

# Unerwünschte Aussendungen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ITU Spektrums-Masken</b>	<b>1</b>
1.1	International Telecommunication Union (ITU)	1
1.1.1	ITU Recommendations	1
1.2	ITU Spektrums-Maske für die AM-Bereiche	2
1.3	Adaption der ITU Spektrums-Maske für DRM	3
1.3.1	Digitale Leistung gleich Analoger Seitenband-Leistung	4
1.3.2	Digitale Leistung gleich AM Träger-Leistung	5
1.4	Die DRM Spektrums-Maske	6
<b>2</b>	<b>Schulterabstand und OOB Steigung</b>	<b>7</b>
2.1	AM kompatible Spektrums-Maske für COFDM-Sender	8
2.2	Spektrums-Maske bei Kanal-Bündelung	8
<b>3</b>	<b>Gemessene DRM Spektren</b>	<b>9</b>
3.1	Beispiel eines für DRM ungeeigneten Senders	9
3.2	Beispiel für die Empfangs-Beeinträchtigung	10
3.3	Beispiel für die neueste Sender-Generation	10
3.4	Filterung von OOB am Sender-Ausgang	11
<b>4</b>	<b>Digitale Leistung bei gleicher Versorgungs-Fläche</b>	<b>11</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Das ITU Logo	1
1.2	Die ITU Spektrums-Maske für die AM Rundfunk-Bereiche	3
1.3	Die normierte ITU Spektrums-Maske für die AM Rundfunk-Bereiche	4
1.4	links: DRM Spektrum und ITU Spektrums-Maske für identische Seitenband-Leistungen ( $B$ : Kanal-Bandbreite, $S$ : Schulter-Abstand, $N$ : Abstand zum „Noise-Floor“); rechts: DRM Spektrum (I/Q-Signal) eines Exciters (frühe Variante)	4
1.5	Die Spektrums-Maske für DRM bei DRM-Leistung gleich AM-Träger-Leistung	5
1.6	DRM Spektrums-Maske und DRM Spektrum am Ausgang des Exciters (verbesserte Version)	6
2.1	Der erforderliche Schulter-Abstand in Abhängigkeit der Steigung des OOB Spektrums bezogen auf gleiche Seitenband-Leistung wie im analogen Fall (durchgezogene Kurve). Für digitale Seitenband-Leistung gleich der analogen Trägerleistung gilt die gestichelte Spektrums-Maske.	7
2.2	Die Steigung des Außerbandspektrums als Funktion der Größe des Lochs im Vektordiagramm. Die Steigung ist auf die RF-Bandbreite $B_{RF}$ normiert.	7
2.3	Die AM kompatible Spektrums-Maske für DRM bei DRM-Leistung gleich AM-Träger-Leistung	8
3.1	Gemessenes Spektrum eines KW Senders bei einer digitalen Übertragung mit COFDM	9
3.2	Die beiden Möglichkeiten um im Vektordiagramm Annäherungen an den Nullpunkt zu vermeiden	10
3.3	KW Empfangs-Situation ohne DRM (links) und mit DRM Signal (rechts). Entfernung zum Sender ca. 2000 km	10
3.4	DRM Spektren, die die DRM Spektrums-Maske einhalten	11

## Unerwünschte Aussendungen

Hochfrequenz-Sender sollten ideal nur solche Signale erzeugen, die die vorgegebenen spektralen Bandgrenzen exakt einhalten. D.h., die erzeugten Signale müßten außerhalb der Bandgrenzen spektral identisch Null sein. Theoretisch und praktisch ist das nicht möglich.

**Theoretisch:** Jedes Nachrichten-Signal ist von endlicher Dauer. Gemäß dem Zeit-Bandbreiten-Gesetz haben Signale endlicher Dauer ein (theoretisch)  $\infty$  breites Spektrum.

**Praktisch:** Kein Übertragungs-System ist absolut linear. Durch Nichtlinearitäten entstehen im Spektrum unerwünschte Frequenz-Komponenten (innerhalb und) außerhalb der vorgegebenen Bandgrenzen.

Die prinzipielle theoretische Grenze ist praktisch gesehen von geringem Gewicht. Durch Spektrums-Formung (Filterung) ist es immer möglich, die Spektralanteile außerhalb der definierten Übertragungs-Bandbreite so klein zu machen, daß diese in die Größenordnung des (stets vorhandenen) Rauschens kommen und deswegen nicht länger als störend in Erscheinung treten können.

Im Unterschied dazu ist die praktisch erreichbare Grenze eine Frage der Dimensionierung resp. Implementierung des Modulators und der Verstärker-Stufen eines Senders und dessen sonstiger Komponenten. Hierbei spielen Kompromisse bezüglich Aufwand und Kosten eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grunde war es erforderlich, durch internationale verbindliche Absprachen, zulässige Grenzwerte für unerwünschte Aussendungen festzulegen.

## 1 ITU Spektrums-Masken

### 1.1 International Telecommunication Union (ITU)

Die ITU mit Sitz in Genf ist eine internationale Organisation innerhalb der Vereinten Nationen (UN) innerhalb der die Regierungen und der private Sektor globale Telecom Netzwerke und Dienste koordinieren.

Die ITU ist führend bei der Veröffentlichung von Telecommunications Technologie, Regularien und Standards. Homepage der ITU ist <http://www.itu.int>



Bild 1.1: Das ITU Logo

#### 1.1.1 ITU Recommendations

Unerwünschte Aussendungen (Unwanted Emissions) setzen sich aus Spurious Emissions und Out-of-Band Emissions zusammen. Diese sind in ITU Rec. SM.329-7 folgendermaßen definiert:

**Spurious emission (Article 1 (S1), No. 139 (S1.145) of the RR):** Emission on a frequency, or frequencies, which are outside the necessary bandwidth and the level of which may be reduced without affecting the corresponding transmission of information. Spurious emissions include harmonic emissions, parasitic emissions, intermodulation products and frequency conversion products but exclude out of band emissions.

**Out-of-band emission (Article 1 (S1), No. 138 (S1.144) of the RR):** Emission on a frequency or frequencies immediately outside the necessary bandwidth which results from the modulation process, but excluding spurious emissions.

Nach diesen Definitionen entstehen die Spurious Emissions durch Nichtlinearitäten und sonstige technischen Unzulänglichkeiten (z.B. mangelnde Unterdrückung von internen Hilfsträgern) des Senders. Hingegen entstehen Out-of-Band Emissions durch unzureichende Filterung bzw. Signalformung im Rahmen des Modulationsprozesses.

Beide zusammen sind unerwünschte Aussendungen, die Störungen in anderen Übertragungskanälen bewirken. Die ITU hat für jede Übertragungs-Art eine Spektrums-Maske veröffentlicht, die von den zugehörigen Aussendungen nicht überschritten werden darf.

Als Beispiel für eine ITU Empfehlung (recommendation) wird der Titel der ITU-R SM.329-7 angegeben:

RECOMMENDATION ITU-R SM.329-7

SPURIOUS EMISSIONS\*

(Question ITU-R 55/1)

(1951-1953-1956-1959-1963-1966-1970-1978-1982-1986-1990-1997)

\* Note by the Editorial Committee. - The terminology used in this Recommendation is in conformity, in the three working languages, with that of Article 1 (S1) of the Radio Regulations (RR) (No. 139 (S1.145)),

namely:

- French: rayonnement non essentiel;
- English: spurious emission;
- Spanish: emisión no esencial.

