

Digitalisierung des UKW Rundfunks

Inhaltsverzeichnis

1	Das UKW FM Rundfunksystem	1
1.1	Die Einführungs-Strategie	1
1.2	Die Entwicklungsschritte bis zum heutigen UKW FM System	2
1.2.1	Frequenzbereich, Kanalabstand und FM-Spektrum	2
1.2.2	Multiplexbildung: Stereo, Verkehrsfunk, RDS	2
1.2.3	Audio-Processing	5
1.2.4	Störbeeinflussung der FM	9
2	Eigenschaften eines Rundfunksystems	13
3	Das DAB-System	14
4	Das DVB-T-System	15
5	Das DRM+ System	15
5.1	Reduktion des Crestfaktors bei DRM+	16
5.1.1	RF Carrier	16
5.2	Dummy Daten	17
5.3	Parallel Kanäle zeitversetzt: Zeit-Diversity	17
5.4	Konkurrenz zu DAB	18
6	Das HD-Radio-System	18
6.1	Kompatibilität zu UKW-FM	19
7	Das UKW-CPM-System	20
8	Das FMeXtra-System	21
9	Zusammenfassung	23

Abbildungsverzeichnis

1.1	FM-Spektrum eines UKW-Senders gemessen	3
1.2	FM-Spektrum eines UKW-Senders schematisch	3
1.3	Blockschaltbild eines hierarchischen Modulators	3
1.4	Blockschaltbild der FM Multiplex-Bildung	4
1.5	Spektrum (prinzipiell) des Multiplex-Signals (MPX) am Eingang des UKW FM-Senders	4
1.6	Spektrum des Multiplex-Signals vor der Einführung von RDS	5
1.7	Amplituden-Dichte Verteilung und Zeitverlauf von weißem Rauschen	6
1.8	Grundsätzliche Dynamik-Verhältnisse bei der Audioübertragung	7
1.9	Die Dynamik-Verhältnisse bei der CD: effektiv sind 54 dB nutzbar	7
1.10	Auswirkung der Phase auf die Zeitfunktion	8
1.11	Dynamik-Kompression	8
1.12	FM-Spektrum für komprimiertes Nachrichten-Signal	8
1.13	FM Spektrums-Masken	8
1.14	FM Pendelzeiger bei Rauschen	9
1.15	Bode-Diagramm Pre-Emphase; Reduktion des Geräusches	10
1.16	Beispiele für die „schnellen Schwankungen“ (Rayleigh-Fading) des Empfangssignals	11
1.17	Verlauf der Empfangsfeldstärke schematisch	11
1.18	Auswirkung von Gleichkanalstörungen	12
5.1	Spektrum von DRM+ schematisch	16
5.2	Vektordiagramme von HD-Radio und DRM+	16
6.1	FM Spektrums-Masken ETSI & FCC	18
6.2	Störung von FM durch HD-Radio	18
6.3	FM-Spektrum HD-Radio voll digital	19
6.4	Störung von FM durch DRM+ und HD-Radio	19
7.1	CPM-System der UNI Hannover	20
8.1	Spektrum MPX-Signal mit FMExtra 1. Stufe	21
8.2	Rausch-Störungen im demodulierten FM-Signal	22
8.3	FM-Spektrum ohne und mit FMExtra	22

Digitalisierung des UKW Rundfunks

Zur Digitalisierung des UKW Rundfunks gab und gibt es mehrere Vorschläge mit unterschiedlichen Eigenschaften. Die aktuellen Systemvorschläge sind:

- **DRM+** : eine Extrapolation des DRM-Systems auf Frequenzen bis 120 MHz
- **HD Radio**: eine Adaption des IBOC Systems (*in Band on Channel*) als IBAC System (*in Band Adjacent Channels*)
- **UKW CPM**: ein digitales Verfahren mit *Continuous Phase Modulation*
- **FMeXtra**: eine Modifikation des UKW FM-Systems

Der frühere Systemvorschlag **DAB** konnte UKW FM nicht ersetzen und wird seither als alternatives Übertragungsverfahren angepriesen. Ebenfalls wenig Bedeutung erlangt hat die Audio-Übertragung mit Hilfe von **DVB-T**, ganz im Unterschied zur terrestrischen digitalen Fernsehübertragung mit diesem System.

Die Eigenschaften der verschiedenen Vorschläge werden in dieser Studie analysiert und bewertet. Man kann dabei zwei Kategorien unterscheiden:

Essential Eigenschaften, die unverzichtbar sind.

Nice to have Eigenschaften, die ganz schön wären, wenn sie realisiert werden können.

Das Ziel aller Vorschläge ist, den UKW-FM-Rundfunk schlußendlich ersetzen zu wollen. Besonderes Augenmerk kommt deswegen der Kompatibilität zum bestehenden UKW-FM-Rundfunk zu. Diese ist besonders deshalb unabdingbar, da der UKW-FM-Rundfunk infolge seiner Verbreitung heute für die Mehrzahl der Rundfunkhörer das einzige Qualitäts-Übertragungssystem ist. Eine Störung des UKW-FM Empfangs durch ein im UKW-Band parallel betriebenes neues digitales Verfahren muß deshalb unbedingt vermieden werden.

1 Das UKW FM Rundfunksystem

Es folgt hier zunächst eine Bestandsaufnahme der Eigenschaften des UKW-FM Systems.

1.1 Die Einführungs-Strategie

Durch den Kopenhagener Wellenplan 1950 wurden Deutschland nur wenige ganz ungünstige Mittelwellenfrequenzen für die Rundfunkversorgung zugewiesen. Insbesondere nach Einbruch der Dunkelheit führte diese Situation auf erhebliche Empfangsstörungen, so daß je nach Bundesland bis zu 70% der Hörer nicht mehr versorgt waren. Infolge der Kriegsschäden herrschte zusätzlich ein akuter Mangel an Empfangsgeräten. Es wurden daher verschiedene Auswege aus diesem Dilemma diskutiert. Herrn Dr. Nestel vom (damaligen) NWDR ist es zu verdanken, daß schließlich ein UKW FM System im Band 2 (damals 88,5 – 100 MHz) gewählt wurde [1], aus dem durch (kompatible) Weiterentwicklung das heutige UKW FM System hervorging.

Gegen die Einführung eines völlig neuen Systems gab es auch damals heftige Bedenken. Jedoch führte eine geeignete Strategie schließlich zum Erfolg.

- UKW wurde in der Presse (Programmzeitschriften, Fachzeitschriften, Tagespresse) stark beworben. Es erschienen zahlreiche Sach- und Fach-Artikel zu dem Thema.
- UKW wurde zur „Welle der Freude“ erklärt und erhielt neue attraktive Exklusiv-Programme.
- Die bisherigen Mittelwellenprogramme wurden nur z.T. auf UKW abgebildet. Teilweise gab es auch ein (heute nicht mehr vorstellbares) „Schmankerl“ indem z.B. die erste Halbzeit eines Fußballspiels auf MW und UKW parallel übertragen wurde, dagegen die zweite Halbzeit nur noch auf UKW. [1]
- Die Empfängerindustrie konnte dazu bewegt werden, recht schnell (z nächst mehr oder weniger) geeignete Empfänger und Vorsatzgeräte (Set-top Boxen) zu produzieren. Hierbei hat ein Preisausschreiben des NWDR (Vorschläge für Vorsatzgeräte und für kombinierte AM-FM-Empfänger) und die Initiative der Firma Rohde & Schwarz (Empfänger ESF, angekündigt in großen Stückzahlen) der sich etwas zögerlich verhaltenden Empfängerindustrie nachgeholfen. [1]

- Infolge Kriegsschäden mußten viele neue Empfangsgeräte beschafft werden. Durch rationelle Produktion ist es gelungen, das Preisniveau für kombinierte AM–FM Geräte unter das Preisniveau der letzten (hochentwickelten) Gerätegeneration (1939) zu drücken. [1]
- Infolge des „Wirtschaftswunders“ und der Maxime „Wohlstand für Alle“ herrschte ein weit verbreiteter Optimismus, der den privaten Konsum beflügelte.
- Die qualitative Verbesserung der Übertragung (obere Grenzfrequenz 15 KHz bei UKW statt 4,5 KHz bei AM), also ein rein technisches Argument, spielte möglicherweise keine entscheidende Rolle, da von vielen Hörern die UKW–Übertragung zunächst als zu „spitz“ empfunden wurde, weshalb dann der Höhenregler entsprechend heruntergedreht wurde, um einen „volleren Klang“ zu erhalten.

1.2 Die Entwicklungsschritte bis zum heutigen UKW FM System

Das ursprüngliche UKW FM System, wie es 1949/1950 bestand, mußte selbstverständlich auf die Eigenschaften der damaligen Radiotechnik Rücksicht nehmen. Insbesondere die Frequenzstabilität der Empfänger war damals nicht sonderlich gut. Deshalb wurde (zunächst) ein Kanalraster von 400 KHz festgelegt. Als die (Empfänger–) Technik besser wurde, konnte sowohl das Kanalraster verkleinert als auch zusätzliche Informationen (Stereo, RDS) übertragen werden.

1.2.1 Frequenzbereich, Kanalabstand und FM–Spektrum

Der ursprüngliche Frequenzbereich für UKW FM war $87,5 \dots 100 \text{ MHz}$. Mit einem Kanalabstand von 400 KHz ergaben sich damit 31 Kanäle. Später wurde der Kanalabstand auf 300 KHz verringert, wodurch sich 42 Kanäle ergaben. Auf der *World Administration Radio Conference* WARC 1979 wurden die obere Frequenzgrenze auf 108 MHz erweitert, wodurch sich schließlich 68 Kanäle ergaben.

Die Ausstrahlungen auf den UKW–Frequenzen haben eine „quasi optische“ Reichweite. Das bedeutet, daß die gleiche Frequenz in einem Abstand von 240 bis 300 km wieder verwendet werden kann. Um die Frequenzplanung für die Sendernetze zu erleichtern und die gegenseitigen Störungen zu verringern, wird bei gegebener Kanal–**Breite** von 300 KHz mit einem Frequenz–**Raster** von 100 KHz gearbeitet.

Im **Zeitbereich** ist ein FM–Signal dadurch gekennzeichnet, daß seine **Amplitude konstant** ist, unabhängig vom Modulationsinhalt. Die übertragene Information steckt damit ausschließlich in den Nulldurchgängen der Zeitfunktion. Die Berechnung des Spektrums einer FM–Schwingung ist mathematisch aufwändig und analytisch nur für spezielle Nachrichtensignale^{*1} durchführbar. [2]

Ein gemessenes FM–Spektrum eines UKW FM Senders^{*2} zeigt Bild 1.1. [4],[22]

Auf Grund der gemessenen Form eines FM–Spektrums mit Audio–Modulation, ist es üblich, entsprechende FM–Spektren symbolisch als Dreiecke darzustellen, Abb. 1.2.^{*3} Für einen verzerrungsfreien FM Empfang ist diese Bandbreite von $\approx 240 \text{ KHz}$ notwendig.

1.2.2 Multiplexbildung: Stereo, Verkehrsfunk, RDS

Hierarchische Modulation Weil das gesendete Signal insgesamt eine Frequenzmodulation FM sein soll, können zusätzliche Informationssignale nur in Form einer hierarchischen Modulation übertragen werden. Hierarchische Modulationen werden in der Technik vielfach angewendet und können allgemein wie in Abb. 1.3 dargestellt werden.

In diesem Bild bedeuten: $u_N(t)$ das Nachrichtensignal (z.B. das Differenzsignal bei Stereo), $u_{C_1}(t)$ das Trägersignal der ersten Modulationsstufe (z.B. der Stereo-Hilfsträger), $u_{\text{Mod}_1}(t)$ das modulierte Signal nach der ersten Stufe (z.B. das modulierte Differenz-Signal), $u_{C_2}(t)$ das Trägersignal der zweiten Modulationstufe (z.B. der HF-Träger), $u_{\text{Mod}_2}(t)$ das Ausgangssignal des zweiten Modulators (z.B. das FM-Signal).

Die in den einzelnen Modulatoren verwendeten Modulationsarten sind i.a. unterschiedlich, z.B. Doppel–Seiten–Band (DSB) Modulation im 1. Modulator und Frequenz–Modulation (FM) im 2. Modulator. In diesem

^{*1}Bekannt ist z.B. daß ein cosinus–förmiges Nachrichtensignal auf ein linienförmiges FM–Spektrum führt, wobei die Liniengröße mit Hilfe von Besselfunktionen bestimmt werden kann (Modulationsindex η oder β , je nach Literaurstelle) und der Linienabstand gleich der Frequenz f_m des Nachrichtensignals ist.

^{*2}Man kann dies auffassen als Mittelwert aus verschiedenen Bessel–Spektrums mit unterschiedlichen Werten für f_m und η . Bei leisen Passagen ist $\eta \rightarrow 0$.

^{*3}Da die Frequenzmodulation eine „exponentielle“ (nichtlineare) Modulation ist, erscheint die Form des Spektrums des modulierenden Multiplex–Signals Abb. 1.5 **nicht** in der Form des FM–Signals Abb. 1.1. In dieser Beziehung gibt es einen deutlichen Unterschied zu den „linearen“ Modulationen (AM, DSB), bei denen die Form des Spektrums des modulierenden Signals erhalten bleibt.

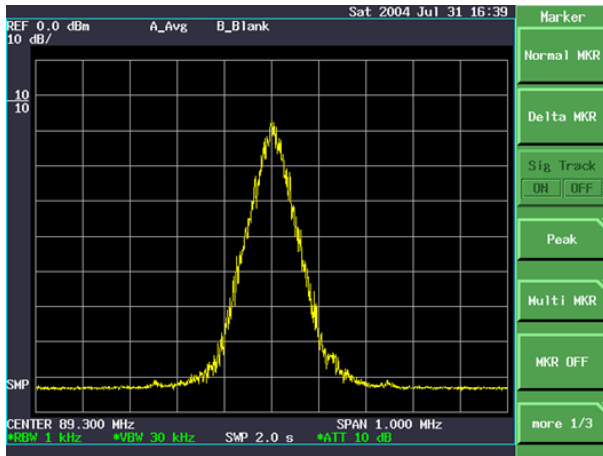


Abbildung 1.1: FM-Spektrum eines UKW-Senders mit Programm (Jazzmusik), KVOB, Denver, Colorado USA, Region 2 [4]. Der Spektrum-Analyser zeigt ein gemitteltes Spektrum.

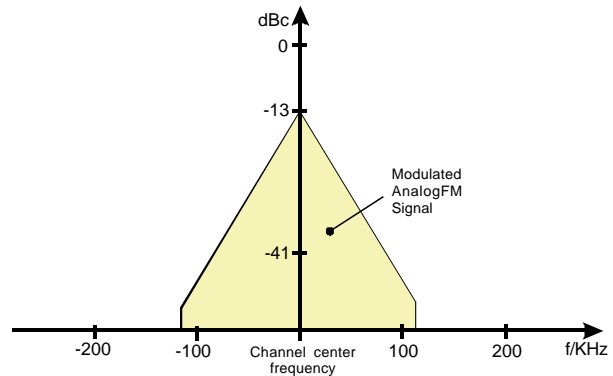


Abbildung 1.2: FM-Spektrum eines UKW-Senders schematisch; (dB_c bezieht sich auf die Leistung des (unmodulierten) Trägers). Die (erforderliche) Bandbreite B_{FM} für das UKW FM-Spektrums beträgt $\approx 240\text{ KHz}$.

