



**Fachhochschule
Kaiserslautern**
University of Applied Sciences



Landeszentrale für
Medien und Kommunikation
Rheinland-Pfalz

Prof. Dr.-Ing. Andreas Steil (FH Kaiserslautern)
Dipl.-Ing. (FH) Felix Schad (FH Kaiserslautern)

Abschlussbericht zum
DRM⁺-Feldversuch Kaiserslautern
Versuchszeitraum: 1. März 2008 – 31. Mai 2008

1. Dezember 2008

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand mit Unterbrechungen in der Zeit von Juni bis Dezember 2008 als Abschluss zu dem groß angelegtem Feldversuch mit DRM⁺, der vom 1. März bis zum 31. Mai 2008 in Kaiserslautern durchgeführt wurde.

Ein Feldversuch von diesem Umfang, der mit großem Aufwand die Stadt Kaiserslautern zu einer „Spielwiese“ von zwei bzw. drei Rundfunksendern macht, um so die große Zahl an Mess- und Testreihen zu ermöglichen, benötigt eine Menge Material, Know-How, Zeit und – vor allem – den engagierten Einsatz einer Vielzahl von Personen in einem Umfang, der durch die Autoren alleine nicht gestemmt werden kann. Daher gibt es eine Vielzahl anderer Personen und Firmen, die – durch persönlichen und/oder materiellen Einsatz – in dieses Projekt eingebunden waren. In erster Linie gilt unser Dank der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz, die mit der FH Kaiserslautern eine langjährige intensive Zusammenarbeit zum Thema der Digitalisierung des UKW-Bandes pflegt.

Die Autoren möchten die Gelegenheit nutzen, allen Beteiligten zu danken. Ein besonderes Dankeschön ergeht dabei an das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), die Bundesnetzagentur (BNetzA), den Südwestrundfunk (SWR), die Landesanstalt für Medien Nordrhein-Westfalen (lfm), sowie an die Rohde & Schwarz Vertriebs GmbH. Sie schafften durch ihr Engagement die Voraussetzungen für das Projekt. Wertvolle Hilfe zur Umsetzung des Vorhabens erhielten die Autoren auch von den nachfolgend genannten Firmen/Institutionen: Robert Bosch GmbH, Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS), Dolby Germany GmbH, ARD.ZDF medienakademie, Ruoss AG, LfK Baden-Württemberg, Microtunes Inc., Radio RPR, BMW, Media Broadcast GmbH, PURE digital, NP Technologies Inc., Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover sowie ATMEL Germany GmbH. Zu dieser Auflistung muss gesagt sein, dass die Reihenfolge keine Gewichtung implizieren soll. Die Autoren hoffen wirklich inständig, niemanden vergessen zu haben ...

Ganz am Ende wird oftmals der Familie/Frau/Freundin gedankt, die ihren technik-affinen Männern ermöglichen, der wissenschaftlichen Arbeit engagiert und mit Begeisterung nachzugehen. Das ist eine gute Tradition, mit der wir nicht brechen möchten: Auch ihnen gebührt unser Dank!

DRM⁺ ist ein spannendes Thema. In diesem Sinne: Viel Spaß bei der Lektüre!

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	7
2 Einleitung	9
2.1 Ausgangslage	9
2.2 Motivation und Zielsetzung	10
2.3 Inhaltsübersicht	10
2.4 Hinweise für den Leser	11
3 Konzeption des Feldversuchs	12
3.1 Grundidee	12
3.2 Sender	13
3.2.1 Standorte und kennzeichnende Merkmale	13
3.2.2 Sender „Am Kaiserberg“ (TX FH)	15
3.2.3 Sender „Rotenberg“ (TX RB)	17
3.3 Parameter der verwendeten Signale	18
3.3.1 FM	18
3.3.2 DRM ⁺	21
3.4 Messung der HF- und NF-Parameter im Feld	24
3.4.1 HF-Parameter	24
3.4.2 NF-Parameter	24
3.5 Empfänger	25
3.5.1 FM-Empfänger	25
3.5.2 DRM ⁺ -Empfänger	25
3.6 Wahl der Messorte	27
3.6.1 Orientierungsmessung	27
3.6.2 Auswahl der stationären Messpunkte	29
3.6.3 Auswahl einer Messroute	32
4 Auswirkungen von DRM⁺ auf den BOS-Funk	34
5 Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM – Stationäre Messungen	36
5.1 Messkonzepte und -verfahren	36
5.1.1 Versorgungskriterium gem. FTZ-Richtlinie	36
5.1.2 S/N und SINAD als Qualitätskriterium	37
5.1.3 Messung und Auswertung der HF-Parameter	38
5.2 Messeinrichtung	42
5.2.1 Messbus der BNetzA	42
5.2.2 Messbus der FH zur Untersuchung unterschiedlicher Empfänger	44
5.3 Ergebnisse	45
5.3.1 Versorgung und Störeinfluß gem. FTZ-Richtlinie	45
5.3.2 Verträglichkeit gemäß S/N- und SINAD-Kriterium	50
5.4 Analyse des Zusammenhangs der Qualitätsbewertungen SINAD und S/N	75

6	Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM – Mobile Messungen	78
6.1	Messkonzepte und -verfahren	78
6.1.1	Versorgungs- und Qualitätsbewertung mit automatischem Messsystem	78
6.1.2	Versorgungs- und Qualitätsbewertung mit dem SINAD-Kriterium	79
6.1.3	Auswertungsverfahren im mobilen Szenario	79
6.2	Messeinrichtung	80
6.3	Ergebnisse	83
6.3.1	Pegelerhältnisse entlang der Messstrecke	83
6.3.2	SINAD-Werte entlang der Messroute im ungestörtem Fall	88
6.3.3	Variation des Frequenzversatzes	91
6.4	Analyse des Zusammenhangs der Qualitätsbewertungen SINAD und Audemat	101
6.4.1	Zielsetzung	101
6.4.2	Aufbereitung der Daten	102
6.4.3	Test auf Unabhängigkeit	104
6.4.4	Test auf Korrelation	105
7	Gesamtbewertung der Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM	108
8	Auswirkungen von DRM⁺ auf den Flugfunk	111
9	Reichweite von DRM⁺	112
9.1	Messkonzept und -verfahren	112
9.2	Ergebnisse der Messung	113
9.3	Gesamtbewertung und allgemeine Beobachtungen	115
10	Ausblick	116
	Literaturverzeichnis	117
	Abbildungsverzeichnis	119
	Tabellenverzeichnis	122

1 Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument beschreibt ausführlich die Arbeiten und Erkenntnisse, welche im Rahmen des Feldversuchs mit DRM⁺ durchgeführt bzw. gewonnen wurden. Der Feldversuch fand in der Zeit vom 01.03.2008 bis 31.05.2008 statt; die ersten Ergebnisse des Feldversuchs wurden auf einem öffentlichen Symposium bereits am 29.05.08 der Fachwelt präsentiert [<http://www.drm-radio-kl.eu/symposium.htm>]. Das Symposium, auf dem 120 hochrangige Experten – auch aus dem europäischen Ausland – anwesend waren, fand internationale Resonanz und Beachtung¹.

Folgende Ziele wurden mit dem Feldversuch angestrebt und erreicht:

1. Ergänzung und Validierung der bei vorangegangenen Labormessungen gewonnenen Erkenntnisse zur Verträglichkeit von DRM⁺ mit anderen Funkdiensten [SSR07, HSE07], insb. zu UKW-FM, im realen Umfeld.
2. Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme der weltweit ersten kompletten echtzeitfähigen DRM⁺-Übertragungskette.
3. Gewinnen erster Eindrücke zur Versorgungsreichweite von DRM⁺ im realen UKW-FM-Umfeld.

Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM: Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse können die nachstehenden Kernaussagen zur Verträglichkeit getroffen werden:

- *Die entscheidende Einflußgröße ist der Crestfaktor des DRM⁺-Signals. Je niedriger dieser ist, desto einfacher ist die Verträglichkeit sicherzustellen. Die Verringerung des Crestfaktors ist demnach der Schlüssel zur Erzielung einer möglichst hohen Verträglichkeit bei gleichzeitig möglichst hoher DRM⁺-Reichweite. Ein niedriger Crestfaktor ist auch der Erhöhung des Wirkungsgrades des DRM⁺-Senders äußerst dienlich.*
- *Die im Feldversuch ermittelte Verträglichkeit ist gegenüber der im Labor bestimmten Verträglichkeit [SSR07, HSE07] aufgrund des in der Realität immer vorhandenen Grundrauschens, des durch Verstärkung bereits im Crestfaktor reduzierten DRM⁺-Signals und der oftmals großen Zahl von FM-Sendern innerhalb der Eingangsselektion des Empfängers *deutlich besser.**
- *DRM⁺ hat im Vergleich zu FM aufgrund des Crestfaktors *grundsätzlich* ein höheres Störpotential. Besonders im 100/200 kHz Abstand ist die Störwirkung von DRM⁺ im Vergleich zu FM relativ gesehen höher, absolut gesehen jedoch weniger kritisch, weil die Bewertungsmaßzahlen für die Audioqualität typischerweise bereits hohe Werte aufweisen.*
- *In bestimmten Empfangssituationen scheint die Störwirkung von DRM⁺ im Vergleich zu FM auch in größeren Abständen als 200 kHz höher zu sein. Diese Empfangssituationen scheinen dort vorzuliegen, wo das dominante, starke Störsignal die Ausregelmöglichkeiten der AGC des Empfängers überschreitet. Auch hier gilt, dass ein niedriger Crestfaktor zu einer geringeren Störwirkung führt als ein höherer Crestfaktor.*

¹Aufgrund des hohen Interesses an DRM⁺ wurde die Veranstaltung auf Wunsch des DRM-Konsortiums am 29.09.2008 erneut öffentlich vor ca. 40 Mitgliedern des DRM-Konsortiums in Teilen wiederholt

- Das den ITU-Planungsrichtlinien (s. insbes. [ITU02a]) zugrunde gelegte psychometrisch bewertete Audio-SNR mit einer Verschlechterung von 56 dB auf 50 dB [ITU02d] ergibt in der realen Empfangssituation zwingend *keine* subjektive Audio-Störung und wird zudem in der heutigen Praxis oftmals weder sender- noch empfängerseitig mehr erreicht. Da es jedoch unter Beibehaltung der gültigen ITU-Planungsrichtlinien kaum möglich ist, einen DRM⁺-Sender verträglich im UKW-FM-Umfeld einzuplanen ist es notwendig, die ITU-Planungsrichtlinien den heutigen technischen Verhältnissen – gerade für den mobilen und portablen Empfang – anzupassen. Grundlage der Richtlinien sollte dabei ausschließlich die *hörbare* Störung sein. Im Feldversuch wurde SINAD als Kriterium zur objektiven Bewertung der UKW-FM-Audioqualität eingesetzt. Es zeigt sich, dass die SINAD-Messung grundsätzlich geeignet ist, die Audioqualität sehr aussagekräftig zu bewerten. Aufgrund der Einfachheit der SINAD-Messung und der Tatsache, dass diese fortlaufend mit einem Dauersinus durchgeführt werden kann, ist diese Messungen im Testbetrieb, insb. auch für mobile Messungen, geeignet.

Auswirkungen von DRM⁺ auf BOS und VOR/ILS: Während des Feldversuches sind keinerlei Störungen des BOS-Funkdienstes messtechnisch festgestellt worden; im Falle von VOR/ILS sind keinerlei Störungen bekannt geworden.

Fazit: Aus diesen Erkenntnissen zur Verträglichkeit ergibt sich als Fazit, dass DRM⁺ durchaus verträglich für einen Regelbetrieb geplant und eingeführt werden kann, sofern die veralteten Planungsgrundlagen an die heutige Realität adaptiert werden. Die praktische verträgliche Einführung gestaltet sich dabei umso einfacher, je niedriger der Crestfaktor des DRM⁺-Signals ist. Auf Basis der Ergebnisse wurden bereits erste Beispielplanungen zur Umstellung von UKW-FM-Sendern gemacht und veröffentlicht [SSFH08, SSL08].

Versorgungsreichweite von DRM⁺: Aus ersten Tests können für 4-QAM folgende vorläufigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- An Orten, an denen FM noch subjektiv „tolerierbar“ empfangbar ist, insb. außerhalb des planerischen Versorgungsgebiets, konnte DRM⁺ immer noch problemlos decodiert werden.
- Mit DRM⁺ kann bei gleicher ERP ein größeres Versorgungsgebiet als mit FM erzielt werden. Insbesondere im interferenzbegrenzten Umfeld erscheint die Versorgungsreserve von DRM⁺ deutlich ausgeprägter als diejenige von FM.

Fazit: Die erhaltenen Ergebnisse zur Versorgungsreichweite von DRM⁺ sind äußerst vielversprechend, aber noch nicht durch systematische Messkampagnen belegt.

In dem Feldversuch konnten einerseits aufgrund der engen zeitlichen Befristung von 3 Monaten und der sehr komplexen Abstimmung über die Zulieferung bzw. Verfügbarkeit von Einzelkomponenten einige wichtige Aspekte zur Nutzung von DRM⁺ nicht untersucht werden; diese Aktivitäten stehen noch aus. Daher sollten auf Basis der obigen Ergebnisse folgende Arbeiten durchgeführt werden²:

1. Vermessen der Güte von DRM⁺-Sender und DRM⁺-Empfänger (insb. Phasenrauschen, Linearität, Rauschzahl und Decoderperformanz).
2. Definition geeigneter Kriterien zur Beurteilung der DRM⁺-Empfangsgüte (z. B. Empfindlichkeit, Fehlerraten, „Out-of-Service“-Zeiten, ...).
3. Ermitteln der Schutzabstandskurven für DRM⁺ unter Einwirkung eines UKW-FM-Störers im Labor.
4. Auf der Basis der Arbeiten aus (1-3): Weiterführung des Feldversuchs mit dem Ziel, die Versorgungsreichweite von DRM⁺ systematisch zu untersuchen, zu bewerten und geeignete Planungskriterien zu identifizieren.

²Manche Arbeiten wurden zum Zeitpunkt der Drucklegung des vorliegenden Dokuments bereits begonnen.

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 den 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 Frequenzplanung im europäischen Raum gesehen. Daher konzentrierten sich die technischen Untersuchungen auf die Weiterentwicklung des DRM-Systems [Ins04], das mit DRM⁺ [Ins08] den geeigneten Kandidaten für ein digitales UKW-Hörfunksystem beinhaltet.

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, unter welchen technischen Randbedingungen der UKW-Hörfunk mit DRM⁺ in einem Migrationsszenario mit FM-Sendern digitalisiert werden könnte. Zu diesen Arbeiten zählen insbesondere

- Konzept und Implementierung der echtzeitfähigen DRM/DRM⁺-Modulatorsoftware „Spark“, siehe hierzu [<http://www.drm-sender.de>] sowie [Fei05].
- Technische Machbarkeitsuntersuchung zu DRM⁺ als Rundfunkübertragungsverfahren [Ber05, Leh06].
- Ausführliche Laboruntersuchungen zum Thema „Verträglichkeit zwischen DRM⁺ und HD-RadioTM mit UKW-FM und angrenzenden Funkdiensten (BOS-Funkdienste, Flugfunk)“ [SSR07, HSE07].

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.
- der Crestfaktor die Verträglichkeit mit UKW-FM im Sinne eines Schlüsselfaktors kontrolliert. Seine Wirkungen in typischen FM-Empfängern wurden identifiziert und analysiert. Je niedriger der Crestfaktor, desto leichter ist Verträglichkeit herzustellen.

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.

2.2 Motivation und Zielsetzung

Die im vorigen Abschnitt 2.1 identifizierten Knackpunkte und sich daraus ergebenden offenen Fragen können mit weiteren richtlinienkonformen Messungen kaum weiter analysiert werden. Insbesondere die Frage nach der Wirkung von DRM⁺ im realen Umfeld läßt sich nur durch einen praktischen Feldversuch beantworten. Aus diesem Grund wurde ein großangelegter Feldversuch mit den bereits in Kapitel 1 kurz angegebenen Zielsetzung konzipiert:

1. *Ergänzung und Validierung der bei vorangegangenen Labormessungen gewonnenen Erkenntnisse zur Verträglichkeit von DRM⁺ mit anderen Funkdiensten, insb. zu UKW-FM, im realen Umfeld.* Die Prämisse dieser Arbeiten war, dass die Ergebnisse aus den Labormessungen korrekt sind. Demnach macht es keinen Sinn, Empfangssituationen im Feld herbeizuführen, die den Laborbedingungen möglichst nahe kommen; der Erkenntnisgewinn wäre zu gering als dass sich der Aufwand lohnte. Der Fokus der Konzeption und der Arbeiten sollte klar auf der Bewertung der realen Gegebenheiten liegen und Methoden zur Bewertung der Verträglichkeit im Feld nutzen, die auch die Audioqualität des Empfangssignals objektiv, qualitativ und reproduzierbar bewerten. Um einerseits Vergleichbarkeit zu gewährleisten und andererseits die Unterschiede in der Störwirkung herauszuarbeiten, sollte an jedem Messort zwischen zwei Störsignalen gleicher Empfangsleistung (realistisches FM-Signal, DRM⁺-Signal) gewechselt werden, vgl. Abschnitt 3.2
2. *Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme der weltweit ersten kompletten echtzeitfähigen DRM⁺-Übertragungskette.* Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der Prototyp des weltweit ersten echtzeitfähigen DRM⁺-Empfängers konzipiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Als Schlüsselkomponenten enthält dieser Empfänger ein hochwertiges handelsübliches Atmel-Frontend (ATR4264¹) sowie den Prototyp des Fraunhofer IIS DRM⁺-Decoders, vgl. Abschnitt 3.5.2
3. *Gewinnen erster Eindrücke zur Versorgungsreichweite von DRM⁺ im realen UKW-FM-Umfeld.* Da die gesamte echtzeitfähige DRM⁺-Übertragungskette vorliegt, wurden erste Messungen sowohl stationär als auch mobil vorgenommen. Zur Bewertung wurde der subjektive Höreindruck als auch die gemessene Bitfehlerrate herangezogen, vgl. Kapitel 6.

2.3 Inhaltsübersicht

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt:

Kapitel 3 beschreibt die grundlegenden Konzepte und Ideen, auf denen der Feldversuch beruht. Die verwendeten Infrastrukturen und Geräte werden dokumentiert sowie die messtechnischen Konzepte angegeben.

Kapitel 4 dokumentiert die im Rahmen dieses Versuchs durchgeführten Tätigkeiten zur Untersuchung der Störwirkung des DRM⁺-Senders der FH Kaiserslautern auf den Funkdienst der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS).

¹Ein sog. automotive consumer frontend.

Kapitel 5 stellt die durchgeführten Untersuchungen zur Wirkung eines DRM⁺-Senders im UKW-FM-Umfeld im Falle des *stationären Empfangsszenarios* dar. Die verwendeten Messverfahren und Messaufbauten werden eingehend erläutert und die jeweiligen Auswertungen der Messdaten dargestellt.

Kapitel 6 stellt die durchgeführten Untersuchungen zur Wirkung eines DRM⁺-Senders im UKW-FM-Umfeld im Falle des *mobilen Empfangsszenarios* dar. Auch hier werden die verwendeten Messverfahren und Messaufbauten sowie die Auswertungen der Messdaten vorgestellt.

Kapitel 7 fasst die Untersuchungen der Kapitel 5 und 6 zusammen, um eine zusammenfassende Analyse der Auswirkungen von DRM⁺ im UKW-FM-Umfeld anhand der im Rahmen des Feldversuchs gewonnenen Erkenntnisse darzulegen.

Kapitel 8 beschreibt die Auswirkungen des DRM⁺-Senders auf den Flugfunk und schließt somit die Betrachtung über die dem UKW-Tonrundfunk benachbarten Funkdienste und dem Verhalten von DRM⁺ im Frequenzbereich des UKW-Tonrundfunks ab.

Kapitel 9 beschreibt die ersten Eindrücke und erste Testreihen über die Performanz von DRM⁺ im realen Betrieb.

Kapitel 10 gibt einen Ausblick über die geplanten weiterführenden Tätigkeiten an der FH Kaiserslautern mit dem DRM⁺-System.

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 stehen in diesem Dokument zwei besondere Kennzeichnungen solcher Links zur Verfügung:

- ein  verweist auf eine externe Audiodatei. Ein Anklicken des Symbols startet das entsprechend zugehörige Programm.
- ein  verweist auf eine externe Bilddatei. Insbesondere die digitalen 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.

3 Konzeption des Feldversuchs

3.1 Grundidee

In Abschnitt 2.2 wurde bereits ausgeführt, dass es weder sinnvoll noch möglich ist, die Laborbedingungen im Feld nachzustellen. Da sich die im Vorjahr angestellten Verträglichkeitsuntersuchungen im Labor [HSE07, SSR07] sowohl durch Messungen der Media Broadcast (vormals T-Systems Media & Broadcast) als auch der BBC bestätigt werden, darf man postulieren, dass sie korrekt sind. Von diesem Standpunkt ausgehend ist ein Feldversuch nur sinnvoll, wenn er diese Labormessungen validiert, darin aufgeworfene Fragen näher beleuchtet und den Nachweis erbringt, ob das DRM⁺-System auch in der Praxis funktioniert und verträglich betrieben werden kann. Somit musste ein Weg gefunden werden, die Verträglichkeit von DRM⁺ im UKW-FM-Umfeld zu untersuchen, wobei

- die Messkonzepte den realen Gegebenheiten Rechnung tragen,
- der Begriff „Verträglichkeit“ relativ zu FM derart definiert werden kann, dass ein Unterschied in den ermittelten Bewertungszahlen möglichst ausschließlich auf die unterschiedlichen Modulationsarten (DRM⁺, FM) zurückzuführen ist.

Konsequenterweise wurde zur Umsetzung der in diesem Kapitel beschriebenen Paradigmen zwei unterschiedliche Sender aufgebaut. Einer dieser Sender wurde hierbei als konventioneller FM-Sender mit variabler Sendefrequenz, der andere als Hybridsender, der sowohl DRM⁺- als auch FM-Signale bei jeweils gleicher Senderleistung abstrahlen kann, betrieben. Zur Bewertung der in einem FM-Empfänger auftretenden Störwirkungen an einem gegebenen Ort ist der FM-Sender als Nutzsender zu betrachten, der gezielt durch den Hybridsender gestört wird, d. h. der Hybridsender strahlt kontrollierbare Störleistung ab. Die Sender sind derart aufgebaut, dass innerhalb der Stadt Kaiserslautern durch Nutzung der Richtwirkung einer der Senderantennen gezielt Zonen unterschiedlichen Störgrades hergestellt werden.

Das zur Beurteilung der FM-Versorgung bzw. Störsituationen üblicherweise verwendete Verfahren [Gem82] basiert auf reinen HF-Messungen. Die Auswertung dieser Messungen basieren auf den zugrundeliegenden Schutzabständen und somit implizit auf der damit verbundenen Bewertung der empfangenen Tonqualität. Das Verfahren ist im operationellen Senderbetrieb heutzutage zwar schnell durchführbar, ist aber nur beim Umgang mit reinen FM-Signalen anwendbar. Daher wird in Rahmen dieses Feldversuchs eine andere Methode eingeführt, die sowohl die HF- als auch die NF-Ebene betrachtet. Hierzu werden vergleichende Messungen auf Basis des Messaufbaus in [Gem82] durchgeführt, die in den verschiedensten Störsituationen zwischen zwei eigenen lokalen Sendern an unterschiedlichen Standorten hergestellt werden.

Zusätzlich zu der Anlehnung an den in [Gem82] definiertem Aufbau für stationäre Messungen werden zur Untersuchung der Auswirkungen von DRM⁺ im UKW-FM-Umfeld zahlreiche mobile Messungen durchgeführt. Da die bisherigen als Verträglichkeitsindikator verwendeten S/N-Messungen [ITU02d] – auf denen die Schutzabstände in [Gem82] beruhen – in diesem Empfangsszenario nicht umsetzbar sind, wird die Messgröße SINAD (Signal with Noise and Distortion, s. z.B. [Mäu88]) verwendet. Diese Größe wird somit auch in die stationären Messungen miteinbezogen. Darüberhinaus ist es – aufgrund des allgemeinen Umgebungsrauschen bzw. Reststrahlung von anderen, weit entfernten Sendern ohnehin oft nur begrenzt möglich dieses hohe S/N auf der Empfängerseite zu nutzen.

3.2 Sender

Im Rahmen dieses Berichts wird der Sender am Campus der **FH Kaiserslautern** mit dem Kürzel **TX FH**, der Sender am **Rotenberg** mit dem Kürzel **TX RB** bezeichnet.

3.2.1 Standorte und kennzeichnende Merkmale

Aus der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die Standortdaten und kennzeichnenden Merkmale der verwendeten Sender ersichtlich. Die Antenne an TX FH ist ein Rundstrahler (Groundplane); die 4-Element-Yagiantenne an TX RB wurde auf den östlichen Bereich der Stadt gerichtet. Die Standorte und insbes. die verwendeten Antennen sind in Abb. 3.2 dargestellt. Durch Ausnutzung der Richtwirkung der Sendeantenne von TX RB wurden im Gebiet von Kaiserslautern Bereiche hergestellt, in denen jeweils ein Sender durch seine Feldstärke dominierender gegenüber dem anderem wirken konnte bzw. beide Sender ungefähr gleiche Feldstärkepegel bewirkten. Die HF-Signale werden vertikal abgestrahlt, um eine zusätzliche Entkopplung von den Signalen anderer UKW-Sender im Zielgebiet zu erreichen.

	TX FH	TX RB
Standort	„Am Kaiserberg“ 49,4506N;7,76316E 260 m ü.NN, 30 m ü.Gr.	„Rotenberg“ 49,459579N;7,771260E 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 Kathrein K 524017
Polarisation	Vertikal	Vertikal

Tab. 3.1: Standortdaten der verwendeten Sender (Koordinatenangaben: WGS84, Dezimalgrad)

Zur Veranschaulichung der Senderstandorte und den jeweiligen Antennendiagrammen sind diese in Abb. 3.1 visualisiert.

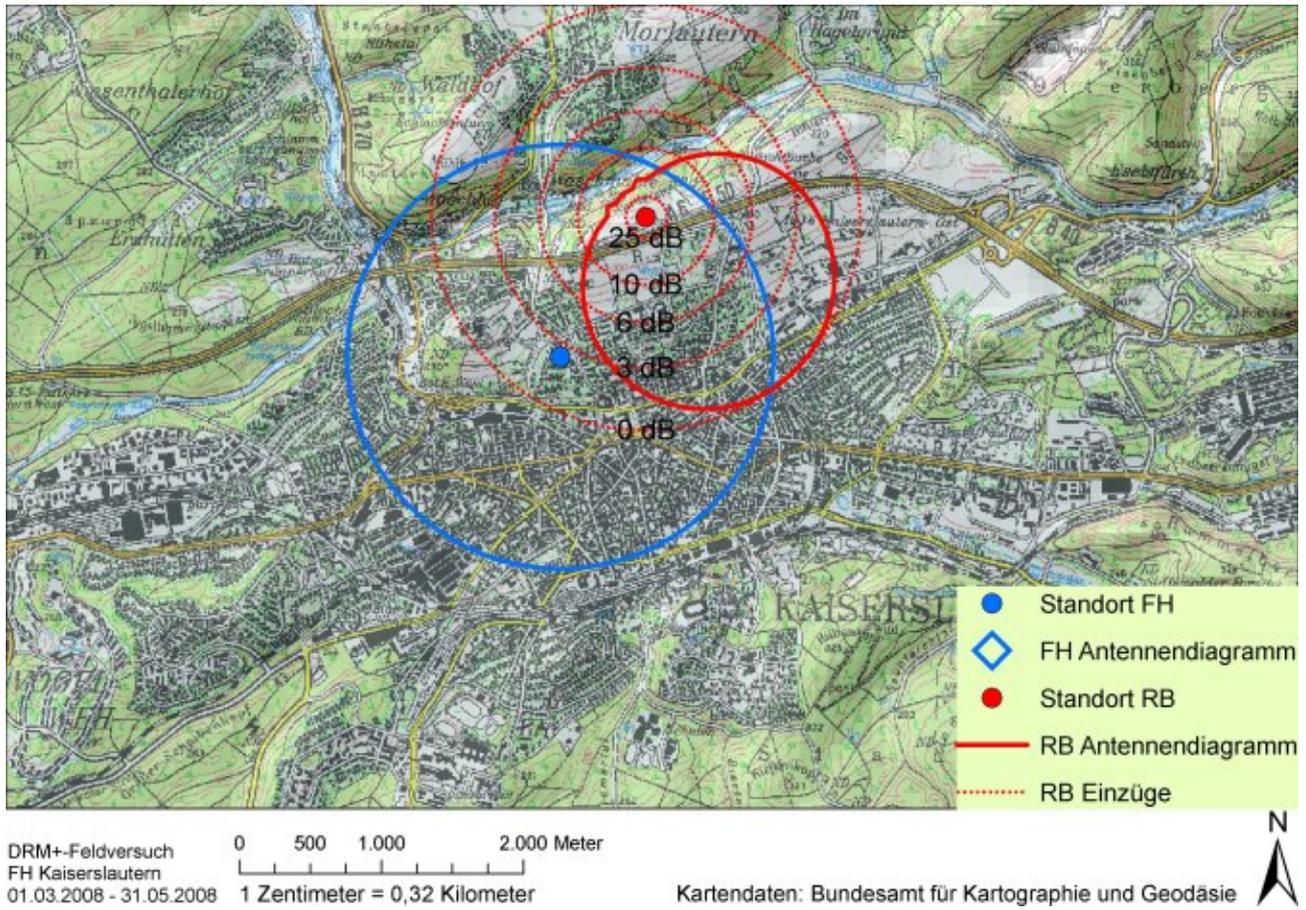
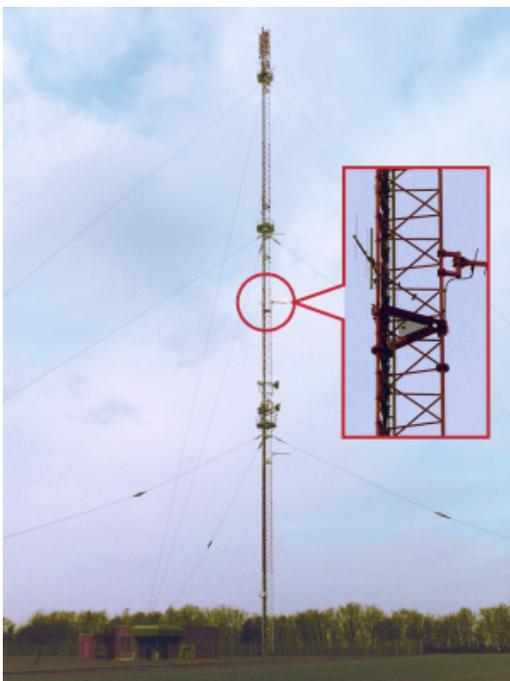


Abb. 3.1: Lage und Antennendiagramme der Sender in Kaiserslautern 



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



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

Abb. 3.2: Fotos der Senderstandorte

3.2.2 Sender „Am Kaiserberg“ (TX FH)

Dieser Hybridsender wurde in den Labors der FH Kaiserslautern aufgebaut. Aufgrund der restlichen Aufbauten auf dem Dach des FH-Gebäudes ist die Ausstrahlung in östlicher Richtung leicht abgeschattet.

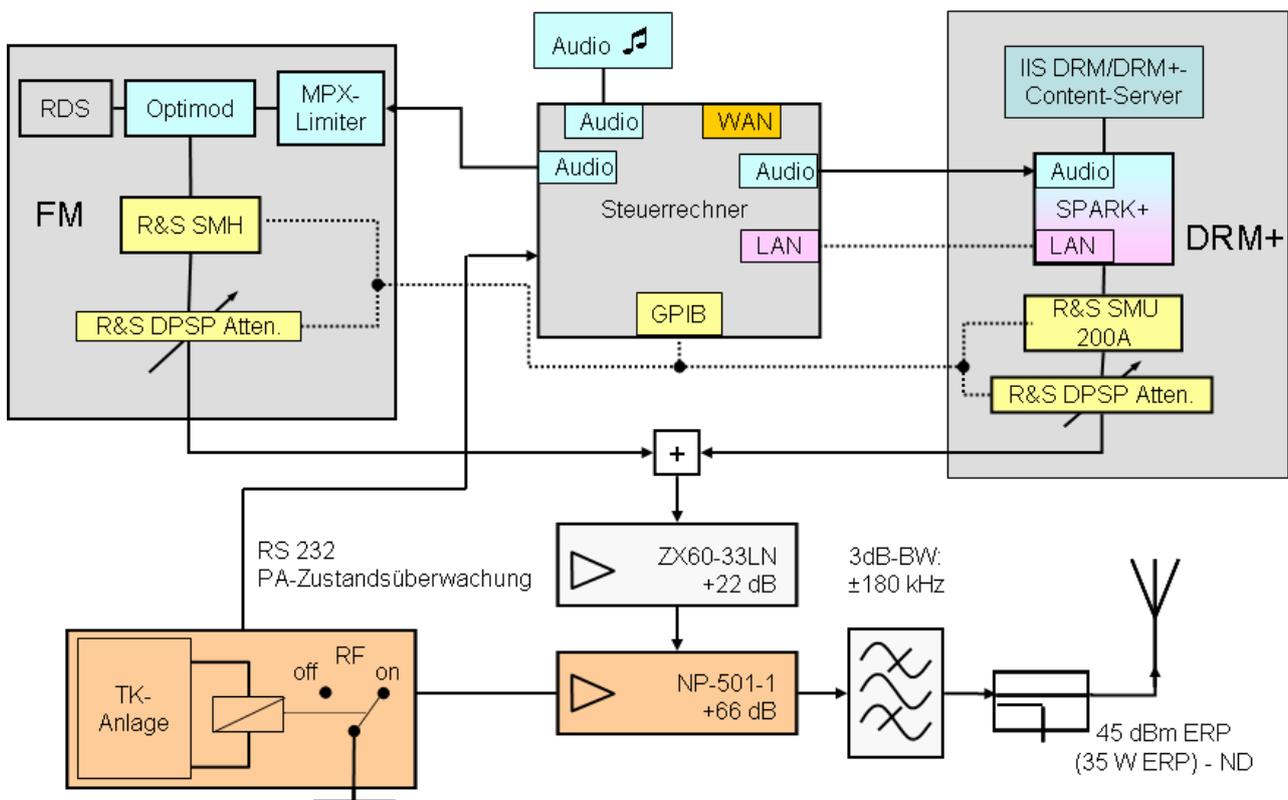


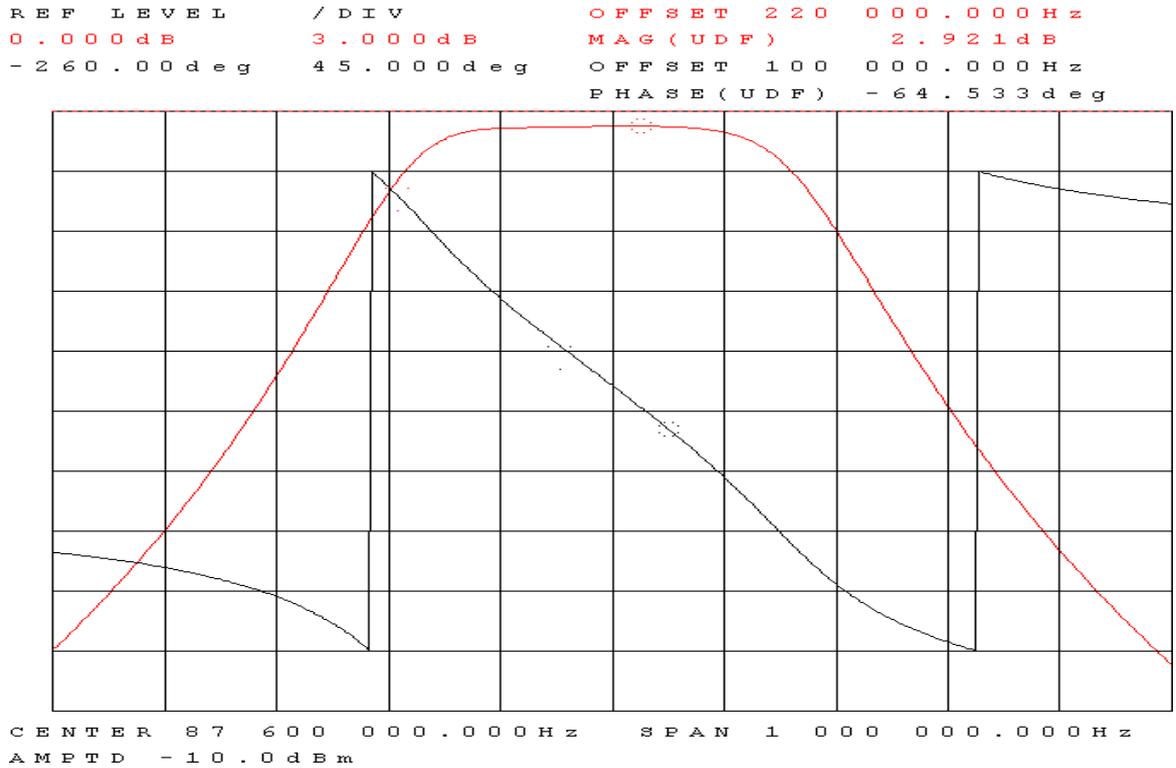
Abb. 3.3: Blockschaltbild des Senders „Am Kaiserberg“

Abb. 3.3 stellt den schematischen Aufbau des Senders da. Der Sender besteht aus einem FM- sowie einem DRM⁺-Zweig.

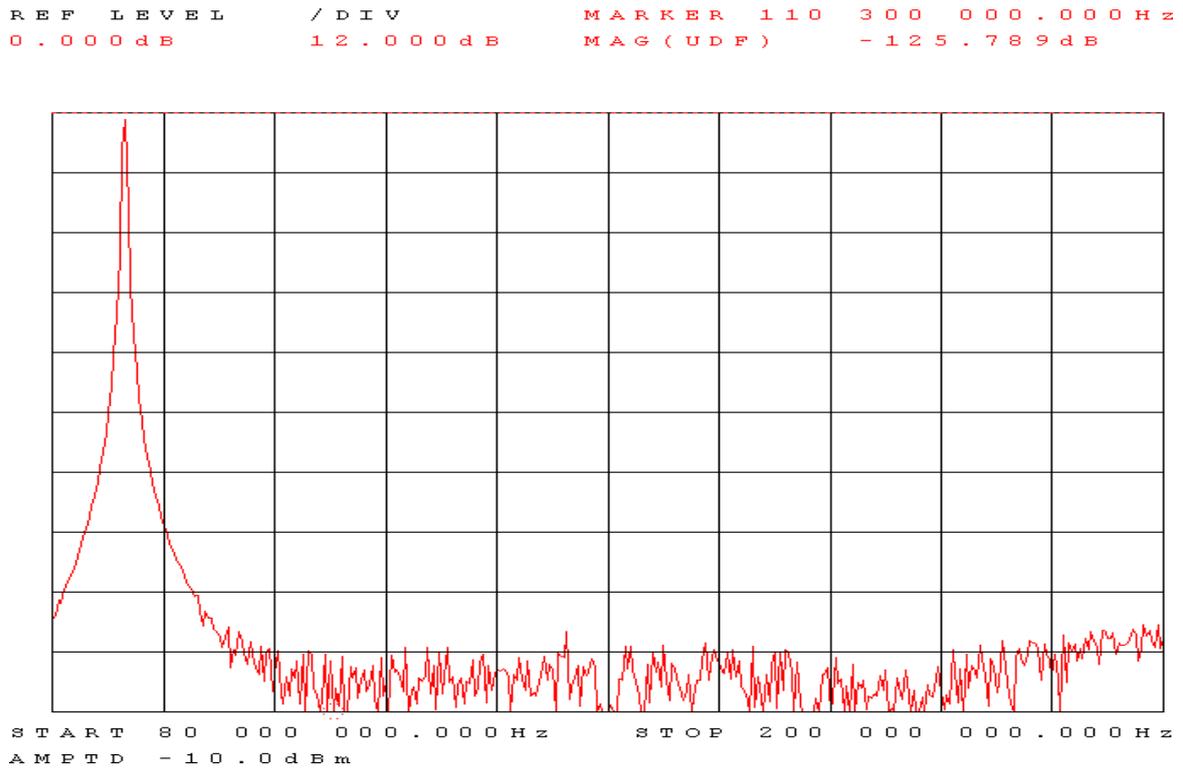
Der FM-Zweig besteht aus einem MPX- und Hublimiter, einem Optimod (der als reiner Stereocoder betrieben wurde) sowie einem RDS-Coder. Das Basisbandsignal wird durch einen Signalgenerator (Rohde & Schwarz SMH) frequenzmoduliert.

Im DRM⁺-Zweig kann der Signalmultiplex entweder über die Sendesoftware „Spark“ [Fei05] oder über den Contentserver des Fraunhofer-IIS erzeugt werden. In beiden Varianten dient „Spark“ als OFDM-Modulator; nach der D/A-Wandlung durch einen 24-Bit D/A-Wandler (National Instruments NiDAQmx 4461) wird mittels eines Signalgenerators (Rohde & Schwarz SMU200A) die Quadraturmodulation durchgeführt. Nach Zusammenführung der beiden HF-Signale¹ folgt ein rauscharmer, linearer Vorverstärker (Minicircuits ZX60-33LN) sowie ein linearer Leistungsverstärker (NP-Technologies NP506-1). Nach Bandpassfilterung (s. Abb. 3.4) wurde das Signal der eigens angefertigten Grundplaneantenne zugeführt. Die Ausgangsleistung orientiert sich dabei an der höchstmöglichen DRM⁺-Leistung, bei der die Sendermaske [Eur06] noch eingehalten wird. Dadurch das das DRM⁺-Signal aufgrund des Großsignalverhaltens der Verstärkerkette die Maske weit ausleuchtet ist dies auch gleichzeitig die Situation der größtmöglichen Störung, die mit diesem Signal in der Senderkette umgesetzt werden kann.

¹Der Sender war immer im FM- oder DRM⁺-Betrieb, niemals im Simulcastbetrieb verwendet worden.



(a) Durchlasskurve (schmalbandig) und Phasengang



(b) Durchlasskurve (breitbandig)

Abb. 3.4: Gemessene Charakteristika des Ausgangsfilters von TX FH

Um bei den Arbeiten im Feld die größtmögliche Flexibilität zu haben und unabhängig von Personen an den beiden Senderstandorten zu sein, wurde die Möglichkeit eines Fernzugriffs auf TX FH (und TX RB, s. unten) geschaffen. Durch den Remotezugriff, insbes. auf den Steuerrechner (s. Abb. 3.3), konnte zudem das in die Sender eingespeiste Audiosignal beeinflusst werden. Zusätzlich konnten durch eine Steuersoftware der jeweils interessierende Senderzweig geschaltet und in seiner Leistung skaliert werden, s. Abb. 3.5. Darüberhinaus wurde (z. B. für Notfälle) mit der laboreigenen Telefonanlage eine Telefonnummer eingerichtet, die bei Anruf per Relais die Senderendstufe aus- und einschalten kann. Der Zustand des Relais wurde mittels der RS232-Schnittstelle ebenfalls dem Steuerrechner bekannt gemacht. Alle Schaltvorgänge über das Steuerinterface wurden darüberhinaus zu Kontrollzwecken in einer SQL-basierten Datenbank abgelegt, womit auch eine Web-gestützte Abfrage von Beteiligten des Senderzustands realisiert wurde.

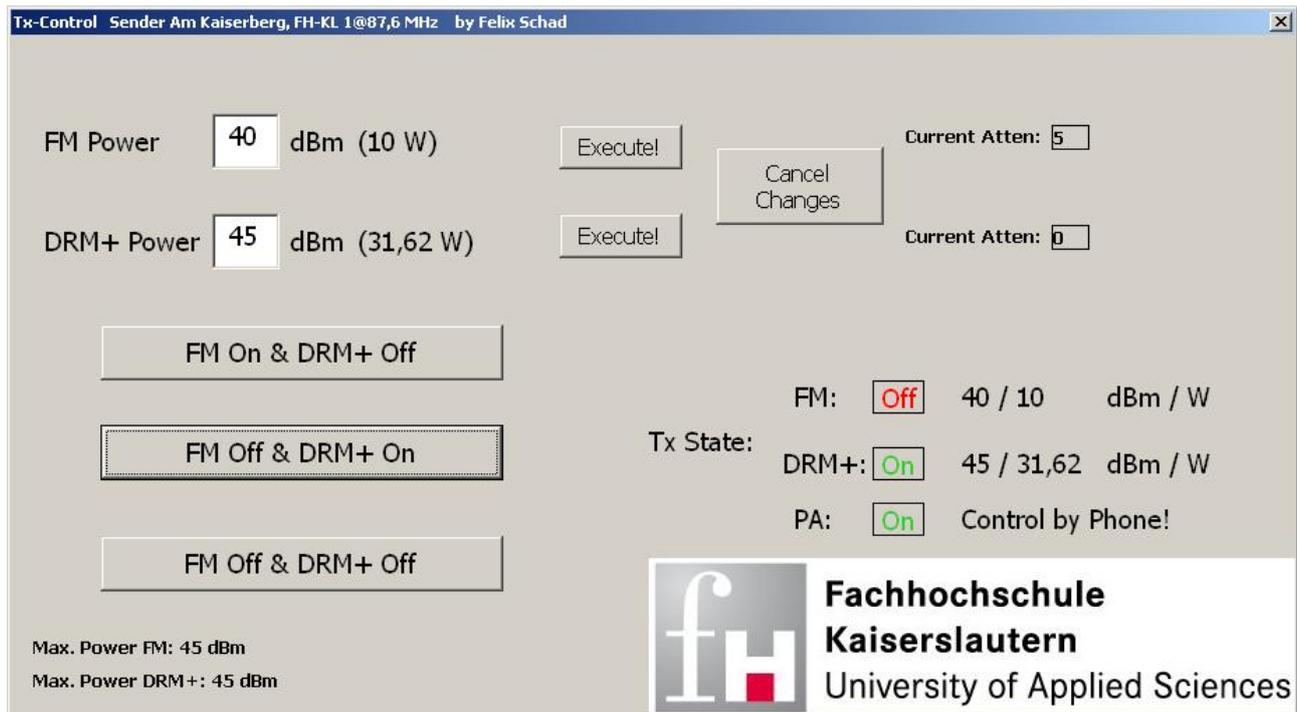


Abb. 3.5: Steuerinterface des Senders „Am Kaiserberg“

3.2.3 Sender „Rotenberg“ (TX RB)

Dieser reine FM-Sender wurde autark im Betriebsraum des Standorts Rotenberg aufgebaut. Über einen Steuerrechner wurden die Audiosignale via eine Soundkarte (Modell: „Terratec DMX6 Fire (USB)“) an einen Stereocoder (Rohde & Schwarz MSC2) weitergeleitet, welcher die Modulationsquelle für einen UKW-FM-Sender (Telefunken VHF/FM-Umsetzer TP3280, mit ausgeschaltetem Empfangsmodul) darstellte. Der Senderausgang war direkt mit der Sendeantenne verbunden. Über ein Steuerinterface kann der Sender fernbedient werden (Sender ein-/ausschalten; Frequenzverstimmung), so dass via Fernzugang auf den PC flexibel das vor Ort benötigte Signal geschaltet werden konnte. Der Sender war nur dann im Betrieb, wenn konkrete Messungen durchzuführen waren. Als Antenne wurde eine 4-Element-Yagi vom Typ Kathrein K 52 4017 verwendet, s. Abb. 3.1, 3.2(a).



Abb. 3.6: Innenansicht des Senders Rotenberg

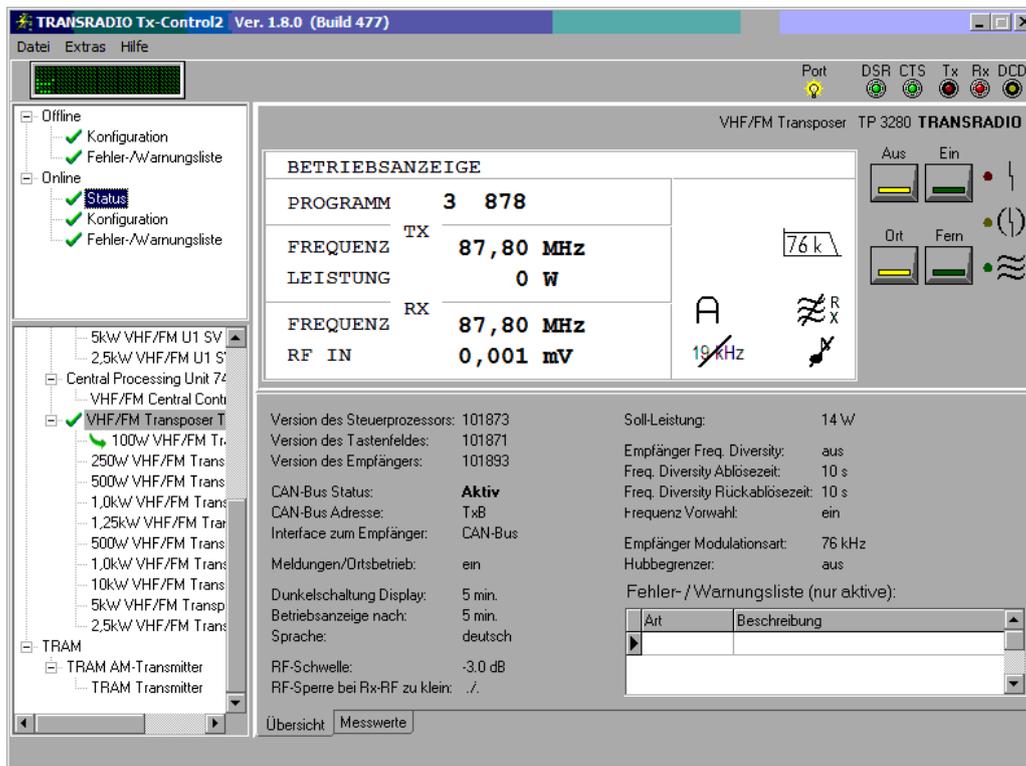


Abb. 3.7: Steuersoftware des Senders Rotenberg

3.3 Parameter der verwendeten Signale

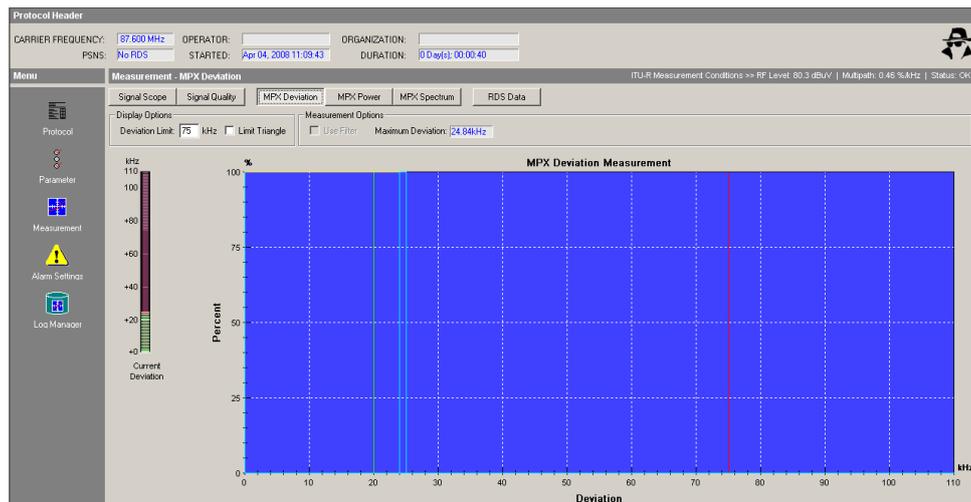
3.3.1 FM

An TX RB kamen zwei unterschiedliche Testsignalformen zum Einsatz:

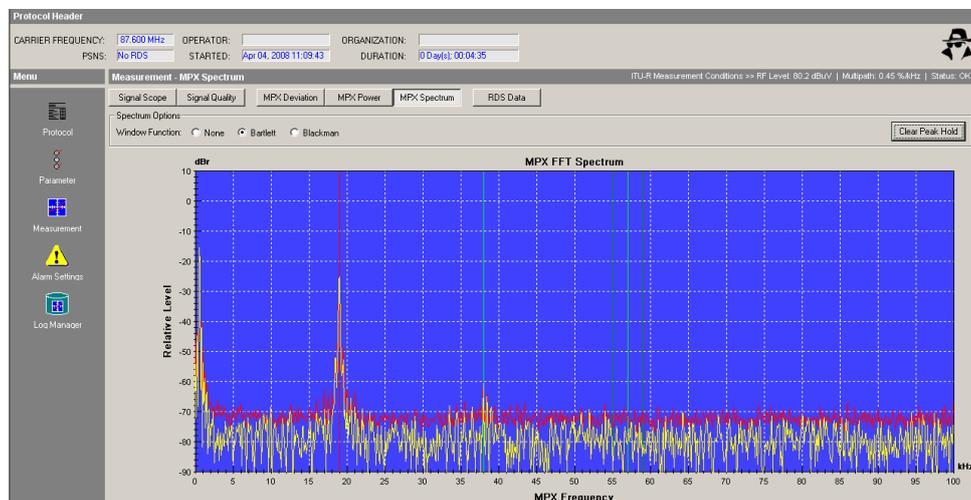
- Sinuston, 500 Hz, L=R, für die S/N- und SINAD-Tests
- Zusammenschnitt diverser Klangbeispiele, ca. 80 s (ohne nachträgliche Kompression 🗣️):

- Orff – Carmina Burana (Klassik)
- Dvořák – Aus der neuen Welt (Klassik)
- Alan Parsons Project – The Cask of Amontillado (Pop)
- SWR-Radiotatort „Himmelreich und Höllental“ (Hörspiel)
- Ennio Morricone – Harmonica (Orchestral / Soundtrack)
- Savatage – Chance (Rock / Metal)

Für den Dauersinus wurde am Senderausgang ein SINAD von 55 dB ermittelt. An dieser Stelle musste ein Trade-Off zwischen dem max. Modulationsindex und den regulativen Vorgaben erfolgen, so dass die MPX-Leistung auf 0 dBr begrenzt wurde.



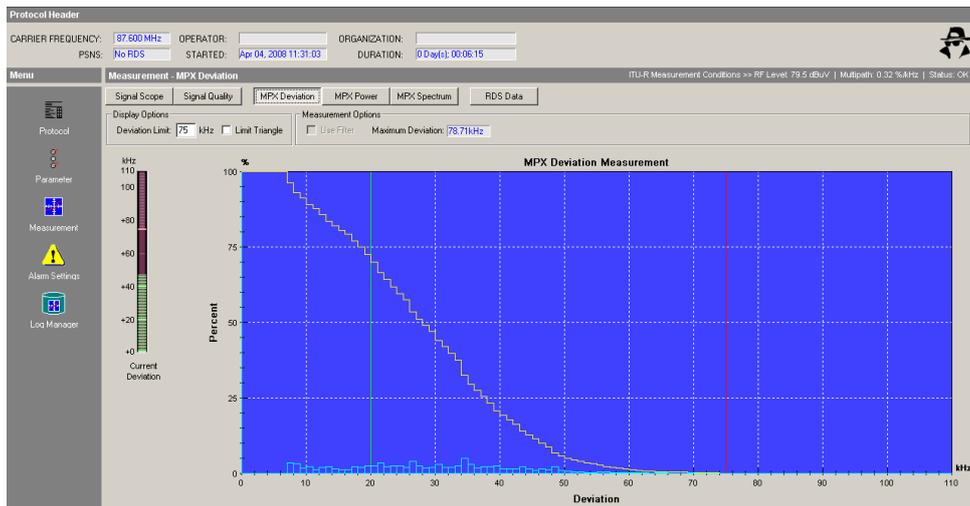
(a) Histogramm der Hubverteilung. Blau: Zeitlicher Mittelwert; gelb: Maxima



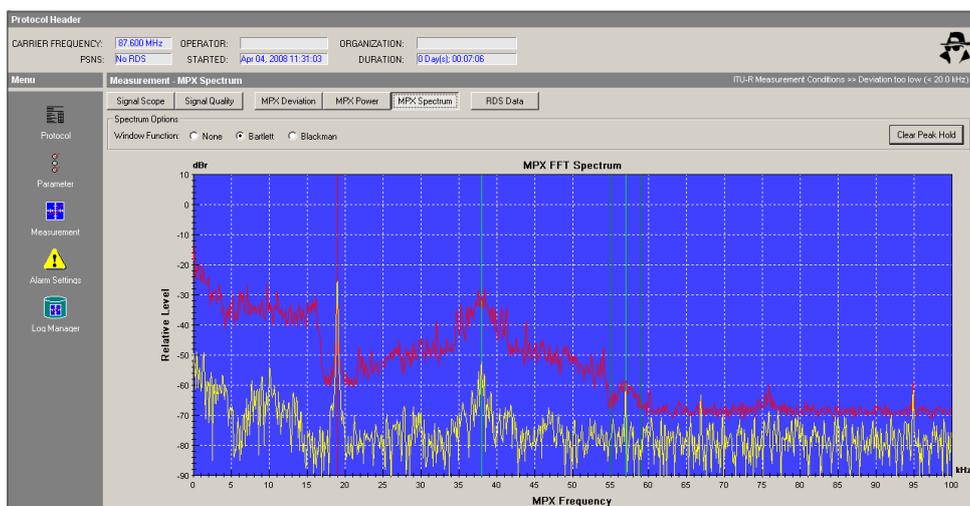
(b) MPX-Spektrum. Gelber Trace: Momentanspektrum; Roter Trace: Maxima

Abb. 3.8: Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des Dauersinus am Senderausgang von TX RB; gemessen mit: FM-Spy-T.

