

# Verträglichkeitsuntersuchungen von OFDM- basierten Rundfunkformaten im UKW-FM-Band

F. Schad, A. Steil, M. Kreutzer (FH Kaiserslautern)

J. Lehnert (LMK Rheinland-Pfalz), M. Rosenbaum (TU Kaiserslautern)

Th. Hasenpusch, R. Effinger (Bundesnetzagentur)

H. Günzel (DFS GmbH)

- 
- Einleitung, Zweck der Untersuchungen, Gültigkeit
  - Untersuchte Sendeformate, betroffene Funkdienste
  - Signalerzeugung der Nutz- und Störsignale
  - Messaufbauten, Allg. Messablauf
  - Messergebnis: FM, DRM120, HD-Radio™ vs. FM-Rundfunk (Audio & RDS)
  - Messergebnis: FM, DRM120, HD-Radio™ vs. BOS-Funk
  - Messergebnis: FM, DRM120, HD-Radio™ vs. ILS-Localizer
  - Messergebnis: FM, DRM120, HD-Radio™ vs. VOR
  - Zusammenfassung

## Einleitung, Zweck der Messungen, Gültigkeit

- **Hintergrund:** Geplante Versuchsübertragungen zu digitalem Rundfunk im UKW-Band
- **Notwendigkeit** von **Verträglichkeitsuntersuchungen** vor Abstrahlung!
- Definition des Begriffes „**Schutzabstand**“:  
Leistungsverhältnis zweier Signale in Abhängigkeit der Frequenzdifferenz, bei dem das Störkriterium des zu schützenden Dienstes gerade noch erfüllt ist.
- **Untersuchte Systeme:**
  - DRM120
  - HD-Radio™
- **Betroffene Systeme:**
  - UKW-Rundfunk (87,5 – 107,9 MHz)
  - Behördenfunk BOS im 4-Meter-Band (74,0 – 85,0 MHz)
  - Flugfunk (hier: 108,0 – 117,95 MHz, VOR & ILS Localizer)
- Die **Reaktion realer Empfänger** auf OFDM-Signale ist **nicht vorhersagbar**.  
Ohne aufwendige Messungen ist eine **zuverlässige Funknetzplanung** unmöglich.
- **Messung** der Schutzabstände erfolgt **konform zu** den einschlägigen **Vorschriften**.
- **Achtung!** Die dargestellten Ergebnisse sind aufgrund der geringen Empfängeranzahl **Anhaltspunkte für Versuchssendungen** und **KEINE** absoluten Zahlen zur Verwendung als **Planungsgrundlage des Regelbetriebs!**

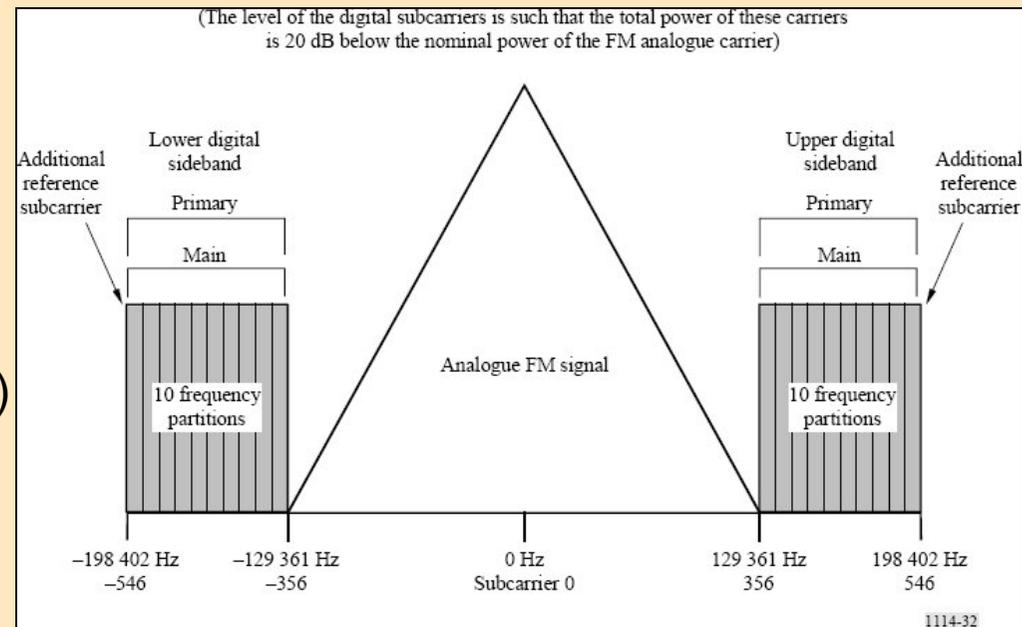
## Untersuchte Sendeformate – DRM120

DRM+ - ähnliches Sendeformat der FH Kaiserslautern

- Entstanden im Rahmen einer Vorstudie zur Machbarkeit rasterkonformen OFDM-basierten Rundfunks im UKW-Band
- Modulationsparameter (Auszug):
  - Modulation: COFDM, 16 QAM
  - Anzahl d. Subträger: 111
  - Trägerabstand: 857 Hz
  - Bandbreite: 100 kHz (Rasterkonform!)
  - Crestfaktor: 11.5 dB (Messwert)
- Details unter <http://www.fh-kl.de/~drm>

## Untersuchte Sendeformate – HD-Radio™

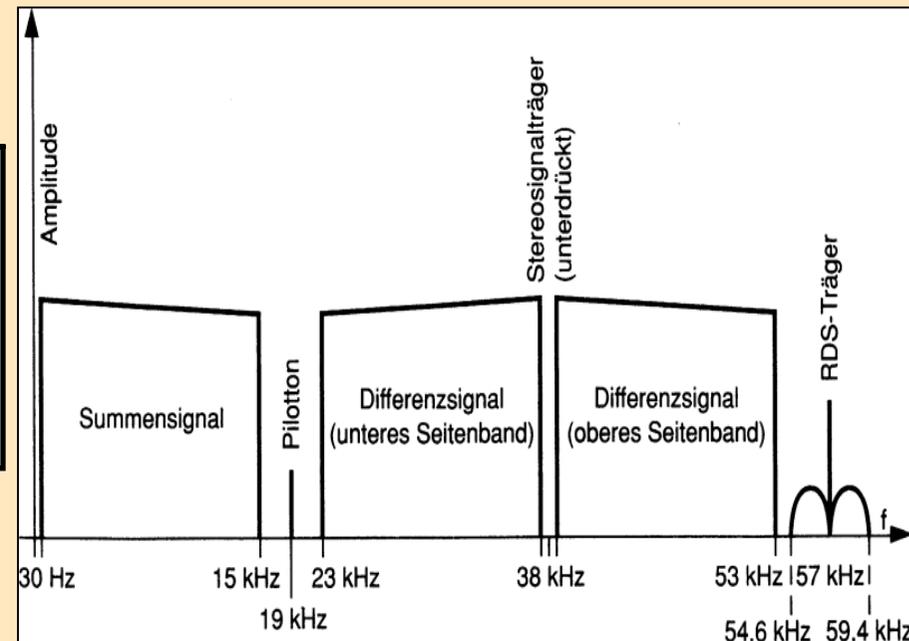
- Von der US-amerikanischen Firma *Ibiquity* entwickeltes Verfahren, auch **IBOC DSB** (**I**n-**B**and, **O**n **C**hannel **D**igital **S**ideband) genannt
- Hier untersucht: Hybridbetrieb, d.h. simultane analoge und digitale Übertragung:
  - Beibehaltung des bisherigen Übertragungsformats im FM-Rundfunk
  - Wechsel zur ausschließlich digitalen Modulation möglich
  - Addition der digitalen Seitenbänder  $\pm 130$  kHz vom FM-Träger entfernt
- Modulationsparameter:
  - Modulation: COFDM, QPSK
  - Anzahl d. Subträger: 2 x 191
  - Trägerabstand: 363 Hz
  - Bandbreite: 2x 69 kHz
  - Crestfaktor: 8.5 dB (Messwert)