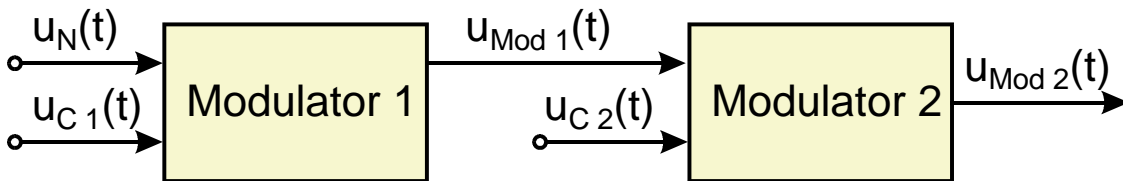


Abbildung 1.3: Blockschaltbild eines hierarchischen Modulators, bestehend aus der Kettenschaltung von 2 Modulatoren

Beispiel entstünde dann eine (hierarchische) DSB/FM als modulierte Signal. Im Empfänger muß entsprechend eine (hierarchische) FM/DSB Demodulation durchlaufen werden, um das Nachrichtensignal zurück zu gewinnen.

Multiplex-Bildung Sollen mehrere Nachrichtensignale (z.B. Summen-Signal, Differenz-Signal, Radio-Daten-Signal (RDS), Piloten, weitere Zusatz-Signale) als Eingangssignale für den 2. Modulator zur Verfügung stehen, müssen diese an seinem Eingang summiert werden. Damit sie sich nicht gegenseitig stören, werden sie frequenzmäßig jeweils durch einen 1. Modulator geeignet verschoben. Man erhält damit ein Frequenz-Multiplex-Signal.

Kompatibilität Da der UKW-Rundfunk zunächst monophon war, mußte aus Gründen der Kompatibilität dafür gesorgt werden, daß auch bei einer Stereo-Übertragung die (bislang) vorhandenen Mono-Empfänger weiterverwendet werden konnten. Dies bedingte die Übertragung eines Summensignals an der Stelle des vorherigen Monosignals (das ja de facto ebenfalls ein Summensignal ist). Aus den Links- und Rechts-Signalen $L(t)$ und $R(t)$ werden deshalb ein Summen- und ein Differenz-Signal $S(t), D(t)$ gebildet.

$$S(t) = L(t) + R(t); \quad D(t) = L(t) - R(t)$$

Dieser Vorgang wird „Matrizierung“ genannt, Abb 1.4 linker Block. Die Rückgewinnung (De-Matrizierung) der links- und rechts-Signale erfolgt damit (im Empfänger) zu:

$$L(t) = \frac{S(t) + D(t)}{2}; \quad R(t) = \frac{S(t) - D(t)}{2}$$

Blockschaltbild Vor-Modulation und Multiplex-Bildung Aus den Vorbetrachtungen folgt direkt das Blockschaltbild Abb. 1.4 für die Multiplex-Bildung und die 1. Modulatoren (vor-Modulation) beim FM-Rundfunk. Die Multiplexbildung entsteht durch die Summierstellen, hinter denen das MPX Signal entsteht, 3. Block von links in der Abbildung.

Als erste Modulationen für das Differenz-Signal und das RDS Signal werden Doppel-Seitenband-Modulationen (DSB) verwendet, bzw. für das Zusatz-Signal wahlweise DSB oder Quadratur-Doppel-Seitenband-Modulation (QDSB). Dieses Zusatzsignal wurde insbesondere in USA als SCA-Signal zur (analogen) Übertragung von Hintergrund-Musik (in Kaufhäusern usw.) verwendet. In Deutschland kam es dagegen so nicht zum Einsatz. Vielmehr wurden verschiedene Datendienste hierfür vorgeschlagen, von denen sich aber keiner vermarkten ließ.

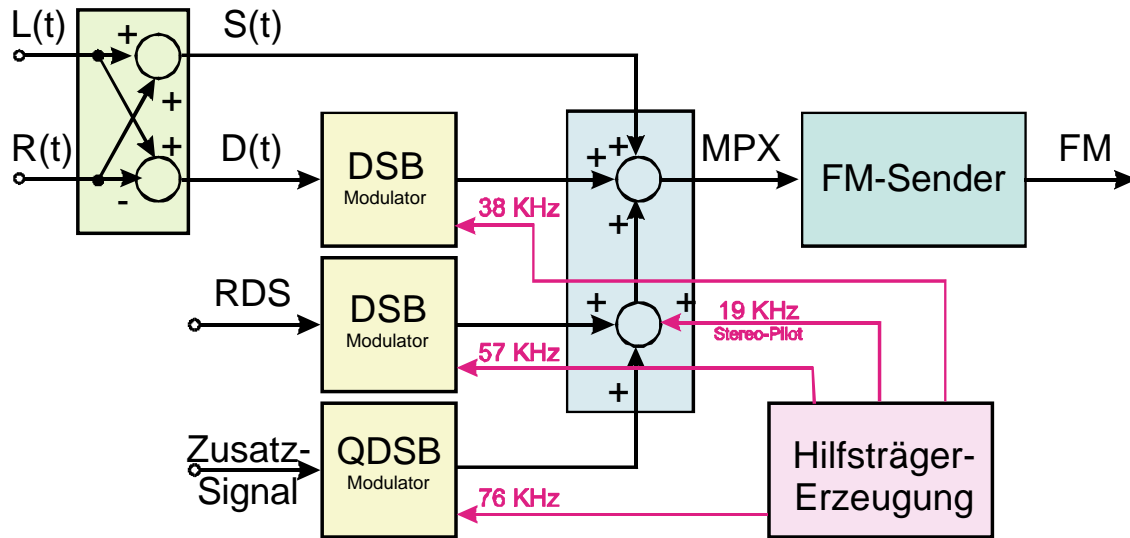


Abbildung 1.4: Blockschaltbild der FM Multiplex-Bildung; Blöcke von links nach rechts: Matrix-Bildung, 1. Modulations-Stufen (DSB & QDSB), Multiplex-Bildung (Summierstufen), 2. Modulations-Stufe (FM-Sender) & Hilfsträger-Erzeugung

Die Datenaufbereitung und die Formung der Datensymbole [5] [30] für RDS und das Zusatzsignal sind im Blockschaltbild nicht dargestellt.

Das MPX Spektrum Das dem FM-Sender zugeführte Modulations-Signal ist das MPX-Signal, dessen (prinzipielles) Spektrum in Abb. 1.5 dargestellt ist.

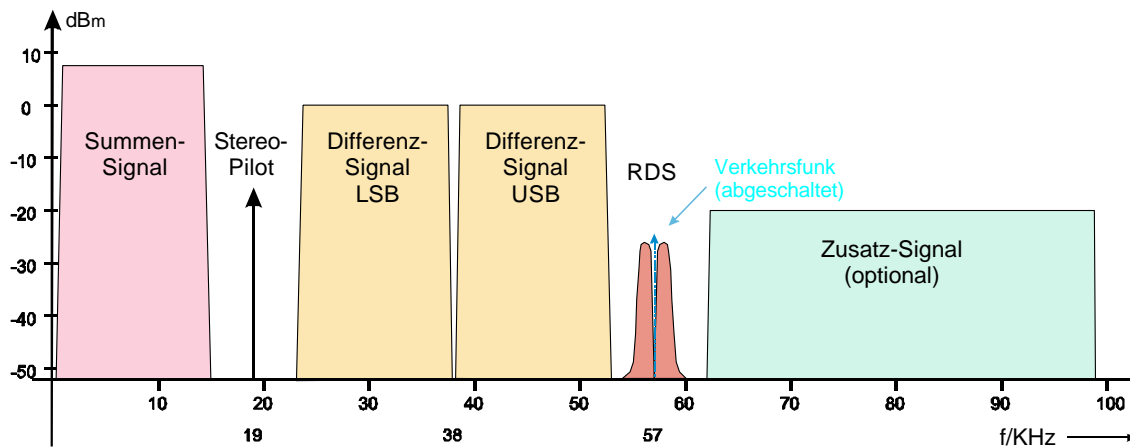


Abbildung 1.5: Spektrum (prinzipiell) des Multiplex-Signals (MPX) am Eingang des UKW FM-Senders

Das Stereo-Differenz-Signal hat spektral ein unteres (LSB, *lower side band*) und ein oberes Seitenband (USB, *upper side band*), weshalb die zugehörige Modulation mit DSB (*double side band*) bezeichnet wird. Zur Demodulation einer DSB benötigt der Empfänger grundsätzlich immer einen frequenz- und phasen-richtigen Hilfsträger. [5] Der Empfänger benötigt hierfür eine Einrichtung zur Hilfsträger-Regeneration. [7] Im Falle des Stereo-Signals geschieht dies dadurch, daß auf der Hälfte der Frequenz des Hilfsträgers 19 KHz ein

„Pilot-Ton“, der Stereo-Pilot übertragen wird. Im Empfänger wird daraus der frequenz- und phasen-richtige Hilfräger auf 38 KHz gewonnen.*⁴

Im Unterschied zu modernen digitalen Konzepten, ist es die Philosophie der analogen Rundfunk-Systeme, daß der Empfänger (als Massenprodukt) möglichst einfach und preiswert sein muß, während der Sender (als Einzelstück) vergleichsweise teuer sein darf. In Bezug auf die Demodulation des Stereo-Differenz-Signals bedeutet dies, daß die Frequenzlücke zwischen dem Summen-Signal und dem LSB des Differenz-Signals so groß gewählt werden mußte ($\approx 7\text{ KHz}$), daß als Filter für den Piloten ein einfacher Schwingkreis ausreicht und dadurch keine unzulässig große Phasendrehung (der Pilotschwingung) entsteht. Hingegen reicht hierfür die Frequenzlücke bei 38 KHz nicht aus, weil diese nur $\approx 60\text{ Hz}$ breit ist.

Auch für die Demodulation des Radio-Daten-Signals ist ein entsprechender frequenz- und phasen-richtiger Hilfräger auf 57 KHz erforderlich. Ursprünglich wurde auf 57 KHz ein Verkehrsfunk-Signal (VF) übertragen, jedoch ist dieser Dienst mittlerweile abgeschaltet. Da somit kein 57 KHz Pilot vorhanden ist, muß der RDS-Decoder den notwendigen Hilfräger aus dem RDS Signal selbst zurückgewinnen*⁵, da RDS auch ohne Stereo-Übertragung funktionieren muß, also wenn kein Stereo-Pilot vorhanden ist.*⁶

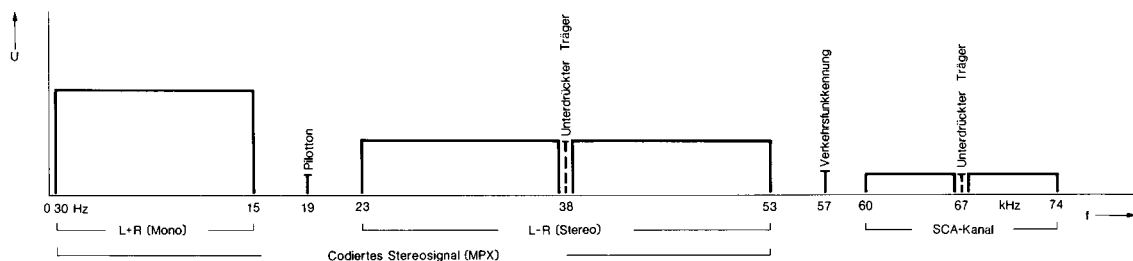


Abbildung 1.6: Spektrum des Multiplex-Signals vor der Einführung von RDS; Das SCA Signal fand vor allem in USA z.B. für Hintergrundmusik in Kaufhäusern eine Anwendung.

Da das RDS-Signal zeitlich nach dem (mittlerweile abgeschalteten) Verkehrsfunk-Signal, Abb. 1.6 [3], hinzugefügt wurde, war es aus Gründen der Kompatibilität erforderlich, daß das RDS-Signal

- im Spektrum bei 57 KHz eine Lücke haben mußte und daß
- die Phasenlage des RDS-Signals 90° (orthogonal) bezüglich des VF-Signals sein mußte.

Diese Bedingungen lassen sich durch ein Bi-Phase Format erfüllen, welches deshalb für RDS gewählt wurde.*⁷

1.2.3 Audio-Processing

Der Frequenzhub Bei der Definition des UKW-FM-Systems wurde ein Frequenzhub von $\pm\Delta F = \pm 75\text{ KHz}$ als Wert für die maximale Aussteuerung eines FM-Senders festgelegt. Der „Frequenzhub“ ist allerdings bezüglich des FM-Spektrums nur ein „Daumen“-Wert und gibt nur einen unteren Grenzwert für die tatsächliche Bandbreite B_{FM} an. [2] Für den Frequenzhub gilt mit K_{FM} als Modulatorkonstante:

$$\Delta F = K_{FM} \cdot \hat{U}_{MPX}; \quad \Delta F_{max} = K_{FM} \cdot \hat{U}_{MPX_{max}}$$

Hierbei ist \hat{U}_{MPX} die Amplitude, die sich als Summenspannung des MPX-Signals $u_{MPX}(t)$ ergeben kann. ΔF_{max} ist also ein direktes Maß für die (maximale) Amplitude $\hat{U}_{MPX_{max}}$ des modulierenden Signals eines FM-Senders.

Die Bandbreite des FM-Spektrum Nach Carson gilt näherungsweise für die FM-Bandbreite B_{FM}

$$B_{FM} \approx 2 \cdot \Delta F + 2 \cdot B_{MPX} = 2 \cdot (\Delta F + B_{MPX})$$

*⁴Die ursprüngliche Methode bestand in einer Frequenzverdopplung; moderne Empfänger arbeiten mit einer Phasen-Regelschleife (PLL, *phase locked loop*). [7]

*⁵Bei jeder Digital-Übertragung wird der empfangsseitige Hilfräger aus den übertragenen Datensignal gewonnen. Es wird dafür kein Pilot-Signal übertragen. Dadurch erhöht sich der technische Aufwand im digitalen Empfänger entsprechend.

*⁶Unter Mithilfe des Stereo-Piloten wäre es relativ einfach, weil $57\text{ KHz} = 3 \cdot 19\text{ KHz}$ ist. Phase des Verkehrsfunk-Piloten entsprechend zu Abb. 1.10 (Seite 8) mit $\varphi = 0$.

*⁷Ein Bi-Phase Signal benötigt gegenüber einem üblichen NRZ (*non return to zero*) Signal die doppelte Bandbreite. [8] Von den Befürwortern des FMExtra-Systems, Kapitel 8 Seite 21, wird dies zwar als Nachteil dargestellt. Doch auch in diesem Fall gilt es, die Kompatibilität zu beachten.

wobei die MPX-Bandbreite B_{MPX} die Bandbreite des Multiplex-Signals ($\approx 100 \text{ KHz}$) ist. Die Carson-Bandbreite gibt an, wie breit das FM-Spektrum wird, wenn alle die Frequenzkomponenten berücksichtigt werden, deren Leistung größer als $\approx 1\%$ der Leistung des (unmodulierten) FM-Trägers ist. Die Carson-Bandbreite ist die für einen verzerrungsfreien FM-Empfang (mindestens) notwendige Bandbreite.*⁸ Die Störungen, die von schwächeren Frequenzkomponenten in den angrenzenden Kanälen verursacht werden, gelten als vertretbar. Die Carson-Bandbreite kann somit auch als (Grenz-) Bandbreite bezüglich Nachbarkanalstörungen aufgefaßt werden.

Hub-Begrenzung im FM-Sender

Damit sich die UKW FM-Sender nicht gegenseitig stören, darf die maximal auftretende Bandbreite $B_{FM_{max}}$ und damit der maximale Frequenzhub $|\pm \Delta F_{max}|$, also die maximale Amplitude der Multiplex-Spannung $|\pm \hat{U}_{MPX_{max}}|$ eine vorgegebene Grenze nicht überschreiten.