Für das Klangbeispiel an TX RB ergibt sich die in Abb. 3.9(a) dargestellte Hubverteilung. Das dazugehörige MPX-Spektrum ist in Abb. 3.9(b) abgebildet. Die MPX-Leistung überschreitet dabei nicht die Grenze von 0 dBr.



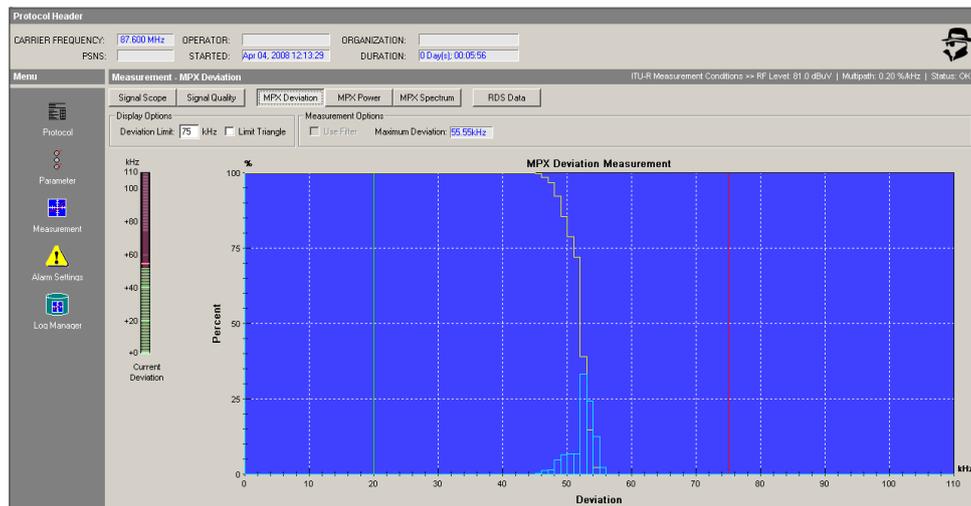
(a) Hubverteilung. Blau: Zeitlicher Mittelwert; gelb: Maxima



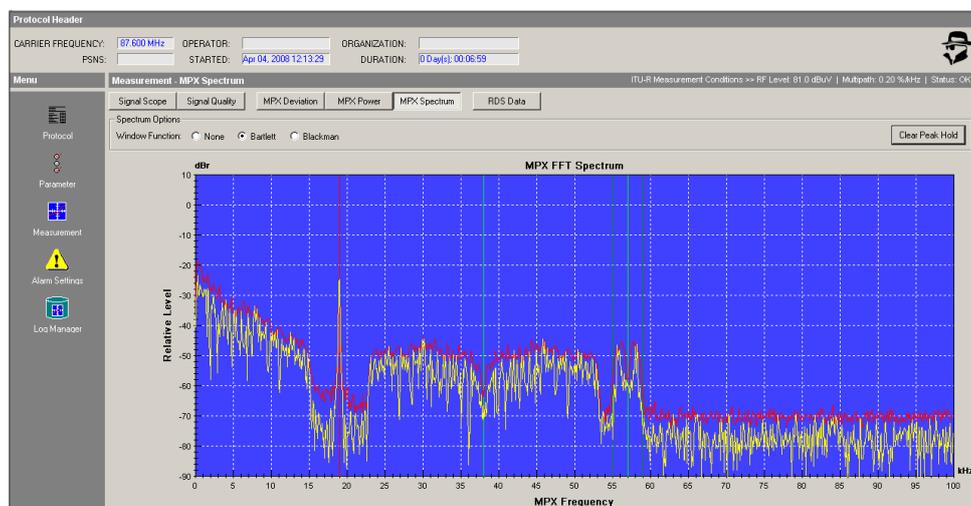
(b) MPX-Spektrum. Gelber Trace: Momentanspektrum; Roter Trace: Maxima

Abb. 3.9: Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des Klangbeispiels am Ausgang von TX RB

Das an TX FH genutzte FM-Störsignal bestand gem. [ITU02c] gefärbtem Rauschen, inkl. RDS. MPX-Leistung und Hub blieben innerhalb der 0 dB / 75 kHz-Grenze. Die resultierende Hubverteilung und das dazugehörige MPX-Spektrum des Signals ist in Abb. 3.10 dargestellt.



(a) Hubverteilung. Blau: Zeitlicher Mittelwert; gelb: Maxima



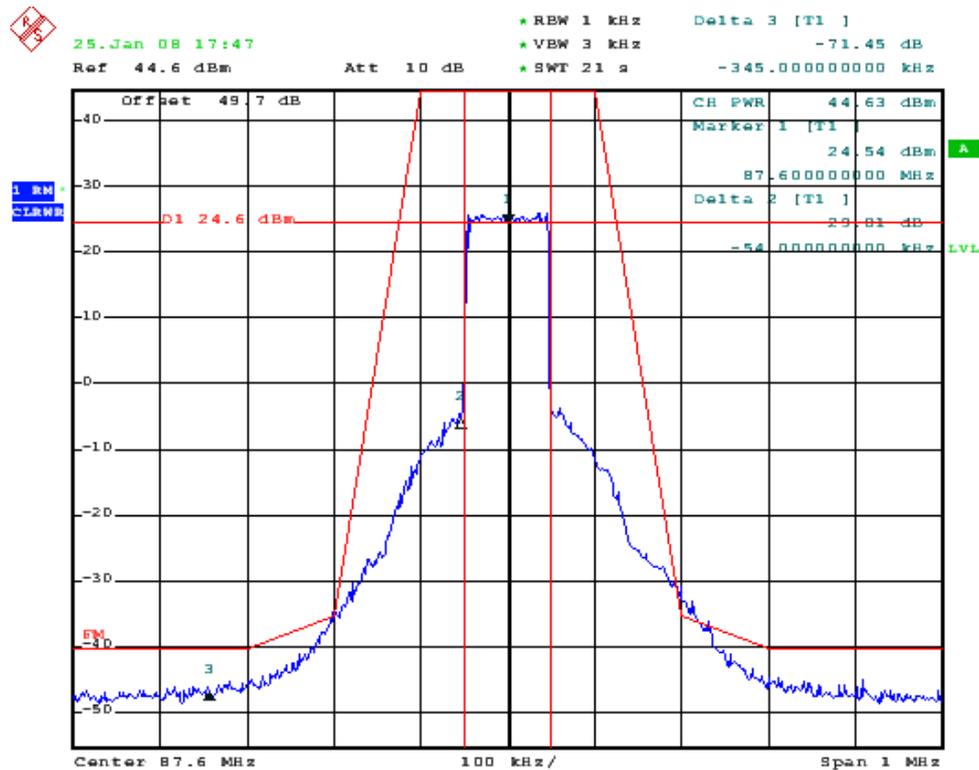
(b) MPX-Spektrum. Gelber Trace: Momentanspektrum; Roter Trace: Maxima

Abb. 3.10: Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des farbigen Rauschens am Ausgang von TX FH

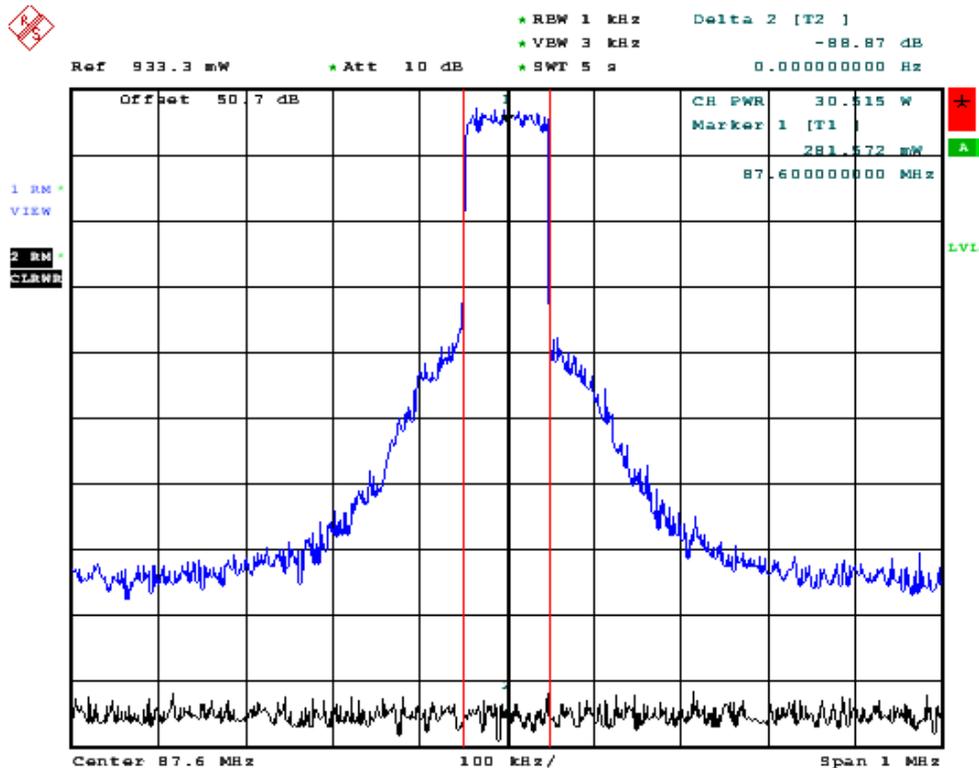
3.3.2 DRM⁺

In Abb. 3.11 ist das Ausgangsspektrum des Senders im DRM⁺-Betrieb zu sehen. Die eingezeichnete Spektrumsmaske entspricht der in [Ins04] genormten Maske für FM-Sender. Diese wurde im Sinne eines Worst-Case-Szenarios soweit wie möglich ausgereizt.

Die Maskenreferenz am oberen Rand der Darstellung 3.11 entspricht der Leistung des unmodulierten Trägers. Aufgrund der Bandbreite des DRM⁺-Signals ist das dargestellte RMS-Spektrum $10 \cdot \log(1 \text{ kHz}/100 \text{ kHz}) = -20 \text{ dB}$ unterhalb dieser Maskenreferenz angesetzt, d.h. die Leistung des Hybridsenders TX FH entspricht im DRM⁺-Modus derjenigen des FM-Betriebes.



(a) DRM⁺-Ausgangsspektrum an TX FH



(b) Blauer Trace: Ausgangsspektrum an TX FH im DRM⁺-Betrieb; Schwarzer Trace: Ausgangsspektrum an TX FH bei betätigter, ferngesteuerter Notabschaltung

Abb. 3.11: DRM⁺-Ausgangsspektrum (a) und Verhalten des Senders bei Notabschaltung (b)

In früheren Arbeiten wurde im Zusammenhang mit DRM⁺ auf die Abhängigkeit des Schutzabstandes vom Crestfaktor verwiesen. Der in diesem Feldversuch eingesetzten Hochleistungsverstärker zur Erzeugung der notwendigen Sendeleistung wurde in den Bereich eines weichen Clippings getrieben

und somit das Signal zusätzlich geformt (Ansteigen der Seitenbänder durch nichtlineare Effekte im Austausch gegen Limitierung der Spitzenleistung → Reduktion des Crestfaktors). Am Senderausgang wurde ein Crestfaktor von ca. 6,5 dB ermittelt, der unkomprimierte Crestfaktor² des DRM⁺-Signals wurde zu ca. 11 dB bestimmt. Abbildung 3.12 stellt das Ergebnis der dazugehörigen CCDF³-Messung graphisch dar.

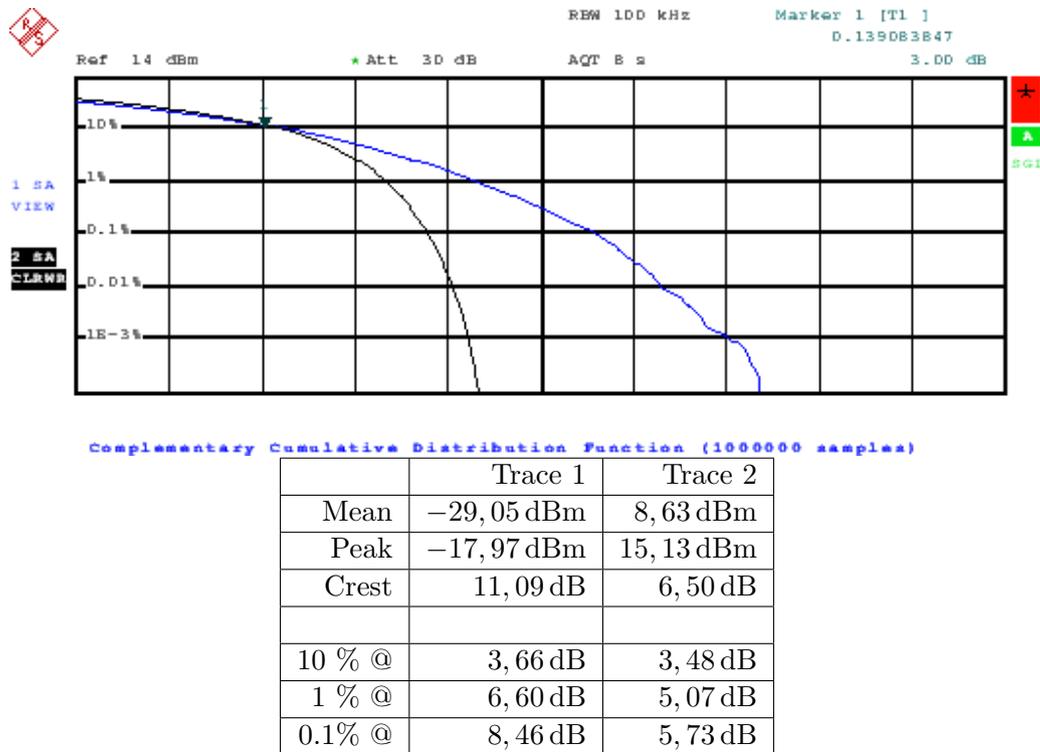


Abb. 3.12: CCDF des DRM⁺-Sendesignals:

Trace1 [blau]: Signal am Ausgang des Vorverstärkers

Trace 2 [schwarz]: Signal am Ausgang der Endstufe

Es ist zu beachten, dass bei der Reduktion der Sendeleistung von TX FH im DRM⁺-Modus der Crestfaktor durch den gewonnenen Abstand der RMS-Spannungen zum 1 dB-Kompressionspunkt wieder bis zum ursprünglichem Wert ansteigt. Dies ist ab einer Dämpfung von ca. 7 dB bezogen auf die volle Ausgangsleistung der Fall.

Im DRM⁺-Multiplex war entweder eine PRBS-Sequenz oder ein HE-AAC-kodiertes Audiosignal enthalten. Optional konnte der Multiplex auch aus einem oder mehreren Journaline-Diensten inkl. einem Audiosignal gebildet werden. Der MSC wurde mit Equal Error Protection (EEP) kodiert und mit einer 4-QAM moduliert, der SDC in der höchsten Schutzstufe (Faltungsrate 0,5) kodiert. Die (C)OFDM-Modulationsparameter von DRM⁺ sind in der folgenden Tab. 3.2 aufgelistet.

Modulationsart	(C)OFDM
Subträgeranzahl	213
Subträgerabstand	444 Hz
HF-Bandbreite	96 kHz

Tab. 3.2: Modulationsparameter von DRM⁺

²Bezug: Basisbandsignal

³CCDF, Complementary Cumulative Distribution Function; engl.: Komplementäre kumulierte Häufigkeitsverteilung. Die CCDF stellt dar, mit welcher Häufigkeit eine Zahl definierter Abtastungen eines Signals einen gewissen Amplitudenwert überschreitet.

3.4 Messung der HF- und NF-Parameter im Feld

Eines der messtechnischen Schlüsselkonzepte dieses Feldversuchs beruht darauf, die Störwirkung vom DRM⁺ im Vergleich zu einem FM-Signal zu erfassen. Hierbei werden die Störsignale von einem einzigen Standort (TX FH) bei gleicher Leistung ausgesendet. TX RB übernimmt die Rolle des zu störenden Nutzsenders. Die Verschlechterung beim Wechsel der Störsituation (FM/DRM⁺) ist das jeweilige Indiz der relativen Änderung des Störpotentials.

Um die Rahmenumstände der Empfangssituation zu beschreiben und die verschiedenen Einflüsse des Störsignals zu identifizieren ist sowohl die HF- als auch die NF-Ebene zu betrachten. Da die Messungen im Feld anstatt im Labor stattfinden ist es notwendig, einige zusätzliche Eigenheiten bei der Festlegung der Messvorgänge zu beachten. Weitere Details zu diesem Thema finden sich in Abschnitt 5.1.

3.4.1 HF-Parameter

Das UKW-FM-Rundfunkband ist im allgemeinen aus planerischer Sicht sehr belegt. Bedingt durch die Vielzahl an Sendern kann an vielen Orten Strahlung messtechnisch erfasst werden, unabhängig davon, ob der dazugehörige Sender den Punkt versorgt oder nicht. Da bei der Frequenzmodulation der erzielbare Signal- zu Rauschabstand am Empfängerenausgang vom Modulationsindex und dem HF-seitigem S/N abhängt, ist dieser Rauschpegel somit in jedem Fall – aus messtechnischer Sicht – als eine Grundstörung anzusehen. Somit sind nicht nur die jeweiligen Empfangspegel von TX FH bzw. TX RB, sondern auch der jeweils auf dem Kanal vorhandene Rauschpegel selektiv zu erfassen. Aus diesen Werten kann der sogenannte Carrier-to-Noise-Ratio (Träger-/Rauschabstand, C/I) ermittelt werden, so dass diesem Umstand Rechnung getragen wird. In jedem Fall ist zu beachten, dass die HF-Messungen gem. [Gem82] nur dann gültig sind, wenn die Reflexionen am Testpunkt kleiner als 2%/kHz sind, um ungewollte Verzerrungen im Signal durch die Empfangssituation allein auszuschliessen.

Da ein Funkfeld auch beim Empfang mit Richtantenne immer mit einer gewissen Dynamik sowohl in der Wellenausbreitung der beteiligten Sender, als auch durch die unterschiedlichsten Störquellen (z.B. „Man-made-noise“) behaftet ist, wurden im Rahmen dieses Versuchs die Pegel im Zeitbereich gemittelt.

3.4.2 NF-Parameter

Die Bewertung des empfangenen Nutzsignals am Empfängerenausgang ist dann am einfachsten und schnellsten durchzuführen, wenn das Nutzsignal ein definiertes Testsignal (z.B. Sinuston auf einer fixen Frequenz) darstellt. 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 am Empfängerenausgang erfasst („N“-Anteil) und anschliessend das Verhältnis gebildet. Hierbei gilt: hohe Werte $\hat{=}$ hohe Signaldynamik, Signal ist mit geringem Rauschen behaftet.

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, das 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.

Aufgrund der oben erwähnten Tatsache, dass das Funkfeld am jeweiligen Testpunkt nur bedingt als 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 linearen Skala) arithmetisch gemittelt und danach wieder in die Dezibelskala übertragen. Durch dieses Verfahren wirken sich bei hohen S/N- bzw. SINAD-Werten Ausreißer stärker aus als bei geringen Werten, da sie stärker ins Gewicht fallen. Somit sind diese Angaben als „Worst-Case“-Werte anzusehen.

Abschliessend sei darauf hingewiesen, dass der Vergleich der Störwirkung von DRM⁺ und FM umso aussagekräftiger ist, je weniger reflexionsbehaftet das FM-Nutzsignal empfangen wird. Somit sind insb. Messaufbauten gem. [Gem82], die um die Funktionalität des Messens von S/N und/oder SINAD durchaus geeignet, diesen Vergleich messtechnisch zu ermitteln.

3.5 Empfänger

3.5.1 FM-Empfänger

Als FM-Empfänger kamen – neben den in den entsprechenden Abschnitten gesondert aufgeführten, dedizierten FM-Messempfängern – die in der folgenden Tabelle 3.3 verzeichneten Modelle zum Einsatz:

Modell	Kategorie	Selektion
JVC CA-MX55RMB Hifi Rack	Stationärer Empfänger	mittel
Blaupunkt Woodstock DAB54	KFZ-Empfänger	hoch
Pure Digital Evoke-2	Portabler Empfänger	niedrig

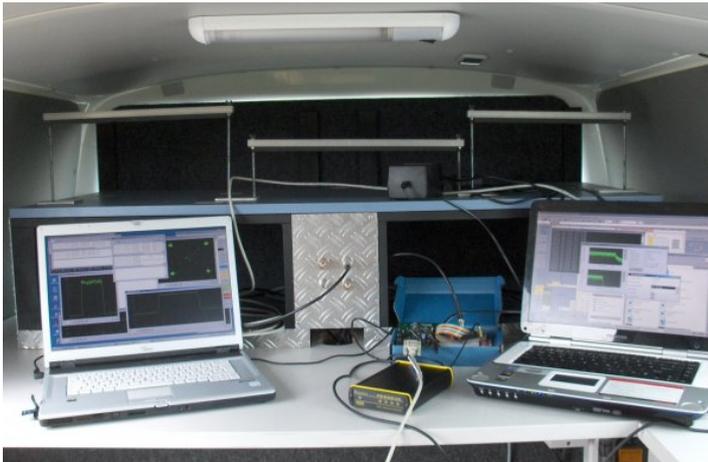
Tab. 3.3: Liste der verwendeten FM-Empfänger

Der JVC-Empfänger wurde bereits durchgängig in den Labormessungen eingesetzt, so dass seine Nutzung Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Zudem ist er aufgrund seiner durchschnittlichen Selektivität, seinem hohem Signal-/Rauschabstand und seiner guten Handhabbarkeit sozusagen der „Standardempfänger“ im Rahmen dieses Feldversuchs. Die beiden weiteren Empfänger sind zusätzlich zu den Versuchen in Abschnitt 5.3.2.3 verwendet worden, um – soweit im zeitlichen Rahmen des Versuchs möglich – das Verhalten unterschiedlicher Empfänger zu erfassen. Dort sind auch weitere Labormesswerte zu den einzelnen Geräten aufgeführt. Die Geräte sind darüberhinaus auch Bestandteil der Untersuchungen [HSE07, SSR07, SS08].

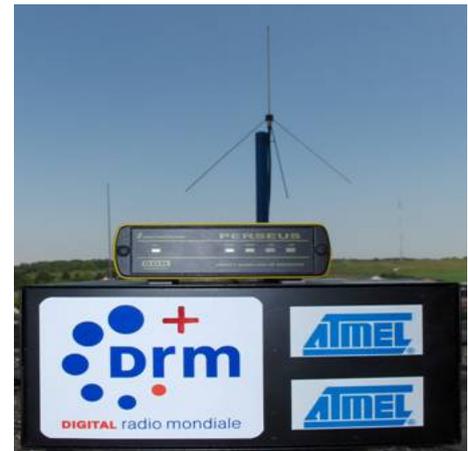
3.5.2 DRM⁺-Empfänger

Die Arbeiten an dem in Abb. 3.13 dargestellten Empfängerprototypen wurden parallel zum laufenden Versuch durchgeführt. Der komplette Aufbau wurde im Mai 2008 fertiggestellt, der Dekoder selbst arbeitete ab Pfingsten stabil. Insofern können im Rahmen dieses Berichts nur erste Eindrücke geschildert werden. Auf jeden Fall muss immer bedacht werden, dass es sich bei dem verwendeten Empfänger um einen Prototypen handelt, der sicher an vielen Stellen noch verbessert werden kann. Dennoch hat sich

gezeigt, dass dieser erste DRM⁺-Empfänger eine durchaus respektable Leistung insbes. im mobilen Einsatz liefert.



(a) Bei den ersten Empfangsversuchen im Messbus der FH-KL



(b) Vereinigung der Komponenten in einem Gehäuse

Abb. 3.13: Der DRM⁺-Empfängerprototyp

Abb. 3.14 stellt den schematischen Aufbau des Empfängers dar, der im folgendem erläutert wird.

Der Empfänger besteht auf einem State-of-the-Art Multiband-/Multistandard-Frontend der Firma Atmel (ATR4262), das im UKW-Modus mit entsprechenden Adaptionen in Bezug auf max. Ausgangspegel, AGC-Verhalten, usw. betrieben wird. Das Ausgangssignal des Frontends liegt auf einer Zwischenfrequenz von 10,7 MHz. Dort wird es an einen Analog-/Digitalwandler (Microtelcom Perseus) weitergereicht, der das ZF-Signal digitalisiert und dezimiert, so dass das Signal im Basisband vorliegt. Die digitalen Basisbandsamples werden via USB in einen PC übertragen, auf dem die ursprüngliche Abtastrate des Perseus-Moduls in Echtzeit von 250 kSamples/s auf 192 kSamples/s umgetastet wird. Dieser Datenstrom wird rechnerintern an den DRM⁺-Decoder des FhG-IIS weitergereicht. Dieser führt die Prozesse der z.B. Kanalverzerrung, Synchronisation, Fehlerkorrektur, Deinterleaving, Demultiplexing durch und liefert in Echtzeit die empfangenen Nutzdaten.

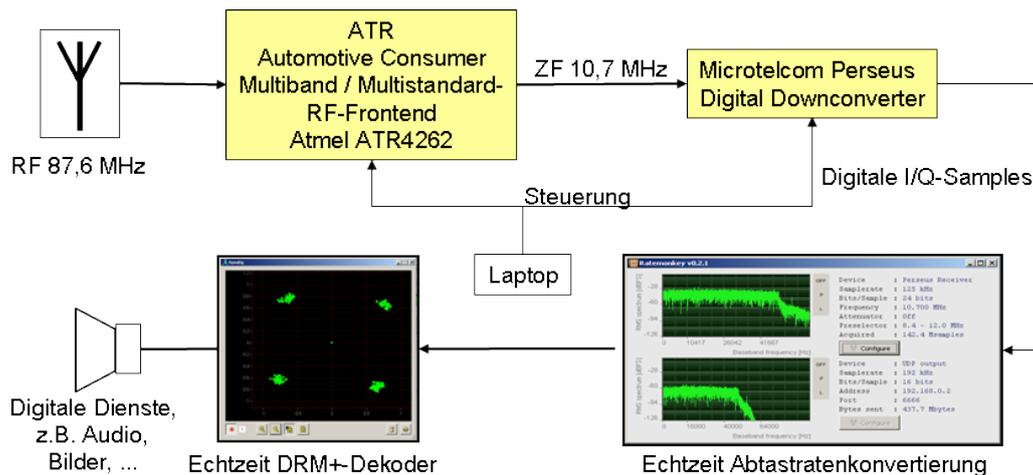


Abb. 3.14: Blockschaftbild des DRM⁺-Empfängers

3.6 Wahl der Messorte

3.6.1 Orientierungsmessung

Um einen generellen Überblick über die Feldstärken der beiden beteiligten Sender im Stadtbereich zu bekommen wurden zwei orientierende Vormessungen durchgeführt. Auf Basis dieser Testfahrten konnten Punkte identifiziert werden, an denen verschiedene Feldstärkekonstellationen vorliegen, um so gezielt verschiedene Situationen in die Messreihen zu integrieren.

Hierzu wurde jeweils ein Sender eingeschaltet und mit einem Messempfänger der sich lokal ergebende Feldstärkepegel an einem Rundstrahler (ca. 2,2 m über Grund) entlang eines (willkürlich gewählten) Weges aufgezeichnet. Die gewonnenen Daten dieser Einzelfahrten sind in den Abbildungen 3.15, 3.16 dargestellt. Der Feldstärkepegel, der an einem Ort von TX FH erzeugt wird, wird hierbei als E_{FH} bezeichnet. Entsprechendes gilt für den Feldstärkepegel von TX RB, der mit E_{RB} bezeichnet wird.

Die auf diese Weise erfassten und in Abb. 3.15, 3.16 dargestellten Feldstärkepegel wurden jeweils zu Rastern von einer Fläche von (100 m × 100 m) zusammengefasst. Bei der Rasterbildung wurden die in dem entsprechenden Bereich erfassten Feldstärkepegel gemittelt, d. h. es wurde der jeweilige Medianwert der Feldstärkepegel in den Flächenabschnitten gebildet. Danach wurde die Differenz der Feldstärkepegel $\Delta_E = E_{FH} - E_{RB}$ an den Orten sich überlappender Raster gebildet, s. Abb. 3.17. Auf einer linearen Skala entspricht Δ_E dem Quotienten der Feldstärkepegel beider Sender.

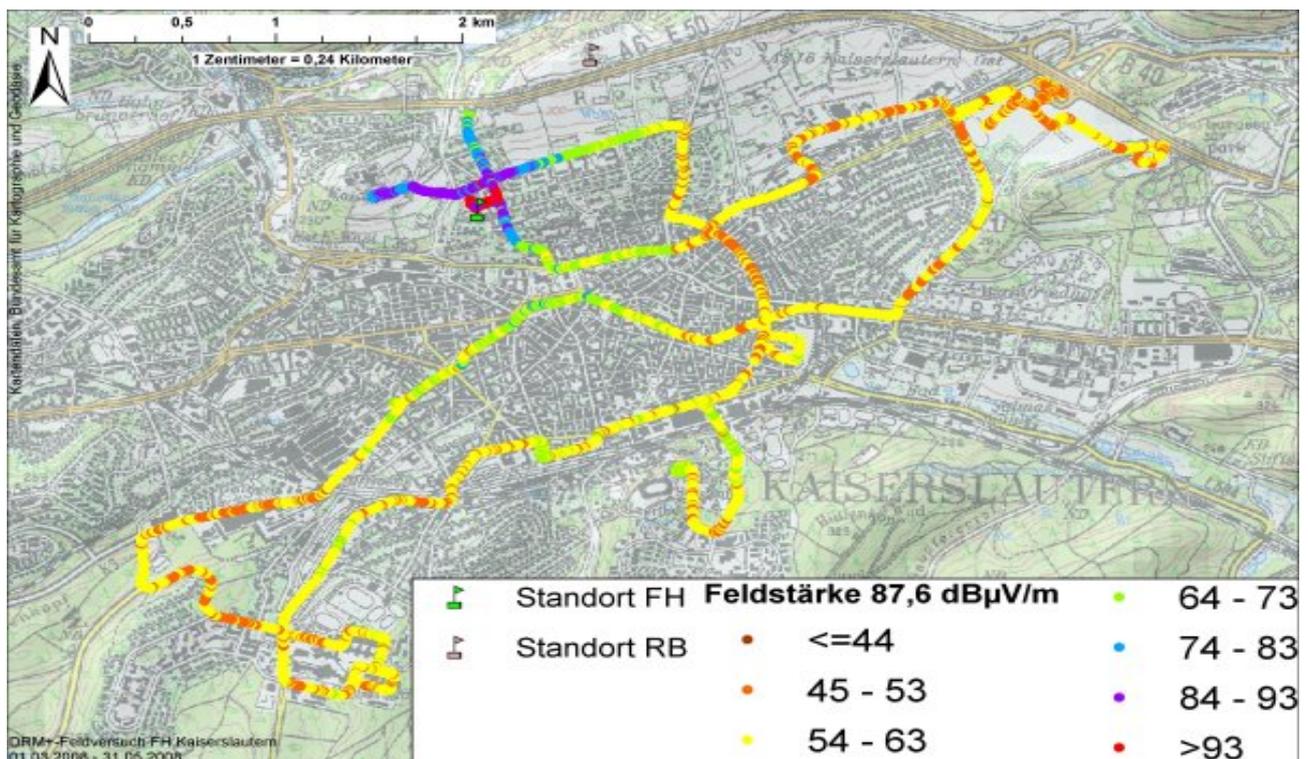


Abb. 3.15: Testfahrt vom 19.3.2008 zur Auswahl der stationären Messpunkte, nur TX FH aktiv. 🔍

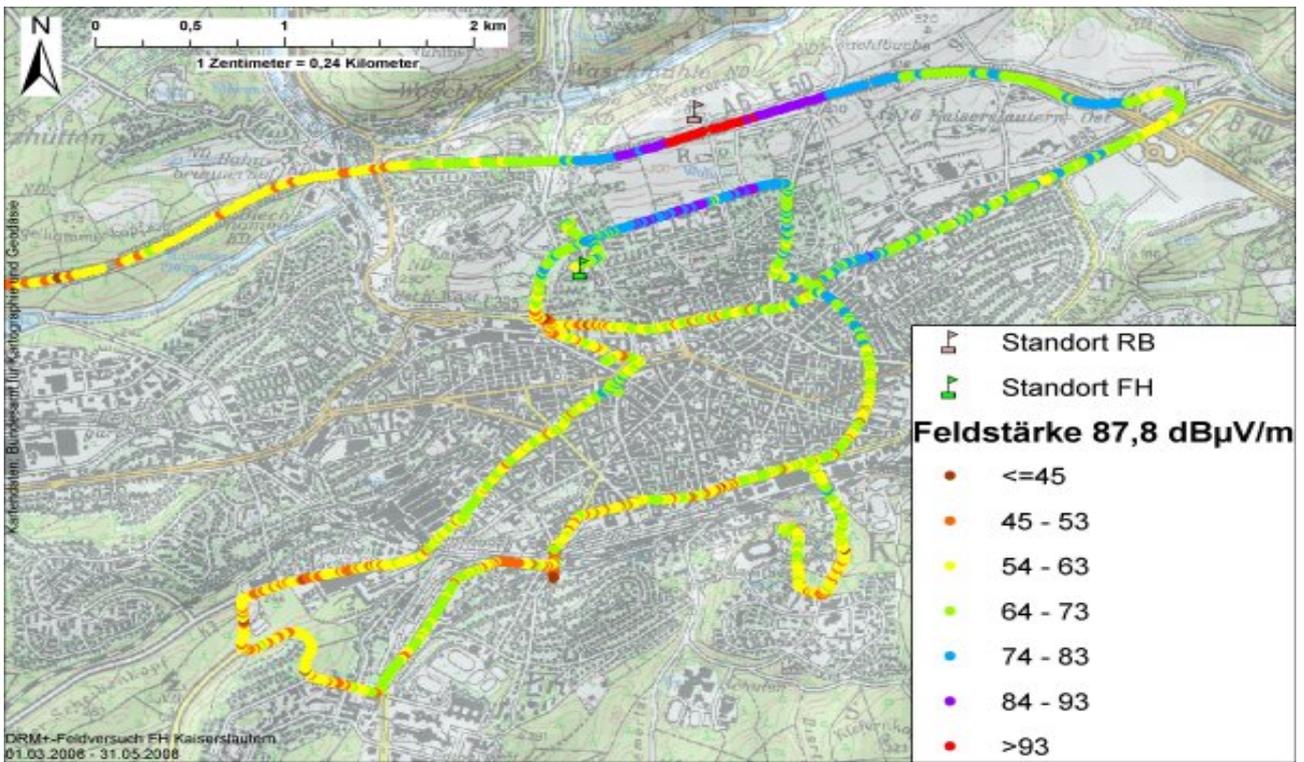


Abb. 3.16: Testfahrt vom 18.3.2008 zur Auswahl der stationären Messpunkte, nur TX RB aktiv. 🔍

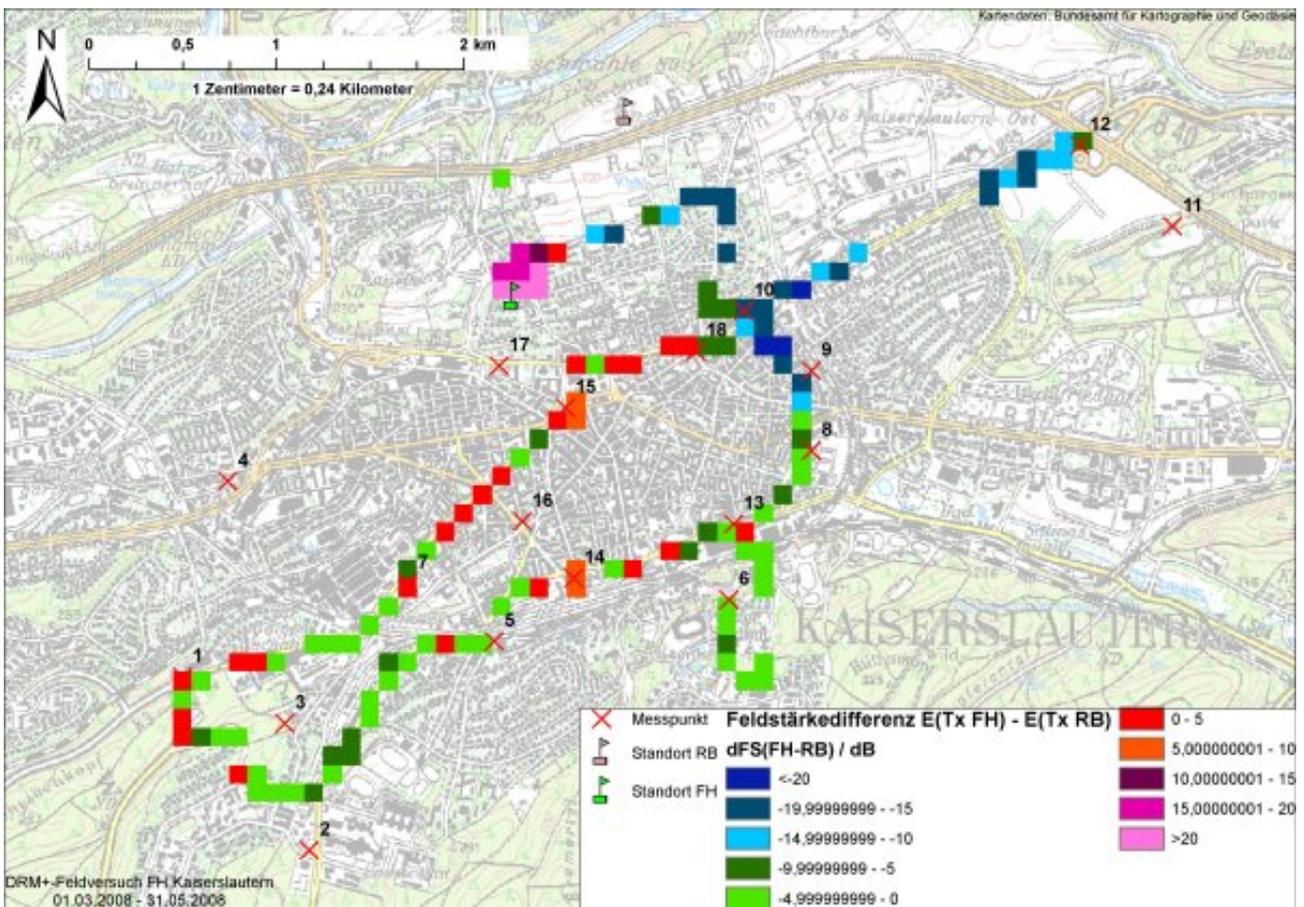


Abb. 3.17: Feldstärkedifferenz der beiden Sender gem. Testfahrten vom 18.& 19.3.2008. 🔍

3.6.2 Auswahl der stationären Messpunkte

Anhand der vorliegenden Datensätze aus den oben beschriebenen Vormessungen bzw. der sich daraus ergebenden Differenzdarstellung ergeben sich für die beiden Messfahrten das in Abb. 3.18 dargestellte Histogramm der Feldstärkepegel. Es ist zu beachten, dass beide Routen leicht unterschiedlich sind.

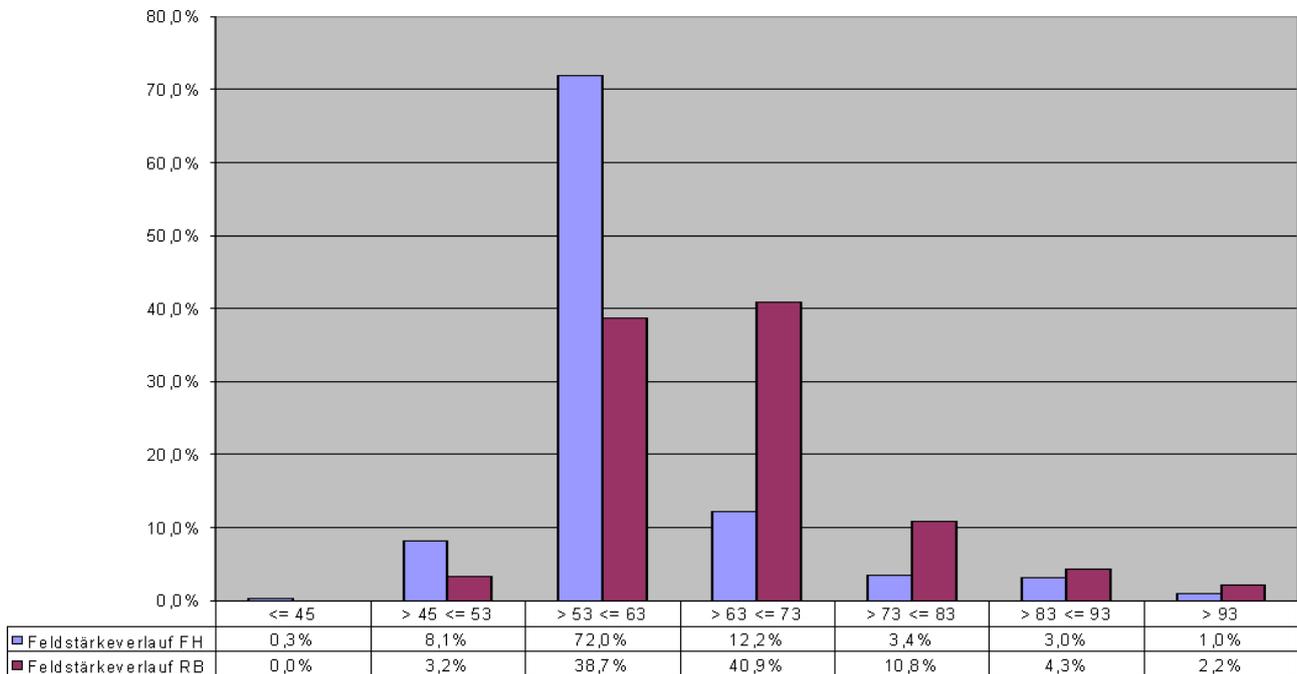


Abb. 3.18: Histogramme der absoluten Feldstärken bei den Testfahrten vom 18./19.3.2008

Betrachtet man das Histogramm der Mediendifferenzen der Feldstärkepegel aus Abb. 3.17, so ergibt sich bezogen auf die jeweils kongruenten Raster der beiden Fahrten die in Abb. 3.19 dargestellte Verteilung.

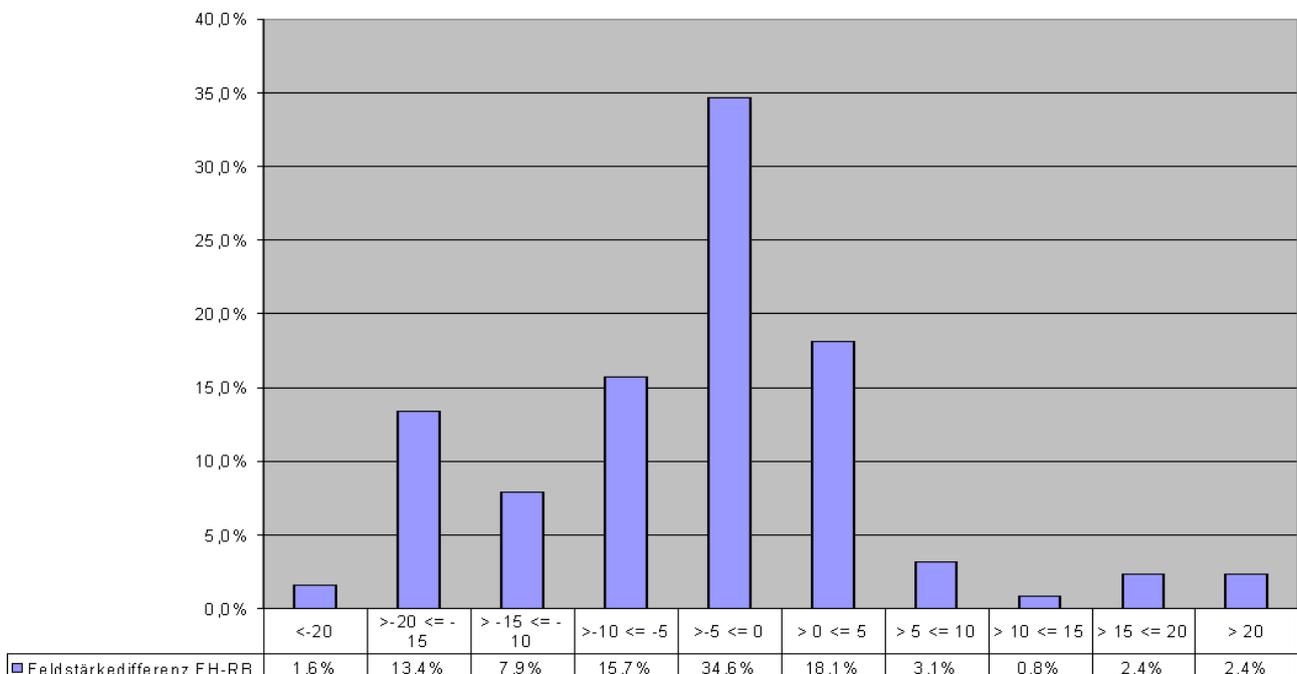


Abb. 3.19: Histogramm der Feldstärkepegeldifferenz ($E_{FH} - E_{RB}$)/dB bei den Testfahrten

Im Anschluß an diese Vormessung wurde die Anzahl der Messpunkte im stationärem Fall (s. auch

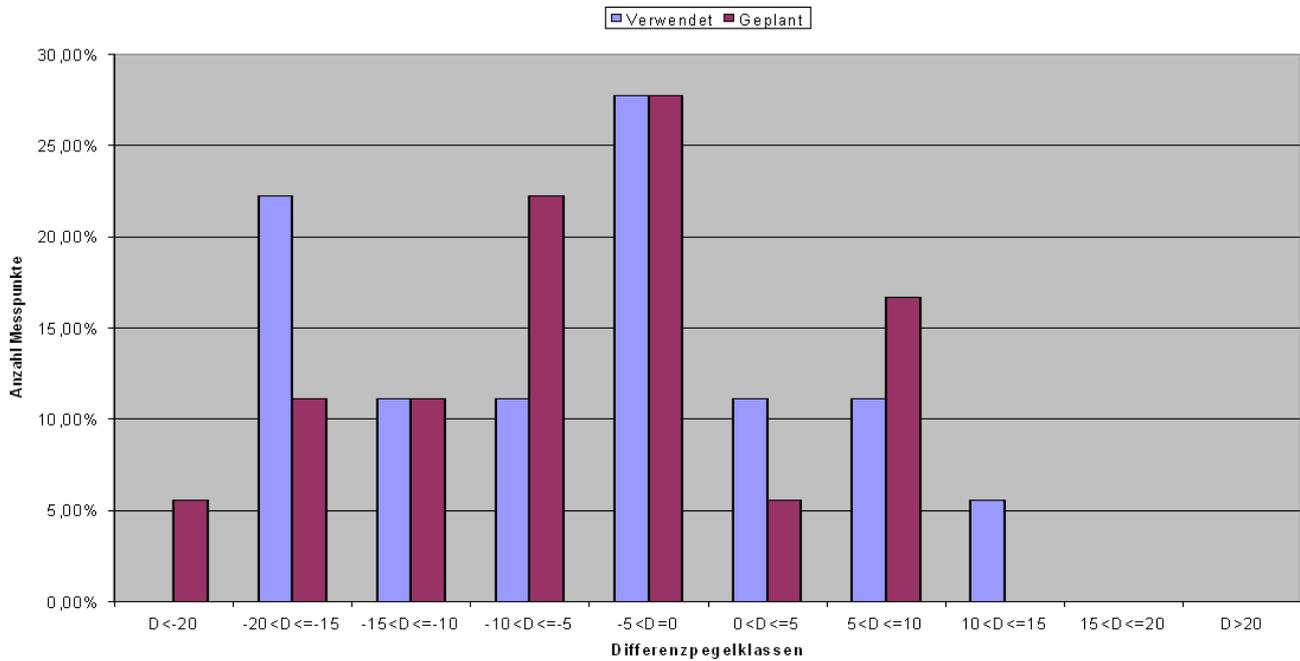


Abb. 3.20: Histogramm der Feldstärkepegeldifferenz der Messpunkte, geplante und tatsächlich vorhandenen Pegeldifferenzen bezogen auf die Anzahl aller Messpunkte (18)

Kapitel 5) zu 16 gewählt. Letztendlich sind insgesamt 18 Punkte abgearbeitet worden. Die Punkte wurden so gewählt, dass die prozentuale Verteilung der Differenzfeldstärken gem. der Verteilung in Abb. 3.19 repräsentiert wurde. In den Fällen, an denen in Abb. 3.19 kein Wert existiert wurde anhand von Abb. 3.15 bzw. Abb. 3.16 eine Schätzung vorgenommen. Es ist zu beachten, dass die Differenzen sich aufgrund der bei den stationären Messungen verwendeten Richtantenne noch verändern können, was bei der Vormessung nicht berücksichtigt werden konnte. Diese Vorgehensweise lieferte eine gute Schätzung für die Verhältnisse, die an den Messpunkten im stationären Fall tatsächlich herrschten. Die Lage der Messpunkte ist in der folgenden Abbildung verzeichnet. Desweiteren sind die in Abschnitt 5.3.2.3 verwendeten Punkte als Sondermesspunkte eingetragen. Zur zusätzlichen Orientierung sind die Luftlinienabstände von den beiden Sendern in

- schwarz bzw. schwarz-gestrichelt (TX FH)
- gelb (TX RB)

eingetragen.

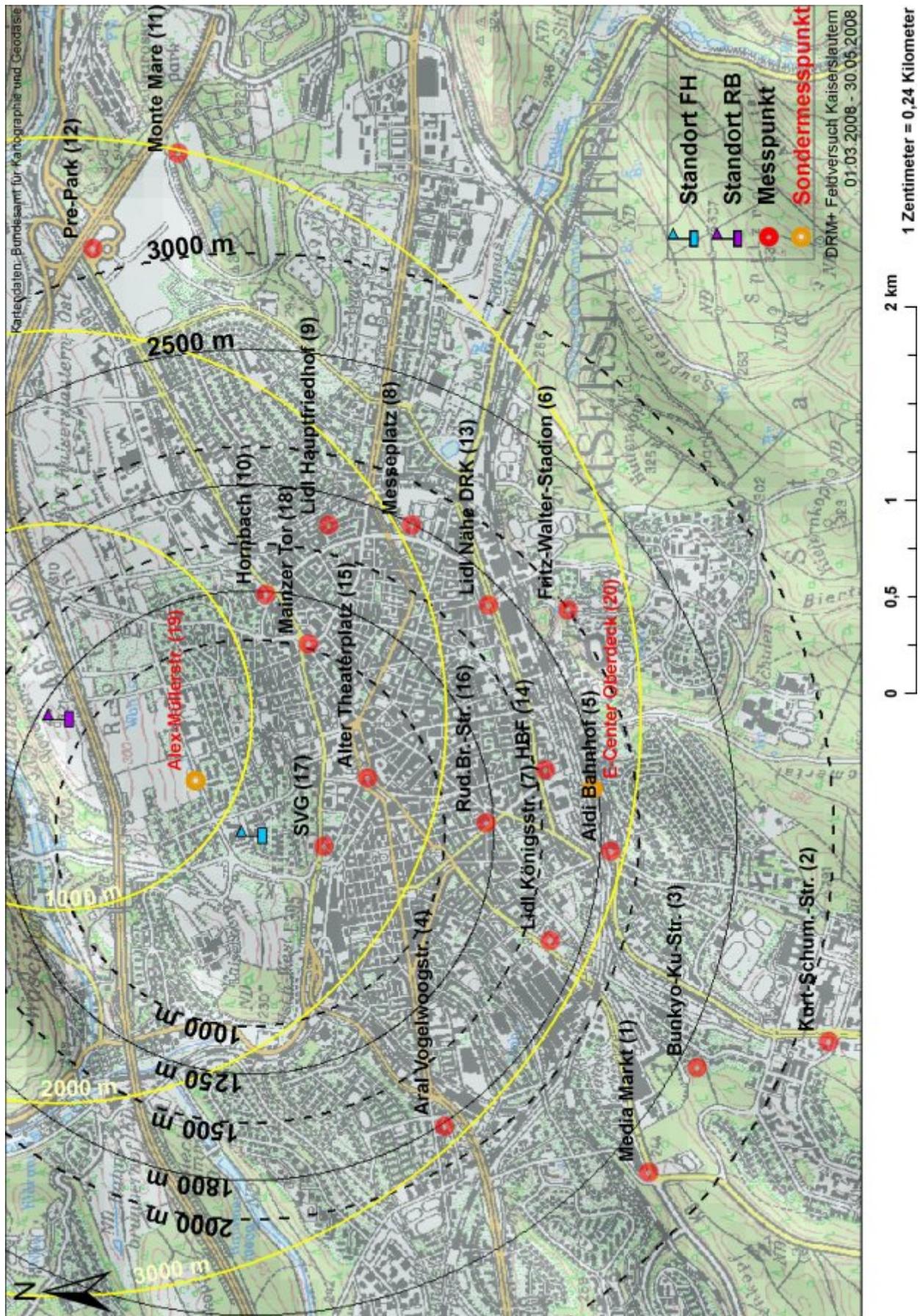


Abb. 3.21: Lage und Zordnung der stationären Messpunkte inkl. der in Kapitel 5.3.2.3 referenzierten Orte. Schwarze Kreise: Abstand von TX FH; gelbe Kreise: Abstand von TX RB. 

3.6.3 Auswahl einer Messroute

Nach Festlegung der Punkte im stationären Fall wurde die Route für die mobilen Messungen derart gewählt, dass

- möglichst viele der stationären Punkte von der Route berührt werden.
- verschiedene Bewegungsprofile (Innenstadtverkehr, verkehrsberuhigte Zonen, Autobahnen) berücksichtigt werden.
- beide Senderstandorte möglichst ortsnah passiert werden.
- unterschiedliche Gebiete wie z.B. Wohngebiete, Autobahnen, Geschäftsviertel, industrielle Umgebungen Teil der Route sind und somit – im Rahmen der örtlichen Gegebenheiten – einen repräsentativen Querschnitt unterschiedlicher Empfangsbedingungen bildet.

Die endgültig verwendete Route ist in Abb. 3.22 dargestellt. Sie weist eine Gesamtlänge von ca. 38 km auf.

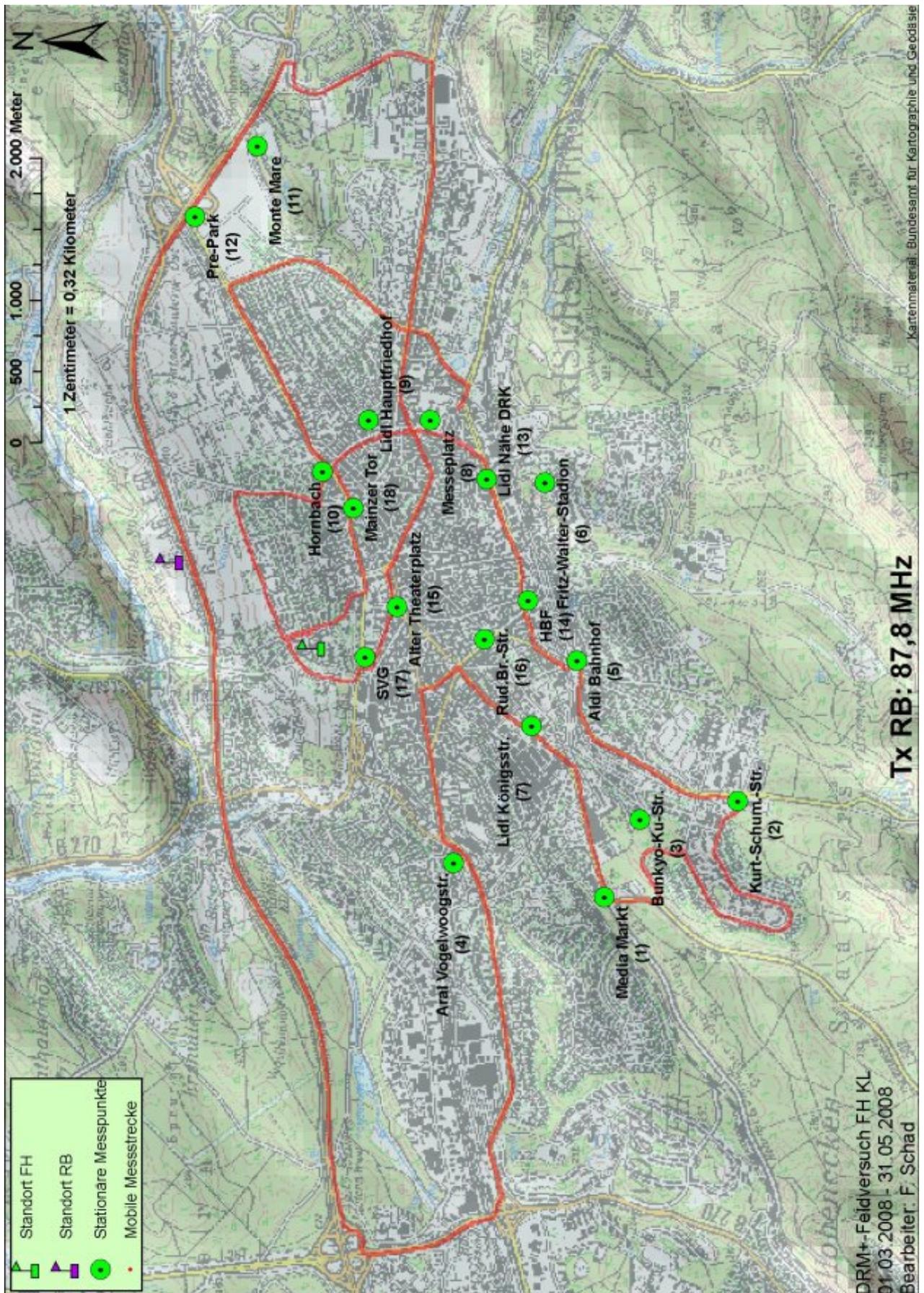


Abb. 3.22: Mobile Messstrecke mit eingezeichneten stationären Messpunkten. 🔍

4 Auswirkungen von DRM⁺ auf den BOS-Funk

Die Situation in Kaiserslautern ist sehr gut geeignet, um im Rahmen des Feldversuchs unerwünschte Wirkungen zu erkennen, die durch die DRM⁺-Ausendung im Bezug auf den BOS-Funk entstehen können, da lokal die Empfangsfrequenz 87,235 MHz verwendet wird. Diese Frequenz liegt lediglich 20 kHz unter der höchsten nutzbaren Frequenz der BOS-Empfänger. Zu dem Oberband 87,235 MHz gehört im Unterband die Sendefrequenz 77,435 MHz. Lokal ist eine Relaisstationen am Sendeturm Dansenberg vorhanden. Darüberhinaus existiert ein weiteres Relais am Donnersberg, das von Kaiserslautern ca. 25 km Luftlinie entfernt ist. Zusammen mit einem Team der zuständigen Stelle für Polizeitechnik wurden direkt zu Beginn des Feldversuchs Messungen durchgeführt, um eventuelle Probleme zu identifizieren bzw. auszuschliessen.

