die 16-QAM-Variante ist in ca. 72% aller Messpunkte entlang der Route einwandfrei dekodierbar. Im Störfall (erster Nachbarkanal) verringert sich die Bedeckung um ca. die Hälfte bezogen auf die ungestörte Situation. Bei Störungen im zweiten Nachbarkanal zeigt sich, daß die ursprüngliche Bedeckung wieder hergestellt ist. Die leichte Verbesserung in beiden Varianten gegenüber dem Fall „TX RB: aus“ ergibt sich durch eine wellenausbreitungsbedingte verminderte Grundbelastung im Sinne der Gleichkanalstörer / Grundrauschen im Bereich Einsiedlerhof, der allerdings den Grenzbereich des Versorgungsgebietes darstellt.

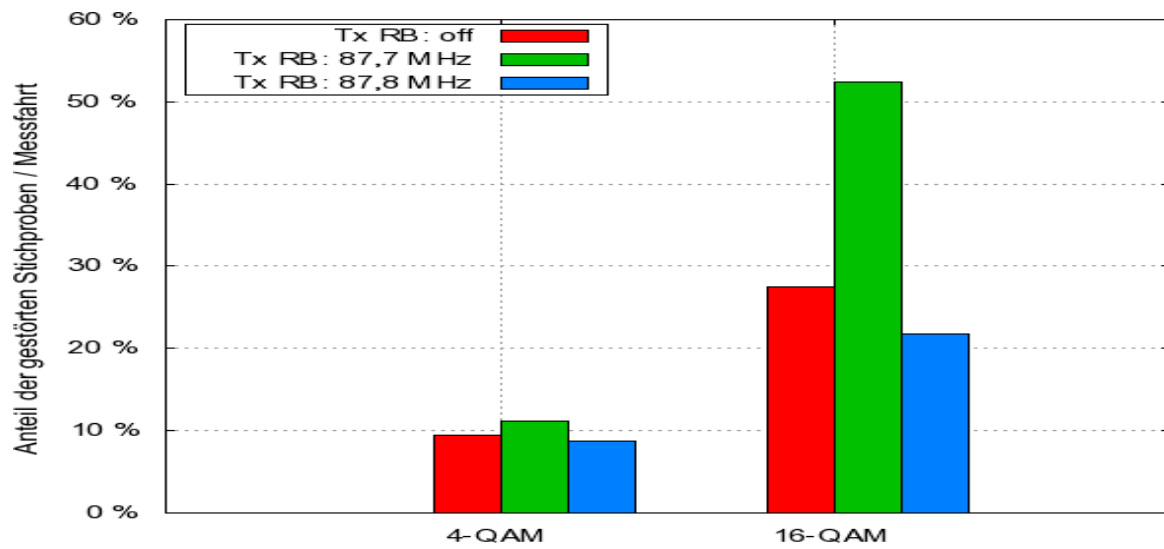


Abb. 13.4.: Prozentuale Verteilung der Bitfehler, die die Bedingung $\text{BER} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ im mobilen Fall nicht einhalten; Darstellung aller untersuchten Frequenzsituationen

14. Ausblick

Der Arbeitseinsatz der letzten Jahre der FH Kaiserslautern und des DRM-Konsortiums haben DRM⁺ zu einem geeigneten, potentiellen Kandidaten zur Digitalisierung des VHF-Bandes II gemacht. Gerade – aber nicht nur – hier vor Ort wurde dies im praktischen Einsatz mehrfach bewiesen.

Aus einem technischen Blickwinkel heraus sollte die Fragestellung: „Was wird aus dem analogen FM-Rundfunk in der Zukunft?“ durch diese Arbeiten auf einer breiten Basis durch das DRM⁺-System beantwortet werden können. Auf bedeutende Detailfragen wurde eingegangen, wie z.B. das

- eine vertragliche Einplanung von DRM⁺ in bestehende UKW-FM-Sendernetze möglich ist.
- die Versorgung eines DRM⁺-Senders ist mindestens so gut wie diejenige, die durch einen FM-Sender erreicht werden kann – je nachdem, wie stark die ursprünglichen analogen Senderleistung im digitalen Betrieb reduziert wird.
- die Versorgungsreserve – und somit die Langzeitstabilität einer hochqualitativen Versorgung eines DRM⁺-Senders gegenüber dem analogen System höher liegt und somit auch gegen die Sendeleistung ausgetauscht werden kann.
- eine sorgfältige Planung von DRM⁺-Gleichwellennetzen viele momentan genutzte Frequenzen wieder freigeben kann, so daß eine effizientere Nutzung der begrenzten Ressource Frequenz innerhalb dieses Frequenzbereichs möglich gemacht wird. Dieser Gewinn kann beispielsweise zu einer Erhöhung der Angebots- und Dienstvielfalt im Rundfunkbereich genutzt werden.

Diese Aussagen verlieren auch dann nicht ihr Gewicht, wenn die typischen Einschränkungen von schmalbandigen OFDM-Systemen – wie z.B. auch DRM⁺ – in Betracht gezogen werden. Zu diesen zählen beispielsweise:

- Die Kohärenzbandbreite kann stellenweise wesentlich größer als die Signalbandbreite werden, was zu starken Signaleinbrüchen führt.
- Die Hüllkurve des hochfrequenten Signals schwankt zeitlich schnell und stark. Dabei weist sie eine relativ breite, Gaussähnliche Amplitudenverteilung auf. Dies äußert sich im Vergleich zu herkömmlichen UKW-FM-Signalen in einem höherem Störpotential in der direkten Frequenznachbarschaft der Trägerfrequenz und in unmittelbarer Sendernähe.

Auf jeden dieser Effekte wurde im Laufe der Zeit eingegangen, und jeder kann technisch gelöst werden, um in der nahen Zukunft die Effizienz von DRM⁺ weiter zu steigern. Von *einem rein technischen Standpunkt aus* kann somit festgestellt werden: *DRM⁺ ist bereit zur Einführung in Band II!*

Folgende Frage, die sich an dieser Stelle geradezu aufdrängt ist: Kann DRM⁺ auch im VHF-Band III, 174 – 230 MHz, als eine ideale Ergänzung der Digital Audio Broadcast ETSI-Systemfamilie (DAB/-DAB+/DMB) [Eur06a] eingesetzt werden? Und – wenn ja – welche Umstände und Einschränkungen sind von einem technischen Standpunkt aus zu erwarten? Welche Vor- und Nachteile würden sich durch diesen Ansatz ergeben?

Diese Idee hat ihren ganz eigenen, besonderen Charme wenn man bedenkt, das im VHF-Band III nur digitale Rundfunksysteme auf Basis der DAB-Systemfamilie verwendet werden. Die Nutzung eines Mischbetriebs der beiden Systeme in Band III ist im vgl. zu Band II wesentlich einfacher, da nur die

Funkverträglichkeit zwischen OFDM-basierten Systemen zu wahren ist. Dies stellt bekanntermassen kein Problem dar.

Beide Systeme können sich gegenseitig symbiotisch ergänzen: Auf der einen Seite das *DAB*-System, das zur gleichzeitigen Ausstrahlung einer *Vielzahl von Programmen und Diensten innerhalb eines einzigen Multiplexes vorgesehen* ist. Es wurde insbesondere im Hinblick auf die Versorgung sehr großer Flächen und die mobile Nutzung entworfen. Auf der anderen Seite eignet sich *DRM⁺* hervorragend zu einer *regionalen und lokalen Rundfunkversorgung*. Im Gleichwellennetzbetrieb können auch sehr große Flächenversorgungen realisiert werden. Das System eignet sich hierbei insbesondere für eine *kleine Anzahl von Programmen und Diensten* (max. 4 Programme und Dienste). Der gleichzeitige und gleichberechtigte Einsatz beider Systeme im gleichen Rundfunkband könnte die *Digitalisierung des Rundfunks vorantreiben und beschleunigen*, da hiermit auch den lokalen und regionalen Diensteanbietern die *Möglichkeit* geboten wird, auf den „digitalen Zug“ aufzuspringen, *ohne* die Kosten eines großen, teuren Multiplexes tragen zu müssen. Denn genau diese Option ist es, für die DAB nicht ausgelegt ist – und genau diese Lücke könnte mit *DRM⁺* gefüllt werden.

Jenseits der technischen Überlegungen stellt die nachfolgende Liste einige Argumente dar, die sowohl aus der Sicht des Marktes als auch der Frequenzregulierung relevant sind:

- Das VHF-Band III ist exklusiv dem *digitalen* Rundfunk vorbehalten.
- Die ursprüngliche Absicht, Band III komplett mit DAB aufzufüllen, wird nicht realisiert werden. Mittlerweile ist es offensichtlich, daß nur ein Teilbereich des Bandes durch DAB genutzt wird. Geeignete freie DAB-Blöcke könnten daher durch *DRM⁺*-Sender für Rundfunkstationen mit einem eindeutigen regionalen und bzw. oder regionalem Schwerpunkt genutzt werden, wie in Abb. 14.1 skizziert.

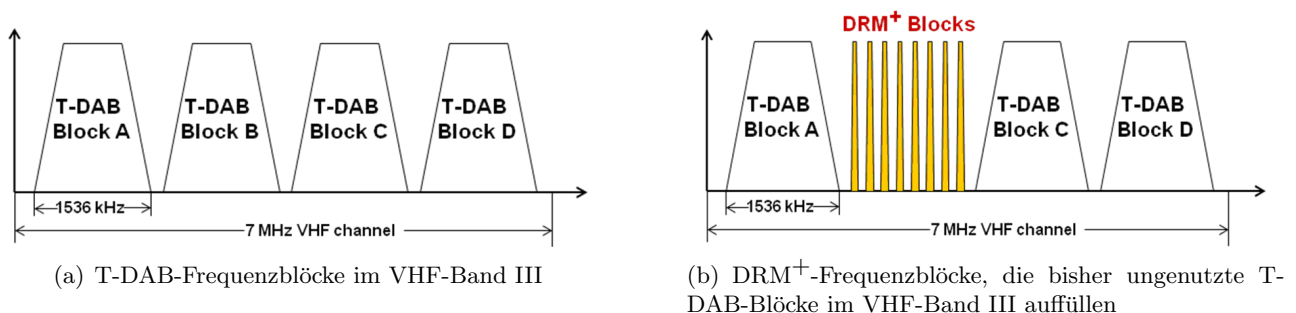


Abb. 14.1.: Das VHF-Band III der Zukunft?

- Die bisher gültigen und rechtskräftigen Methoden zur Prüfung der Verträglichkeit zwischen Funksystemen in Band II gegenüber dem analogen Tonrundfunk sowie die Flugnavigationsdiensten – welche eine Einführung von *DRM⁺* in Band II in der nahen Zukunft verhindern – sind innerhalb von Band III von geringem Interesse, von dem oberen Frequenzbereich ab 223 MHz und darüber abgesehen.
- Im VHF-Band III sind ausschliesslich digitale Dienste im Einsatz. Daher ist in diesem Bereich die Koordinierung zwischen den verschiedenen Sendern erheblich leichter zu lösen im Vergleich zu einem analog-digital Mischbetrieb innerhalb von Band II, der bei einer weichen Migration von UKW-FM zu einem digitalen Nachfolgesystem stattfinden würde. Dies trifft insbesondere im Hinblick auf die internationale Koordinierung und Vereinbarungen zum Schutz bestehender FM-Sender zu.
- Angefangen von der OFDM-Modulation bis hin zur MPEG-4-AAC-Audiokodierung – die DAB- und die DRM-Familie haben in technischer Hinsicht viele Gemeinsamkeiten. Dies ermöglicht insbesondere beim gemeinsamen Betrieb in Band III die Nutzung von Synergieeffekten nicht

nur innerhalb der Empfänger, so dass kostengünstige Multistandard-Produkte dem Endkunden offeriert werden könnten.

Daher wird an der Fachhochschule Kaiserslautern auch weiterhin DRM⁺ ein Thema sein, um diese Fragen näher zu beleuchten. Hierzu wird beispielsweise:

- Untersucht, wie der momentan gültige DRM Mode E (DRM⁺, spezifiziert bis 174 MHz) auf die Effekte bei höheren Frequenzen reagiert, z.B. auf den Dopplereffekt.
- Eine messtechnische Untersuchung mit Mittenfrequenzen bis zu 230 MHz der notwendigen Schutzabstände für DRM⁺ gegenüber T-DAB und umgekehrt durchgeführt.
- Die Praxistauglichkeit und die Messergebnisse in einem Strahlungsversuch erprobt.
- Anhand von Frequenzplanungen wie das oben beschriebene Szenario mittels DRM⁺ die DAB-Systemfamilie ergänzt werden könnte, d.h. inwiefern sich in Band III die lokale Versorgung eines kleinen Anbieters realisieren lassen würde. Dieser Fall zielt auf die vielen kommerziellen lokalen Programme in Deutschland ab, lässt sich aber auch auf die regionale Bedeckung öffentlicher Programmveranstalter übertragen.

