

4.4.1 Das theoretische DVB-T Spektrum

Betrachtet man das theoretische DVB-T Spektrum in Bild 16, so findet man im Nutzbereich einen flachen Verlauf, allerdings mit einer etwa 3 dB tiefen Welligkeit. Diese hängt vom eingefügten Schutzintervall ab.

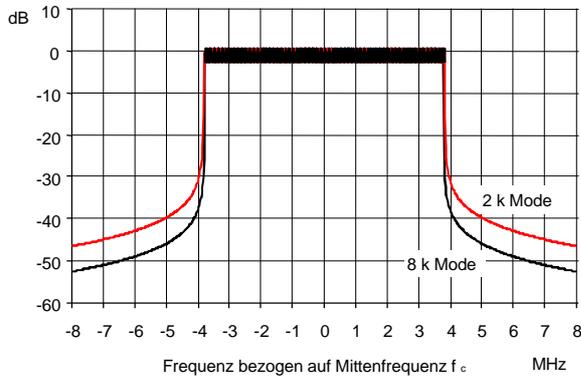


Bild 4.16 Das DVB-T Spektrum für 2k und 8k Mode bei einem Schutzintervall $\tau = 1/4$

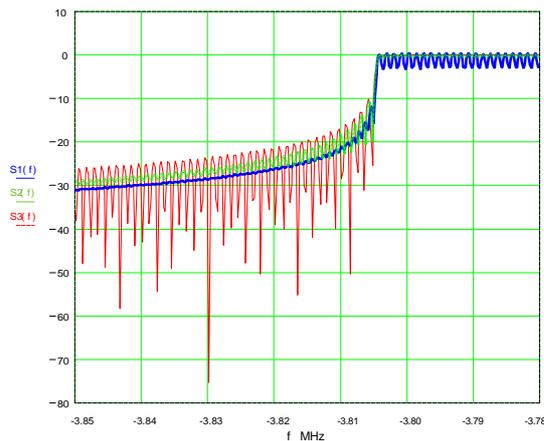


Bild 4.17 Teilspektrum mit unterschiedlichen Schutzintervallen:

$\tau = 1/4$ $S1(f)$
 $\tau = 1/32$ $S2(f)$
 $\tau = 0$ $S3(f)$

An den Bandgrenzen fällt das Spektrum in der Bandbreite von einem Trägerabstand sehr steil ab. Der weitere Verlauf des Spektrums ist dann verhältnismäßig flach. Der Knickpunkt liegt beim 2k Mode etwa um 10 dB höher als beim 8k Mode.

Bei höherer Frequenzauflösung - das Bild 4.17 zeigt den Bereich von -3.85 ...-3.78 MHz und lässt daher die Unterscheidung der Einzelträger im 8k Mode zu - sieht man den Effekt der Schutzintervalleinblendung deutlich.

Die blaue Kurve gibt den Verlauf für $\tau = 1/4$ wieder. Innerhalb des Nutzbereichs sind die Einzelträger zu unterscheiden, auch wenn die Einbrüche zwischen den Trägern nur etwa 3 dB betragen. Die Außerbandanteile dagegen verlaufen deutlich glatter.

Die grüne Kurve gibt den Verlauf für $\tau = 1/32$ wieder. Innerhalb des Nutzbereichs sind die Einzelträger fast nicht mehr zu unterscheiden. Die Einbrüche zwischen den Trägern sind nun schon kleiner 1 dB. Die Außerbandanteile dagegen verlaufen deutlich welliger.

Die rote Kurve gibt den Verlauf für $\tau = 0$ wieder. Es ist also kein Schutzintervall eingefügt. Innerhalb des Nutzbereichs ist das Spektrum völlig glatt. Die Außerbandanteile dagegen verlaufen mit tiefen Einbrüchen im Trägerabstand.

Bild 4.17 veranschaulicht, daß nur mit $\tau = 0$ die Orthogonalität der Einzelträger besteht. Sobald aber das Schutzintervall addiert wird gilt diese Bedingung nicht mehr. Im Empfänger wird aber das Schutzintervall wieder ausgeblendet und die Orthogonalitätsbedingung ist wieder hergestellt.

Diese beiden Bilder zeigen nun ein prinzipielles Problem bei der Messung des DVB-T Spektrums. Im Nutzbereich wird immer eine mehr oder weniger große Welligkeit in Abhängigkeit vom Schutzintervall vorhanden sein. Wie wird dabei das Nutzspektrum vermessen?