Folgende Messungen wurden durchgeführt, s. a.[HHE08]:

- Bewertung von Nebenwellenausendungen mit dem Spektrumanalyzer
- Empfängerempfindlichkeitsmessung mit einem 4 m-BOS-Empfänger. Hierzu wurde als Referenz bei getasteter Gleichwellenfunkanlage (BOS-Kanal 508, Sender Donnersberg & Dansenberg) bei abgeschaltetem DRM⁺- bzw. FM-Sender der FH KL der Empfangspegel in dB μ V ermittelt. Gegenüber der Referenzmessung wurden im direktem Anschluß die Messungen mit dem eingeschaltetem DRM⁺- bzw. FM-Sender verglichen. Die gleiche Prozedur wurde nachfolgend mit abgeschaltetem BOS-Relais Dansenberg durchgeführt, so dass die Kommunikation über das Relais Donnersberg erfolgte.

Die Lage der Relaisstationen und Messpunkte ist in Abb. 4.1 verzeichnet. Zusätzlich ist in dieser Darstellung der Ort Ramstein markiert, s. hierzu Kapitel 8.

Der Empfangspegel auf dem beobachtetem Kanal war in allen Senderzuständen gleich, d.h. dass dort keine Nebenausendungen des Senders FH erkennbar waren. Darüberhinaus war an allen Testpunkten die Kommunikation in allen Senderzuständen via dem BOS-Funk erfolgreich, auch bei abgeschaltetem Ortsrelais.

Messpunkt	Pegel (Dansenberg & Donnersberg)	Pegel (Donnersberg)
Alex-Müllerstr.	40 dB μ V	27 dB μ V
Messeplatz	53 dB μ V	15 dB μ V
PS Enkenbach	30 dB μ V	n.v.

Tab. 4.1: Nutzfeldstärken an den Messpunkten bei den BOS-Messungen

An allen Orten konnte keine Beeinträchtigung des BOS-Dienstes festgestellt werden. Während des gesamten Versuchszeitraums ist von keinen Ungewöhnlichkeiten bzw. Beeinträchtigungen berichtet worden.

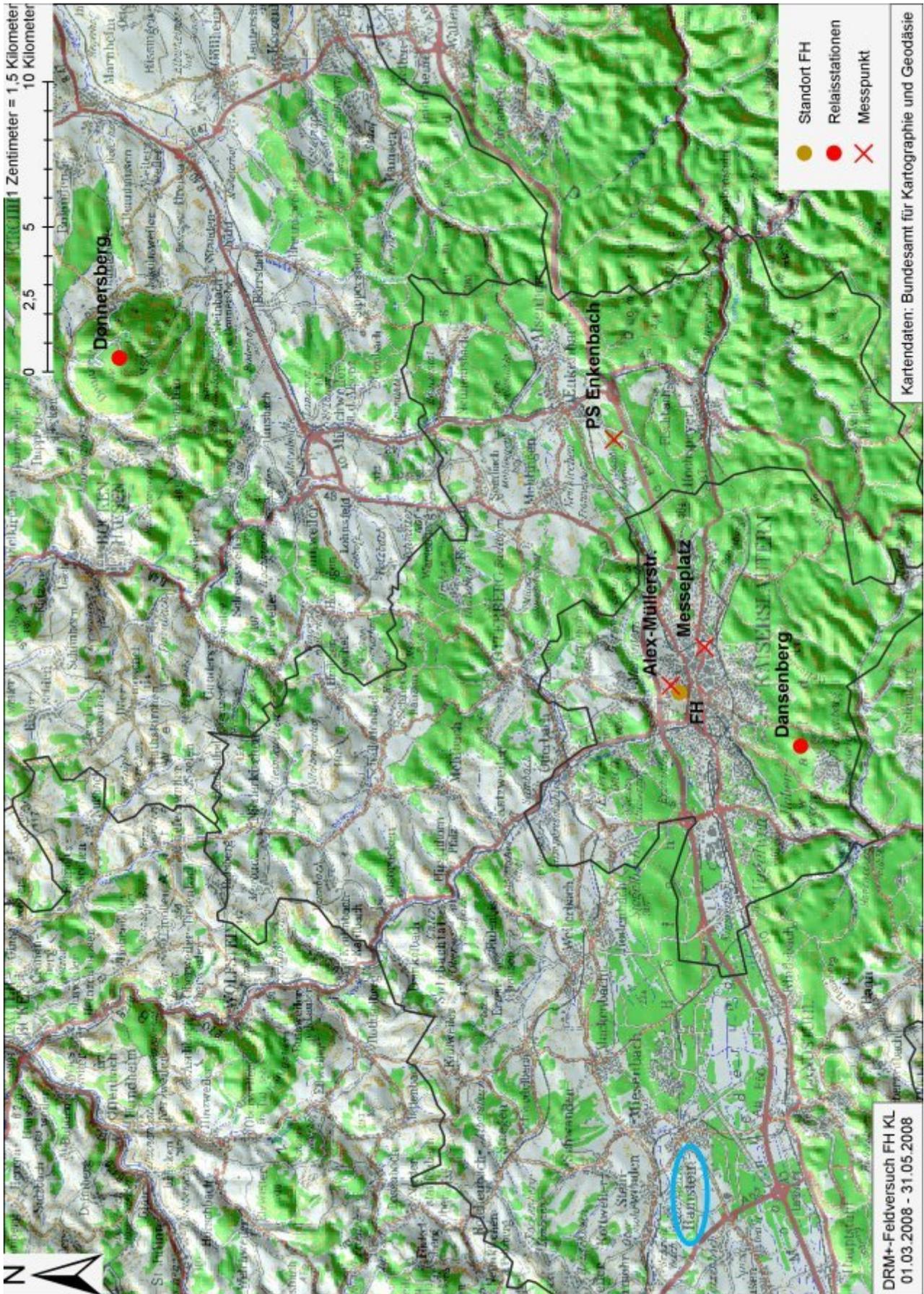


Abb. 4.1: Lage der BOS-Relaisstationen und BOS-Messpunkte. 

5 Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM – Stationäre Messungen

5.1 Messkonzepte und -verfahren

5.1.1 Versorgungskriterium gem. FTZ-Richtlinie

Die Versorgungsrichtlinie für den UKW-Rundfunkempfang [Gem82] sieht für Versorgungs- bzw. Störmessungen eine Erfassung der HF-Pegel mit der dort angegebenen Richtantenne zum Stereoempfang in 10 m Antennenhöhe über Grund vor. Die ermittelten Feldstärken werden mit den entsprechenden Schutzabständen für den UKW-FM-Empfang (FM stört FM) gewichtet und ausgewertet. Demnach gilt ein Punkt dann als versorgt, wenn alle nachfolgend genannten Punkte erfüllt sind:

- Am Empfangsort liegt ein Mindestnutzfeldstärkepegel von 54 dB μ V/m vor.
- Die Reflexionen des Nutzsenders am Empfangsort sind kleiner als 2 %/kHz.
- Die Interferenzen durch andere Sender dürfen die in [ITU02a, Gem82] aufgeführten Schutzabstände nicht überschreiten.

Als zumutbare Antenne zum UKW-Stereoempfang – die auch zur Bestimmung der oben genannten Kriterien verwendet wird – ist eine Antenne mit dem in Abb. 5.1 dargestelltem Richtdiagramm angegeben.

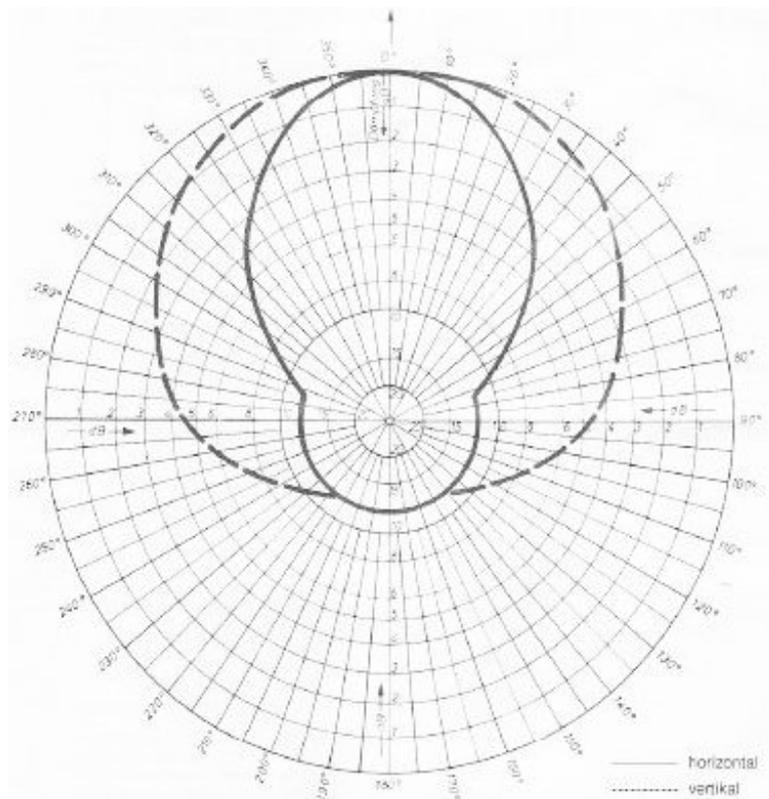


Abb. 5.1: Richtdiagramm der Antenne zum UKW-Stereoempfang und zu den stationären Messungen, aus: [Gem82]

5.1.2 S/N und SINAD als Qualitätskriterium

Die Größen S/N (Signal-to-Noise-Ratio) bzw. des SINAD (Signal with Noise and Distortion) [Mäu88, S. 118 ff.] repräsentieren die *Güte* eines Tonsignals.

Mittels des S/N wird der *Dynamikumfang* eines Signals von seinem maximalem Wert bis zum Rauschen angegeben. Dies heißt, dass es sich hierbei um eine zweistufige Messung handelt. Im ersten Schritt wird die Signalspannung U_s bei Ansteuerung des zu testenden Geräts mit dem maximalem Signalpegel ermittelt. Im zweiten Schritt wird die Rauschspannung U_n des Geräts ohne Ansteuerung erfasst. Nach Gl. 5.1 ergibt sich das S/N zu:

$$\text{S/N} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_s}{U_n} \right) \quad [\text{dB}] \quad (5.1)$$

Optional kann das Rauschen durch Rauschformfilter in seinen Eigenschaften verformt werden, z. B. zur Anpassung an die menschliche Gehörkurve. Ein solches spezielles Filter ist z. B. in [ITU02b] definiert und geht beispielsweise auch in die Bestimmung der Schutzabstände für den UKW-Rundfunk mit ein [ITU02d]. Auch der dort geforderte Quasi-Peak-Detektor wurde berücksichtigt. Bei allen S/N Messungen im Rahmen dieses Versuchs wurde daher dieses Filter verwendet.

Eine Alternative zu dem S/N-Verfahren ist das SINAD-Verfahren. Hierbei liegt der Prüftone dauerhaft am Testobjekt an. Auch hier wird eine zweistufige Messung durchgeführt. Im ersten Schritt wird die Gesamtspannung am Ausgang des Testobjekts gemessen (U_1). Im zweiten Schritt wird der Referenzton mit einem schmalbandigem Kerbfilter ausgeblendet und die Spannung erneut ermittelt (U_2). Somit ergibt sich aus der Signalspannung U_{sig} (die eigentliche Signalkomponente infolge des Prüftons), der Rauschspannung U_r und der Verzerrungsspannung U_d :

$$\text{SINAD} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{U_{sig}^2 + U_r^2 + U_d^2}{U_r^2 + U_d^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (5.2)$$

Der SINAD ist somit nicht nur ein Maß für die Dynamik im Sinne des S/N-Verfahrens, sondern auch für die Verzerrung des Signals, so dass bei diesem Verfahren gleich zwei wesentliche Parameter in der Erfassung der Audioqualität einfließen: Zusätzlich zum Rauschanteil werden auch Effekte erfasst, die durch z. B. gestörte Empfangssignale sich infolge von Verzerrungen oder ähnlichem äußern. Die Abbildung der Dynamik in Anlehnung zu dem S/N-Verfahren ist dann gegeben, wenn das verwendete Kerbfilter zum Ausblenden der Signalspannung U_{sig} ideal ist, d. h. das Filter weist bei minimaler Bandbreite (mit der Mittenfrequenz des Referenztons) eine unendliche Dämpfung auf.

Zwischen beiden Größen SINAD und S/N besteht ein Zusammenhang, der unter Laborbedingungen für verschiedene Signale und Anwendungsparameter ermittelt werden könnte. Dennoch ist zu beachten, dass aufgrund der angeführten verfahrenstechnischen Unterschiede Empfänger durchaus unterschiedliche Effekte und Reaktionen z. B. bei hohen HF-Eingangsspannungen, Störungen oder auch senderseitigem Überhub zeigen, so dass der gefundene Zusammenhang für genau den betrachteten Empfänger gilt. Auf der anderen Seite können durch Gegenüberstellung der Messwerte SINAD und S/N Rückschlüsse gezogen werden, welche der in den Gl. (5.1) und (5.2) beschriebenen Einzelspannungen das Störszenario besonders prägt. Wächst beispielsweise die Eingangsspannung des Empfängers und stagniert (oder sinkt) SINAD während S/N weiter ansteigt, dann ist dies ein klares Indiz dafür, dass die nichtlinearen Verzerrungen in der Übertragungskette¹ – und nicht der Rauschanteil – die Audioqualität bestimmen. Umgekehrt gilt auch: Sind SINAD und S/N zueinander weitestgehend proportional, d. h. besteht ein weitestgehend linearer Zusammenhang zwischen SINAD und S/N, dann sind die in der Übertragungskette auftretenden Verzerrungen eher gering.

¹Bedingt durch z. B. Nichtlinearitäten des Empfängers oder Verzerrungen des Nutzsignals

Ein weiterer Vorteil des SINAD-Verfahrens ist, dass der Prüftön dauerhaft angeschaltet bleiben kann, so dass im Falle mobiler Messungen eine kontinuierliche Datenerfassung erfolgen kann. Im Rahmen dieses Feldversuchs wurde der SINAD ohne das oben erwähnte Gewichtungsfiler ermittelt.

5.1.3 Messung und Auswertung der HF-Parameter

Das grundsätzliche Schema aller Messungen liegt in der Erfassung der Veränderung unterschiedlicher Audioqualitätsmaßzahlen als Folge des Wechsels der Modulation von FM zu DRM⁺ am Standort TX FH (bei gleicher Sendeleistung). Diese Veränderungen werden in Abhängigkeit von den HF-Parametern

- Kanalleistung des Nutzsenders C_k ,
- Kanalleistung des Störsenders bzw. die durch ihn hervorgerufene Leistung im Nutzkanal; s.a. Kapitel 5.1.3.1 I_k ,
- Kanalrauschleistung innerhalb der Messbandbreite des Nutzkanals N_k ,
- Frequenzabstand der beiden Sender Δf

am Empfangsort bestimmt. Alle Leistungen wurden in einer Messbandbreite von 120 kHz mit dem RMS-Detektor ermittelt, die Größen C_k und I_k wurden dabei jeweils im Einzelbetrieb separat erfasst. Im Rahmen der stationären Messungen wurde darauf geachtet, dass der Störhub aufgrund von Reflektionen gem. [Gem82] kleiner als 2%/kHz war. Abb. 5.2 verdeutlicht die beteiligten Größen. In jedem Fall wurde die Antenne passend zu der Polarisation der Sender TX FH und TX RB vertikal polarisiert und – wiederum entsprechend [Gem82] – auf den Nutzsender TX RB ausgerichtet. Die Antennenausrichtung erfolgte hierbei automatisch über das ArgusMon-System, das aus den Koordinaten des Messpunktes und des Senderstandortes die korrekte Ausrichtung ermittelt.

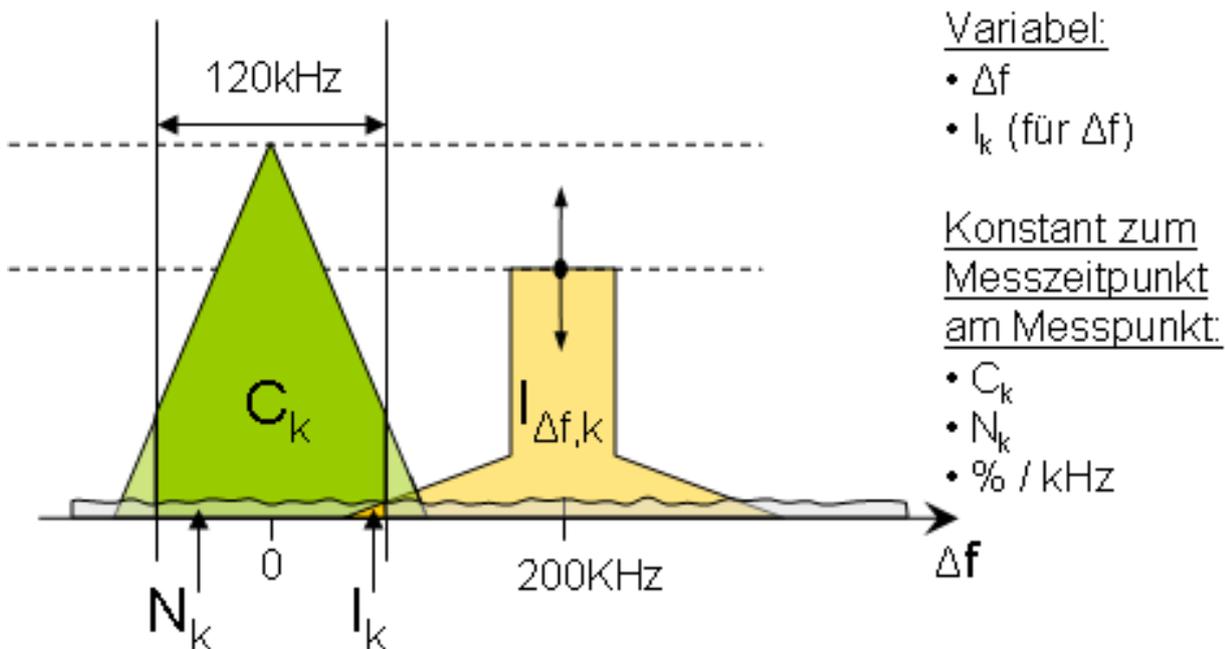


Abb. 5.2: Größen bei stationären Messungen – Prinzipdarstellung

Zur Auswertung der HF-Parameter wurden die im Folgenden dargestellten Rechengänge mit den gewonnenen Daten durchgeführt:

Die empfangenen Leistungspegel an $50\ \Omega$ sowie weitere Parameter sind:

- Empfangener Nutzsinalpegel P_{nutz} ,
- Empfangspegel der Grundrauschens im Nutzkanal P_{grund} ,
- Empfangener Störsignalpegel P_{stoer} ,
- maximaler Empfangsleistungspegel des Störsignals (TX FH sendet mit voller Ausgangsleistung) $P_{stoer,max}$,
- Dämpfung von TX FH (TX FH sendet mit reduzierter Ausgangsleistung) D ,
- Frequenzabstand von Nutz- und Störsignal Δf ,
- Pegel der Störleistung in den Nachbarkanälen aufgrund von TX FH, s.a. Abschnitt 5.1.3.1 ACPR(Δf , D),
- (C/I) für das resultierende Carrier-to-Interference-Level.

Diese Werte wurden zum Empfängereingang hin gerechnet, der über ein $50\ \Omega \rightarrow 75\ \Omega$ -Breitbandimpedanztransformationsglied mit einer Dämpfung von 6 dB über die Schaltmatrix der Messeinrichtung mit der Antenne verbunden wurde. Somit ergibt sich die Gesamttempfängereingangsspannung und der Störabstand des Nutzträgers auf Basis der erfassten HF-Größen durch Umrechnung von Leistung auf die Spannung (inkl. der Dämpfung durch die Impedanztransformation) sowie unter Einbeziehung der Leistung von TX FH in den Nachbarkanälen (im Gleichkanalfall wird mit der vollen gemessenen Störleistung gerechnet) zu:

$$\frac{U_{nutz}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{-6/10} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{\frac{P_{nutz}/\text{dBm}}{10}} \cdot 10^6}$$

$$\frac{U_{nutz}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{\frac{-3,6}{10}} \cdot 10^6 \cdot 10^{\frac{P_{nutz}/\text{dBm}}{20}}} \quad (5.3)$$

$$\frac{U_{grund}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{-6/10} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{\frac{P_{grund}/\text{dBm}}{10}} \cdot 10^6}$$

$$\frac{U_{grund}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{\frac{-3,6}{10}} \cdot 10^6 \cdot 10^{\frac{P_{grund}/\text{dBm}}{20}}} \quad (5.4)$$

$$\frac{U_{stoer}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{-6/10} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{\frac{P_{stoer,max}/\text{dBm} - D/\text{dB} + \text{ACPR}(\Delta f)/\text{dB}}{10}} \cdot 10^6}$$

$$\frac{U_{stoer}}{\mu V} = \sqrt{75 \cdot 10^{\frac{-3,6}{10}} \cdot 10^6 \cdot 10^{\frac{P_{stoer,max}/\text{dBm} - D/\text{dB} + \text{ACPR}(\Delta f)/\text{dB}}{20}}} \quad (5.5)$$

$$\frac{U}{\mu V} = \sqrt{\left(\frac{U_{nutz}}{\mu V}\right)^2 + \left(\frac{U_{grund}}{\mu V}\right)^2 + \left(\frac{U_{stoer}}{\mu V}\right)^2} \quad (5.6)$$

$$\frac{C}{I} = 10 \cdot \log \left[\frac{\left(\frac{U_{nutz}}{\mu V}\right)^2}{\left(\frac{U_{grund}}{\mu V}\right)^2 + \left(\frac{U_{stoer}}{\mu V}\right)^2} \right] \quad [\text{dB}] \quad (5.7)$$

Das Arbeiten mit dem C/I ist deshalb sinnvoll, weil das allgegenwärtige Grundrauschen bzw. die durch andere Sender im Gleichkanal vorhandene Grundstörung aufgrund der Eigenschaften der FM

$((S/N)_{HF} \Leftrightarrow (S/N)_{NF})$ die erreichbare Audioqualität am Empfangsort limitiert. Somit werden durch diese Art der C/I-Angabe sowohl die von TX FH, als auch die von fremden Quellen hervorgerufenen Störungen berücksichtigt und die Vergleichbarkeit der Situationen an unterschiedlichen Messpunkten ermöglicht, was im Falle reiner HF-Pegelmessungen nur begrenzt möglich ist.

5.1.3.1 Bestimmung der Nachbarkanalleistung I_k

Die Bestimmung der Nachbarkanalleistung I_k wurde im Labor durchgeführt, da diese Werte immer gleich sind und anhand der im Feld erfassten Pegel direkt eingerechnet werden können. Darüber hinaus ist die Messung im Labor reproduzierbarer und mit einem geringeren Rauschanteil erfasst worden. Da insb. durch die nichtlinearen Effekte bei der Verstärkung des DRM⁺-Signals die Leistung I_k variiert, ist für jede verwendete Dämpfungseinstellung des Senders die Aufnahme von I_k erforderlich. Die Größe I_k ist im allgemeinen auch unter dem Begriff ACPR, (**A**djacent **C**hannel **P**ower **R**atio) bekannt. Der ACPR gibt das Leistungsverhältnis der Reststrahlung eines Senders in den Nachbarkanälen bezogen auf die Leistung seines Nutzsignals an.

Das Messverfahren basiert darauf, das Senderausgangssignal schmalbandig im Zerospan eines Spektrumanalyzers im interessierendem Frequenzbereich (Sendefrequenz und die drei nächsthöheren Nachbarkanäle) abzutasten. Das Sendesignal wird dabei selektiv mit einem Kerbfilter gedämpft. Im Anschluß wird der Frequenzgang dieses Filters bestimmt und aus den Messdaten herausgerechnet, so dass die verfügbare Dynamik des Spektrumanalyzers um den Betrag der Filterdämpfung erhöht wird; die interne Dämpfung – und somit der Rauschteppich – des Analyzers kann somit gegenüber dem ungefiltertem Fall reduziert werden. Anschliessend wird das Systemrauschen erfasst, um eine Aussage treffen zu können, inwiefern das Ergebnis sich von dem Analyzerrauschen abhebt. Die jeweiligen Schritte der Messungen und Auswertungen erfolgen vollautomatisch mit einer speziell zu diesem Zweck entworfenen Softwaresteuerung.

Die Nachbarkanalleistung ergibt sich jeweils als Differenz der Leistung des eigentlichen Sendekanals zu der Leistung des jeweiligen Nachbarkanals; die jeweiligen Kanalleistungen ergeben sich aus der Integration der Leistungspegel (in Watt) innerhalb des relevanten Frequenzbandes [fsp, Kapitel 2]. Alle Werte sind jeweils als RMS-Werte in einer Bandbreite von 120 kHz angegeben.

Die Messung wurde für jede Modulationsart und Sendeleistung in 5 dB-Schritten durchgeführt.

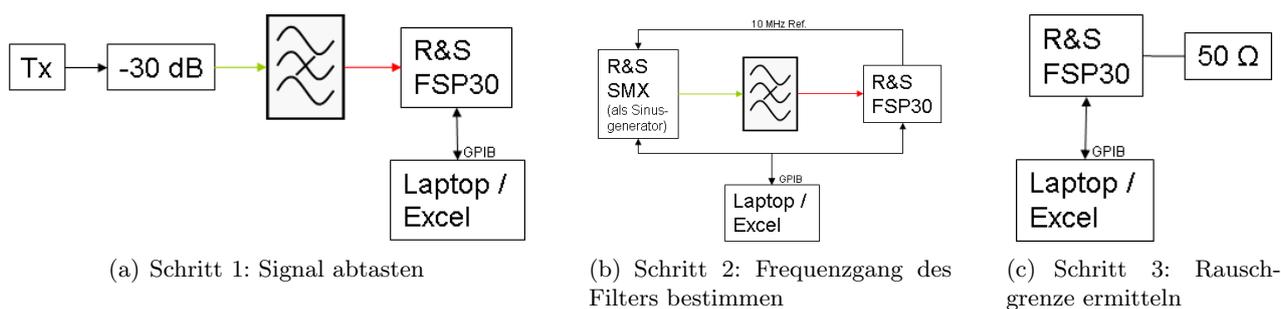


Abb. 5.3: Blockschaltbild und Vorgehensweise zur ACPR-Messung

In Tabelle 5.1 kennzeichnet der Begriff

ACPR1: den ACPR im ersten Nachbarkanal, also das I_k von TX FH auf der Frequenz 87,7 MHz.

ACPR2: den ACPR im zweiten Nachbarkanal, also das I_k von TX FH auf der Frequenz 87,8 MHz.

ACPR3: den ACPR im dritten Nachbarkanal, also das I_k von TX FH auf der Frequenz 87,9 MHz.

DRM⁺ Dämpfung/dB	ACPR1 87,7 MHz	ACPR2 87,8 MHz	ACPR3 87,9 MHz
0	-10,6 dB	-53,4 dB	-71,6 dB
5	-10,6 dB	-66,3 dB	-78,0 dB
10	-10,6 dB	-65,7 dB	-74,3 dB
15	-10,6 dB	-61,0 dB	-69,8 dB
20	-10,6 dB	-56,1 dB	-65,3 dB
25	-10,6 dB	-51,1 dB	-60,4 dB
30	-10,6 dB	-46,2 dB	-55,4 dB
35	-10,6 dB	-41,1 dB	-50,5 dB
40	-10,6 dB	-36,2 dB	-45,5 dB
45	-10,5 dB	-31,2 dB	-40,5 dB
FM Dämpfung/dB	ACPR1 87,7 MHz	ACPR2 87,8 MHz	ACPR3 87,9 MHz
0	-23,3 dB	-70,1 dB	-77,1 dB
5	-23,4 dB	-66,8 dB	-76,4 dB
10	-23,3 dB	-62,0 dB	-71,6 dB
15	-23,3 dB	-57,2 dB	-67,4 dB
20	-23,3 dB	-52,2 dB	-62,5 dB
25	-23,3 dB	-47,2 dB	-57,6 dB
30	-23,3 dB	-42,2 dB	-52,7 dB
35	-23,1 dB	-36,9 dB	-47,3 dB
40	-22,8 dB	-32,3 dB	-42,3 dB
45	-21,8 dB	-27,4 dB	-37,8 dB

Tab. 5.1: Ergebnis der ACPR bzw. I_k -Messung. Die Dämpfungswerte entsprechen der Dämpfung der Senderausgangsleistung. Begriffserläuterung: s. Text

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der ACPR von DRM⁺ im ersten Nachbarkanal gegenüber FM um ca. 13 dB höher ist. Da das (C)OFDM-Spektrum rechteckförmig anstatt dreiecksförmig wie bei FM verläuft, fällt aufgrund der 120 kHz-Meßbandbreite – die in dem stationärem und mobilem Meßsystem ebenfalls verwendet wird – ein weitaus größerer Leistungsanteil wie bei FM in den so entstehenden Nachbarkanal.

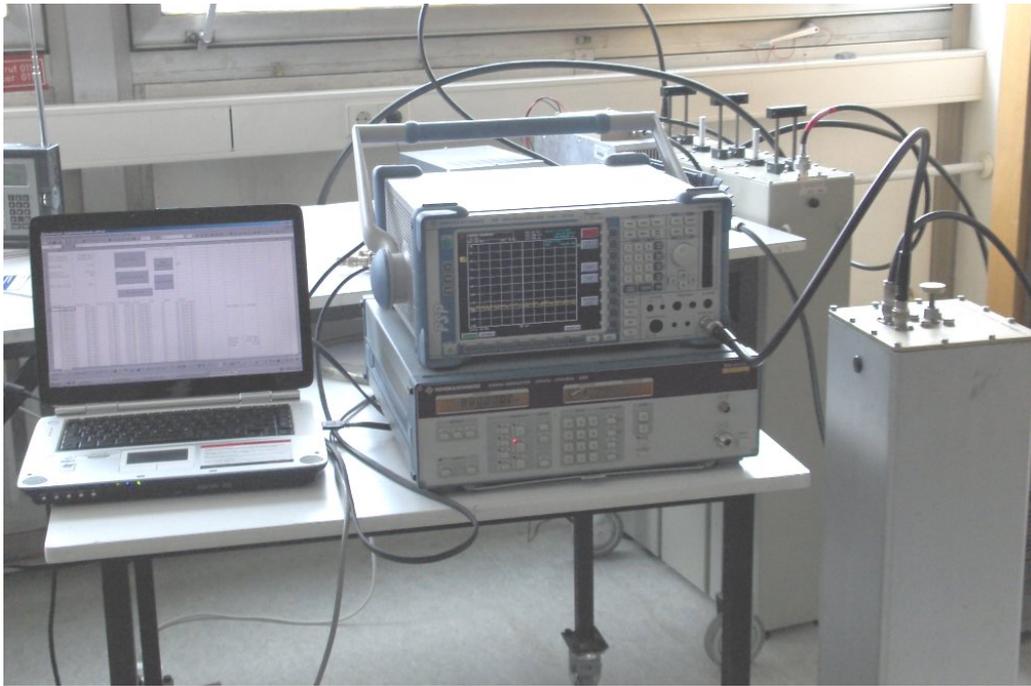


Abb. 5.4: Aufbau zur Erfassung der Nachbarkanalleistung I_k im Labor

5.2 Messeinrichtung

5.2.1 Messbus der BNetzA

Der verwendete Messaufbau ist in Abb. 5.5 schematisch dargestellt. Abb. 5.6(b) zeigt diesen Messaufbau in seiner praktischen Ausführung. Abbildung 5.6(a) zeigt – exemplarisch für alle stationären Messpunkte – den Messbus der BNetzA im Messbetrieb an Messpunkt 7. Die Richtantenne wurde mit Hilfe der Maststeuerung in Ihre Sollhöhe von 10 m über Grund ausgefahren und der Polarisation der beiden verwendeten Sender angepasst. Der Signalfluss von Blockschaltbild (Abb. 5.5) beginnt mit der Antenne. Bei dieser handelt es sich um die Richtantenne gem. [Gem82], s. Abb. 5.1. Über eine HF-Schaltmatrix wurde das Signal an die unterschiedlichen Einrichtungen geschaltet. Somit konnte die Versorgung gem. Richtlinie über das ArgusMon-System erfasst werden (hor. & vertikale Polarisation). Zu allen nachfolgenden Messungen wurde die Antenne vertikal polarisiert. Mittels eines Spektrumanalyzers (R&S FSP30) wurden die selektiven Pegelmessungen durchgeführt (RBW: 10 kHz, VBW: 10 kHz, Messfunktion: ChannelPower mit $B=120$ kHz, RMS-Detektor, Sweepzeit immer ≥ 6 s). Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 5.7 dargestellt.

Im Anschluss an die Pegelaufnahmen wurden die Audioparameter ermittelt. Dazu wurden nach der Impedanztransformation (-6 dB) die Lineout-NF-Ausgänge des Empfängers JVC CA-MX55RMB dem Audioanalyzer R&S UPV zugeführt und die Messungen per PC-Steuerung durchgeführt. Die Steuerungs- und Auswertungsmimik war derart aufgebaut, dass in schneller Folge 30 Messungen der Referenzspannung U_s , Rauschspannung U_n für die S/N-Messungen bzw. SINAD nacheinander durchgeführt wurden. Die Werte wurden (im linearen Maßstab) gemittelt und abschließend in Dezibel angegeben. Die Fehlergrenzen wurden anhand eines 95-%igen Vertrauensbereichs angegeben. Dieser Vertrauensbereich wurde derart gebildet, indem die (aufgrund der nur geringen Stichprobenanzahl) geschätzte Standardabweichung mit einem Korrekturwert modifiziert wurde, der dem 95%-Bereich der Student-t-Verteilung entspricht. Der auf diese Weise geschätzte Messfehler befand sich im Rahmen der stationären Messreihen in den meisten Fällen unter 1,5 dB.

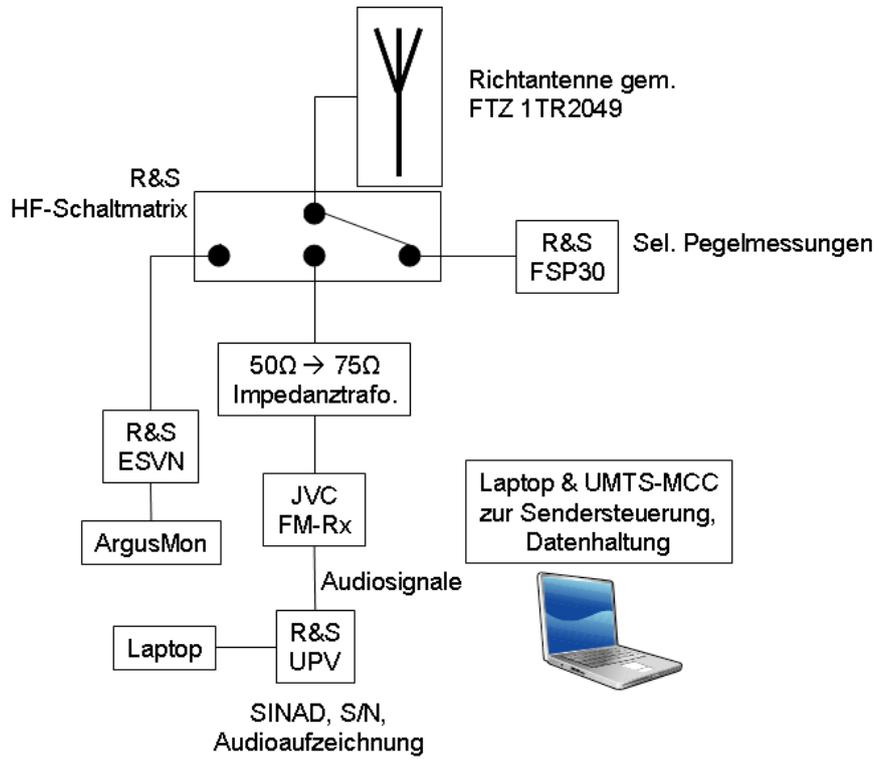


Abb. 5.5: Messaufbauten im Messbus der BNetzA



(a) Stationäre Messung an Messpunkt 7



(b) Messaufbauten für die stationären Messungen

Abb. 5.6: Messbus der BNetzA für die stationären Messungen in 10 m Antennenhöhe, Außenansicht (a) und Innenansicht (b)

Es ist bei der Betrachtung der S/N- bzw. SINAD-Werte wichtig zu bedenken, dass durch die arithmetische Mittelung der einzelnen Werte Ausreißer das Endergebnis wesentlich stärker beeinflussen wie es durch eine Medianbildung (Bildung des arithmetischen Mittelwerte der Dezibelwerte) der Fall gewesen wäre. Das heißt, dass gerade durch Signaleinbrüche im Bereich hoher Messwerte der Wert wesentlich stärker negativ beeinflusst wird, wie es bei niedrigen Werte der Fall wäre, da ein einziger starker Ausreißer – sowohl in positiver, als auch in negativer Richtung – sich in der entsprechenden Richtung bei der arithm. Mittelung stärker auswirkt wie im Falle der Medianbildung. Solche Effekte können durch die Eigenschaften des Funkfeldes leicht unbemerkt während der laufenden Messung geschehen, z. B. durch breitbandige, sporadische Störungen, Einflüsse durch Bahn-, Industrie-, oder andere elektrische Anlagen in Wohnumgebungen. In diesem Sinne sind die ermittelten NF-Werte somit als der Worst-Case zu verstehen. Solange der geschätzte Messfehler keine ungewöhnlichen Werte annahm, wurde der ermittelte Wert übernommen. Bei der Nutzung des S/N- bzw. SINAD-Verfahrens wurden beide Audiokanäle erfasst und vor Ort auf evtl. vorhandene Abweichungen überprüft – was allerdings in der Praxis nicht vorgekommen war. Festgehalten wurde somit jeweils nur der rechte Kanal.

Über die in Kapitel 3.2 beschriebenen Fernsteueroptionen der Sender konnten die Sendesignale und Modulationsinhalte der jeweiligen Messaufgabe angepasst werden. An jedem Punkt wurden die Messreihen ohne Unterbrechung (z.B über Nacht, Pausen, etc.) aufgenommen.

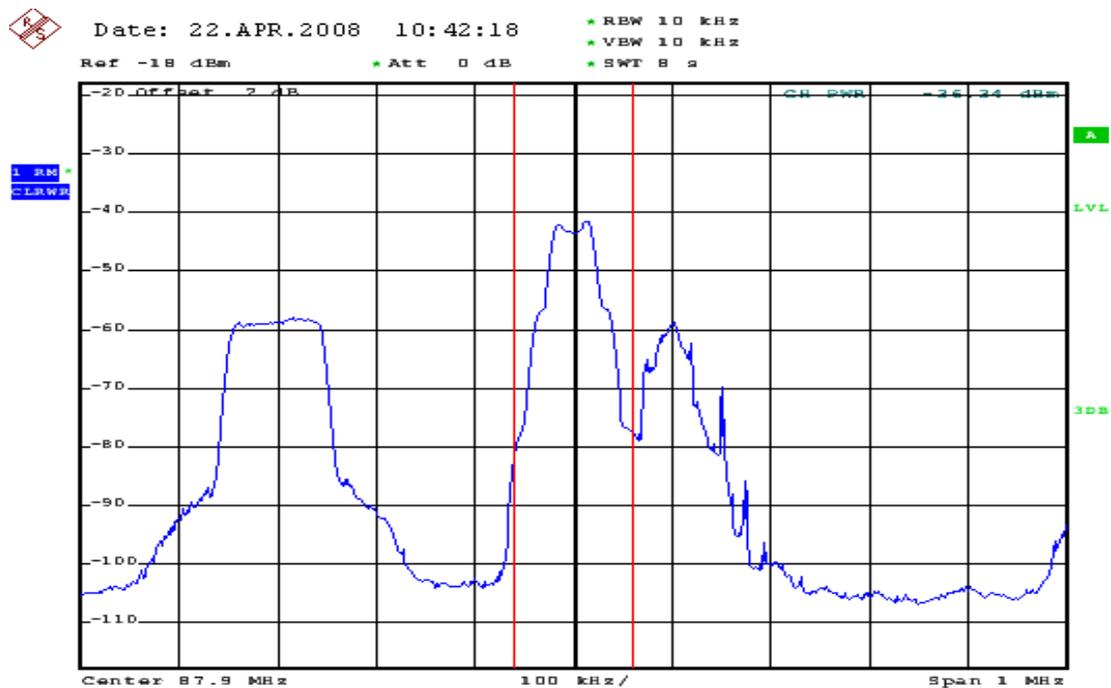


Abb. 5.7: Beispielspektrum an Messpunkt 4

5.2.2 Messbus der FH zur Untersuchung unterschiedlicher Empfänger

Im Falle der Messreihe mit drei unterschiedlichen Empfängern (s. Abschnitt 5.3.2.3) kam ein Aufbau ähnlich zu dem in Abb. 5.5 zum Einsatz. Die Messeinrichtung wurde im Messbus der FH-KL aufgebaut. Auf dem Dach des Busses wurde ein Rundstrahler ($l = 36$ cm, $k = 30$ dB) in einer Höhe von ca. 2 m über Grund auf einer runden Metallplatte (zur Verbesserung der Rundstrahlcharakteristik wg. Einzügen durch die Geometrie der Dachfläche) angebracht. Zur Signalverteilung wurde ein 3 dB-Koppler verwendet. Die wesentlichen Unterschiede zu den stationären Untersuchungen mit dem Messaufbau der BNetzA liegen somit in der Verwendung einer nicht-gerichteten Antenne und der geringeren Antennenhöhe. Die willkürlich gewählten Messpunkte sind in Abbildung 3.21 verzeichnet.

5.3 Ergebnisse

Vorbemerkung: Bei allen Messungen mit der Nutzfrequenz 87,9 MHz ist zu beachten, dass die Werte durch den Sender Göttinger Höhe, der auf der Frequenz 88,0 MHz mit 100 kW das Programm des SR1 abstrahlt und nur ca. 60 km Luftlinie entfernt liegt, beeinflusst sind, was teilweise auch auf die Nutzfrequenz 87,8 MHz durchschlagen kann. Dennoch sind sie aus Gründen der Vollständigkeit dokumentiert.

5.3.1 Versorgung und Störeinfluß gem. FTZ-Richtlinie

Mit dem Messaufbau der stationären Messungen (s. Kapitel 5.2) wird mit dem Messprogramm ArgusMon die entsprechende Erfassung und Auswertung (Ermittlung der nutzbaren Feldstärke und der Nutzfeldstärke) durchgeführt. Die zugrundeliegenden Schutzabstände [ITU02a, Gem82] basieren auf Störungen von FM-Systemen durch andere FM-Systeme. Dies heißt, dass

- anhand dieser Messung die Auswirkungen von DRM⁺ auf andere FM-Sender auf diese Weise nicht bewertet werden kann (und somit das Ausweichen auf die vorgestellten alternativen Messkonzepte notwendig machte),
- die Messung allerdings die prinzipielle Versorgung bzw. Störwirkungen der beiden Sender aufzeigt und eine Kontrolle mit den dazugehörigen Prognoserechnungen ermöglicht.

Es ergeben sich nun fünf interessierende Szenarien, die im folgenden näher beleuchtet werden:

1. Versorgung von TX FH,
2. Versorgung von TX FH unter Einwirkung von TX RB,
3. Versorgung von TX RB unter Einwirkung von TX FH,
4. Versorgung von SR1, 88,0 MHz unter Einwirkung von TX FH,
5. Versorgung von SR1, TX FH und TX RB aktiv.

Die folgenden Abbildungen 5.8... 5.12 stellen die erhaltenen Messergebnisse graphisch dar. Dabei gilt in den Abbildungen folgende Symbolik:

- **Rot:** Mindestnutzfeldstärke von $< 54 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ unterschritten.
- **Gelb:** Mindestnutzfeldstärke vorhanden, aber Störungen durch Interferenzen (Nichteinhaltung des Schutzabstandes).
- **Grün:** Messpunkt ist versorgt.
- Die Zahlen selbst geben die zugehörigen Schutzmargen (Versorgungsreserve) an, wenn die Bedingung der Mindestnutzfeldstärke erfüllt ist. Im Falle eines roten Punktes (Mindestnutzfeldstärke zu gering) gibt die Zahl die Nutzfeldstärke an diesem Punkt an.

Für diese Szenarien gelten die auf den nachfolgenden Seiten aufgeführten Aussagen.

Szenario 1: Abb. 5.8 zeigt die Analyse der Versorgung von TX FH. TX RB ist dabei ausgeschaltet. Der FH-Sender versorgt das Stadtgebiet, ausgenommen Messpunkt 10 (Mindestnutzfeldstärke nicht erreicht). An den Punkten 5,6 und 8 wird der Sender durch die Gleichkanalsender aus Mainz bzw. Idar-Oberstein gestört.

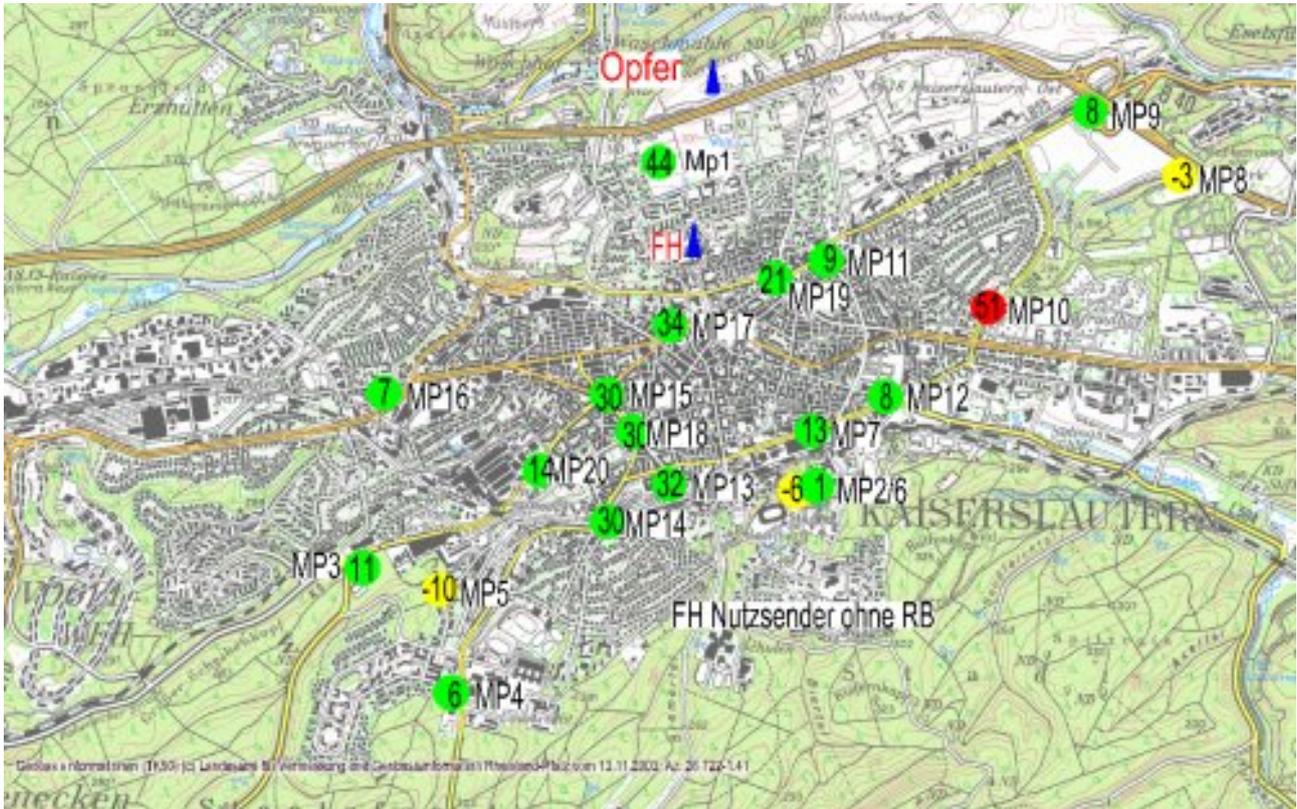


Abb. 5.8: FM-Versorgung von TX FH alleine gem. [Gem82] 

Szenario 2: Abb. 5.9 stellt dar, wie sich die Versorgung des FH-Senders bei Zuschaltung von TX RB ändert. Man erkennt deutlich, wie die Versorgung durch die zusätzliche Störung einbricht.

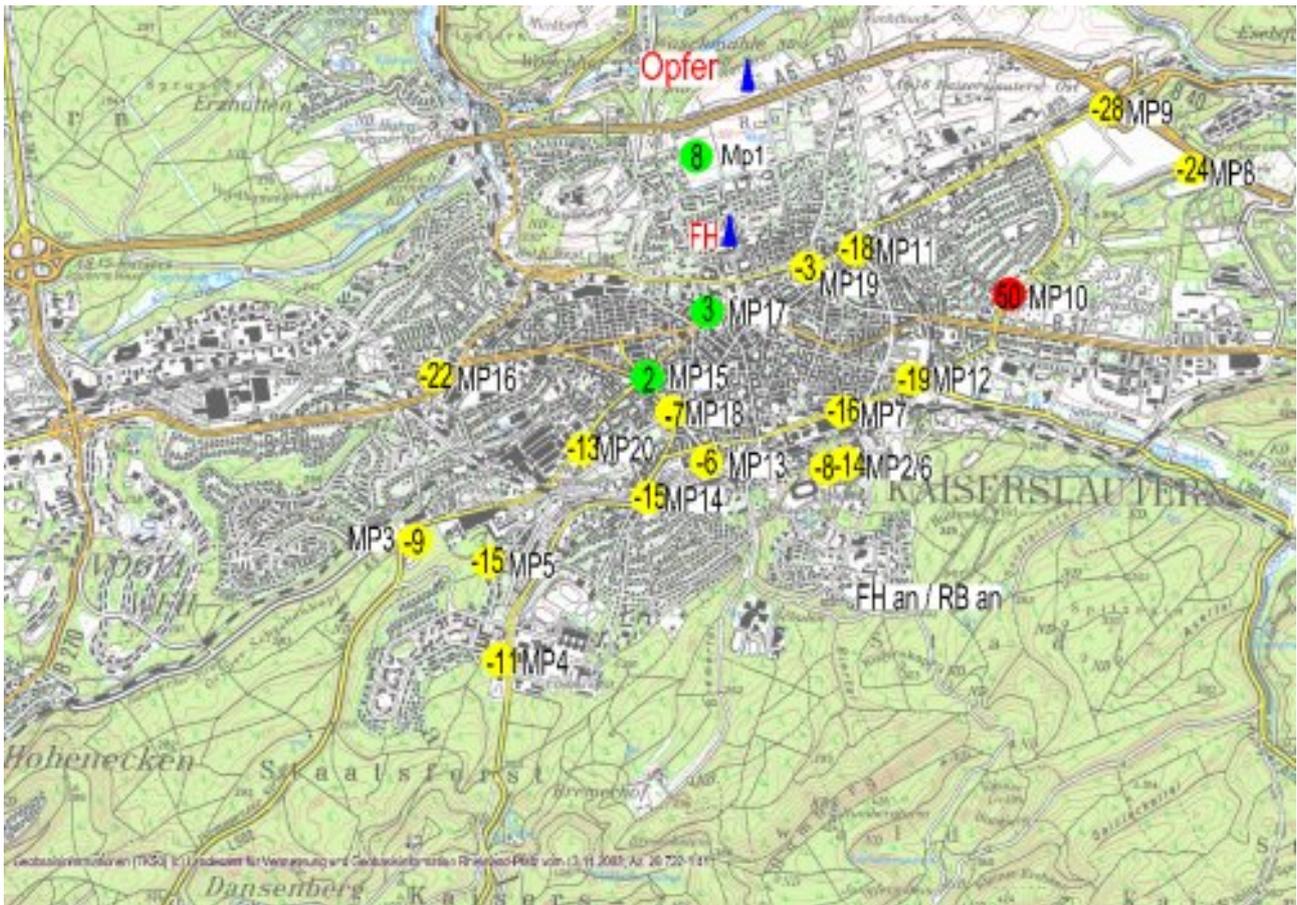


Abb. 5.9: Versorgung von TX FH 87,6 MHz gestört durch TX RB 87,8 MHz gem. [Gem82] 🔍

Szenario 4: In Darstellung 5.11 ist die Wirkung von TX FH auf den Sender 'Göttelborner Höhe' (SR1, 88,0 MHz, 1200 kW) zu sehen. Durch den Betrieb von TX FH alleine sind hier – entsprechend der Vorplanungen – keine Beeinträchtigungen in der Versorgung des SR1 entstanden.

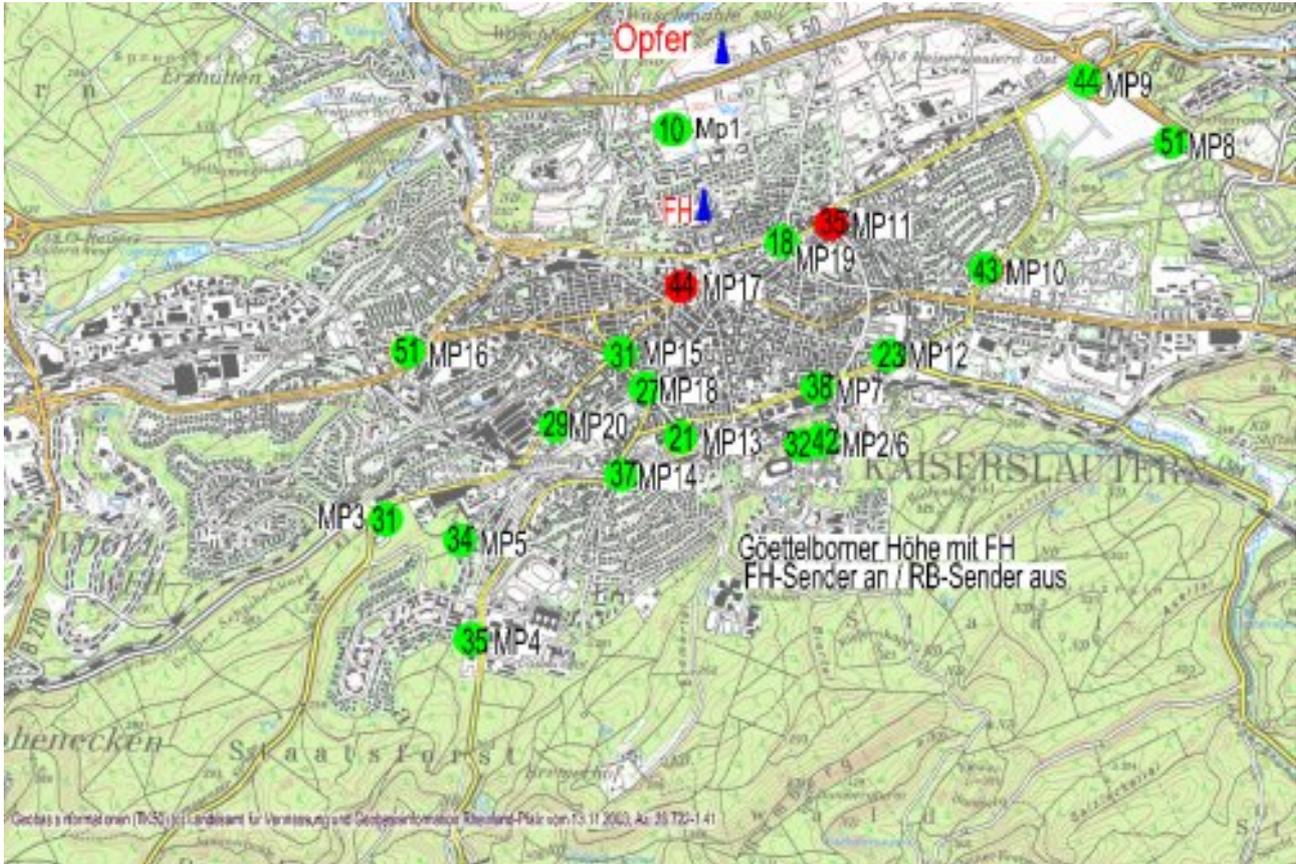


Abb. 5.11: Versorgung des SR1, 88,0 MHz gem. [Gem82]; nur TX FH eingeschaltet 

In den Darstellungen symbolisieren Kurven gleicher Farbe den jeweils gleichen Frequenzversatz Δf zwischen Stör- zu Nutzsender. Die unterschiedlichen Modulationen des Störsenders TX FH sind durch die entsprechend gefärbten Symbole mit

- einem \diamond gekennzeichnet, wenn TX FH FM abstrahlt.
- einem \triangle gekennzeichnet, wenn TX FH DRM⁺ abstrahlt.