## 1.2 ITU Spektrums-Maske für die AM-Bereiche

Als Beispiel für eine ITU Spektrums-Maske wird diejenige für die AM-Rundfunk-Bereiche (150 KHz — 30 MHz) betrachtet.

Nach ITU-R SM.328-9 (SPECTRA AND BANDWIDTH OF EMISSIONS) ist diese wie folgt definiert:

**Out-of-band spectrum (AM Transmission):** If frequency is plotted as the abscissa in logarithmic units and if the power densities are plotted as ordinates (dB) the curve representing the out-of-band spectrum should lie below two straight lines starting at point (+0.5 F, 0 dB) or at point (-0.5 F, 0 dB) and finishing at point (+0.7 F, -35 dB) or (-0.7 F, -35 dB) respectively. Beyond these points and down to the level of -60 dB, this curve should lie below two straight lines starting from the latter points and having a slope of 12 dB/octave. Thereafter, the same curve should lie below the level -60 dB.

The reference level, 0 dB, corresponds to the power density that would exist if the total power, excluding the power of the carrier, were distributed uniformly over the necessary bandwidth (see § 3.6.1.4).

The ordinate of the curve so defined represents the average power intercepted by an analyser with an r.m.s. noise bandwidth of 100 Hz, the frequency of which is tuned to the frequency plotted on the abscissa.

In dieser Recommendation ist  $F$  die Kanal-Bandbreite. Diese hat die Werte:

- 9 KHz für Lang- und Mittelwelle (Region 1 & 3: „Rest der Welt“)  
Rundfunk auf LW gibt es nur in Region 1 (Europa incl. Rußland).
- 10 KHz für Mittelwelle (Region 2: „die Amerikas“)
- 10 KHz für Kurzwelle bzw. 5 KHz (wegen Überbelegung der Bänder)

Da es technisch leicht möglich ist, einen HF-Träger spektral sauber zu generieren, bezieht sich die Rec. ITU-R SM.328-9 nur auf die Seitenbänder, die infolge der Modulation entstehen („excluding the power of the carrier“).

Meßtechnisch verwendet man zur Prüfung eines AM-Senders zur Modulation einen Rauschgenerator, der innerhalb des Nachrichten-Bandes ein Rauschen mit konstanter Leistungsdichte liefert. Ein solches bandbegrenzt Rauschen wird „farbiges Rauschen“ bezeichnet (coloured noise). Dadurch kommt es in beiden Seitenbändern der AM zu einer gleichmäßigen Spektraldichte („distributed uniformly over the necessary bandwidth“).

Wird eine Rauschleistungs-Dichte mit Hilfe eines Spektrum-Analysers gemessen, ergibt sich die gemessene Rauschleistung proportional zur (effektiven) Meßbandbreite. Daher muß festgelegt werden, wie groß die Meßbandbreite sein soll („an analyser with an r.m.s. noise bandwidth of 100 Hz“).

Zur Messung wird der AM-Sender auf einen (effektiven) Modulations-Grad von 35 % eingestellt. Da das Rauschen eine Gauß-förmige Amplituden-Verteilung hat, ergibt sich dadurch in der Spitze bis zu 100 % Modulationsgrad.

Die Leistung eines AM-Senders wird als Träger-Leistung angegeben. Wird der Sender moduliert, kommt noch die Seitenband-Leistung hinzu.

Es werde angenommen, daß ein AM-Sender  $P_C = 100 \text{ KW}$  Trägerleistung habe. Bei einem Modulations-grad  $m = 0.35$  kommt dann als Seitenband-Leistung  $P_{SB}$  zustande:

$$P_{SB} = \frac{m^2}{2} P_C = 0.06125 \cdot P_C = 6.125 \text{ KW} \tag{1.1}$$

Bezogen auf die Träger-Leistung  $P_C$  sind dies 6,125% oder -12.13 dB.

Die Seitenband-Leistung ist gleichmäßig auf die Seitenbänder verteilt. Hier wird angenommen, auf eine Bandbreite von 10 KHz<sup>1</sup>. Der Spektrum-Analyser soll aber mit einer Bandbreite von 100 Hz messen („with an r.m.s. noise bandwidth of 100 Hz“). Dadurch wird nur ein Faktor von  $\frac{100 \text{ Hz}}{10 \text{ KHz}} = \frac{1}{100}$  der Seitenbandleistung  $P_{SB}$  beim Analyser angezeigt<sup>2</sup>. Dieser Wert wird zu 0 dBr angesetzt. Der Zusatz „r“ bedeutet „relativ“.

$$\frac{1}{100} \text{ der Leistung} \rightsquigarrow -20 \text{ dB} \tag{1.2}$$

Damit ist die gemessenen Seitenband-Leistung insgesamt -32.125 dB unterhalb der Träger-Leistung  $P_C$ , bzw. die Trägerleistung ist relativ 32.125 dB größer als die (gemessene) Seitenband-Leistung, Bild 1.2. Die Steigung von -12 dB/Oktave ist identisch mit -40 dB/Dekade.

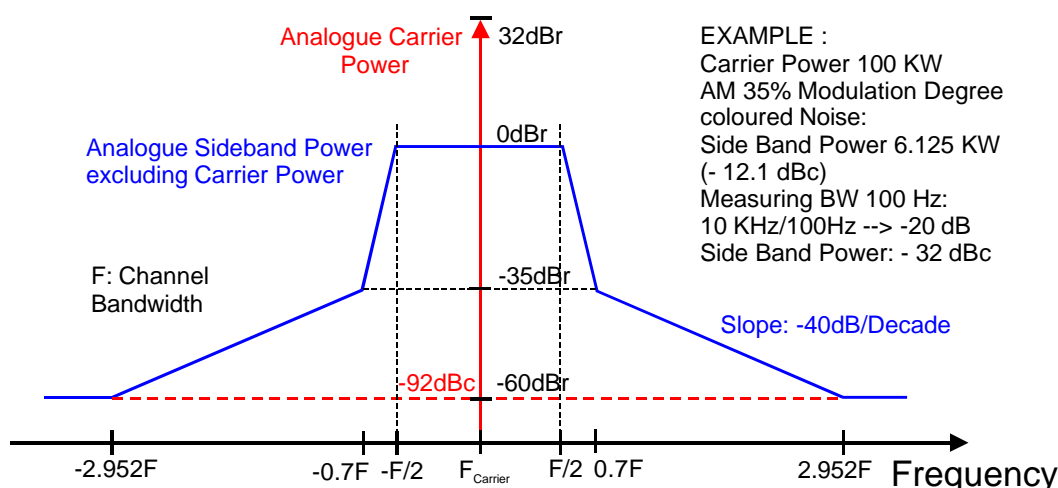


Bild 1.2: Die ITU Spektrums-Maske für die AM Rundfunk-Bereiche

Der Abstand zwischen dem 0 dBr Wert und dem -35 dBr Wert wird mit „Schulter-Abstand“ bezeichnet. Den exakten Verlauf der ITU-Maske in normierter Darstellung zeigt Bild 1.3 für linear unterteilte Frequenz-achse.