Die Außerbandanteile haben auch immer eine Grundwelligkeit und sinken steil um etwa 15 dB im Pegel im Abstand von einem Träger zum letzten Nutzträger ab. Danach ist der Verlauf des Außerbandspektrums ziemlich flach und hat bei einem Schutzintervall von $\tau = 1/32$ zusätzlich noch bis zu 10 dB tiefe Einbrüche im Trägerabstand.

Wo wird hier der Schulterabstand gemessen?



SPECTRUM ANALYSER FSP

Kurzdaten FSP

Frequenzbereich (FSP3/7/13/30)	9kHz...3/7/13/30 GHz
Amplitudenmessbereich Amplitudendarstellbereich	-140...+30 dBm 10...200 dB, 10 dB Schritte, linear
Amplitudenmessfehler	< 0.5 dB bis 3 GHz <2.0 dB von 3...13 GHz <2.5 dB von 13...20 GHz
Auflösebandbreiten	1 Hz...30 kHz (FFT Filter) 10 Hz...10 MHz, Stufung 1,3 EMI Bandbreiten: 200 Hz, 9 kHz, 120 kHz
Detektoren	Max. Peak, Min. Peak Auto Peak Sample, Average, RMS Quasi Peak
Darstellung	21 cm (8.4") Farb TFT LC Display VGA Auflösung
Fernsteuerung	IEC 625-2 (SCPI 1997.0) oder RS 232 C
Abmessungen (B x H x T)	412 x 197 x 417 mm
Gewicht (FSP3/7/13/30)	10.5/11.3/12/12 kg



SPECTRUM ANALYSER FSEx

Kurzdaten FSEA/FSEB

Frequenzbereich	20Hz / 9kHz...3.5 / 7 GHz
Amplitudenmessbereich Amplitudendarstellbereich	-155/-145...+30 dBm 10...200 dB, 10 dB Schritte, < 1 dB bis 1 GHz <1.5 dB über 1 GHz
Amplitudenmessfehler	
Auflösebandbreiten	1 Hz / 10 Hz...10 MHz, Stufung 1,2,3,5
Kalibrierung	Amplitude Bandbreite
Darstellung	24 cm (9.5") Farb oder SW - TFT LC Display VGA Auflösung IEC 625-2 (SCPI 1997.0) oder RS 232 C
Fernsteuerung	
Abmessungen (B x H x T)	412x 236 x 460 mm
Gewicht	21.5 / 23.0 kg

4.4.2 Das Nutzspektrum

Ein Spektrumanalysator mit einer Auflösungsbandbreite viel größer als der Trägerabstand mittelt die Einbrüche im Nutzspektrum und zeigt einen glatten Verlauf. Ein Analysator der mittleren Preisklasse erzielt daher schon befriedigende Ergebnisse. Zu bedenken ist aber: Die Referenz für alle Messungen ist die positive Hüllkurve des Spektrums. Der Spektralanalysator muß daher einen Maximum Detektor besitzen.

Die modernen Spektrumanalysatoren wie FSP und FSEx erfüllen alle am Sender erforderlichen Bedingungen.

Der MAX DETECTOR ist genauso verfügbar wie z.B. ein RMS DETECTOR. Die Dynamik übersteigt die Forderungen für alle nachfolgenden Spektralmessungen. Die Frequenzbereich ist selbst bei der preisgünstigsten Version immer noch mehr als ausreichend für Oberwellenmessung des LO (Local Oscillator).

Wie beim analogen Sender ist die Messung der 2. Oberwelle und die Bestimmung des Phasenrauschens des LO selbstverständlich auch beim DVB-T Sender unabdingbar.

4.4.3 Messung des Phasenrauschens

An jedem Senderstandort im SFN sollte ein SPECTRUM ANALYSER vorhanden sein, um die bereits genannten Messungen durchzuführen, aber auch um das Phasenrauschen des Local Oscillator LO eindeutig zu bestimmen. Für diese Messung muß der Analysator schon zur High End Klasse gehören. FSP und FSEx erfüllen die nötigen Anforderungen. Die Vorgaben von der europäischen Arbeitsgruppe VALIDATE sind nämlich sehr eng gefaßt. Bild 4.18 zeigt den vorläufigen VALIDATE Vorschlag AC106 für das Phasenrauschen im 2k Mode:

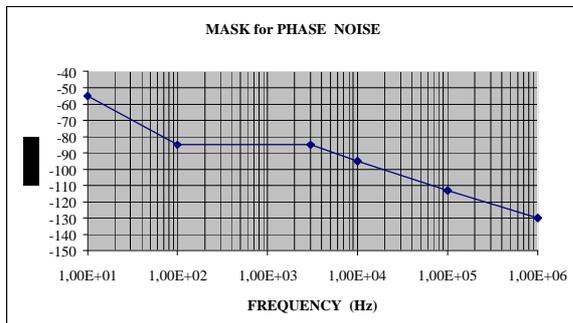


Bild 4.18 VALIDATE Vorschlag AC 106 für das Phasenrauschen

Man erkennt 10 Hz neben dem LO sind bereits -55 dB/Hz zu erreichen. Die Auflösungsbandbreite RBW muß daher wesentlich kleiner als 10 Hz sein. Anzustreben ist eine RBW von 1 Hz. Dabei wird das Phasenrauschen einen Trägerabstand neben dem LO bereits als ENF (Equivalent Noise Floor) definiert.

Bei der COFDM Modulation existieren zwei Arten von Phasenrauschen:
Signalverzerrungen, die alle Träger gleichmäßig betreffen

CPE Common Phase Error
dieser Fehler kann durch die Kanalschätzung unter Benutzung der "ständigen Piloten" (teilweise) unterdrückt werden

und

Rauschen, das allen Trägern überlagert ist

ICI Inter-Carrier Interference
diese Signalverschlechterung ist nicht korrigierbar.

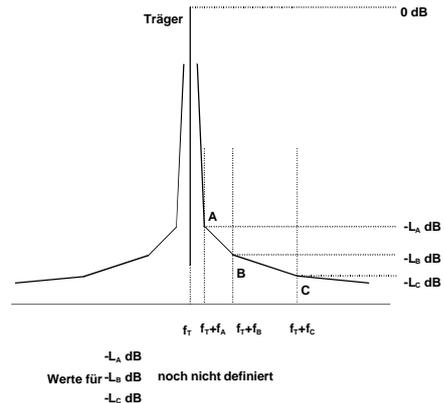


Bild 4.19 Maske für Phasenrauschen

Für die ICI Bestimmung sind die Meßfrequenzen nach ETR 290 festgelegt, nicht aber die Werte an den Punkten der Maske. Die Frequenzen entsprechen dem n-fachen der jeweiligen Trägerabstände.

COFDM Mode	f _A kHz	f _B kHz	f _C kHz
2k	4.464	8.928	13.392
8k	1.116	2.232	3.348

Tabelle 4.7 Meßfrequenzen für ICI

4.4.4 Maske für Außerbandanteile (minimaler Schulterabstand)

In der Zeit des Übergangs vom analogen Sendebetrieb zum digitalen werden die Schutzkanäle zwischen den heutigen Analogkanälen benutzt werden um mit dem DVB-T Betrieb zu starten. Weitere freie Frequenzen sind vor allem in Mittel-europa fast nicht verfügbar. Bild 4.20 zeigt eine mögliche Konfiguration der Spektren wie sie in der Übergangszeit während der Umschaltung von analogen Fernsehen auf DVB auftreten wird.

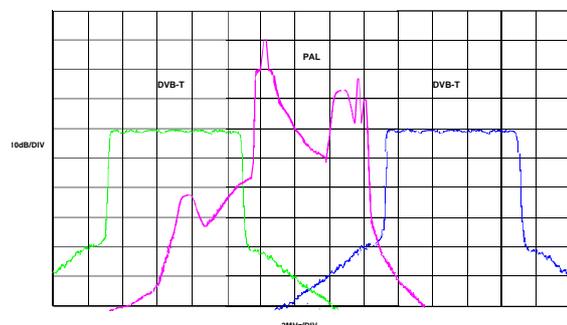


Bild 4.20 DVB-T und PAL Spektren bei Nachbarkanalbelegung

Das DVB-T Spektrum im oberen Nachbarkanal wird das PAL Signal nur wenig beeinflussen, wenn die PAL Bildträgerfrequenz und die DVB-T Mittenfrequenz nach Norm gehalten werden. Allenfalls wird die DVB T Schulter zum unteren Nachbarkanal im Falle des BG Systems den zweiten Tonträger im PAL Signal stören, während die DVB Schulter zum oberen Nachbarkanal das Restseitenband im B/G PAL Signal rauschähnlich überlagert. Damit die benachbarten analogen TV Kanäle nicht gestört werden, sind Masken für das DVB-T Spektrum in EN 300 744 festgelegt. Diese Masken beschreiben die Pegelverteilung im Bereich ± 12 MHz von der Mittenfrequenz des DVB-T Kanals, wenn der obere und untere Nachbarkanal mit analogen HF-Signalen von UHF Sendern belegt sind, die am gleichen Ort ausstrahlen.