Der jeweils kleinste C/I-Wert einer Kurve entspricht der maximalen Ausgangsleistung von 45 dBm, der größte Wert von C/I der minimalen Ausgangsleistung (0 dBm) von TX FH.

Aus den Darstellungen können für die verschiedenen Frequenzdifferenzen Δf folgende Schlüsse gezogen werden:

- Im Gleichkanal ist das Störpotential von DRM⁺ mit einem quasi-konstantem Offset von ca. 5 dB höher als bei FM. Dies deckt sich mit den Messungen aus [SSR07, HSE07]. Hierbei ist zu beachten, dass in [SSR07, HSE07] das FM-Störsignal und der S/N-Referenzton andere Parameter haben.
- Im ersten Nachbarkanal ist das niedrigere C/I bei DRM⁺ insb. durch die Form des Signals geprägt, s. Abschnitt 5.1.3.1. Gleichmaßen liegt aber auch ein höherer Pegel auf der Flanke des empfängerseitigen ZF-Filters, so dass – bedingt durch die Hüllkurvenvariation des OFDM-Signals – der Effekt der AM/PM-Konversion sich als zusätzlicher Störbeitrag im Ausgangssignal äußert. Die geringeren Maximalwerte der NF-Parameter deuten auf die Limitierung der Empfangsqualität durch den allgemeinen Interferenzpegel hin. Es ist zu beachten, dass bei gleichem C/I-Verhältnis die Werte der NF-Parameter sich schon sehr stark aneinander angeglichen haben. Dies läßt darauf schließen, dass in diesem Fall die jeweilige Störleistung, nicht die Modulationsart, die Empfangsgüte bestimmen.
- Im zweiten Nachbarkanal sind die Verhältnisse im wesentlichen nur noch durch die Leistungsverhältnisse und die übliche Effekte auf der HF-Seite geprägt (Mischerlinearität etc.). Ein gravierender Unterschied in den Störpotentialen beider Signale zueinander ist nicht mehr auszumachen.
- Im dritten (durch den starken Sender Götterborner Höhe, 88,0 MHz aus dem Sinne der Messung stark belastetem) Nachbarkanal verwischen die Unterschiede noch mehr, soweit sie durch die Modulation des Nachbarsenders überhaupt nachweisbar sind, s.a. Kapitel 6.3.3.4.

Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes ist die Messung mit den variablen Parametern Frequenzversatz Δf und Sendeleistung von TX FH $P_{stoer,max} - D$ nur an Messpunkt 7 durchgeführt worden. Bei der Bearbeitung der weiteren stationären Messpunkte wurden bei voller Sendeleistung von TX FH die der Parameter Frequenzversatz Δf , Störsignalart (FM, DRM⁺) variiert.

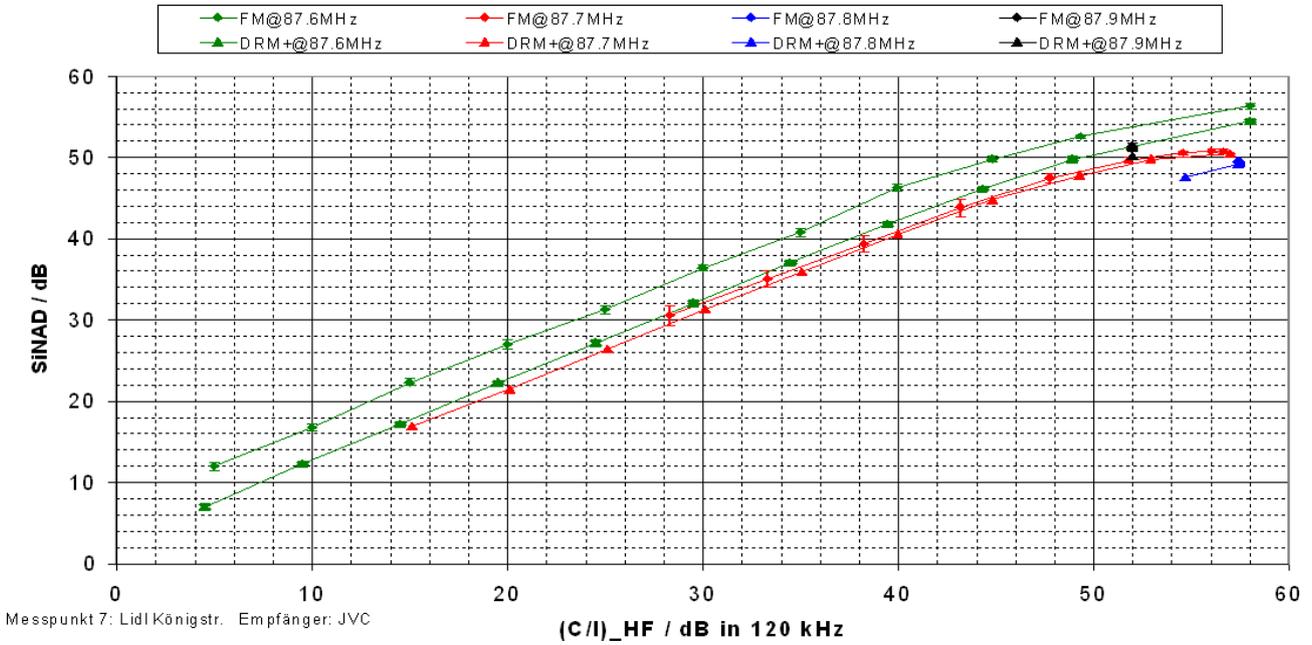


Abb. 5.13: Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, SINAD

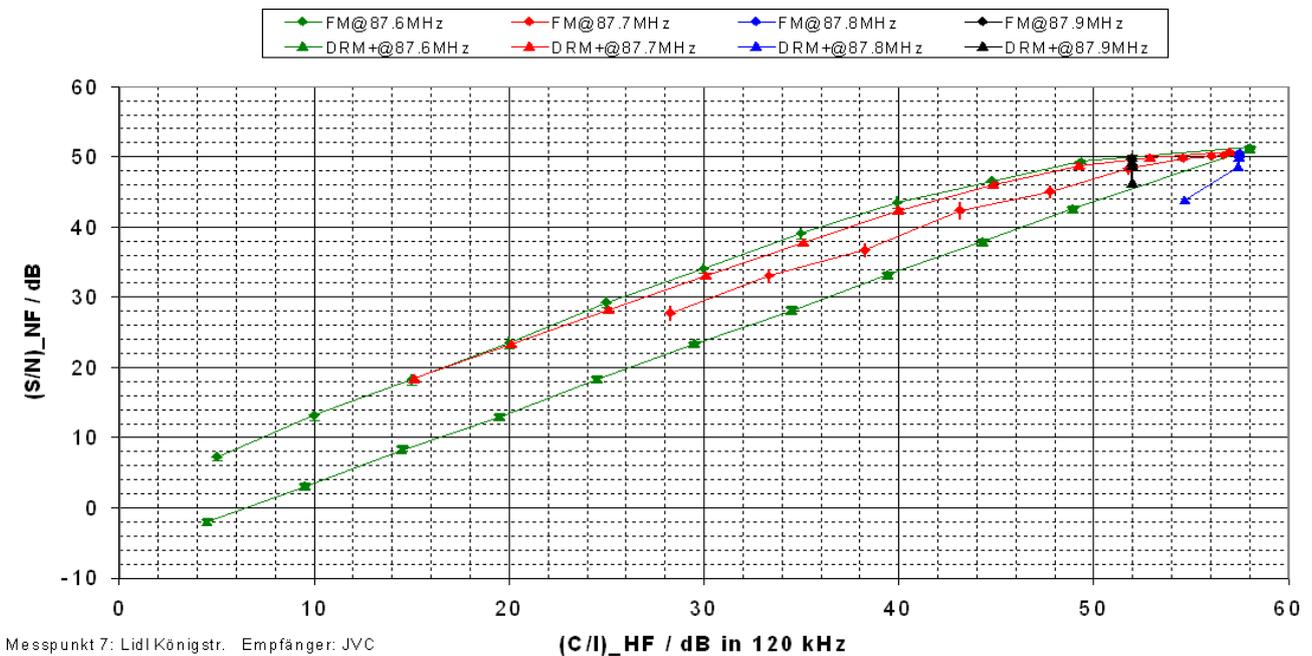


Abb. 5.14: Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, S/N

Die oben getroffenen Aussagen ändern sich nicht, wenn man die Betrachtungsweise ändert. In den folgenden Abbildungen 5.15 und 5.16 sind die NF-Messwerte als Funktion der Störspannung U_{stoer} , Gl. 5.5 von TX FH aufgetragen. In diesen Darstellungen repräsentiert der höchste Wert von U_{stoer} den Fall, dass TX FH mit voller Ausgangsleistung betrieben. Umgekehrt beschreibt der geringste Wert von U_{stoer} den Fall, dass TX FH mit der kleinsten Ausgangsleistung betrieben wird.

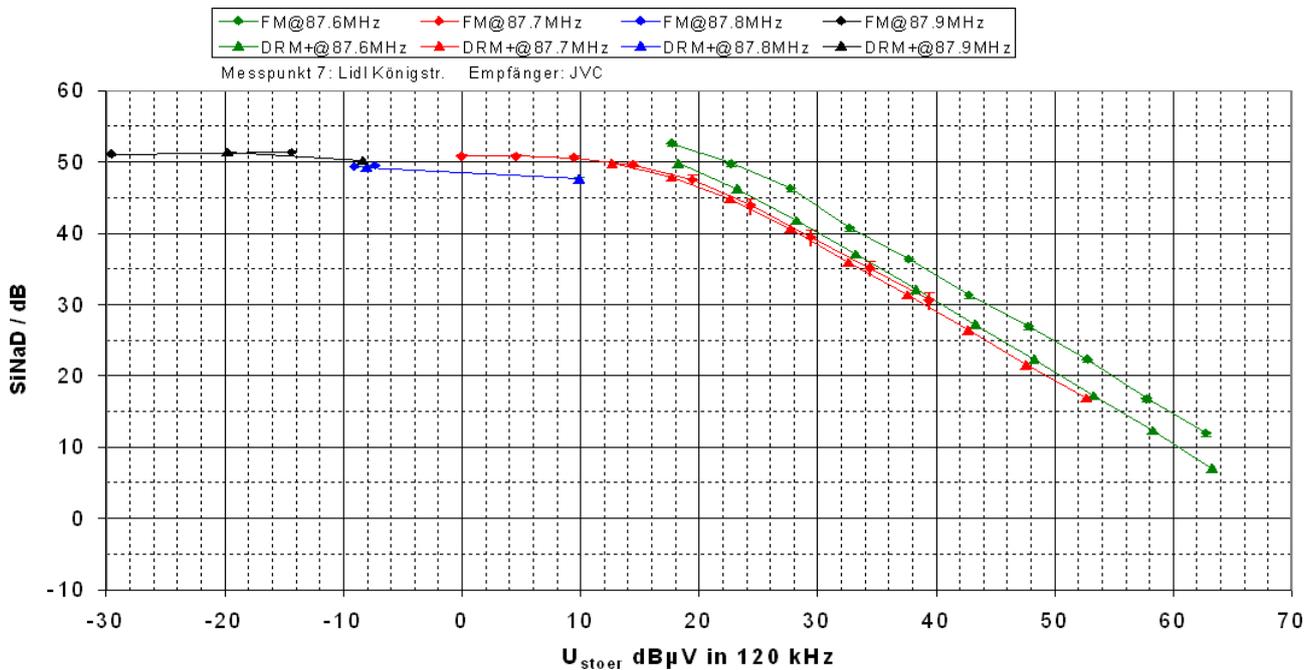


Abb. 5.15: Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, Darstellung von SINAD über der Störspannung U_{stoer}

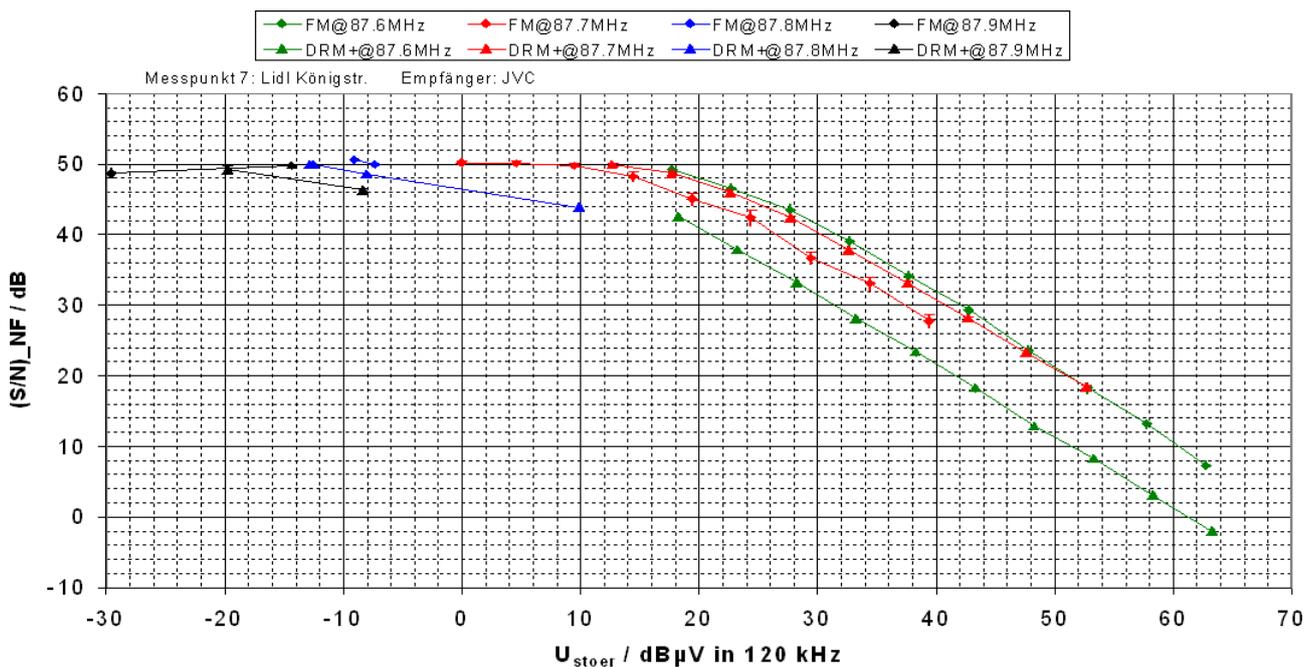


Abb. 5.16: Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, Darstellung von S/N über der Störspannung U_{stoer}

5.3.2.2 Variation des Frequenzversatzes, unterschiedliche Messpunkte

Dieser Abschnitt beschreibt – gestaffelt nach der Nutzfrequenz – die Ergebnisse an allen stationären Messpunkten. Zusätzlich sind Hörproben verfügbar, die beispielhaft die Situationen an den jeweiligen Messpunkten verdeutlichen.

Zur Visualisierung der Daten in Abhängigkeit der Lage des Messpunktes sowie zur schnellen Übersicht wurde eine kartographische Darstellung gewählt. In dieser sind folgende Parameter enthalten:

- Kennzeichnung der Senderstandorte
- Kennzeichnung der Messpunkte
- Darstellung folgender Größen an jedem Messpunkt als Säulendiagramm:
 - SINAD im Falle, dass TX FH FM abstrahlt (in der Kartenlegende als „*FMSINAD*“ gekennzeichnet)
 - SINAD im Falle, dass TX FH DRM⁺ abstrahlt (in der Kartenlegende als „*DRMSINAD*“ gekennzeichnet)
 - Signalpegel von TX FH (in der Kartenlegende als „*pFHdBuV*“ gekennzeichnet). Dieser Wert entspricht dem ermittelten Messwert +107 dB zur Umskalierung auf dBμV. Die Umskalierung wurde lediglich aus Gründen der besseren Darstellbarkeit vorgenommen.
 - Signalpegel von TX RB (in der Kartenlegende als „*pRBdBuV*“ gekennzeichnet). Dieser Wert entspricht dem ermittelten Messwert +107 dB zur Umskalierung auf dBμV. Die Umskalierung wurde lediglich zur besseren Darstellbarkeit vorgenommen.
 - S/N im Falle, das TX FH FM abstrahlt (in der Kartenlegende als „*FMSINAD*“ gekennzeichnet)
 - S/N im Falle, das TX FH DRM⁺ abstrahlt (in der Kartenlegende als „*DRMSINAD*“ gekennzeichnet) Diese Darstellungsart wird zum Identifizieren der Unterschiede der NF-Parameter, abhängig von Störmodulation und Messpunkt, genutzt. Daher sind die zugehörigen Absolutwerte an dieser Stelle nicht gesondert eingetragen – die Übersicht über die Veränderungen allgemein steht hier im Vordergrund.
 - Als zusätzliche Referenz ist in der Darstellung eine Liste der Messpunkte mit den zugehörigen HF-Pegeln angegeben. Hierbei kennzeichnet die Spalte „*pFHdBuV*“ wiederum den Empfangspegel von TX FH, „*pRBdBuV*“ den Empfangspegel von TX RB. Die oben beschriebene Umskalierung ist in dieser Darstellung berücksichtigt. Zusätzlich existiert die Spalte „*dFHRB*“. Diese entspricht der Differenz der Empfangspegel ($dFHRB = pFHdBuV - pRBdBuV$).

Innerhalb dieser Kartenserie ist die Skalierung der Säulen immer gleich.

Nutzfrequenz: 87,6 MHz

Abb. 5.17 zeigt die Verteilung der Messwerte im Stadtgebiet. In Abb. 5.18 sieht man, dass an den unterschiedlichen Punkten tendenziell der Verlauf analog zu dem in Abb. 5.13,5.14 erkennbar ist, d. h. durch den Wechsel zu digitalen Modulation ist der Empfang des analogen Signals um ca. 5 dB (SINAD) stärker beeinträchtigt.

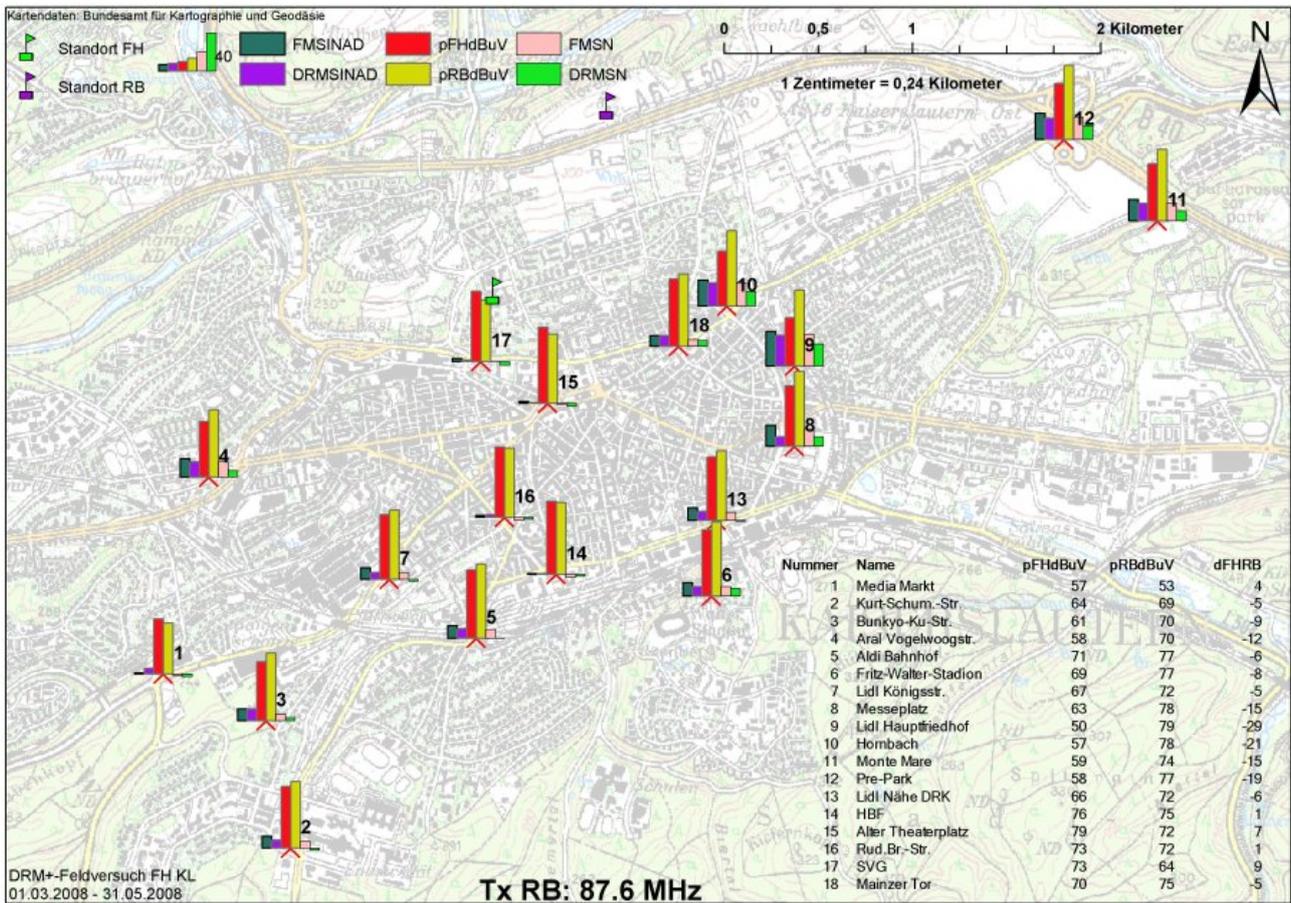
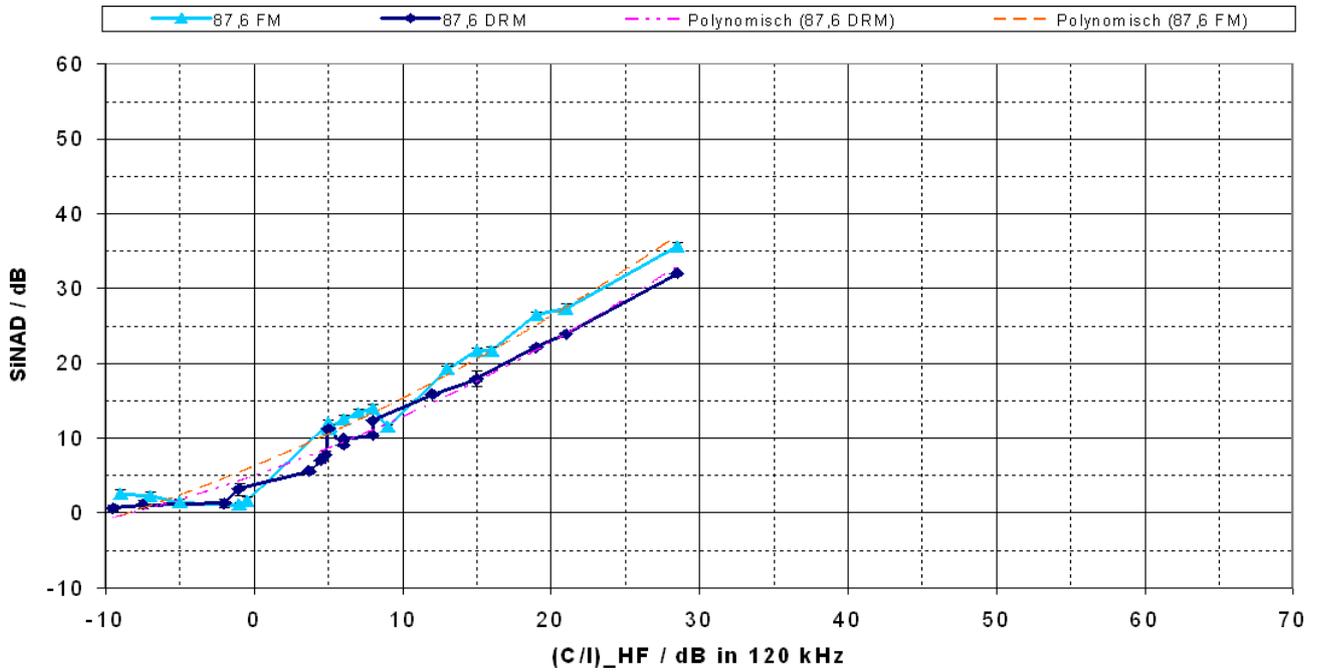


Abb. 5.17: Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,6 MHz

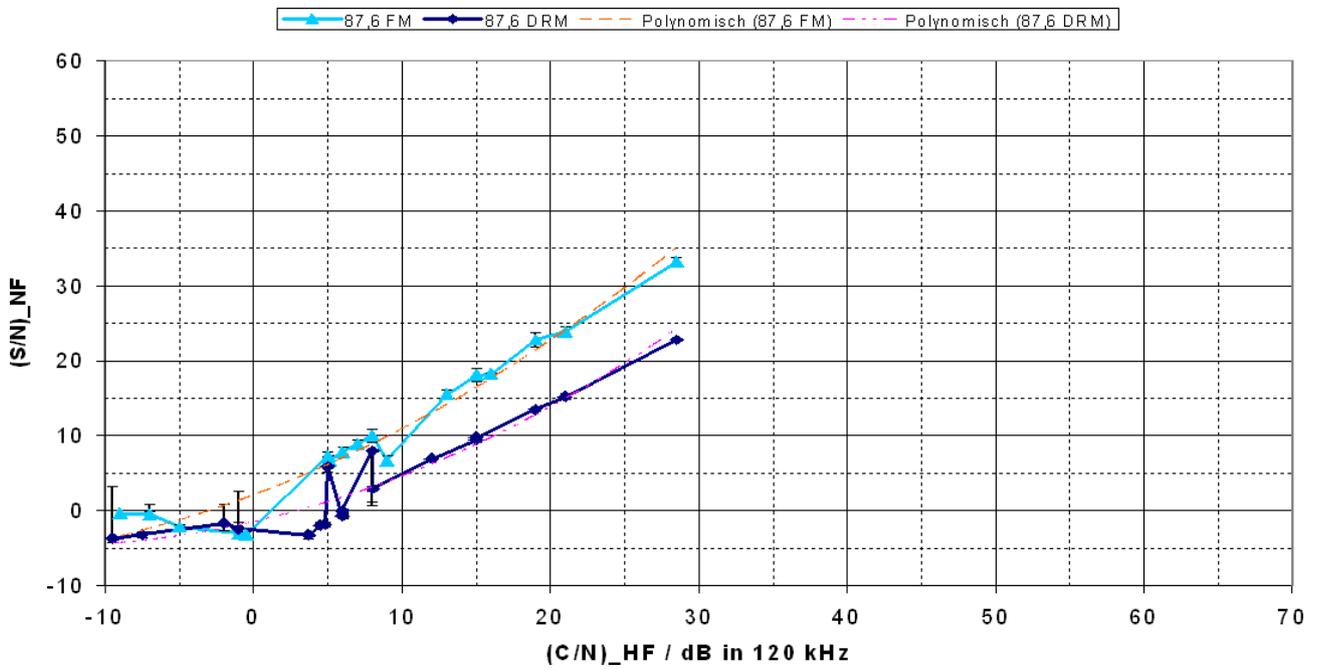
Folgende Tabelle enthält einige Hörproben, die die Situationen verdeutlichen sollen:

Messpunkt-Nr.	Störsignal von TX FH	
	FM	DRM ⁺
8	👂	👂
12	👂	👂

Tab. 5.2: Hörproben 87,6 MHz



(a) SINAD



(b) S/N

Abb. 5.18: SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,6 MHz

C/I/dB	-9,0	-7,0	-5,0	-1,0	-0,5	5,0	5,0	5,1	6,0
MP(FM)	17	15	1	14	16	7	18	2	13
C/I/dB	-9,5	-7,5	-2,0	-1,0	3,7	4,5	4,8	5,0	6,0
MP(DRM)	17	15	14	16	1	7	2	18	13
C/I/dB	7,0	8,0	9,0	13,0	15,0	16,0	19,0	21,0	28,5
MP(FM)	5	6	3	4	11	8	12	10	9
C/I/dB	6,0	8,0	8,0	12,0	15,0	15,0	19,0	21,0	28,5
MP(DRM)	5	6	3	4	11	8	12	10	9

Tab. 5.3: Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,6 MHz

Nutzfrequenz: 87,7 MHz

In Abb. 5.20 zeigt, dass an den unterschiedlichen Punkten tendenziell ein Verlauf analog zu dem in Abb. 5.13,5.14 erkennbar ist. Die sich anschmiegende Verlauf der Kurven im Falle darf nicht darüber hinweg täuschen, dass aufgrund der unterschiedlichen C/I-Werte die beiden Verläufe zueinander verschoben (bezogen auf die einzelnen Messpunkte sind). Dieser Effekt ist klarer in Darstellung 5.20 zu erkennen. Die resultierende erhöhte Störwirkung im digitalen Betriebsmodus liegt im Bereich von ca. 5...15dB. Der zusätzliche Störgrad infolge der Demodulation auf der ZF-Filterflanke ist in den Hörproben an Stellen höherer Aussteuerung zu bemerken, die Verzerrungen sind deutlicher wahrnehmbar als im Falle eines FM-Störers.

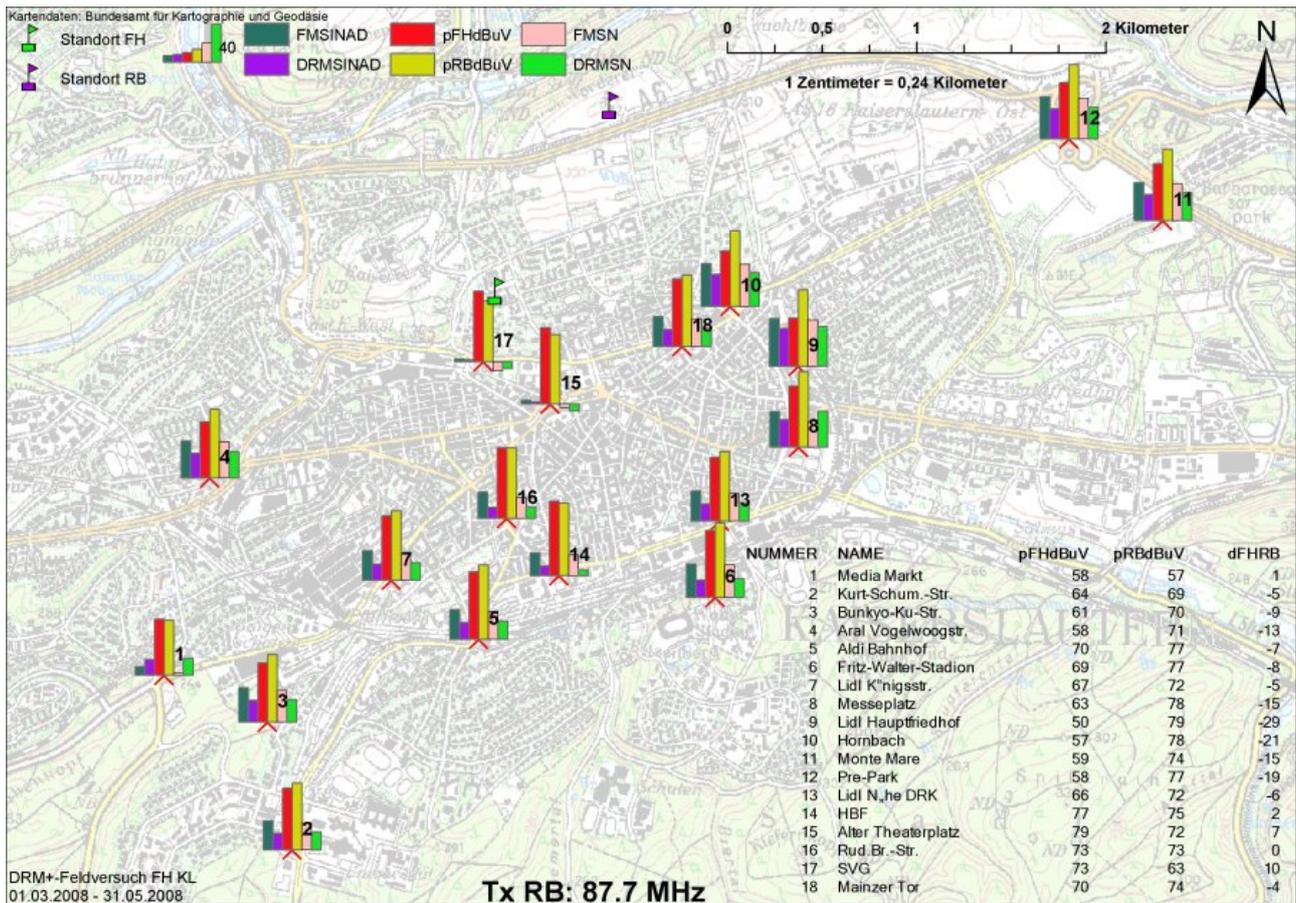
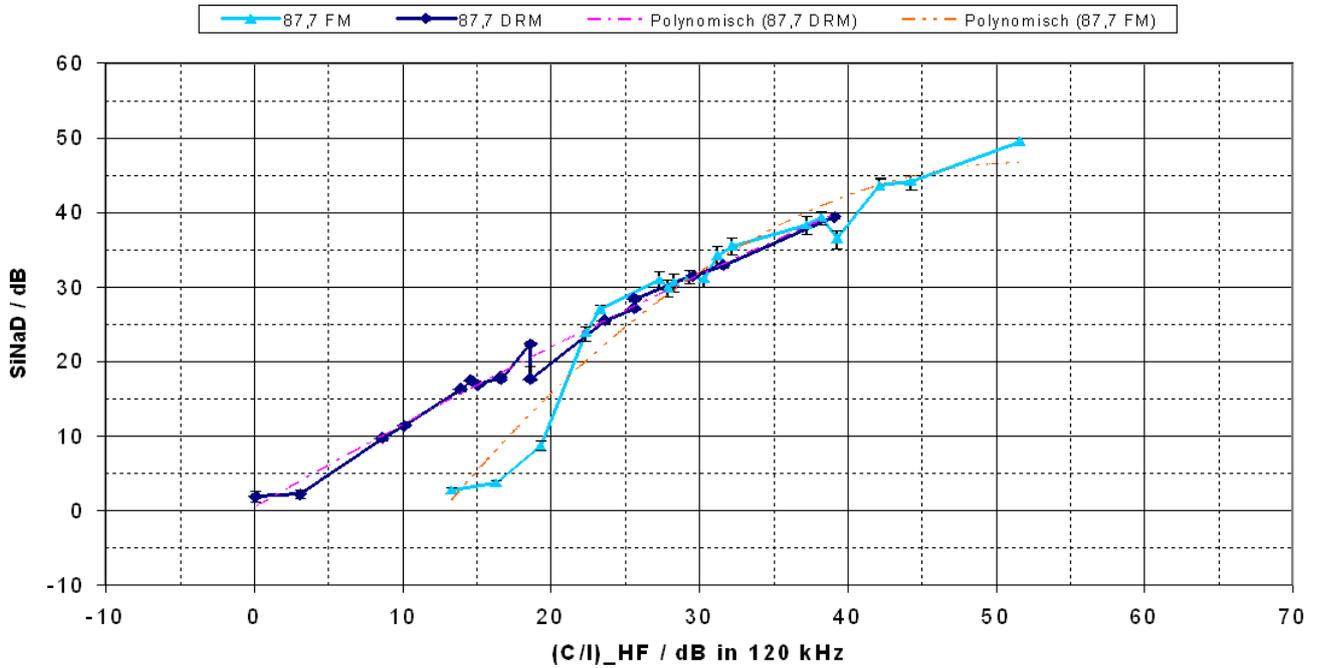


Abb. 5.19: Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,7 MHz

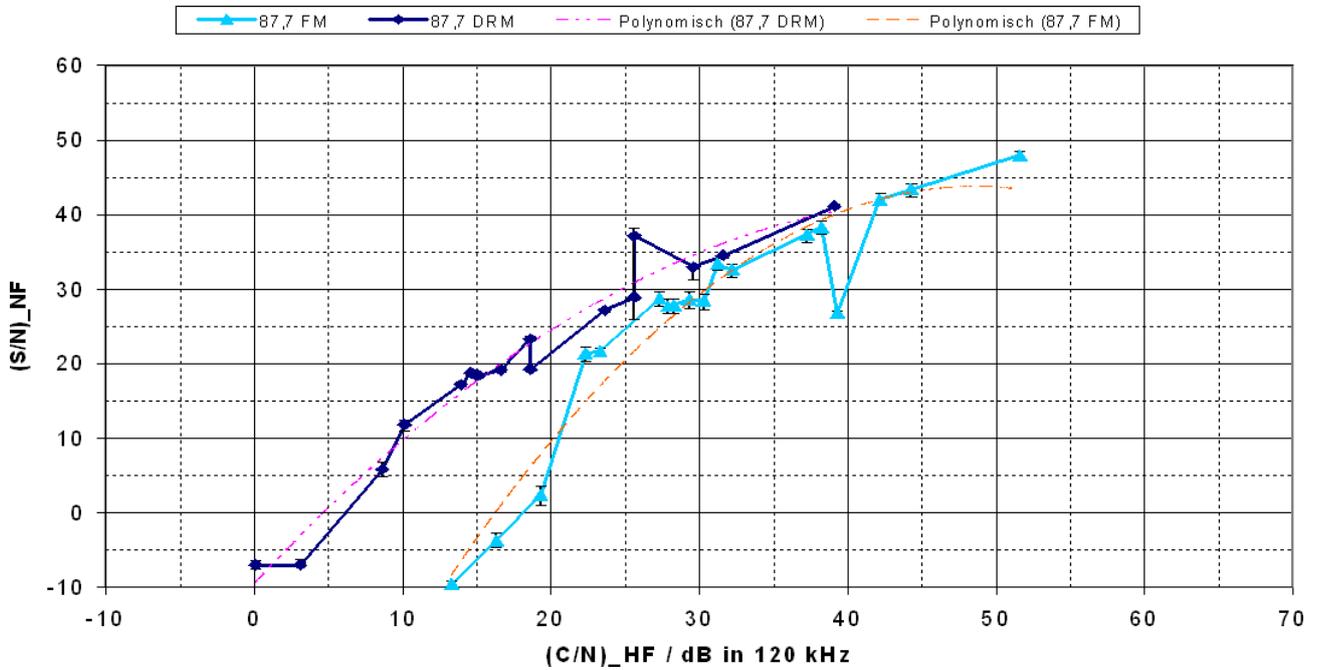
Im folgendem einige Hörbeispiele zu den Situationen an verschiedenen Messpunkten:

Messpunkt-Nr.	Störsignal von TX FH	
	FM	DRM ⁺
1	👂	👂
2	👂	👂
8	👂	👂

Tab. 5.4: Hörproben 87,7 MHz



(a) SINAD



(b) S/N

Abb. 5.20: SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,7 MHz

C/I/dB	13,3	16,3	19,3	22,3	23,3	27,3	27,9	28,3	29,3
MP(FM)	17	15	1	14	16	18	2	7	13
C/I/dB	0,1	3,1	8,6	10,1	13,9	14,6	14,9	15,1	16,6
MP(DRM)	17	15	14	16	1	18	2	7	13
C/I/dB	30,3	31,2	32,2	37,3	38,2	39,3	42,2	44,3	51,6
MP(FM)	5	6	3	4	11	8	12	10	9
C/I/dB	16,6	18,6	18,6	23,6	25,6	25,6	29,6	31,6	39,1
MP(DRM)	5	3	6	4	11	8	12	10	9

Tab. 5.5: Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,7 MHz

Nutzfrequenz: 87,8 MHz

In Abb. 5.22 sieht man, dass an den unterschiedlichen Punkten der gleiche Trend wie in den Abb. 5.13,5.14 erkennbar ist: die Unterschiede der Messwerte am Empfängeranfang aufgrund des Modulationswechsels an TX FH schrumpfen. Es ist zu beachten, dass die NF-Parameter (S/N bzw. SINAD) sich hier auch im gestörtem Zustand bereits auf einem hohem Niveau befinden. Die verschiedenen Einbrüche in der DRM⁺-Kurve sind auch im FM-Bereich zu erkennen. Dort treten diese allerdings aufgrund der C/I-Rechnung verschoben entlang der C/I-Achse auf und sind auch nicht derart ausgeprägt, zudem das verwendete Verfahren zur Mittelung (s. Kap. 5.1.2) den Worst-Case darstellt.

Betrachtet man sich Abb. 5.22 näher, so stellt man bei den Messpunkten 15, 14 und 16 die stärksten Einbrüche z.B. des SINAD fest. Verfolgt man die Einbrüche entlang des SINAD, so treten diese – von niedrigen zu hohen C/I-Werten – an den Messpunkten 15 (Alter Theaterplatz), 14 (Vorplatz Hauptbahnhof) und 16 (Rudolf-Breitscheid-Straße) auf. Diese drei Punkte haben die Gemeinsamkeit, dass beim „Blick“ durch die Richtantenne auf TX RB die Aussendungen von TX FH zum dominierenden Störsignal werden. Der Empfänger – insbesondere seine AGC – reagiert entsprechend sensibler auf diesen Umstand. Dies ist ähnlich zu den Situationen im Labor [SSR07] – dort sind nur das Nutz- und das Störsignal vorhanden. Die Betrachtung von Messpunkt 1 zeigt allerdings, dass hier nur bei einer geringen Absenkung des empfangenen Signals von TX FH keine weitere Beeinflussung des NF-Signals mehr festzustellen ist. Somit ist in dieser Frequenzkonstellation die DRM⁺-Leistung leicht gegenüber einem FM-Sender in dieser Frequenzkonstellation abzusinken.

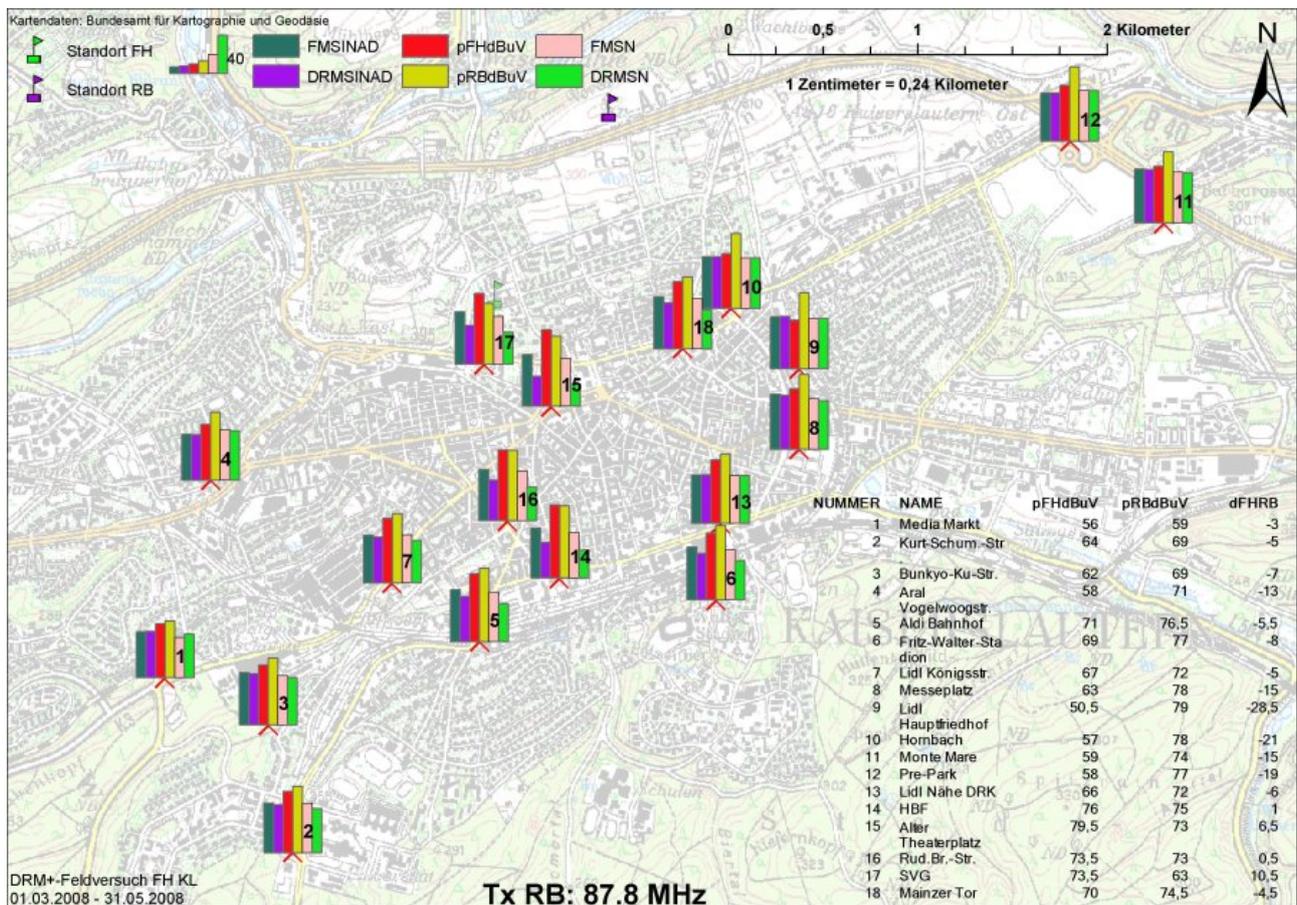
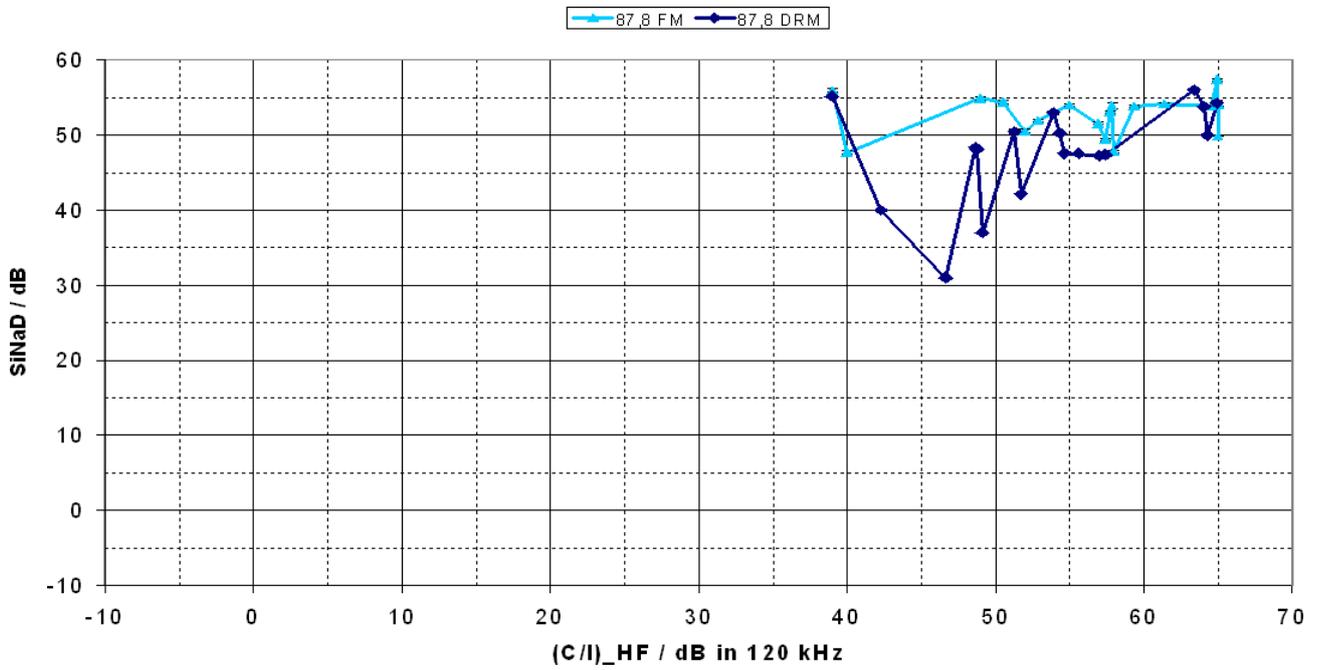


Abb. 5.21: Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,8 MHz

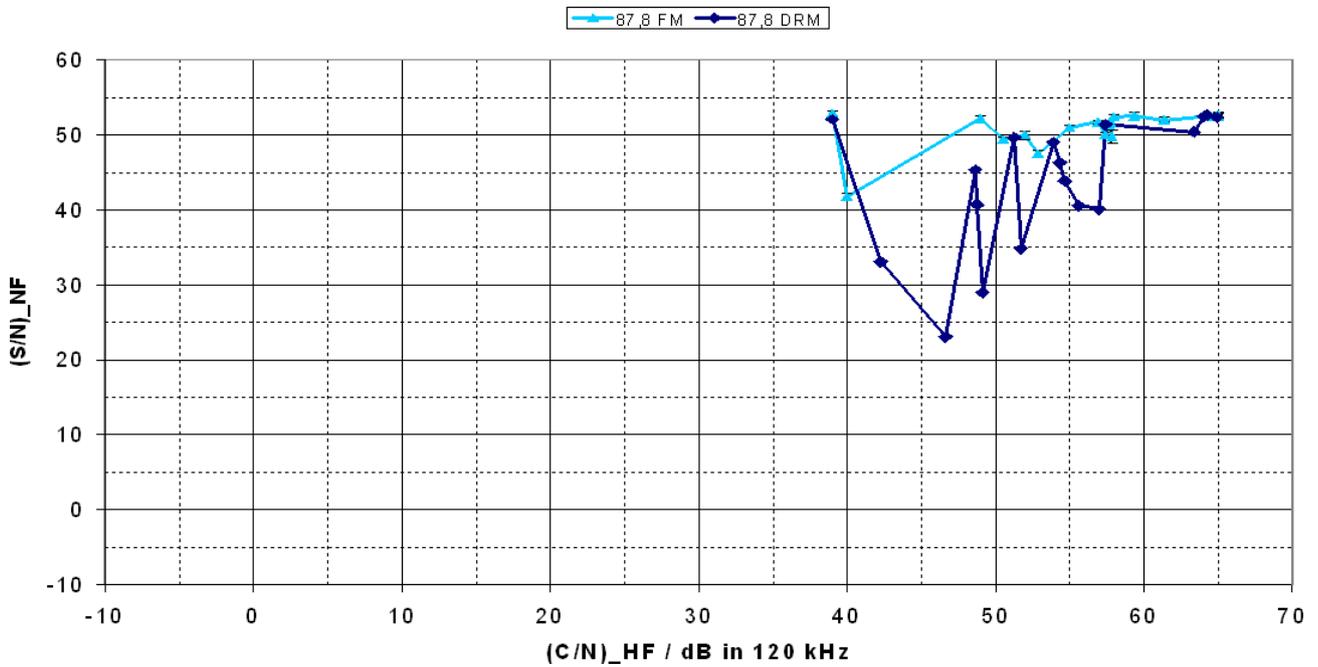
Die nachfolgende Tabelle beinhaltet einige Hörproben zu der Situation an verschiedenen Messpunkten:

Messpunkt-Nr.	Störsignal von TX FH	
	FM	DRM ⁺
1		
2		

Tab. 5.6: Hörproben 87,8 MHz



(a) SINAD



(b) S/N

Abb. 5.22: SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,8 MHz

C/I/dB	39,0	40,0	49,0	50,5	52,0	52,9	55,0	56,9	57,4
MP(FM)	11	1	6	17	13	14	3	2	7
C/I/dB	39,0	42,3	46,6	48,6	48,8	49,1	51,3	51,7	53,9
MP(DRM)	11	17	15	1	6	14	13	16	3
C/I/dB	57,7	57,8	58,0	59,4	61,4	64,5	65,0	65,0	65,0
MP(FM)	16	15	4	18	5	10	8	12	9
C/I/dB	54,3	54,7	55,6	57,0	57,4	63,4	64,1	64,3	64,9
MP(DRM)	2	7	18	5	4	8	10	12	9

Tab. 5.7: Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,8 MHz

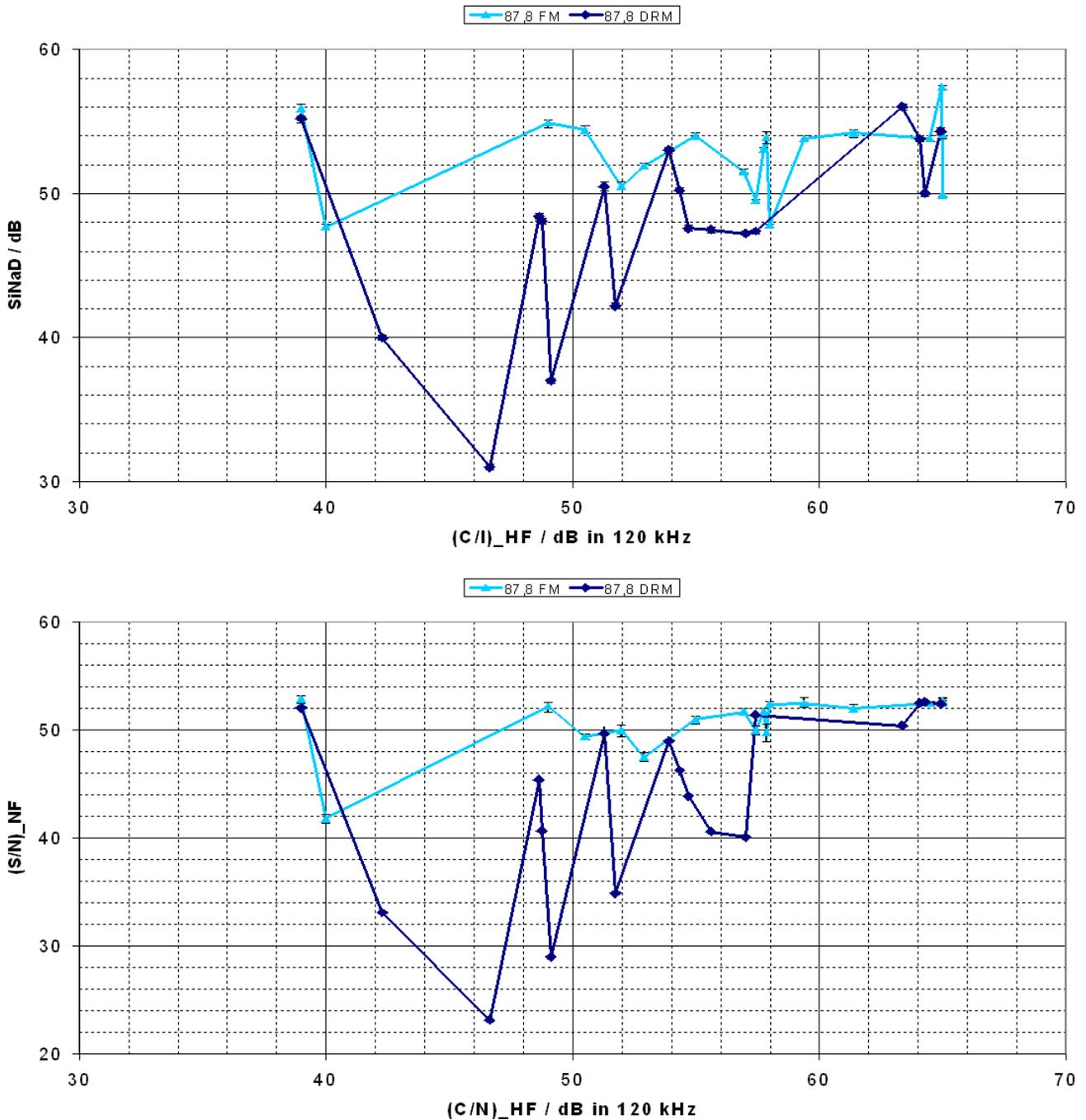


Abb. 5.23: SINAD und S/N über C/I (vergrößert), Nutzfrequenz: 87,8 MHz

Nutzfrequenz: 87,9 MHz

In Abb. 5.25 sieht man, dass an den unterschiedlichen Punkten der gleiche Trend wie in den Abb. 5.13,5.14 erkennbar ist. Es ist zu beachten, dass die NF-Parameter sich hier auch im gestörtem Zustand bereits auf einem hohem Niveau befinden und das viele Werte durch den Sender 88,0 MHz beeinflusst sind. Tonbeispiele von dieser Frequenz wurden nicht angefertigt, da bereits bei 87,8 MHz bei der subjektiven Bewertung keine Beeinflussungen festgestellt werden konnten.