In diesem Sinne: DRM⁺ bleibt auch weiterhin ein spannendes Thema – die ersten Bits im Kanal 10B wurden via DRM⁺ bereits erfolgreich übertragen!

Teil IV.

Anhänge

15. Schutzabstandsmessungen

15.1. Spektrumsaufnahmen der verwendeten Signale mit hoher Dynamik

Auf der nachfolgenden Seite werden die gemessenen spektralen Leistungsdichten der bei den Schutzabstandsmessungen verwendeten Störsignale mit einer gegenüber herkömmlichen Spektrumanalysatoren erhöhten Meßdynamik dargestellt.

Zur Realisierung dieser Messungen wird ein Spektrumanalyzer (oder: Messempfänger) verwendet. Ein steiles, vorgeschaltetes Filter dämpft hierbei die Hauptaussendung des zu vermessenden Senders. Somit kann schon bei sehr geringen Frequenzabständen zu dem Sendesignal die Empfindlichkeit des Empfängers erheblich gegenüber dem ungefiltertem Fall gesteigert werden, ohne diesen zu übersteuern. Auf diesem Weg ist es möglich die Randaussendungen des untersuchten Systems wesentlich genauer von dem sonst erhöhten Eigenrauschen des Empfängers zu identifizieren.

Durch eine der Signalerfassung folgende Messung des Betragsfrequenzgang des Filters kann der ursprüngliche, ungefilterte Signalverlauf wiederhergestellt werden. Abschliessend wird das Empfängereigenrauschen erfasst, was in Kombination mit dem Betragsfrequenzgang des Filters auf die endgültige Empfindlichkeit der Messanordnung schliessen lässt. Die verwendete Messanordnung ist in der nachfolgenden Abb. 15.1 dargestellt.

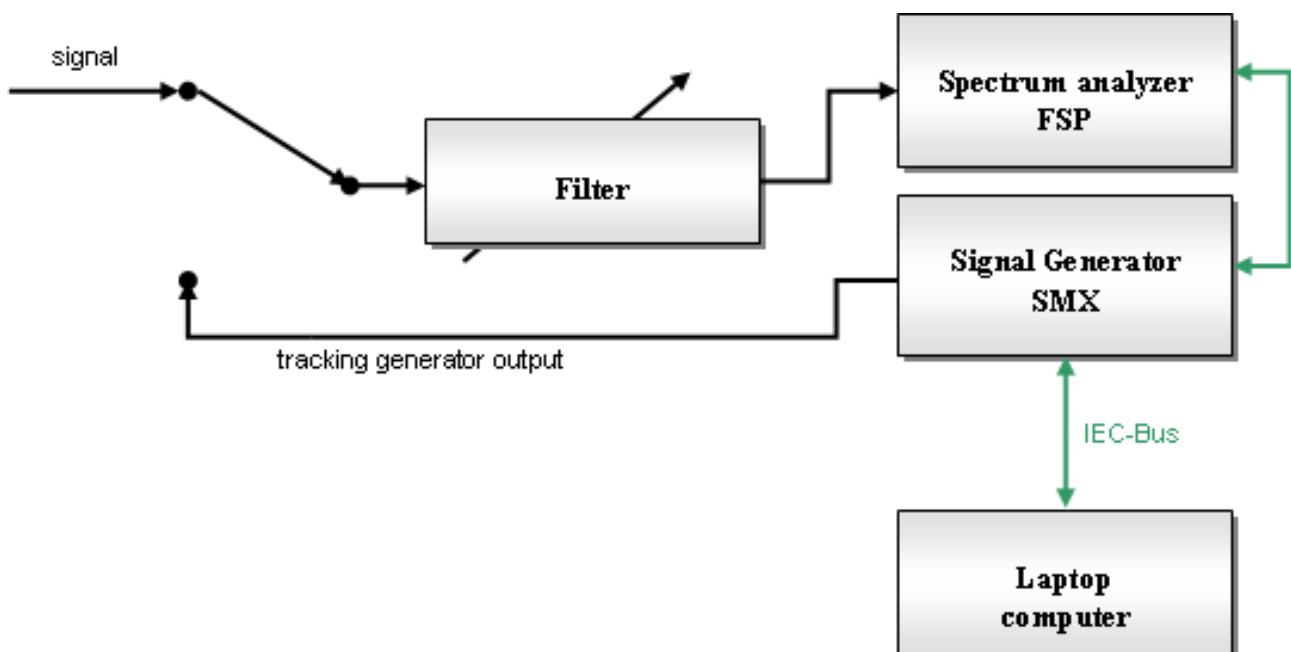
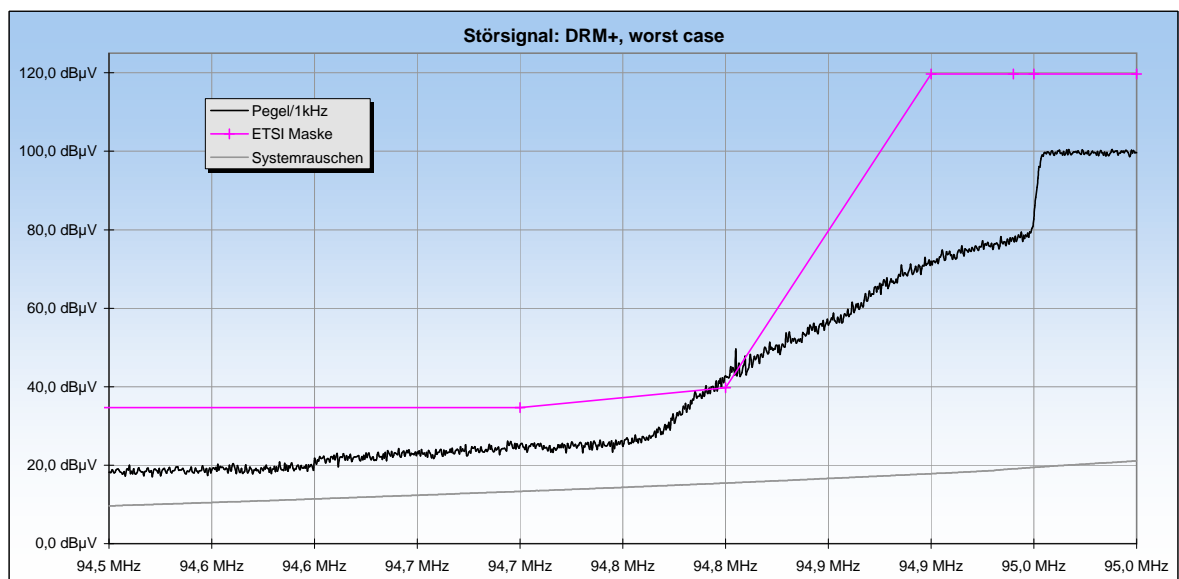
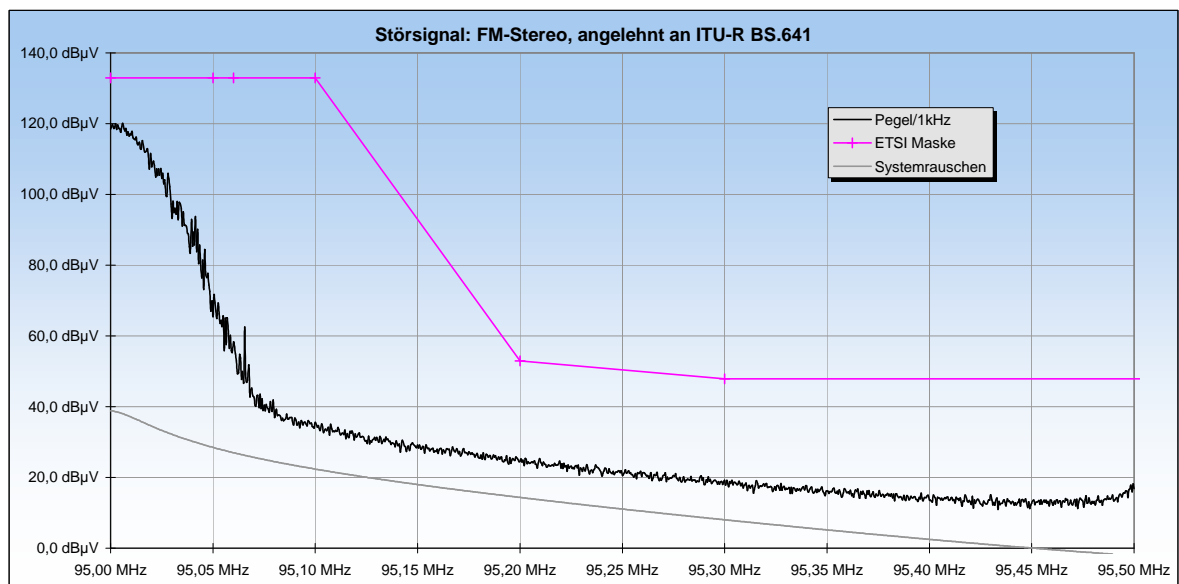
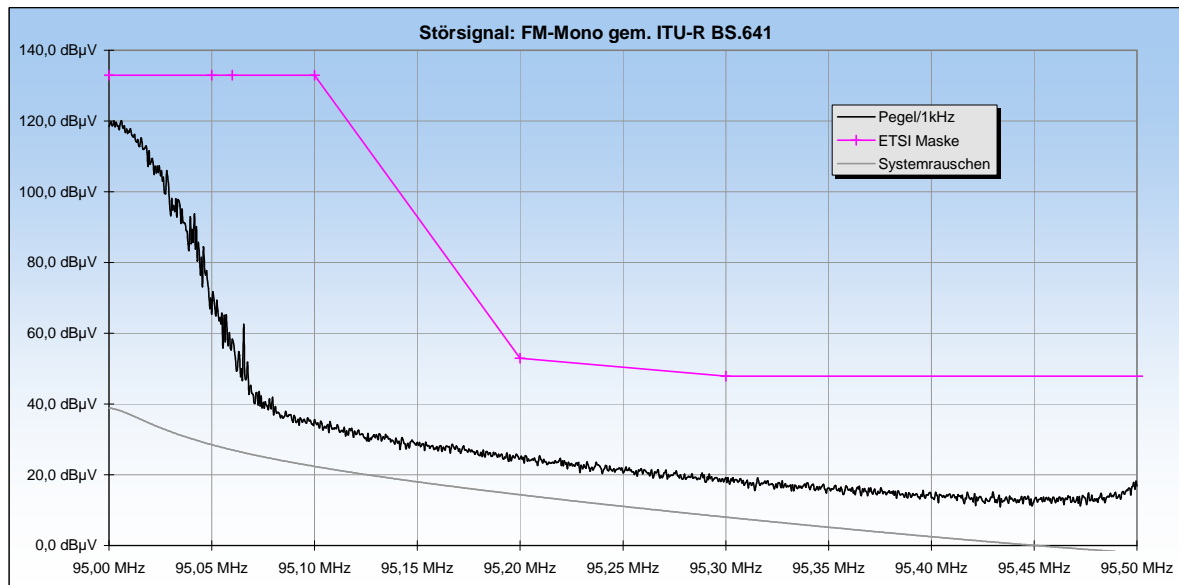


Abb. 15.1.: Messaufbau zur Messung von Signalspektren mit hoher Dynamik



15.2. Messergebnisse in tabellarischer Form

15.2.1. Störsignal FM-Mono und FM-Stereo

Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+Empfänger: **ATR4262**

Empfindlichkeit: -108 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: **4QAM** Coderate 4/10

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -88 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -98 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: **FM-BC**