### 1.3 Adaption der ITU Spektrums-Maske für DRM

Im Unterschied zu anderen Digitalisierungen im Rundfunkbereich, wie z.B. DAB, geht die Digitalisierung in den AM-Bereichen (DRM, Digital Radio Mondiale <http://www.drmm.org>) davon aus, daß die digitalen Sendungen die analogen Sendungen ersetzen sollen. Sie werden daher in den gleichen Rundfunkbändern ausgestrahlt wie die analogen Sendungen.

Bis die analogen Dienste durch die digitalen abgelöst sind, sind demnach in den Rundfunk-Bändern nebeneinander sowohl analoge als auch digitale Sendungen zu empfangen.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Für LW & MW in den Regionen 1 & 3 sind das 9 KHz.

<sup>2</sup>Der Träger wird stets richtig angezeigt, da für diesen eine Filterbreite von z.B. 1 Hz bereits ausreicht.

<sup>3</sup>Mit einem analogen Empfänger hört man nur ein zischendes Rauschen beim Empfang einer DRM-Sendung.

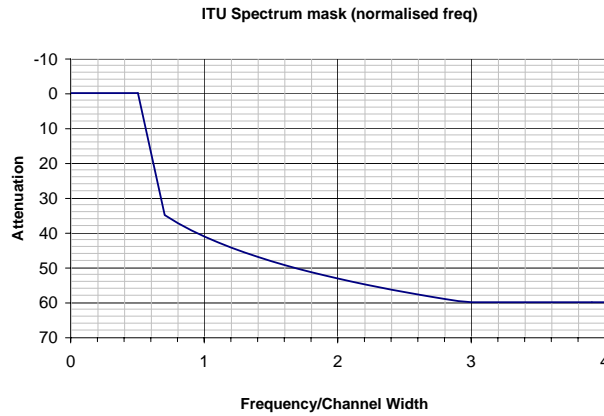


Bild 1.3: Die normierte ITU Spektrums-Maske für die AM Rundfunk-Bereiche

In dieser Übergangszeit sind die DRM-Sendungen demnach nur „Untermieter“ in den analogen AM-Bändern. Das bedeutet, daß sich die unerwünschten Aussendungen der DRM-Sender an die Spektrums-Maske für AM halten müssen.

Wird demnach ein analoger AM-Sender durch einen digitalen DRM-Sender ersetzt, darf dadurch in den Nachbarkanälen keine größere Störwirkung entstehen.

### 1.3.1 Digitale Leistung gleich Analoger Seitenband-Leistung

Das DRM Spektrum hat keine Trägerlinie. Die gesamte abgestrahlte Leistung befindet sich somit in den Seitenbändern.

Bei der Koordinierung der AM-Sender und deren Standorte bei der ITU gilt, daß z.B. ein 100 KW AM-Sender eine Trägerleistung  $P_C = 100$  KW und eine nominelle Seitenband-Leistung  $P_{SB} = 6.125$  KW hat. Für diesen Wert der Seitenband-Leistung gilt die für diesen Sender koordinierte ITU Spektrums-Maske bzw. deren relative Pegelwerte.

Wird nun dieser Sender auf DRM umgestellt, so darf dadurch keine Seitenband-Leistung und OOB Aussendung entstehen, die die koordinierten Werte überschreitet. In diesem Fall kann die ITU Spektrums-Maske für DRM Sendungen unmittelbar verwendet werden, Bild 1.4.

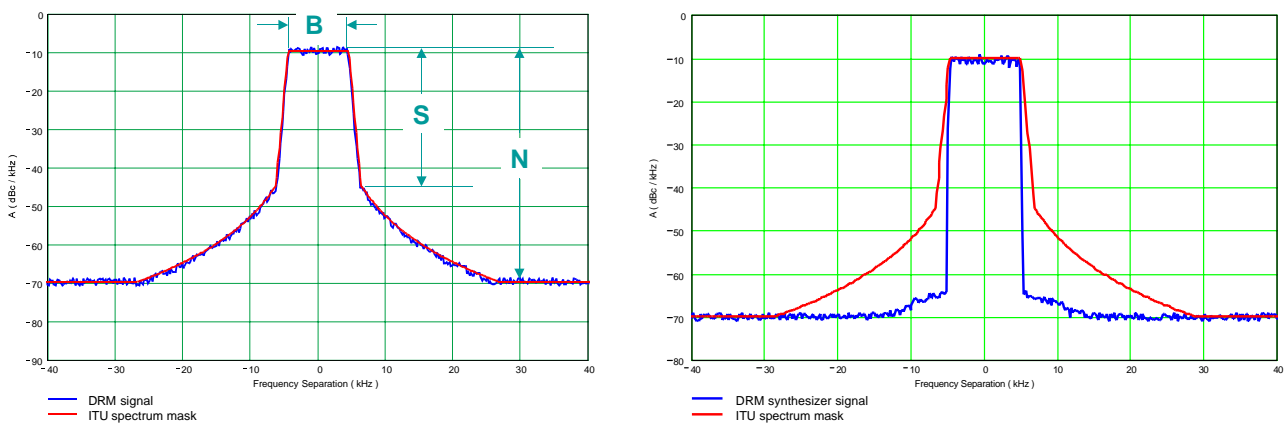


Bild 1.4: links: DRM Spektrum und ITU Spektrums-Maske für identische Seitenband-Leistungen ( $B$ : Kanal-Bandbreite,  $S$ : Schulter-Abstand,  $N$ : Abstand zum „Noise-Floor“); rechts: DRM Spektrum (I/Q-Signal) eines Exciters (frühe Variante)

Der in Bild 1.4 (links) dargestellte Fall schöpft die zulässige Spektrums-Maske zu 100% aus. Dies ist ein theoretischer Grenzfall. Da die AM-Sender i.a. die Maske nicht vollständig ausschöpfen und die entsprechenden Störwirkungen auf benachbarte AM-Sendungen zwischen analog und digital sehr unterschiedlich

sind, wird ein solcher DRM-Sender zumindest beim Empfang (frequenzmäßig) benachbarter AM-Sender „auffallen“.

### 1.3.2 Digitale Leistung gleich AM Träger-Leistung

Anders sieht der Fall aus, wenn die digitale Sende-Leistung (in den Seitenbändern) gleich der analogen Träger-Leistung sein soll. Die digital ausgesendete DRM Seitenband-Leistung wäre damit gleich der koordinierten (Träger-) Leistung.

Wenn jedoch die Seitenband-Leistung erhöht wird, wirkt sich diese Erhöhung entsprechend stark auf die Störung einer (räumlich entfernten) Gleich-Kanal Sendung aus.<sup>4</sup>

Die Außerband (OOB) Störungen betreffen (im LW und MW Bereich) aber i.a. räumlich benachbarte Sender. Diese dürfen jedoch durch DRM nicht stärker gestört werden als es der bisherigen ITU Spektrums-Make entspricht.