## Betroffene Sendeformate, Empfängererauswahl: FM-Rundfunk

- Sendeformat: Stereoübertragung, 50  $\mu$ s Preemphasis, mit RDS
- Schutzabstände und Messverfahren: ITU BS.641, BS.412-9
- Messung des Verhaltens von **6 Empfängern**, Auswahl aus den Kategorien Heimempfänger, Autoradio, portabler Empfänger
- JVC CA-MX55RMB als repräsentativster verfügbarer Empfänger gewählt, da die Kurve aus 412-9 am besten nachgebildet wird
- Pilotton: 19 kHz, Hub: 6,7 kHz
- Störkriterium FM:

- Abfall des gewichteten S/N von 56 dB auf 50 dB
- Referenz: 500 Hz, 75 kHz Hub
- RDS: Auftreten von Bitfehlern



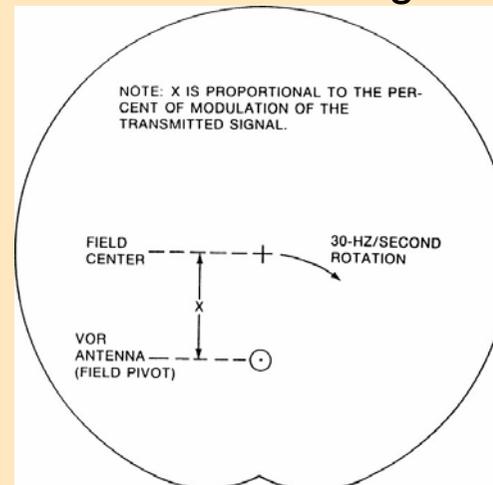
## Betroffene Sendeformate, Empfängererauswahl: BOS

- Insgesamt 6 Schmalband-FM / BOS-Empfänger vermessen
- Repräsentative Auswahl von Hand- und Festempfängern
- Messung nach FTZ 17TR2049
- Kanalraster: 20 kHz
- Störkriterium BOS:

- (1) SINAD von 20 dB wird durch Störsignal verschlechtert
- (2) Desensibilisierung der Rauschsperr: Präsenz eines starken Störsignals verhindert das Öffnen der Rauschsperr, obwohl ein ausreichender Nutzpegel vorhanden ist, um - im ungestörtem Fall – den Empfänger „freizuschalten“
- (3) Referenzsignal:  
FM-Modulation des Trägers mit einem 1 kHz-Sinuston, Hub: 2,4 kHz

## Betroffene Sendeformate, Empfängerenauswahl: VOR

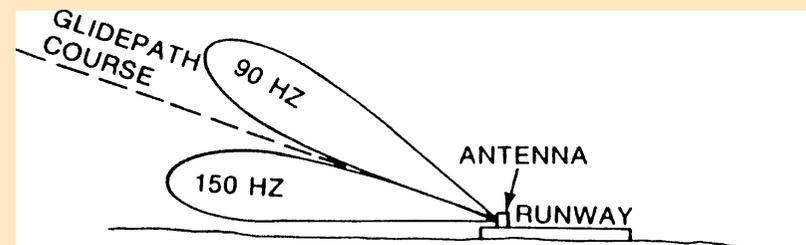
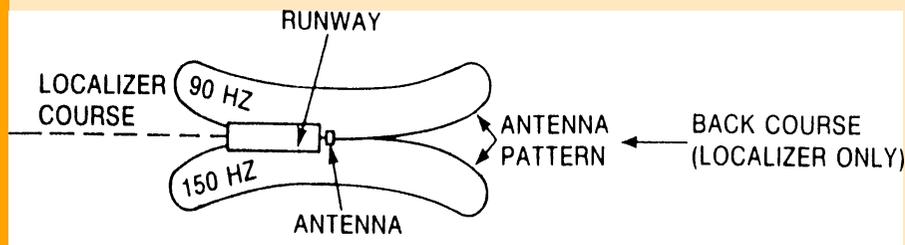
- VOR bedeutet VHF Omnidirectional Range
- Navigationsfunksystem mit 100 kHz Kanalraster
- Kombination aus AM und FM
- Übertragungsverfahren:
  - FM-Modulation eines 9960 Hz Unterträgers mit einem variablen 30 Hz Signal (Referenz), Abstrahlung durch Rundstrahler
  - AM-Modulation des Hauptträgers mit variablem 30 Hz-Signal, Abstrahlung durch eine mit 30 Hz rotierende Antenne
  - Auswertung der Phasendifferenz beider Signalanteile zur Detektion der horizontalen Position



Antennendiagramm eines VOR-Senders

## Betroffene Sendeformate, Empfängererauswahl: ILS

- ILS bedeutet **I**nstrument **L**anding **S**ystem
- Kanalraster: 100 kHz
- 2 Sender: „Localizer“ (horizontal, ab 108,1 MHz) und „Glidescope“ (vertikal, ab 329,15 MHz): Die Empfänger erkennen über diese Angaben die Abweichungen vom vorgegebenen Landepfad
- Hier untersucht: Localizer
- Übertragungsverfahren:
  - AM-Modulation zweier Sinustöne (150 und 90 Hz)
  - Aussendung jeweils beider Komponenten
  - Die Differenz der empfangenen Modulationsgrade gibt die Abweichung vom Sollkurs an (DDM: Difference in Depth of Modulation)



Antennendiagramme von ILS-Localizer und ILS-Glidescope-Sendungen

## Betroffene Sendeformate, Empfängerenauswahl: VOR/ILS

- Empfänger: Rockwell-Collins ILS/VOR/MB-900
- Testsignale und Störkriterien lt. ITU-R IS.1140 u. 1009:
  - **VOR**: Modulationsgrad: 30%, Phasendifferenz: 0°  
(Kurs: 0°, direkt auf den Sender zu)
  - **ILS**: Testsignal: Modulationsgrad der 90- und 150 Hz-Träger: 20%;  
nomineller Offset vom idealen Gleitweg: 0,093 DDM

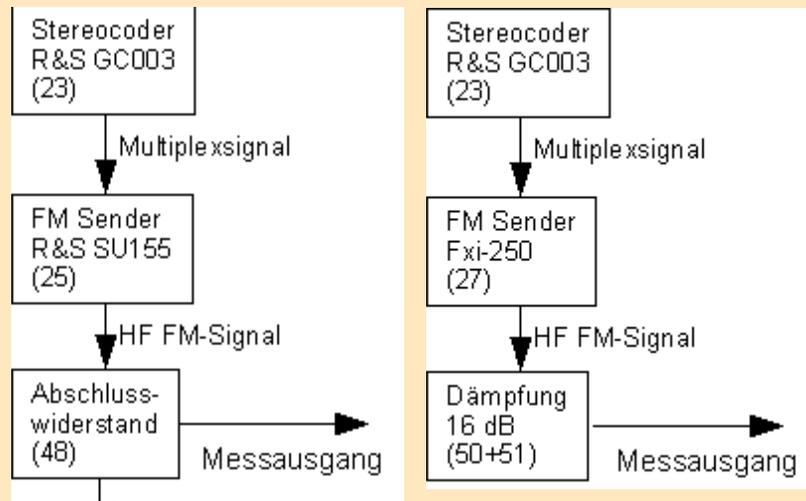
- Störkriterium VOR:

- (1) Maximaler Anzeigefehler der Kursabweichung von 0,3° wird überschritten
- (2) „Flaggen“-anzeige zeigt Ungültigkeit des Signals

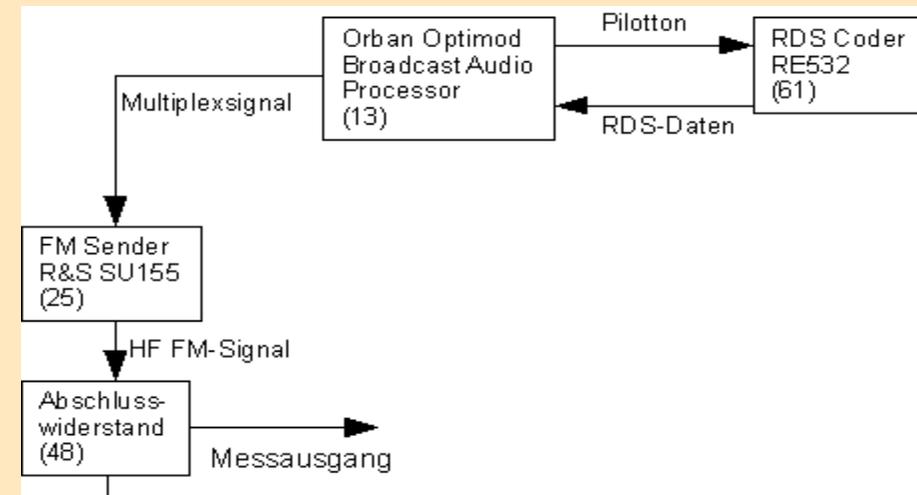
- Störkriterium ILS:

- (1) Max. Kursabweichung von 7% bei einer Kursdifferenz von 2/3 der max. Auslenkung wird überschritten
- (2) „Flaggen“-anzeige zeigt Ungültigkeit des Signals

## Signalerzeugung: Zu schützenden Signale



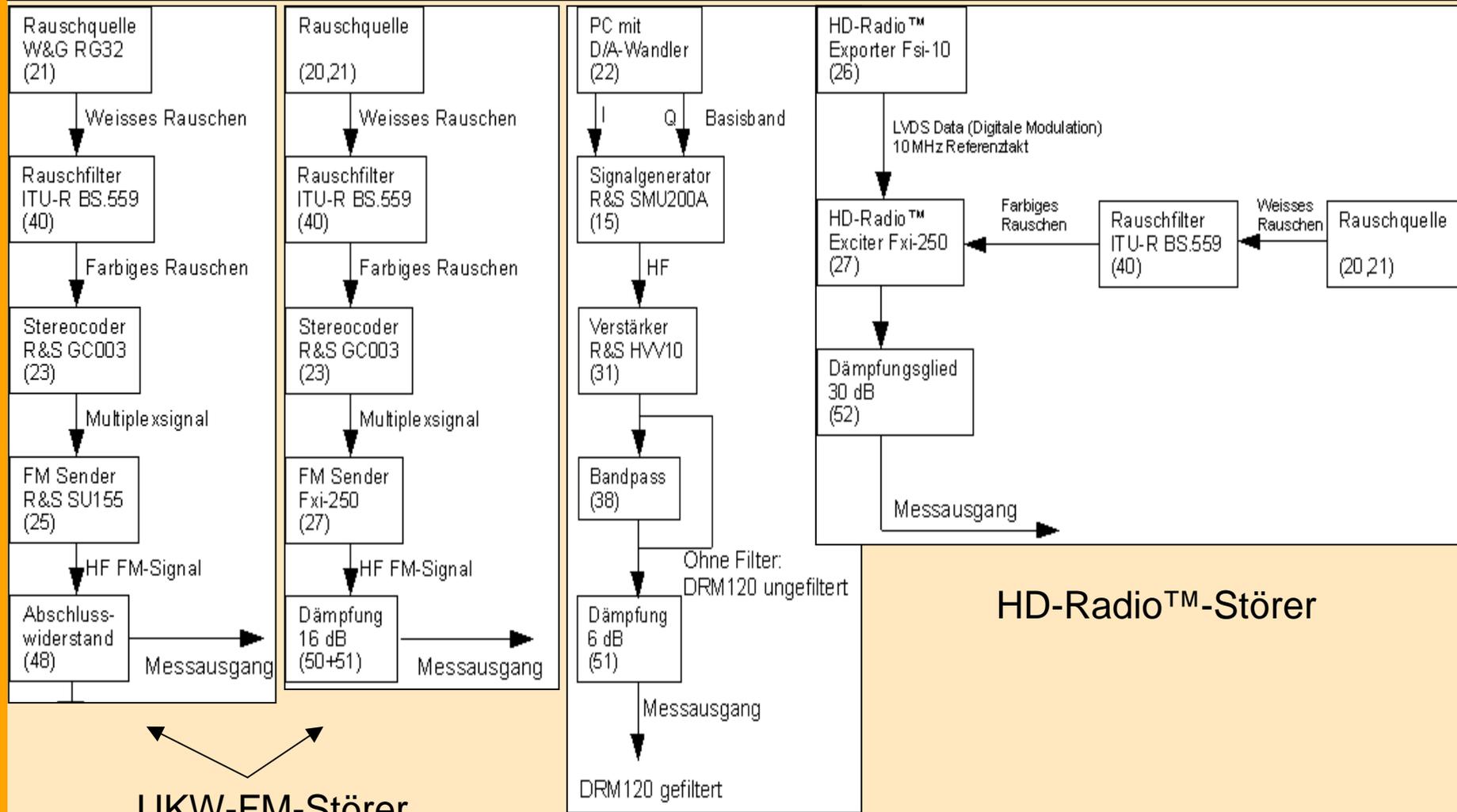
Erzeugung der FM-Rundfunksignale zur Messung der Schutzabstände bei stereophoner Audioübertragung



Erzeugung der FM-Rundfunksignale zur Messung der Schutzabstände bei RDS-Datenübertragung

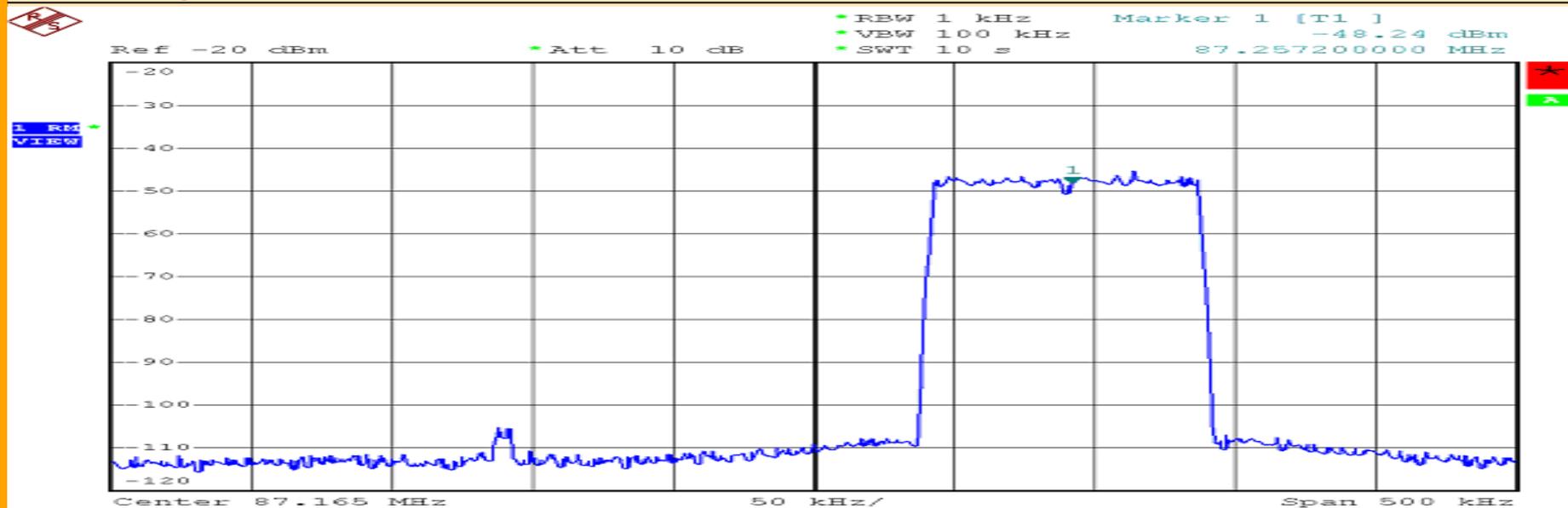
- Generator für BOS-Signale: R&S TX/RX Testrack CMS48
- Generator für ILS- und VOR-Signale: R&S Signalgenerator SME03