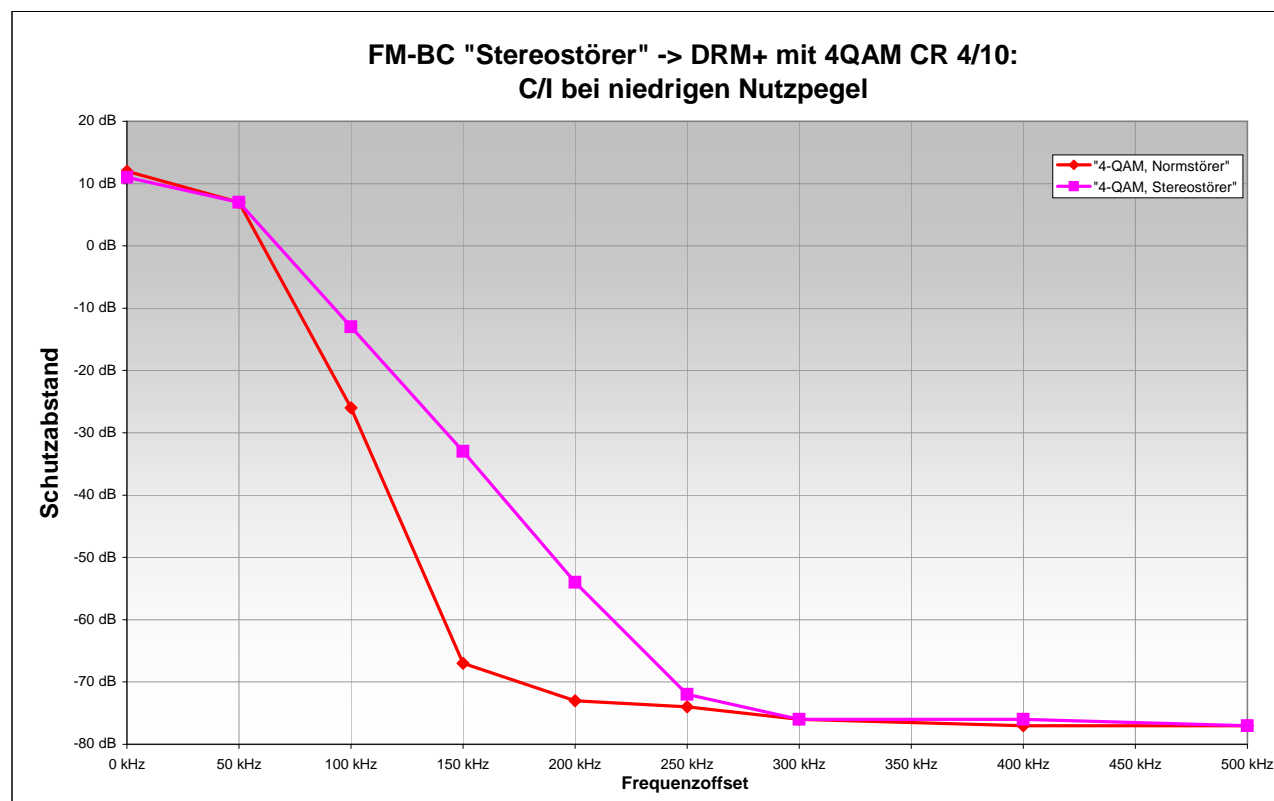
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: -11 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate 10E-4 nach Viterbi

"4-QAM, Normstörer"		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	99 dB	-110 dBm	12 dB
50 kHz	95,05 MHz	94 dB	-105 dBm	7 dB
100 kHz	95,10 MHz	61 dB	-72 dBm	-26 dB
150 kHz	95,15 MHz	20 dB	-31 dBm	-67 dB
200 kHz	95,20 MHz	14 dB	-25 dBm	-73 dB
250 kHz	95,25 MHz	13 dB	-24 dBm	-74 dB
300 kHz	95,30 MHz	11 dB	-22 dBm	-76 dB
400 kHz	95,40 MHz	10 dB	-21 dBm	-77 dB
500 kHz	95,50 MHz	10 dB	-21 dBm	-77 dB

"4-QAM, Stereostörer"		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	98 dB	-109 dBm	11 dB
50 kHz	95,05 MHz	94 dB	-105 dBm	7 dB
100 kHz	95,10 MHz	74 dB	-85 dBm	-13 dB
150 kHz	95,15 MHz	54 dB	-65 dBm	-33 dB
200 kHz	95,20 MHz	33 dB	-44 dBm	-54 dB
250 kHz	95,25 MHz	15 dB	-26 dBm	-72 dB
300 kHz	95,30 MHz	11 dB	-22 dBm	-76 dB
400 kHz	95,40 MHz	11 dB	-22 dBm	-76 dB
500 kHz	95,50 MHz	10 dB	-21 dBm	-77 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+**Empfänger:** ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM CR 1/3

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -81 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -91 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: FM-BC

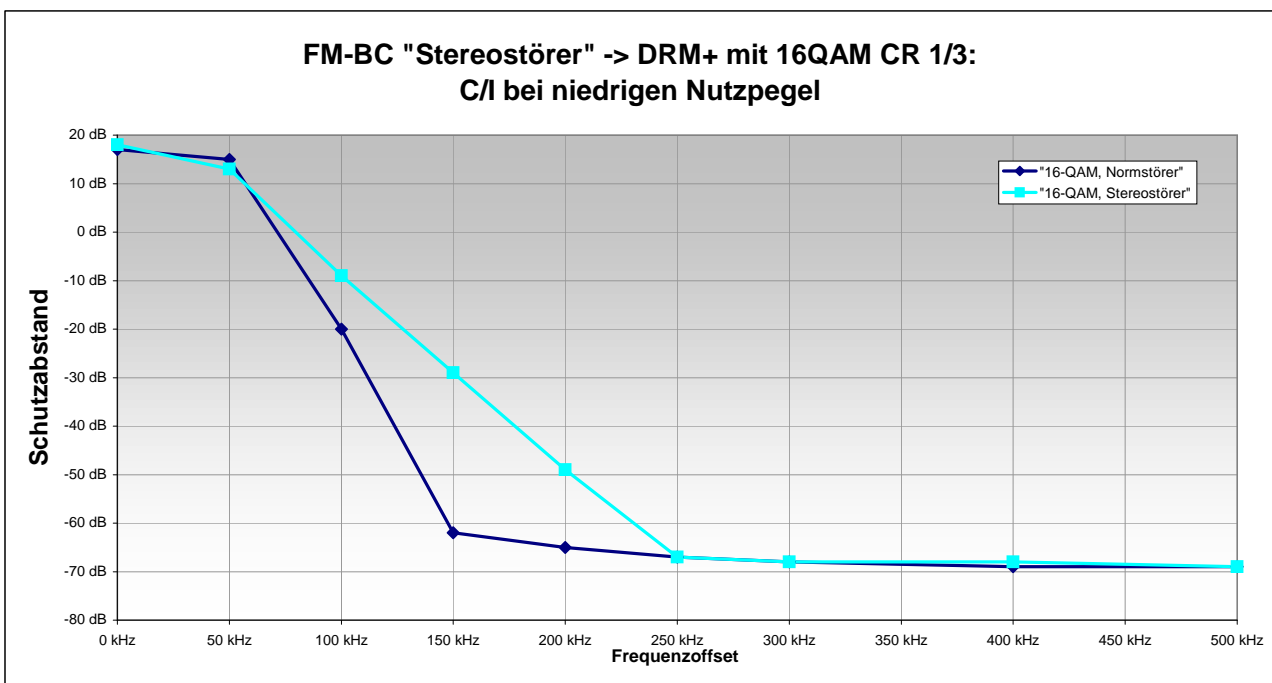
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: -11 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate $10E-4$ nach Viterbi

"16-QAM, Normstörer"		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	97 dB	-108 dBm	17 dB
50 kHz	95,05 MHz	95 dB	-106 dBm	15 dB
100 kHz	95,10 MHz	60 dB	-71 dBm	-20 dB
150 kHz	95,15 MHz	18 dB	-29 dBm	-62 dB
200 kHz	95,20 MHz	15 dB	-26 dBm	-65 dB
250 kHz	95,25 MHz	13 dB	-24 dBm	-67 dB
300 kHz	95,30 MHz	12 dB	-23 dBm	-68 dB
400 kHz	95,40 MHz	11 dB	-22 dBm	-69 dB
500 kHz	95,50 MHz	11 dB	-22 dBm	-69 dB

"16-QAM, Stereostörer"		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	98 dB	-109 dBm	18 dB
50 kHz	95,05 MHz	93 dB	-104 dBm	13 dB
100 kHz	95,10 MHz	71 dB	-82 dBm	-9 dB
150 kHz	95,15 MHz	51 dB	-62 dBm	-29 dB
200 kHz	95,20 MHz	31 dB	-42 dBm	-49 dB
250 kHz	95,25 MHz	13 dB	-24 dBm	-67 dB
300 kHz	95,30 MHz	12 dB	-23 dBm	-68 dB
400 kHz	95,40 MHz	12 dB	-23 dBm	-68 dB
500 kHz	95,50 MHz	11 dB	-22 dBm	-69 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM 1/3 mit erhöhtem Nutzpegel

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepegel: -46 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: FM-BC "Stereostörer"

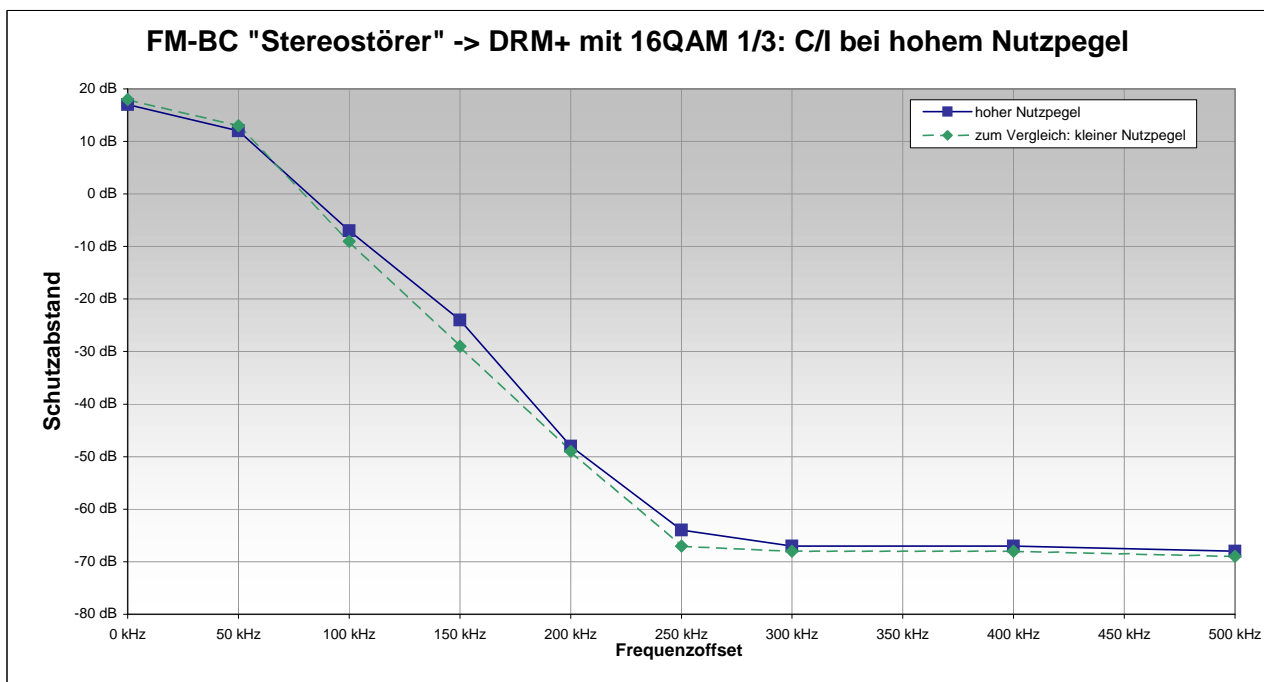
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: 20 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate $10E-4$ nach Viterbi

kleiner Nutzpegel		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			18 dB
50 kHz	95,05 MHz			13 dB
100 kHz	95,10 MHz			-9 dB
150 kHz	95,15 MHz			-29 dB
200 kHz	95,20 MHz			-49 dB
250 kHz	95,25 MHz			-67 dB
300 kHz	95,30 MHz			-68 dB
400 kHz	95,40 MHz			-68 dB
500 kHz	95,50 MHz			-69 dB

hoher Nutzpegel		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	93 dB	-73 dBm	17 dB
50 kHz	95,05 MHz	88 dB	-68 dBm	12 dB
100 kHz	95,10 MHz	69 dB	-49 dBm	-7 dB
150 kHz	95,15 MHz	52 dB	-32 dBm	-24 dB
200 kHz	95,20 MHz	28 dB	-8 dBm	-48 dB
250 kHz	95,25 MHz	12 dB	8 dBm	-64 dB
300 kHz	95,30 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB
400 kHz	95,40 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB
500 kHz	95,50 MHz	8 dB	12 dBm	-68 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM 1/3

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -46 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm RMS lang gemittelt, am Rx-Eingang