Im Beispiel wird angenommen, daß der Sender durch seine Spitzen-Leistung  $P_{sp}$  begrenzt ist (Power limited Mode). Im Falle eines  $P_C = 100 \text{ KW}$  (Träger-Leistung) AM Senders ist:

$$P_{sp} = 4 \cdot P_C = 400 \text{ KW} \tag{1.3}$$

Der Crest-Faktor des DRM Signals wird mit 10 dB angenommen.<sup>5</sup> Dadurch ist die effektive DRM-Leistung:

$$P_{DRM} = P_{sp}/10 = 40 \text{ KW} \tag{1.4}$$

Die Seitenband-Leistung liegt damit nun um den Faktor

$$\frac{40 \text{ KW}}{6.125 \text{ KW}} = 6.53 \sim 8.15 \text{ dB} \tag{1.5}$$

höher als im analogen Fall. Da sich die Außerband-Strahlung nicht erhöhen darf, ist nunmehr ein Schulter-Abstand von (mindestens) 43 dB erforderlich und die weiter ab liegenden Störanteile müssen ca. 70 dB tiefer liegen. (Zusatz „d“ für „digital“)

Damit erhält man die für diesen Fall angepaßte Spektrums-Maske gemäß Bild 1.5, die bei 8.15 dB (bezogen auf die ITU AM Spektrums-Maske) anzulegen ist.

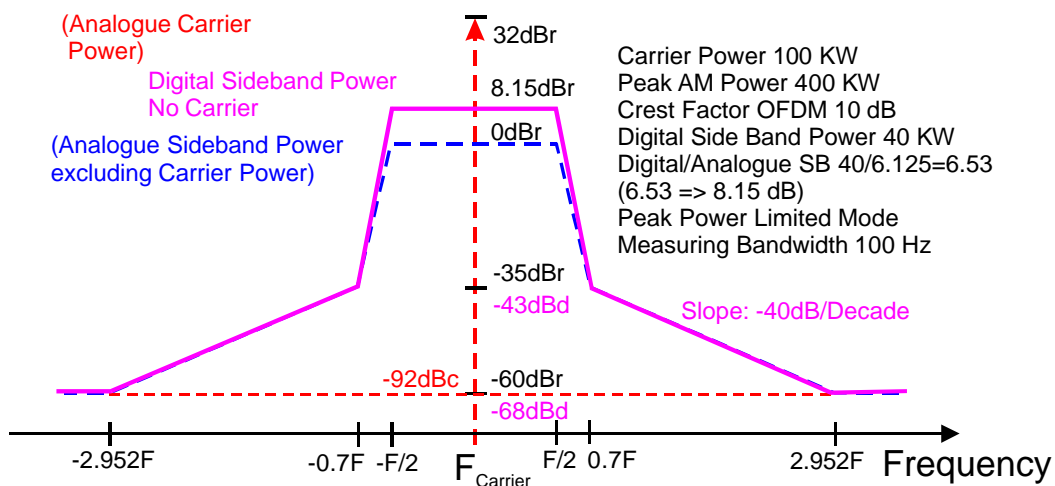


Bild 1.5: Die Spektrums-Maske für DRM bei DRM-Leistung gleich AM-Träger-Leistung

<sup>4</sup>In den LMK-Rundfunk-Bereichen herrscht akuter Frequenzmangel. Daher werden gleiche Frequenz-Kanäle von mehreren räumlich weit auseinander liegenden Sendern gemeinsam genutzt. Ausbreitungsbedingte gegenseitige Störungen lassen sich dabei nicht immer vermeiden. Auf MW gilt dies speziell in den Nachtstunden, wo aufgrund ionosphärischer Reflexionen Überreichweiten entstehen. Daher werden Standorte und Leistungen der Sender bei der ITU koordiniert.

<sup>5</sup>Die Amplituden-Verteilungs-Dichte des DRM Signals ist näherungsweise Gauß-förmig. Praktisch wird versucht, durch verschiedene Maßnahmen (Codieren, Clippen, etc.) den Crestfaktor zu reduzieren. Ohne diese Maßnahmen ist ein Crest-Faktor von ca. 13 dB realistischer.

## 1.4 Die DRM Spektrums-Maske

Da das bei DRM verwendete COFDM-Spektrum sehr steil außerhalb des Kanals abfällt, wurde von DRM eine modifizierte Spektrums-Maske vorgeschlagen (Bild 1.6).<sup>6</sup>

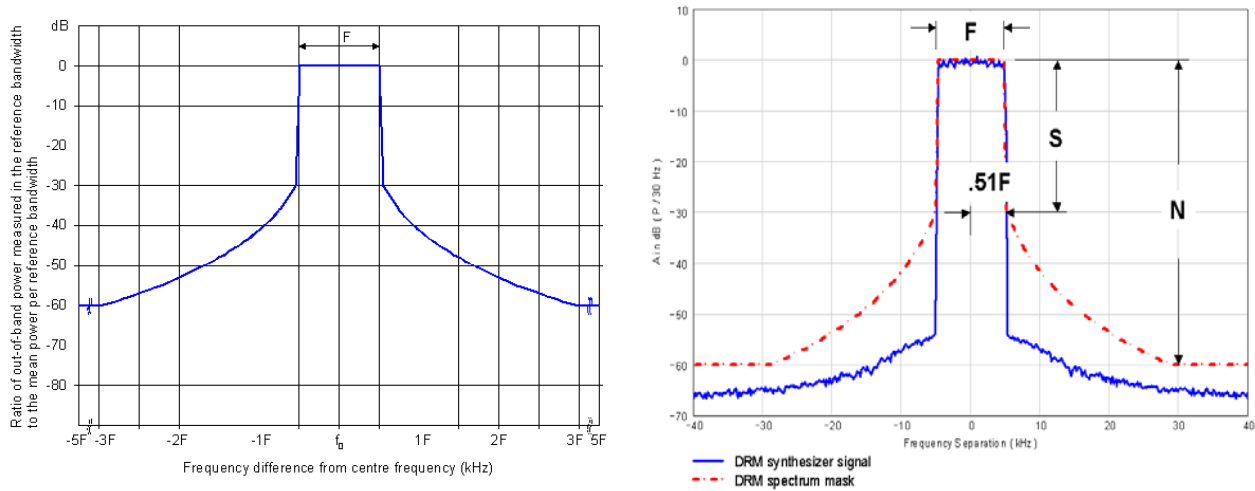


Bild 1.6: DRM Spektrums-Maske und DRM Spektrum am Ausgang des Exciters (verbesserte Version)

Gegenüber der ITU Spektrums-Maske für AM Sender, Bild 1.3, ist der Schulter-Abstand hierbei nur zu 30 dB gewählt. Da als Untergrenze  $-60$  dB an der Stelle  $\pm 2,95F$  beibehalten wurde, ergibt sich daraus eine notwendige größere Steigung (d.h. raschere Abnahme) der OOB Aussendung.

Bei der Festlegung auf einen Schulterabstand von 30 dB wurde Rücksicht genommen auf den damaligen Stand der Technik der AM-Sender, die nur wenig mehr als 30 dB Schulterabstand für ein DRM Signal realisieren konnten, vergleiche z.B. Bild 3.1.

Im Unterschied dazu wurde jedoch keinerlei Rücksicht genommen auf die mit dem DRM Signal mittels EER-Technik erzielbaren Steigungen der Außerband-Strahlungen (OOB).