## Signalerzeugung: Störsignale

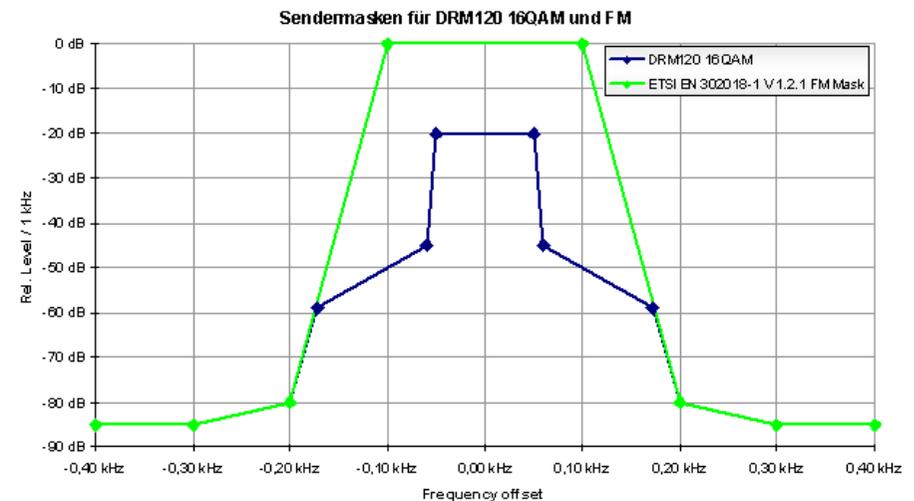


DRM120-Störer, 3dB-Bandbreite des Filters: 1 MHz

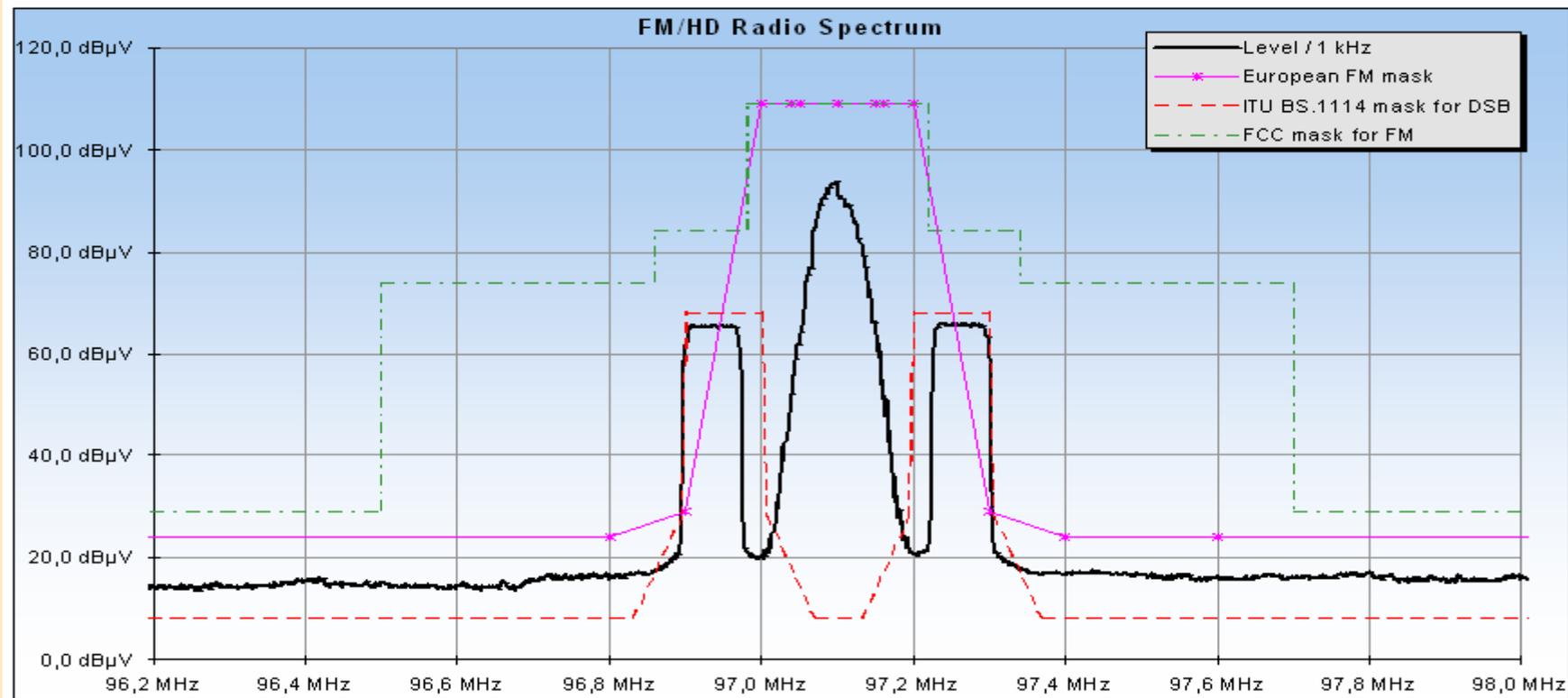
## Störspektren: DRM120



- Messbeispiel:  
DRM120 vs. BOS Schmalband-FM  
bei Beginn der Störung
- Dynamik DRM120  $\geq 75$  dB (Messwert)
- Sendermaske kompatibel mit FM-Maske  
ETSI-EN 302 108-1 V1.2.1



## Störspektren: HD-Radio™



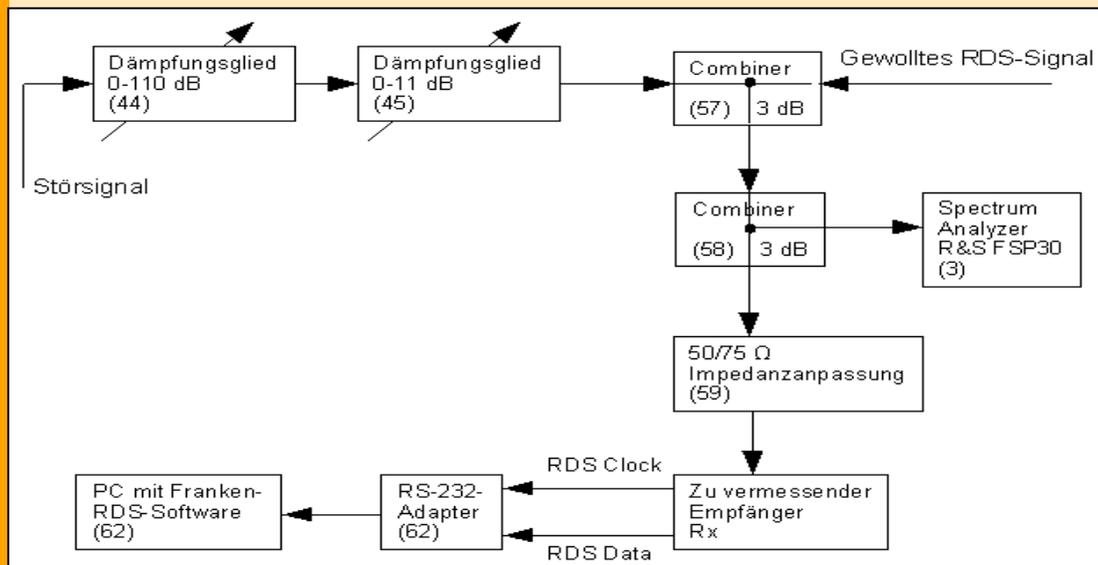
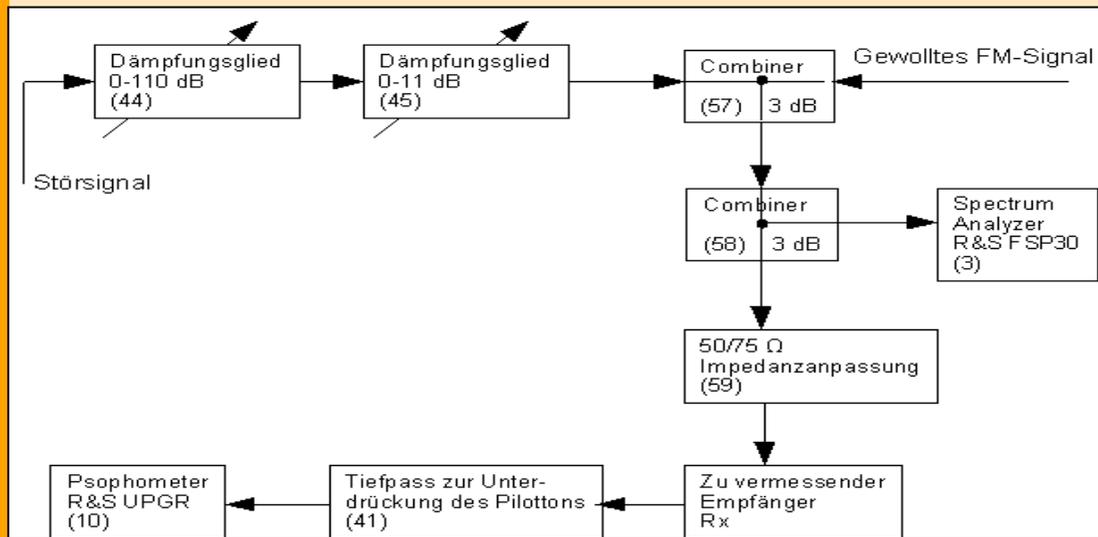
Spektrumsmaske: Kombination aus