Ursprünglich geschah diese Begrenzung einfach durch eine Amplitudenbegrenzung des MPX-Signals. Dies setzte ein genaue Pegelung aller am MPX-Signal beteiligten Signale (Summen-Signal, Differenz-Signal, Stereo-Pilot, RDS-Signal, Zusatz-Signal) voraus, einschließlich der Einhaltung der gegenseitigen Phasenbeziehungen zwischen Stereo-Pilot und RDS-Signal.

Da die am MPX-Signal beteiligten Signale nur teilweise korreliert sind, folgt, daß gemäß dem Zentralen Grenzwertsatz, die Summenspannung mehr oder weniger rauschähnlichen Verlauf aufweist und damit die Amplituden-Verteilungs-Dichte des MPX-Signals näherungsweise die Form einer Gauß-Glocke hat, Abb 1.7.

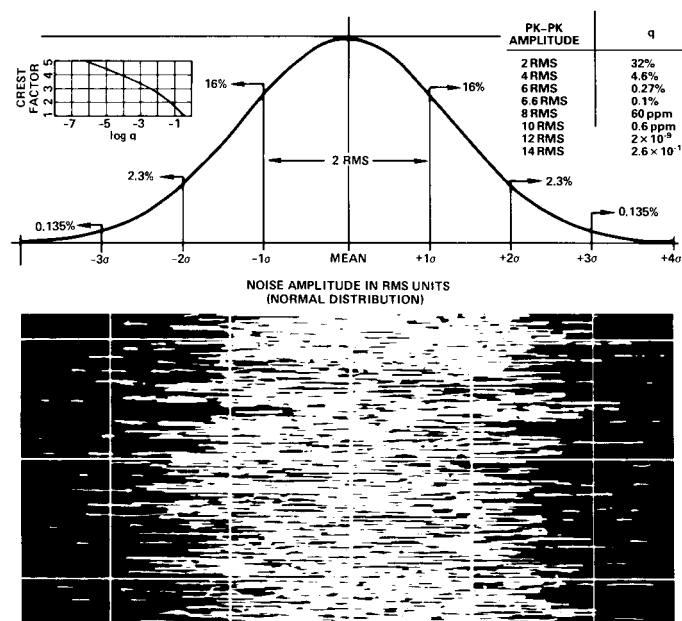


Abbildung 1.7: Amplituden-Dichte Verteilung (oben) und Zeitverlauf (unten) von weißem Rauschen; der Effektivwert (RMS root mean square) ist $1 \cdot \sigma$. Das weiße Rauschen dient hierbei als Modell für den Zeitverlauf des MPX-Signals. Kleines Diagramm links oben: Crest-Faktor = Peak Amplitude / RMS Wert

Charakteristisch für rauschähnliche Zeitfunktionen sind die in der Abbildung erkennbaren Amplituden-Spitzenwerte (*peak amplitude*), die um so seltener auftreten, je höher sie sind. Eine Amplitudenbegrenzung schneidet also die Spitzenwerte ab, wenn diese die vorgegebene Schwelle überschreiten. Damit dies nicht als Störung im Empfänger bemerkbar macht, dürfen nur extreme Spitzenwerte abgeschnitten werden. Das bedeutet aber dann andererseits, daß dann die mittlere Lautstärke des demodulierten Signals im Empfänger relativ gering ausfällt.

Die spektrale Leistungsdichte eines FM-Signals hat die gleiche Form wie die Wahrscheinlichkeits-Dichte des modulierenden Signals. [9] Daraus folgt, daß für den Fall, daß das MPX-Signal – wie hier unterstellt – rauschähnlichen Charakter hat, das Leistungsdichtespektrum der damit sich ergebenden FM ebenfalls die

*⁸Für verzerrungsfreien FM-Empfang ist eine konstante (ebene) Laufzeit innerhalb dieser Bandbreite entscheidend. Die Carson-Bandbreite darf nicht verwechselt werden mit der sonst häufig verwendeten -3 dB Bandbreite. Siehe hierzu auch die Abb. 1.1 und 1.2.

Form einer Gauß-Glocke hat. Abb. 1.1 (Seite 3) zeigt, daß dies (bei diesem Sender) wenigstens näherungsweise auch der Fall ist.

Dynamik-Kompression und -Begrenzung im Sender Dynamik ist das Verhältnis zwischen der kleinsten und der größten Lautstärke, wenn man dies auf ein Audio-Signal bezieht. Soll die Dynamik begrenzt werden, wobei gleichzeitig die größten Amplituden (fast) so groß werden sollen wie der Schwellwert für die Begrenzung, müssen demzufolge die kleinsten Amplituden entsprechend angehoben werden, was im einfachsten Fall durch eine nichtlineare Kennlinie erfolgen kann. Ein Audio-Signal ist dann „komprimiert“ und klingt bei der Wiedergabe im Empfänger lauter.*⁹

Grundsätzlich hat jedes Übertragungs-System einen technisch bedingten Dynamik-Bereich. Die obere Grenze ergibt sich dadurch, daß bei zu großen Signal-Amplituden Übersteuerung auftritt. Die untere Grenze ist durch die Störungen (Geräusche, Knacke, Rauschen usw.) festgelegt, die bei der Übertragung auftreten.

Die für analoge Rundfunkübertragung nutzbaren Dynamikbereiche sind:

- 20 dB (nachts) – 30 dB (tags) für Amplitudenmodulation
- 40 – 55 dB für Frequenzmodulation

Im fahrenden Auto sind aber (wegen der Fahrgeräusche) kaum mehr als 20 dB Dynamik vernünftig nutzbar.

Die Notwendigkeit der Dynamik-Begrenzung erkennt man aus den Darstellungen Abb. 1.8 und 1.9. [10] Der *Headroom* ist die Übersteuerungsreserve und der *Footroom* ist der Schutzabstand zum Störpegel.

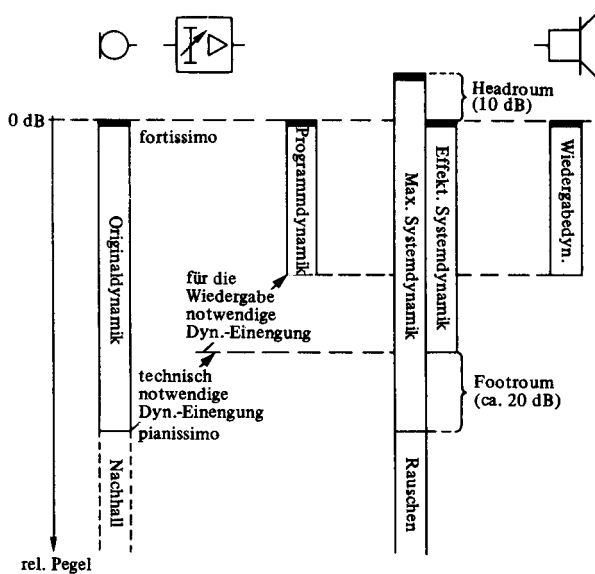


Abbildung 1.8: Grundsätzliche Dynamik-Verhältnisse bei der Audioübertragung

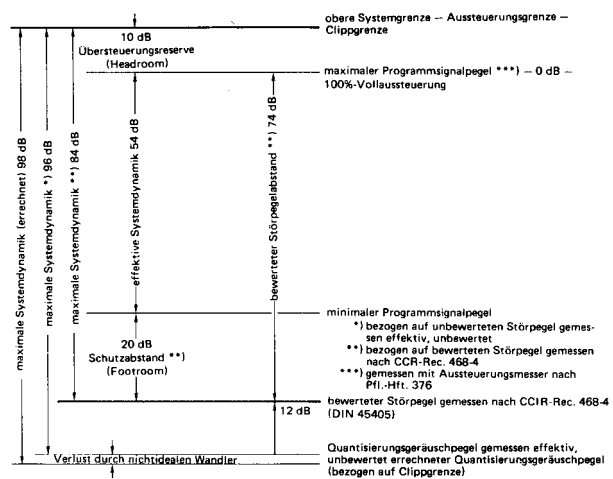


Abbildung 1.9: Die Dynamik-Verhältnisse bei der CD: effektiv sind 54 dB nutzbar

Audio-Processing mit Optimod Trotz der technisch notwendigen Dynamik-Einschränkung, bei der bereits der Lautstärke-Unterschied zwischen der leisesten und der lautesten Stelle verringert ist, klingt eine solche Übertragung dennoch leise (an heutigen Verhältnissen gemessen). Der Grund dafür liegt daran, daß auch jetzt immer noch Amplituden-Spitzenwerte auftreten (ähnlich wie bei der Rauschspannung Abb 1.7), die den Sender übersteuern würden, wenn der (mittlere) Audiopegel zu groß gewählt würde.*¹⁰

*⁹Bei Tonbandaufnahmen wird häufig von Kompressionsverfahren (Dolby, HighCom etc.) Gebrauch gemacht um das Bandrauschen bei der Wiedergabe abzusenken, Abb. 1.8.

*¹⁰An diesem Problem entzündeten sich in der Vergangenheit immer wieder Diskussionen zwischen Hörern und Sender: Musik ist zu leise, aber die Ansagen sind zu laut. Warum? Weil Musik auf höhere Amplituden-Spitzenwerte führt als Sprache, denn Sprache hat definitiv keine Gauß-förmige Amplitudendichte. Wenn im Sender dann so gepegelt wird, daß gerade jeweils die Übersteuerungsgrenzen eingehalten werden, hat man den beschriebenen Effekt.

An diesem Punkt setzt das Optimod-Verfahren an. [11] Dieses liefert nicht nur eine (konfigurierbare) Dynamik-Kompression, sondern es ändert auch die Amplitudenstatistik der Audiosignale dergestalt, daß die Spitzenwerte der Amplitude geringer ausfallen, wodurch dann der Pegel im Mittel angehoben werden kann, ohne daß es zu Übersteuerungen bzw. zu Hub-Überschreitungen bei FM kommt.

Zur Verdeutlichung der Möglichkeiten zur Verringerung der Spitzen-Amplitude ohne Verwendung eines Begrenzers seien als (einfaches) Beispiel die Zeitverläufe in Abb. 1.10 betrachtet.

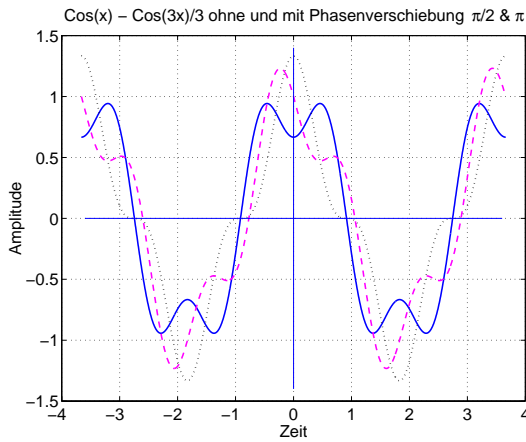


Abbildung 1.10: Zeitverläufe einer Schwingung, bestehend aus $\cos(\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t + \varphi)$ mit $\varphi = 0$ (durchgezogen), $\pi/2$ (gestrichelt), π (gepunktet)

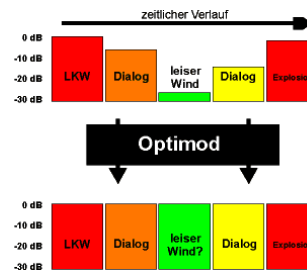


Abbildung 1.11: Dynamik-Kompression, die im Extremfall (fast) eingestellt werden könnte; Üblich sind 5 – 7 dB Dynamikbereich für das komprimierte Signal.

Wird also eine gegebene Zeitfunktion einer Fourier-Analyse unterzogen (mit FFT *Fast Fourier Transform*) und werden dann die spektralen Komponenten mit einer geeigneten Phasendrehung versehen, hat die mit der IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) wieder zusammengesetzte (synthetisierte) Zeitfunktion einen geringeren Spitzenwert der Amplitude.*¹¹ Da das Ohr solche Phasenverschiebungen kaum oder nicht registriert, bleibt dadurch die Lautstärke (zunächst) unverändert. Da man aber nunmehr den Pegel erneut bis zur Übersteuerungsgrenze erhöhen kann, ist das so veränderte Audiosignal im Empfänger lauter.

Eine sehr kräftig eingestellte Dynamik-Begrenzung, Abb. 1.11, stößt bei der Hörerschaft auf geteilte Zustimmung. Es ist diese aber nicht charakteristisch für das Optimod-Verfahren, sondern für das jeweilige Programm.

Optimod und die Auswirkung auf das FM Spektrum Durch die Veränderung der Amplitudenstatistik des MPX-Signals folgt eine entsprechende Veränderung des Leistungs-Dichte-Spektrums der FM. [12]

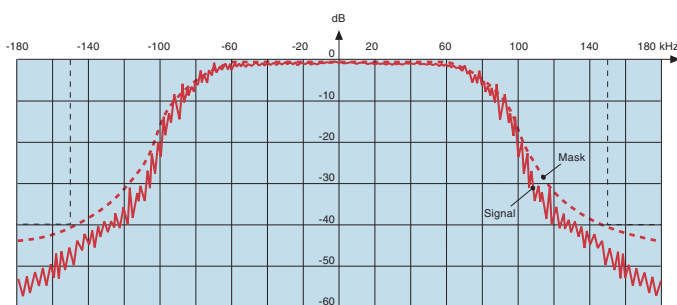


Abbildung 1.12: FM-Spektrum für komprimiertes Nachrichten-Signal

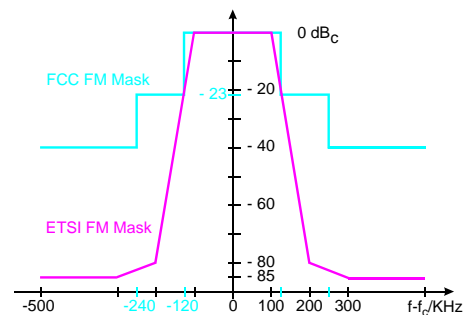


Abbildung 1.13: FM Spektrums-Maske für Region 1 und Region 2. Unter der Maske für Region 2 (FCC FM Mask) ist „viel Luft“.

*¹¹Die vom Optimod berechnete optimale Phasenverschiebung der einzelnen Fourier-Komponenten geht wieder verloren, wenn zwischen Optimod und Sender eine Übertragungs-Leitung eingeschaltet wird, da diese nicht ausreichend eben in ihrer Gruppen-Laufzeit ist. Der Optimod wird daher jeweils am FM-Sender installiert. Er enthält auch den Stereo-Encoder.

Da nun im modulierenden Signal weniger kleine Amplituden vorkommen, ändert sich die Form des Spektrums so, daß es deutlich breiter wird als bei einem nicht komprimierten Programm, Abb 1.1 (Seite 3). Es ist dann zwar immer noch kompatibel zur FCC Spektrums Maske für die Region 2, aber nicht mehr zur ETSI Spektrums Maske, die in Region 1 gilt, Abb 1.13. Aus diesem Grunde gilt hier neben der Hubbegrenzung auf $\pm 75 \text{ KHz}$ eine zusätzliche Beschränkung durch das RegTP für die mittlere Leistung des Differenz-Signals.

1.2.4 Störbeeinflussung der FM

Störung durch Thermisches Rauschen Die Wärmebewegungen der Elektronen führen zu thermischem Rauschen. [13] [14] Es entsteht so eine regellose (*random*) thermische Rauschspannung mit Gauß-verteilter Amplitudenstatistik.

- Grundsätzlich wird eine Nachrichten-Übertragung immer derart optimiert, daß nicht mehr Sende-Leistung als (unbedingt) notwendig aufgebracht wird. Als Maß dafür dient der Signal-zu-Geräusch-Abstand (SNR *signal to noise ratio*) am Ausgang des Empfängers.
- Aus diesem Grund ist das Empfangs-Rauschen maßgeblich für die untere System-Grenze eines Übertragungs-Systems.