Störsignal: FM-BC "Stereostörer"

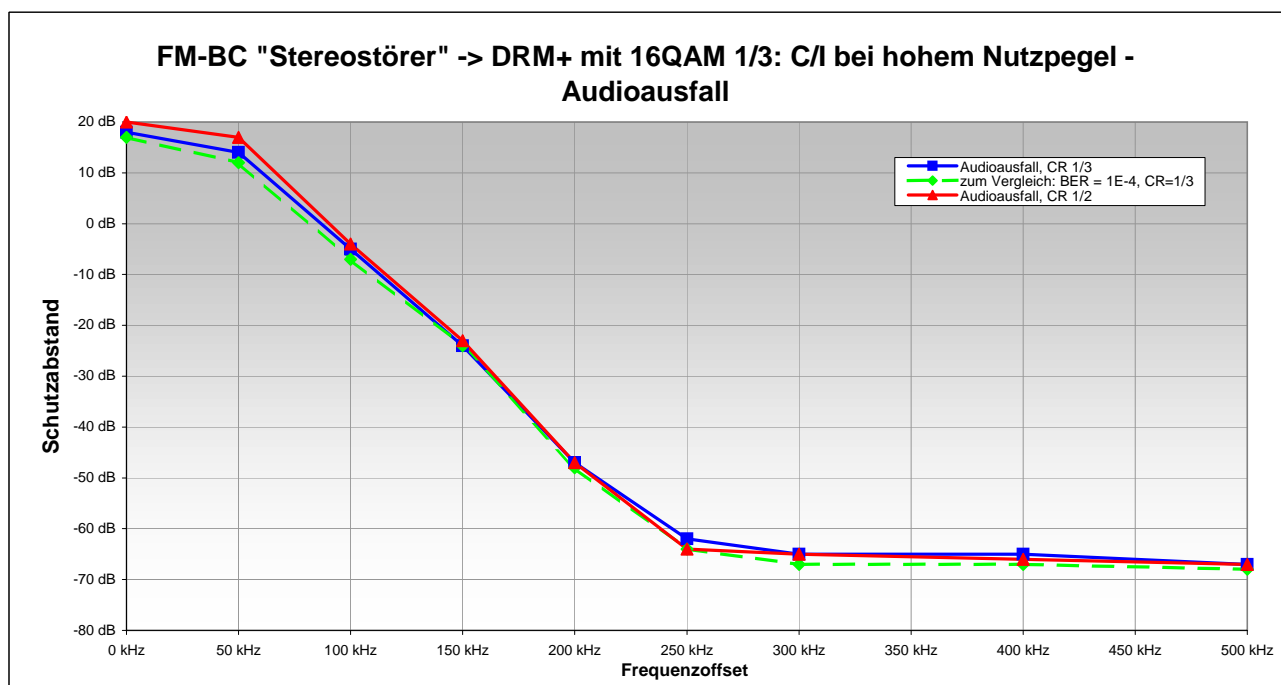
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: 20 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audio fällt aus (Audiodecoder stürzt ab)

BER 10E-4		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			17 dB
50 kHz	95,05 MHz			12 dB
100 kHz	95,10 MHz			-7 dB
150 kHz	95,15 MHz			-24 dB
200 kHz	95,20 MHz			-48 dB
250 kHz	95,25 MHz			-64 dB
300 kHz	95,30 MHz			-67 dB
400 kHz	95,40 MHz			-67 dB
500 kHz	95,50 MHz			-68 dB

Audioausfall, CR 1/3		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	94 dB	-74 dBm	18 dB
50 kHz	95,05 MHz	90 dB	-70 dBm	14 dB
100 kHz	95,10 MHz	71 dB	-51 dBm	-5 dB
150 kHz	95,15 MHz	52 dB	-32 dBm	-24 dB
200 kHz	95,20 MHz	29 dB	-9 dBm	-47 dB
250 kHz	95,25 MHz	14 dB	6 dBm	-62 dB
300 kHz	95,30 MHz	11 dB	9 dBm	-65 dB
400 kHz	95,40 MHz	11 dB	9 dBm	-65 dB
500 kHz	95,50 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+**Empfänger:** ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM Coderate 1/2 und 1/3

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -46 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm RMS lang gemittelt, am Rx-Eingang

Störsignal: FM-BC "Stereostörer"

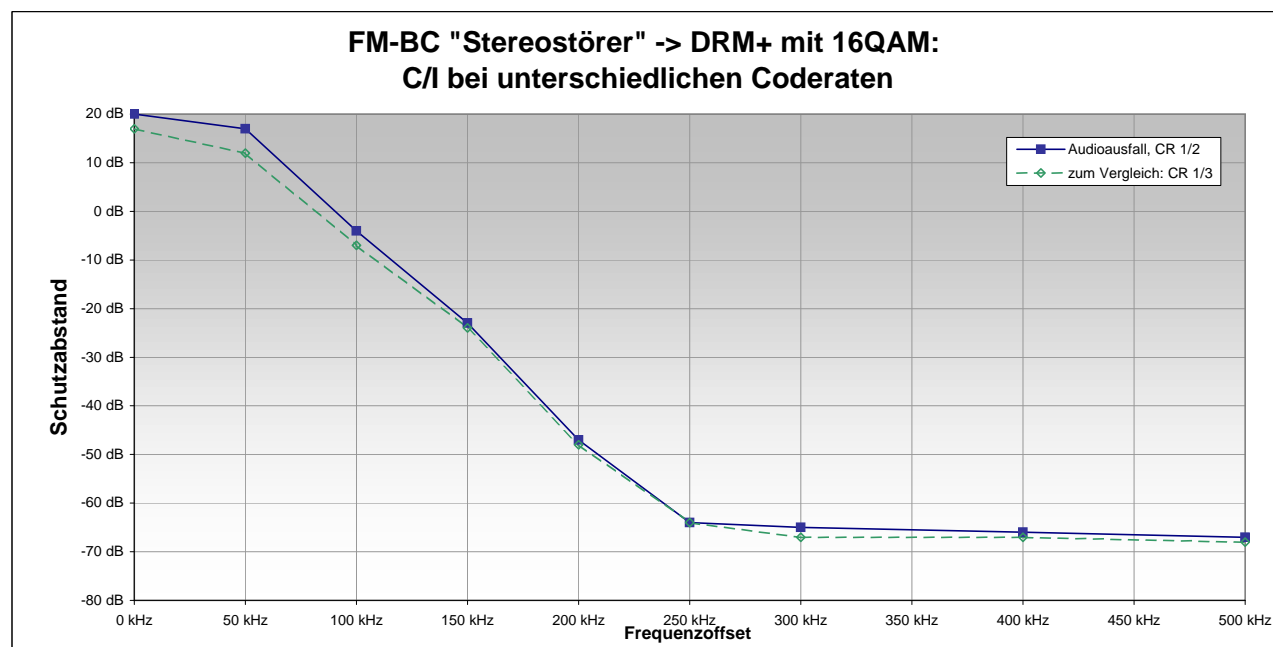
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: 20 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audio fällt aus (Audiodecoder stürzt ab)

CR 1/3		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			17 dB
50 kHz	95,05 MHz			12 dB
100 kHz	95,10 MHz			-7 dB
150 kHz	95,15 MHz			-24 dB
200 kHz	95,20 MHz			-48 dB
250 kHz	95,25 MHz			-64 dB
300 kHz	95,30 MHz			-67 dB
400 kHz	95,40 MHz			-67 dB
500 kHz	95,50 MHz			-68 dB

Audioausfall, CR 1/2		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	96 dB	-76 dBm	20 dB
50 kHz	95,05 MHz	93 dB	-73 dBm	17 dB
100 kHz	95,10 MHz	72 dB	-52 dBm	-4 dB
150 kHz	95,15 MHz	53 dB	-33 dBm	-23 dB
200 kHz	95,20 MHz	29 dB	-9 dBm	-47 dB
250 kHz	95,25 MHz	12 dB	8 dBm	-64 dB
300 kHz	95,30 MHz	11 dB	9 dBm	-65 dB
400 kHz	95,40 MHz	10 dB	10 dBm	-66 dB
500 kHz	95,50 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -86 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM 1/3 mit Fading (autom. Gainregelung)

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -46 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm RMS lang gemittelt, am Rx-Eingang

Störsignal: FM-BC "Stereostörer"

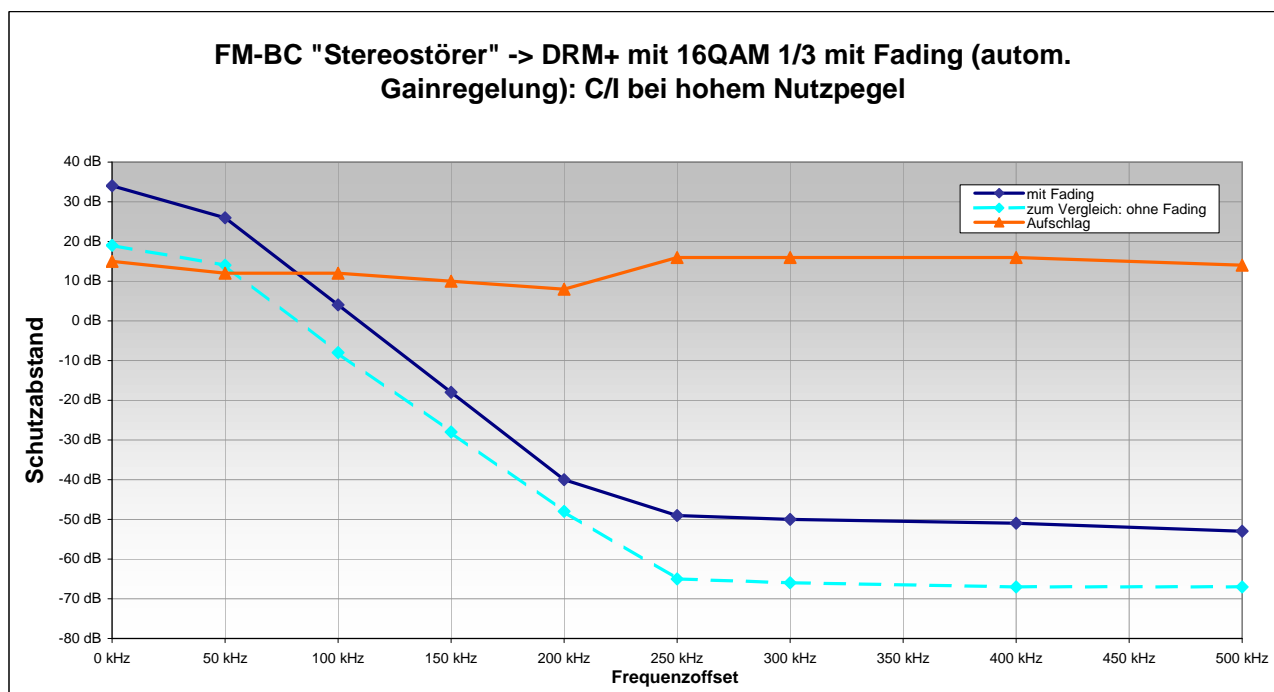
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: 20 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audio fällt aus (Audiodecoder stürzt ab)

ohne Fading		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			19 dB
50 kHz	95,05 MHz			14 dB
100 kHz	95,10 MHz			-8 dB
150 kHz	95,15 MHz			-28 dB
200 kHz	95,20 MHz			-48 dB
250 kHz	95,25 MHz			-65 dB
300 kHz	95,30 MHz			-66 dB
400 kHz	95,40 MHz			-67 dB
500 kHz	95,50 MHz			-67 dB

mit Fading		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	110 dB	-90 dBm	34 dB
50 kHz	95,05 MHz	102 dB	-82 dBm	26 dB
100 kHz	95,10 MHz	80 dB	-60 dBm	4 dB
150 kHz	95,15 MHz	58 dB	-38 dBm	-18 dB
200 kHz	95,20 MHz	36 dB	-16 dBm	-40 dB
250 kHz	95,25 MHz	27 dB	-7 dBm	-49 dB
300 kHz	95,30 MHz	26 dB	-6 dBm	-50 dB
400 kHz	95,40 MHz	25 dB	-5 dBm	-51 dB
500 kHz	95,50 MHz	23 dB	-3 dBm	-53 dB



Schutzabstandsmessungen FM-BC auf DRM+Empfänger: **ATR4262**

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: **16QAM 1/3 ohne Fading**

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -46 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 10 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm RMS lang gemittelt, am Rx-Eingang