Dies ist aber ein prinzipieller Mangel der DRM Spektrums-Maske, denn

- der Schulterabstand des DRM-Spektrums ist eine Funktion von
  - Delay (A-Signal gegenüber RF-P-Signal)
  - Bandbreite des Amplituden-Zweiges (A-Zweig) im Sender
  - Genauigkeit des DC-Offsets im A-Zweig

um nur die wichtigsten Einflußfaktoren zu benennen. Alle diese sind jedoch durch die Dimensionierung und den Abgleich des (AM-) Senders beeinflussbar.

- die Steigung der OOB Strahlung im Spektrum hängt nur ab von der Größe des Loches im Vektor-Diagramm der Digitalen Modulation.

COFDM hat kein Loch im Vektor-Diagramm und deshalb die kleinst mögliche Steigung für OOB, die bei digitaler Modulation vorkommen kann.

Die Steigung der OOB Strahlung kann nur dadurch beeinflusst werden, daß (künstlich) ein Loch in das Vektor-Diagramm der COFDM eingebracht wird. Bei der Größe dieses Loches sind aber enge Grenzen gesetzt, weil die Erzeugung des Loches zu einer Verminderung des Signal-zu-Geräusch-Verhältnisses bereits des Sende-Signals führt.

Aus diesen Gründen ist eine DRM Spektrums-Maske mit nur 30 dB Schulter-Abstand und dafür größerer Steigung der OOB Strahlung praktisch wertlos.

<sup>6</sup>Bei den neuesten Sendern wird diese Spektrums-Maske bereits angewendet, vergleiche Bild 3.4.

## 2 Schulterabstand und OOB Steigung

Aufgrund der Eigenschaften der Digitalen Modulation<sup>1</sup> erreicht die Steigung des OOB Spektrums nicht den Wert von  $-40$  dB/Dekade. Will man trotzdem unterhalb der ITU Grenzkurve bleiben, hilft dann nur, den Schulterabstand zu vergrößern. Bild 2.1 zeigt dazu verschiedene Fälle<sup>2</sup>.

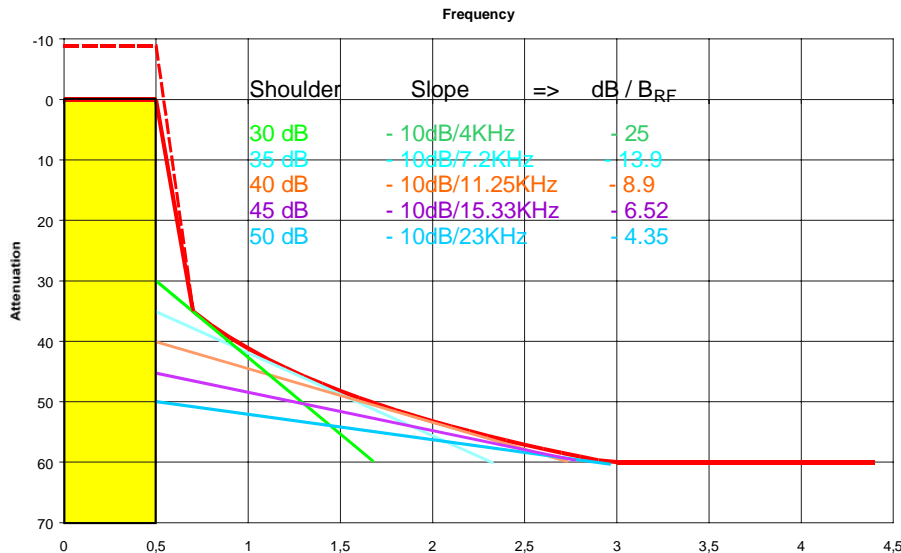


Bild 2.1: Der erforderliche Schulter–Abstand in Abhängigkeit der Steigung des OOB Spektrums bezogen auf gleiche Seitenband–Leistung wie im analogen Fall (durchgezogene Kurve). Für digitale Seitenband–Leistung gleich der analogen Trägerleistung gilt die gestichelte Spektrums–Maske.

Je flacher das OOB Spektrum verläuft, um so größer muß der Schulterabstand (des Senders) im Spektrum werden. Wie aus Bild 2.1 zu entnehmen ist, kann bei sehr geringen OOB Steigungen ein Schulterabstand zwischen 50 dB und 60 dB erforderlich werden.

Im Kapitel „EER–Technik in der Digital–Übertragungstechnik“ ergab sich als (mittlere) Steigung des OOB Spektrums in Abhängigkeit von der Größe des „Lochs“ im Vektor–Diagramm das Bild 2.2.

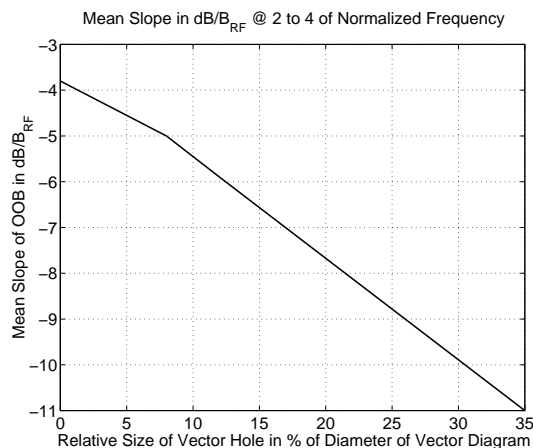


Bild 2.2: Die Steigung des Außerbandspektrums als Funktion der Größe des Lochs im Vektordiagramm. Die Steigung ist auf die RF–Bandbreite  $B_{RF}$  normiert.

<sup>1</sup>Siehe hierzu das Kapitel über die EER Technik.

<sup>2</sup>Dargestellt ist die ITU AM Spektrums–Maske. Gegenüber der von DRM vorgeschlagenen Spektrums–Maske ergeben sich aufgrund deren kleineren Schulter–Abstand kaum Änderungen bezüglich der Steigungen.



Da die COFDM nach dem Zentralen Grenzwertsatz in guter Näherung mit Hilfe eines Gauß-verteilter Rauschens modelliert werden kann, hat diese kein „Loch“ in ihrem Vektor-Diagramm. Nach Bild 2.2 ergibt sich dafür eine (mittlere) Steigung der Außerband-Strahlung (OOB) von  $\approx -3.8 \text{ dB}/B_{RF}$ . Nach Bild 2.1 ist dafür jedoch ein Schulterabstand des Senders von  $> 50 \text{ dB}$  erforderlich, bezogen auf gleiche Seitenband-Leistung wie im analogen Fall. Das bedeutet einen Schulteranstand von  $\approx 60 \text{ dB}$  wenn die digitale Seitenband-Leistung gleich der analogen Träger-Leistung sein soll.

Die Anforderungen an den Schulterabstand kann dadurch vermindert werden, daß das OFDM Signal in einer Weise vorverzerrt wird, daß ein Loch im Vektordiagramm entsteht, wie im Kapitel EER-Technik beschrieben ist. Um mit einem Schulterabstand von  $45 \text{ dB}$  auszukommen, müßte demnach nach Bild 2.2 die Größe des Loches im Vektor-Diagramm  $\approx 12\%$  des Durchmessers des Vektor-Diagramms betragen.

Das in das Vektor-Diagramm der COFDM eingebrachte Loch darf andererseits nicht zu groß gemacht werden, da die hierfür erforderlichen Maßnahmen die Fehlerrate erhöhen. Tatsächlich werden ja zur Erzeugung des Loches gezielt „Störsymbole“ (bezogen auf die digitale Übertragung) eingebracht.