Zur Analyse der Modulationsverfahren ist es üblich, diese mit Hilfe von Zeigern [19] darzustellen, wobei dann unterstellt ist, daß die Nachrichtenspannung $u_N(t)$ Cosinus-förmig sein soll. Bei der FM handelt es sich dann um „Pendel-Zeiger“. [2] Dieser Darstellung folgend, erhält man die Zeigerdarstellungen der FM mit Störung durch Rauschen gemäß Abb. 1.14. [6]

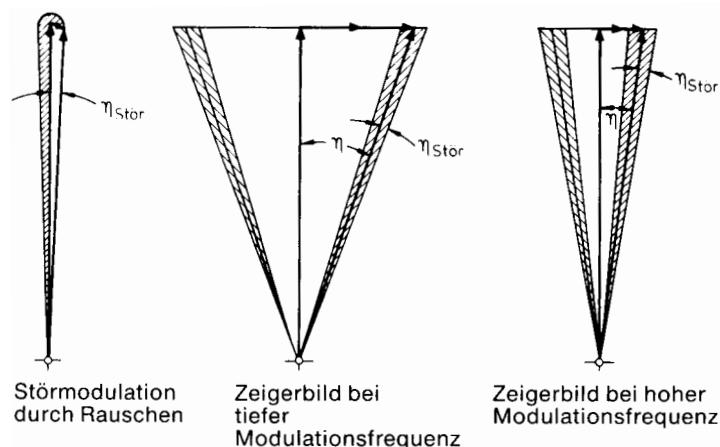


Abbildung 1.14: Pendelzeiger Darstellung der FM mit Rauschen. Für die Darstellung ist der Modulations-Index η sehr klein gewählt; der Kreis ist durch die Tangente ersetzt.

Mit einer Cosinus-förmigen Nachrichtenspannung $u_N(t) = \hat{U}_N \cdot \cos(2\pi f_N t)$ ergibt sich für den Frequenzhub ΔF und den Modulations-Index η , wenn K_{FM} die Modulator-Konstante ist: [2]

$$\Delta F = K_{FM} \cdot \hat{U}_N; \quad \eta = \frac{\Delta F}{f_N} = \frac{K_{FM} \cdot \hat{U}_N}{f_N}$$

Ein kleiner Wert für η bedeutet somit eine kleine Amplitude \hat{U}_N des Nachrichtensignals, wenn seine Frequenz f_N konstant bleibt.

Wird jedoch umgekehrt die Amplitude \hat{U}_N konstant gehalten, aber die Frequenz f_N verändert, so erkennt man, daß η um so kleiner wird, je höher die Modulations-Frequenz f_N gewählt wird, Abb. 1.14 mitte und rechts.

Etwas vereinfachend wird in Abb. 1.14 das Rauschen (zeichnerisch) genau so behandelt wie eine Cosinus-förmige Spannung. Der Stör-Hub $\eta_{Stör}$ stellt somit ein Maß für die Amplitude des Rauschens dar. In allen drei Fällen ist unterstellt, daß das Rauschen gleich groß sein soll.

- Da $\eta_{Stör} = \text{konstant}$ ist, aber $\eta \sim \frac{1}{f_N}$ sich ändert, folgt das wichtige Ergebnis, daß für eine Frequenz-Modulation (nach der Demodulation) das Verhältnis von Stör-Amplitude zu Nutz-Amplitude proportional (linear) zur Nachrichtenfrequenz zunimmt, Abb. 1.15 (rechts).

$$\frac{U_{\text{Stör}}}{\hat{U}_N} \sim f_N \quad \rightsquigarrow \quad U_{\text{Stör}} \sim f_N$$

Wenn aber die Stör-Spannung $U_{\text{Stör}}$ linear mit f_N zunimmt, so nimmt die Stör-Leistung (genauer die Stör-Leistungs-Dichte $S_{\text{Stör}}(f)$ [13]) quadratisch zu, Abb. 8.2 (Seite 22).

$$S_{\text{Stör}}(f) \sim (f_N)^2$$

Bezogen auf das Multiplex-Signal (MPX) Abb. 1.5 (Seite 4) bedeutet dies, daß das Summen-Signal das beste empfangsseitige Signal-zu-Stör-Verhältnis (SNR *signal to noise ratio*) aufweist. Das Differenz-Signal hat ein schlechteres SNR. Daher ist für (praktisch) rauschfreien Stereo-Empfang ein wesentlich stärkeres Empfangs-Signal (ca. 20 dB) notwendig.*¹² Da RDS und insbesondere die Zusatz-Signale im MPX-Spektrum bei noch höheren Frequenzen angesiedelt sind, ist für deren rauschfreien Empfang eine noch höhere Empfangsfeldstärke als für Stereo erforderlich.*¹³

Die im praktischen Betrieb zusätzlich auftretenden Störungen werden vereinfachend wie das thermische Rauschen berücksichtigt. Man spricht dann allgemeiner von „Geräuschen“.

Pre-Emphase & De-Emphase Da bei einer FM-Übertragung der Modulations-Index

$$\eta \sim \frac{\hat{U}_N}{f_N}$$

ist, muß man eigentlich nur die Amplitude des Nachrichtensignals $\hat{U}_N \sim f_N$ machen, was einer „Höhenanhebung“ verbunden mit einer „Tiefenabsenkung“ entspricht, damit der Modulations-Index η und damit das Verhältnis von $\frac{\eta}{\eta_{\text{Stör}}}$ konstant bleibt.*¹⁴ In der Praxis werden beim FM-Rundfunk nur die Höhen angehoben (Pre-Emphase, *pre-emphasis*). Zum Ausgleich werden im Empfänger die Höhen in gleichem Maße abgesenkt (De-Emphase, *de-emphasis*) und damit auch gleich das Rauschen. Das Bode-Diagramm zur Pre-Emphasis und die resultierende Geräusch-Amplitude zeigt Abb. 1.15.

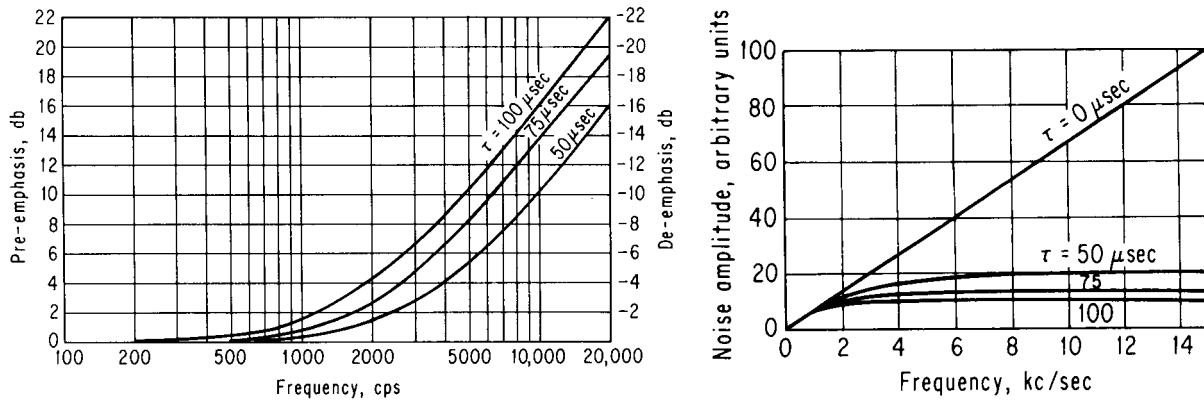


Abbildung 1.15: Bode-Diagramm der Pre-Emphase-Schaltung (links); Reduktion der Geräusch-Spannung durch Pre-Emphase/De-Emphase (rechts)

Im UKW-FM Rundfunk sind unterschiedliche Zeitkonstanten τ üblich, je nach Region.

$$\tau = 50\mu\text{sec} \quad \text{Europa (Region 1);} \quad \tau = 75\mu\text{sec} \quad \text{USA (Region 2)} \tag{1.1}$$

Die Grenz-Frequenzen (3 dB), ab wo eine Höhen-Anhebung einsetzt, sind demnach:

$$\tau = 50\mu\text{sec} \rightsquigarrow f_g = 3,183\text{KHz}; \quad \tau = 75\mu\text{sec} \rightsquigarrow f_g = 2,1\text{KHz} \tag{1.2}$$

*¹²Aus der Praxis des UKW-Empfangs ist bekannt, daß ein verrauschtes Stereo-Programm immer noch als Mono-Programm rauschfrei empfangen werden kann.

*¹³Unter diesem Problem leiden die z.Z. durchgeführten Versuche mit FMeXtra, wo die Digital-Übertragung nur im Frequenzbereich dieser Zusatz-Signale erfolgt. Man stellt dabei (verwundert ?) fest, daß der Versorgungs-Radius für die Digital-Übertragung geringer ist als der Stereo-Versorgungsradius.

*¹⁴In diesem Falle wird aus der FM eine PM. Man kann dann den NF-seitigen Differenzierer weglassen und gleich einen Phasen-Modulator verwenden. [2]

Durch die Pre-Emphase wird der FM-Sender für hohe NF-Frequenzen stärker angesteuert. Um dadurch keine Hub-Überschreitungen zu erhalten, müssen die Pegel der Signale entsprechend angepaßt werden.

Der Funk-Kanal Auf den UKW-Frequenzen erfolgt (praktisch) keine Reflexion an der Ionosphäre, weshalb die Reichweite der Sender als „quasi-optisch“ bezeichnet werden kann. Weil aber die Wellenlänge „ultra“-kurz ist, erfolgen auf dem Ausbreitungsweg viele Reflexionen z.B. an Erhebungen, an Gebäuden, an Fahrzeugen.

Am Empfangsort treffen somit mehrere gegeneinander leicht zeitlich gegeneinander verschobene „Funkstrahlen“ (quasioptisch betrachtet) ein. Je nach gegenseitiger Phasenlage dieser „Teil-Strahlen“ führt das zur Verstärkung oder Schwächung der Empfangs-Feldstärke. Diese Einflüsse auf die Empfangs-Feldstärke unterliegen räumlichen und zeitlichen Änderungen, wie es z.B. in Abb. 1.16 dargestellt ist. [15] [16] [17]

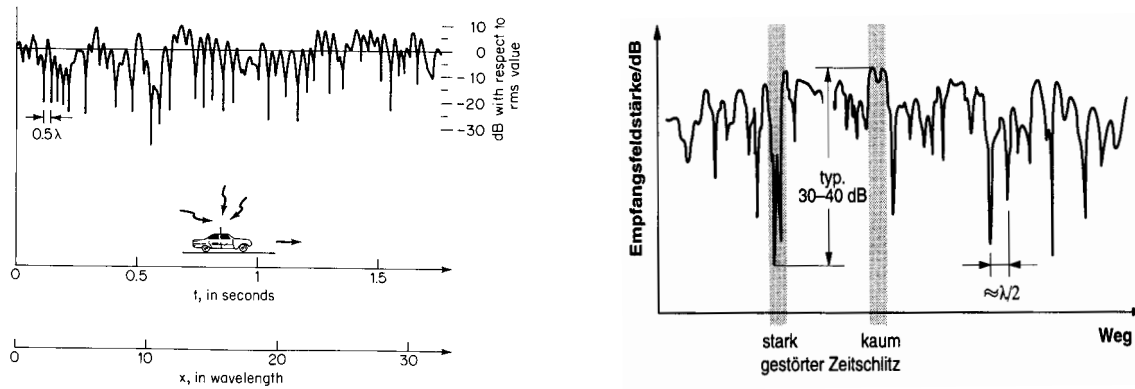


Abbildung 1.16: Beispiele für die „schnellen Schwankungen“ (Rayleigh-Fading) des Empfangssignals

Die in Abb. 1.16 dargestellte Situation ist typisch oder charakteristisch für alle terrestrischen Empfangsverhältnisse bei hohen Frequenzen: UKW, TV, Mobilfunk, WLAN usw. Dieses „schnelle Fading“ stellt die größte technische Herausforderung für ein Funksystem dar, insbesondere bei digitaler Übertragung.

Während Abb. 1.16 nur einen (entfernungsmäßig) kleinen Ausschnitt (die Feinstruktur) aus einem Funkfeld zeigt, stellt Abb. 1.17 den typischen Feldstärkeverlauf in größerem Maßstab dar.

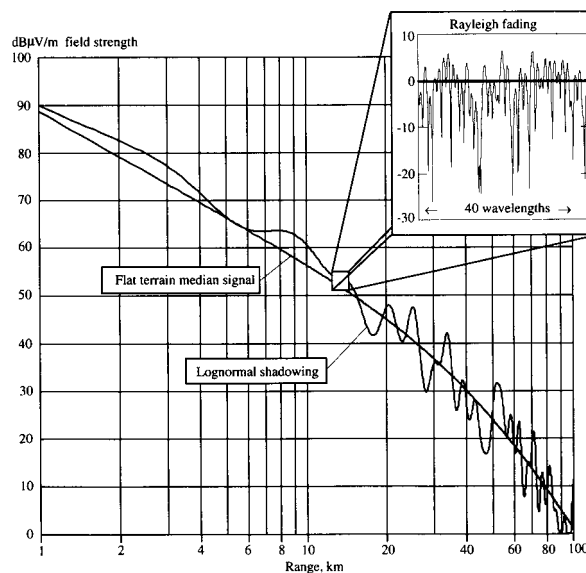


Abbildung 1.17: Mittlere Empfangsfeldstärke mit überlagerten Schwankungen durch Bebauung (Log Normal) und Interferenzen (Rayleigh)

Digitale Übertragungs-Systeme bekämpfen das Rayleigh-Fading entweder durch spezielle Modulations-

Verfahren z.B. COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*) (DVB-T, DAB) oder durch (adaptive) Entzerrung (GSM Handy).

Im Falle der (analogen) Frequenzmodulation, bei der die Information in den Nulldurchgängen des HF-Signals steckt, werden die Amplitudenschwankungen, die durch Rayleigh-Fading entstehen, durch den Begrenzerverstärker in der ZF-Ebene unterdrückt. Der Begrenzer-Verstärker ist daher für einen sauberen FM-Empfang unverzichtbar. Ein wirkungsvoller Begrenzer benötigt eine Schwelle, die so niedrig liegt, daß die Fading-Einbrüche im Empfangssignal auch noch bei sehr schwachen Empfangssignalen oberhalb der Schwelle bleiben und somit das Ausgangssignal des Begrenzers stets eine konstante Amplitude hat.

Der Amplitudenbegrenzer im FM-Empfänger sorgt also nicht nur für konstante Lautstärke des demodulierten Signals, unabhängig von der Größe des Empfangssignals (dick gezeichnete Kurven in Abb. 1.17), sondern bekämpft recht wirkungsvoll die Störungen durch die Mehrwegeausbreitung.*15

Der Mehrwegeempfang erzeugt aber nicht nur Amplitudenschwankungen, die durch Begrenzung beseitigt werden können, sondern auch Schwankungen in den Nulldurchgängen, die die Information enthalten. Allerdings werden die Nulldurchgänge dabei i.a. nur wenig verschoben. In den feinen Unterschieden bei den Nulldurchgängen befinden sich aber die Informationen aus den höheren Frequenzanteilen des Multiplex-Signals. Daher sind diese Bereiche (Stereo-Differenzsignal, RDS-Signal, Zusatz-Signal) entsprechend stärker gestört.*16

Capture-Effekt Die Unterdrückung von Mehrwege-Empfang, aber auch von (entfernten) Gleichkanal-Sendern, mit Hilfe des Begrenzer-Verstärkers (*limiter*) funktioniert nur so lange, wie die Feldstärke des Störers kleiner ist als die des Nutzsignals. Bei guten Begrenzer-Verstärkern genügen $\approx 0,2 \text{ dB}$ Unterschied, um das schwächere Signal um $\approx 30 \text{ dB}$ zu unterdrücken (*capture ratio*), bezogen auf Mono-Empfang.*17

Die Breite des Übergangs-Bereichs zwischen Nutz-Sender und Stör-Sender (bzw. Mehrwege Signal) ist für die einzelnen Bereiche im (demodulierten) Multiplex-Signal unterschiedlich und zwar wird die Breite größer mit steigender Frequenz des Multiplex-Signals. Dies erkennt man aus einer Simulation, bei der die Größe des (unmodulierten) Gleichkanal-Störers variiert wird, während das FM Signal mit einem Cosinus moduliert ist, Abb. 1.18. [18] Gezeichnet ist eine Periode ($\doteq 360^\circ$) des Cosinus der modulierenden Nachrichtenschwingung.