- ITU-R BS.1114 (Digitale Seitenbänder)
- ETSI EN 302018-1 V1.2.1 (FM)
- Zusätzlich: FCC 47CFR73.317 (FM in ITU-Region II)

### Gemessenes HD-Radio™- Spektrum

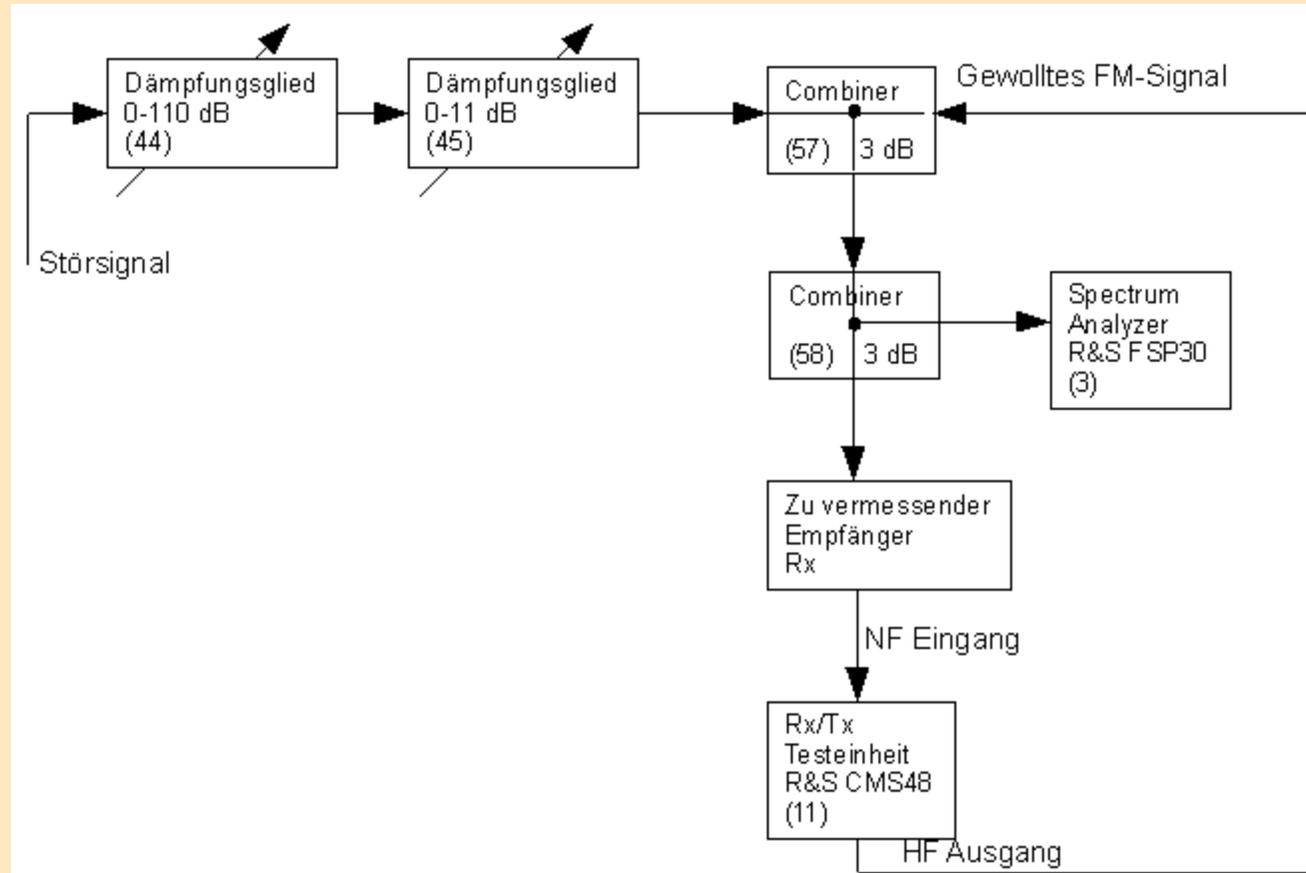
(Zusammenfassung von 2  
Messungen des unteren und  
oberen Seitenbandes  
mit unterschiedlichen Filtern)

## Messaufbau: Schutzabstände FM-Dienste, Allgemeines



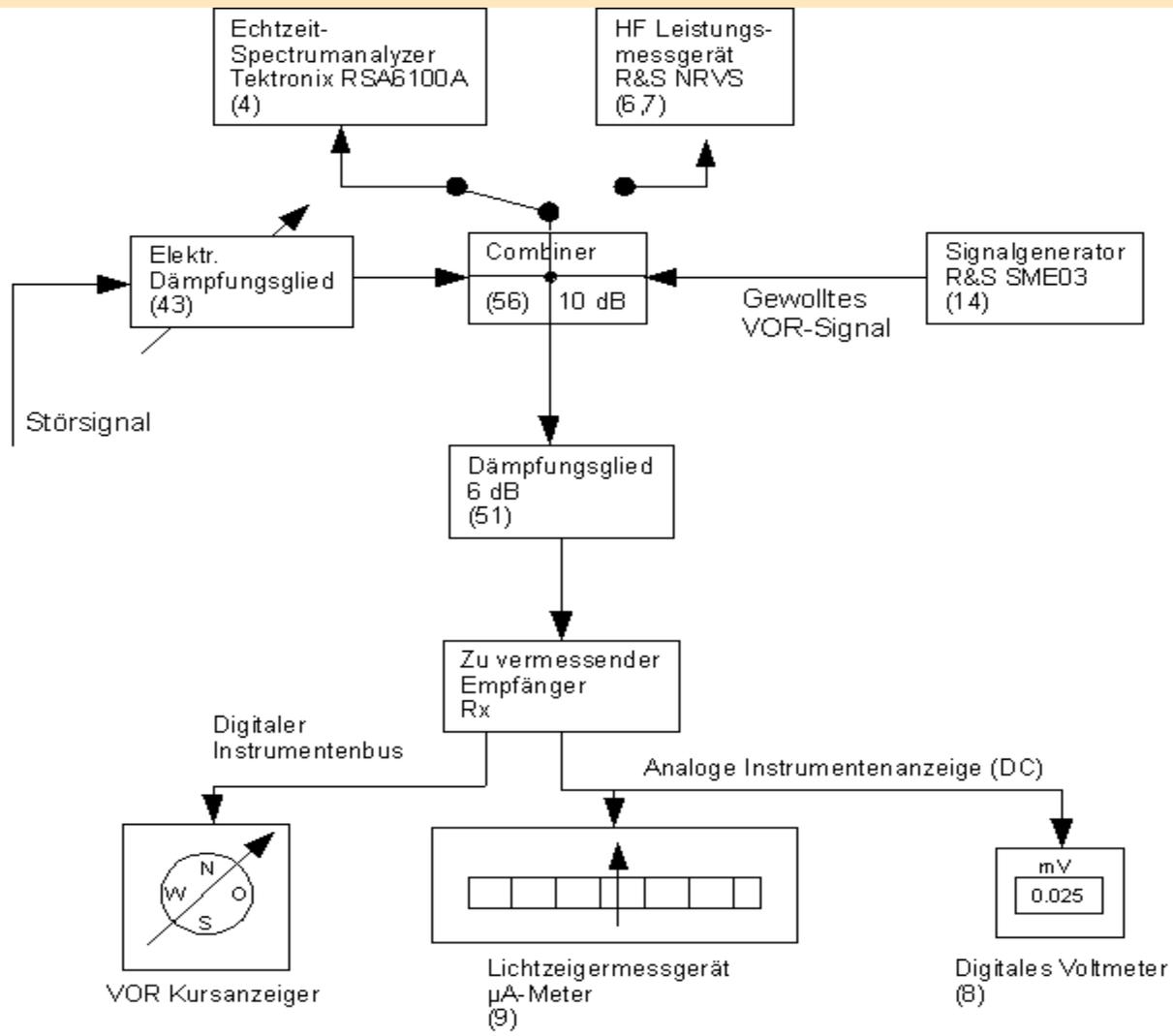
- Aufbau (FM) gem. **ITU-R BS.641**
- **Allgemein** bei allen Messungen:
  - Kalibrierung der Signale nach Vorschrift
  - Nutzeingangspegel ca. 10 dB über Mindesteingangspegel bzw. Eingangspegel nach Vorschrift
  - Ermitteln der jew. max. verfügbaren Kanalleistung von Stör- und Nutzsender
  - Erhöhen des Störpegels mit variablen Dämpfungsgliedern, bis das jeweilige Störkriterium erfüllt wird
  - Die Differenz der jew. HF-Leistungen ist der **Schutzabstand**