Störsignal: **FM-BC "Stereostörer"**

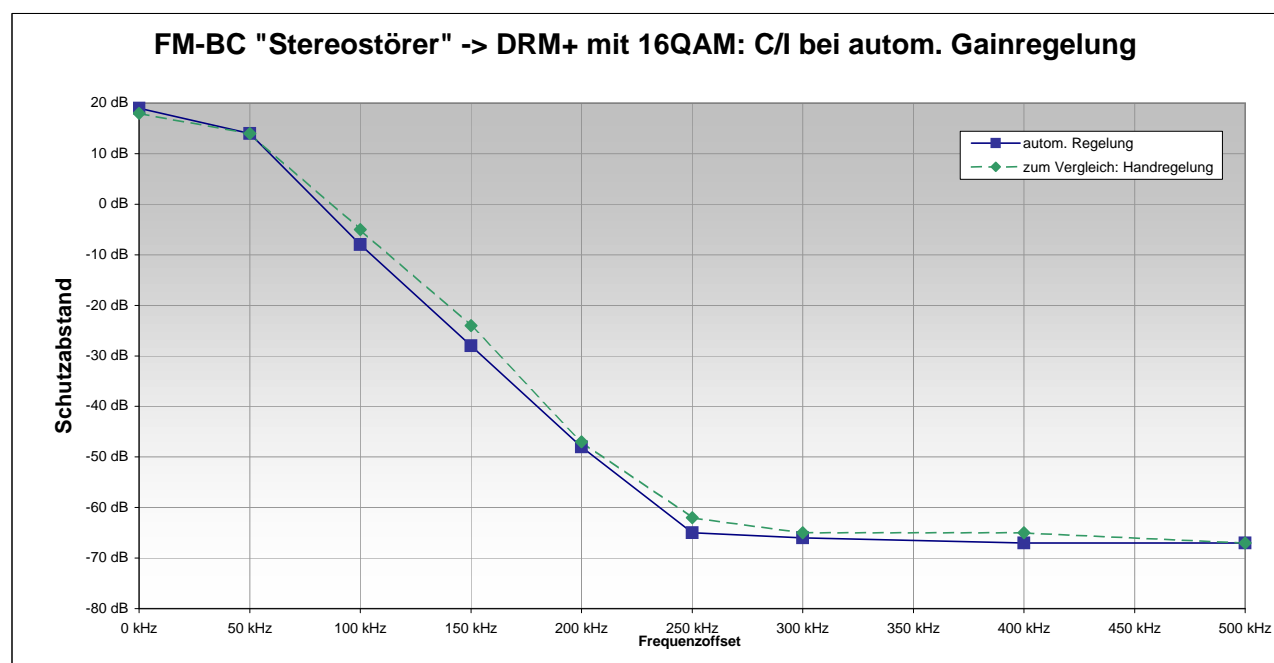
Frequenz: (variabel)

Voller Pegel: 20 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audio fällt aus (Audiodecoder stürzt ab)

Handregelung		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			18 dB
50 kHz	95,05 MHz			14 dB
100 kHz	95,10 MHz			-5 dB
150 kHz	95,15 MHz			-24 dB
200 kHz	95,20 MHz			-47 dB
250 kHz	95,25 MHz			-62 dB
300 kHz	95,30 MHz			-65 dB
400 kHz	95,40 MHz			-65 dB
500 kHz	95,50 MHz			-67 dB

autom. Regelung		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	95 dB	-75 dBm	19 dB
50 kHz	95,05 MHz	90 dB	-70 dBm	14 dB
100 kHz	95,10 MHz	68 dB	-48 dBm	-8 dB
150 kHz	95,15 MHz	48 dB	-28 dBm	-28 dB
200 kHz	95,20 MHz	28 dB	-8 dBm	-48 dB
250 kHz	95,25 MHz	11 dB	9 dBm	-65 dB
300 kHz	95,30 MHz	10 dB	10 dBm	-66 dB
400 kHz	95,40 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB
500 kHz	95,50 MHz	9 dB	11 dBm	-67 dB



15.2.2. Störsignal DRM⁺

Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: **ATR4262**

Empfindlichkeit: -108 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: **4QAM**

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -77 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -98 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: **DRM+**

Frequenz: (variabel)

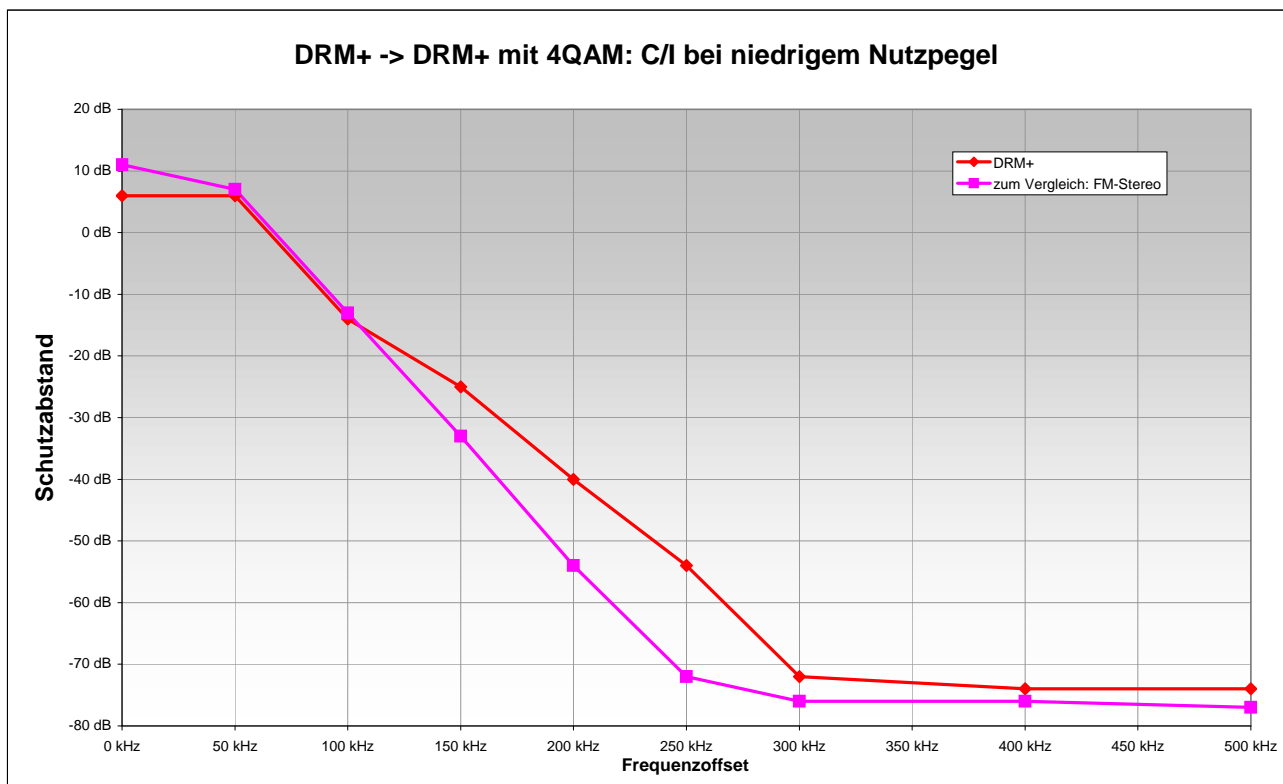
SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate 10E-4 nach Viterbi

DRM+		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	116 dB	-104 dBm	6 dB
50 kHz	95,05 MHz	116 dB	-104 dBm	6 dB
100 kHz	95,10 MHz	96 dB	-84 dBm	-14 dB
150 kHz	95,15 MHz	85 dB	-73 dBm	-25 dB
200 kHz	95,20 MHz	70 dB	-58 dBm	-40 dB
250 kHz	95,25 MHz	56 dB	-44 dBm	-54 dB
300 kHz	95,30 MHz	38 dB	-26 dBm	-72 dB
400 kHz	95,40 MHz	36 dB	-24 dBm	-74 dB
500 kHz	95,50 MHz	36 dB	-24 dBm	-74 dB

zum Vergleich: FM-Stereo		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			11 dB
50 kHz	95,05 MHz			7 dB
100 kHz	95,10 MHz			-13 dB
150 kHz	95,15 MHz			-33 dB
200 kHz	95,20 MHz			-54 dB
250 kHz	95,25 MHz			-72 dB
300 kHz	95,30 MHz			-76 dB
400 kHz	95,40 MHz			-76 dB
500 kHz	95,50 MHz			-77 dB



Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: **ATR4262**

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: **16QAM CR 1/3**

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -70 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -91 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: **DRM+**

Frequenz: (variabel)

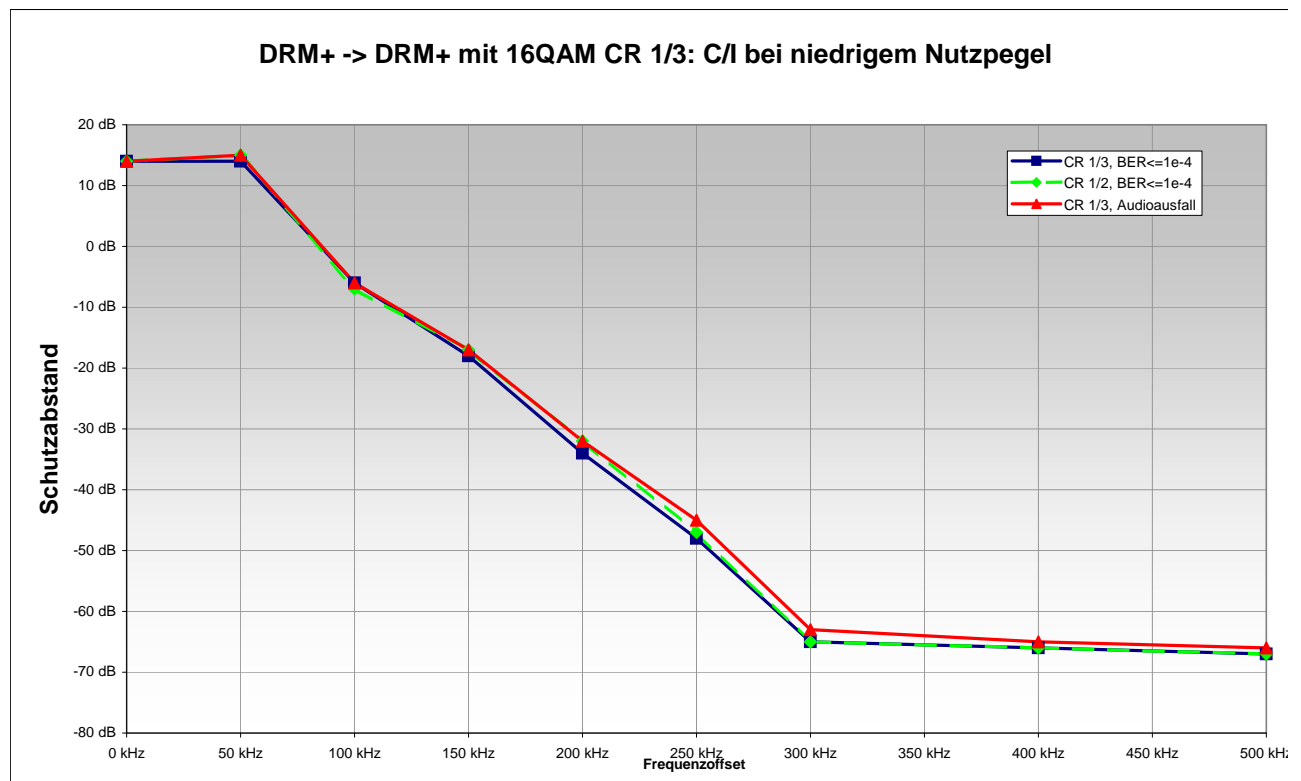
SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate $10E-4$ nach Viterbi

CR 1/3, BER $\leq 1e-4$		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	117 dB	-105 dBm	14 dB
50 kHz	95,05 MHz	117 dB	-105 dBm	14 dB
100 kHz	95,10 MHz	97 dB	-85 dBm	-6 dB
150 kHz	95,15 MHz	85 dB	-73 dBm	-18 dB
200 kHz	95,20 MHz	69 dB	-57 dBm	-34 dB
250 kHz	95,25 MHz	55 dB	-43 dBm	-48 dB
300 kHz	95,30 MHz	38 dB	-26 dBm	-65 dB
400 kHz	95,40 MHz	37 dB	-25 dBm	-66 dB
500 kHz	95,50 MHz	36 dB	-24 dBm	-67 dB

zum Vergleich: FM-Stereo		Störsignal	
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel
0 kHz	95,00 MHz		
50 kHz	95,05 MHz		
100 kHz	95,10 MHz		
150 kHz	95,15 MHz		
200 kHz	95,20 MHz		
250 kHz	95,25 MHz		
300 kHz	95,30 MHz		
400 kHz	95,40 MHz		
500 kHz	95,50 MHz		



Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: **ATR4262**

Empfindlichkeit: -100 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: **16QAM CR 1/2**

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -69 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -90 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: **DRM+**

Frequenz: (variabel)

SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

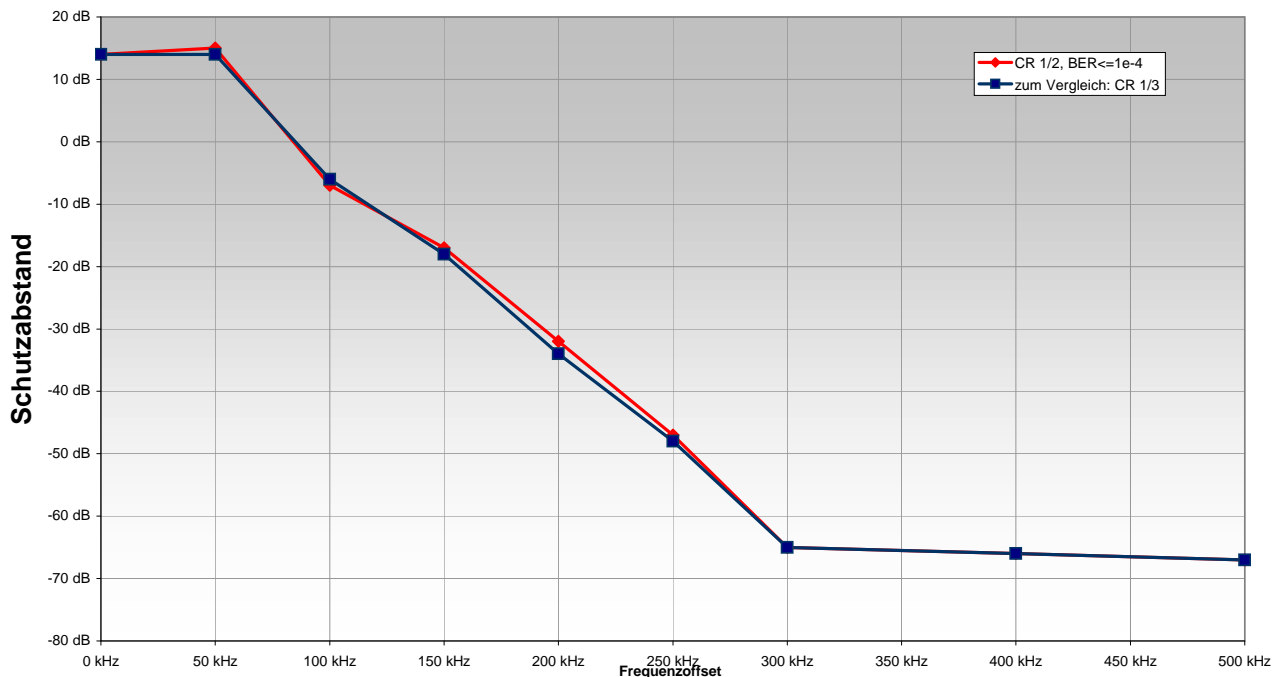
Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate $10E-4$ nach Viterbi

CR 1/2, BER $\leq 1e-4$		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	116 dB	-104 dBm	14 dB
50 kHz	95,05 MHz	117 dB	-105 dBm	15 dB
100 kHz	95,10 MHz	95 dB	-83 dBm	-7 dB
150 kHz	95,15 MHz	85 dB	-73 dBm	-17 dB
200 kHz	95,20 MHz	70 dB	-58 dBm	-32 dB
250 kHz	95,25 MHz	55 dB	-43 dBm	-47 dB
300 kHz	95,30 MHz	37 dB	-25 dBm	-65 dB
400 kHz	95,40 MHz	36 dB	-24 dBm	-66 dB
500 kHz	95,50 MHz	35 dB	-23 dBm	-67 dB

zum Vergleich: CR 1/3		Störsignal	
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel
0 kHz	95,00 MHz		
50 kHz	95,05 MHz		
100 kHz	95,10 MHz		
150 kHz	95,15 MHz		
200 kHz	95,20 MHz		
250 kHz	95,25 MHz		
300 kHz	95,30 MHz		
400 kHz	95,40 MHz		
500 kHz	95,50 MHz		

DRM+ -> DRM+ mit 16QAM CR 1/2: C/I bei niedrigem Nutzpegel



Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM CR 1/3

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -35 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -56 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: DRM+

Frequenz: (variabel)

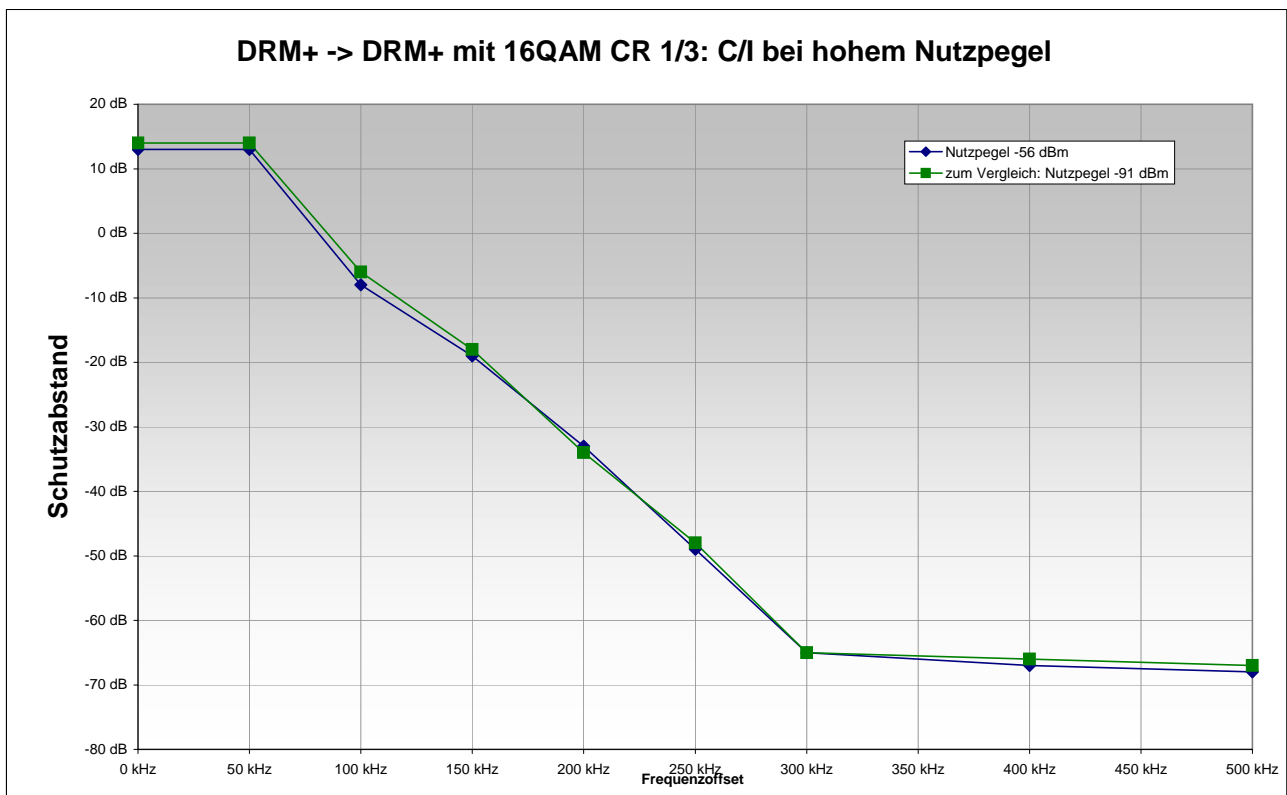
SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Bitfehlerrate 10E-4 nach Viterbi

Nutzpegel -56 dBm		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	81 dB	-69 dBm	13 dB
50 kHz	95,05 MHz	81 dB	-69 dBm	13 dB
100 kHz	95,10 MHz	60 dB	-48 dBm	-8 dB
150 kHz	95,15 MHz	49 dB	-37 dBm	-19 dB
200 kHz	95,20 MHz	35 dB	-23 dBm	-33 dB
250 kHz	95,25 MHz	19 dB	-7 dBm	-49 dB
300 kHz	95,30 MHz	3 dB	9 dBm	-65 dB
400 kHz	95,40 MHz	1 dB	11 dBm	-67 dB
500 kHz	95,50 MHz	0 dB	12 dBm	-68 dB

zum Vergleich: Nutzpegel -91 dBm		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz			14 dB
50 kHz	95,05 MHz			14 dB
100 kHz	95,10 MHz			-6 dB
150 kHz	95,15 MHz			-18 dB
200 kHz	95,20 MHz			-34 dB
250 kHz	95,25 MHz			-48 dB
300 kHz	95,30 MHz			-65 dB
400 kHz	95,40 MHz			-66 dB
500 kHz	95,50 MHz			-67 dB



Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM CR 1/3

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -38 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -59 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: DRM+

Frequenz: (variabel)

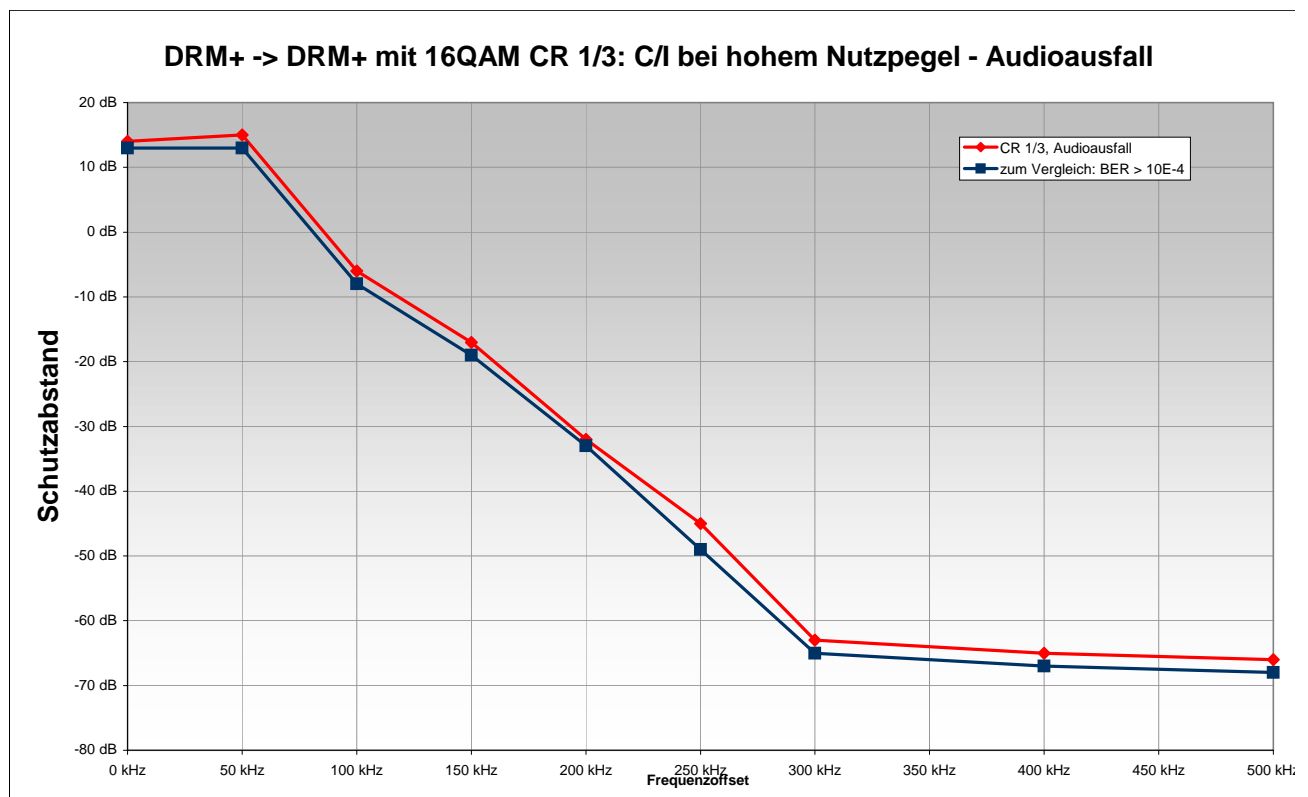
SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audioausfall