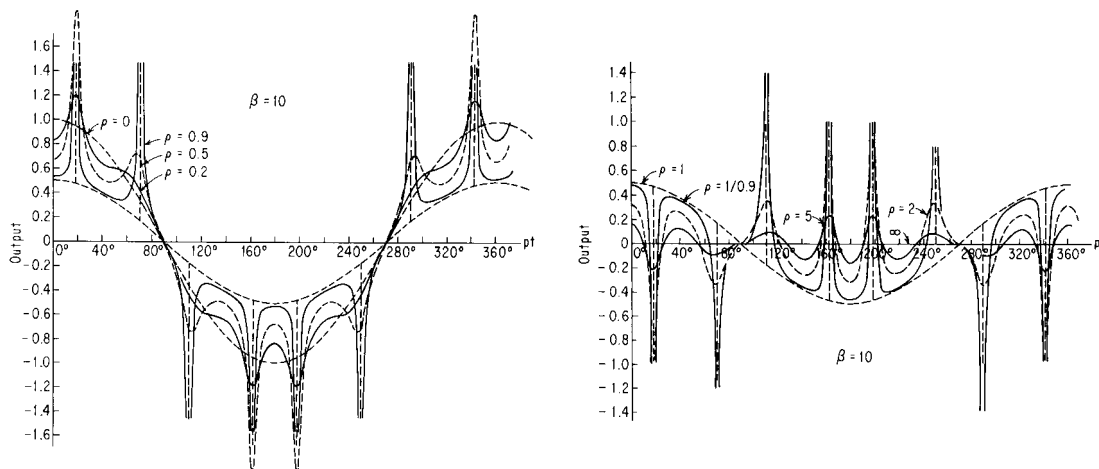


Abbildung 1.18: Auswirkung eines unmodulierten Gleichkanal-Störers (perfekter Limiter angenommen); $\rho = \hat{U}_{\text{Stör}}/\hat{U}_{\text{FM}}$ ist das Verhältnis der Amplitude des Störers zur Amplitude des FM-Signals. Die stärksten Störungen ergeben sich, wenn beide Amplituden etwa gleich groß sind.

Aus den Bildern zu dieser Simulation kann man folgendes entnehmen:

1. Die stärksten Störungen ergeben sich, wenn die Amplituden von Nutzsignal (FM) und Störer etwa gleich groß sind.

*15 Daß auch das nicht immer gelingt, beobachtet man manchmal im Auto beim Warten an der Ampel: Der Ton ist verzerrt, also läßt man den Wagen etwa $\lambda/2 \approx 1,5 \text{ m}$ vorrollen um wieder sauberen Empfang zu haben. Leider läßt der Hintermann dann meist auch vorrollen und man hat die wieder die vorigen Zustände.

*16 In kritischen Empfangssituationen (z.B. im Gebirge) äußert sich dies z.B. in „Zwitscher-Geräuschen“ beim Stereo-Empfang, während der Mono-Empfang praktisch störungsfrei ist.

*17 Im fahrenden Auto kann es daher an der Versorgungs-Grenze zwischen zwei Gleichkanal-Sendern zum Hin- und Her-Springen zwischen den Programmen kommen.

2. Die Störung des demodulierten Signals (linkes Bild) enthält schnelle Schwankungen (Störspitzen) – und damit hohe Frequenzen. Diese werden durch den De-Emphase Tiefpaß beseitigt und sind im Mono-Signal daher nicht mehr vorhanden.
3. Die schnellen Schwankungen machen sich aber bei den höheren Frequenzen des Multiplex-Signals (Differenz-Signal, RDS, Zusatz-Signal) als Störung bemerkbar.
4. Während das Summen-Signal praktisch ungestört ist, werden die anderen Teile mehr oder weniger stark gestört.
5. Eine Störung der anderen Teile ist auch noch bei relativ schwachem Störer $\rho = 0,2$ (durchgezogene Linie) vorhanden. Folglich ist hier der Übergangsbereich breiter.
6. Wird die Amplitude des Störers größer als die Amplitude der FM, kehren die Störspitzen im demodulierten Signal ihr Vorzeichen um. (rechtes Bild)
7. Da der Störer als unmoduliert angenommen ist, ergibt sich nun das Mono-Signal praktisch zu Null, weil die verbleibenden schnellen Schwankungen durch die De-Emphase unterdrückt werden. Hier zeigt sich der Capture-Effekt. Wäre der Störer moduliert, hätte das Mono-Signal nun dessen Modulation übernommen.
8. Auch im Falle einer Mehrwege-Ausbreitung, wenn ein reflektiertes (und dann moduliertes) Signal als Störer wirkt, treten entsprechende Spitzen im demodulierten Signal auf. Diese wirken sich insbesondere auf die höherfrequenten Anteile im MPX Spektrum aus.*¹⁸
9. Da die FM eine exponentielle (nichtlineare) Modulation ist, werden die HF-Störungen nichtlinear auf das demodulierte Signal abgebildet. Der Störer ist hier ein unmodulierter Träger, hat also keine „Störmodulation“, aber die Störungen im demodulierten Signal sind Impuls-förmig.

2 Eigenschaften eines Rundfunksystems

Soll wie hier ein bestehendes Rundfunksystem geändert oder ersetzt werden, gibt es dafür zwei Möglichkeiten.

1. Die Modifikation muß kompatibel zum bestehenden System sein, wenn der gleiche Frequenzbereich benutzt werden soll.
2. Ein inkompatibles System benötigt ein anderes (zusätzliches, neues) Frequenzband.

Unter Kompatibilität soll hier folgendes verstanden werden:

- Die bisher empfangbaren analogen UKW FM Sender dürfen durch das neue System nicht gestört werden. Man kann allerdings nicht verlangen, daß das neue System auch mit den bisherigen Empfängern zu empfangen geht. Beispiele hierzu sind die Einführung des Stereorundfunks und des RDS (Radio Daten System). Alte FM Mono-Empfänger wurden dadurch in ihrem (Mono-) Empfang nicht beeinträchtigt.^{†1}
- Der Übergang von der vollständig analogen zur vollständig digitalen Übertragung geschieht in einem angemessen langen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren.^{†2}

Ein Digitales System, das Störungen beim UKW FM Empfang verursacht oder das eine kurzfristige Umschaltung zwischen analog und digital erfordert, ist demzufolge nicht kompatibel.

Für den Fall, daß man ein neues Frequenzband finden sollte, gibt es die Forderung nach Kompatibilität nicht. Da ist man diesbezüglich freier. Aber das Beispiel DAB (*Digital Audio Broadcast*) lehrt, daß dies nicht automatisch zum Erfolg führt. Vom ursprünglich proklamierten Ziel, DAB im Frequenzbereich des analogen UKW FM Rundfunks zu übertragen, ist man mittlerweile abgegegangen, da dies aus Kompatibilitätsgründen unmöglich ist.

*¹⁸Demzufolge erleidet das Zusatz-Signal, welches bei den aktuellen Feldversuchen von FMeXtra ausschließlich für die Digitalübertragung verwendet wird, die größten Störungen.

^{†1}Die Übertragung zusätzlicher Signale bedingt hier eine Pegelanpassung des Summensignals (Mono-Information). Dieses wird dadurch leiser. Beim Mono-Empfänger ist deshalb der Lautstärkeregel etwas weiter aufzudrehen gegenüber der Zeit davor. Dies kann aber nicht als Störung gewertet werden.

^{†2}Entsprechend der üblichen Lebensdauer von Auto-Radios.

3 Das DAB-System

Das DAB System ist ein klassisches Beispiel für ein System, das am „grünen Tisch“ konzipiert wurde. Das wichtigste Argument zu seiner Durchsetzung war der „Spreadungs-Gewinn“, der sich bei Kanalbündelung ergeben kann. Damit hat man sich geringe Energiekosten erhofft.

DAB verwendet als Modulation das Mehrträgerverfahren COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*). Als digitale Modulationen in den Teilkanälen (*subchannel*) werden höherstufige QAM (*quadrature amplitude modulation*) Verfahren angewendet. Da die hierbei pro Teilkanal übertragenen Informationen weitestgehend statistisch von einander unabhängig sind, ergibt sich (gemäß dem Zentralen Grenzwertsatz) auch hierbei eine Gauß-förmige Amplitudenverteilung der resultierenden Spannung des COFDM Signals, vergleichbar mit Abb. 1.7 (Seite 6).

Der Crestfaktor, das ist das Verhältnis von maximaler Amplitude \hat{U}_{\max} zum Effektivwert $u_{\text{RMS}} = u_{\text{eff}}$ der resultierenden Spannung, wird dadurch $\approx 4 \doteq 12 \text{ dB}$, siehe Abb. 1.7, kleines Diagramm links oben.^{†1}

Ein COFDM Hochfrequenz-Signal mit Amplitudenschwankungen, also mit keiner konstanten Einhüllenden wie die FM es hat, benötigt einen linearen Sendeverstärker, damit die (digitalen) Amplitudeninformationen korrekt übertragen werden können. Lineare Sendeverstärker haben aber in der Praxis sehr geringe Wirkungsgrade. Damit erhöht sich die aufzuwendende Gleichstromleistung entsprechend. Dem gegenüber arbeitet der Sendeverstärker für FM im (nichtlinearen) Schaltbetrieb mit entsprechend hohem Wirkungsgrad, weil die FM eine konstante Amplitude (mit Crestfaktor $= \sqrt{2} \doteq 3 \text{ dB}$) hat.

COFDM kommt zwar als digitale Modulation mit einer geringeren Sendeleistung aus als FM, jedoch ist die Ersparnis an Energiekosten wegen der stark unterschiedlichen Wirkungsgrade der Sender nicht so deutlich.

Der restliche Kosten-Vorteil wird jedoch durch die Kosten für die Multiplexbildung und für die Programmzuführung konterkariert.

Um einen Spreadungs-Gewinn realisieren zu können, muß für die Funk-Übertragung eine größere Bandbreite verwendet werden, als die digitale Modulation (minimal) benötigt. Damit daraus keine unnötige Verschwendung von Übertragungs-Bandbreite resultiert, werden bei DAB z.B. 6 Programme^{†2} so in einander verschachtelt, daß sich die Informationen für ein einzelnes Programm in jedem 6. Teilkanal befindet. Damit werden die Teilkanäle, die zu den jeweiligen Programmen gehören, praktisch über die gesamte Bandbreite des COFDM Hochfrequenz-Signals gespreizt.

Im Empfänger bedeutet dies, daß zunächst das komplette DAB Signal demoduliert und verarbeitet werden muß, ehe man die Information (das gewünschte Programm) eines Teilkanals daraus extrahieren kann. Das bedingt eine aufwändigere Signalverarbeitung und mehr Strombedarf, weil de facto 5/6 der Daten anschließend nicht gebraucht werden.

Auf der Sender-Seite ist ein Multiplexer erforderlich, der die angelieferten Programme in einander verschachtelt. Da DAB als sogenanntes „Single Frequency Netzwerk“ (SFN) arbeitet, muß bei jedem an diesem Netzwerk beteiligten Sender ein Multiplexer mit entsprechender Zuführung der Programme vorhanden sein. Ein SFN, bei dem mehrere Sender auf der gleichen Frequenz arbeiten, spart (hochfrequente) Sendeleistung für den einzelnen Sender ein. Demgegenüber entstehen Kosten durch die notwendige Programmzuführung zu jedem Teil-Sender und durch den Multiplexer.

Will man an einzelnen Standorten z.B. eines der 6 Programme unterschiedlich haben (hier Anbieter A, dort Anbieter B), ergibt das hierfür erhebliche gegenseitige Störungen und eine entsprechende starke Reduktion der Versorgungsfläche.^{†3}

Zur Zeit der Konzeption von DAB gab es auch noch keine verfügbaren Frequenzen mit den erforderlichen Kanalbandbreiten. Schließlich wurden der TV Kanal 12 ($\approx 220 \text{ MHz}$) dafür bereitgestellt, und da dies nicht ausreichte, das L-Band ($\approx 1,7 \text{ GHz}$). Ein DAB Empfänger muß also beide Frequenzbereiche empfangen können.^{†4} Durch die Einführung von DVB-T sind weitere TV-Kanäle in den Bändern 1, 3, 4 & 5 frei geworden, so daß zwischenzeitlich auch für DAB zusätzliche Frequenzen bereitgestellt werden können. Im L-Band läuft mittlerweile eine digitale TV-Übertragung (DMB).

^{†1}Eine Verminderung des Crestfaktors kann auf folgende Weise erfolgen: 1. geeignete Phasendrehung (Rotation) der Symbole in den Teilkanälen gegeneinander; 2. Übertragung von „Dummy-Daten“ (Auf diese Weise wird bei DRM der „Simulcast“ Betrieb realisiert, indem mit Hilfe dieser „Dummy Daten“ die Hüllkurve der Modulation entsprechend zu einer AM gebildet und ein HF-Träger hinzugefügt wird.); 3. Amplituden-Clipping. Alle diese Verfahren ergeben aber einen Verlust bei der Übertragung. [20]

^{†2}Die Zahl 6 bezieht sich auf den Entwicklungsstand von DAB bei seiner ersten (geplanten) Einführung. Damals wurde als Audiocodierung das „Musicam“-Verfahren nach MPG2 festgelegt. Das ist zwischenzeitlich technisch überholt. Neuere Audiocodierungen wie z.B. AAC+ kommen mit deutlich niedrigeren Datenraten aus, so daß in der gegebenen HF-Bandbreite mehr Programme übertragen werden können.

^{†3}Aus diesem Grund ist DAB für regionale Programm-Anbieter nicht sonderlich geeignet.

^{†4}DAB war also eine „Kompromißgeburt“.

Was bislang für DAB fehlt, sind attraktive Exklusiv-Programme, wie diese als „Welle der Freude“ bei der Einführung des UKW FM Rundfunks geschaffen wurden. Da (bislang) oftmals noch nicht einmal das Programmangebot von UKW FM auf DAB abgebildet werden konnte, tut sich DAB schwer, die Gunst des Hörerpublikums zu erwerben.

4 Das DVB-T-System

Bei der Digitalisierung des terrestrischen Fernsehens (*digital video broadcasting – terrestrial*) DVB-T gab es Faktoren, die sehr günstig dafür waren.

- Nur noch ca. 7 % der TV-Teilnehmer empfangen ihr Fernsehprogramm über die Antenne. Der Rest war verkabelt oder hatte Satelliten-Empfang.
- Pro analogem TV-Kanal lassen sich mit DVB-T 4 Programme übertragen.
Das gibt für die Zuschauer (theoretisch, da nicht überall realisiert) eine Vervierfachung des bisherigen Programm-Angebotes.
Für die Broadcaster resultiert eine Verringerung der Sender-Kosten und überzählige Sendekapazitäten lassen sich vermarkten.
- Für zahlungsschwache TV-Teilnehmer bestand ein Angebot von den Broadcastern, den DVB-T Umsetzer (*set top box*) zu bezuschussen.