Dennoch kann auch bei diesem Frequenzversatz festgestellt werden, dass bei den Messpunkten 14 und 15 ein Einbruch des SINAD entgegen dem Trend zu verzeichnen ist, wobei die Werte weiterhin auf einem recht hohem Niveau verbleiben. Bei MP 14 (Bahnhof) wird TX FH durch die Keule der Richtantenne noch gut „gesehen“ und wird zum dominierenden Störsignal, auf das die AGC wiederum reagiert. Aufgrund ihrer zeitlichen Trägheit sind die Amplitudenvariationen des OFDM-Signals zu schnell, um ausgeregelt werden zu können, so dass hierbei die Mischerstufe des Empfängers durch die Signalspitzen periodisch überlastet wird. Bei MP 15 (Alter Theaterplatz), welcher fast direkt nördlich von MP 14 liegt, ist dieses Verhalten ausgeprägter. Die Richtantenne zeigt zwar weniger auf TX FH, der absolute Signalpegel steigt allerdings aufgrund der höheren Nähe zu den Sendern an. Die Kombination aus hohem absolutem Eingangspiegel und der Stördominanz² von TX FH treibt den Empfänger umso leichter in einen nichtlinearen Zustand. Dieser Effekt ist auch an MP 16 erkennbar, wobei der Einbruch des SINAD geringer ist.

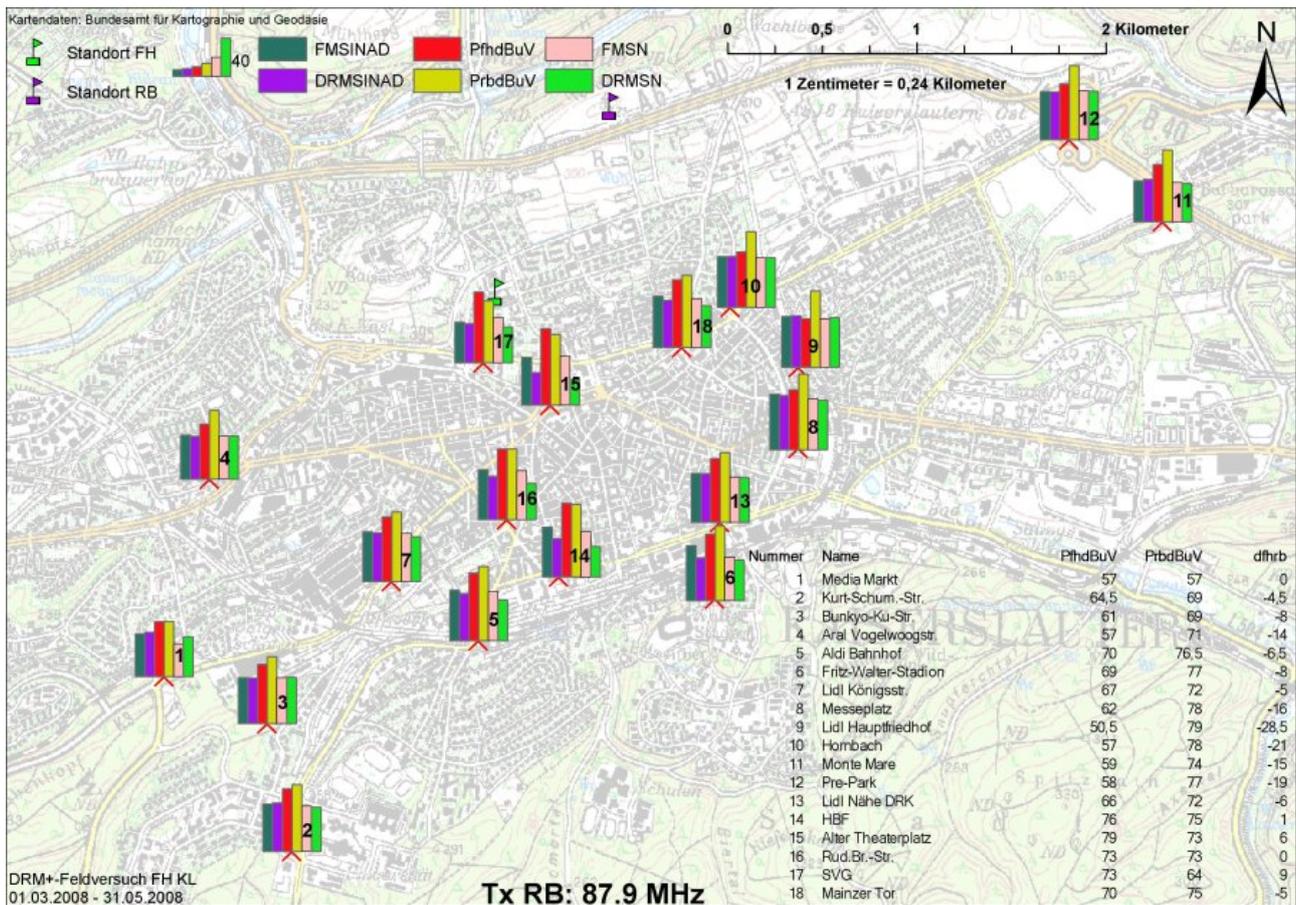
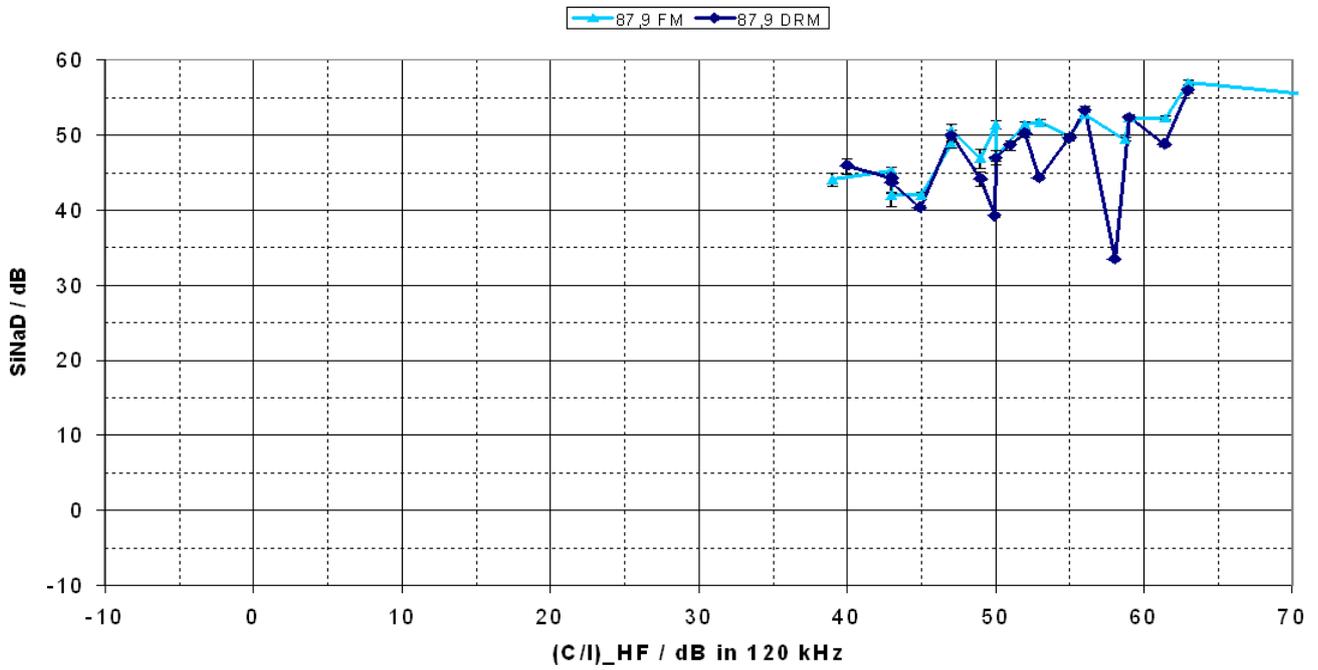
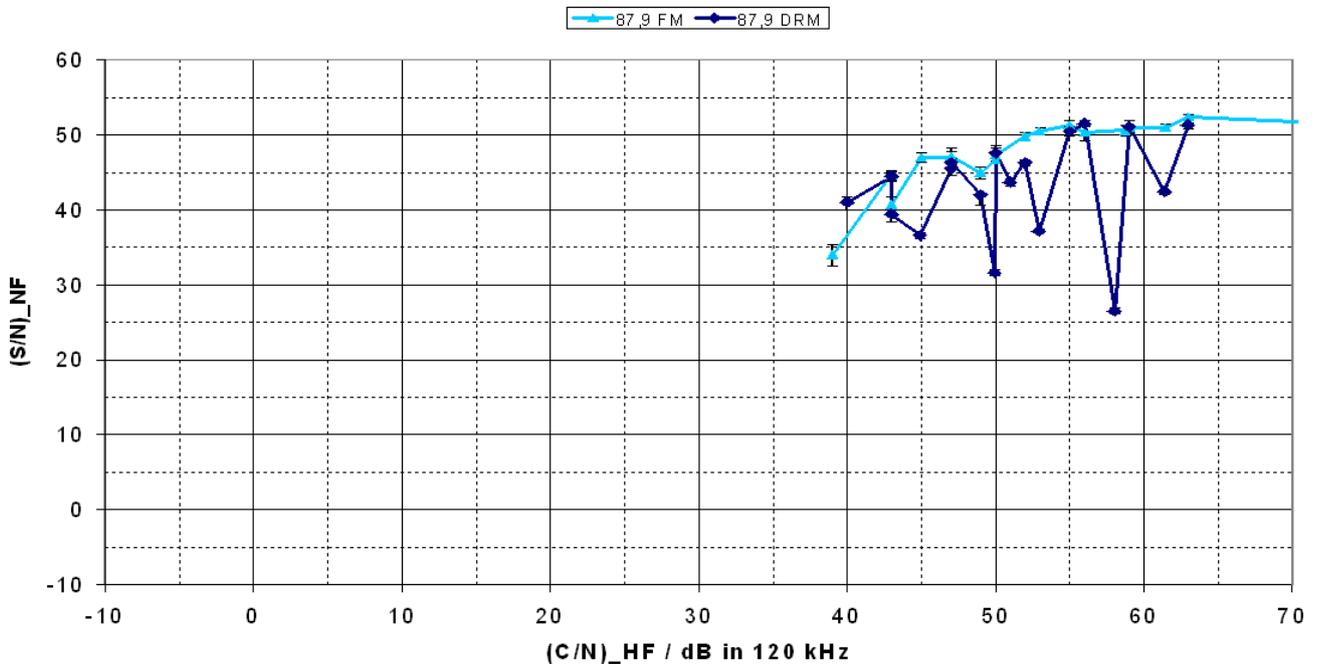


Abb. 5.24: Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,9 MHz

²TX FH ist innerhalb der Eingangsselektion der Störer mit dem stärkstem Pegel



(a) SINAD



(b) S/N

Abb. 5.25: SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,9 MHz

C/I/dB	39,0	43,0	43,0	45,0	47,0	47,0	49,0	50,0	50,0
MP(FM)	1	4	11	17	2	13	6	14	3
C/I/dB	40,0	43,0	43,0	44,9	47,0	47,0	49,0	50,0	50,0
MP(DRM)	1	4	11	17	2	13	6	14	3
C/I/dB	52,0	53,0	55,0	56,0	58,7	59,0	61,5	63,0	83,0
MP(FM)	7	16	12	9	15	10	5	8	18
C/I/dB	51,0	52,0	52,9	55,0	56,0	58,0	59,0	61,4	63,0
MP(DRM)	18	7	16	12	9	15	10	5	8

Tab. 5.8: Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,9 MHz

5.3.2.3 Wirkung auf unterschiedliche FM-Empfänger

Der im Rahmen dieser Untersuchung verwendete Messaufbau ist in Abschnitt 5.2.2 beschrieben. An den beiden Messpunkten 19 & 20 wurde für jeden einzelnen der drei verwendeten Empfänger (s. Abschnitt 3.5.1) jeweils eine Messreihe aufgenommen, bei der die Nutzfrequenz und Störleistung variiert wurden. Die Lage der Punkte 19 & 20 ist in Abb. 3.21 verzeichnet.



(a) Messpunkt 19



(b) Messpunkt 20

Abb. 5.26: Ansicht von Messpunkt 19 und 20; Position der Messpunkte: s. Abb. 3.21

Im Vorfeld zu dieser Messreihe wurde die Übertragungskennlinien (S/N bzw. SINAD über Eingangspegel) der einzelnen Empfänger unter Nutzung der in Abschnitt 3.3.1 dokumentierten Prüfsignale im ungestörtem Fall vermessen. Die Geräte sind darüberhinaus auch Bestandteil der Untersuchungen [HSE07, SSR07, SS08].

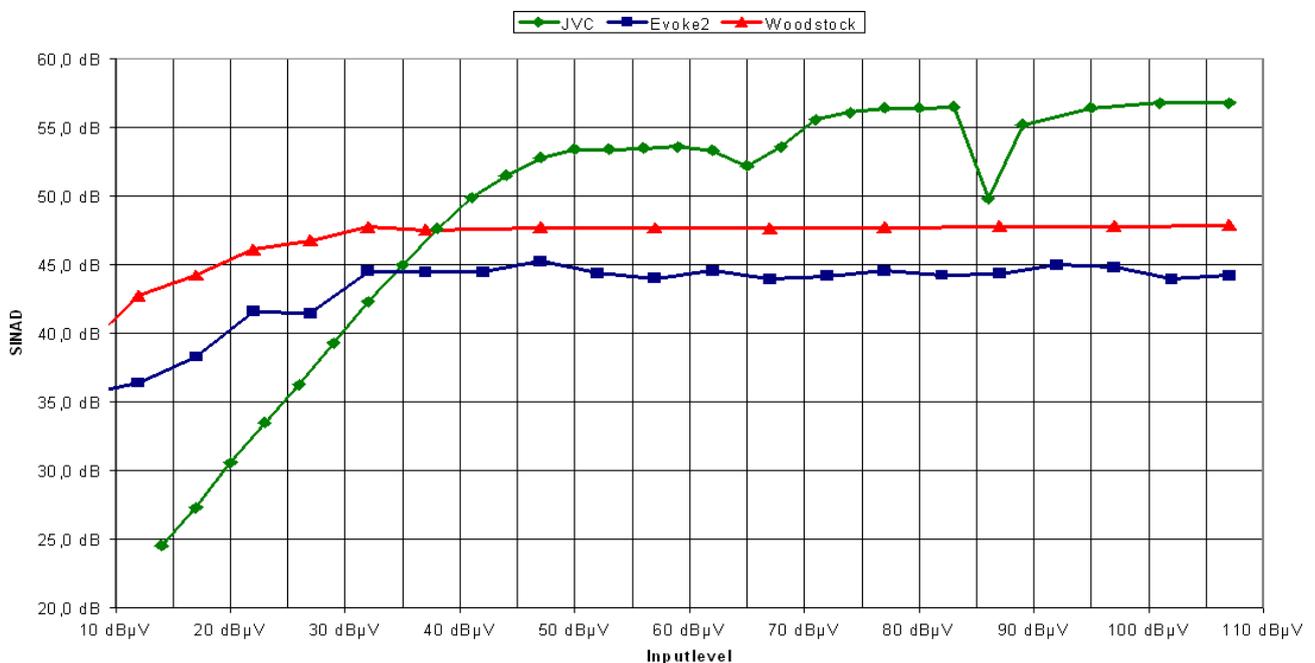


Abb. 5.27: SINAD-Empfindlichkeit der unterschiedlichen Empfänger im Labor

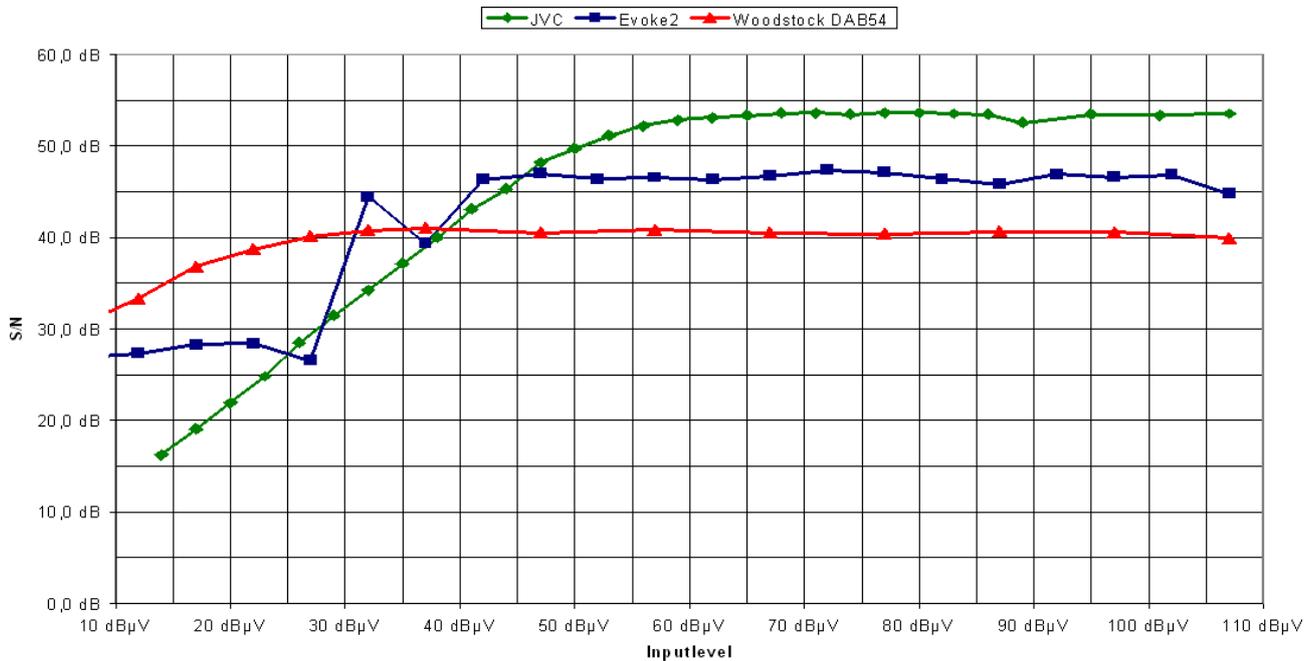


Abb. 5.28: S/N-Empfindlichkeit der unterschiedlichen Empfänger im Labor

Sprünge der NF-Parameter im Bereich niedriger C/I-Werte beim Blaupunkt-Empfänger (Abb. 5.27) sind auf das Einsetzen der autom. Mono- / Stereumschaltung zurückzuführen. Bei den anderen Empfängern ist diese Umschaltung entweder manuell vorzunehmen bzw. nicht vorhanden.

Die HF-Pegel wurden beim Wechsel der Nutzfrequenz erneut gemessen. Da die Durchführung einer kompletten Messreihe eine längere Zeitspanne³ beansprucht, sind innerhalb der einzelnen Messreihen an einem Messpunkt Variationen dieses Parameters systematisch bedingt. An den jeweiligen Punkten ergaben sich im Mittel die in Tabelle 5.9 aufgelisteten Empfängereingangspegel. Darin kennzeichnet

- P_{nutz} : Nutzleistung am Empfängereingang (von TX RB)
- P_{stoer} : Störleistung am Empfängereingang (von TX FH)
- Rausch <Frequenz>: Rauschpegel auf der jeweils angegebenen Frequenz (in MHz)

	P_{nutz}	P_{stoer}	Rausch 87.6	Rausch 87.7	Rausch 87.8	Rausch 87.9
MP19	-59 dBm	-56 dBm	-102 dBm	-102 dBm	-102 dBm	-101 dBm
MP20	-65 dBm	-71 dBm	-105 dBm	-105 dBm	-105 dBm	-105 dBm

Tab. 5.9: Pegel bei der stationären Untersuchung mit drei unterschiedlichen Empfängern

Auf den folgenden Seiten sind die jeweiligen grafischen Auswertungen dieser Messreihe – sortiert nach Nutzfrequenz – dargestellt und diskutiert.

³Die Bearbeitung eines Messorts in dieser Reihe entspricht einem kompletten Arbeitstag, ohne Vor- und Nachbereitung

Nutzfrequenz: 87,6 MHz

Die folgenden Abbildungen 5.29, 5.30 beschreiben die Situation im Falle einer Gleichkanalstörung. Zieht man die Abbildungen 5.13 sowie 5.14 als Vergleich heran, so sind die gleichen Auswirkungen der jeweiligen Störmodulation zu erkennen. Der Sprung der NF-Parameter bei dem KFZ-Empfänger ist auf das Einsetzen der Mono-/Stereoschaltung zurückzuführen. Hierbei ist der Schaltspunkt im Falle des DRM⁺-Signals ca. 5 dB gegenüber dem FM-Signal verschoben, was die in Kapitel 5.3.2.1 vermerkte Feststellung der Leistungsreduktion um ca. 5 dB von DRM⁺ gegenüber FM im Gleichkanalstörfall festigt.

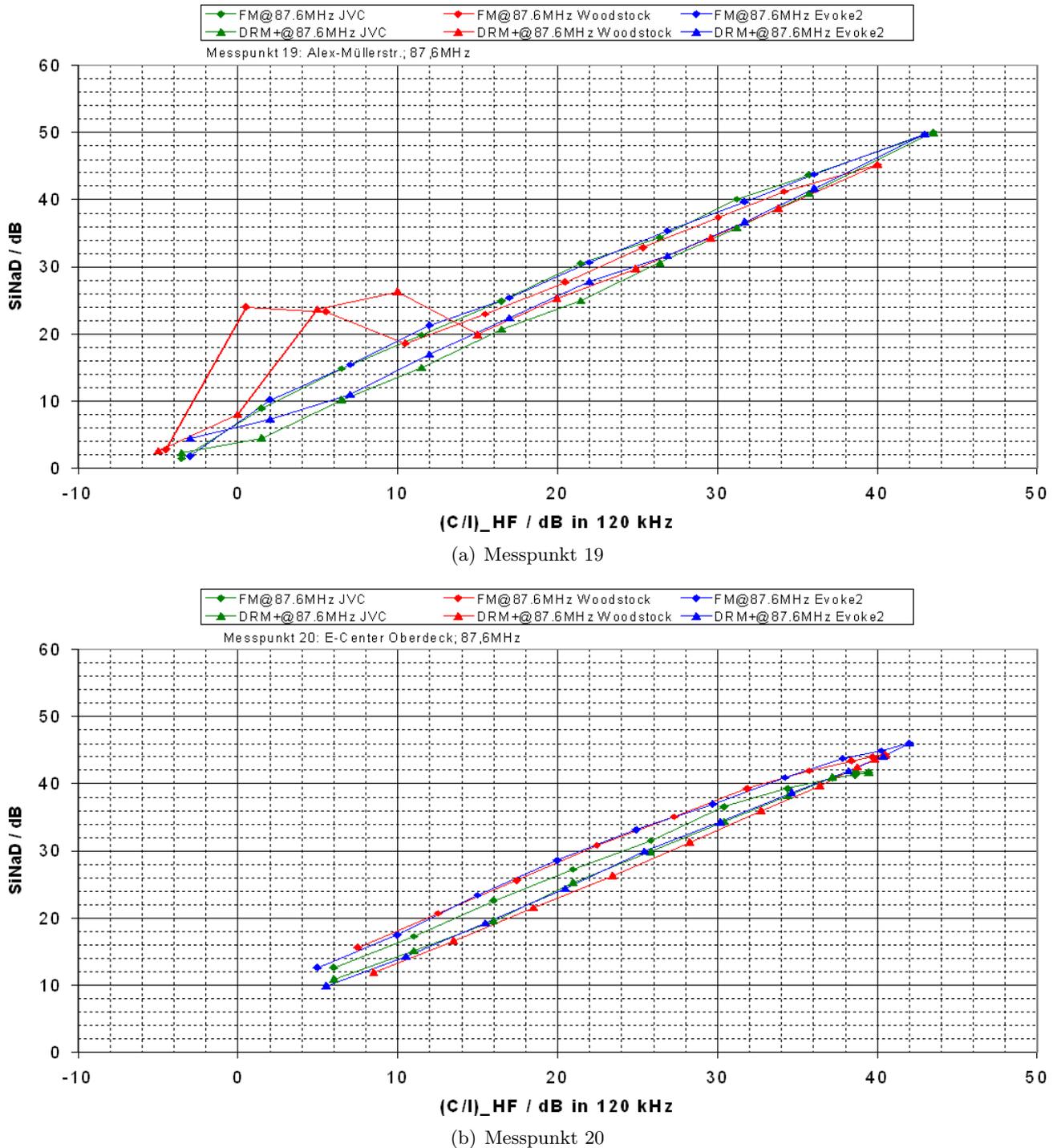


Abb. 5.29: SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,6 MHz

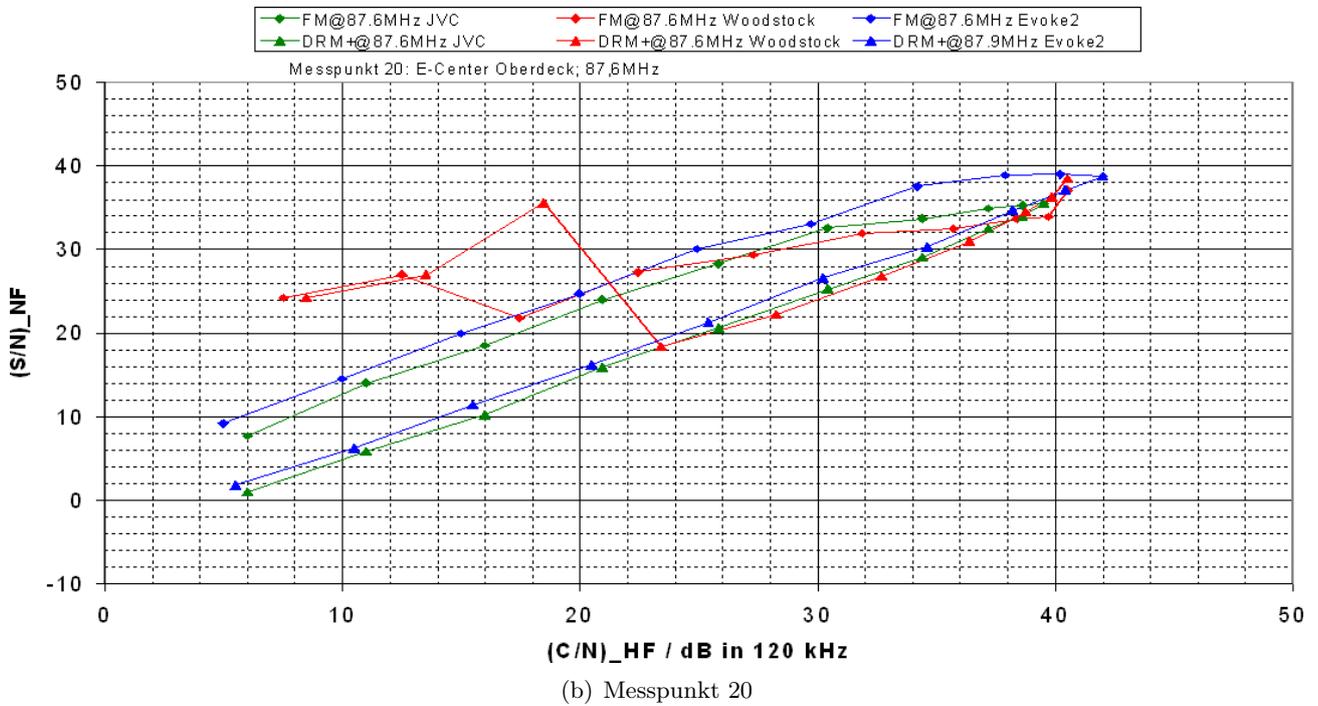
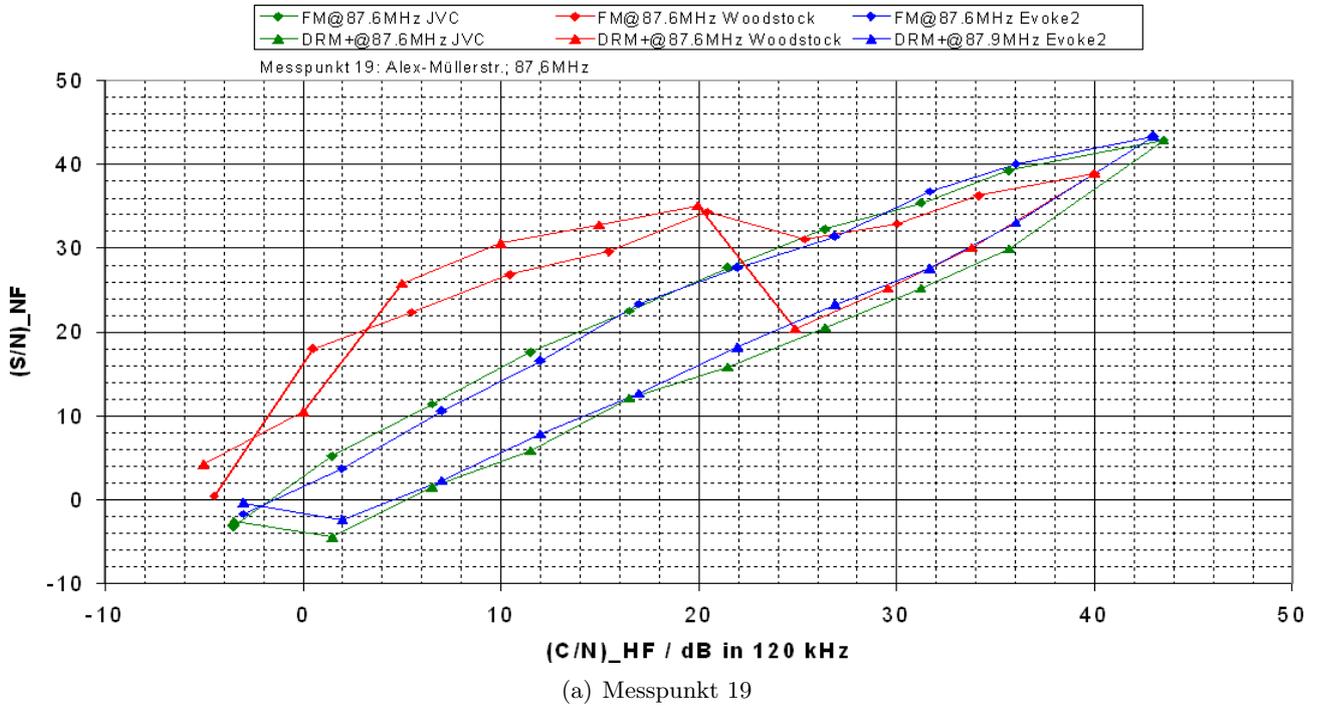
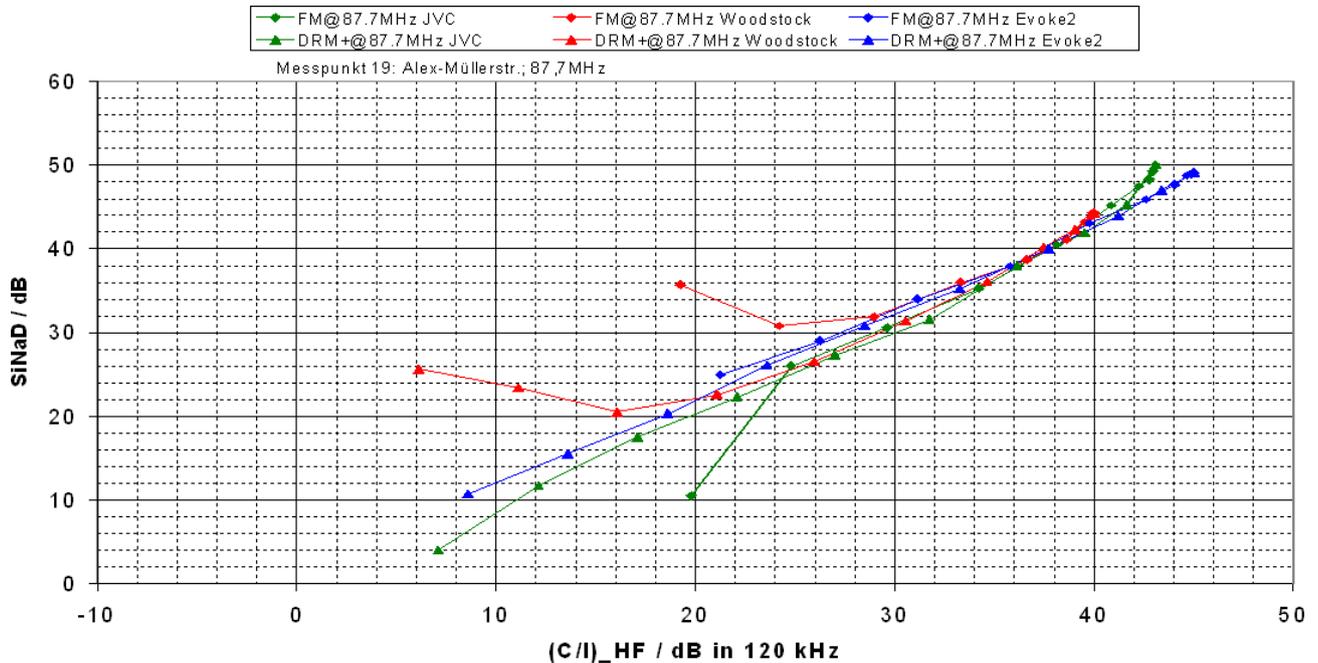


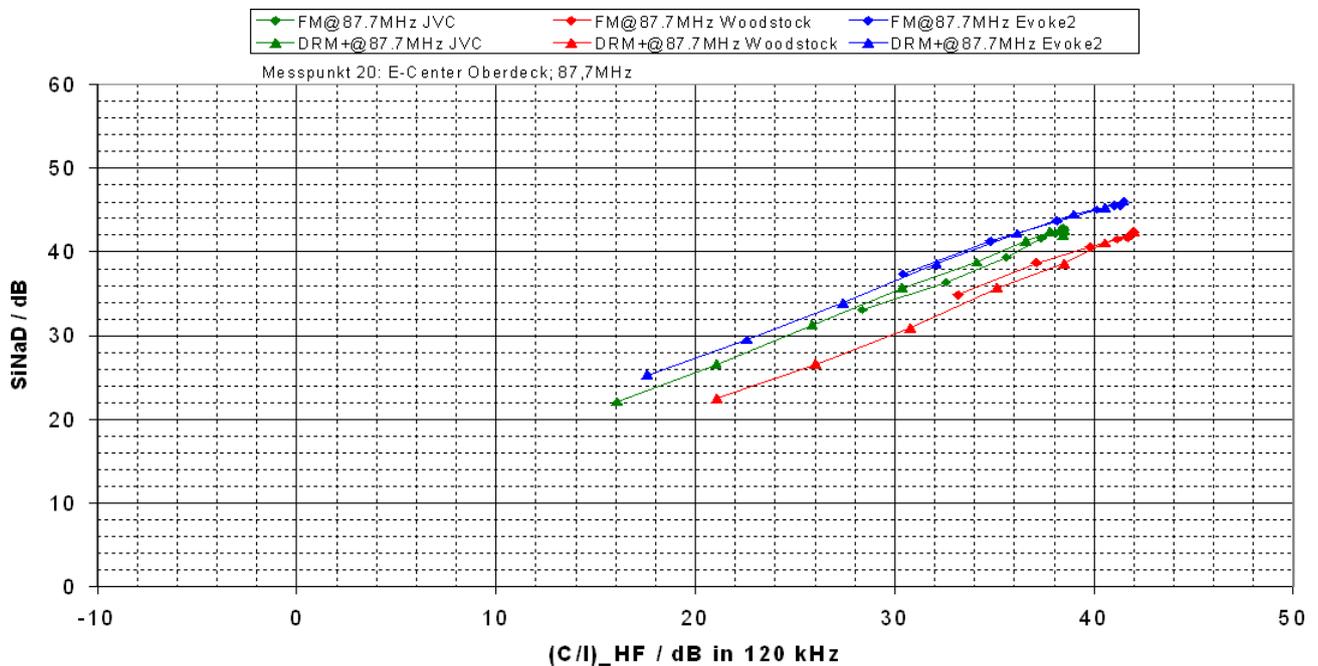
Abb. 5.30: S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,6 MHz

Nutzfrequenz: 87,7 MHz

Die untenstehenden Abbildungen 5.31, 5.32 beschreiben die Situation im Falle eines Störsenders im ersten Nachbarkanal. Die Resultate haben grosse Ähnlichkeit zu den Verläufen der Referenzgraphen 5.29, 5.30. Da bei dem KFZ-Empfänger die ZF-Filterflanke steiler und das Filter schmalbandiger ausgelegt ist, erhöht sich der Grad der AM/PM-Konversion entsprechend, was sich in einem erhöhten Störgrad widerspiegelt. Wesentlich ist an dieser Stelle allerdings die Tatsache, dass die unterschiedlichen Empfänger keine ungewöhnlichen Effekte zeigen, die durch das DRM⁺-Signal hervorgerufen werden könnten.

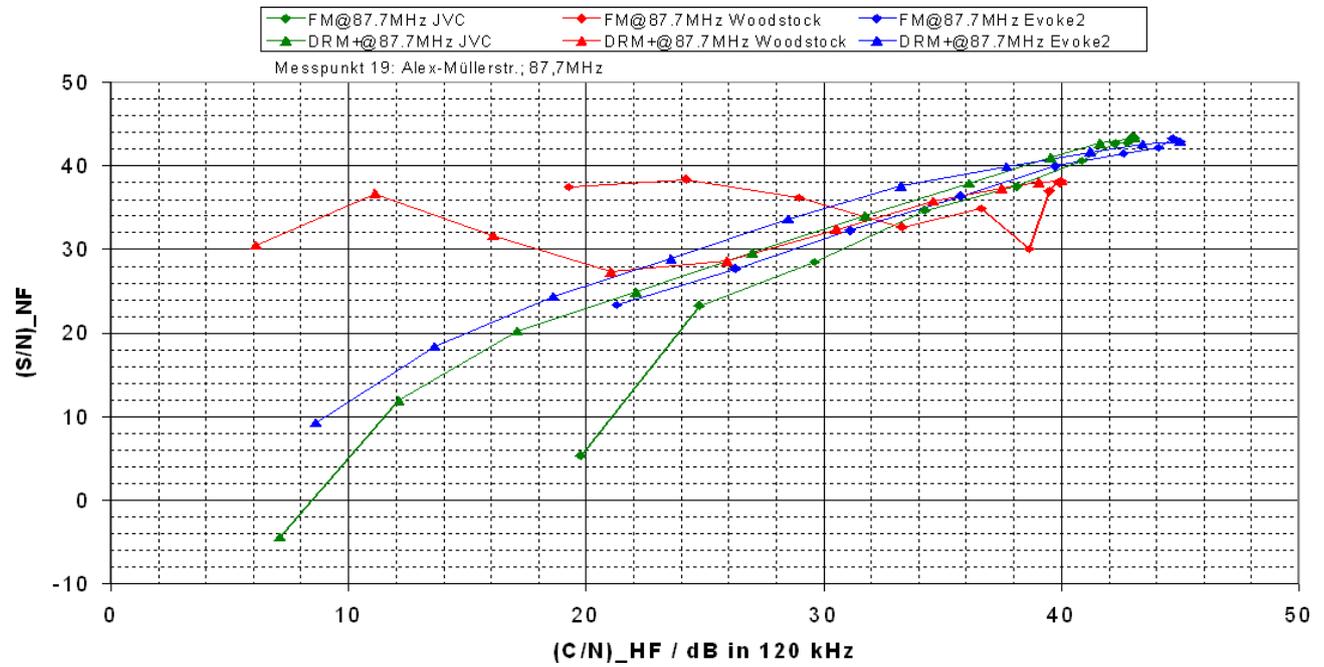


(a) Messpunkt 19

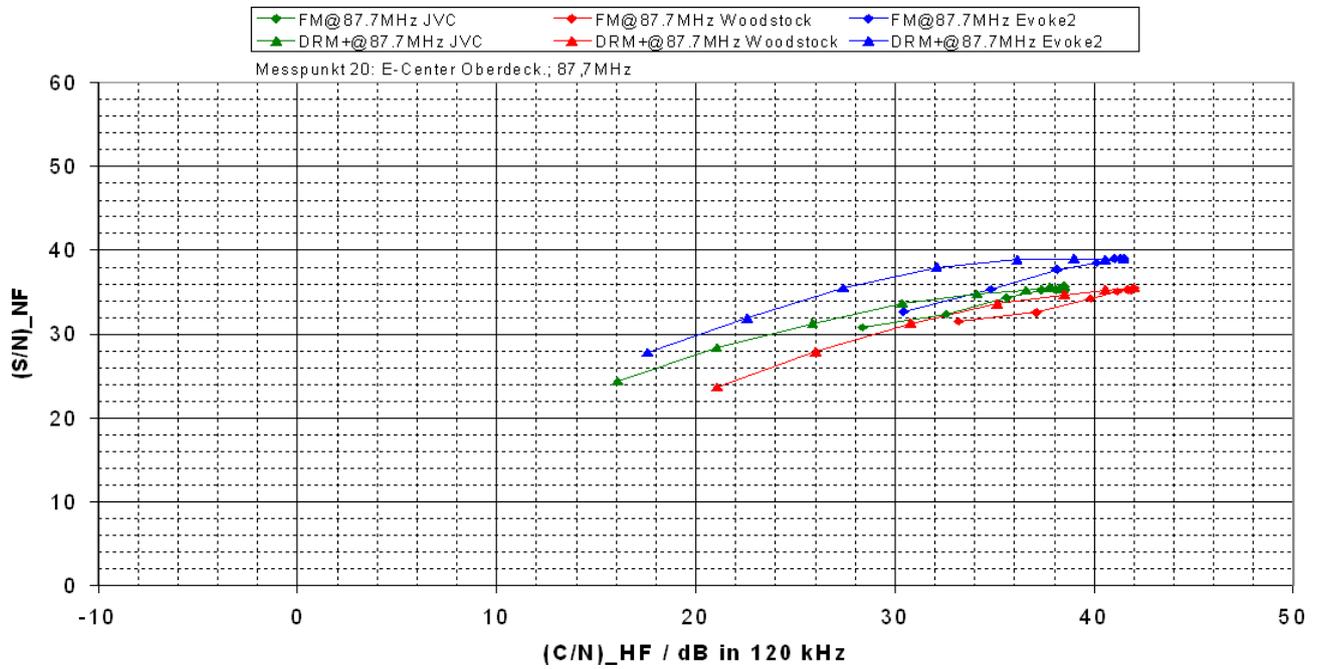


(b) Messpunkt 20

Abb. 5.31: SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,7 MHz



(a) Messpunkt 19

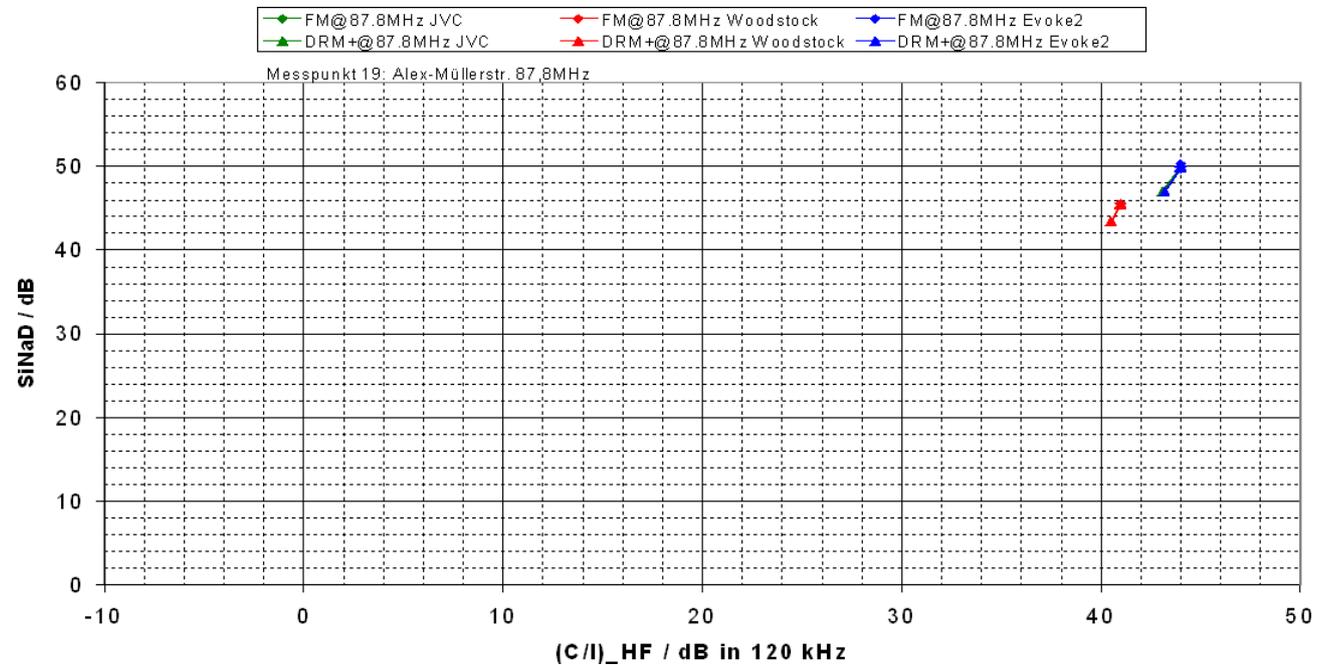


(b) Messpunkt 20

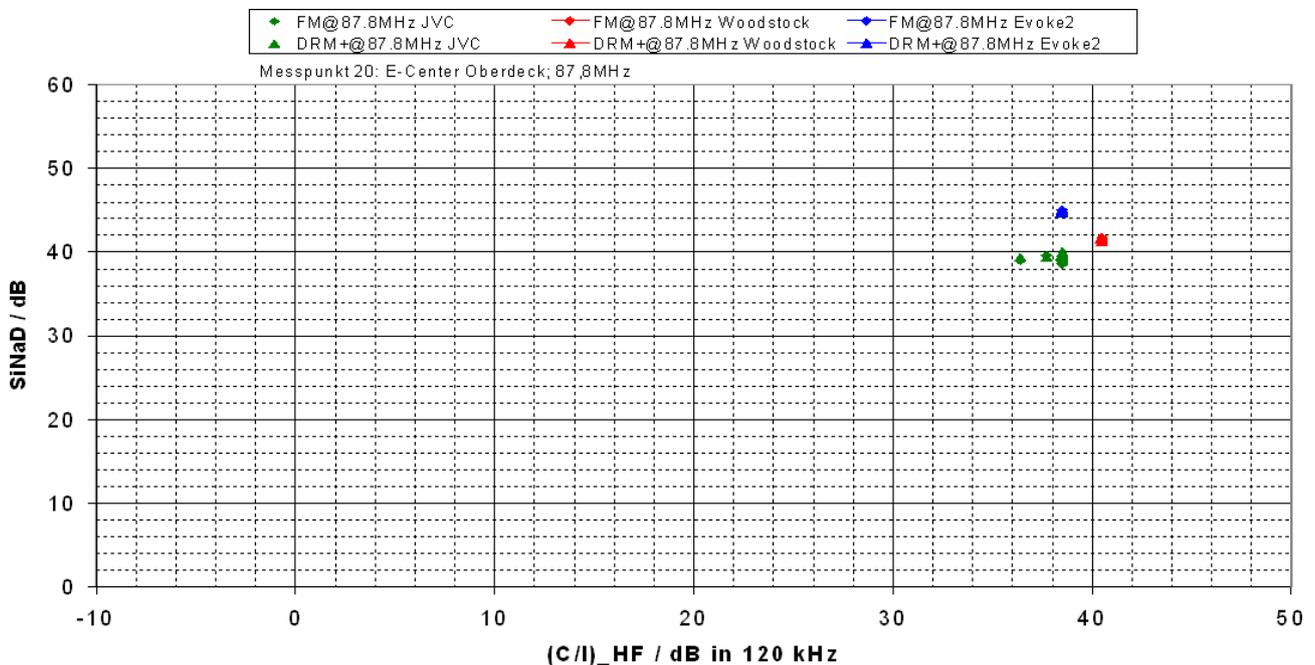
Abb. 5.32: S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,7 MHz

Nutzfrequenz: 87,8 MHz

Die obigen Abbildungen 5.33 und 5.34 beschreiben die Situation im Falle eines Störsenders im zweiten Nachbarkanal. Die Resultate haben große Ähnlichkeit zu den Verläufen der Referenzgraphen 5.29,5.30. Auch hier sind die NF-Parameter bereits auf einem hohem Niveau, bei Änderung des Sendesignals von TX FH auf DRM⁺ ist nur noch eine geringe Leistungsreduzierung gegenüber dem FM-Signal notwendig, um zu den gleichen Ergebnissen zu gelangen.

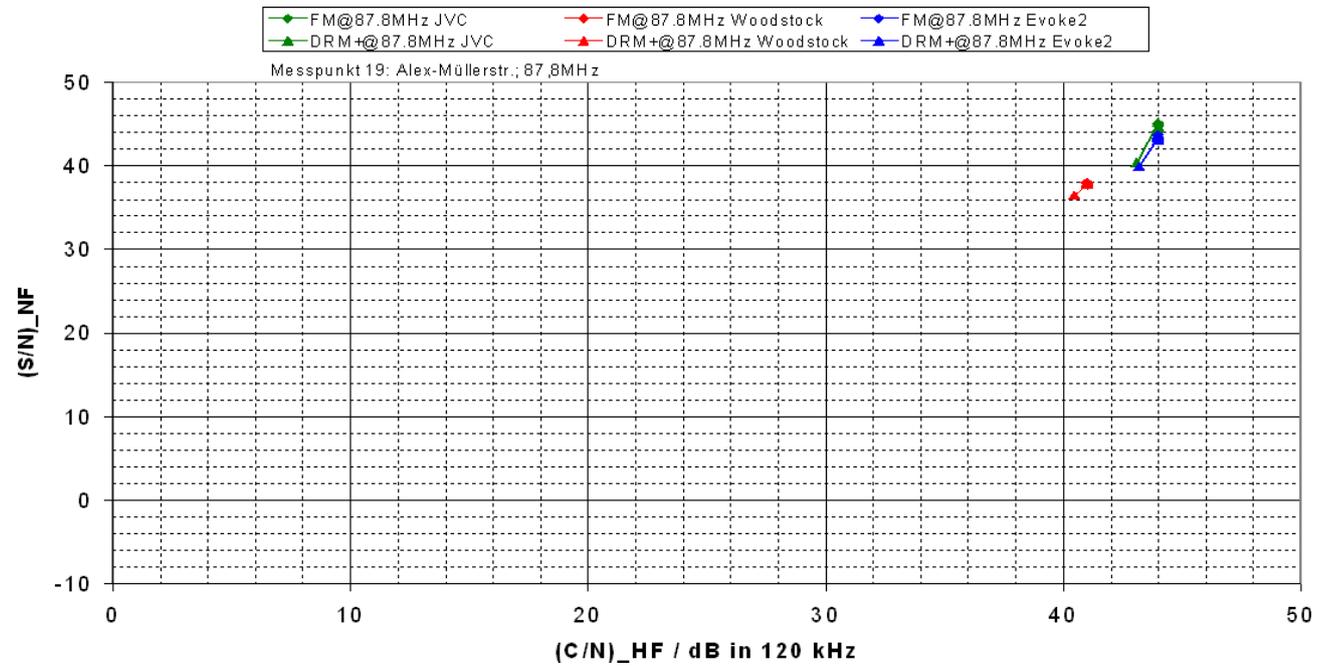


(a) Messpunkt 19

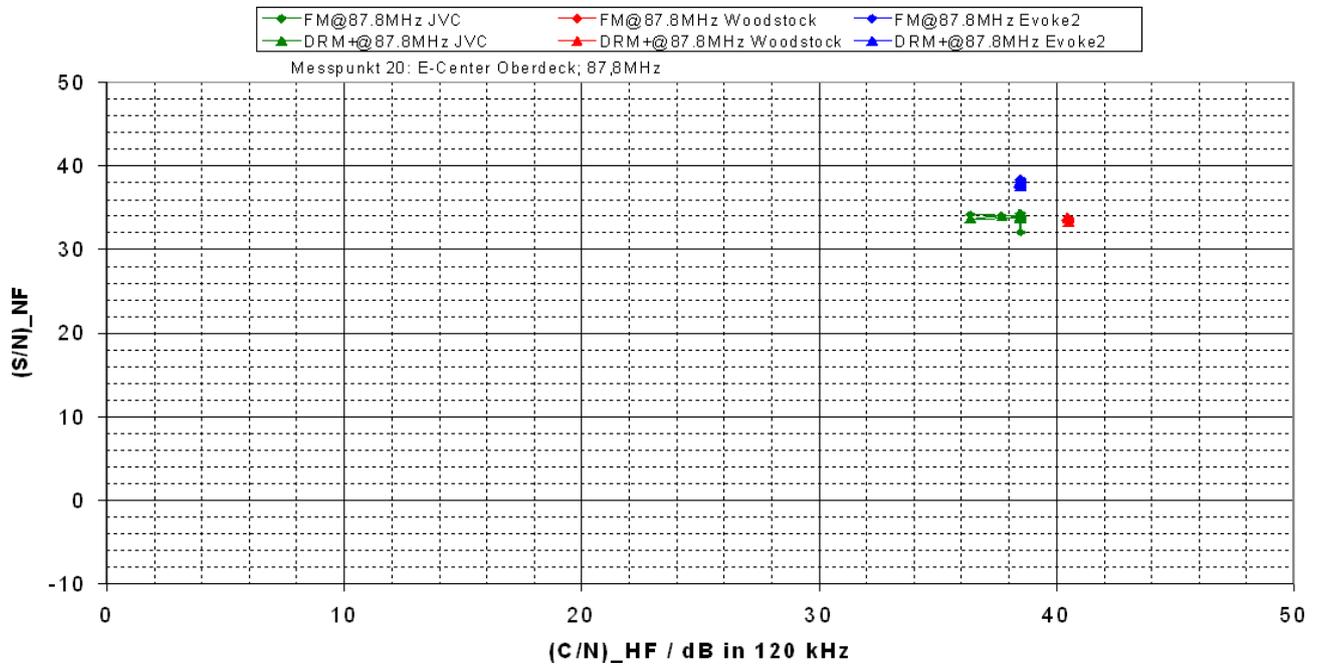


(b) Messpunkt 20

Abb. 5.33: SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,8 MHz



(a) Messpunkt 19

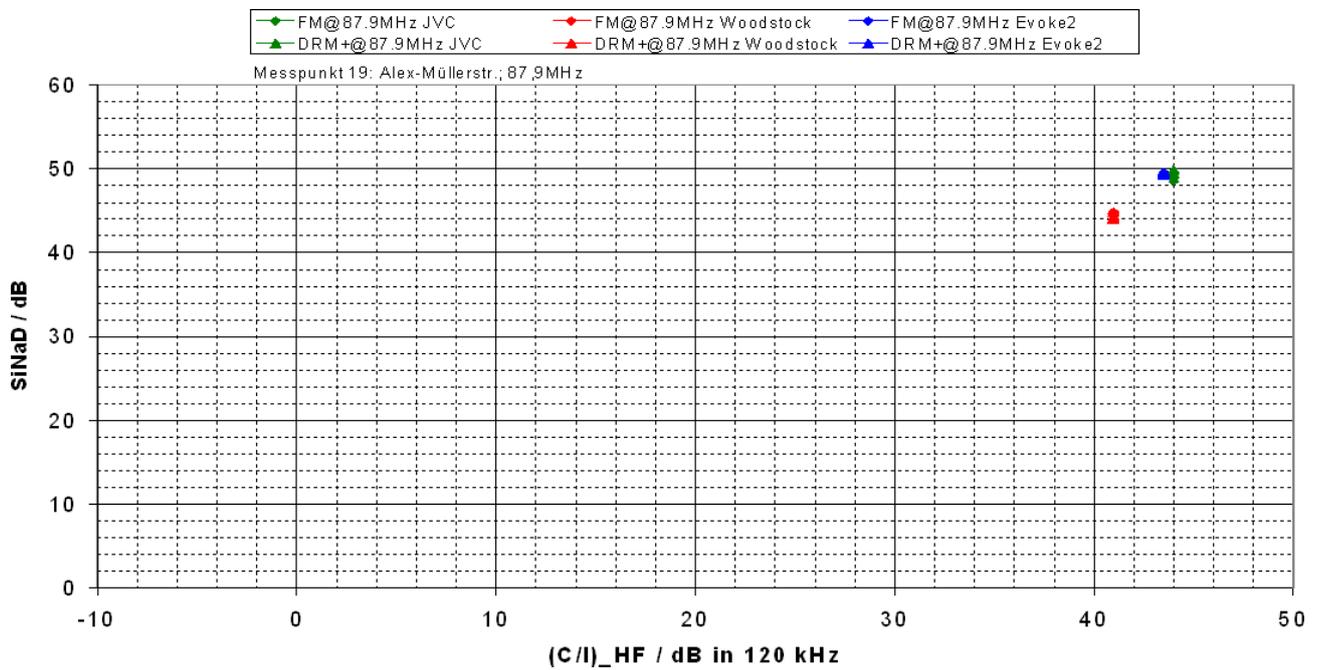


(b) Messpunkt 20

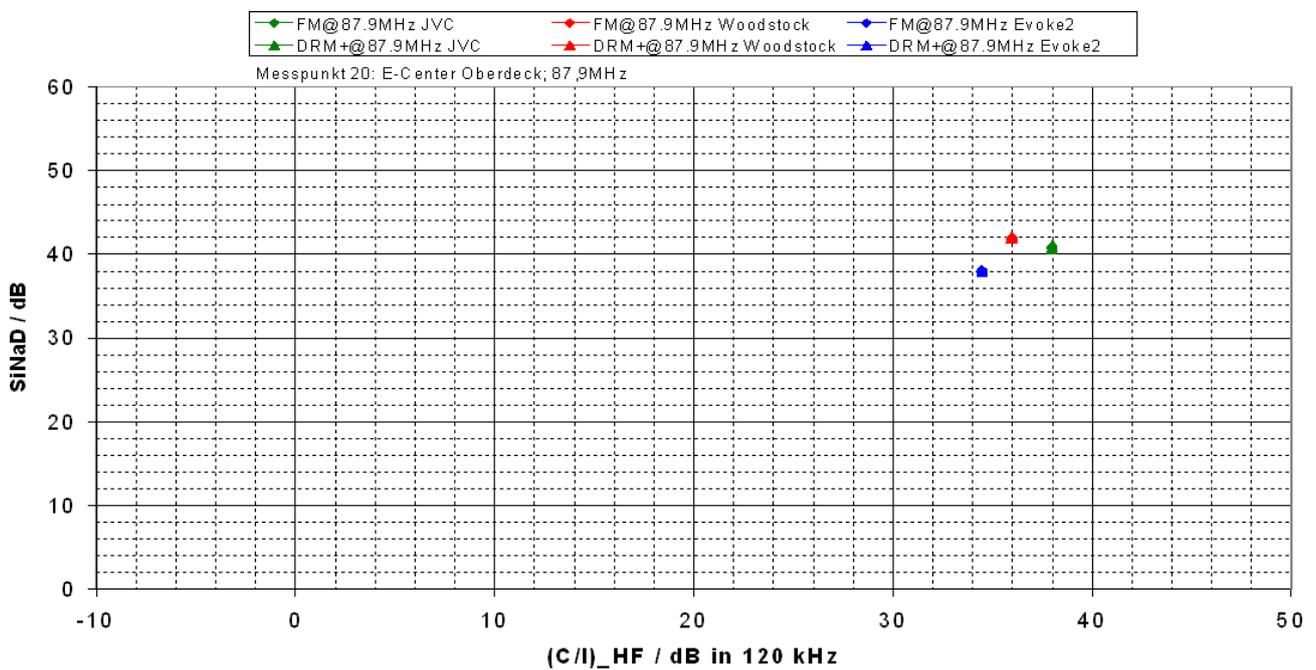
Abb. 5.34: S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,8 MHz

Nutzfrequenz: 87,8 MHz

Die in Abb. 5.35, 5.36 dargestellten Messwerte haben sich zu einer Punktwolke verdichtet. Es ist keine Unterschied mehr feststellbar, ob von TX FH ein FM- oder DRM⁺-Signal abgestrahlt wird.