CR 1/3, Audioausfall		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	85 dB	-73 dBm	14 dB
50 kHz	95,05 MHz	86 dB	-74 dBm	15 dB
100 kHz	95,10 MHz	65 dB	-53 dBm	-6 dB
150 kHz	95,15 MHz	54 dB	-42 dBm	-17 dB
200 kHz	95,20 MHz	39 dB	-27 dBm	-32 dB
250 kHz	95,25 MHz	26 dB	-14 dBm	-45 dB
300 kHz	95,30 MHz	8 dB	4 dBm	-63 dB
400 kHz	95,40 MHz	6 dB	6 dBm	-65 dB
500 kHz	95,50 MHz	5 dB	7 dBm	-66 dB

zum Vergleich: BER > 10E-4		Störsignal	
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel
0 kHz	95,00 MHz		
50 kHz	95,05 MHz		
100 kHz	95,10 MHz		
150 kHz	95,15 MHz		
200 kHz	95,20 MHz		
250 kHz	95,25 MHz		
300 kHz	95,30 MHz		
400 kHz	95,40 MHz		
500 kHz	95,50 MHz		



Schutzabstandsmessungen DRM+ auf DRM+

Empfänger: ATR4262

Empfindlichkeit: -101 dBm am Rx-Eingang

Nutzsignal: 16QAM CR 1/3 mit hohem Nutzpegel

Frequenz: 95,0 MHz

Sendepiegel: -38 dBm SMU-RMS Einstellung

Dämpfung: 21 dB vom SMU-Ausgang bis Eingang Rx

Nutzpegel: -59 dBm am Rx-Eingang

Störsignal: DRM+

Frequenz: (variabel)

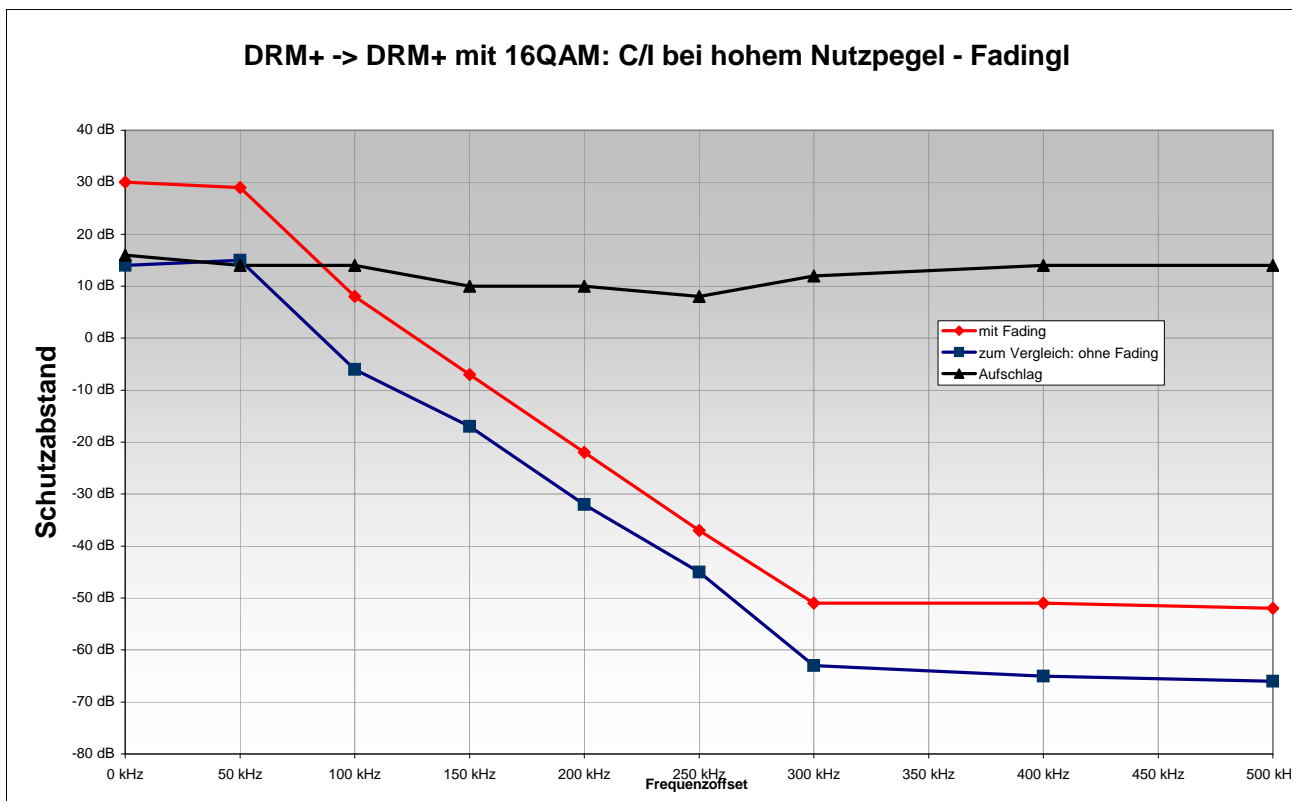
SMU-Pegel: 16 dBm RMS Ablesewert

Voller Pegel: 12 dBm am Rx-Eingang bei 0 dB Dämpfung ohne zusätzl. Dämpfungsglieder

Kriterium: Audioausfall

mit Fading		Störsignal		
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel	C/I
0 kHz	95,00 MHz	101 dB	-89 dBm	30 dB
50 kHz	95,05 MHz	100 dB	-88 dBm	29 dB
100 kHz	95,10 MHz	79 dB	-67 dBm	8 dB
150 kHz	95,15 MHz	64 dB	-52 dBm	-7 dB
200 kHz	95,20 MHz	49 dB	-37 dBm	-22 dB
250 kHz	95,25 MHz	34 dB	-22 dBm	-37 dB
300 kHz	95,30 MHz	20 dB	-8 dBm	-51 dB
400 kHz	95,40 MHz	20 dB	-8 dBm	-51 dB
500 kHz	95,50 MHz	19 dB	-7 dBm	-52 dB

zum Vergleich: ohne Fading		Störsignal	
Offset	Störfrequenz	Dämpfung	Störpegel
0 kHz	95,00 MHz		
50 kHz	95,05 MHz		
100 kHz	95,10 MHz		
150 kHz	95,15 MHz		
200 kHz	95,20 MHz		
250 kHz	95,25 MHz		
300 kHz	95,30 MHz		
400 kHz	95,40 MHz		
500 kHz	95,50 MHz		



Literaturverzeichnis

- [Aud] AUDEMAT TV AND BROADCAST SOLUTIONS: Signal Monitoring. <http://audemat.com/tv-radio-11.html>
- [Ber05] BERNHARDT, Frank: *Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystems auf OFDM-Basis im UKW-Frequenzbereich*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, November 2005
- [Bro06] BRONGER, Torsten: Python GPIB etc. support with PyVISA. (2006). <http://pyvisa.sourceforge.net/>
- [Deu98] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., DIN: Meßverfahren für Funkempfänger für verschiedene Sendearten. Teil 4: Empfänger für frequenzmodulierte Ton-Rundfunksendungen. In: *DIN EN 60315-4* (1998)
- [Eur05] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI TS 102 821: Digital Radio Mondiale (DRM); Distribution and Communications Protocol (DCP). (2005), 03
- [Eur06a] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI EN 300 401 V1.4.1: Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. (2006), 06
- [Eur06b] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI EN 302181-1 V1.2.1: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Frequency Modulated (FM) sound broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods. (2006), 03
- [Eur06c] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI TS 102 349: Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCI). (2006), 03
- [Fei] FEILEN, Michael: DRM-Transmitter Spark. <http://www.drm-sender.de>
- [Fei05] FEILEN, Michael: *Objektorientierte Implementierung eines Sendesystems für Digital Radio Mondiale*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, Oktober 2005
- [Gem82] GEMISCHTE EXPERTENGRUPPE ARD/DBP: Richtlinie Nr. 5 R 4 - Richtlinie für die Beurteilung der UKW-Hörfunkversorgung (Mono und Stereo) bei ARD und DBP (wortgleich zu: FTZ 175R4). In: *Technische Richtlinien der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten in der Bundesrepublik Deutschland* (1982)
- [GRA08] GRASS DEVELOPMENT TEAM ; OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (Hrsg.): *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software*. Open Source Geospatial Foundation, 2008. <http://grass.osgeo.org>
- [HSE07] HASENPUSCH, Th. ; SCHAD, F. ; EFFINGER, R.: Compatibility Measurements: DRM120, DRM+ and HD-RadioTM interfering with FM Broadcast, Narrowband FM (BOS) and Aeronautical Radionavigation / Federal Network Agency of Germany and Fachhochschule Kaiserslautern. 2007 (G531/00328/07)

- [Ins09] INSTITUTE, European Broadcasting Union & European Telecommunications S. ; EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (Hrsg.): *ETSI ES 201 980 – Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification*. V3.1.1. 650 Route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis Cedex – FRANCE: European Telecommunications Standards Institute, Februar 2009
- [IRT09] IRT – INSTITUT FÜR RUNDFUNKTECHNIK: Frequenzplanungssoftware FRANSY. (2009). <http://www.irt.de/de/produkte/programmverbreitung/frequenzplanungssoftware-fransy.html>
- [ITU02a] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.412-9: Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF. (1986, 2002)
- [ITU02b] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.641: Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting. (1986, 2002)
- [ITU05] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R SM.1708: Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations. (2005)
- [Kam08] KAMMEYER, Karl-Dirk: *Nachrichtenübertragungstechnik*. 4. Auflage. Vieweg & Teubner, 2008
- [Küh08] KÜHN, Manfred: *Der digitale terrestrische Rundfunk*. Hüthig, 2008
- [Lee66] LEESON, D.B.: A simple model of feedback oscillator noise spectrum. In: *Proceedings of the IEEE* 54 (1966), Feb., Nr. 2, S. 329–330
- [Lee93] LEE, William C. Y.: *Mobile communications design fundamentals*. 2nd ed. Wiley-Interscience, 1993. – ISBN 0-471-57446-5
- [Leh06] LEHNERT, J.: Kann der UKW-Bereich noch digitalisiert werden? In: *FKT – Die Fachzeitschrift für Fernsehen, Film und Elektronische Medien* Ausgabe 5 (2006), S. 285–290
- [Lie09] LIECHTI, Chris: Python Serial Port Extension V2.4. (2009). <http://pyserial.sourceforge.net/>
- [MF73] MOTCHENBACHER ; FITCHEN: *Low-Noise Electronic Design*. John Wiley & Sons Inc, 1973
- [MH93] MITASOVA, H. ; HOFIERKA, L.: Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation; Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis. In: *Mathematical Geology* 25 (1993), S. 641–655, 657–667
- [Mic] MICROTELECOM S.R.I.: Perseus SDR Homepage. <http://microtelecom.it/perseus/>
- [Mic09] MICROGEN ELECTRONICS: TS9085 FM Modulation and Spectrum Analyzer. Technical Specification, Rev. 1.2. (2009). http://microgenelectronics.com/TS9085_spec_18may09.pdf
- [MS91] MÄUSL, Rudolf ; SCHLAGHECK, Erhard: *Meßverfahren in der Nachrichtenübertragungstechnik*. 2. Auflage. Hüthig Verlag, 1991. – ISBN 3-7785-2057-1
- [Mäu88] MÄUSL, Rudolf: *Analoge Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1988
- [Nat] NATIONAL INSTRUMENTS: National Instruments VISA. <http://www.ni.com/visa/>
- [Qua09] QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM ; OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (Hrsg.): *Quantum GIS Software*. Open Source Geospatial Foundation, 2009. <http://qgis.osgeo.org>