Aus diesen Gründen ging die Umstellung von analogem PAL TV auf DVB-T TV praktisch geräuschlos über die Bühne. Es besteht sogar der Eindruck, daß manche „Kabel-Kunden“ einen Umstieg zu DVB-T überlegen.

In einem früheren TV-Kanal im UHF Bereich findet (zumindest) in Berlin eine Radio-Übertragung mit DVB-T statt. Diese hat jedoch keine größere Bedeutung erlangt, weil erstens in der Regel der Fernseher dafür eingeschaltet sein muß (aber kein Bild hat; nur Titelanzeige) und zweitens, weil die Programmauswahl vergleichsweise gering ist.

5 Das DRM+ System

Im Zusammenhang mit den Bemühungen um die weltweite Einführung von DRM-30 (150 KHz bis 30 MHz) wurde DRM+ vorgeschlagen, das eine Extrapolation des DRM-Systems bis zum Band 2 (88,5 – 108 MHz) darstellt. Hintergrund dazu sind die Überlegungen zur Digitalisierung im Rundfunk, die die Latein-Amerikanischen Staaten anstellen. Zur Auswahl stehen hier

- die IBOC-Systeme (AM-IBOC und FM-IBOC, heute HD-Radio genannt), die in den USA teilweise schon in Betrieb sind und
- das (weltweite) DRM-System für die AM-Bereiche (DRM-30) und DRM+ für den FM-Bereich.

Da die Lateinamerikaner ein „einheitliches System“ wollen, mußte das DRM-Konsortium (kurzfristig) ein entsprechendes DRM+ System vorstellen.

Die Fachhochschule Kaiserslautern hat zwischenzeitlich ein Interims-System DRM-120 mit leicht veränderten Parametern untersucht. DRM-120 und DRM+ unterscheiden sich im Prinzip nur durch die Anzahl der verwendeten Unterträger (111 bzw. 213) und damit im Frequenzabstand der Unterträger (857 Hz bzw. 444 Hz), nicht jedoch in der Modulations-Art (COFDM) und der HF-Bandbreite ($B_{HF} \leq 100 \text{ KHz}$). Als Modulationsarten (der Unterträger) sind wahlweise QPSK = 4QAM, 16QAM oder 64QAM vorgesehen. Die prinzipielle spektrale Leistungsdichte von DRM+ zeigt Abb. 5.1 (linke Seite).[21]

Rein von der Form des Spektrums her betrachtet, stellt DRM+ eine Möglichkeit dar, um ggf. noch bestehende Frequenzlücken im FM-Band mit einer (zusätzlichen) digitalen Übertragung zu füllen.

Allerdings genügt es nicht, nur das Spektrum zu betrachten, denn viele Eigenschaften eines Signals erscheinen im Frequenzbereich genau invers zu ihrer Erscheinung im Zeitbereich.^{¶1} In diesem Fall ist das Spektrum „topfeben“, hingegen ist die zugehörige Zeitfunktion von DRM+ ebenfalls sehr ähnlich zu einer Rauschspannung wie in Abb. 1.7 (Seite 6) und hat auch einen entsprechend hohen Crestfaktor.^{¶2}

^{¶1}Speziell wird dies ausgedrückt durch das Zeit-Bandbreiten-Gesetz.

^{¶2}Wenn im Gegensatz dazu DRM den Crestfaktor von DRM+ mit nur $9 \text{ dB} \doteq 2,82$ angibt, ist das Signal entsprechend stark „behandelt“. Siehe hierzu Fußnote auf Seite 14.

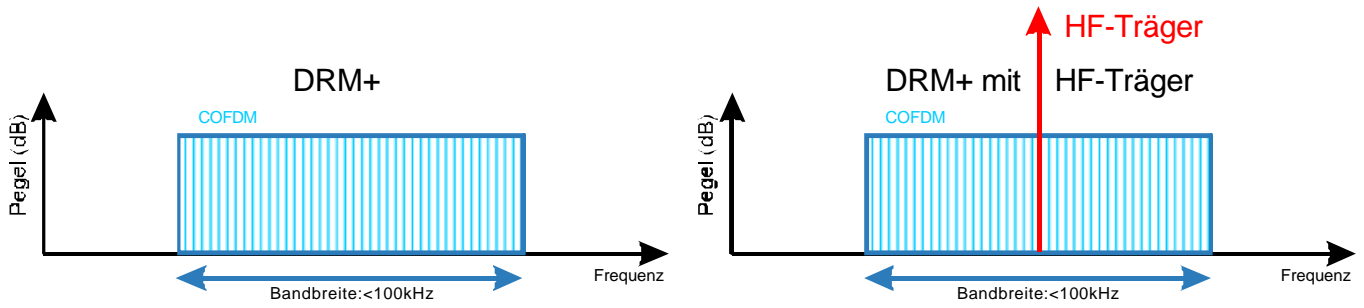


Abbildung 5.1: Prinzipielle spektrale Leistungsdichte von DRM+ (213 Sub-Channel mit je 444 Hz Bandbreite) und Vorschlag für ein DRM+C System, das aufgrund eines zusätzlichen HF-Trägers einen kleinen Crest-Faktor hat. (Der Träger ist nur während der Migrationsphase erforderlich.)

Messungen an UKW-FM-Empfängern 1985 vom IRT [23], 2006 wiederholt von T-Systems Media Broadcast, haben jeweils ergeben, daß bei fast allen Empfängern durch ein Signal mit starken Amplitudenschwankungen, wie es das DRM+ Signal darstellt, nicht tolerierbar große Intermodulations-Störungen entstehen. Die in einer Machbarkeitsstudie zu DRM-120 [24] dargelegten Gesichtspunkte gelten entsprechend auch für DRM+.

Durch das Einbringen von DRM+ Blöcken in das UKW-FM-Band ist deshalb mit Störungen beim Empfang von UKW-FM zu rechnen. Damit ist DRM+ (innerhalb des UKW-FM-Bandes) wegen seines hohen Crestfaktors nicht so ohne weiteres kompatibel zu UKW-FM.

5.1 Reduktion des Crestfaktors bei DRM+

Der Crestfaktor von DRM+ läßt sich jedoch reduzieren. Die vorgeschlagenen Maßnahmen dafür müssen aber nur während der Migrationsphase angewendet werden, um Störungen des bestehenden UKW-FM Systems zu vermeiden.

5.1.1 RF Carrier

Die erste Methode verwendet einen zusätzlichen HF-Träger, der im (bisherigen) DRM+ Spektrum anstelle des mittleren Sub-Channels (während der Migrations-Phase) dort eingefügt wird (DRM+C = DRM+ & RF carrier), Abb. 5.1 (rechts). Mit dieser Modifikation läßt sich der Crestfaktor für DRM+C erniedrigen. Dies erkennt man aus der Darstellung im Vektor-Diagramm, Abb. 5.2 (links).

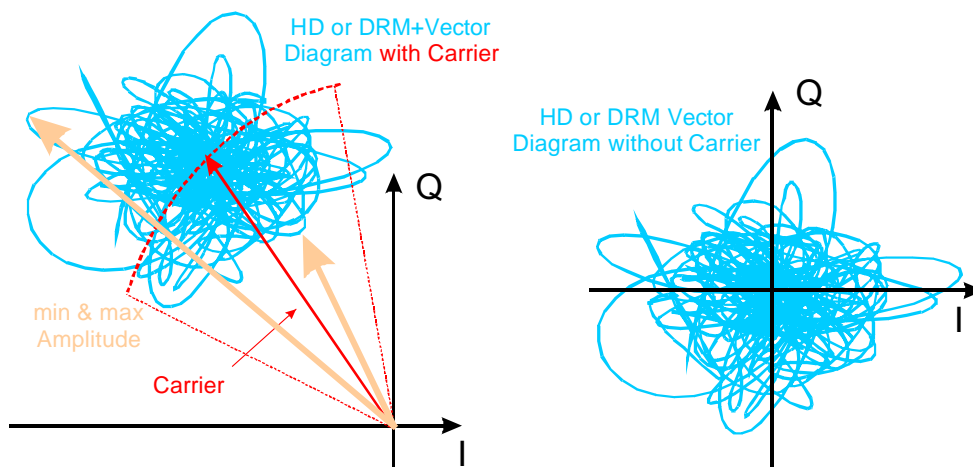


Abbildung 5.2: Vergleich der (prinzipiellen) Vektordiagramme von HD-Radio & DRM+C (links) und DRM+ & HD full digital (rechts); Das Vektordiagramm von DRM+C besteht aus einem (Träger-)Zeiger (bei HD-Radio ein Pendelzeiger), dessen Länge und Winkel durch das (blau gezeichnete) Vektordiagramm der digitalen Modulation entsprechend modifiziert wird. (ockerbraune Pfeile)

Damit ergibt sich dann ein digitales Übertragungsverfahren, das tatsächlich in vorhandene Lücken des UKW-FM-Bandes eingefügt werden könnte, ohne daß unzulässig hohe Kreuzmodulations-Störungen in vorhandenen FM-Empfängern auftreten.^{¶3}

Daß der Crestfaktor für HD-Radio (*Hybrid Mode*) und für DRM+C geringer ausfällt als bei DRM+ und bei HD *Full Digital Mode*, wird sofort einsichtig, wenn man das Vektordiagramm der beiden Modulationen vergleicht, Abb 5.2.

Zur überschlagsmäßigen Abschätzung des Crestfaktors wird für den Effektivwert bei HD *Hybrid* und für DRM+C die Größe des FM-Trägers angenommen (ein etwas zu kleiner Wert) und als maximaler oder Crest-Wert die maximale Amplitude. Aus diesen beiden Werte wird der Crest-Faktor gebildet. Bei DRM+ und bei HD *Full Digital Mode* wird als Effektivwert der Wert genommen, wo sich die ersten Löcher im Vektordiagramm zeigen. Wird daraus wieder ein Crest-Faktor gebildet, so sieht man direkt aus den geometrischen Verhältnissen, daß der Crestfaktor in Anwesenheit eines HF-Trägers kleiner ausfällt.

Ebenfalls geringer sind die Amplitudenschwankungen bei Anwesenheit eines HF-Trägers prozentual genommen, da hier im digitalen Teil weniger Leistung steckt. Ein Digitales Verfahren mit zusätzlichem HF-Träger wird somit in „normalen“ FM-Empfängern geringere Intermodulations-Störungen produzieren als ein reines Digitales Verfahren mit COFDM.^{¶4}

Es ist jedoch zu beachten, daß durch Hinzufügung eines HF-Trägers die Leistung des digitalen Signals — und damit die Reichweite — vermindert wird, wenn nur mit einem Sendeverstärker (für digitale Modulation & HF-Träger) gearbeitet wird.

5.2 Dummy Daten

Die zweite Methode verwendet zusätzliche Dummy-Daten, die so gewählt werden, daß sich der Crest-Faktor des Summensignals verringert.

Aufgrund der modernen Audio-Codierverfahren ist es möglich, bei DRM+ bis zu vier Programme zu übertragen. Diese Anzahl könnte man während der Einführungsphase beschränken und die nicht genutzten Kanäle so mit Dummy-Daten auffüllen, daß der Crest-Faktor so klein wird, daß keine Kreuzmodulations-Störungen in benachbarten UKW-FM Kanälen entstehen. (DRM+D = DRM+ & *Dummy Data*)

Eine (vermutlich bessere) Alternative dazu, die den DRM+ Standard nicht ändert, besteht darin, oberhalb und unterhalb des aktuellen DRM+ Spektrums ein je 50 KHz breites Band mit Dummy-Daten anzufügen. Auch diese Modifikation ist nur während der Migrations-Phase erforderlich.

Die Dummy Daten in den entsprechenden Sub-Channel bzw. in den beiden 50 KHz breiten Blöcken werden aktuell so generiert, daß die Amplitude des resultierenden HF-Signals konstant ist.^{¶5} Der große Vorteil davon ist dann, daß der Back-Off Faktor für den Sendeverstärker klein gehalten werden kann. Im Grenzfall läßt sich möglicherweise der HF-Verstärker im C-Betrieb fahren, was zu einer wesentlichen Verbesserung des Wirkungsgrades führt. In diesem Falle wäre DRM+D kompatibel zu den bisherigen UKW-FM Sender-Endstufen und würde auf der Sender-Seite nur geringe Kosten ergeben, was während der Migrations-Phase von besonderem Vorteil ist.

5.3 Parallel Kanäle zeitversetzt: Zeit-Diversity

Da die Übertragungskapazität von DRM+ hinreichend groß ist, lassen sich zwei Programme doppelt übertragen. Wird dabei je eines der Programme um den Wert (im Sender) zeitversetzt, der der Verarbeitungsdauer (& Interleaving Zeit) im Empfänger entspricht, läßt sich bei (kurzen) Unterbrechungen der Übertragung (Störungen, Unterführungen etc.) eine störungsunanfällige Übertragung realisieren.

Normalerweise wird das zeitverzögerte Programm (A) wiedergegeben. Das nicht verzögerte Programm (B) [mit ansonsten gleichem Inhalt wie Programm (A)] wird im Empfänger so verzögert, so daß beim Umschalten zwischen beiden kein Unterschied besteht. Tritt nun der Störfall auf, entsteht im Programm (A) bei der Wiedergabe eine Lücke. Dann wird umgeschaltet auf Programm (B), bei dem sich dieser Teil dann im Zwischenspeicher des Empfängers befindet.

Durch diese Strategie erreicht man eine Zeit-Diversity, wohingegen eine Frequenz-Diversity aufgrund der geringen Bandbreite von DRM+ kaum gegeben ist.

Wird diese Strategie auf alle in einem DRM+ Block übertragbaren Programme angewendet, kommt man infolge des Zeit-Diversity auf einen von Muting (praktisch) freien Empfang.

^{¶3}Durch Filterung muß zusätzlich sichergestellt sein, daß der Sender keine unzulässigen Nebenaussendungen macht.

^{¶4}In jedem Fall aber produziert HD-Radio unmittelbare Störungen in beiden Nachbarkanälen, wie aufgrund seiner Spektralverteilung Abb. 6.2 sofort erkennbar wird.

^{¶5}Dies ist im Prinzip eine Modifikation des Simulcast-Betriebes bei DRM-30.

Da Störungen durch Muting charakteristisch für eine digitale Übertragung sind, die Hörer aufgrund der bisherigen analogen UKW-FM Übertragung jedoch nicht daran gewöhnt sind, ist die Einführung der Zeit-Diversity aus Sicht der Vermarktbarkeit unabdingbar. Andernfalls bestünde die Gefahr, daß die Kundschaft die Empfänger reklamiert und das digitale System ablehnt.

5.4 Konkurrenz zu DAB

In einem neuen Frequenzbereich hingegen, z.B. in den durch die Umstellung auf DVB-T frei gewordenen TV Kanälen, könnte DRM+ ohne störende Auswirkungen auf UKW-FM ausgesendet werden. DRM+ stünde damit dort in Konkurrenz zu DAB. Der Vorteil von DRM+ ist allerdings, daß keine (so starke) Programmbündelung wie bei DAB erforderlich ist. Die dort mit der Multiplexbildung verbundenen Aufwendungen können entfallen.

DRM+ (und DRM+C oder DRM+D) ist — wie grundsätzlich alle rein digitalen Übertragungen — SFN (*single frequency network*) fähig. Das führt auf Vereinfachungen bei der Funknetzplanung, da für die Sender eines Programmes keine unterschiedlichen Trägerfrequenzen erforderlich werden, soweit die Echozeiten die Länge des Guardintervalls der COFDM nicht überschreiten.

Die für DAB verwendeten Sender könnten (mit einem passenden Exciter versehen) ohne Änderung direkt für DRM+ benutzt werden.