## Messaufbau: Schutzabstände BOS



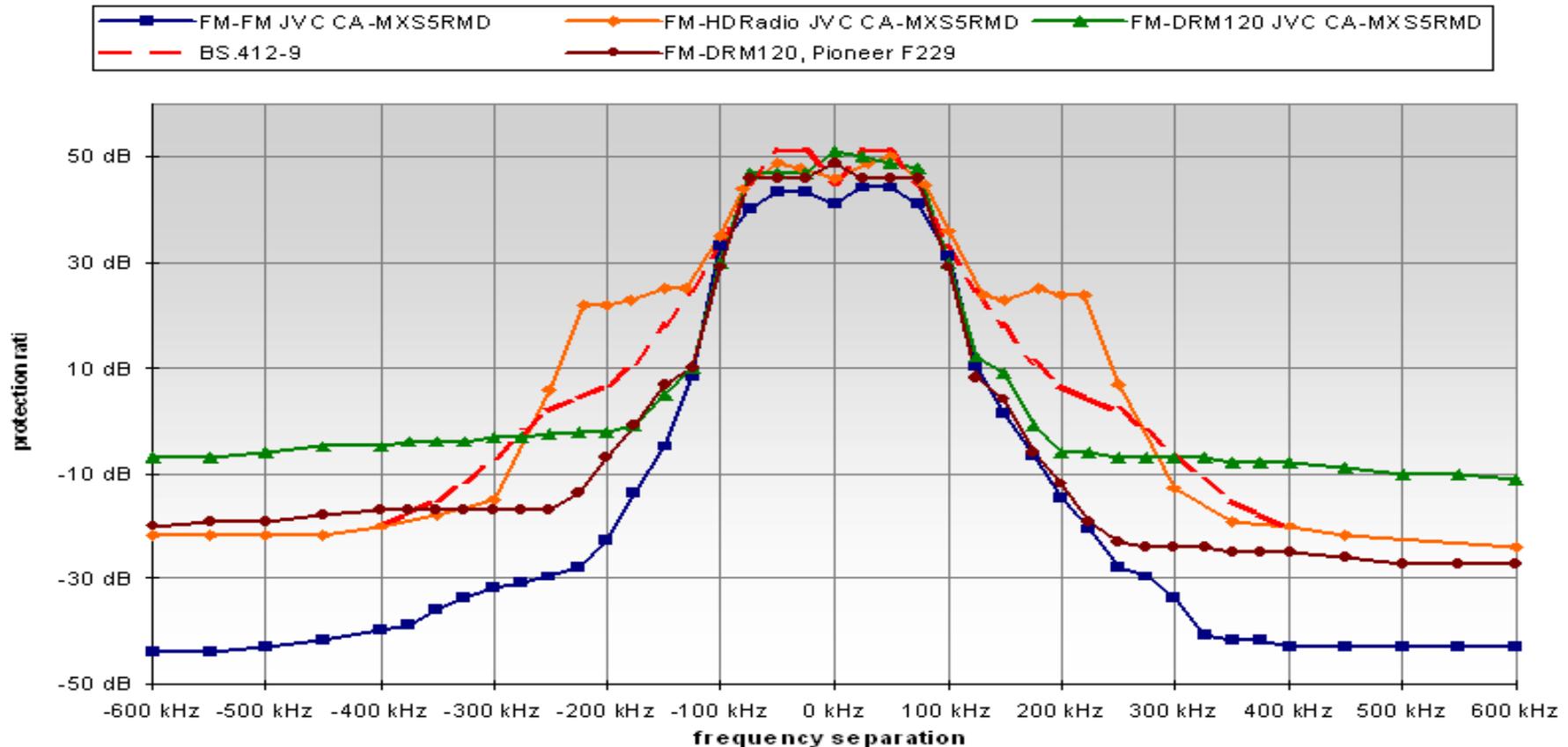
- Messung nach Kriterien der **FTZ 17TR2049**
- Prüfsender/Auswertung des empfangenen Nutzsignals im R&S CMS48 vereint

## Messaufbau: Schutzabstände VOR/ILS Localizer



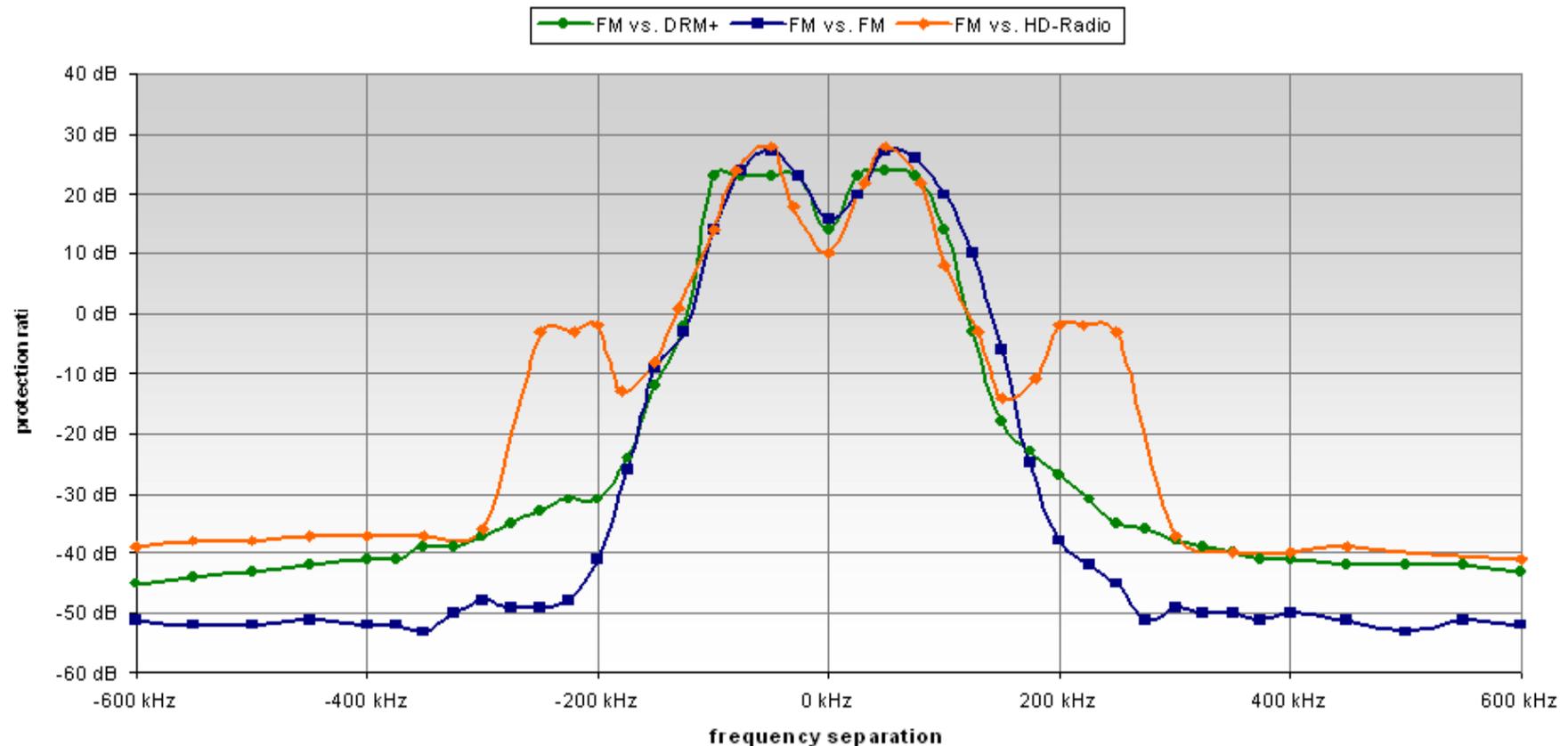
- Aufbau gem. ITU-R IS.1140
- **Kursanzeiger** zur Auswertung der **Flaggenstörung**
- **Lichtzeigermessgerät** zur *qualitativen* Beobachtung der Schwankungen der empf. **Kursabweichung**
- **Voltmeter** zur *quantitativen* Auswertung der **Kursabweichung**