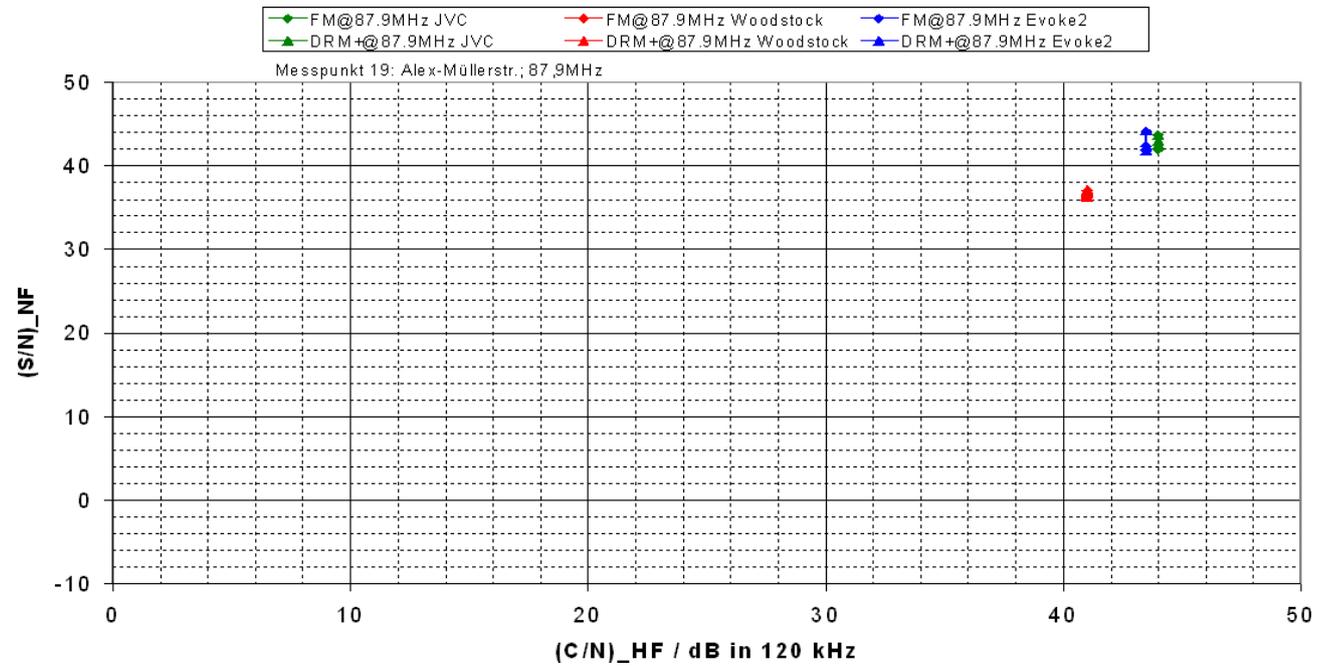


(a) Messpunkt 19

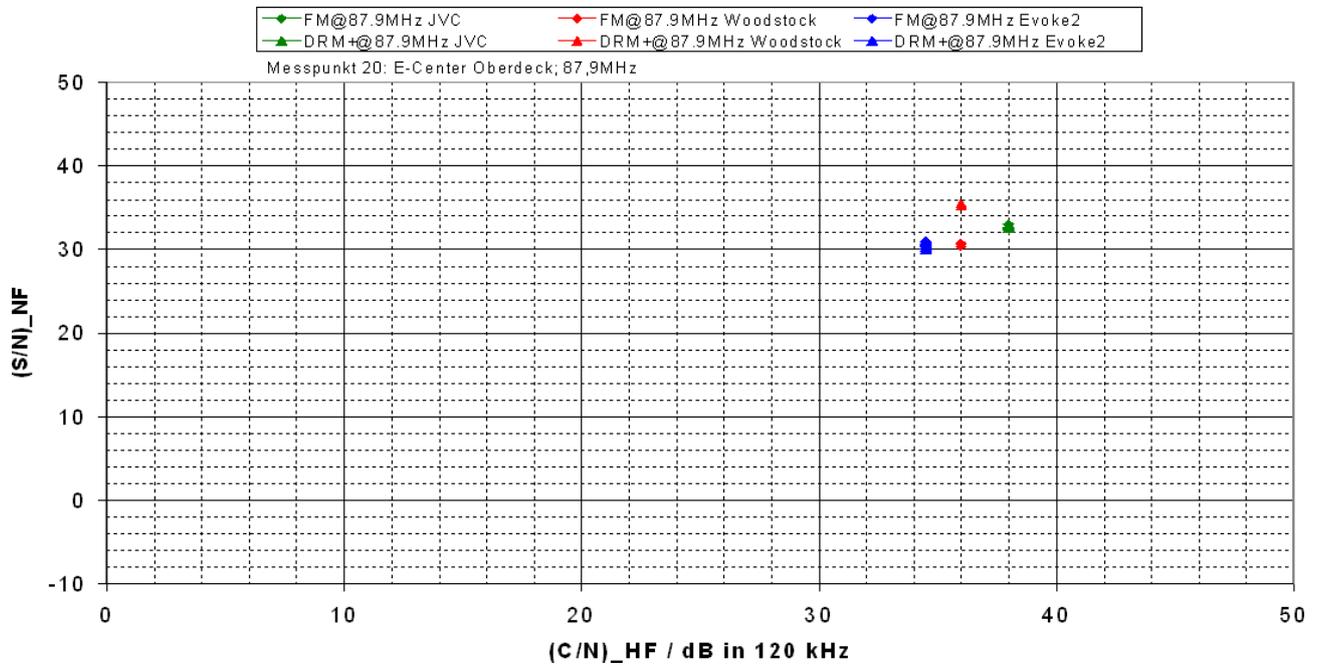


(b) Messpunkt 20

Abb. 5.35: SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,9 MHz



(a) Messpunkt 19



(b) Messpunkt 20

Abb. 5.36: S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,9 MHz

5.4 Analyse des Zusammenhangs der Qualitätsbewertungen SINAD und S/N

Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 gesagt besteht zwischen den Qualitätsbewertungen SINAD und S/N ein fester Zusammenhang. Der vorliegende Abschnitt dokumentiert und analysiert den an den 18 Messpunkten der stationären Messungen erhaltenen Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten SINAD und S/N.

In Abb. 5.37 sind die gemessenen SINAD-Werte als Funktion der S/N-Werte dargestellt. Abb. 5.37(a) zeigt insgesamt $4 \cdot 18 = 72$ Wertepaare $(\text{SINAD})_i, (\text{S/N})_i, i = 1 \dots 72$, für den Fall des FM-FM Störszenarios. Die Farbgebung der Punkte in Abb. 5.37 kennzeichnet hierbei die jeweilige Nutzfrequenz. Entsprechendes gilt für Abb. 5.37(b) des DRM⁺-FM Störszenarios. In beiden Abbildungen ist zusätzlich diejenige Regressionsgerade eingezeichnet, die sich durch lineare Regression⁴ über jeweils alle 72 Wertepaare $(\text{SINAD})_i, (\text{S/N})_i, i = 1 \dots 72$, errechnet. Die Steigung ist mit 0,92 in beiden Fällen gleich, und der Achsenabschnitt beträgt in beiden Fällen knapp 6 dB. Dies lässt sich auf die Verwendung des psophometrischen Bewertungsfilters bei der S/N-Messung [ITU02b] erklären: Das Bewertungsfiler hat bei der verwendeten Frequenz des Prüftons (500 Hz) eine Dämpfung von 6 dB; bei der SINAD-Messung wurde das jedoch Bewertungsfiler *nicht* verwendet.

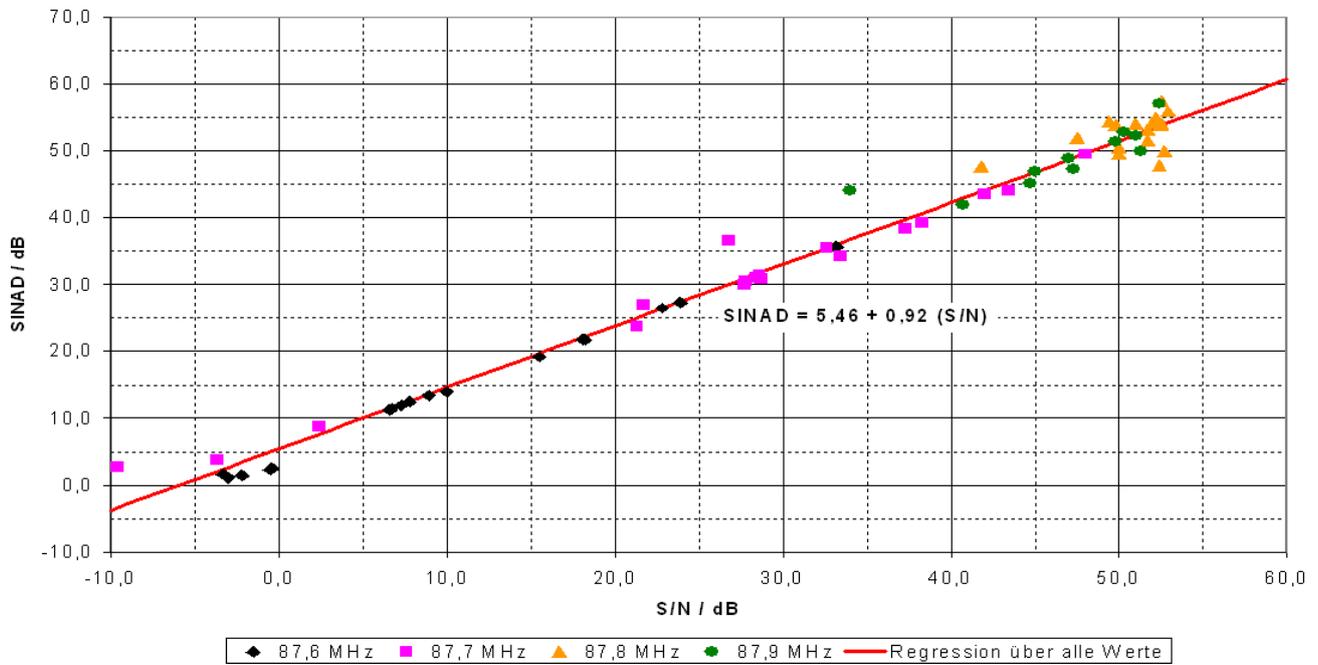
Aus Abb. 5.37 kann weiterhin Folgendes abgeleitet werden: SINAD und S/N können nur in einem gewissen Bereich in einem quasi linearen Zusammenhang stehen, und zwar dann, wenn der Verzerrungsanteil der Signalspannung am Empfängerausgang vernachlässigbar ist. Dies ist der lineare Arbeitsbereich des Empfängers. Steigt der Verzerrungsanteil der Signalspannung (z. B. durch Erhöhen des Eingangspegels), so kann es vorkommen, dass zwar S/N ansteigt, SINAD aber gleich bleibt oder sogar abnimmt. Dies bedeutet, dass die Steigung der Regressionsgeraden bei sehr hohen S/N-Werten kleiner oder sogar negativ werden kann. Dies wird z. B. bei der Nutzfrequenz 87,8 MHz in Abb. 5.37(a) deutlich. Berechnet man die Steigung für diese Nutzfrequenz (d. h. alle 18 Wertepaare bei 87,8 MHz), so ergibt sich der Zahlenwert 0,5 – also deutlich flacher als im Ergebnis der Regression über alle 72 Wertepaare. Betrachtet man Abb. 5.37 nochmals im Lichte dieser Überlegungen, so erkennt man, dass sich die Übertragungskette überwiegend linear verhalten hat.

Das Ziel der nachstehend beschriebenen Analyse ist herauszufinden, ob der gemessene Zusammenhang zwischen SINAD und S/N auch als statistisch signifikant zu erachten ist oder aber nicht. Da die in Abb. 5.37 gezeigten Messwerte einen tendenziell linearen Zusammenhang nahelegen, wurde der sog. Korrelationskoeffizient r nach Breavais-Pearson [Sch03] als Maß für die lineare statistische Abhängigkeit auf Basis der in Abb. 3.21 gezeigten 18 stationären Messpunkte bestimmt. Mit $i, i = 1 \dots n$, als Laufindex zur Adressierung der Messwerte $(\text{SINAD})_i, (\text{S/N})_i$ ⁵ gilt

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n (\text{SINAD})_i (\text{S/N})_i - \left(\sum_{i=1}^n (\text{SINAD})_i \right) \left(\sum_{i=1}^n (\text{S/N})_i \right)}{\sqrt{\left[n \left(\sum_{i=1}^n (\text{SINAD})_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\text{SINAD})_i \right)^2 \right) \right] \left[n \left(\sum_{i=1}^n (\text{S/N})_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\text{S/N})_i \right)^2 \right) \right]}} \quad (5.8)$$

⁴Nach der Methode der Minimierung des quadratischen Fehlers.

⁵Die Werte sind in dB einzusetzen



(a) Störsignal: FM

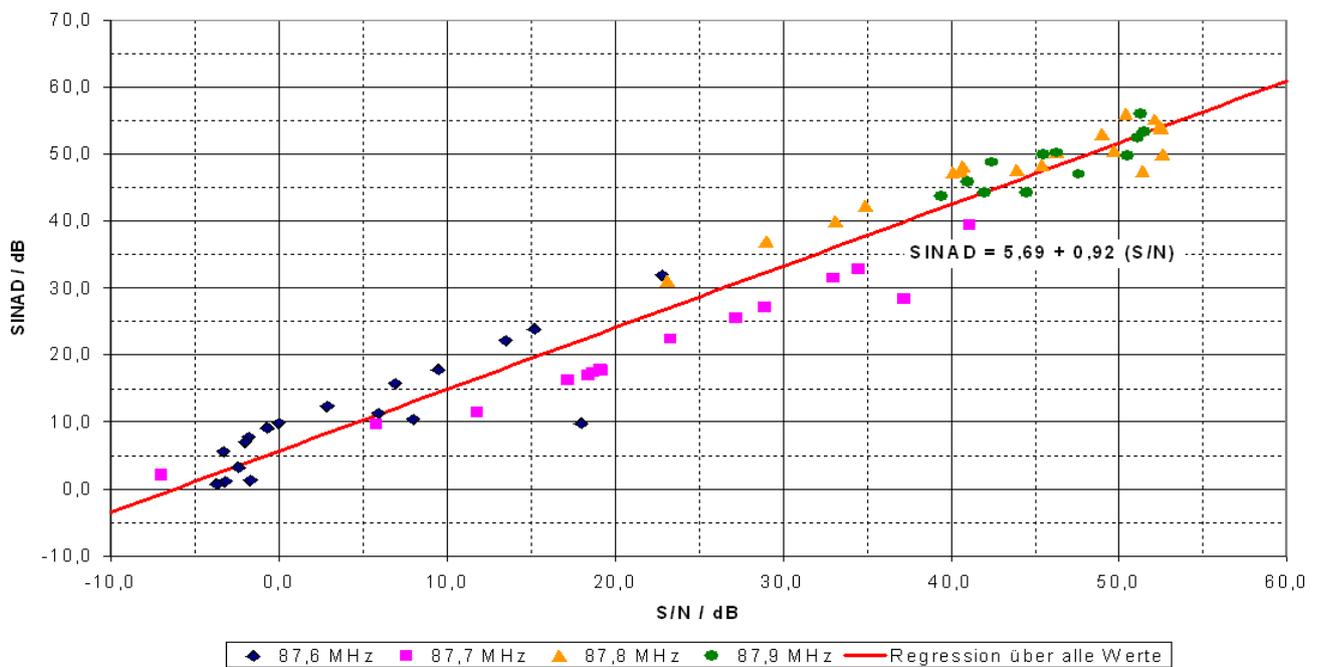
(b) Störsignal: DRM⁺

Abb. 5.37: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen S/N und SINAD

wobei $[-1 \leq r \leq 1]$ gilt. Der Betrag $|r|$ des Korrelationskoeffizienten r nach (Gl. 5.8) gibt Auskunft über die Stärke der *linearen* Abhängigkeit: Gilt $|r| = 1$, dann korrelieren die Werte zu 100%, und alle Wertepaare liegen auf einer *Geraden*; gilt hingegen $|r| = 0$, so liegt keine lineare Korrelation vor, d. h. es lässt sich keine Gerade finden, die die Abhängigkeit der Wertepaare „korrekt“ wiedergibt.

Der Zusammenhang (Gl. 5.8) kann für die FM-Messungen als auch für die DRM⁺-Messungen ausgewertet werden, sowohl für jeden Frequenzversatz Δf einzeln als auch über alle Frequenzversätze. Im Ergebnis erhält man die Werte r_{FM} bzw. r_{DRM^+} aus Tab. 5.10. Der Korrelations-

koeffizient r nach (Gl. 5.8) wird verwendet, um die beiden Hypothesen

H_0 : SINAD und S/N sind unkorreliert,

H_1 : SINAD und S/N sind korreliert,

zu testen. Als Testentscheidung kann folgendes zweiseitiges Kriterium verwendet werden [Sch03]:

$$\left| r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \right| > T_c = t_{n-2}[1 - \alpha/2] \quad \Rightarrow \quad H_0 \text{ verwerfen!} \quad (5.9)$$

In (Gl. 5.9) ist $T_c = t_{n-2}[1 - \alpha/2]$ der kritische Wert, bei dessen Überschreitung die Hypothese H_0 zugunsten von H_1 mit Irrtumswahrscheinlichkeit α abgelehnt wird. Dieser Wert $t_{n-2}[1 - \alpha/2]$ stellt ein Quantil der Student-t-Verteilung mit $n - 2$ Freiheitsgraden dar.

(a) Korrelation bei Störsignaltyp: FM

		FM			
Nutzfrequenz	n	r	$ r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} $	T_c für $\alpha = 5\%$	T_c für $\alpha = 0,1\%$
87,6 MHz	18	0,998	57,427	2,120	4,015
87,7 MHz	18	0,989	27,153	2,120	4,015
87,8 MHz	18	0,489	2,243	2,120	4,015
87,9 MHz	18	0,749	4,524	2,120	4,015
– alle –	72	0,992	63,792	1,994	3,435

(b) Korrelation bei Störsignaltyp: DRM⁺

		DRM ⁺			
Nutzfrequenz	n	r	$ r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} $	T_c für $\alpha = 5\%$	T_c für $\alpha = 0,1\%$
87,6 MHz	18	0,860	6,743	2,120	4,015
87,7 MHz	18	0,978	18,655	2,120	4,015
87,8 MHz	18	0,938	10,793	2,120	4,015
87,9 MHz	18	0,936	10,658	2,120	4,015
– alle –	72	0,973	35,470	1,994	3,435

Tab. 5.10: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der stationären Messungen: Korrelationskoeffizient r von S/N und SINAD im Fall (a) eines FM-Störers sowie (b) eines DRM⁺-Störers.

Man erkennt aus Tab. 5.10, dass die Korrelation der Qualitätsbewertungen durch SINAD-Qualitätswerte und S/N-Qualitätswerte in fast allen Fällen hochsignifikant von Null verschieden ist. Die einzige Ausnahme stellt die Bewertung im Fall FM bei 87,8 MHz dar, bei der bis zu einer akzeptierten Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \geq 5\%$ die Hypothese H_0 abgelehnt, ab $\alpha < 5\%$ allerdings angenommen werden muss; die Korrelation ist folglich nur als signifikant zu bewerten. Da der Korrelationskoeffizient r nach (Gl. 5.8) der Steigung der Regressionsgerade proportional ist, läßt sich diese „Abweichung“ bei 87,8 MHz mit Bezug auf Abb. 5.37(a) gut erklären: Die Regressionsgerade für 87,8 MHz hat eine Steigung von nur 0,5 – die Gerade ist also eher „flacher“ als alle anderen –, so dass auch r nach (Gl. 5.8) kleiner sein muss als alle anderen. An dieser Stelle ist somit Vorsicht geboten: Der Korrelationskoeffizient r nach (Gl. 5.8) bewertet lediglich den *linearen* Zusammenhang, evtl. nichtlineare Zusammenhänge zwischen SINAD und S/N werden *nicht* erfasst⁶.

⁶Betrachtet man z. B. eine mittelwertfreie Zufallsvariable \mathbf{X} mit einer zu null symmetrischen Dichtefunktion und bildet aus ihr die Zufallsvariable $\mathbf{Y} = \mathbf{X}^2$, so sind die beiden Zufallsvariablen \mathbf{X}, \mathbf{Y} zu 100% korreliert. Berechnet man für diesen Fall den Korrelationskoeffizient r nach (Gl. 5.8), so erhält man $r = 0$.

6 Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM – Mobile Messungen

Zusammen mit der Landesmedienanstalt NRW (lfm) wurde eine große Reihe an mobilen Messungen durchgeführt. Die Motivation zu dieser Messreihe liegt in der Tatsache begründet, dass die Nutzung des UKW-Rundfunks gerade im KFZ einen sehr hohen Stellenwert aufweist. Gleichzeitig soll von dem Ansatz des Empfangs mit einer Richtantenne (die heutzutage in den meisten Fällen nur zur Kontrolle des Begriffs „Testpunkt planerisch versorgt“ noch Bedeutung hat) zu einer nutzertypischeren Rundantenne unter Berücksichtigung der speziellen Gegebenheiten beim mobilen Empfang übergegangen werden.

6.1 Messkonzepte und -verfahren

6.1.1 Versorgungs- und Qualitätsbewertung mit automatischem Messsystem

Bei dem autom. Messsystem handelt es sich um ein System der Firma Audemat, das entlang eines Weges die unterschiedlichsten Signalparameter auf der HF- und NF-Ebene eines FM-Signals inkl. Ortsreferenz aufzeichnen kann um Sender – auch im operationellen Betrieb – im mobilen Empfangsfall zu prüfen. Die Auswertung der Messdaten zur Bildung der sog. Qualitätsstufen erfolgt durch Anwendung der dazugehörigen Software „GoldenEar“. Diese bildet die Messdaten zu Qualitätsstufen auf einer Skala von 1...5 ab. Die hierzu verwendeten Parameter entsprechen denjenigen Parametern, die im Laufe der langjährigen Erfahrung der lfm NRW mit diesem System gemacht wurden. Diese sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 dokumentiert. Diese stellen das Verfahren zur Auswertung der herangezogenen Signalparameter „Durchschnittlicher HF-Pegel“ sowie „Pilotton“ dar. Die endgültige Qualitätsstufe wird durch die Kombination dieser beiden Kriterien gebildet.

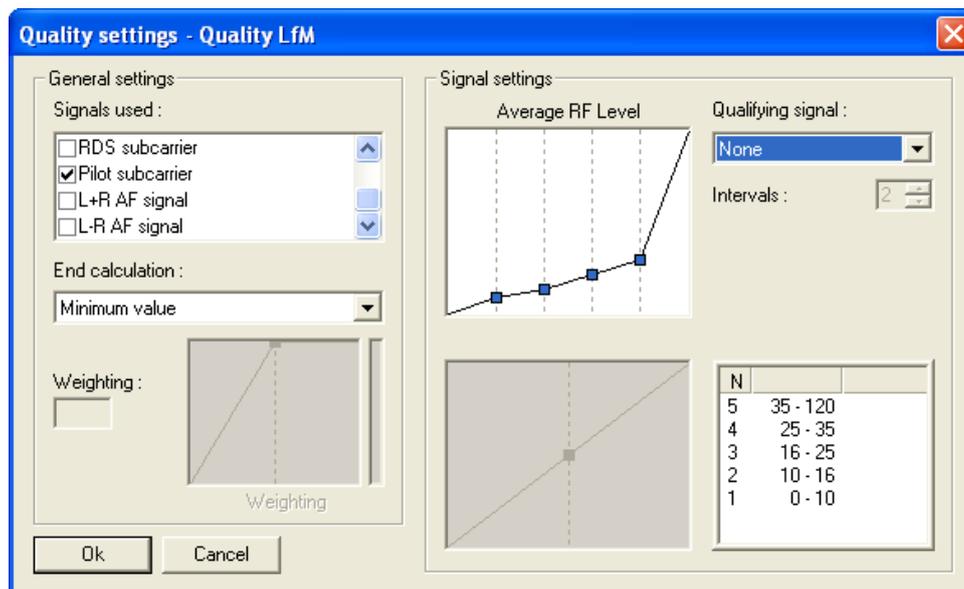


Abb. 6.1: Bewertungsparameter „Durchschnittlicher HF-Pegel“ zur Bildung der Audemat-Qualitätsbewertung

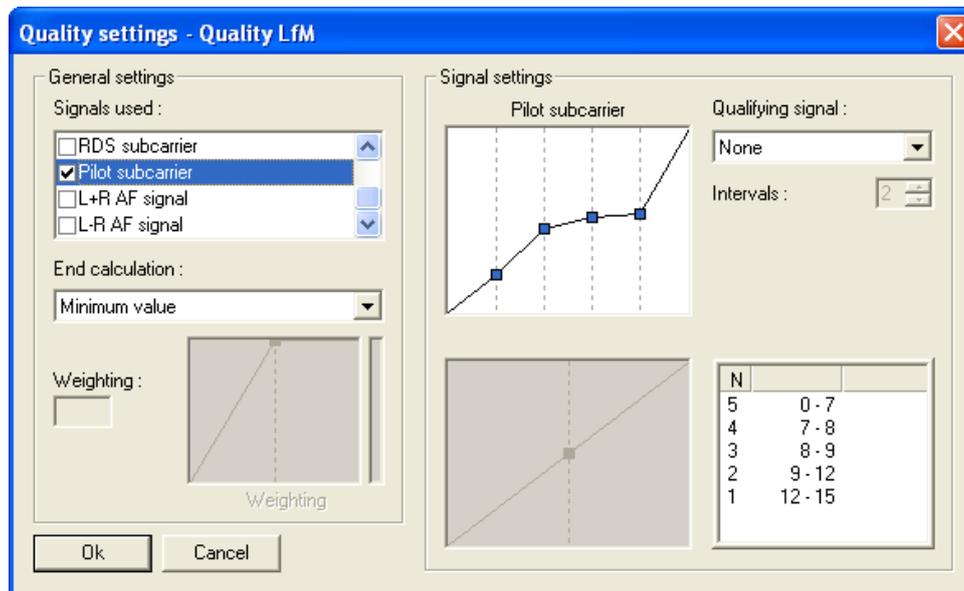


Abb. 6.2: Bewertungsparameter „Pilotton“ zur Bildung der Audemat-Qualitätsbewertung

6.1.2 Versorgungs- und Qualitätsbewertung mit dem SINAD-Kriterium

Alternativ zum Audemat-System wurde eine reine Betrachtung der NF-Signale auf Basis des SINAD durchgeführt. Auf diese Weise wird der Verzerrungsgrad inkl. Rauschen des demodulierten Signals erfasst und rundet die subjektiven Qualitätsskalen des Audemat-Systems durch quantitative Messwerte ab. Es ist zu beachten, dass eine SINAD-Messung zweistufig durchgeführt wird (Messen der Gesamtsignalspannung, Messen der Signalspannung mit gefiltertem Grundton), s.a.Kap. 5.1.2. An jedem gespeichertem Wegpunkt wurde ein SINAD-Wert erfasst, im Gegensatz zu dem Mittelungsverfahren im stationärem Messbetrieb. Die Messung selbst ist mit einem (geringem) Zeitversatz verbunden, der den Trend der SINAD-Verläufe über den Weg bzw. die SINAD-Degradation durch unterschiedliche Störsignale allerdings nicht verfälscht, da er in allen Fällen gleich ist und somit zu einer jeweils gleichen Bewertung führt.

6.1.3 Auswertungsverfahren im mobilen Szenario

Aufgrund der Vielfalt der verwendeten Systeme und Fülle an Datensätzen gibt es mehrere mögliche Auswertungsoptionen, z. B.

- Auswertung der Feldstärkeverhältnisse (R&S-System),
- Auswertung der HF-Spannung am Audematsystem,
- Auswertung der subjektiven Empfangsqualität (Audematsystem),
- Auswertung der SINAD-Werte bzw. SINAD-Differenzen (System FH-KL),
- sowie die Kombination dieser Auswertung.

Der zweite und dritte Punkt ist aufgrund seiner Größe als Kartensatz in Form von externen Dateien verfügbar. Im Folgenden wird das Hauptaugenmerk auf die SINAD-Auswertung gelegt, teilweise vermischt mit den korrespondierenden HF-Pegeln auf Basis des R&S-Systems.

Im Kapitel 6.3 kennzeichnet die Frequenzangabe die jeweilige Nutzfrequenz von TX RB. Die jeweils zugehörige Messfahrtennummer – und somit auch die Senderkonstellation – ist in Tabelle 6.1 aufgeführt.

6.1.3.1 Erläuterung der Auswertungsdarstellungen im mobilem Szenario

Zur Auswertung der in Dezibel vorliegenden SINAD-Werte wurden die erfassten Datensätze mit einer Rasterweite von (100 m × 100 m) quantisiert. Jedem einzelnen Raster wurde dabei ein SINAD-Wert zugewiesen, der dem arithmetischem Mittel aller Einzelmesspunkte in dieser (100 m × 100 m)-Fläche entspricht. Dies entspricht einer Medianbildung auf der Dezibel-Skala.

Zur Auswertung einer Nutzfrequenz wurde mit den SINAD-Werten des empfangenen Nutzsignals diese Quantisierung im Fall einer Störung durch ein FM-Signal von TX FH sowie für den Fall einer Störung durch ein DRM⁺-Signal von TX FH durchgeführt. Die beiden so erhaltenen Datensätze lagen nach diesem Prozess in einer Art vor, in der die entstandenen kongruenten Qualitätsbewertungen voneinander subtrahiert werden konnten. Für die Ergebnisgröße Δ dieser Operation gilt für jedes einzelne Flächenstück der Messroute:

$$\Delta = \left(\text{SINAD}_{FM} - \text{SINAD}_{\text{DRM}^+} \right)$$

Somit gilt für die Aussagen dieser so gebildeten Differenzansicht folgende Fallunterscheidung über den SINAD-Medianwert des empfangenen Nutzsignals in der jeweils betrachteten Rasterfläche:

Im Median ist der SINAD des Nutzsignals unter Einwirkung

- eines FM-Störers kleiner als im Falle eines DRM⁺-Störers bei Abstrahlung der jeweiligen Störsignale von TX FH: $\Delta < 0$
- eines FM-Störers genauso groß wie im Falle eines DRM⁺-Störers bei Abstrahlung der jeweiligen Störsignale von TX FH: $\Delta = 0$
- eines FM-Störers größer als im Falle eines DRM⁺-Störers bei Abstrahlung der jeweiligen Störsignale von TX FH: $\Delta > 0$

In den Darstellung dieser Differenzenauswertung (siehe die späteren Abbildungen 6.11, 6.13, 6.14, 6.18) ist jeweils der gleiche Kartenausschnitt im gleichen Maßstab mit der gleichen Klassierung der Differenzen zu sehen. Zusätzlich ist ein Histogramm dargestellt, das die Häufigkeit der Rasterwerte angibt, wobei die Klassierung und Farbskala der Einteilung der kartographischen Visualisierung entspricht. Hierdurch können die Tendenzen der SINAD-Differenzen bezogen auf die zugrunde liegenden Messfahrten leichter erkannt werden. Bei der Betrachtung der Abbildungen 6.11 sind die Abbildungen 6.6 – 6.10 als Referenz im Sinne der Absolutwerte anzusehen. Darüber hinaus sind in den entsprechenden Abschnitten die zugehörigen Dateien zu den Messergebnissen des Audemat-Systems in tabellarischer Form angegeben bzw. verlinkt.

6.2 Messeinrichtung

Zum Einsatz in diesem Feldversuch wurde das bestehende System aus

- R&S TS9955 zur mob. Feldstärkeaufnahme mittels R&S ESVN,
- Audemat GoldenEar, s. z.B. <http://audemat.com/radio-products-11-16.html> (neuere Version als die verwendete),

um das zu diesem Zweck erstellte mobile System der FH KL erweitert, bestehend aus

- R&S UPV Audioanalyzer (SINAD), über einen Laptop gekoppelt an einen GPS-Rx,
- DRM+-Empfänger zur Speicherung der Basisbandsamples auf eine externe Festplatte.

Das Blockschaltbild der Einrichtung ist in Abb. 6.3 dargestellt.

Der Messaufbau wurde derart vorgenommen, dass das Signal von der Rundantenne (2,2 m Antennenhöhe) an die unterschiedlichen Systeme verteilt wird. Dabei wurden die Abzweigungspunkte so verteilt, dass so viele Systeme wie möglich mit dem gleichen Eingangspegel versorgt wurden. Das R&S-System TS9955 übernimmt in dieser Messanordnung die Aufzeichnung der Feldstärken auf mehreren, frei definierbaren Kanälen. Die Messbandbreite wurde auch in dieser Messreihe – wie schon bei den stationären Untersuchungen – zu 120 kHz festgelegt.

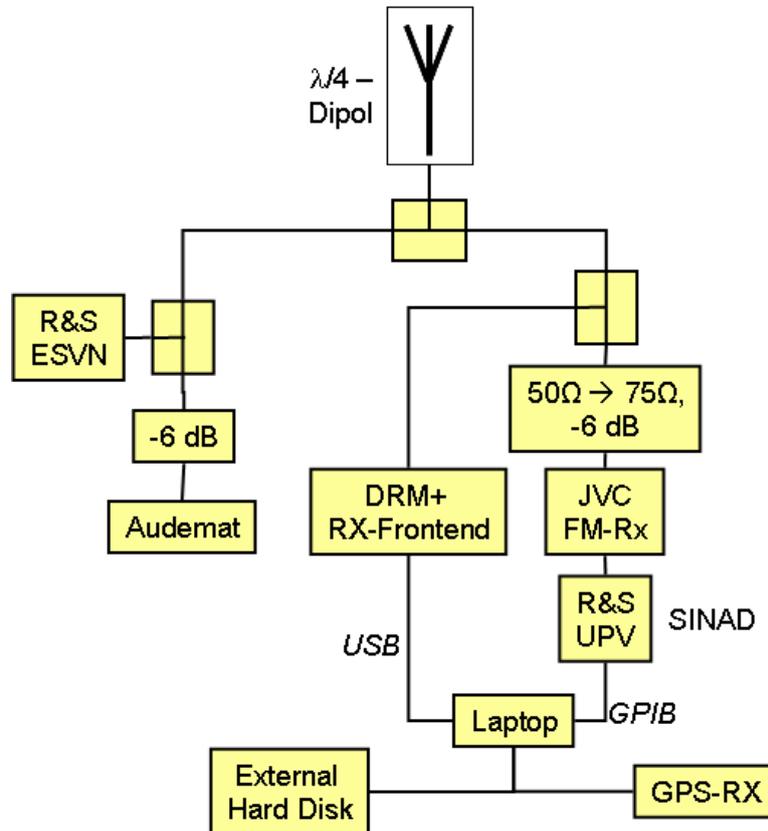


Abb. 6.3: Blockschaltbild der Messeinrichtung im mobilen Szenario

Das Audemat-System führt eine eigene, 5-stufige Bewertung auf Basis des Stereopilotons und Eingangspegels durch und speichert das demodulierte Signal auf einer Festplatte.

Der Audioanalyzer R&S-UPV führt – über den GPIB-Bus getriggert durch die Aufnahme eines neuen Wegpunktes aus dem GPS-System ($1 \times 1/s$) – eine SINAD-Messung durch, während die Basisbandsamples kontinuierlich erfasst wurden (sofern TX FH im DRM⁺-Betrieb war). Da das benutzte Laptop hierbei gelegentlich Probleme machte, sind einige der Werte nicht erfasst worden (Verlust der Verbindung zum GPS-Empfänger aufgrund hoher Belastung des USB-Busses durch das Aufzeichnen von DRM⁺-Samples). Die Messungen mit geänderter Modulation erfolgten in der Regel zeitnah hintereinander, so dass die Ausbreitungsverhältnisse und Umgebungsbedingungen dieser Fahrten untereinander so ähnlich wie möglich sind. Aufgrund der vergleichenden Natur des Messschemas (Betrachtung der Änderungen, die durch den Modulationswechsel bedingt sind) sind die Ergebnisse untereinander recht gut verknüpfbar und dienen darüberhinaus auch als ein Anhalt zum Vergleich mit den stationären Messungen, da viele dieser Messpunkte dicht an der Fahrstrecke liegen, s. Abb. 3.22. Zwar handelt es sich bei dem Testempfänger am SINAD-System nicht explizit um ein KFZ-Radio, jedoch ist dieser in den bisherigen Reihen ebenfalls zum Einsatz gekommen und ist ebenfalls durch seine eingangsseitige

AGC¹ in der Lage, die Pegeldynamik im Fahrbetrieb berücksichtigen zu können.

Alle GPS-basierten Systeme wurden mit autarken GPS-Empfängern betrieben. Eine Ankopplung des UPV an die bestehenden Einrichtungen war nicht möglich, so das kurzerhand ein eigenes Aquisitionssystem s. Abb. 6.4 implementiert wurde. Aufgrund seines modulbasierten Aufbaus ist die Wiederverwendung z.B. zu Erfassungen von Zuständen, Bitfehlern des DRM⁺-Decoders oder anderen Geräten möglich.

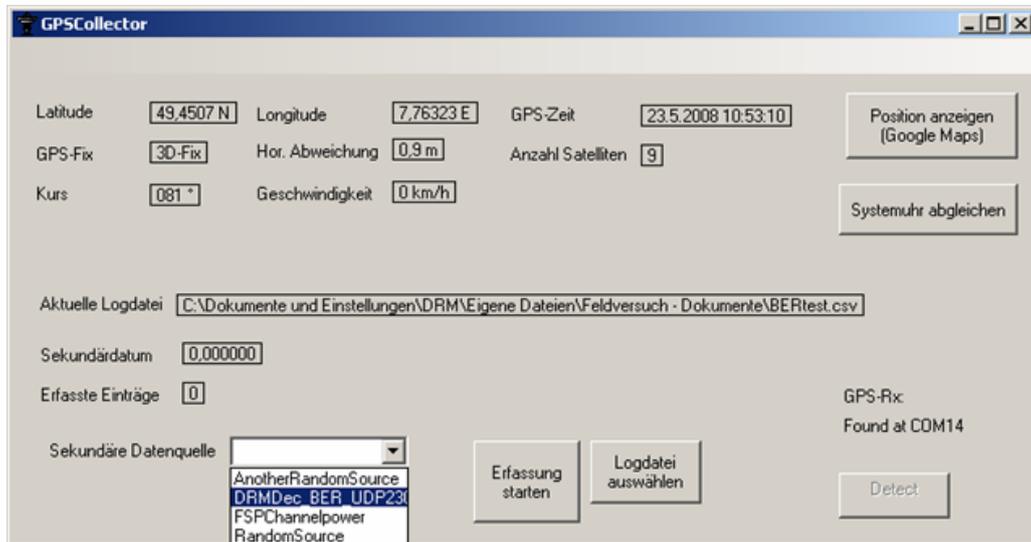


Abb. 6.4: Mobiles Messsystem FH KL, Version Sommer 2008

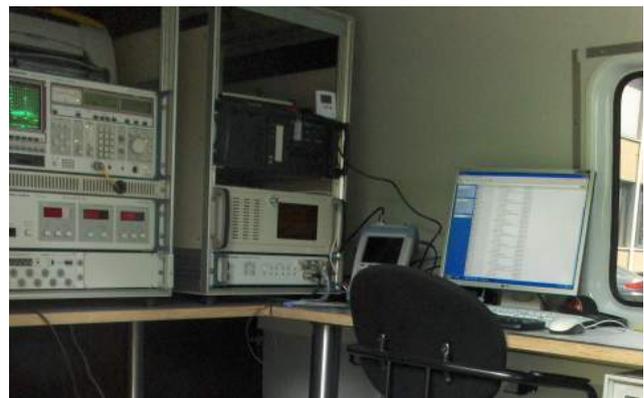


Abb. 6.5: Aussen- und Innenansicht des lfm-Busses

¹Automatic Gain Control

6.3 Ergebnisse

Vorbemerkung: Bei allen Messungen mit der Nutzfrequenz 87,9 MHz ist zu beachten, dass die Werte durch den 100 kW-Sender SR1, ca. 60 km Luftlinieabstand mit der Sendefrequenz 88,0 MHz beeinflusst sind, was teilweise durchaus auch schwach auf die Nutzfrequenz 87,8 MHz durchschlagen kann. Dennoch sind sie aus Gründen der Vollständigkeit dokumentiert. Da dieser Sender aufgrund der Planungsschutzabstände durch seine hohe Leistung eine weiträumige Schutzkontour aufspannt, sind die hier untersuchten Frequenzen an vielen Punkten des Stadtgebiets relativ frei von der Strahlung anderer Sender. Somit sind die Darstellungen der NF-Messwerte im unbelastetem Fall bei einer Frequenz durchaus als Referenz zum Anhalt für die anderen untersuchten Frequenzen ansehbar.

Es wurden Fahrten mit den in Tabelle 6.1 aufgeführten Stör-/Nutzsenderkombinationen durchgeführt. Die Messfahrten 1 ··· 12 betrachten immer TX RB als Nutzsender, wobei TX FH die Rolle des Störsenders übernimmt. Die Fahrten 13 ··· 14a betrachten TX FH als Nutzsender. Die Tabelle ordnet der jeweiligen Kennzahl „Fahrtennummer“ die Frequenzen und Störsignaltypen zu. Desweiteren sind die Dateinamen der Messsysteme angegeben. Im Falle des FH-KL-Systems sind die Dateinamen mit der Fahrtennummer und den Senderzuständen kodiert.

Fahrtennr.	TX RB,FM	TX FH,FM	TX FH,DRM+	Dateiname R&S-System	Dateiname Audemat
1	87,6 MHz			KL100100.MES, KL100101.MES	KL1.cgn
2	87,7 MHz			KL200100.MES	KL2.cgn
3	87,8 MHz			KL300100.MES	KL3.cgn
4	87,9 MHz			KL400101.MES	KL4.cgn
5	87,6 MHz	87,6 MHz		KL100103.MES	KL5.cgn
6	87,7 MHz	87,6 MHz		KL200101.MES	KL6.cgn
7	87,8 MHz	87,6 MHz		KL300101.MES	KL7.cgn
8	87,9 MHz	87,6 MHz		KL400102.MES, KL400103.MES	KL8.cgn
9	87,6 MHz		87,6 MHz	KL100105.MES	KL9.cgn
10	87,7 MHz		87,6 MHz	KL200103.MES	KL10.cgn
11	87,8 MHz		87,6 MHz	KL300102.MES	KL11.cgn
12	87,9 MHz		87,6 MHz	KL400104.MES	KL12.cgn
13		87,6 MHz		KL100104.MES	KL13.cgn
14			87,6 MHz; 4-QAM	KL200102.MES	
14a			87,6 MHz; 16-QAM	KL300103.MES	

Tab. 6.1: Senderkonstellationen bei den mobilen Messungen und Dateizuordnungen; die Fahrtennummern sind nur Kennzahlen und geben sagen nichts über die Reihenfolge der Fahrten aus.

6.3.1 Pegelverhältnisse entlang der Messstrecke

Im Folgenden werden die Empfangspegel entlang der Messstrecke dokumentiert und bilden somit die Referenz für die weiteren Auswertungen in diesem Szenario. Datenbasis hierzu sind die Pegel, die am Eingang des R&S-Messempfängers ESVN im mobilen Messsystem detektiert wurden. Abb. 6.6 zeigt die Empfangsfeldstärkepegel E_{FH} von TX FH, Abb. 6.7 die Empfangsfeldstärkepegel E_{RB} von TX RB jeweils im alleinigen Betrieb. Diese Darstellungen verwenden die Rohdaten des R&S-Systems. In den Abbildungen 6.6, 6.7 ist zu erkennen, dass TX FH

im Kernstadtgebiet einen ausreichenden Empfangspegel produziert. TX RB dominiert im östlichen Stadtbereich mit seiner Feldstärke. Wie auch bei TX FH bestehen insb. an den östlichen und westlichen Rändern der Fahrtenroute Bereiche mit den niedrigsten Feldstärken.

Diese beiden Datensätze wurden mit einer Rastergröße von (100 m × 100 m) quantisiert. Dabei entspricht ein Rasterwert dem arithmetischen Mittel der Dezibelwerte (Medianbildung). Die Differenzdarstellung Abb. 6.8 zeigt die Differenz der empfangenen Feldstärkepegel ($E_{FH} - E_{RB}$). In der Differenzdarstellung 6.8 ist erkennbar, dass – gemäß des Versuchskonzepts – im Bereich westlich des Senderstandortes von TX FH die Feldstärkepegel E_{FH} sich ungefähr im Gleichgewicht mit dem Feldstärkepegel E_{RB} befinden.

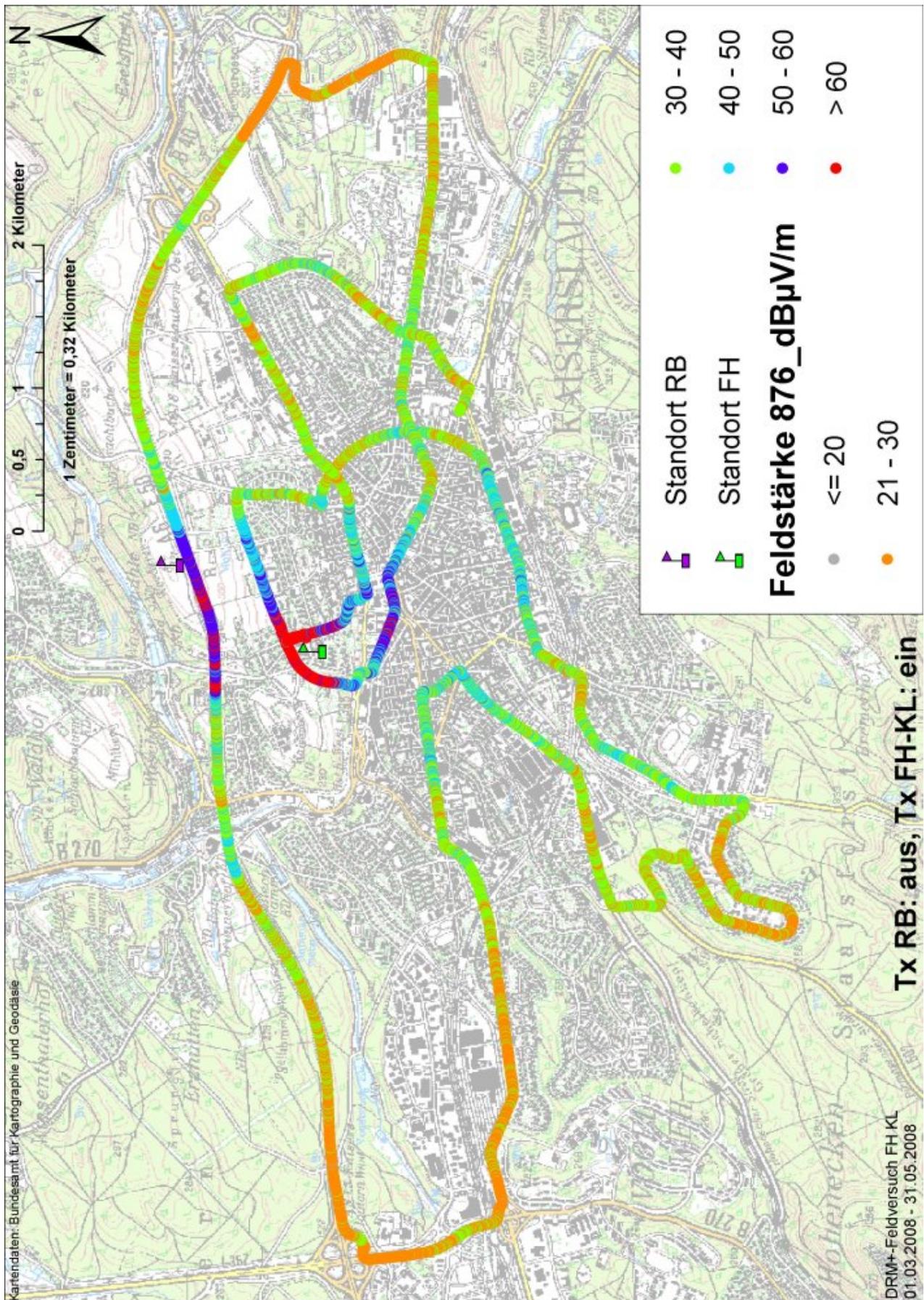


Abb. 6.6: Empfangsfeldstärkepegel von TX FH entlang der Messroute;
Messfahrt 13: nur TX FH aktiv

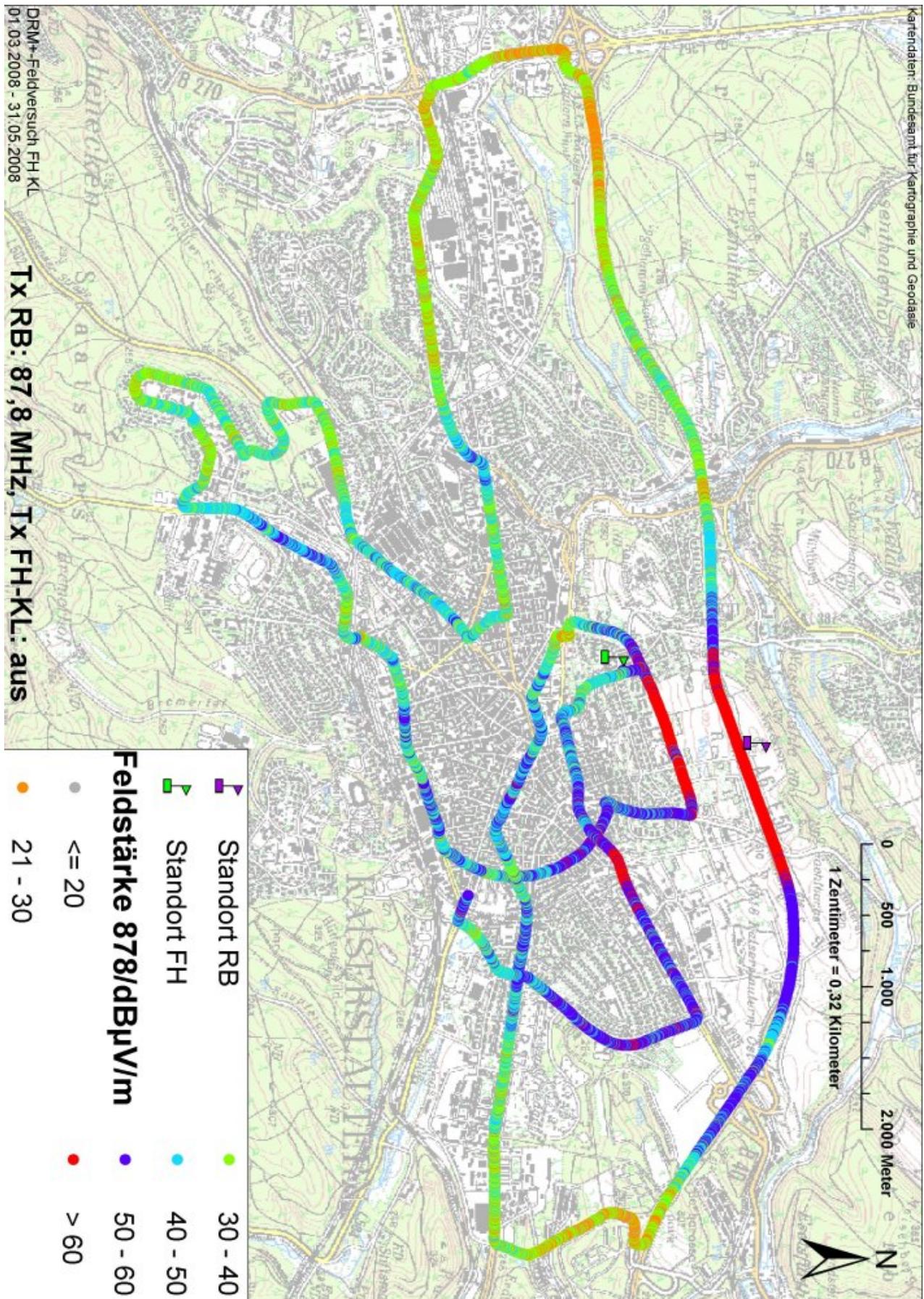


Abb. 6.7: Empfangsfeldstärkepegel von TX RB entlang des Messroute;
Messfahrt 3: nur TX RB aktiv 🔍

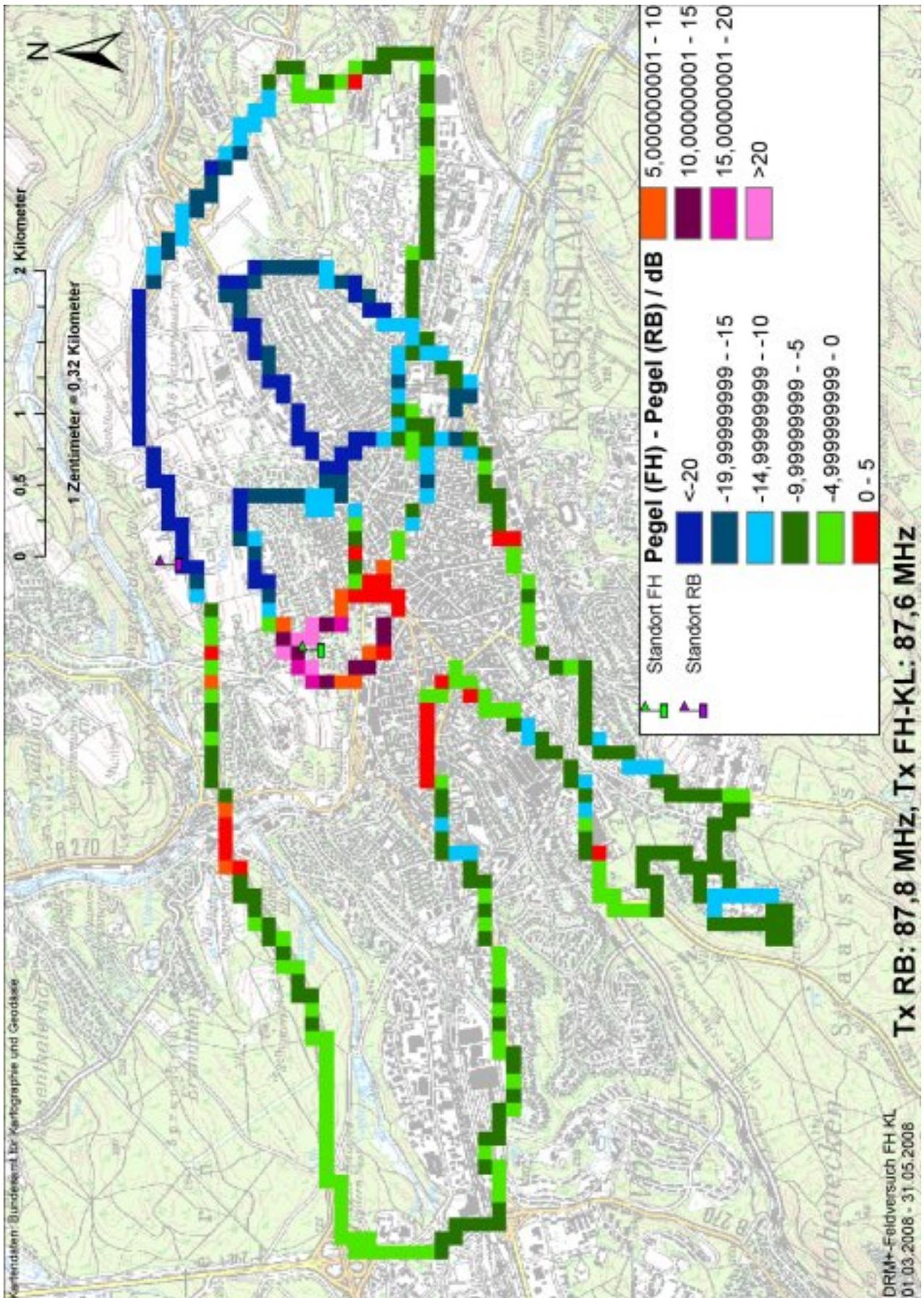


Abb. 6.8: Differenz der Feldstärkepegel beider Sender entlang des Messroute 

6.3.2 SINAD-Werte entlang der Messroute im ungestörtem Fall

In den nachstehend folgenden Abbildungen 6.9, 6.10 sind die SINAD-Werte der beiden Sender im FM-Betrieb im ungestörtem Szenario (Fahrt 3 & 13) als Referenz dargestellt. Man kann erkennen, dass – unter der Maßgabe, dass im gelb markierten Bereich die Empfangsqualität noch als ausreichend bewertet kann² – TX FH die Stadt gut versorgt. Im Bereich der Autobahnanschlussstellen treten insb. infolge von 2 unterschiedlichen Gleichkanalstörern Versorgungseinbußen zu Tage. Im südlichen Zipfel der Messstrecke (Uni-Wohngebiet) ist die Bebauung insb. durch Hochhäuser geprägt. Der Bereich am östlichem Rand liegt in einem bewaldetem Abschnitt (Erdbeerenhügel), der durch mehrere Senken und Höhen geprägt ist. Hier wirkt sich die Kombination aus Reflexionen / Abschattungen / niedriger Pegel entsprechend negativ auf die Empfangsgüte aus. Ähnliche Aussagen gelten in dieser Darstellung für TX RB, der von der höheren Antennenposition im Punkte der Versorgung profitiert. Die Einbußen in den westlichen und östlichen Randbereichen sind gewollt und – zusätzlich zu den topographischen Bedingungen – auf die Richtwirkung der Sendeantenne zurückzuführen.