6 Das HD-Radio-System

HD-Radio ist der neue Name des amerikanischen IBOC (*in band on channel*) Systems, das sowohl eine Variante für den AM- als auch für den FM-Bereich hat. Hier wird nur das HD-Radio-System für FM betrachtet.¹¹

Für die HD-Radio Versuche in Region 1 wurde versucht, die FCC-Spektrums-Maske geeignet zu modifizieren, Abb. 6.1. [21] Man erkennt daraus, daß es sich tatsächlich um ein IBAC (*In Band Adjacent Channels*) System handelt, denn die digitalen Signale werden tatsächlich in den beiden anschließenden Nachbarkanälen übertragen. Die Digitale Übertragung bei HD-Radio erfolgt somit auf Kosten der frequenzmäßigen Nachbarn.

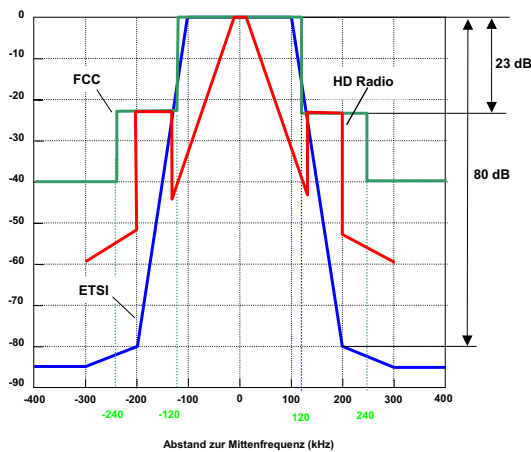


Abbildung 6.1: FM Spektrums-Masken von ETSI, FCC und Modifikation für HD-Radio Versuche im *Hybrid Mode* (rote Maske)

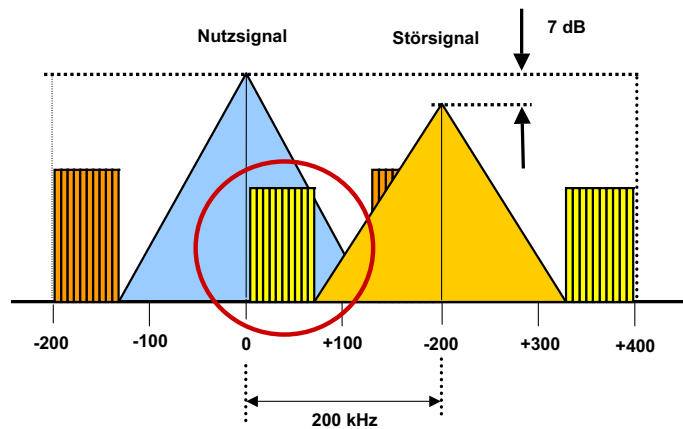


Abbildung 6.2: Störung der FM durch HD-Radio (*Hybrid Mode*) im Kanalabstand 200 KHz. Diese Störung entsteht auch dann, wenn der Nutzsender „nur“ FM moduliert ist. Ansonsten stören sie sich gegenseitig.

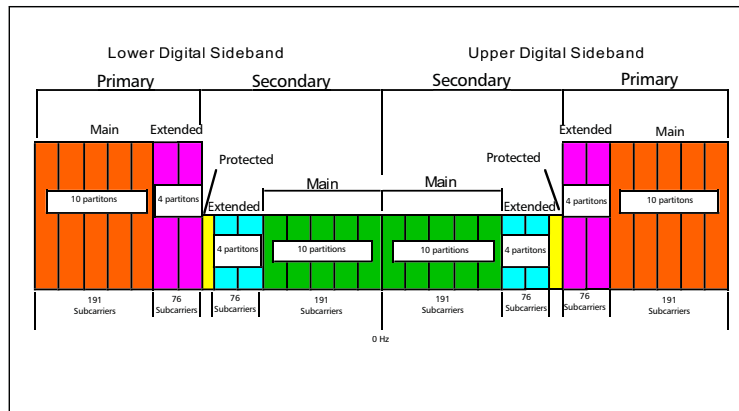
Die digitalen Zusatzsignale reichen beim *Hybrid Mode* für Region 1 nicht so weit in die Nachbarkanäle hinein, wie das in USA üblich ist. Während aber in USA die Senderdichte (räumlich und frequenzmäßig) einiges geringer ist als in Region 1 und somit diese spektrale Verbreiterung in der Regel nicht stört, ist die Senderdichte in der Region 1 so groß, daß auch die für HD-Radio modifizierte schmalere Spektralverteilung zu Störungen des UKW-FM-Empfangs führen wird, Abb. 6.2. [21]

Die digitalen Informationen für die HD-Versuche (im *Hybrid Mode*) werden als COFDM übertragen. In den Teil-Kanälen wird eine QPSK = 4QAM verwendet [21]. Es kommen $2 \cdot 191$ Unterträger mit einem Frequenz-

¹¹In [22] findet man eine Zusammenstellung der Eigenschaften und weitere Literaturstellen.

Abstand von 363 Hz zum Einsatz. Die Bandbreite der digitalen Modulationen beträgt je 69 KHz, so daß eine Gesamt-Bandbreite für das HD-Spektrum von 400 KHz zustande kommt, Abb. 6.1 und 6.2.

Bei der rein digitalen Übertragung im „Full Digital Mode“ soll das analoge FM-Signal (im Kanal) ebenfalls durch ein digitales Signal ersetzt werden, wodurch sich spektrale Verhältnisse gemäß Bild 6.3 ergeben. Man erkennt, daß in den unmittelbar angrenzenden Nachbarkanälen (*adjacent channels*) sogar mehr Leistung übertragen wird als im eigentlichen (nominellen) Kanal, denn diese werden sogar mit „Primary“ bezeichnet.



FM HD Radio—Full Digital Mode

Abbildung 6.3: FM-Spektrum IBOC voll digital: HD Radio. Die Spektralanteile in den unmittelbar angrenzenden Nachbarkanälen (*adjacent channels*) sind größer als die Spektralanteile innerhalb des nominellen Kanals.

6.1 Kompatibilität zu UKW-FM

Unter den Bedingungen für die Region 1 geht eine HD-Übertragung (*Hybrid* oder *Full Digital*) immer nur auf Kosten von anderweitig belegten Nachbarkanälen und ist deshalb praktisch nicht kompatibel zum bestehenden UKW-FM-System.

Dies zeigen die Messungen, die zu Verträglichkeitsuntersuchungen von DRM+ und HD-Radio an der Fachhochschule Kaiserslautern durchgeführt wurden, Abb. 6.4. [25] [26]

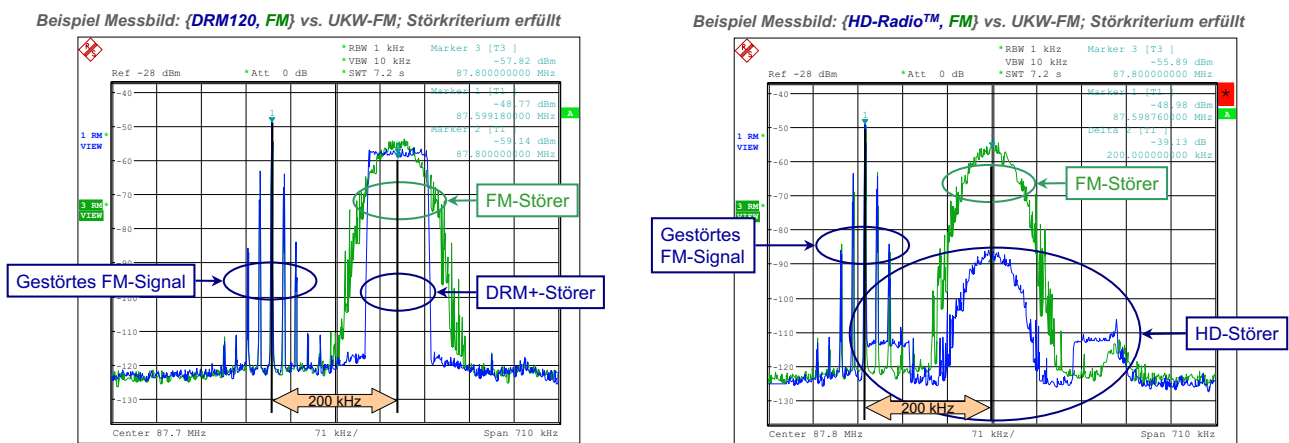


Abbildung 6.4: Störwirkung auf das UKW-FM Spektrum durch DRM+ (links) und HD-Radio (rechts) mit je 200 KHz Abstand. Gegenüber dem DRM+ Signal muß das (gesamte) HD Signal um 30 dB abgesenkt werden, um zur gleichen Störung im FM-Spektrum zu kommen wie durch DRM+.

Da HD-Radio aufgrund der systembedingten Störwirkung auf die Nachbarkanäle in der Sendeleistung um 30 dB (verglichen zu einem FM-Sender ohne HD) abgesenkt werden muß, geht dadurch die Versorgungsfläche dramatisch zurück.

Wenn nur Wenige (ohne Rücksicht auf die erzeugten Störungen in den Nachbarkanälen) auf HD-Radio umsteigen würden, wären diese im Vorteil, denn sie könnten auf Kosten der anderen zusätzliche digitale Kanäle nutzen. Wenn aber schließlich alle zu diesen Bedingungen umstiegen, störte man sich schließlich nur noch gegenseitig. Man erhielte dadurch ein durch Interferenzen begrenztes System, das nur noch eine geringe Übertragungskapazität hätte.^{||2}

HD-Radio ist also nur für ein weitflächiges Land mit geringer Senderdichte (wie z.B. die USA) oder allenfalls für die Versorgung von einzelnen Tälern im Gebirge geeignet, wo aufgrund der Abschattungen durch die Berge keine gegenseitigen Störungen entstehen können.

7 Das UKW-CPM-System

Das UKW-CPM-System wurde an der Uni Hannover entwickelt [27] [28] und am Senderstandort Hannover an einem vorhandenen UKW-Sender getestet, Abb 7.1. Es war nur der Steuersender entsprechend zu modifizieren.



Digitaler UKW-Rundfunk

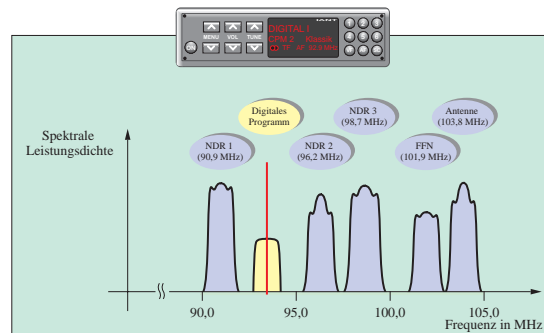
Funkübertragung: Modulation

Ziel

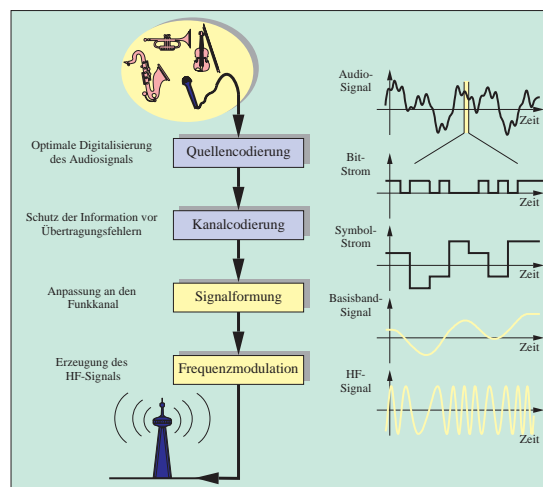
- Digitale Hörfunk-Programme im UKW-Band

Vorteile

- CD-Qualität
- weniger Störungen im Auto
- zusätzliche Dienste, z.B. Verkehrsleitfunk
- geringere Sendeleistung erforderlich
- schrittweise Einführung, da Koexistenz mit bestehenden Sendern



Einbettung des digitalen Signals in die bestehende UKW-Landschaft



Erzeugung des Sendesignals aus dem Audiosignal

Prinzip

- Optimale Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite durch **gemeinsame Optimierung** von

Quellencodierung, Kanalcodierung und Modulation.

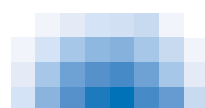
Modulation

Verfahren

- Continuous Phase Modulation (CPM, 4-stufige stetige Phasenmodulation)
- Einträgerverfahren

Eigenschaften des Sendesignals

- konstante Einhüllende
- kompaktes Spektrum
- ähnliches Verhalten wie das analoge FM-Signal



Institut für Allgemeine Nachrichtentechnik

Appelstraße 9A, 30167 Hannover
Prof. Dr.-Ing. H.-P. Kuchenbecker, Dipl.-Ing. G. de Boer
Tel.: 0511/762 2842, Fax: 3030, www.ant.uni-hannover.de

Abbildung 7.1: Das von der UNI Hannover vorgeschlagene und am Senderstandort Hannover getestete CPM-System (2003 – 2004)

^{||2}Diese Problematik ist vom UMTS Mobilfunk her bekannt.

CPM ist eine *Continuous Phase Modulation*, genauer eine 4–stufige stetige Phasenmodulation, oder allgemeiner ausgedrückt, eine digitale Frequenzmodulation.**1

Ein sehr bekanntes Beispiel eines CPM–Systems ist die Modulation (GMSK, *Gaussian Minimum Shift Keying*) des „normalen“ GSM–Handys. Der Grund für die Wahl einer Modulation mit konstanter Einhüllender war hier der höhere Wirkungsgrad des Senders im Mobile und die dadurch resultierende längere Akku–Standzeit.

Der Grund für ein CPM–System zum Ersatz des UKW–FM Rundfunks ist der, daß hierdurch keine Intermodulationsstörungen in UKW–FM Empfängern entstehen. Man kann also ohne zusätzliche Störungen zu erzeugen, vorhandene Lücken im UKW–Band mit UKW–CPM Sendern ausfüllen (anstatt mit UKW–FM Sendern).

Das UKW–CPM System, wie es von der UNI Hannover vorgeschlagen wurde, ist kompatibel zum Kanalraster des UKW–FM Rundfunk und erzeugt keine weiteren Störungen als ein entsprechender analoger UKW–FM Sender auch erzeugt hätte. Diese Problematik ist aber Teil einer jeden Funknetzplanung. Für UKW ist dadurch keine neue Planung erforderlich.

Zum Empfang der digitalen Sendungen wird ein hierfür geeigneter Empfänger benötigt. Da es sich bei CPM übertragungstechnisch um eine FM handelt — und damit um eine nichtlineare (exponentielle) Modulation — ist der Aufwand im Empfänger entsprechend hoch.**2 Dies ist ein wesentlicher Einwand gegen die Verwendung von CPM, obwohl gerade die CPM aufgrund ihres FM–ähnlichen Charakters bezüglich der Kompatibilität zum FM–Rundfunk besonders geeignet wäre.

Unter günstigen Voraussetzungen (und bei nicht zu hohen Anforderungen) könnte als einfache Lösung ein Empfänger mit Begrenzer–Verstärker und Diskriminator mit anschließender digitaler Signalverarbeitung in Betracht kommen.**3 Einer solchen einfachen Lösung fehlt jedoch auf der HF–Ebene eine entsprechende adaptive Entzerrung der durch den Mehrwege–Empfang verzerrten Datensymbole. Diese Entzerrung kann nach der FM–Demodulation nicht mehr nachgeholt werden, weil sich dieser Demodulationsvorgang nichtlinear verhält, wie sich am Beispiel der Gleichkanal–Störungen bei der (analogen) FM gezeigt hat, Abb. 1.18 (Seite 12). Dieser „einfache“ CPM–Empfänger würde also bei ausgeprägten Echo–Störungen versagen.