Praktisch bedeutet dies, daß AM-Sender, die im DRM-Betrieb nicht mindestens auf einen Schulterabstand von  $50 \text{ dB}$  kommen, nur mit geringerer Seitenband-Leistung im DRM-Betrieb (als im AM-Betrieb) gefahren werden dürfen, weil die ITU Spektrums-Maske eingehalten werden muß.

### 2.1 AM kompatible Spektrums-Maske für COFDM-Sender

Aufgrund der vorausgegangenen Überlegungen ist demnach zu fordern, daß LMK-Sender die Spektrums-Maske gemäß Bild 2.3 einzuhalten haben, wenn keine höheren OOB Störungen als die bei AM zulässigen auftreten sollen.

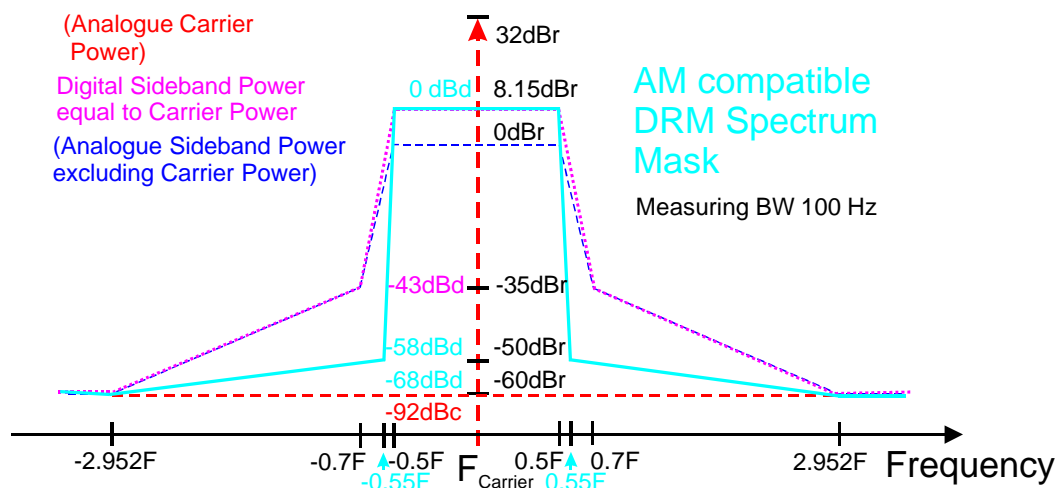


Bild 2.3: Die AM kompatible Spektrums-Maske für DRM bei DRM-Leistung gleich AM-Träger-Leistung

Die gezeichnete Spektrums-Maske gilt für den Fall, daß die digitale Leistung gleich der analogen Träger-Leistung sein soll. Man erkennt daraus, daß in diesem Fall ein Sender auf einen Schulter-Abstand von fast  $60 \text{ dB}$  kommen muß.

Wird die digitale Leistung gleich der analogen Seitenband-Leistung, genügt ein Schulter-abstand von  $50 \text{ dB}$ .

Beide Werte können dann geringer ausfallen, wenn ein Loch in das Vektor-Diagramm der OFDM eingebracht wird, weil dadurch die OOB Steigung größer wird.

### 2.2 Spektrums-Maske bei Kanal-Bündelung

In der (Draft) ETSI Spezifikation EN 302 245-2 [3] ist vorgesehen, daß die Form der DRM Spektrums-Maske relativ zu der gewählten Kanal-Bandbreite unverändert bleibt. Das bedeutet in der Praxis, daß bei Kanal-Bündelung (z.B. werden 2 Kanäle à  $10 \text{ KHz}$  zu einem Kanal à  $20 \text{ KHz}$  Bandbreite zusammengefaßt) die OOB Anteile zu beiden Seiten eines Bündel-Kanals das 2.95-fache der Bandbreite des Bündel-Kanals wird.

Damit darf ein gebündelter Kanal mehr OOB erzeugen als die Summe entsprechend vieler direkt aneinander anschließender Kanäle einfacher Bandbreite.

Mit der EER-Technik entsteht tatsächlich bei einem Kanal mit größerer Bandbreite eine proportional zur Bandbreite abnehmende Steigung der OOB Aussendung. In Bild 2.2 (Seite 7) sieht man das in der Bezeichnung der Ordinate mit  $dB/B_{RF}$ .

Die von ETSI vorgesehene Regelung dürfte in der Praxis trotzdem auf Probleme stoßen, etwa wenn schließlich die Forderung erhoben wird auf „gleiches Recht“ in Bezug auf die Störung benachbarter Kanäle.

### 3 Gemessene DRM Spektren

#### 3.1 Beispiel eines für DRM ungeeigneten Senders

In der Anfangs-Zeit der digitalen Übertragungen in den AM-Bereichen (ab ca. 1994, also noch vor Gründung des DRM Konsortiums) erfolgten bereits Tests mit vorhandenen Sendern. Aus dieser Zeit stammt das gemessene Spektrum einer Digital-Übertragung über einen KW Sender, Bild 3.1.

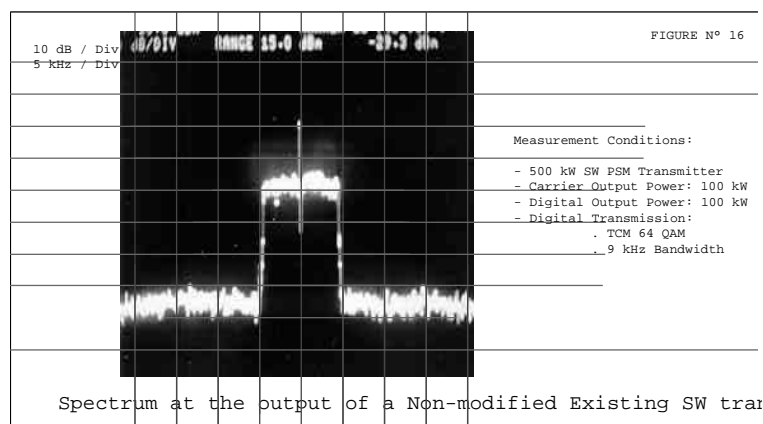


Bild 3.1: Gemessenes Spektrum eines KW Senders bei einer digitalen Übertragung mit COFDM

Aus dieser Messung ist folgendes erkennbar.

- Der Schulterabstand beträgt weniger als 35 dB.
- Die Steigung der Außerband-Strahlung ist praktisch Null. Diese nimmt also sehr viel langsamer ab, als es bei OFDM mit  $-3.8dB/B_{RF}$  sein müßte. Das zeigt, daß weitere Einflußfaktoren zum Tragen kommen, wie z.B. eine unzureichende Bandbreite im Amplituden-Zweig des Senders, siehe Kapitel EER-Technik.
- Statt eines Loches im Vektor-Diagramm wurde ein RF-Träger von gleicher Leistung wie die Seitenband-Leistung zugesetzt, der im Spektrum deutlich erkennbar ist.  
Addition eines RF-Trägers ist eine Alternative zum Vektor-Loch (Bild 3.2), jedoch wird die Leistungs-Bilanz des Senders dadurch verschlechtert.
- Mittels eines RF-Trägers wird die Phasen-Auslenkung geringer als durch Einbringen eines Vektor-Loches. Der Sender wird dadurch linearisiert.  
Offensichtlich erreicht der betreffende Sender, der zur damaligen Zeit dem neuesten Modell entsprach, trotz der Linearisierung keinen ausreichend großen Schulterabstand. Er muß daher (in seinem damaligen technischen Zustand) als für DRM ungeeignet eingestuft werden.