²subjektiver Eindruck der Autoren

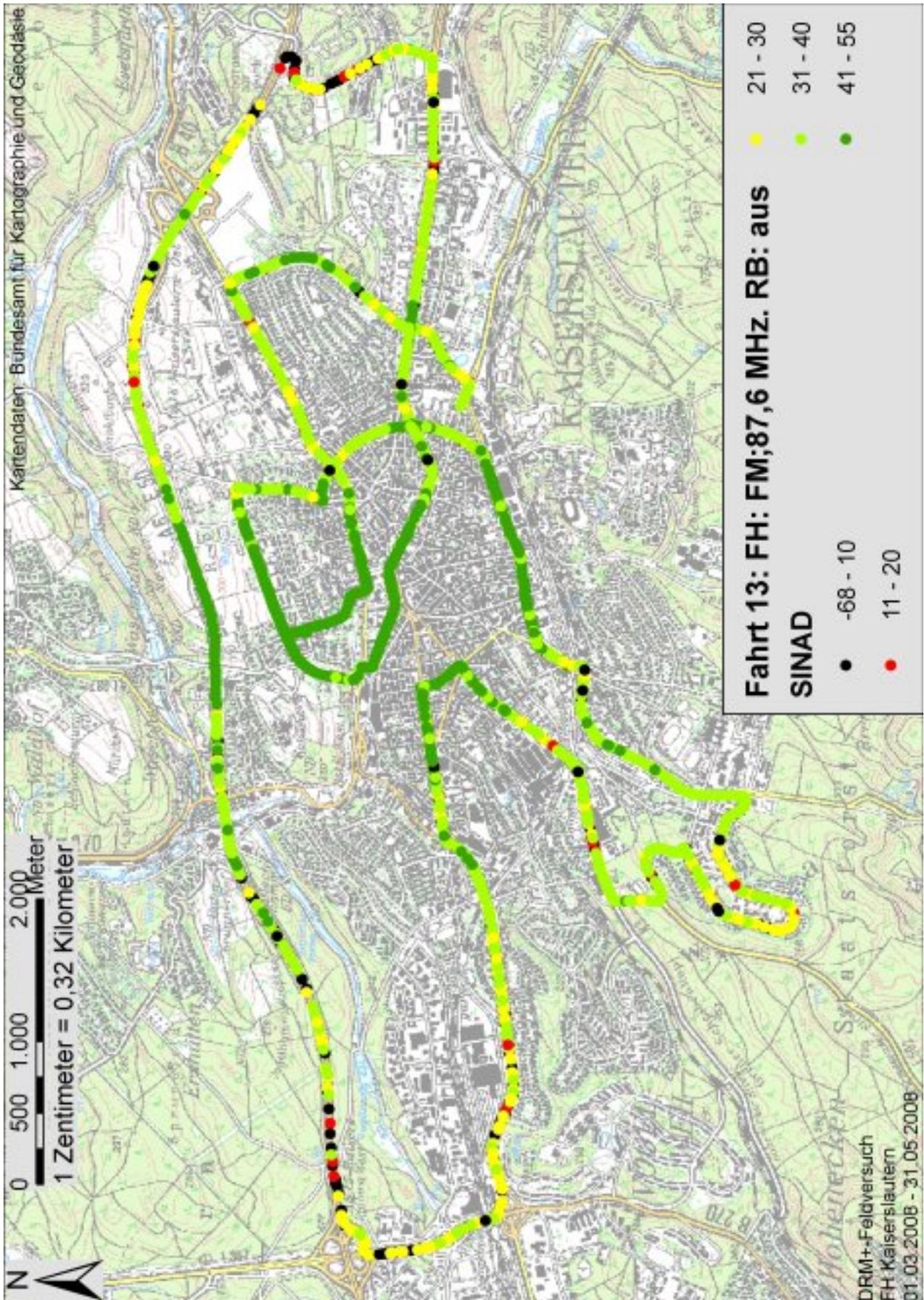


Abb. 6.9: SINAD von TX FH, FM, im ungestörtem Fall (Fahrt 13) 🔍

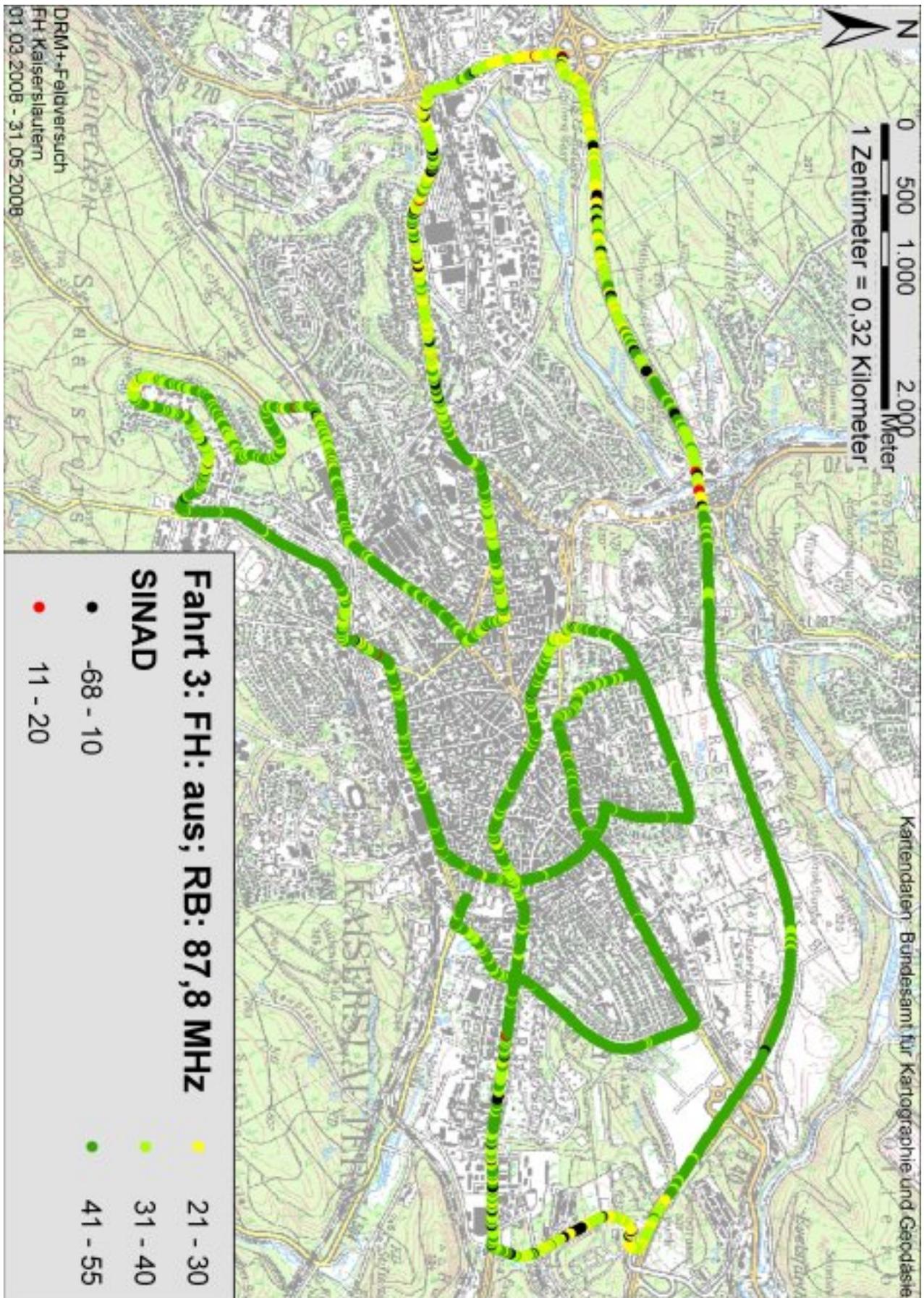


Abb. 6.10: SINAD von TX RB, 87,8 MHz im ungestörtem Fall (Fahrt 3) 🔍

6.3.3 Variation des Frequenzversatzes

6.3.3.1 Nutzfrequenz: 87,6 MHz

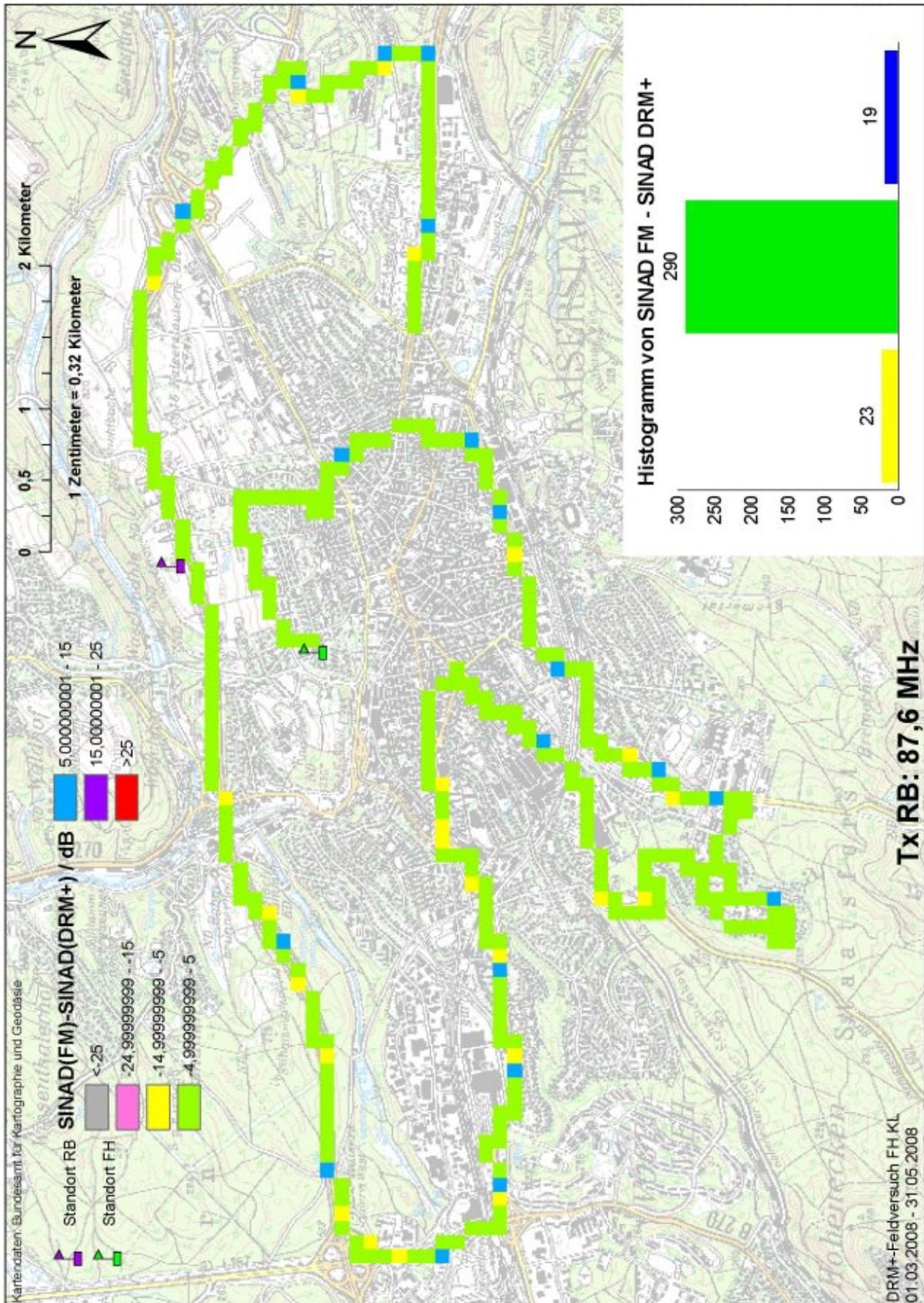


Abb. 6.11: Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,6 MHz

Der im stationärem Fall gezeigte Unterschied von ca. 5 dB in den NF-Parametern tritt in dieser Messreihe nicht zu Tage. Trägt man die kumulierte relative Häufigkeitsverteilung der dargestellten Rasterwerte im Bereich $-6 \dots 6$ dB auf, so erkennt man dass die SINAD-Differenzen sich nur minimal in Richtung einer höheren Störwirkung von DRM⁺ (+0.3 dB) bewegen. Eine mögliche Begründung hierfür ist, dass die Hüllkurvenschwankungen des DRM⁺-Signals durch den Sender „Göttelborner Höhe“, 88,0 MHz verdeckt werden. Aufgrund der Frequenznachbarschaft kann dieser starke Sender die Amplitudenmodulation des OFDM-Signals überdecken, so dass der AGC-Regelkreis des Empfängers infolge dessen Signalstärke diesen als Regelgröße ansieht.

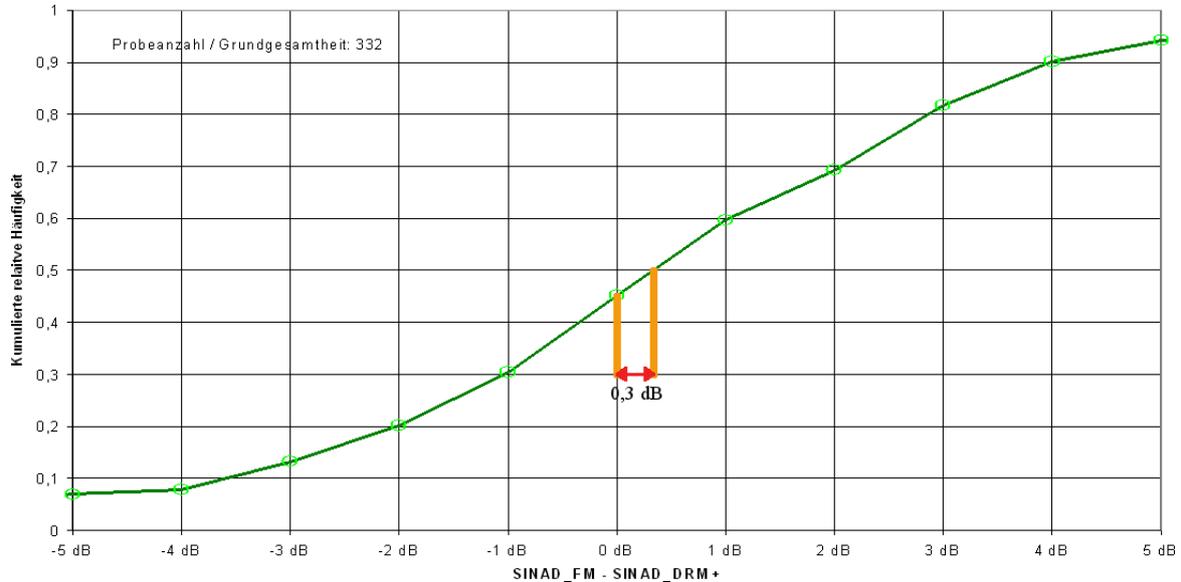


Abb. 6.12: Kumulierte Häufigkeit der Rasterwerte aus Abb. 6.11

Fahrtennr.	Audemat Quality	HF-Pegel
1	Messfahrt 1-87_6 MHz Quality.pdf	Messfahrt 1-87_6 MHz RFininput.pdf
5	Messfahrt 5-87_6 vs 87_6 MHz Quality.pdf	Messfahrt 5-87_6 vs 87_6 MHz RFininput.pdf
9	Messfahrt 9-87_6 vs 87_6 MHz (DRM) Quality.pdf	Messfahrt 9-87_6 vs 87_6 MHz (DRM) RFininput.pdf
13	Messfahrt 13-87_6 MHz FH KL Quality.pdf	Messfahrt 13-87_6 MHz FH KL RFininput.pdf

Tab. 6.2: Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,6 MHz

6.3.3.2 Nutzfrequenz: 87,7 MHz

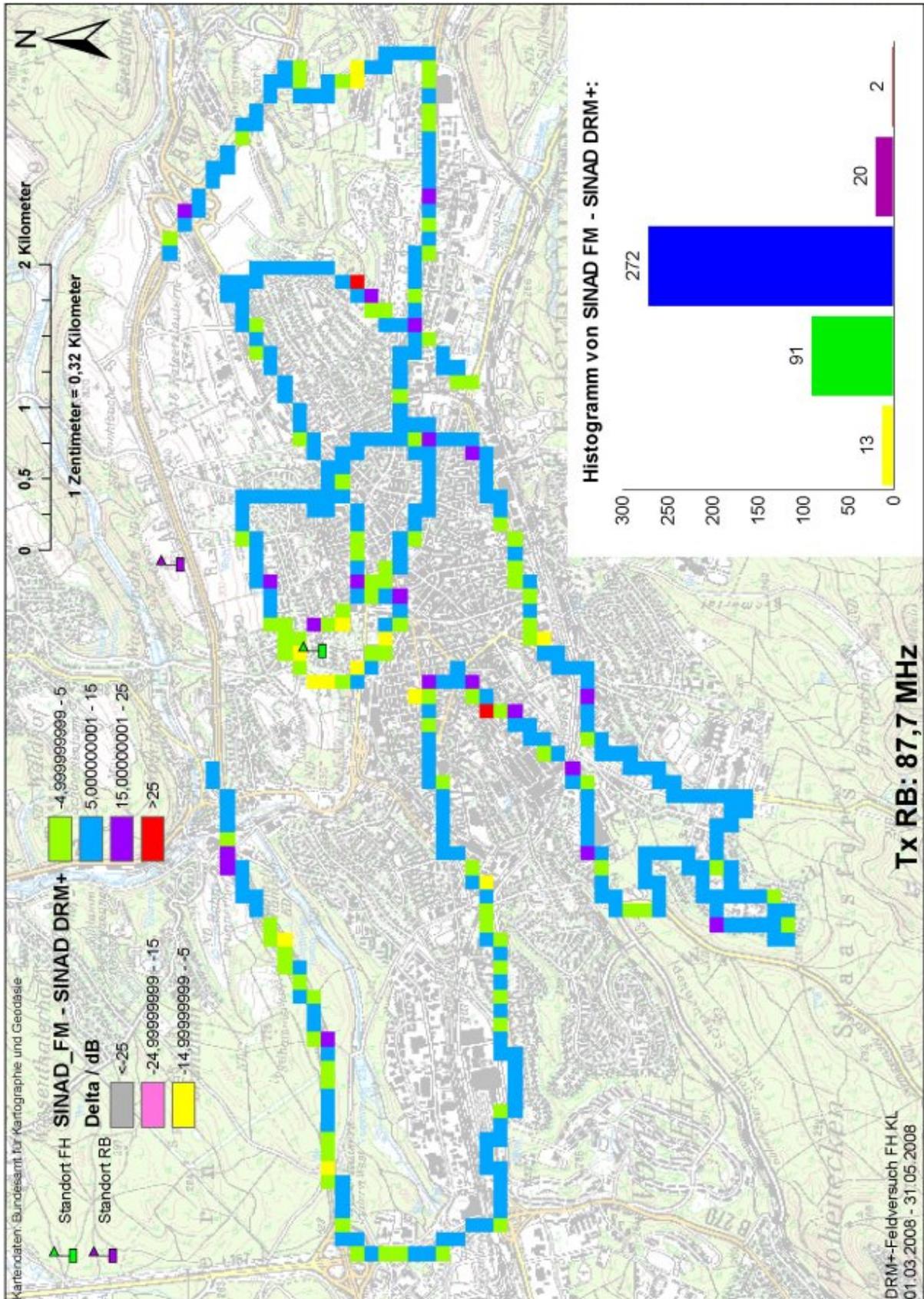


Abb. 6.13: Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,7 MHz 🔍

Anhand Abb. 6.13 kann man erkennen, dass in dieser Frequenzkonstellation DRM⁺ stärker als FM stört, was sich entsprechend auch im Histogramm durch eine Verschiebung der häufigsten Werte in Richtung zu einer höheren Störwirkung hin widerspiegelt. Dies ist auch in der Nähe von TX FH der Fall, was in der Darstellung allerdings nicht so klar zum Vorschein tritt, s. die Darstellung der Qualitätsbeurteilung in untenstehender Tabelle 6.3.

Fahrtennr.	Audemat Quality	HF-Pegel
2	Messfahrt 2-87_7 MHz Quality.pdf	Messfahrt 2-87_7 MHz RFinput.pdf
6	Messfahrt 6-87_7 vs 87_6 MHz Quality.pdf	Messfahrt 6-87_7 vs 87_6 MHz RFinput.pdf
10	Messfahrt 10-87_7 vs 87_6 MHz (DRM) Quality.pdf	Messfahrt 10-87_7 vs 87_6 MHz (DRM) RFinput.pdf

Tab. 6.3: Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,7 MHz

6.3.3.3 Nutzfrequenz: 87,8 MHz

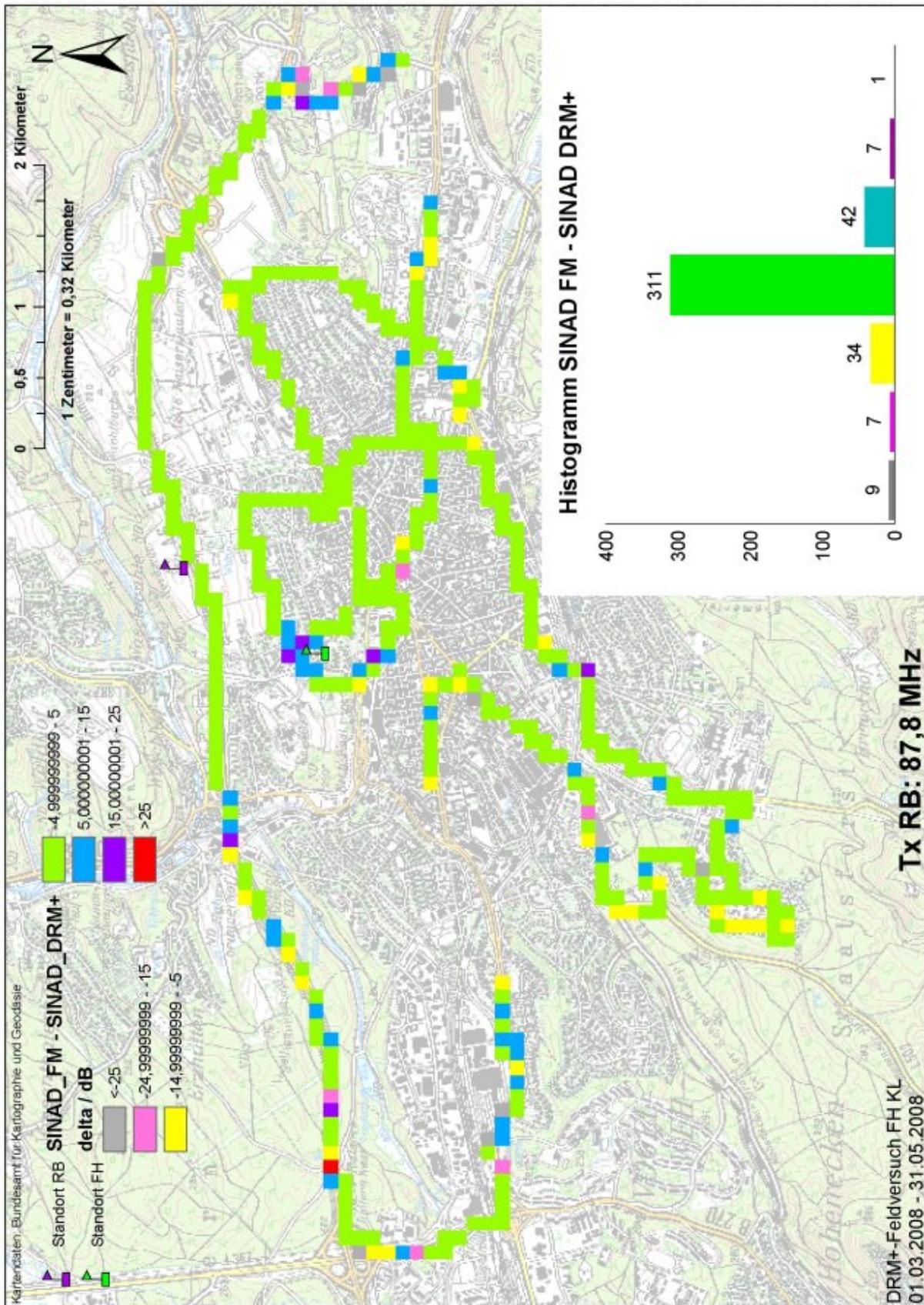


Abb. 6.14: Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,8 MHz 🔍

Anhand Abb. 6.14 kann man erkennen, dass bei dieser Frequenzlage kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Störsignalen mehr besteht. Im Bereich direkt um TX FH herum ist der Einfluß des DRM⁺-Störers leicht stärker hörbar wie im FM-Fall, ist aber nur noch als ein dezentes, höhenbetontes Hintergrundrauschen wahrzunehmen.

Fahrtennr.	Audemat Quality	HF-Pegel
3	Messfahrt 3-87.8 MHz Quality.pdf	Messfahrt 3-87.8 MHz RFinput.pdf
7	Messfahrt 7-87.8 vs 87.6 MHz Quality.pdf	Messfahrt 7-87.8 vs 87.6 MHz RFinput.pdf
11	Messfahrt 11-87.8 vs 87.6 MHz (DRM) Quality.pdf	Messfahrt 11-87.8 vs 87.6 MHz (DRM) RFinput.pdf

Tab. 6.4: Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,8 MHz

Die Darstellung bzw. die Aussage dieser Betrachtungen ändert sich auch nicht, wenn man das Klassifikationsschema ändert und die absoluten SINAD-Werte als Betrachtungsbasis verwendet, s. nachfolgende Abbildungen 6.15 – 6.17. Auch hier kann man erkennen, dass bei diesem Frequenzoffset keine signifikante Störung des Nutzsignals auftritt, lediglich im Bereich um die FH selbst ist das Störpotential des digitalen Signals höher, s. Sektor C2. Zur farblichen Unterteilung wurden alle SINAD-Werte < 40 dB in schwarz, $40 \text{ dB} \leq \text{SINAD} < 50$ dB in rot, ≥ 50 dB in grün dargestellt. Die Farbskala hat keine subjektive Bedeutung, sondern ist auf möglichst hohen Kontrast ausgelegt.

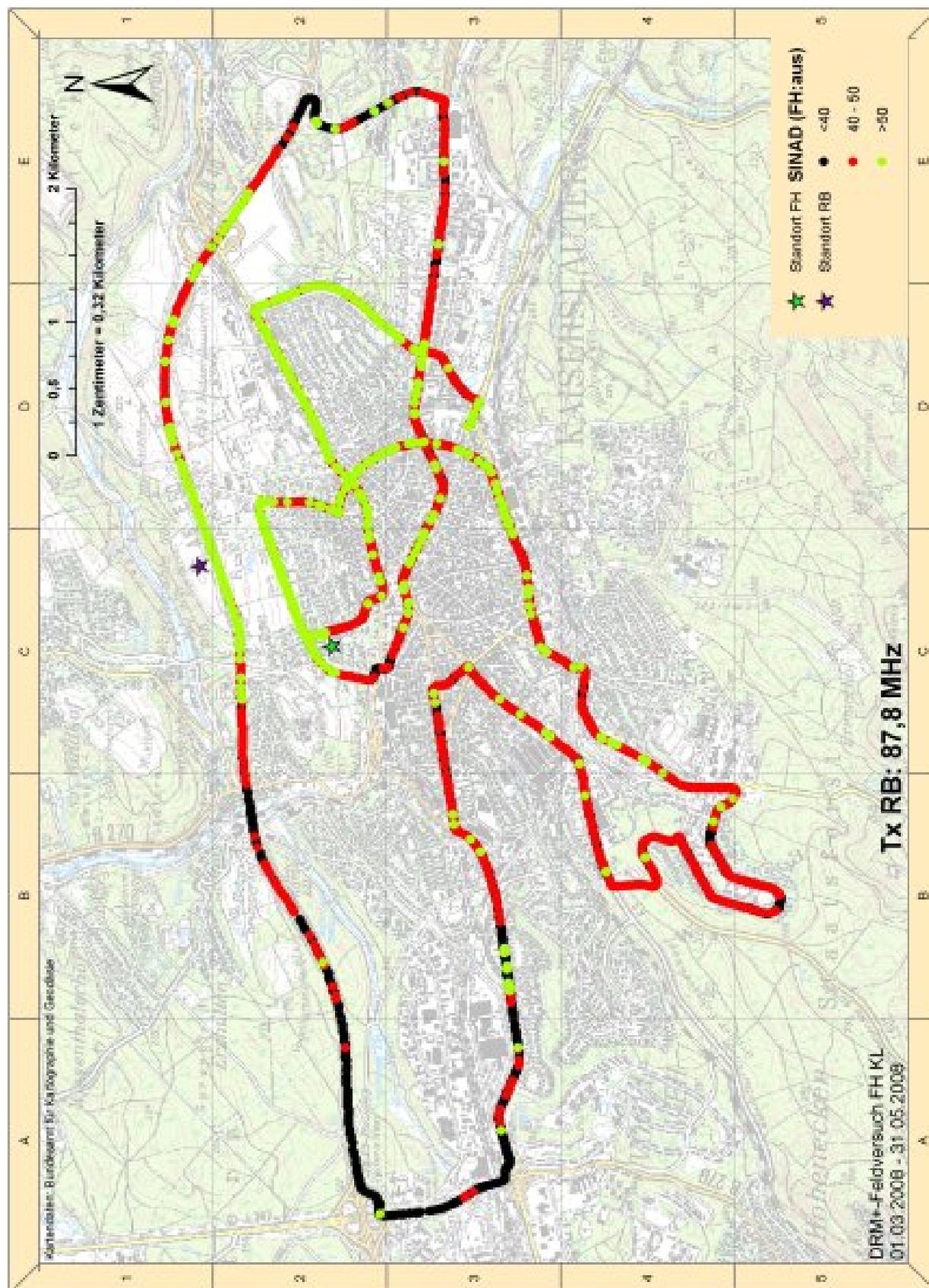


Abb. 6.15: Absolute SINAD-Werte, nur TX RB in Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz

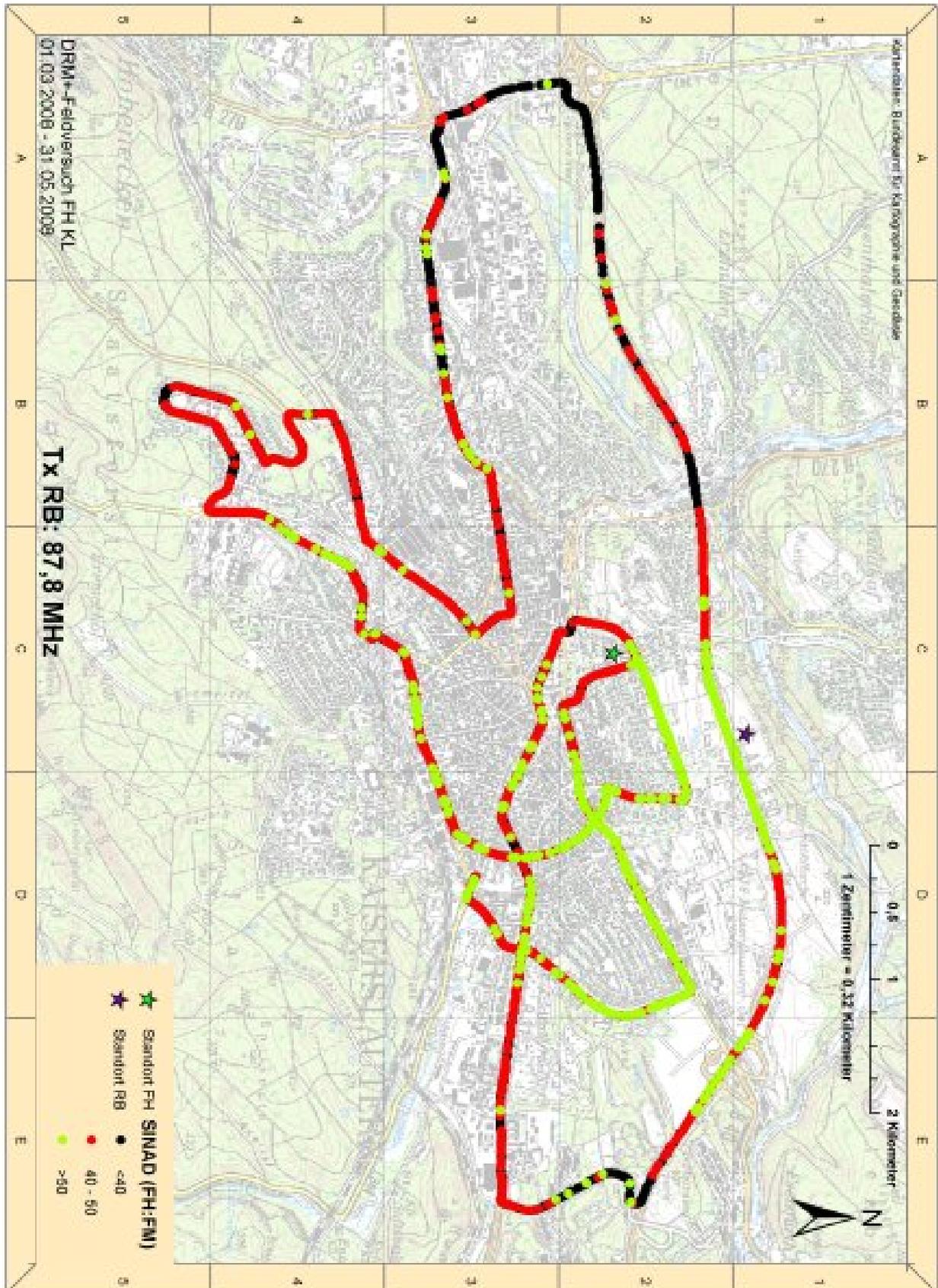


Abb. 6.16: Absolute SINAD-Werte, TX FH im FM-Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz

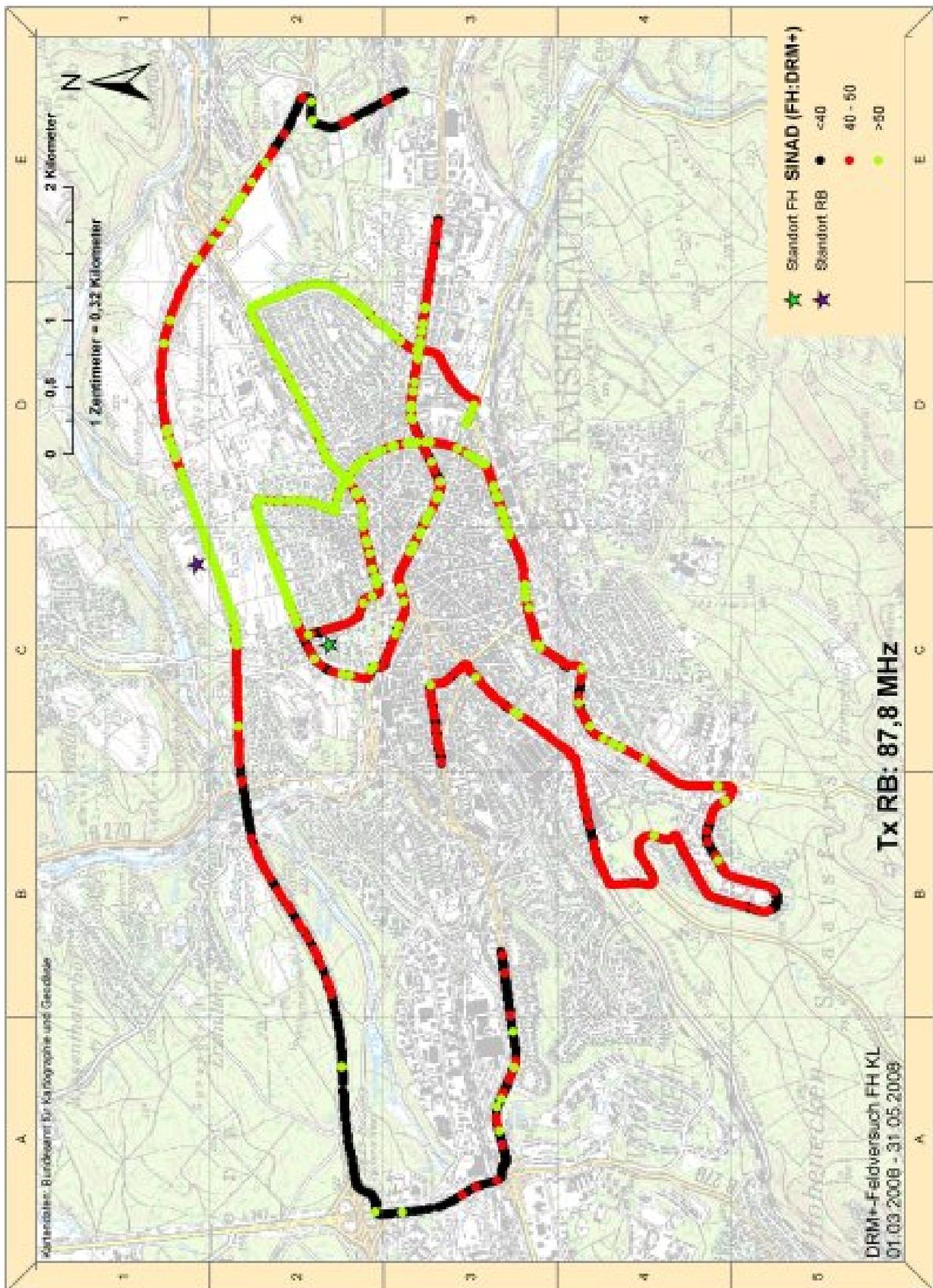


Abb. 6.17: Absolute SINAD-Werte, TX FH im DRM⁺-Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz

6.3.3.4 Nutzfrequenz 87,9 MHz

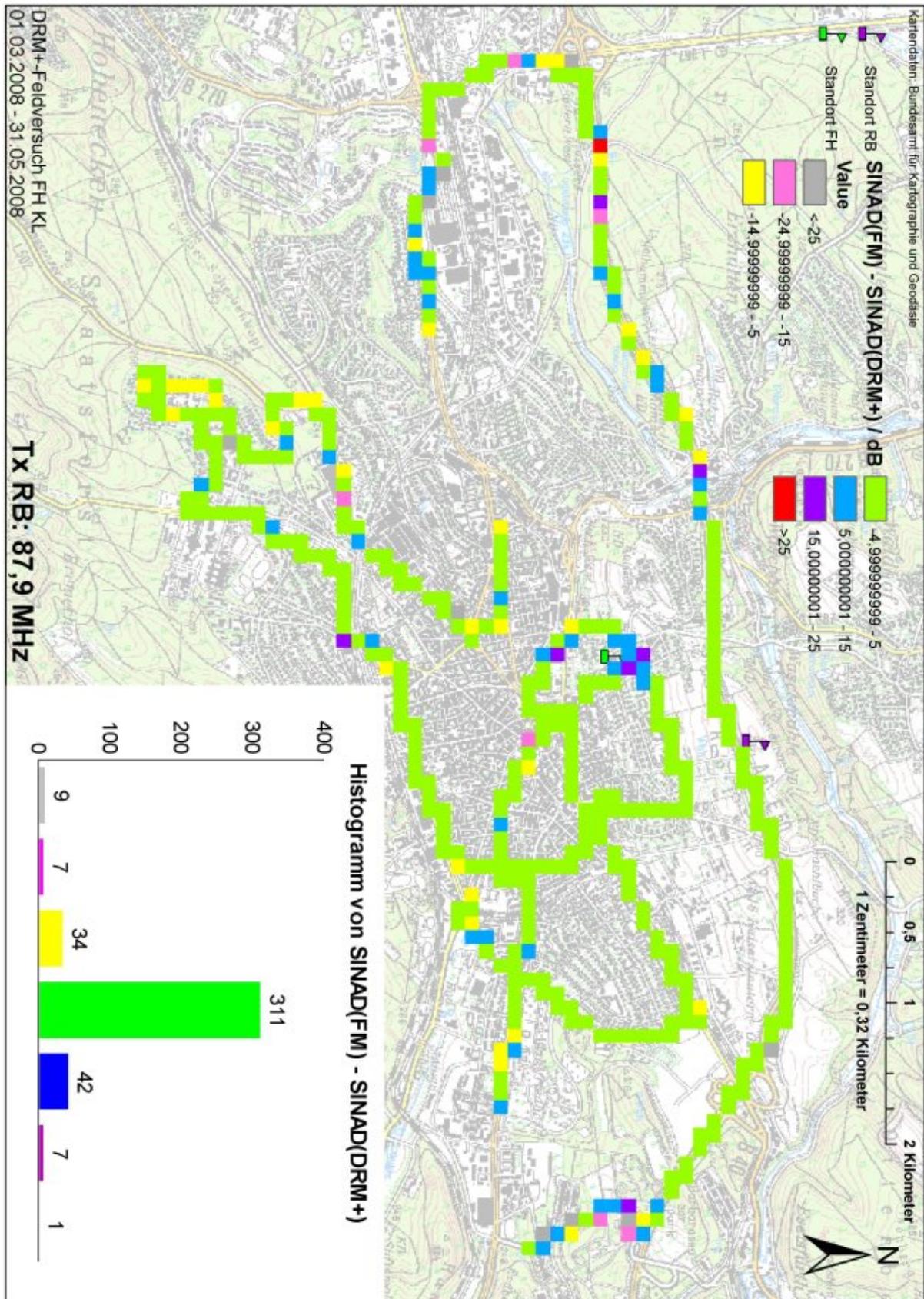


Abb. 6.18: Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,9 MHz 🔍

Die folgenden Beispieldarstellungen des demodulierten Audiosignals (Abb. 6.19) vom Routenstartpunkt (Ausfahrt FH) der korrespondierenden Messfahrten 8 & 12 zeigen, dass in der dortigen Situation optisch keine Signaldegradation feststellbar ist. Daher sind auch in Kapitel 5.3.2, Abschnitt: „Nutzfrequenz 87,9 MHz“ keine Hörbeispiele angeführt. Die Darstellungen (Abb. 6.19) hätten sich nicht geändert, wenn TX FH zu diesem Zeitpunkt ausgeschaltet gewesen wäre.

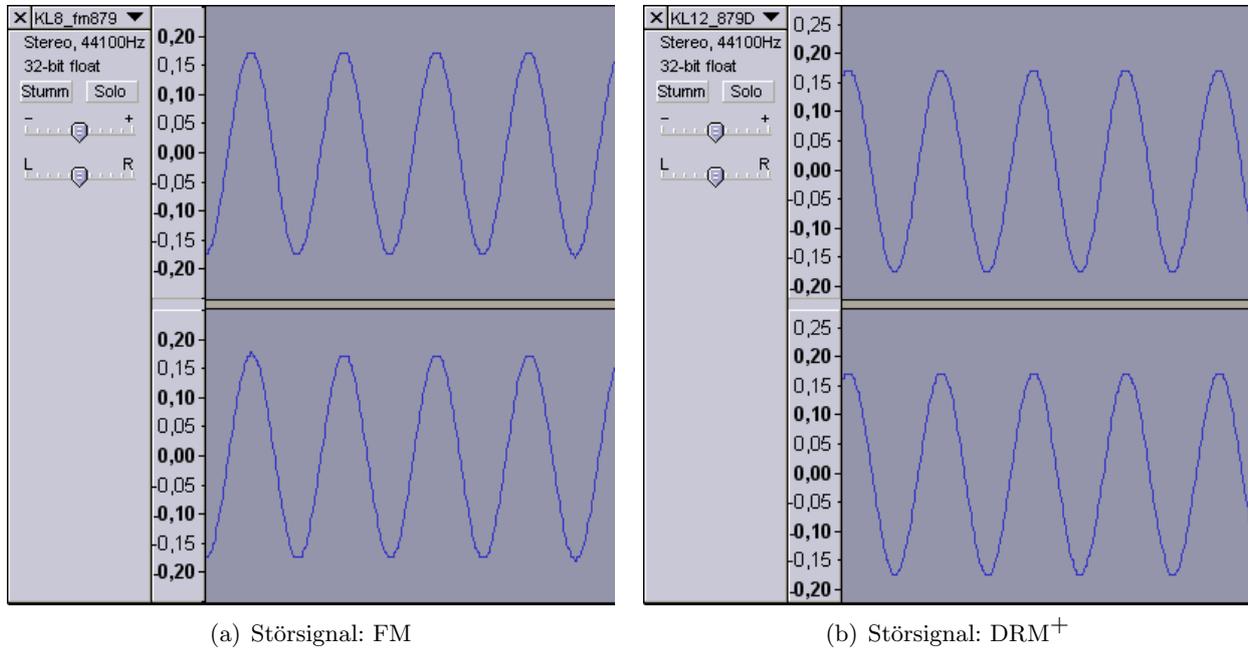


Abb. 6.19: Empfangenes Nutzsignal, 87,9 MHz am Routenstartpunkt gestört durch FM (a) und DRM⁺(b)

Fahrtennr.	Audemat Quality	HF-Pegel
4	Messfahrt 4-87_9 MHz Quality.pdf	Messfahrt 4-87_9 MHz RFininput.pdf
8	Messfahrt 8-87_9 vs 87_6 MHz Quality.pdf	Messfahrt 8-87_9 vs 87_6 MHz RFininput.pdf
12	Messfahrt 12-87_9 vs 87_6 MHz (DRM) Quality.pdf	HF-Pegel; Messfahrt 12-87_9 vs 87_6 MHz (DRM) RFininput.pdf

Tab. 6.5: Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,9 MHz

6.4 Analyse des Zusammenhangs der Qualitätsbewertungen SINAD und Audemat

6.4.1 Zielsetzung

Die auf Basis der mobilen Messungen erhaltenen Qualitätsbewertungen legen den Schluss nahe, dass die automatisierten Bewertungen mit den Messsystem Audemat einerseits und die ermittelten SINAD-Werte andererseits im statistischen Sinne voneinander abhängen, s. Abb. 6.20 und 6.21. Statistische Abhängigkeit bedeutet, dass die Kenntnis des einen Qualitätswertes (z. B. SINAD) etwas über den anderen Qualitätswert (Audemat) aussagt. Der statistische Zusammenhang ist dabei umso ausgeprägter, je sicherer aus der Kenntnis des einen Wertes der jeweils andere Wert vorhergesagt werden kann. Im Grenzfall genügt die Kenntnis des einen Wertes, um umkehrbar eindeutig auf den jeweils anderen Wert zu schließen; man sagt in diesem Fall

auch, dass die Werte zu 100% *korrelieren*. Der andere Grenzfall tritt ein, wenn aus der Kenntnis des einen Wertes keinerlei Aussage über den jeweils anderen Wert abgeleitet werden kann; man sagt in diesem Fall, dass die Werte *unkorreliert* sind. Sind die beteiligten Größen statistisch *unabhängig*, dann sind sie immer unkorreliert, die Umkehrung gilt jedoch i. allg. – ausgehend von rein mathematischer Betrachtung – nicht. Die Eigenschaft der Unabhängigkeit ist demnach die mathematisch stärkere Forderung. Hat man diese nachgewiesen, ist automatisch die Unkorreliertheit garantiert. Obwohl die Umkehrung i. allg. zwar nicht gilt, kann man für praktische Überlegungen mit realen Vorgängen oft davon ausgehen, dass aus der nachgewiesenen Abhängigkeit auch eine Korrelation folgt.

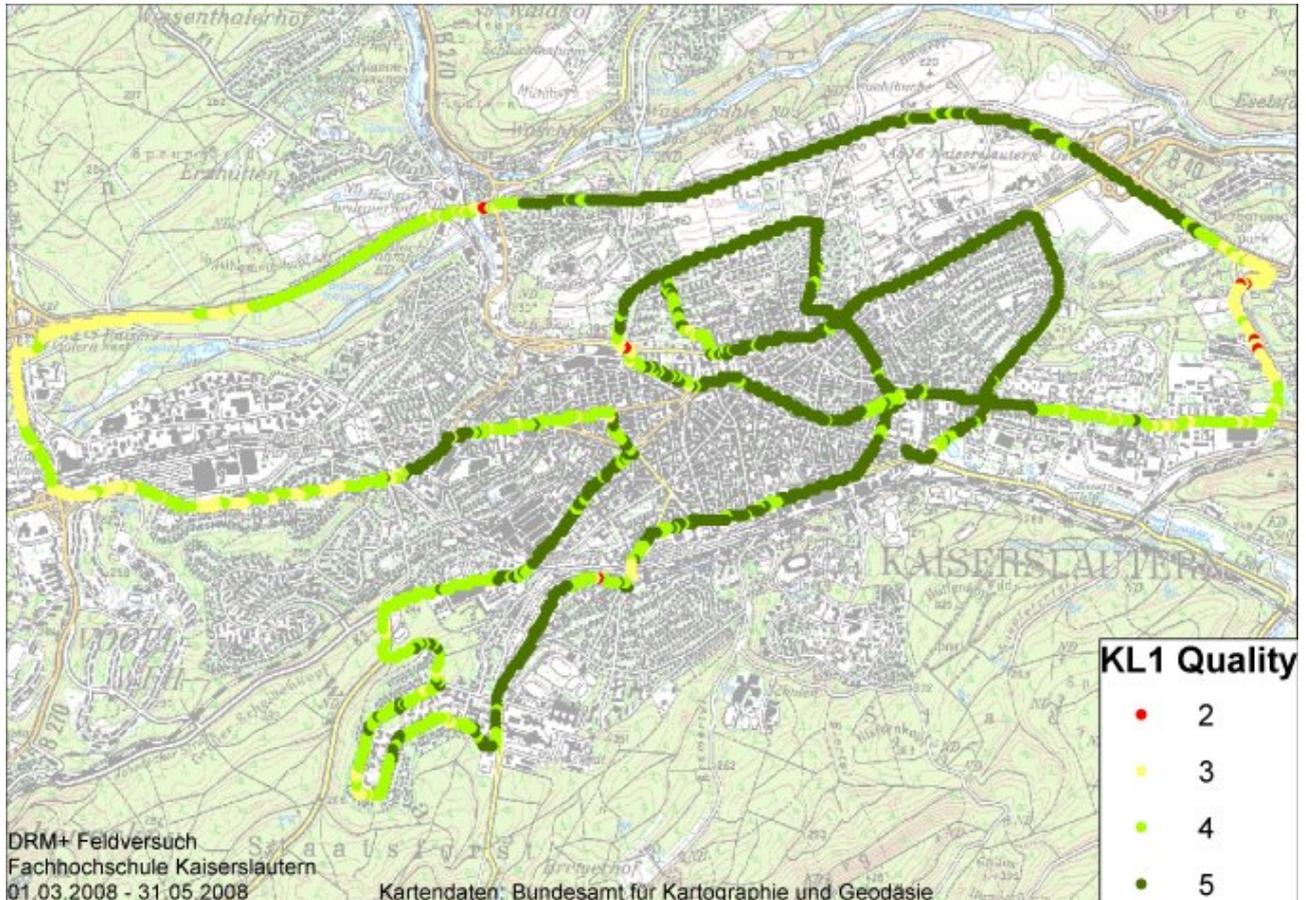


Abb. 6.20: Fahrt 1: Darstellung der Qualitätsbewertung durch das Audemat-System 🔍

Das Ziel der nachstehend beschriebenen Analysen ist herauszufinden, ob die Vermutung der Abhängigkeit der Qualitätsbewertungen als statistisch signifikant zu erachten ist oder aber nicht. Im Unterschied zu Abschnitt 5.4 wurden zwei Arten statistischer Tests angewendet:

- Test auf Unabhängigkeit,
- Test auf Korrelation.

6.4.2 Aufbereitung der Daten

Die ermittelten Qualitätswerte können nicht unmittelbar für die statistischen Tests herangezogen werden. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass sie mit unterschiedlichen GPS-Erfassungssystemen zeit- und geo-referenziert wurden: Beide Messsysteme haben ein eigenes GPS-Erfassungssystem mit durchaus unterschiedlicher Genauigkeit, die zeitlich nicht synchronisiert waren, jedoch beide im Abstand von 1 s Messwerte protokolliert haben.