## Messergebnis: Schutzabstände FM-Rundfunk



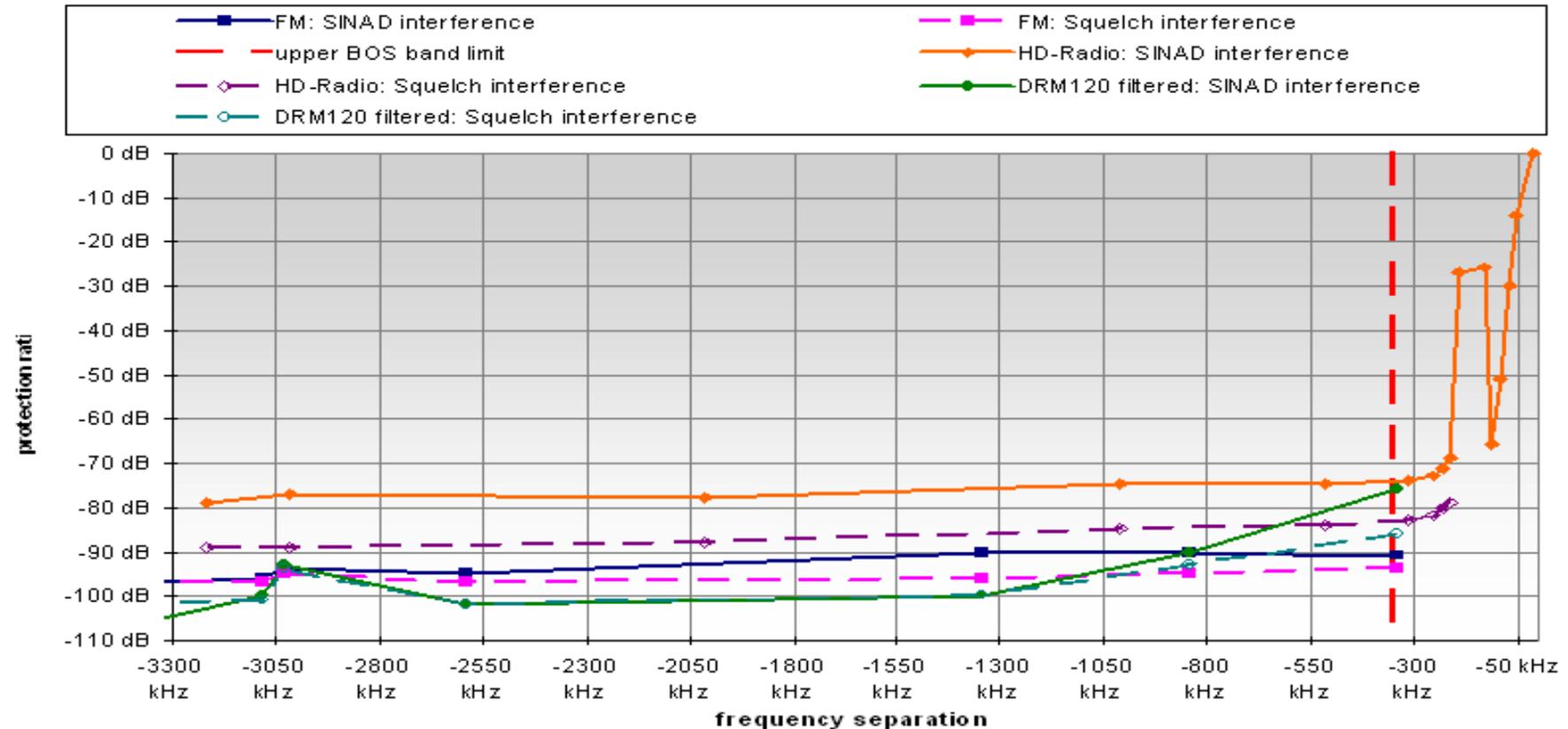
- Auszug aus 7 vermessenen Empfängern
- Allgemein: Bei DRM+ starke Streuung der Werte ab  $\pm 200$  kHz  $\rightarrow$  Crestfaktor!
- Nutzeingangspegel: -54 dBm (JVC); -51 dBm (Pioneer)

## Messergebnis: Schutzabstände RDS



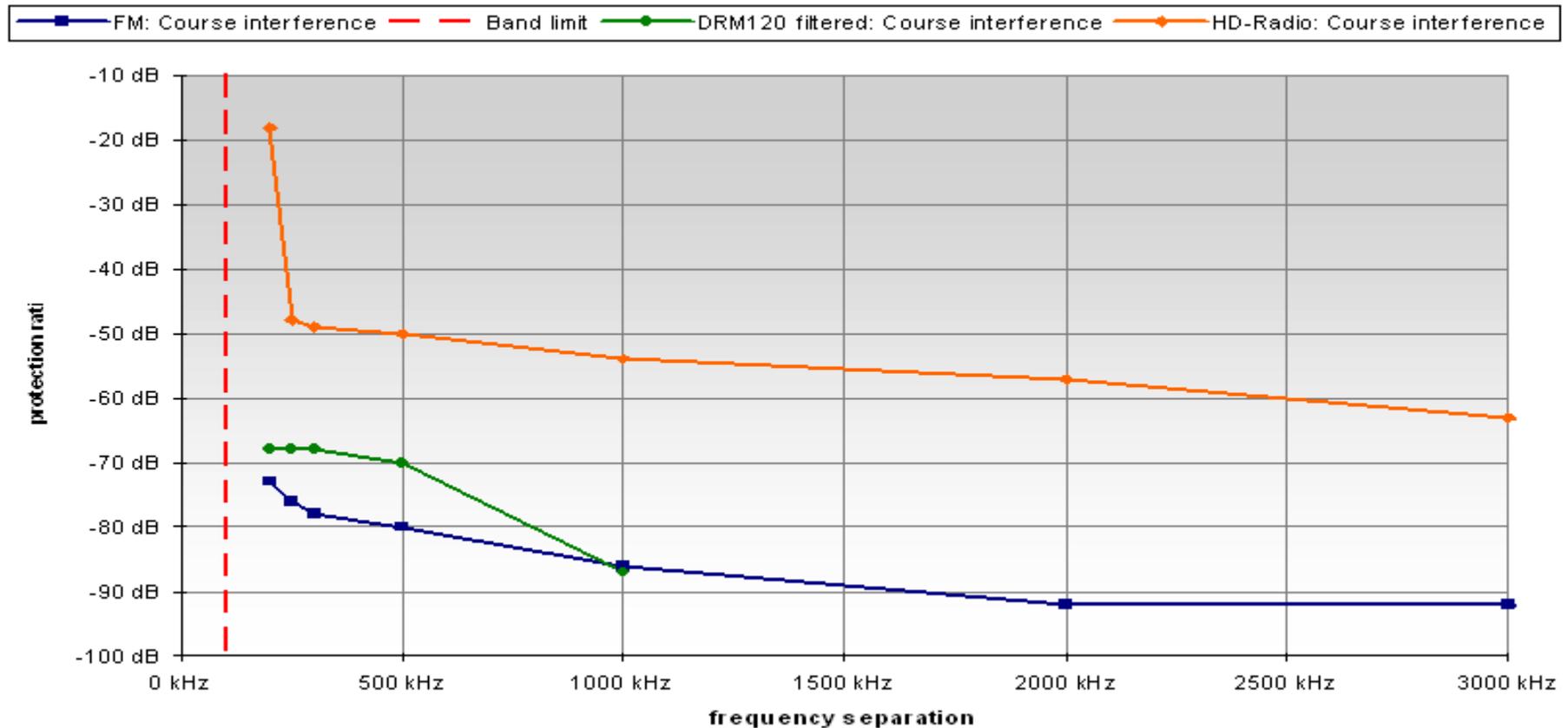
- Empfänger: BMW Business RDS, Nutzeingangspegel  $-46$  dBm
- Bei allen untersuchten Empfängern wurde festgestellt:  
Beim Auftreten der ersten RDS-Fehler ist die Audioübertragung schon längst gestört!