8 Das FMeXtra–System

Das FMeXtra–System wendet im Unterschied zu den anderen bisher betrachteten eine hierarchische Modulation an. Die oberste Modulations–Stufe ist FM, also eine Modulation mit konstanter Einhüllender. Damit ist sicher gestellt, daß FMeXtra (ähnlich wie UKW–CPM) keine unzulässigen Störungen im UKW–FM Rundfunk verursacht.

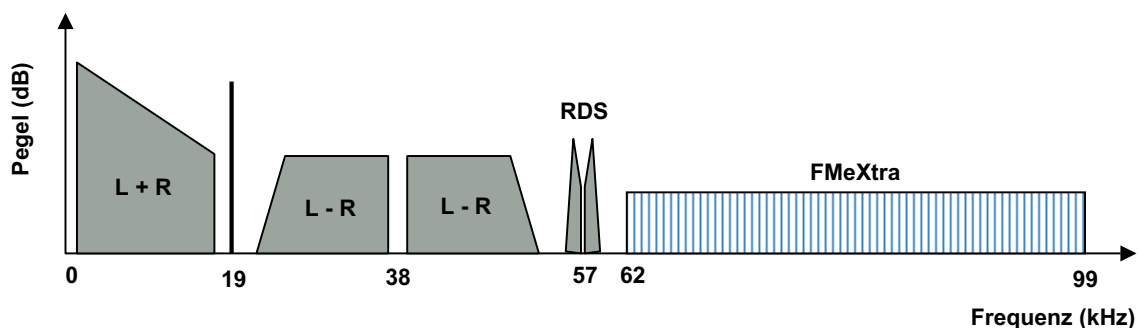


Abbildung 8.1: Spektrum MPX–Signal mit FMeXtra 1. Stufe

Es unterscheidet sich vom UKW–FM System dadurch, daß die analogen Teile im Multiplex–Signal (Zusatz–Signal, Differenz–Signal, Summen–Signal) teilweise oder vollständig durch digitale Signale ersetzt werden, Abb. 8.2.††1

**1 Zwischen Phasen– (PM) und Frequenz–Modulation (FM) besteht eine enge Verwandtschaft. Alle digitalen „Phase Modulations“ sind übertragungstechnisch gesehen Frequenz–Modulationen. [2] [29]

**2 Im Unterschied zu der sonst beim Rundfunk üblichen Philosophie, ist bei praktisch allen digitalen Systemen der Empfänger sehr viel komplexer als der Sender, was die digitale Signalverarbeitung betrifft. Aber besonders trifft dies für CPM zu.

**3 Dies entspricht dem bei Bluetooth angewendeten Konzept.

††1 Das RDS–Signal wird sich vorläufig nicht ersetzen lassen, weil hierüber wichtige Zusatzinformationen übertragen werden.

Da im Empfänger bis zum Diskriminator dadurch keine Änderung erforderlich wird, weil die Digitale Signalverarbeitung für die Aufbereitung der Digitalsignale erst danach (im MPX) einsetzt, wird der technische Aufwand im Empfänger geringer als bei den anderen Vorschlägen.

Das FMeXtra System könnte in 4 Stufen eingeführt werden.

1. Das Zusatz-Signal (62 KHz – 99 KHz) ist digital.
2. Orthogonal zum analogen Differenz-Signal wird ein digitales Signal übertragen. (Als Zwischenlösung^{††2})
3. Zusätzlich wird das analoge Differenz-Signal durch ein weiteres digitales Signal ersetzt. Der Stereo-Pilot wird dann abgeschaltet.
4. Schließlich wird auch noch das analoge Summensignal durch ein drittes digitales Signal ersetzt.

Die aktuellen Versuche benutzen nur die 1. Stufe, also eine Digitalübertragung als Zusatz-Signal, Abb. 8.1. [21] Dieser Bereich im MPX Spektrum ist aufgrund der Eigenschaften der FM (Störungen durch Rauschen und Interferenzen) als besonders ungünstig bekannt.

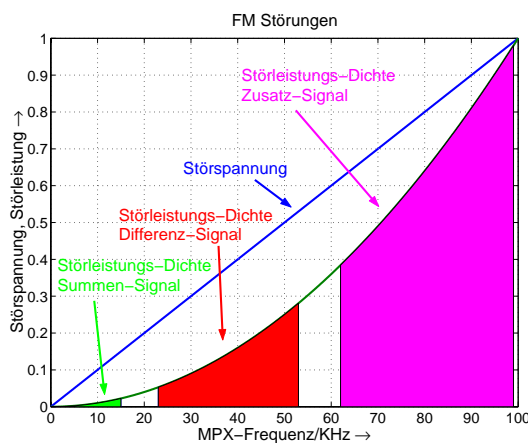


Abbildung 8.2: Die Störleistungs-Dichte (Rauschen, relative Werte) im demodulierten MPX-Signal. Die Störleistung ist jeweils proportional zu den Flächen.

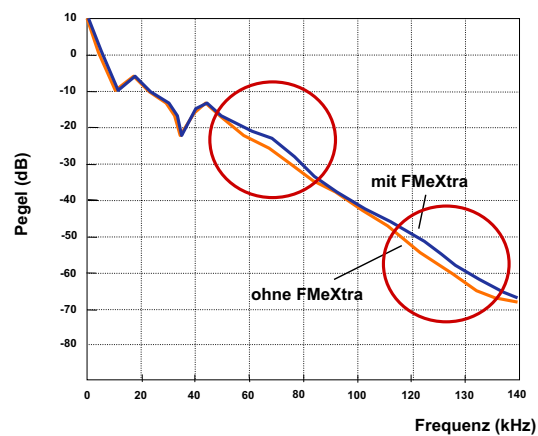


Abbildung 8.3: Die Leitungs-Dichte (einseitige Darstellung; 0 = f_C) des FM-Spektrums. Die HF-Leistung, die durch das FMeXtra-Signal hinzukommt ist proportional zu den Flächen zwischen den beiden Kurven.

Die Störleistungen in den farbig markierten Bereichen, Abb. 8.2, sind jeweils proportional zu den entsprechenden Flächen. Hieraus ist deutlich erkennbar, daß der Bereich von 62 KHz bis 99 KHz besonders ungünstig ist.^{††3} Auf der anderen Seite sieht man aus Abb. 8.3 [21], daß die durch das digitale FMeXtra Signal hinzukommende HF-Leistung vergleichsweise gering ist. Dies muß aber auch so sein, weil das FM-Spektrum durch die ITU-Vorgaben für die Spektrumsmaske in seinen Maximalwerten festgelegt ist. Wenn also zusätzlich ein digitales Signal im MPX hinzugefügt wird, müssen deshalb die Pegel der anderen Teil-Signale entsprechend abgesenkt werden.^{††4}

Bei verschiedenen lokalen Sendern, die schon jetzt nur in „Mono“ senden,^{††5} könnte man direkt auch schon zur 3. Stufe übergehen. Dies ergäbe weitaus günstigere Werte z.B. für die Reichweite der Digitalübertragung.

Da die Störleistung im Bereich 23 KHz - 53 KHz (Stereo-Differenz-Signal) bereits deutlich geringer ist, kann hier mit einer höherstufigen Modulation (16QAM) in den Sub-Channel der COFDM gearbeitet werden, wodurch sich mehrere Programme mit höherer Qualität übertragen lassen.

^{††2}Hier eignet sich nur eine Amplitude Shift Keying (ASK) Modulation. Diese Zwischenlösung ist allerdings problematisch, weil bei schlecht abgeglichenen Stereo-Dekodern das Datensignal als Störung zu hören sein könnte.

^{††3}Die Kurven stellen zunächst nur den Beitrag durch das Rauschen dar. Für die zusätzlichen Störungen durch Mehrwege-Empfang gelten entsprechende (kompliziertere) Zusammenhänge.

^{††4}Aus den Leistungsverhältnissen wird erkennbar, daß in dem MPX Bereich von 62 KHz bis 99 KHz nur mit einer niederstufigen Modulation (QPSK) in den Sub-Channel der COFDM gearbeitet werden kann.

^{††5}Damit lassen sich Kosten für Übertragungsleitungen einsparen. Und bei mancher Musik fällt das gar nicht auf, denn die Stereo-Anzeige ist trotzdem in Betrieb. Zudem kann das Summensignal auch noch lauter übertragen werden, was für das „Zappen“ günstiger ist.

Schließlich kann nach einer (angemessenen) Übergangszeit auch noch die 4. Stufe realisiert werden, bei der im bisherigen Kanal für das Summensignal dann eine 64QAM in den Sub-Channel eingesetzt werden kann.

Da FMeXtra in jedem Fall wegen der hierarchischen Modulation in jedem Fall erst eine FM-Demodulation im Empfänger benötigt, hat man auch hier die Probleme mit den nichtlinearen Auswirkungen der Echo-Störungen. Für die Daten, die im MPX Spektrum bei höheren Frequenzen übertragen werden, treten diese Störungen (weit) stärker zu Tage als für Daten, die z.B. im Bereich des Summen-Signals übertragen werden könnten. Zusätzlich sind die höheren Frequenzen im MPX Spektrum auch noch durch eine größere Rauschleistung beeinträchtigt, wie aus Abb. 8.2 hervorgeht.

9 Zusammenfassung

Es gibt verschiedene Ansätze zur Digitalisierung des analogen UKW-FM-Rundfunks. Diese unterscheiden sich durch ihre Störwirkung auf das existierende UKW-FM Rundfunksystem und durch den Aufwand und damit die Kosten für den Empfänger. Es kann aber dem durchschnittlichen Hörer i.a. nur schwer vermittelt werden, weshalb er sich neue (teure) Empfänger kaufen soll, wenn damit keine qualitative Verbesserung sondern bestenfalls nur eine quantitative Vermehrung von Rundfunkprogrammen zustande kommt. Wo bleibt hier eine „Welle der Freude“?

Vorschläge wie HD-Radio führen im bestehenden UKW-Band zu nicht tolerierbaren Störungen beim analogen FM-Empfang, der bislang (zumindest im mobilen Bereich) die einzige Übertragungsart mit guter Qualität ist. Sie sind deshalb nicht kompatibel. Eine Rechnung, die kalkuliert, daß eine Verschlechterung des UKW-Empfangs die Hörschaft zum Kauf digitaler Empfänger treibt, dürfte nicht aufgehen.

Kompatibel zum bestehenden UKW-FM-Rundfunk sind UKW-CPM und FMeXtra, da diese keine unzulässigen Störungen bei benachbarten FM-Programmen verursachen, aber bei welchen Störungen durch Mehrwegeausbreitung nur aufwändig bzw. nicht zu beseitigen gehen.

Kompatibel gemacht werden kann DRM+ durch Zusatz eines Trägers (DRM+C) oder vorteilhafter durch Einfügen geeigneter Dummy-Daten zur Reduktion des Crestfaktors (DRM+D). Da es sich bei DRM+ mit COFDM um ein lineares Modulationsverfahren handelt, ist die Beseitigung von Störungen durch Mehrwegeausbreitung einfach. Dieses Verfahren erscheint daher am besten geeignet, um den analogen UKW-FM Rundfunk längerfristig zu ersetzen.

Literatur

- [1] Schneider, R.: *Die UKW-Story; Zur Entstehungsgeschichte des Ultrakurzwellen-Rundfunks*, Drei-R-Verlag Berlin, 1989
- [2] Rudolph, D.: *Winkel-Modulationen*, Skript zur Vorlesung „Signale und Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [3] O.A.: *Messungen an Sendesystemen, Rezepte zur Messung/Überwachung von FM-Hörfunk- und TV-Sendesystemen*, Firmendruckschrift Rohde & Schwarz, N 4-023 D-1 & N 4-023 D-2, ca. 1980 — 1985
- [4] Maxson, D; Woods, M.; Mahaney, C.: *Measuring Your IBOC Spectrum*, <http://www.broadcastsignalab.com>
- [5] Rudolph, D.: *Amplituden-Modulationen*, Skript zur Vorlesung „Signale und Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [6] O.A.: *Verzerrungsmeßtechnik an Richtfunkssystemen*; Firmendruckschrift Wandel & Goltermann, BN 6134; 1981
- [7] Rudolph, D.: *Synchronisation des Empfängers*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [8] Rudolph, D.: *Basisband-Signale*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [9] Taub, H.; Schilling, D.L.: *Principles of Communication Systems*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1989
- [10] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*, 5.A, K.G. Saur, Bd1 1987, Bd2 1990
- [11] Orban, R.: *A short History of Transmission Audio Processing in the United States*, <http://www.261.gr/roberthistory.html> & <http://www.bext.com/histproc.htm>
- [12] Stokke, K.N.: *Some Quality and Coverage Problems in Audio Broadcasting*, *Teletronikk* 2.2000, pp. 80 – 84
- [13] Rudolph, D.: *Modulation und Rauschen*, Skript zur Vorlesung „Signale und Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [14] Rudolph, D.: *Einführung in die Signal- und System-Theorie*, Skript zur Vorlesung „Signale und Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [15] Rudolph, D.: *Funk-Kanal*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [16] Lee, W.C.Y.: *Mobile Communication Engeneering*, Mc-Graw Hill 1982.
- [17] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: *GSM, Global System for Mobile Communication*, 2.A. Teubner, 1999
- [18] Panter, P.F.: *Modulation, Noise, and Spectral Analysis, Applied to Information Transmission*, McGraw Hill, 1965
- [19] Rudolph, D.: *Spektren periodischer Zeitfunktionen*, Skript zur Vorlesung „Signale und Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [20] Rudolph, D.: *Vielträger-Modulationen*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“, <http://www.diru-beze.de/>
- [21] Kretschmar, R.: *HD-Radio und FMeXtra, Vorstellung digitaler Systeme im UKW-Bereich*, Landesanstalt für Kommunikation Baden-Württemberg, 27. September 2007

- [22] Rudolph, D.: *In Band on Channel (IBOC) bei FM und AM*,
<http://www.diru-beze.de/> & <http://www.radiomuseum.com/>
- [23] Schneeberger, G.: *Verträglichkeit von UKW-Heimempfängern und Digitalmodulation*, Aktennotiz, Institut für Rundfunktechnik, Juli 1985
- [24] Rudolph, D.: *Machbarkeitsstudie zu DRM 120*, Wissen Heute, Heft 6, 2006, pp. 292 — 304,
<http://www.diru-beze.de/>
- [25] Steil, A.; Schad, F.; Rosenbaum, M.: *Abschlussbericht Verträglichkeit Digitale Modulation im UKW-Band*, FH Kaiserslautern, 8. November 2007
<http://www.fh-kl.de/~drm>
- [26] Steil, A.; Lehnert, J.; Schad, F.; *Digital Radio Mondiale (DRM) mit OFDM-Technik*, Vortrag beim VDE, 25. Oktober 2007
<http://www.fh-kl.de/~drm>
- [27] de Boer, G.; Kupferschmidt, C.; Bederov, D.; Kuchenbecker, H.-P.: *Digital Audio Broadcasting in the FM Band Based on Continuous Phase Modulation*, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 40, Nr.3, Sept 2003, pp. 293 — 303
- [28] Kupferschmidt, C.; de Boer, G.; Kuchenbecker, H.-P.: *A new DAB Scheme for the FM Band Based on Continuous Phase Modulation*, IEEE 54th Annual Broadcasting Symposium, Oct. 13 — 15, 2004, Washington, USA
- [29] Rudolph, D.: *Digitale Modulationsverfahren*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“,
<http://www.diru-beze.de/>
- [30] Rudolph, D.: *Inter-Symbol-Interferenz & Nyquist-Bedingung*, Skript zur Vorlesung „Digitale Funk-Systeme“,
<http://www.diru-beze.de/>