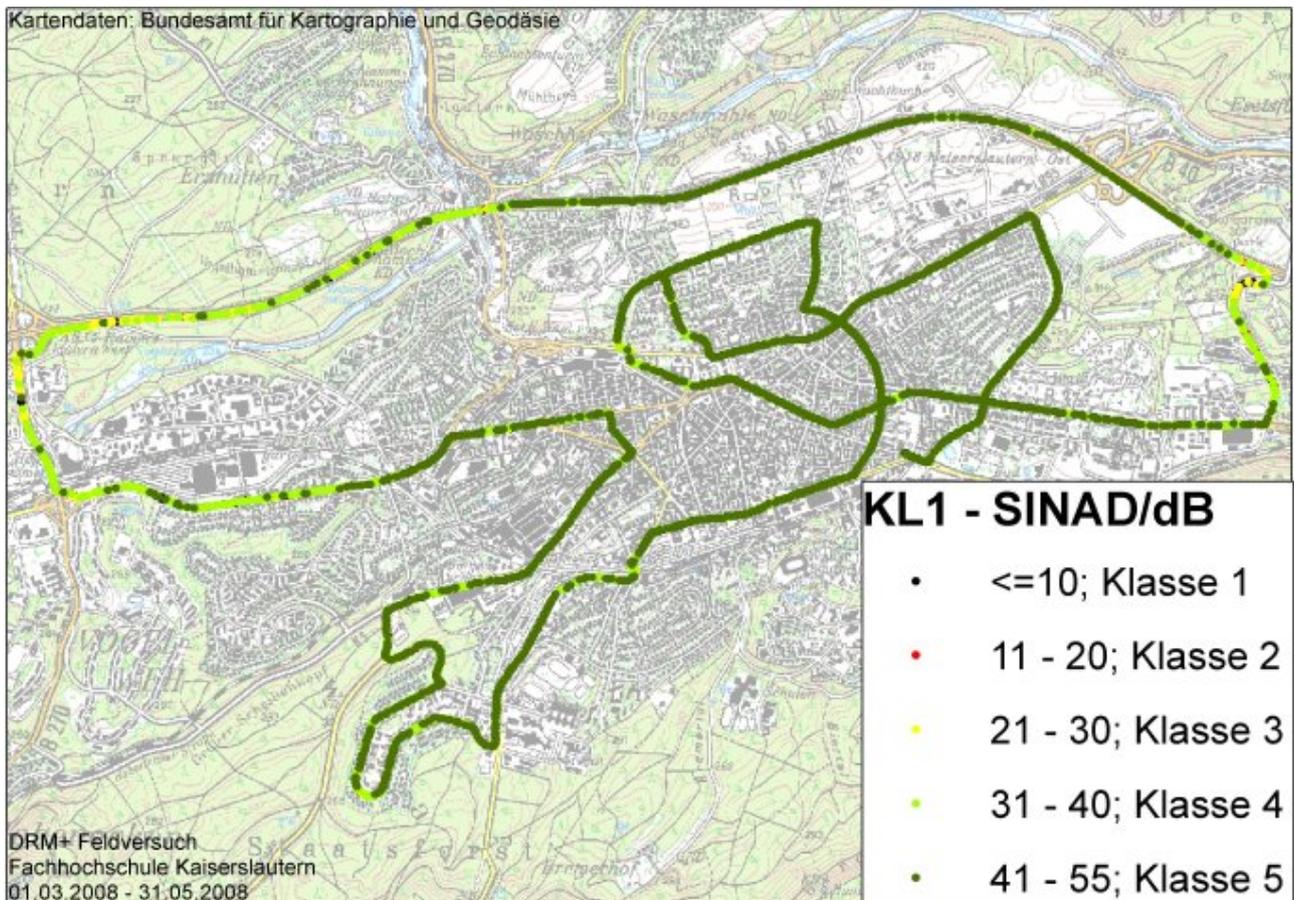


Abb. 6.21: Fahrt 1: Darstellung der absoluten SINAD-Werte 

Damit die aus den statistischen Tests abgeleiteten Aussagen sinnhaft sind, wurden die Daten zunächst so aufbereitet, dass für jedes in die nachstehend beschriebenen Berechnungen einfließenden Pixels je ein Qualitätswert aus der Audemat-Messung als auch aus der SINAD-Messung vorliegt. Folgende Vorgehensweise wurde angewendet:

1. Jede Messreihe wurde zunächst auf $(30\text{ m} \times 30\text{ m})$ große Pixel quantisiert. Hierbei bestehen zwei Schwierigkeiten:
 - Festlegung der Pixelgröße: Sie sollte möglichst klein sein, damit die räumliche Auflösung gut genug ist. Andererseits differieren die protokollierten Koordinaten aufgrund der verschiedenen GPS-Erfassungssysteme, so dass ein variierender „Pseudo“-Koordinatenoffset entsteht, der in der Realität so nicht vorlag. Die gewählte Pixelgröße orientiert sich an den Streckenabschnitten der Autobahn, an denen schnell gefahren wurde und gewährleistet, dass mindestens ein Messwert in das Raster fällt.
 - Auswahl eines repräsentativen Qualitätswertes für das Pixel, sofern mehr als ein Wert vorliegt: Da es sich um rein *ordinal* skalierte Merkmale handelt, darf man die Qualitätswerte, die innerhalb des gleichen Pixels liegen, nicht arithmetisch mitteln. Deshalb wurde der häufigste Wert als Stellvertreter gewählt.
2. Nach der o.g. Quantisierung der Messwerte auf $(30\text{ m} \times 30\text{ m})$ große Pixel wurden die beiden Qualitätswerte so verknüpft, dass nur diejenigen Pixel in die späteren Berechnungen eingehen, für die sowohl ein Audemat-Messwert A als auch ein SINAD-Messwert S vorliegt. Auf diese Weise entstehen insgesamt n Rasterpunkte, und jedem Rasterpunkt sind eindeutig zwei repräsentative Qualitätswerte A und S zugeordnet.

Zur statistischen Auswertung kann man nach dieser Aufbereitung die Qualitätsbewertungen \mathbf{A} und \mathbf{S} an jedem Pixel formal als Realisierung der Zufallsvariablen \mathbf{A} (Audemat) und \mathbf{S} (SINAD) mit Ergebnismengen $A \in \mathbb{A} = \{A_1 = 1, A_2 = 2, A_3 = 3, A_4 = 4, A_5 = 5\}$ (mit $|\mathbb{A}| = 5$ Audematqualitätsstufen) bzw. $S \in \mathbb{S} = \{S_1 = 1, S_2 = 2, S_3 = 3, S_4 = 4, S_5 = 5\}$ (mit $|\mathbb{S}| = 5$ SINAD-Qualitätsstufen) auffassen. In beiden Qualitätsskalen stellt 1 die schlechteste Qualitätstufe und 5 die beste Qualitätstufe dar, und \mathbf{A} und \mathbf{S} sind – wie bereits gesagt – *ordinal* skalierte Zufallsvariablen. Zu beachten ist, dass der Index zur Unterscheidung der Elemente der Mengen \mathbb{A} und \mathbb{S} in beiden Fällen gleich der zugeordneten Qualitätstufe ist; dies müsste aber nicht so sein. Als Indizes zur Adressierung der Elemente der Mengen \mathbb{A} und \mathbb{S} werden $a, a = 1 \dots |\mathbb{A}|$, bzw. $s, s = 1 \dots |\mathbb{S}|$, verwendet. So ist z. B. für $a = 3$ das Element $A_a = A_3$ mit Audematqualitätsrangzahl 3 gemeint. Die Abbildung der wertekontinuierlichen SINAD-Daten zu der ordinalen Klasseneinteilung der Ergebnismenge \mathbb{S} wurde gemäß Tab. 6.6 vorgenommen.

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

Tab. 6.6: Zuordnung der SINAD-Werte zu $s \in \mathbb{S}$

6.4.3 Test auf Unabhängigkeit

Um zu bewerten, ob die Bewertungen nach den Qualitätskategorien $\mathbb{A} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ und $\mathbb{S} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ entlang der Messtrecke statistisch unabhängig sind, kann man den sog. Unabhängigkeits- oder Kontingenztest [Bei95, Sch03, Zöf03] durchführen. Ausgehend von den beobachteten absoluten Häufigkeiten der Realisierungen von \mathbf{A} und \mathbf{S} entlang der gemäß Abschnitt 6.4.2 aufbereiteten Messtrecke wird eine sog. Kontingenz- oder Kreuztabelle aufgestellt, siehe Tab. 6.7.

		$\mathbf{A} =$					
		$A_1 = 1$	$A_2 = 2$	$A_3 = 3$	$A_4 = 4$	$A_5 = 5$	
$\mathbf{S} =$	$S_1 = 1$	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}	n_{1A}
	$S_2 = 2$	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}	n_{25}	n_{2A}
	$S_3 = 3$	n_{31}	n_{32}	n_{33}	n_{34}	n_{35}	n_{3A}
	$S_4 = 4$	n_{41}	n_{42}	n_{43}	n_{44}	n_{45}	n_{4A}
	$S_5 = 5$	n_{51}	n_{52}	n_{53}	n_{54}	n_{55}	n_{5A}
		n_{S1}	n_{S2}	n_{S3}	n_{S4}	n_{S5}	n

Tab. 6.7: Kontingenz- oder Kreuztabelle für die Qualitätsstufen \mathbf{A} und \mathbf{S} mit den beobachteten Häufigkeiten n_{sa} sowie den Randsummen n_{sA} bzw. n_{Sa}

In Tab. 6.7 bedeuten

n_{sa} die absolute Häufigkeit der Pixel, an denen gleichzeitig die Qualitätsstufe $\mathbf{S} = S_s$ und die Qualitätsstufe $\mathbf{A} = A_a$ gemessen wurden,

n_{sA} die absolute Häufigkeit Pixel, an denen \mathbf{S} die Qualitätsstufe $\mathbf{S} = S_s$ bei gleicher Qualitätsstufe A hatte, d. h. $n_{sA} = \sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} n_{sa}$,

n_{Sa} die absolute Häufigkeit Pixel, an denen \mathbf{A} die Qualitätsstufe $\mathbf{A} = A_a$ bei gleicher Qualitätsstufe S hatte, d. h. $n_{Sa} = \sum_{s=1}^{|\mathbb{S}|} n_{sa}$,

n die Gesamtanzahl der Pixel mit beiden Qualitätsbewertungen, d. h. $n = \sum_{s=1}^{|\mathcal{S}|} \sum_{a=1}^{|\mathcal{A}|} n_{sa}$.

Aus Tab. 6.7 errechnet sich der sog. Kontingenzkoeffizient T – als rein deskriptives Maß – um die beiden Hypothesen

H_0 : \mathbf{A} und \mathbf{S} sind unabhängig,

H_1 : \mathbf{A} und \mathbf{S} sind nicht unabhängig,

zu testen. Als Prüfstatistik kommt bei diesem Test die sog. quadratische Kontingenz

$$T = \sum_{a=1}^{|\mathcal{A}|} \sum_{s=1}^{|\mathcal{S}|} \frac{(n_{sa} - E_{sa})^2}{E_{sa}} \quad \text{mit} \quad E_{sa} = \frac{n_{sA} \cdot n_{Sa}}{n} \quad (6.1)$$

zum Einsatz, die unter der Voraussetzung H_0 einer χ^2 -Verteilung mit $(|\mathcal{A}| - 1) \cdot (|\mathcal{S}| - 1)$ Freiheitsgraden entstammt. Mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α und (Gl. 6.1) lautet die Testregel ganz einfach

$$T > \chi_c^2 = \chi_{(|\mathcal{A}|-1) \cdot (|\mathcal{S}|-1)}^2 [1 - \alpha] \quad \Rightarrow \quad H_0 \text{ verwerfen!} \quad (6.2)$$

wobei χ_c^2 den sog. „kritischen“ Wert bezeichnet, bei dessen Überschreitung die Hypothese H_0 zugunsten der Hypothese H_1 mit Irrtumswahrscheinlichkeit – dem sog. Signifikanzniveau – α abgelehnt wird. Im vorliegenden Fall bedeutet $T > \chi_c^2$, dass \mathbf{A} und \mathbf{S} mit Irrtumswahrscheinlichkeit α *nicht* unabhängig – also *abhängig* – sind. Hierbei gilt: Je größer T im Vergleich zu χ_c^2 , desto „sicherer“ ist diese Aussage.

Damit (Gl. 6.2) angewendet werden darf, muss gewährleistet sein, dass die beobachteten absoluten Häufigkeiten in den Feldern der Kontingenztabelle nach Tab. 6.7 mindestens 5 betragen, wobei in maximal 20 % der Felder Werte < 5 erlaubt sind. Um dies ggf. zu erreichen, werden Qualitätsstufen zu einer neuen Kategorie zusammengefasst, so könnten z. B. die Werte der Qualitätsstufen $\{1, 2\}$ des Audematsystems zusammengefasst werden, falls in beiden zu wenig beobachtete absolute Häufigkeiten vorkommen. In diesem Fall reduziert sich entsprechend die Anzahl der Freiheitsgrade von vorher $(|\mathcal{A}| - 1) \cdot (|\mathcal{S}| - 1) = (5 - 1) \cdot (5 - 1) = 16$ auf nachher $(|\mathcal{A}| - 1) \cdot (|\mathcal{S}| - 1) = (4 - 1) \cdot (5 - 1) = 12$, was für die Ermittlung von χ_c^2 nach (Gl. 6.2) zu berücksichtigen ist.

Das Ergebnis der Tests auf Unabhängigkeit für die einzelnen Messfahrten ist in Tab. 6.8 zusammengefasst. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde der Wert $\alpha = 0,1\%$ verwendet.

Man erkennt aus Tab. 6.8, dass die Hypothese der Unabhängigkeit in *allen* Fällen sehr deutlich zugunsten der Hypothese der Abhängigkeit verworfen werden muss. Die Anhängigkeit der Qualitätsbewertungen des Audemat-Systems und den SINAD-Qualitätswerten muss daher als hochsignifikant bezeichnet werden.

6.4.4 Test auf Korrelation

Als Maß für die Korrelation zwischen \mathbf{A} und \mathbf{S} kann der sog. Rangkorrelationskoeffizient r_{SP} nach Spearman [Zöf03] aus Tab. 6.7 errechnet werden, der den *linearen* statistischen Zusammenhang zwischen beiden ordinal skalierten Qualitätsstufen angibt. Die Größe r_{SP} kann aus

Fahrtennr.	TX RB, FM	TX FH, FM	TX FH, DRM ⁺	Test auf Unabhängigkeit				
				A	S	χ_c^2	T	Abhängig?
1	87,6 MHz			5	4	32,91	599,04	ja
2	87,7 MHz			5	4	32,91	379,87	ja
3	87,8 MHz			5	4	32,91	436,62	ja
4	87,9 MHz			5	5	39,25	516,28	ja
5	87,6 MHz	87,6 MHz		4	4	27,88	400,88	ja
6	87,7 MHz	87,6 MHz		5	5	39,25	349,17	ja
7	87,8 MHz	87,6 MHz		5	5	39,25	504,66	ja
8	87,9 MHz	87,6 MHz		5	5	39,25	596,50	ja
9	87,6 MHz		87,6 MHz	5	4	32,91	636,61	ja
10	87,7 MHz		87,6 MHz	5	5	39,25	469,32	ja
11	87,8 MHz		87,6 MHz	5	4	32,91	449,13	ja
12	87,9 MHz		87,6 MHz	5	5	39,25	395,84	ja
13		87,6 MHz		3	5	26,12	214,87	ja

Tab. 6.8: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Messfahrten, Test auf Unabhängigkeit: Die kritischen Werte χ_c^2 nach (Gl. 6.2) gelten für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,1\%$

der Kontingenztabelle Tab. 6.7 bestimmt werden:

$$r_{\text{SP}} = \frac{n \sum_{s=1}^{|\mathbb{S}|} \sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} n_{sA} S_s A_a - \left(\sum_{s=1}^{|\mathbb{S}|} n_{sA} S_s \right) \left(\sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} n_{sA} A_a \right)}{\sqrt{\left[n \left(\sum_{s=1}^{|\mathbb{S}|} n_{sA} S_s^2 - \left(\sum_{s=1}^{|\mathbb{S}|} n_{sA} S_s \right)^2 \right) \right] \left[n \left(\sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} n_{sA} A_a^2 - \left(\sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} n_{sA} A_a \right)^2 \right) \right]}} \quad (6.3)$$

Die Größe r_{SP} nach (Gl. 6.3) hat die gleiche Interpretation wie der bereits in Abschnitt 5.4 eingeführte Korrelationsfaktor r nach (Gl. 5.8). Der Rangkorrelationskoeffizient r_{SP} nach (Gl. 6.3) kann aber auch direkt aus den aufbereiteten Messreihen berechnet werden. Mit i als Laufindex zur Adressierung der Pixel sowie A_i und S_i als ermittelte Qualitätsstufe $A \in \mathbb{A}$ bzw. $S \in \mathbb{S}$ im Pixel i gilt

$$r_{\text{SP}} = \frac{n \sum_{i=1}^n A_i S_i - \left(\sum_{i=1}^n A_i \right) \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)}{\sqrt{\left[n \left(\sum_{i=1}^n A_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n A_i \right)^2 \right) \right] \left[n \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right) \right]}} \quad (6.4)$$

Der Rangkorrelationskoeffizient r_{SP} nach (Gl. 6.3) bzw. (Gl. 6.4) wird verwendet, um die beiden Hypothesen

H_0 : \mathbf{A} und \mathbf{S} sind unkorreliert,

H_1 : \mathbf{A} und \mathbf{S} sind korreliert,

zu testen. Da r_{SP} nach (Gl. 6.3) bzw. (Gl. 6.4) für Werte von $n > 30$ in guter Näherung normalverteilt mit Erwartungswert null und Varianz $1/(n-1)$ ist, kann man als *zweiseitigen* Test die Testentscheidung

$$\left| r_{\text{SP}} \sqrt{n-1} \right| > Z_c = \Phi[1 - \alpha/2] \quad \Rightarrow \quad H_0 \text{ verwerfen!} \quad (6.5)$$

anwenden [Sch03]. In Analogie zu χ_c^2 aus (Gl. 6.2) ist Z_c der kritische Wert, bei dessen Überschreitung die Hypothese H_0 zugunsten von H_1 mit Irrtumswahrscheinlichkeit α abgelehnt wird; im Unterschied zu χ_c^2 ergibt sich Z_c jedoch aus der Standardnormalverteilung $\Phi(x)$ [Sch03].

Das Ergebnis der Tests auf Korrelation für die einzelnen Messfahrten ist in den Tab. 6.9 zusammengefasst. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde wiederum $\alpha = 0,1\%$ verwendet.

Fahrtennr.	TX RB, FM	TX FH, FM	TX FH, DRM ⁺	Test auf Korrelation			
				r_{SP}	$ r_{SP}\sqrt{n-1} $	Z_c	Korreliert?
1	87,6 MHz			0,62	19,00	3,29	ja
2	87,7 MHz			0,61	16,68	3,29	ja
3	87,8 MHz			0,61	17,56	3,29	ja
4	87,9 MHz			0,66	19,70	3,29	ja
5	87,6 MHz	87,6 MHz		0,67	15,98	3,29	ja
6	87,7 MHz	87,6 MHz		0,58	15,67	3,29	ja
7	87,8 MHz	87,6 MHz		0,62	18,80	3,29	ja
8	87,9 MHz	87,6 MHz		0,68	20,52	3,29	ja
9	87,6 MHz		87,6 MHz	0,74	20,56	3,29	ja
10	87,7 MHz		87,6 MHz	0,59	17,11	3,29	ja
11	87,8 MHz		87,6 MHz	0,65	16,82	3,29	ja
12	87,9 MHz		87,6 MHz	0,66	16,95	3,29	ja
13		87,6 MHz		0,47	12,01	3,29	ja

Tab. 6.9: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Messfahrten: Rangkorrelationskoeffizient. Die kritischen Werte Z_c (Gl. 6.5) gelten für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,1\%$

Man erkennt aus den Tab. 6.9 und Tab. 6.8, dass die Hypothese der Unkorreliertheit in *allen* Fällen deutlich zugunsten der Hypothese der Korrelation verworfen werden muss. Die Korrelation der Qualitätsbewertungen des Audemat-Systems und den SINAD-Qualitätswerten ist daher hochsignifikant von Null verschieden.

7 Gesamtbewertung der Auswirkungen von DRM⁺ auf UKW-FM

Im vorliegenden Abschnitt werden wesentliche Erkenntnisse, die bis jetzt auf Basis der Laborarbeiten und des Feldversuchs vorliegen, zusammengefasst und bewertet.

Als eindeutig wichtigste Einflußgröße für die Verträglichkeit wurde der Crestfaktor des DRM⁺-Signals identifiziert. Das bisher verwendete DRM⁺-Signal weist je nach Ausgangsleistung einen Crestfaktor von ca. 6 dB . . . 11 dB¹ – im Vergleich zu 0 dB des FM-Signals – auf. Der Crestfaktor führt zu höherer Intermodulation in typischen FM-Empfängern, was wiederum mit einer Verschlechterung der subjektiven und objektiven Audioqualität einhergeht. Das bedeutet, dass ein DRM⁺-Störsignal grundsätzlich ein höheres Interferenzpotential aufweist als ein FM-Störsignal gleicher Leistung, solange es innerhalb der Eingangsselektion des Empfängers liegt. Die Intermodulation entsteht dann in der ersten Mischerstufe, die das HF-Signal in die ZF-Ebene überführt, wo es anschliessend durch das ZF-Filter gefiltert wird. Für die Wirkung auf die NF-Qualität ist die Lage des Störsignals relativ zur Mitte des ZF-Filters wichtig. Kritisch ist die Situation, in der das Störsignal in den Flankenbereich des Filters fällt, weil es dann zu AM/PM-Konversion kommt. Dies ist umso ausgeprägter, je steiler (und damit je selektiver) das ZF-Filter ist. Dies führt unter Umständen zu dem irritierenden Effekt, dass ein hochwertiges FM-Frontend mit hochwertiger ZF-Filterung im ersten Nachbarkanal deutlich mehr unter DRM⁺ „leiden“ kann als ein eher minderwertiges Frontend. Ab dem zweiten Nachbarkanal reduziert sich der Einfluß des Crestfaktors auf die Audioqualität immer mehr; je mehr, je steiler die ZF-Filterung. Je nach Empfangssituation ist es daher durchaus möglich, dass ein DRM⁺-Störsignal die nahezu gleiche Audioqualität bewirkt wie ein FM-Störsignal gleicher abgestrahlter Leistung.

Die Messungen legen aber auch den Schluss nahe, dass ein DRM⁺-Störsignal in speziellen Empfangssituation auch ab dem zweiten Nachbarkanal aufwärts die Audioqualität mehr verschlechtern kann als ein FM-Störsignal gleicher Leistung. Diese Empfangssituationen sind scheinbar dann vorhanden, wenn das Störssignal innerhalb der Eingangsselektion dominiert und die AGC des UKW-FM-Empfängers versucht, diese dominierenden schnellen Schwankungen auszugleichen; eine These, die sich aus den Labormessungen ergibt und sich jetzt im Feld widerzuspiegeln scheint. Eine solche Situation trat bei manchen stationären Messungen auf – dort wurde in 10 m Höhe mit ausgerichteter Antenne gemessen – und dort läßt sich dieser Effekt beobachten, vgl. Abb. 5.22, MP 14,15,16. Liegt also ein dominierendes DRM⁺-Störsignal innerhalb der Eingangsselektion (also nicht notwendigerweise im Gleichkanal) und weist es eine höhere (und schneller fluktuierende) Leistung als das Nutzsignal auf, so kann es in dieser Empfangssituation auch im zweiten oder dritten Nachbarkanal zu deutlich schlechteren Audioqualitäten kommen als bei einem leistungsgleichen FM-Störsignal. Im Fall der mobilen Messungen wurde für die Messungen eine rundstrahlende $\lambda/4$ -Antenne eingesetzt. Bei diesen mobilen Messungen liegt der starke Sender SR1 auf 88,0 MHz folglich *immer* in der Eingangsselektion und „beruhigt“ gleichermaßen die AGC. Weiterhin ist es denkbar, dass sich die Leistungsverhältnisse aufgrund von Mehrwegeempfang und Bewegung innerhalb der Eingangsselektion zusätzlich

¹Bezug: Basisbandsignal

u.U. recht schnell ändern. Eine weitere Überlegung stützt den hier vorgestellten Erklärungsversuch: Am Standort Rotenberg wird auf der Frequenz 92,5 MHz das SWR-Programm „Das Ding“ mit ca. 200 W mit Richtwirkung über die Stadt Kaiserslautern abgestrahlt. Diese Frequenz scheint außerhalb der Selektion des verwendeten UKW-FM-Empfängers zu liegen. Die am Empfängereingang anliegende Leistung bei 92,5 MHz beeinflusst die Audioqualität jedoch augenscheinlich nicht. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass im Fall der durchgeführten mobilen Messungen der Unterschied in der Störwirkung ab dem zweiten Nachbarkanal nahezu gleich ist.

Die oben beschriebenen Wirkungen des Crestfaktors auf die Audioqualität erklären auch, weshalb es in der Nähe eines DRM⁺-Störsenders typischerweise vermehrt zu stärkerer Beeinflussung der Audioqualität im Vergleich zu einem FM-Sender gleicher Leistung kommen kann. Hier kommt es sicherlich öfter vor, dass die oben beschriebene Empfangssituation eintritt, d. h. das der Störsender innerhalb der Eingangsselektion absolut dominant und ist.

Im Zusammenhang mit dem Crestfaktor ist eine weitere Erkenntnis relevant: Die durch den Crestfaktor verursachten Effekte treten auch dann auf, wenn das Sendesignal im Sinne der Nebenaussendungen sehr sauber gefiltert wird, d. h. die beschriebenen nichtlinearen Effekte treten erst *im* FM-Empfänger auf. Anschaulich bedeutet dies, dass der Crestfaktor des Signals, der ja innerhalb der Nutzbandbreite auftritt, *immer* zu Problemen im FM-Empfänger führt, gleichgültig, wie gut die Nebenaussendungen unterdrückt werden. Aus diesem Grund ist es immens wichtig, dass der DRM⁺-Standard – am besten senderseitig – Methoden vorsieht, die den Crestfaktor des DRM⁺-Signals so niedrig wie möglich machen. Hierbei muss es zu einer Abwägung aus DRM⁺-Performanz (im Sinne des benötigten SNR des DRM⁺-Decoders) und Verträglichkeit mit UKW-FM kommen. Die Verringerung des Crestfaktors ist demnach der Schlüssel zur Erzielung einer möglichst hohen Verträglichkeit bei gleichzeitig möglichst hoher DRM⁺-Reichweite. Ein niedriger Crestfaktor kann auch zur Erhöhung des Wirkungsgrades des DRM⁺-Senders genutzt werden.

Die Aussagen bzgl. der Verträglichkeit kann man abhängig vom Frequenzversatz wie folgt zusammenfassen, wobei immer von der senderseitig sauberen Ausfilterung der Nebenaussendungen sowie einer gleichen Audioqualität ausgegangen wird:

$\Delta f = 0$ kHz: Ein DRM⁺-Störsignal muss in der Leistung zwischen 0 dB und 5 dB gegenüber einem FM-Störsignal reduziert werden. Insbesondere bei den stationären Messungen erscheinen die Reduktion ausgeprägter als bei den mobilen Messungen. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser Unterschied durch den nichtvorhandenen Mehrwegeempfang (stationäre Messung) und potentiell vorhandenen Mehrwegeempfang (mobilen Messung) bewirkt wird.

$\Delta f = \pm 100$ kHz: Ein DRM⁺-Störsignal muss in der Leistung zwischen 5 dB und 15 dB gegenüber einem FM-Störsignal reduziert werden, abhängig vom Absolutwert der Störleistung I_k . Je höher diese Störleistung, je höher die Reduktion.

$\Delta f = \pm 200$ kHz: Auch hier müsste ein DRM⁺-Störsignal muss in der Leistung gegenüber einem FM-Störsignal reduziert werden, allerdings ist der erreichte Qualitätswert typischerweise bereits sehr hoch, so dass diese Reduktion der Leistung keine signifikante Verbesserung der Audioqualität mehr verspricht, insbesondere dann, wenn der Empfänger bereits die maximale Audioqualität abgibt.

$\Delta f > \pm 200$ kHz: In den allermeisten Fällen scheint die Verträglichkeit im Sinne der Audioqualität gegeben zu sein, jedoch ist nicht auszuschließen, dass eine Leistungsreduktion nötig wäre, siehe die oben diskutierten speziellen Empfangssituationen.

Als weiteres Ergebnis läßt sich festhalten, dass die Verträglichkeit von DRM⁺ mit UKW-FM in der Realität leichter herzustellen zu sein scheint als es die Labormessungen [SSR07, HSE07] zunächst vermuten lassen. Als Gründe hierfür sind u.a.:

- Der immer vorhandene Kanalrauschpegel N_k begrenzt die HF-Dynamik – und damit die letztlich erzielbare NF-Dynamik – nach oben hin.
- Das Empfangssignal setzt sich typischerweise aus mehr als nur zwei statistisch unabhängigen Signalkomponenten mit meist unterschiedlichen Signalleistungen zusammen. Auf diese Weise wird der Einfluß des Crestfaktors auf die Verträglichkeit verringert. Bei den Schutzabstandsmessungen im Labor sind jedoch immer nur zwei Signale (mit hoher Dynamik) vorhanden, nämlich das „Opfersignal“ und das „Störsignal“, so dass der negative Einfluß des Crestfaktors voll zu Buche schlagen kann.

Aus den bisherigen Untersuchungen ergibt sich ein weiteres Ergebnis. Man kann festhalten, dass ein psophometrisch bewertetes S/N von 50 dB – welches der Bestimmung der Schutzabstandskurven zugrundeliegt – in realen Empfangssituationen des Feldtests nur selten erreicht wird, und zwar ungeachtet der Frage, ob der FM-Empfänger diese Dynamik bietet oder nicht. Der Grund hierfür liegt in der Begrenzung durch den Kanalrauschpegel N_k . Betrachtet man ein FM-Signal, dessen MPX-Signal keine Messsignale sondern Audiomaterial enthält, so kommt ein weiterer Aspekt hinzu: Die senderseitig vorgenommene Dynamikkompression bewirkt eine mehr oder weniger starke Beschneidung der Dynamik des Audiosignals. Die Feldtests legen den Schluss nahe, dass in der praktischen Empfangssituation – rein subjektiv – auch ein niedrigerer S/N-Wert von z. B. 40 dB mehr als gut erscheint.

Abschließend sei auf die Nutzbarkeit des SINAD-Kriteriums eingegangen. In den Messungen zur Bewertung der Audioqualität wurde erstmals der SINAD-Wert zur Beurteilung herangezogen. Das Verwenden des SINAD-Wertes zur Beurteilung der Audioqualität hat folgende Vorteile: Zum einen benötigt diese Messung kein Einpegeln als ersten Schritt, sondern kann fortlaufend durchgeführt werden. Zum anderen bewertet der SINAD-Wert auch die nichtlinearen Verzerrungen im Audiosignal des Empfängers; Verzerrungen, die wie oben erläutert, durchaus aus der Empfangssituation heraus entstehen können, also nicht nur durch die NF-Schaltung. Die statistischen Auswertungen zeigen, dass es eine hochsignifikante Abhängigkeit und Korrelation aller verwendeten Bewertungskriterien vorlag. Solange der verwendete Empfänger sehr wenige Verzerrungen produziert, stehen SINAD und S/N in einem linearen Zusammenhang. Dies ändert sich, sobald die Verzerrungen zunehmen. Die Qualität des Audiosignals wird in diesem Fall durch SINAD umfassender bewertet. In die vorgenommene Qualitätsbewertung durch das Audemat-System fließt u.a. der Störgrad des Pilottons ein, und der Zusammenhang zwischen SINAD und der Audemat-Bewertung ergab sich als hoch signifikant. Beide Verfahren ergaben die gleiche Qualitätsbewertung, obwohl sie von völlig unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen: SINAD benötigt einen Dauersinus fester Frequenz, das Audemat-System hingegen kann das laufende Hörfunkprogramm bewerten. Insgesamt erscheint die SINAD-Messung grundsätzlich geeignet, die Audioqualität sehr aussagekräftig zu bewerten.

8 Auswirkungen von DRM⁺ auf den Flugfunk

Im Bereich des Flugfunks wurden – nach dem Kenntnisstand der Autoren – keine Messungen durchgeführt. Im Vorfeld des Versuchs wurde eventuell kritische Frequenzkombinationen in Bezug auf Intermodulationsprodukte mit dem BNetzA-Tool „D88“ geprüft und mit einer zus. Sicherheitsmarge von 10 dB zusätzlich zu den bisher bekannten Messwerten [HSE07, SSR07] versehen. Inwiefern das auf FM-Signalen aufbauenden D88-Tool zur Bewertung von OFDM-Signalen geeignet ist, ist allerdings ein anderes Thema.

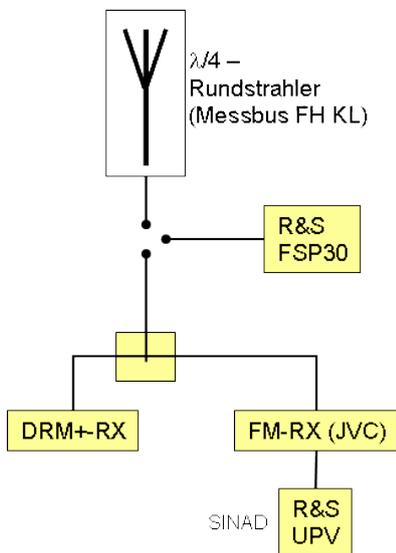
Insbes. die Verantwortlichen des benachbarten Militärflughafens Ramstein (Lage des Ortes Ramstein s. Markierung in Abb. 4.1) waren im Rahmen des Versuchs eingebunden; weder von dort noch von anderen Flughafenbetreibern wurden Probleme an die Autoren herangetragen.

9 Reichweite von DRM⁺

9.1 Messkonzept und -verfahren

Zum Herantasten an die Frage „wie verhält sich FM, wenn DRM⁺ empfangbar ist (bzw. umgekehrt)“ wurde der im Folgenden beschriebene Test durchgeführt. Grundgedanke dabei war die Frage nach den Empfangsbedingungen des analogen und digitalen Empfangs, die sich in den Grenzsituationen der DRM⁺-Dekodierbarkeit ergeben.

Der FH-Messbus wurde entsprechend dem Blockschaltbild in Abb. 9.1 bestückt. Das Empfangssignal wurde über einen 3 dB-Koppler an die Empfänger (JVC bzw. DRM⁺) verteilt. Mittels des Spektrumanalysators (R&S-FSP30) wurde der RMS-Empfangsspannungspegel in dB μ V unter Berücksichtigung der Kopplungsverluste in einer Bandbreite von 120 kHz ermittelt. Mittels des Audioanalysators (R&S UPV) wurden die in Kapitel 5.1.2 beschriebene SINAD-Messung durchgeführt sowie Audiosamples aufgezeichnet. Als Antenne wurde ein $\lambda/4$ -Strahler (Kathrein K51164, Antennenfaktor $k = 10$ dB, s. Abb. 9.1) verwendet. Es war nur TX FH in Betrieb, dessen Modulation, Modulationsinhalte sowie Leistung über den Fernzugriff beeinflusst wurden.



(a) Messaufbau



(b) Aussenansicht des Messbusses mit montiertem $\lambda/4$ -Strahler

Abb. 9.1: Blockschaltbild des Messaufbaus (a) und Aussenansicht des FH-eigenen Messbusses (b)

An den willkürlich gewählten Testpunkten wurde im stationären Fall bei wechselnder Modulation von TX FH

- geprüft, ob der DRM⁺-MSC dekodiert werden konnte,

- der HF-Pegel erfasst sowie
- der SINAD-Wert am Ausgang des FM-Empfängers erfasst.

An einigen Punkten wurde die DRM⁺-Sendeleistung reduziert, bis der Dekoder stoppte. Danach wurde die FM-Sendeleistung im gleichen Maß reduziert und der resultierende SINAD-Wert erfasst.

9.2 Ergebnisse der Messung

Die Ergebnisse der Messfahrt sind in Tab. 9.1 zusammengestellt und in Abb. 9.2 visualisiert. In der Tabelle sind folgende Angaben enthalten:

Messpunkt: Referenziert den Ort in Abb. 9.2.

Position N, Position E: Die Koordinate des jeweiligen Messortes (Angaben in WGS84, Dezimalgrad).

Pegel: Mit dem Spektrumanalysator gemessener Spannungspegel in dB μ V an 50 Ω , Messbandbreite: 120 kHz.

DRM⁺ Audio geht?: Gibt an, ob der MSC des DRM⁺-Multiplexes in der jeweiligen Situation stabil dekodiert werden konnte. Die Angabe „DRM⁺-Reserve x dB“ gibt dabei die zusätzliche Dämpfung der Senderausgangsleistung von TX FH an, mit der die Dekodierung an die Grenze zur Nicht-Dekodierbarkeit geführt werden konnte. Dieser zusätzliche Eintrag ist nur an den Orten vorhanden, an denen dieser Test auch tatsächlich durchgeführt werden konnte.

FM SINAD: Der SINAD-Wert, der im Falle einer FM-Abstrahlung von TX FH am Empfänger Ausgang gemessen werden konnte. Es kam hierbei das in Kap. 5.1.2 beschriebene Auswertungsschema zur Anwendung. An den meisten Orten wurden zusätzlich Hörproben des demodulierten FM-Signals angefertigt, die in der Tabelle hinterlegt sind. An den Orten an denen eine wie im DRM⁺-Fall beschriebene Leistungsreduzierung von TX FH vorgenommen wurde, sind zusätzlich die in diesem Falle gemessenen SINAD-Werte verzeichnet. Der Vermerk „Stummschaltung“ kennzeichnet, dass der Empfänger in der entsprechenden Situation stummgeschaltet blieb; das demodulierte Signal konnte somit nicht ausgewertet werden.

In der zu Tab. 9.1 gehörenden Abb. 9.2 sind folgende Parameter dargestellt:

- Standort von TX FH,
- Lage der Messpunkte,
- Empfangspegel in dB μ V an den jeweiligen Messpunkten (in roter Schrift),
- SINAD im Falle einer FM-Sendung mit voller Sendeleistung von TX FH,
- zusätzliche Dämpfung der Sendeleistung von TX FH, bei der DRM⁺ gerade noch empfangbar war (Feld „Versorgungsreserve“).
- da DRM⁺ an allen Punkten empfangen werden konnte, ist hierfür keine zusätzliche Markierung eingetragen.

An den Punkten, an denen die Leistung reduziert wurde, schaltete der FM-Empfänger auf stumm, bevor der DRM⁺-Dekoder stoppte. Selbst wenn die Stummschaltung später oder auch gar nicht erfolgt wäre, war das Programm bereits sehr stark gestört (schlechte Verständlichkeit aufgrund geringen Eingangspegels und Gleichkanalstörungen).

In Abb. 9.2 kann man erkennen, dass an Orten in denen FM nicht mehr als versorgt betrachtet werden kann für DRM⁺ immer noch Versorgungsreserven bestehen.

Messpunkt	Position N	Position E	Pegel	DRM ⁺ Audio geht?	FM: SINAD
1	49,451	7,76248	91 dB μ V	ja	50 dB
2	49,4382	7,72579	33 dB μ V	ja	33 dB
3	49,4377	7,70779	23 dB μ V	ja	24 dB
4	49,432	7,68305	25 dB μ V	ja	18 dB
5	49,4309	7,67597	20 dB μ V	ja	8 dB
6	49,4375	7,72508	28 dB μ V	ja DRM ⁺ Reserve 15dB	30 dB Stummschaltung bei -15 dB geht sporadisch mit SINAD: 19 dB bei -12 dB
7	49,4386	7,73365	31 dB μ V	ja DRM ⁺ Reserve 19dB	29 dB
8	49,4472	7,70483	30 dB μ V	ja DRM ⁺ Reserve 11dB	23 dB Hörprobe bei -11 dB
9	49,4669	7,6958	21 dB μ V	ja	13 dB
10	49,472	7,67527	15 dB μ V	ja	Stummschaltung
11	49,4508	7,78071	42 dB μ V	ja	40 dB

Tab. 9.1: Wertetabelle zum Reservetest

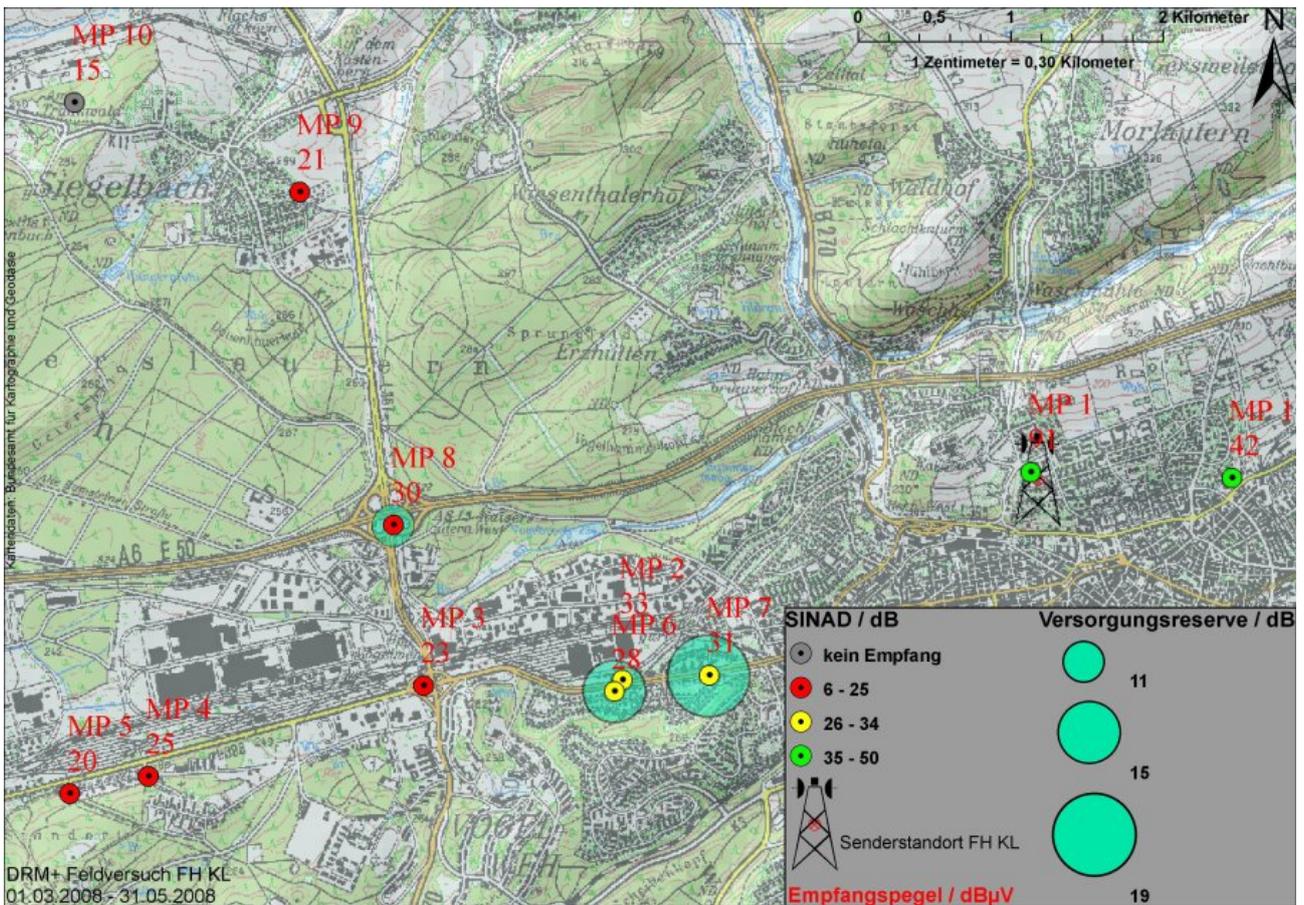


Abb. 9.2: Übersichtskarte der Ergebnisse

9.3 Gesamtbewertung und allgemeine Beobachtungen

Bei mehreren Fahrten zu unterschiedlichsten Tageszeiten und Wetterlagen hat sich der Eindruck gefestigt, dass die Stadt Kaiserslautern durch TX FH mit DRM⁺ versorgt werden konnte – sowohl unter LOS- als auch unter NLOS-Empfangsbedingungen. In den unterschiedlichen Gebieten der Stadt – auch zwischen Häuserzeilen – war der Empfang möglich. Das DRM⁺-System hat sich durchgängig als äußerst robust gezeigt. Empfangbarkeit konnte im Bereich von Enkenbach bis kurz vor dem Autobahnkreuz Landstuhl festgestellt werden.

Bei Fahrten über die Autobahn A6 in Richtung Westen konnte das Signal länger dekodiert werden, als es mit dem 50 W-Veranstaltungssender der FH (der dem im Versuch verwendeten FM-Zweig mit erhöhter Leistung entspricht) entlang dieses Wegabschnitts möglich ist. In dieser Gegend sind bereits starke Gleichkanalstörungen durch einen Sender aus Metz / Frankreich vorhanden, welche beim digitalen Empfang nicht auffallen (darüberhinaus ist stellenweise in Kaiserslautern-West auch ein Gleichkanalstörer aus Idar-Obarstein schwach vorhanden). Bei einer Fahrt durch den Wald am südlichem Stadtrand zum Bremerhof (s. z.B. Abb. 6.15, Planquadrat C5) ist der FM-Empfänger kurz nach Eintritt in den Wald zur Stummschaltung übergegangen bzw. befand sich im Grenzbereich seiner Empfangsschwelle. Mit DRM⁺ hingegen konnte durchgängig problemlos der MSC dekodiert werden.

10 Ausblick

Aufgrund des recht kurzen Zeitraumes des Feldversuchs und der doch relativ späten Verfügbarkeit des DRM⁺-Empfängerprototypen sind noch viele technische Aspekte in Bezug auf die Frage der Versorgungssituation eines DRM⁺-Senders im realen Umfeld zu untersuchen. Dazu zählt nicht nur die Betrachtung der Reichweite des DRM⁺-Senders alleine, sondern auch die Frage nach der Robustheit des DRM⁺-Empfangs im UKW-FM-Umfeld. Die heute noch offenen Fragen müssen beantwortet werden, um schlussendlich gesicherte Planungsgrundlagen für DRM⁺ zu schaffen. Die Autoren beabsichtigen daher, sich speziell den Fragen nach der realen Versorgungsreichweite von DRM⁺ und den möglichen Planungsansätzen in naher Zukunft zu widmen. Sie beabsichtigen, diese Aufgabe systematisch sowohl im Labor als auch im freiem Feld anzugehen. Die geplanten Arbeiten beinhalten insbesondere

- die Vermessung der Sende- und Empfangseinrichtung in Bezug auf Kernparameter wie z.B. Linearität, Phasenrauschen, Rauschzahl und Dekodergüte,
- die Definition geeigneter Planungsparameter zum DRM⁺-Empfang, z.B. Empfängerempfindlichkeit, zulässige Fehlerraten bzw. von 'Out-of-Service'-Kriterien,
- die Messung der Schutzabstände für DRM⁺ gegenüber dem FM-Rundfunk anhand der oben definierten Kriterien.

Die erhaltenen Ergebnisse sollen in einem für 2009 geplanten Feldversuch die Parameter validiert und ergänzt werden, um die Performanz des DRM⁺-System umfassend bewerten zu können. Basierend auf den geplanten Labor- und Feldmessungen wird es hoffentlich möglich werden, konkrete Funknetzplanungen für DRM⁺ durchzuführen, die nicht mehr nur auf reinen systemtheoretischen und/oder rein simulativen Ergebnissen fußen.

Ganz zum Schluss sei angemerkt, dass dieses Dokument bewusst nur technische Aussagen und Bewertungen rund um den durchgeführten Feldversuch trifft. Ausführungen zu Aktivitäten, die vorwiegend das DRM-Konsortium betreffen, z. B.

- das Vorantreiben der Standardisierung,
- eine Liste mit Richtlinien, die zur Einführung von DRM⁺ angepasst und/oder modifiziert werden müssen,
- Reduktion des Crestfaktors,
- Transmit-Diversity aufgrund des oftmals stark selektiven Fadings,
- DRM⁺-Hybridmodus,

oder zu ersten Planungsansätzen sowie Ideen zu einem DRM⁺-Hybridmode, die zum Zeitpunkt der Drucklegung des Dokuments bereits vorliegen, sind in [SSL08, SSFH08] zu finden. Dort wird auch auf nicht-technische Aspekte abgehoben, z. B. auf Marktchancen, Regulierung oder ein denkbarer optimistischer Zeitplan zur Regeleinführung von DRM⁺.

In diesem Sinne: DRM⁺ bleibt ein spannendes Thema ...

Literaturverzeichnis

- [Bei95] BEICHELT, Frank: *Stochastik für Ingenieure*. BG-Teubner-Verlag, Stuttgart, 1995. – ISBN 3-519-2987-1
- [Ber05] BERNHARDT, Frank: *Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystems auf OFDM-Basis im UKW-Frequenzbereich*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, November 2005
- [Eur06] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI EN 302018-1 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
- [Fei05] FEILEN, Michael: *Objektorientierte Implementierung eines Sendesystems für Digital Radio Mondiale*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, Oktober 2005
- [fsp] *Rohde & Schwarz, FSP30 – Betriebshandbuch, 2 Bände. : Rohde & Schwarz, FSP30 – Betriebshandbuch, 2 Bände*
- [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)
- [HHE08] HEYERMANN, Thomas ; HEIDENREICH, Bernd ; EITELMANN, Udo: *HF-Messungen der ZPT bezüglich Störmöglichkeiten des Pilotversuchs DRM⁺ der FH Kaiserslautern*. 2008
- [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)
- [Ins04] INSTITUTE, European Broadcasting Union & European Telecommunications S. ; EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (Hrsg.): *ETSI ES 201 980 – Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification*. V2.1.1. 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE: European Telecommunications Standards Institute, Juni 2004
- [Ins08] 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 (draft). 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE: European Telecommunications Standards Institute, Februar 2008
- [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.468-4: Measurement of audio-frequency noise voltage level in sound broadcasting. (1986, 2002)
- [ITU02c] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.559-2: Objective measurement of radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting. (1986, 2002)
- [ITU02d] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.641: Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting. (1986, 2002)
- [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
- [Mäu88] MÄUSL, Rudolf: *Analoge Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1988
- [Sch03] SCHIRA, Josef: *Statistische Methoden der VWL und BWL. Theorie und Praxis*. Pearson Education Deutschland GmbH, München, 2003. – ISBN 3–8273–7041–8
- [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.: Laboruntersuchung über Versorgungskriterien für eine UKW-FM-Monoabstrahlung / Fachhochschule Kaiserslautern, LMK Rheinland-Pfalz. 2008
- [SSFH08] STEIL, A. ; SCHAD, F. ; FEILEN, M. ; HEDRICH, E.: Leaving the dead-end street: New ways for the digitisation of the VHF-FM sound broadcasting with DRM⁺. Pt. I: DRM⁺ Field Trial: Concept, Setup and First Results. In: GERHÄUSER, H. (Hrsg.) ; Fraunhofer Gesellschaft für Integrierte Schaltungen (IIS) (Veranst.): *9th Workshop Digital Broadcasting* Fraunhofer Gesellschaft für Integrierte Schaltungen (IIS), 2008
- [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
- [Zöf03] ZÖFEL, Peter: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Im Klartext*. Pearson Education Deutschland GmbH, München, 2003. – ISBN 3–8273–7062–0

Abbildungsverzeichnis

3.1	Lage und Antennendiagramme der Sender in Kaiserslautern	14
3.2	Fotos der Senderstandorte	14
3.3	Blockschaltbild des Senders „Am Kaiserberg“	15
3.4	Gemessene Charakteristika des Ausgangsfilters von TX FH	16
3.5	Steuerinterface des Senders „Am Kaiserberg“	17
3.6	Innenansicht des Senders Rotenberg	18
3.7	Steuersoftware des Senders Rotenberg	18
3.8	Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des Dauersinus am Senderausgang von TX RB	19
3.9	Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des Klangbeispiels am Ausgang von TX RB	20
3.10	Hubverteilung (a) und MPX-Spektrum (b) des farbigen Rauschens am Ausgang von TX FH	21
3.11	DRM ⁺ -Ausgangsspektrum (a) und Verhalten des Senders bei Notabschaltung (b)	22
3.12	CCDF des DRM ⁺ -Sendesignals	23
3.13	Der DRM ⁺ -Empfängerprototyp	26
3.14	Blockschaltbild des DRM ⁺ -Empfängers	26
3.15	Testfahrt vom 19.3.2008 zur Auswahl der stationären Messpunkte	27
3.16	Testfahrt vom 18.3.2008 zur Auswahl der stationären Messpunkte	28
3.17	Feldstärkedifferenz der beiden Sender gem. Testfahrten vom 18.& 19.3.2008	28
3.18	Histogramme der absoluten Feldstärken bei den Testfahrten vom 18./19.3.2008	29
3.19	Histogramm der Feldstärkepegeldifferenz ($E_{FH} - E_{RB}$)/dB bei den Testfahrten	29
3.20	Histogramm der Feldstärkepegeldifferenz der Messpunkte, geplante und tatsächlich vorhandenen Pegeldifferenzen bezogen auf die Anzahl aller Messpunkte (18)	30
3.21	Lage und Zordnung der stationären Messpunkte	31
3.22	Mobile Messstrecke mit eingezeichneten stationären Messpunkten	33
4.1	Lage der BOS-Relaisstationen	35
5.1	Richtdiagramm der Antenne zum UKW-Stereoempfang und zu den stationären Messungen, aus: [Gem82]	36
5.2	Größen bei stationären Messungen – Prinzipdarstellung	38
5.3	Blockschaltbild und Vorgehensweise zur ACPR-Messung	40
5.4	Aufbau zur Erfassung der Nachbarkanalleistung I_k im Labor	42
5.5	Messaufbauten im Messbus der BNetzA	43
5.6	Messbus der BNetzA, Außen- und Innenansicht	43
5.7	Beispielspektrum an Messpunkt 4	44
5.8	FM-Versorgung von TX FH alleine gem. [Gem82]	46
5.9	Versorgung von TX FH 87,6 MHz gestört durch TX RB 87,8 MHz gem. [Gem82]	47
5.10	Versorgung von TX RB 87,8 MHz gem. [Gem82]; TX FH eingeschaltet	48
5.11	Versorgung des SR1, 88,0 MHz gem. [Gem82]; nur TX FH eingeschaltet	49
5.12	Versorgung des SR1, 88,0 MHz gem. [Gem82], TX FH und TX RB eingeschaltet	50

5.13	Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, SINAD	52
5.14	Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, S/N	52
5.15	Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, Darstellung von SINAD über der Störspannung U_{stoer}	53
5.16	Stationäre Aufnahme mit Variation von Störleistung und Frequenzversatz, Darstellung von S/N über der Störspannung U_{stoer}	53
5.17	Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,6 MHz	55
5.18	SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,6 MHz	56
5.19	Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,7 MHz	57
5.20	SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,7 MHz	58
5.21	Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,8 MHz	59
5.22	SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,8 MHz	61
5.23	SINAD und S/N über C/I (vergrößert), Nutzfrequenz: 87,8 MHz	62
5.24	Übersicht der stationären Messungen, Nutzfrequenz: 87,9 MHz	63
5.25	SINAD (a) und S/N (b) über C/I, Nutzfrequenz: 87,9 MHz	64
5.26	Ansicht von Messpunkt 19 und 20	65
5.27	SINAD-Empfindlichkeit der unterschiedlichen Empfänger im Labor	65
5.28	S/N-Empfindlichkeit der unterschiedlichen Empfänger im Labor	66
5.29	SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,6 MHz	67
5.30	S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,6 MHz	68
5.31	SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,7 MHz	69
5.32	S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,7 MHz	70
5.33	SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,8 MHz	71
5.34	S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,8 MHz	72
5.35	SINAD-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,9 MHz	73
5.36	S/N-Verläufe von drei unterschiedlichen Empfängern an den Messpunkten 19 & 20; Nutzfrequenz: 87,9 MHz	74
5.37	Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen S/N und SINAD	76
6.1	Bewertungsparameter „Durchschnittlicher HF-Pegel“ zur Bildung der Audemat-Qualitätsbewertung	78
6.2	Bewertungsparameter „Pilotton“ zur Bildung der Audemat-Qualitätsbewertung	79
6.3	Blockschaltbild der Messeinrichtung im mobilen Szenario	81
6.4	Mobiles Messsystem FH KL, Version Sommer 2008	82
6.5	Aussen- und Innenansicht des lfm-Busses	82
6.6	Empfangsfeldstärkepegel von TX FH entlang des Messroute	85
6.7	Empfangsfeldstärkepegel von TX RB entlang des Messroute	86
6.8	Differenz der Feldstärkepegel beider Sender entlang des Messroute	87
6.9	SINAD von TX FH, FM, im ungestörtem Fall	89
6.10	SINAD von TX RB, 87,8 MHz im ungestörtem Fall	90
6.11	Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,6 MHz	91
6.12	Kumulierte Häufigkeit der Rasterwerte aus Abb. 6.11	92
6.13	Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,7 MHz	93
6.14	Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,8 MHz	95

6.15	Absolute SINAD-Werte, nur TX RB in Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz	97
6.16	Absolute SINAD-Werte, TX FH im FM-Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz	98
6.17	Absolute SINAD-Werte, TX FH im DRM ⁺ -Betrieb, Nutzfrequenz (TX RB): 87,8 MHz	99
6.18	Auswertung der SINAD-Differenzen im mobilen Szenario, 87,9 MHz	100
6.19	Empfangenes Nutzsignal, 87,9 MHz am Routenstartpunkt gestört durch FM (a) und DRM ⁺ (b)	101
6.20	Fahrt 1: Darstellung der Qualitätsbewertung durch das Audemat-System	102
6.21	Fahrt 1: Darstellung der absoluten SINAD-Werte	103
9.1	Blockschaltbild des Messaufbaus (a) und Aussenansicht des FH-eigenen Mess- busses (b)	112
9.2	Übersichtskarte der Ergebnisse zum Reservetest, s. a. Tab. 9.1	114

Tabellenverzeichnis

3.1	Standortdaten der verwendeten Sender	13
3.2	Modulationsparameter von DRM ⁺	23
3.3	Liste der verwendeten FM-Empfänger	25
4.1	Nutzfeldstärken an den Messpunkten bei den BOS-Messungen	34
5.1	Ergebnis der ACPR bzw. I_k -Messung	41
5.2	Hörproben 87,6 MHz	55
5.3	Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,6 MHz	56
5.4	Hörproben 87,7 MHz	57
5.5	Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,7 MHz	58
5.6	Hörproben 87,8 MHz	60
5.7	Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,8 MHz	61
5.8	Zuordnung von C/I-Werten zu Messpunkten; Nutzfrequenz: 87,9 MHz	64
5.9	Pegel bei der stationären Untersuchung mit drei unterschiedlichen Empfängern	66
5.10	Ergebnisse der statistischen Auswertungen der stationären Messungen: Korrelationskoeffizient r von S/N und SINAD im Fall (a) eines FM-Störers sowie (b) eines DRM ⁺ -Störers.	77
6.1	Senderkonstellationen bei den mobilen Messungen und Dateizuordnungen	83
6.2	Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,6 MHz	92
6.3	Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,7 MHz	94
6.4	Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,8 MHz	96
6.5	Links & Dateinamen zu lfm-Karten; Nutzfrequenz: 87,9 MHz	101
6.6	Zuordnung der SINAD-Werte zu $s \in \mathcal{S}$	104
6.7	Kontingenztafel	104
6.8	Ergebnisse der statistischen Auswertungen: Unabhängigkeitstest	106
6.9	Ergebnisse der statistischen Auswertungen: Rangkorrelationskoeffizient	107
9.1	Wertetabelle zum Reservetest	114