Aus Bild 2.3 oder Bild 2.1 (Seite 7) sieht man, daß bei praktisch Steigung Null für OOB die Digitale Sendeleistung um 30 dB (also um einen Faktor 1000) gegenüber der analogen Seitenband-Leistung abgesenkt werden muß, wenn die ITU Spektrums-Maske eingehalten werden soll. Bei einem 100 KW AM-Sender würde das zahlenmäßig bedeuten, daß statt 6.125 KW Seitenband-Leistung nur noch 6.125 Watt (!) digitale

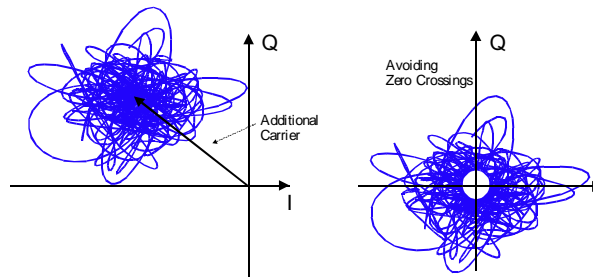


Bild 3.2: Die beiden Möglichkeiten um im Vektordiagramm Annäherungen an den Nullpunkt zu vermeiden

Leistung erzeugt werden dürfte. Bezogen auf den Sender, von dem das gemessene Spektrum stammt und der für 500 KW Trägerleistung dimensioniert ist, dürften mit diesem gerade mal 32 Watt Leistung im DRM Betrieb erzeugt werden, um unterhalb der ITU Spektrums-Maske zu bleiben. Deswegen ist der betreffende Sender für DRM als ungeeignet zu betrachten.

### 3.2 Beispiel für die Empfangs-Beeinträchtigung

Wie wichtig die Einhaltung der ITU Spektrums-Maske durch DRM Sender ist, zeigt ein weiteres Beispiel, das ebenfalls aus der Anfangszeit von DRM stammt. Hier wurde das Empfangs-Spektrum aufgenommen. Bild 3.3 zeigt links die Empfangs-Situation ohne DRM Sendung auf 15150 KHz und im rechten Bild die Veränderung im Spektrum mit DRM Sendung auf 15150 KHz.

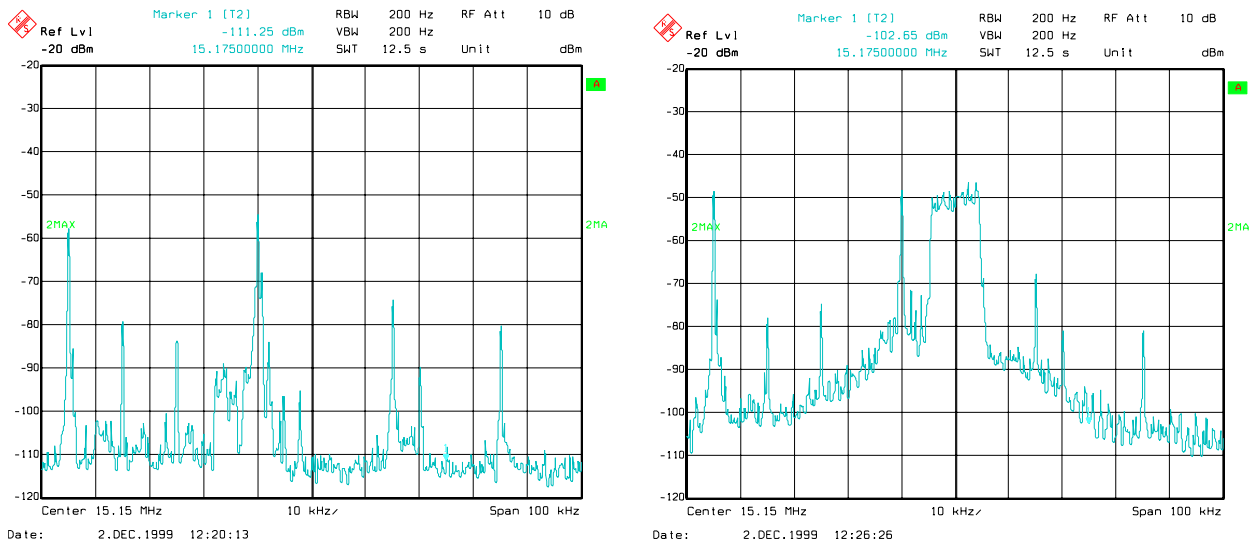


Bild 3.3: KW Empfangs-Situation ohne DRM (links) und mit DRM Signal (rechts). Entfernung zum Sender ca. 2000 km

Die OOB Steigung im Spektrum des DRM Signals beträgt ca.  $11 \text{ dB}/B_{RF}$ . Da der Schulter-Abstand nur ca. 32 dB ist, kommt es zu erheblichen Beeinträchtigungen der AM Sendungen in den Nachbar-Kanälen, wie man z.B. im unteren Nachbar-Kanal deutlich erkennt. Akustisch reichte die Störwirkung tatsächlich (frequenz- und entfernungsmäßig) erheblich weiter.

An dem betreffenden Sender waren daher umfangreiche Verbesserungs-Maßnahmen erforderlich.

### 3.3 Beispiel für die neueste Sender-Generation

In der Zwischenzeit wurden AM-Sender so weiter entwickelt, daß diese in der Lage sind, die von DRM vorgeschlagene Spektrums-Maske gut einzuhalten. Bild 3.4 zeigt Beispiele für MW Sender.

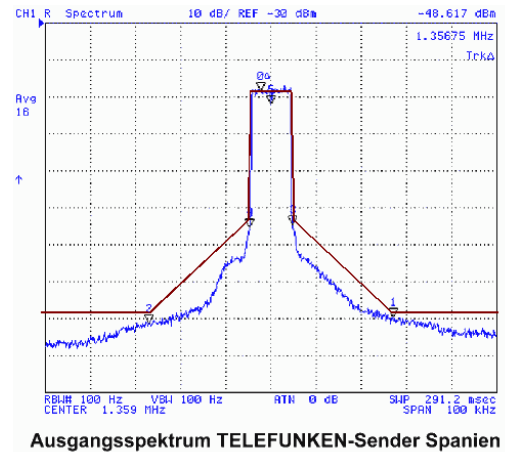
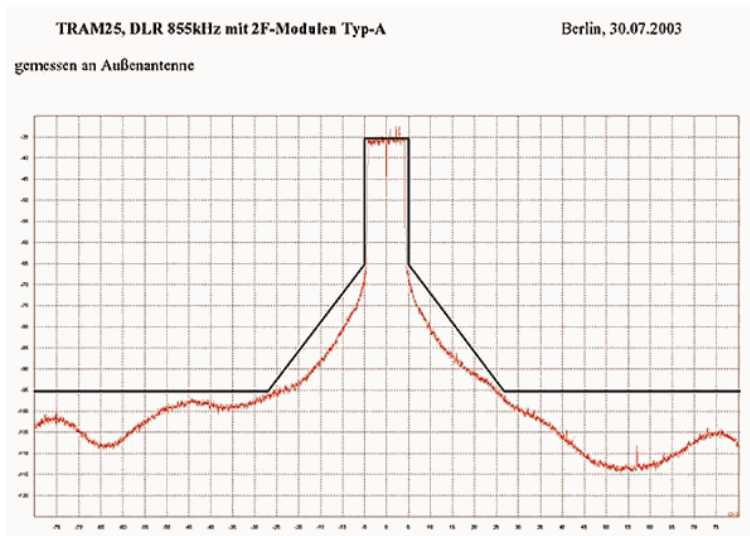