- [Roh05] ROHDE UND SCHWARZ (Hrsg.): *Vector Signal Generator SMU 200A – Manual*. Rohde und Schwarz, 2005
- [SKL⁺06] STEIL ; KREUTZER ; LEHNERT ; FEILEN ; URBANSKY ; SAUER-GREFF: Technical feasibility study and field trial concept for DRM-based digital radio in the VHF-FM radio band. In: GERHÄUSER, H. (Hrsg.): *7th Workshop on Digital Broadcasting*, 2006, S. 67ff.
- [SS08] SCHAD, F. ; STEIL, A.: Abschlussbericht zum DRM⁺-Feldversuch Kaiserslautern. Versuchszeitraum: 1. März 2008 – 31. Mai 2008 / Fachhochschule Kaiserslautern, LMK Rheinland-Pfalz. 2008
- [SSF⁺09] STEIL ; SCHAD ; FEILEN ; KÖHLER ; LEHNERT ; HEDRICH ; KILIAN: Digitising VHF FM sound broadcasting with DRM⁺ (DRM Mode E) – Aspects related to compatibility, coverage and radio network planning. In: *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2009
- [SSL08] STEIL, A. ; SCHAD, F. ; LEHNERT, J.: Neue Wege zur Digitalisierung des UKW-Hörfunks mit DRM⁺. In: *FKT – Die Fachzeitschrift für Fernsehen, Film und Elektronische Medien* Ausgabe 11 (2008), S. 645–650
- [SSR07] SCHAD, F. ; STEIL, A. ; ROSENBAUM, M.: Verträglichkeitsuntersuchungen zum Verhalten von DRM120 und HD-Radio gegenüber dem FM-Rundfunk, BOS-Funk und Flugfunkdiensten – Abschlussbericht / Fachhochschule Kaiserslautern. 2007
- [The09] THE PYTHON SOFTWARE FOUNDATION: Python Programming Language – Official Website. (2009). <http://python.org>
- [Zim05] ZIMMERMANN, Gerd: DRM⁺ Radio channel profiles for use in band II / T-Systems International GmbH; SU SI, SSC ENPS. 2005 (DRM-Doc. No. TC_CM302)

Abbildungsverzeichnis

4.1. Blockschaltbild des Hybridsenders TX FH	17
4.2. Blockschaltbild des DRM ⁺ -Empfängers	18
5.1. Messaufbau Rauschmaßmessung des Frontends	19
5.2. Amplitudengang des Frontends bei Eintonansteuerung	20
5.3. Bestimmung des empfängerseitigen Schulterabstands	21
5.4. Nahbereichsaufnahme des ZF-Filters	22
5.5. Breitbandige Darstellung des ZF-Filterverlaufs	22
5.6. Phasenrauschen des Frontends	23
5.7. Phasenrauschen des gesamten Empfängersystems, Nahaufnahme	24
6.1. Messaufbau zur Messung des senderseitigen IP3-Punktes	27
6.2. Intermodulationsspektrum am Senderausgang bei voller Leistung	28
6.3. Schulterabstand am Senderausgang bei voller Ausgangsleistung	29
6.4. Phasenrauschen am Senderausgang	30
7.1. Verbundphasenrauschen von Sender und Empfänger	31
7.2. Ergebnisse der BER- und MSC-FDR Simulationen im AWGN-Kanal	33
9.1. Histogramm der Spitzenhubverteilung (Monostörer). Blau: Verteilung; Gelb: Max-Hold (jeweils über die komplette Messzeit)	39
9.2. Spektren Monostörer Schutzabstandmessung	39
9.3. Histogramm der Spitzenhubverteilung (Stereostörer). Blau: Verteilung; Gelb: Max-Hold (jeweils über die komplette Messzeit)	40
9.4. Gemittelte Leistungsdichtespektren verschiedener Stereomodulationen	41
9.5. MaxHold-Spektren verschiedener Stereomodulationen	41
9.6. Leitsungsdichtespektrum des verwendeten DRM ⁺ -Störsignals	42
9.7. Schaltbild: Schutzabstandsmessung FM stört DRM ⁺	43
9.8. Schaltbild: Schutzabstandsmessung DRM ⁺ stört DRM ⁺	44
9.9. Schutzabstände für die 4-QAM-Variante gegen FM-Rundfunk, Mono- und Stereostörer. Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$	45
9.10. Schutzabstände für die 16-QAM-Variante gegen FM-Rundfunk, Mono- und Stereostö- rer. Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$	46
9.11. Schutzabstände für die 16-QAM-Variante gegen FM-Stereorundfunk; Störkriterium: Audioausfall	47
9.12. Schutzabstände für die 16-QAM-Variante mit Fading gegen FM-Stereorundfunk; Stör- kriterium: Audioausfall	48
9.13. Schutzabstände der 4-QAM-Variante gegenüber DRM ⁺ ; Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$.	49
9.14. Schutzabstände der 16-QAM-Variante gegenüber DRM ⁺ inkl. Variation von Störkrite- rium und Coderate	50
9.15. Schutzabstände der 16-QAM-Variante gegenüber DRM ⁺ bei Mehrwegeempfang; Stör- kriterium: Audioausfall	51
9.16. Zusammenfassung der Schutzabstände für DRM ⁺ , Störkriterium: $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$. Zum Vergleich: Schutzabstände für den FM-Stereorundfunk gem. [ITU02a].	52

10.1. Lage und Antennendiagramme der Sender in Kaiserslautern	58
10.2. Fotos der Senderstandorte	59
10.3. SINAD über Eingangsleistungspegel von TX FH des verwendeten FM-Empfängers . .	61
10.4. DRM ⁺ -Ausgangsspektrum an TX FH	64
10.5. Multiplexspektrum, -leistung und Spitzenhubverteilung von TX FH	65
10.6. Multiplexspektrum, -leistung und Spitzenhubverteilung von TX RB	66
11.1. Richtdiagramm der bei den stationären Messungen eingesetzten Antenne, aus: [Gem82]	68
11.2. Messaufbau bei den stationären Messungen	68
11.3. Stationäre Messung an Messpunkt 20	69
11.4. HF-Größen bei stationären Messungen – Prinzipdarstellung	70
11.5. Versorgungsprognose 4/16-QAM (TX RB: nicht aktiv), Lage der Messpunkte	71
11.6. HF-Situation an Messpunkt 16 (neber Umspannwerk Otterberg). Zur besseren Darstellung der Oberwellen im Energienetz wurde die sonst angewandte Sweepzeit von 8 s reduziert	73
11.7. Empfangsspannungspegel und Signal-zu-Rausch-Abstände an den Meßpunkten	77
11.8. Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im ungestörten Fall	78
11.9. Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall TX RB 87,6 MHz	81
11.10. Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall TX RB 87,7 MHz	84
11.11. Empfangssituation im Untersuchungsgebiet im Störfall TX RB 87,8 MHz	87
11.12. Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: aus	91
11.13. Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,6 MHz	91
11.14. Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,7 MHz	92
11.15. Verlauf der Empfangsqualität bei Variation der Sendeleistung von TX FH. TX RB: 87,8 MHz	92
12.1. Aufbau mobiles Messsystem im Messbus der FH-KL, DRM ⁺ -Modus	95
12.2. Aufbau mobiles Messsystem im Messbus der FH-KL, FM-Modus	95
12.3. Messbus der FH-KL mit montierter Antenne, Aussenansicht.	96
12.4. Messbus der FH-KL, Innenansicht. Links: Arbeitsbereich mit aktivem Messsystem; Rechts: Fahrerkabine mit Überwachungsbildschirm des DRM ⁺ -Dekoders.	96
12.5. Schematischer Schaltplan des Messprogramms	97
12.6. Oberfläche des mobilen Messsystems im DRM ⁺ -Modus	98
12.7. Mobile Messroute inkl. Samplenummer entlang verschiedener Routenabschnitte	102
12.8. Topographische Übersicht der Umgebung von Kaiserslautern. Nur das Rechteck, das die Messroute einschliesst ist farblich markiert.	103
12.9. Mittlerer Empfangsleistungspegel in dBm von TX FH entlang der Messroute (ohne Einfluss von TX RB)	106
12.10. Mittlerer Empfangsleistungspegel in dBm von TX RB entlang der Messroute (ohne Einfluss von TX FH)	107
12.11. Mittlere Empfangsleistungspegeldifferenz in dB zwischen TX FH und TX RB auf Basis von Abb. 12.9 und Abb. 12.10	108
12.12. Mittlerer Empfangsrauschleistungspegel in dBm entlang der Route, TX FH und TX RB inaktiv	109
12.13. Vorhersage der DRM ⁺ -Signaldekodierungschance anhand des benötigten Mindest-Signal-zu-Rauschabstands SNR _{Dec} entlang der Messroute auf Basis der gemessenen, mittleren HF-Leistungen. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent.	110
12.14. Mittlere relative Höhendifferenz der Empfangs- und Sendeantennen sowie Profil des mittleren Luftlinienabstandes zwischen Empfänger und Sender entlang der Route. Das Mittelungsintervall entspricht der Stichprobenanzahl einer Fahrstrecke von 100 m. . . .	111

12.15	Profil der mittleren Fahrgeschwindigkeit entlang der Route	112
12.16	Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate, TX RB: aus. Versorgungsprognose: 4-QAM: hellblau; 16-QAM: dunkelblau; gestörte Bereiche: klar / transparent.	113
12.17	Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: aus	114
12.18	Darstellungsbeispiel der 4-QAM-Variante über Samplenummer	115
12.19	Topographische Darstellung des Verlaufs der abgestrahlten Leistung von TX FH, Ansicht 1	117
12.20	Topographische Darstellung des interpolierten Verlaufs der abgestrahlten Leistung von TX FH, Ansicht 1	117
12.21	Topographische Darstellung des Verlaufs der Bitfehlerrate, Ansicht 1	118
12.22	Topographische Darstellung des Verlaufs der Bitfehlerrate, Ansicht 2	118
12.23	Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate TX RB: 87,7 MHz	119
12.24	Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: 87,7 MHz	120
12.25	Empfangsverhältnisse der 4- und 16-QAM-Variante bewertet anhand der gemessenen Bitfehlerrate TX RB: 87,8 MHz	121
12.26	Mittlerer klassierter SINAD entlang der Messroute, TX RB: 87,8 MHz	122
13.1.	Histogramm der klassierten SINAD-Werte an allen stationären Messpunkten, für alle untersuchten Frequenzsituationen	127
13.2.	Histogramm der $\overline{\text{BER}} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ an allen stationären Messpunkten, für alle untersuchten Frequenzsituationen	127
13.3.	Prozentuale Verteilung der klassierten SINAD-Werte im mobilen Fall für alle untersuchten Frequenzsituationen	128
13.4.	Prozentuale Verteilung der Bitfehler, die die Bedingung $\text{BER} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ im mobilen Fall nicht einhalten; Darstellung aller untersuchten Frequenzsituationen	129
14.1.	Das VHF-Band III der Zukunft?	132
15.1.	Messaufbau zur Messung von Signalspektren mit hoher Dynamik	137

Tabellenverzeichnis

5.1. ZF-Schulterabstand als Funktion des Eingangspegels	21
7.1. DRM ⁺ -Signalparameter zur $\overline{\text{BER}}$ -Messung	32
7.2. Geschätzte Quantile im AWGN-Kanal der 4- und 16-QAM-Variante	34
8.1. Mindestempfangsleistungspegel und -feldstärkepegel am Antennenfußpunkt	36
9.1. Bei den Schutzabstandsmessungen verwendetes Kanalprofil	38
9.2. Koppelmaße des Richtkopplers, Messaufbau DRM ⁺ stört DRM ⁺	44
10.1. Standortdaten der verwendeten Sender	58
10.2. Multiplexaufbau der DRM ⁺ -Signale	63
11.1. Name, Nummer, Höhe über normal Null und Senderabstände der stationären Messpunkte	73
11.2. Zuordnung von SINAD-Klassen zu Messwerten und subjektive Beurteilung	74
11.3. Empfangsleistungspegel, Pegeldifferenz zwischen den beiden Sendern sowie SNR _{Dec} an den Messorten	76
11.4. Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten im ungestörten Fall	79
11.5. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante ohne TX RB	79
11.6. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante ohne TX RB	80
11.7. Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im Gleichkanal	82
11.8. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87, 6 MHz	82
11.9. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB: 87, 6 MHz	83
11.10. Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im ersten Nachbarkanal	85
11.11. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87, 7 MHz	85
11.12. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB: 87, 7 MHz	86
11.13. Empfangssituation an den einzelnen Messpunkten, Störungen im zweiten Nachbarkanal	88
11.14. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 4-QAM-Variante. TX RB: 87, 8 MHz	88
11.15. Vergleich der vorhergesagten und realen Versorgungssituation, 16-QAM-Variante. TX RB: 87, 8 MHz	89
12.1. Mindestleistungspegel am DRM ⁺ -Empfängereingang im AWGN-Kanal im mobilen Empfangsfall (Messbus FH-KL). Die Feldstärken beziehen sich auf einen $\lambda/4$ -Rundstrahler, k-Faktor: 13 dB (inkl. Splitter am Empfängereingang).	101
12.2. Farbkodierung bei kombinierter Rasterdarstellung der momentanen Bitfehlerrate der 4-/16-QAM-Variante im mobilen Szenario	104

13.1. Zusammenfassung der Schutzabstände für DRM⁺ 126