## Messergebnis: Schutzabstände BOS



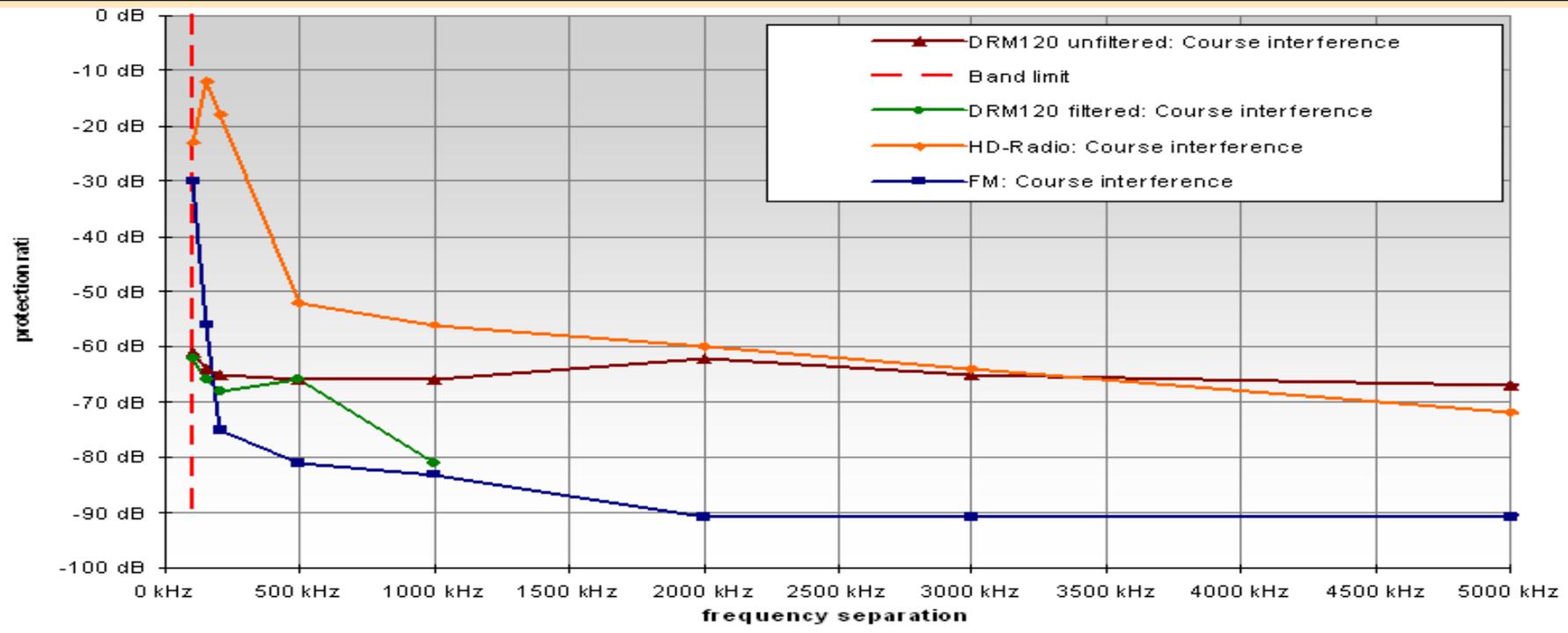
- Empfänger (1/6): Bosch FuG8b-1-Z-SE
- Eingangsspiegel Nutzsinal: -104 dBm (SINAD); -110 dBm (Rauschsperr)
- Zusätzlich gemessen: Ungewolltes Öffnen / Blockieren der Rauschsperr bei Präsenz von Störsignalen → Unkritischer als Störung der Sprachübertragung!

## Messergebnis: Schutzabstände ILS Localizer



- Empfänger: Collins ILS/VOR/MB-900; Nutzeingangspegel: -86 dBm
- Oberes digitales Seitenband von HD-Radio™ @107,9 MHz fällt in den Nutzkanal 108,!
- Schutzabstände bleiben unverändert, wenn der Eingangspegel um 16 dB erhöht wird

## Messergebnis: Schutzabstände VOR



- FM Störer im Stereomodus lt. ITU-R IS. 1140
- Empfänger: Collins ILS/VOR/MB-900; Nutzeingangspegel: -79 dBm
- Störkriterium „Kurs“ kritischer als „Flagge“, daher nicht dargestellt
- Oberes digitales Seitenband v. HD-Radio™ @ {107,8; 107,9} MHz fällt in den Nutzkanal 108,0!
- Verhältnisse bleiben gleich, wenn Eingangspegel um 16 dB erhöht wird

## Zusammenfassung (1)

### ▪ **DRM120**

- weist im Vergleich zu FM ein ähnliches Störpotential gegenüber den Nachbardiensten BOS und VOR/ILS auf. Ungeachtet dessen muss eine senderseitige Filterung zur Eliminierung evtl. Nebenaussendungen vorgesehen werden.
- hat gleiches bis höheres Störpotential im UKW-Band als FM. Die Höhe der Störung hängt wesentlich vom Empfängerfrontend (ALC-Problematik, Übersteuerung des ersten Mischers durch hohen Crestfaktor, ...) ab.

### ▪ **HD-Radio™**

- weist bei senderseitiger Filterung ein vergleichbares Störpotential gegenüber BOS wie FM auf.
- hat gegenüber ILS/VOR ab einer Sendefrequenz 107,5 MHz ein höheres Interferenzpotential als FM. Ein Betrieb oberhalb 107,7 MHz ist aufgrund der Bandbreite nicht möglich.
- ist im UKW-Band im Sinne der Störwirkung mit Ausnahme des Bereichs  $\pm (100 \dots 250)$  kHz vergleichbar mit FM. Im Bereich  $\pm (100 \dots 250)$  kHz haben die digitalen Seitenbänder hohes Störpotential.
- erfüllt nicht die Vorgaben an die Spektrumsmaske in ITU-Region I.

## Zusammenfassung (2)

**Gegenstand für weitere Diskussionen** könnten u.a. folgende Fragen sein:

- Ist das bestehende Störkriterium heutzutage noch sinnvoll?
- Sind angesichts des Umstellungsbedarfs Kompromisse im Analogfunk in einer Übergangsphase möglich / nötig / gewollt?
  - **Feldtests/Versuchssendungen unter realen Bedingungen mit begleitenden Messkampagnen sind neben Labormessungen unabdingbar!**

- 
- Der RDS-Dienst der UKW-Sender ist unkritischer / robuster als der Audioempfang
  - DRM120 hat ein um 5 dB geringeres Störpotential in Belangen der Intermodulation mit unmodulierten FM-Trägern gegenüber ILS Localizer & VOR (Ergebnis einer Dreisendermessung) als FM und HD-Radio™; allerdings bestehen aufgrund der Bandbreite die Störungen in einem größerem Frequenzband
  - Alle Messungen wurden zu Versuchszwecken / als Vorbereitung von Versuchssendungen angestellt. Die Ergebnisse sind daher nicht zur Planung im Dauerbetrieb anwendbar, sondern nur als Vorstudien zu betrachten! Insbesondere zum Schutz des Flugfunks sollten Sicherheitsreserven eingeplant werden da die Empfängerbandbreiten nicht normiert sind und hier nur ein einziger VOR/ILS-Empfänger vermessen wurde!

## Danksagungen

Die FH und TU Kaiserslautern danken ihren Projektpartnern und –beteiligten:

- Der **BNetzA** für die gute Zusammenarbeit
- Der **DFS** für die gute Zusammenarbeit und Ermöglichung der Messungen im Flugfunksektor
- Dem **SWR** für die Leihgabe einer Vielzahl von Geräten (FM-Sender, Verstärker für DRM120, ...)
- Der **ARD.ZDF medienakademie** für die Leihgabe eines Optimod 8200 FM
- Der **Ruoss AG** für die Leihgabe von HD-Radio™ Equipment
- **Rohde & Schwarz** für die Leihgabe eines SMU200A-Signalgenerators
- **TSI** für die Leihgabe des JVC-UKW-Heimempfängers
- **Bosch** und **BMW** für die Leihgabe von KFZ-Radios
- Der **Polizei in RLP** für die Leihgabe der BOS-Empfänger
- ... und vielen anderen!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen / Anregungen / Vorschläge?

**Weitere Informationen / Kontakt: [www.fh-kl.de/~drm](http://www.fh-kl.de/~drm)**