Bild 3.4: DRM Spektren, die die DRM Spektrums-Maske einhalten

Die Sender, deren DRM Spektren in Bild 3.4 dargestellt ist, sind Modul-Sender für Mittelwelle, die aus einer Parallelschaltung von Leistungs-Modulen bestehen. Jeder Modul besteht aus einer  $\mathcal{H}$  Brücke und einem PDM-Modulator.<sup>1</sup>

### 3.4 Filterung von OOB am Sender-Ausgang

Ein naheliegender Gedanke zur Verminderung der OOB-Störungen ist es, ein Bandpaß-Filter hinter den Senderausgang zu schalten.

Bei Sendern kleiner Leistung und auf höheren Frequenzen, die als Linearverstärker arbeiten, wird dies gemacht. Z.B. für DAB und DVB-T mit Sendeleistungen in der Größenordnung von  $\leq 1$  KW.

Bei einem LMK Sender müßte das ein Filter mit großer Flankensteilheit und damit großer Güte sein<sup>2</sup>. Filter mit diesen Eigenschaften haben merkliche Durchlaß-Dämpfungen, wodurch sich der Wirkungsgrad eines Senders erheblich verschlechtert. Aus diesem Grund können ausgangsseitige Filter zur Unterdrückung der OOB Störungen im digitalen Betrieb bei Sendern mit EER-Technik in der Praxis nicht verwendet werden.

## 4 Digitale Leistung bei gleicher Versorgungs-Fläche

Eine vernünftige Annahme ist es, für gleiche Versorgungs-Flächen für digitalen und analogen Betrieb auszugehen. Damit entstehen auch bei der ITU kaum Probleme bei der Koordinierung.

Die Größe der Versorgungs-Flächen ergeben sich aus den für Empfang notwendigen minimalen Signal-zu-Geräusch-Verhältnissen im analogen und digitalen Fall. Es ist dabei zu beachten, daß sich diese Grenzen analog anders auswirken als digital. Ferner ist die mit Hilfe von Signal-zu-Geräusch-Verhältnis (SNR) definierte Versorgungs-Grenze infolge ionosphärischer Reflexionen räumlich und zeitlich nicht konstant. Der Empfänger registriert das als „Fading“. Fading kann langsam oder schnell sein.

**Versorgungs-Grenze analog:** Sinkt das Signal-zu-Geräuschverhältnis unter die definierte Schwelle ab, nimmt die hörbare Störung zu. Es handelt sich dabei um keine scharfe Grenze, sondern um einen allmählichen Übergang von gutem zu unbrauchbarem Empfang (bezogen auf das SNR).

**Versorgungs-Grenze digital:** Sinkt das Signal-zu-Geräuschverhältnis unter die definierte Schwelle ab, nimmt die Bitfehlerrate zu. Steigt die Fehlerrate über das Maß an, das von der Codierung korrigiert werden kann, versagt die Audio-Decodierung und der Empfänger schaltet stumm. Hierbei handelt es

<sup>1</sup>Siehe hierzu „EER-Technik“ .

<sup>2</sup>Die Güte eines Filters bestimmt sich aus der gespeicherten Blind-Leistung zur umgesetzten Wirk-Leistung.

sich um eine ziemlich scharfe Grenze zwischen einwandfreiem Empfang und keinem Empfang. Fading führt hier zu Aussetzern bei der Übertragung.

Für die digitale Übertragung gibt es 4 unterschiedliche Modi, die sich in der „Robustheit“ und damit i.w. im erforderlichen Signal-zu-Geräuschverhältnis unterscheiden.

Zur Abschätzung wird angenommen, daß ein Signal-zu-Geräuschverhältnis von 15 dB als Grenzwert genüge. Das Spektrum der Störung liege damit (beim Empfänger) 15 dB unterhalb des digitalen Spektrums oder anders ausgedrückt, empfangsseitig ragt das digitale Spektrum noch um 15 dB aus dem Rausch-Floor heraus.

Im Bild 1.2 (ITU AM Spektrums-Maske, Seite 3) läge diese Rausch-Leistungsdichte (bezogen auf den Empfänger) dann bei  $-15 \text{ dB}_r$ .

Wenn dieser Sender im AM-Betrieb arbeitet, liegt diese Grenze für das empfangsseitige  $\text{SNR} \approx -47 \text{ dB}_C$  (Bezogen auf die Trägerleistung  $P_C$ ) tiefer.

Um die Verhältnisse bei DRM mit einer AM-Sendung vergleichen zu können, muß berücksichtigt werden, daß bei AM die gesamte Rauschleistungs-Dichte in den Seitenbändern auf die Träger-Leistung bezogen wird. Da die AM-Bandbreite zur Meßbandbreite des Spektrum-Analysers sich wie 10 KHz zu 100 Hz (100 : 1) verhält, wird die Grenze für die Rauschleistungs-dichte für AM  $-47.125 \text{ dB}_C + 20 \text{ dB} = -27.125 \text{ dB}_C$ .

Für analoge Übertragung in den AM-Bereichen wird i.a. als Grenze  $\text{SNR}_{\min} = 25 \text{ dB}$  angenommen. Damit zeigt es sich, daß es für eine DRM Sendung ausreicht, wenn die Leistung digital ausgestrahlt wird, die analog als Seitenband-Leistung auftritt.

Das bedeutet somit eine Leistungs-Ersparnis von  $\approx 12 \text{ dB}$  oder einem Zahlenwert von  $\approx 16$  bei digitaler Übertragung. Das ist ein wesentlicher Faktor in den Betriebskosten für einen Sender. Notwendige Umbau-Kosten bzw. Investitions-Kosten amortisieren sich daher rasch.

## Literatur

- [1] Recommendation ITU-R SM.329-7
- [2] Recommendation ITU-R SM.328-9
- [3] ETSI EN 302 245-2 V1.1.1 (2004-05): *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 2: Harmonized EN under article 3.2 of the R & TTE Directive*
- [4] Rudolph, D.: *Out-of-Band Emissions of Digital Transmissions Using Kahn EER Technique*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, No. 8, Aug. 2002.
- [5] Rudolph, D.: *Kahn EER Technique With Single-Carrier Digital Modulations*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, No. 2, Feb. 2003.
- [6] Rudolph, D.: *EER-Technik in der Digital-Übertragung*, Vorlesungsskript
- [7] Weber, K.: *Comments on using the spectrum mask of AM for DRM emissions*, Diskussionsbeitrag 1999