Tabellen in EN 300 744 spezifizieren die Pegelwerte über der Frequenz. Die Frequenzen sind dabei nach wichtigen Frequenzmarken innerhalb der Analogkanäle ausgesucht. Als Beispiele werden Bild 4.21 und Tabelle 8 aufgeführt, die die Werte für die Belegung des oberen und unteren Nachbarkanals mit G/PAL/A2 aus der Norm EN 300 744 wiedergeben.

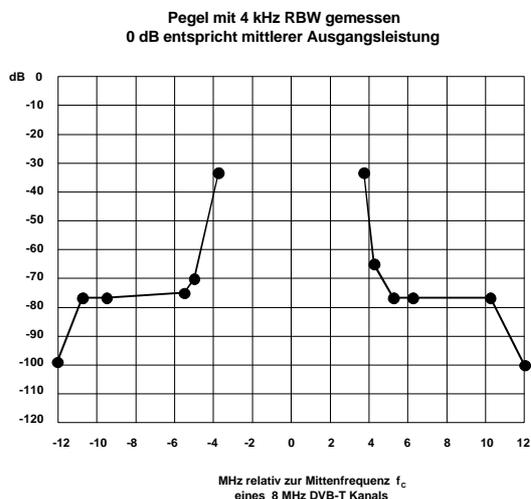


Bild 4.21 Maske für Außerbandanteile

DVB-T Maske für Standard G/PAL/A2 Belegung in den Nachbarkanälen		
Frequenz relativ zur Mittenfrequenz MHz	Erläuterung der Frequenz	Pegel dB ¹⁾
-12.00	unteres Ende des unteren Nachbarkanals	-100
-10.75	Bildträger des unteren Nachbarkanals	-76.9
-9.75	Bildträger +1 MHz im unteren Nachbarkanal	-76.9
-5.75	oberes Ende des (oberen) Seitenbandes des unteren Nachbarkanals	-74.2
-5.185	oberes Ende der HF Bandbreite des ersten Tonträgers im unteren Nachbarkanal	²⁾
-4.94	oberes Ende der HF Bandbreite des zweiten Tonträgers (IRT A2) im unteren Nachbarkanal	-69.9
-3.90	unteres Ende der HF Bandbreite des DVB-T Signals	-32.8
+3.90	oberes Ende der HF Bandbreite des DVB-T Signals	-32.8
+4.25	Bildträger - 1 MHz; unteres Ende Restseitenband des oberen Nachbarkanals	-64.9
+5.25	Bildträger des oberen Nachbarkanals	-76.9
+6.25	Bildträger + 1 MHz des oberen Nachbarkanals	-76.9
+10.25	oberes Ende des (oberen) Seitenbandes des oberen Nachbarkanals	-76.9
+12.00	oberes Ende des oberen Nachbarkanals	-100

¹⁾ gemessen mit 4 kHz RBW
²⁾ kein Einfluß auf Verzerrungen

Tabelle 4.8

In kritischen Fällen, z.B. wenn die zu den DVB-T Kanälen benachbarten Kanäle unter Sonderbedingungen arbeiten (wie etwa analoge TV Übertragung mit Kleinleistung) können an die Außerbandanteile des DVB-T Signals höhere Anforderungen gestellt werden. Für diesen Fall gilt dann eine kritische Maske, die in EN 300 744 festgelegt ist.

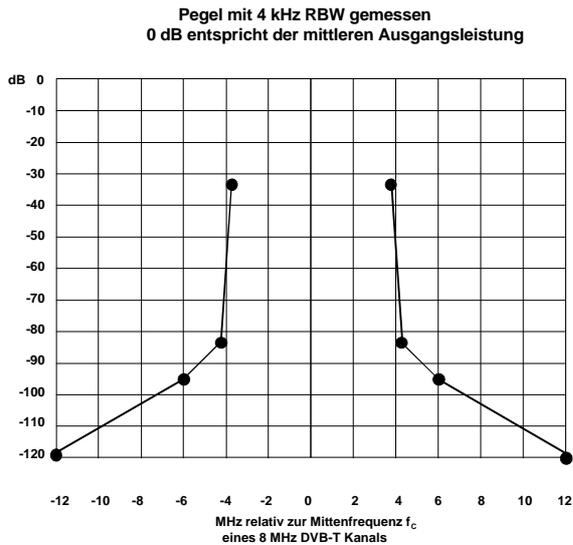


Bild 4.22 Die kritische Maske

Auch hier sind die Eckwerte der Maske in einer Tabelle festgehalten:

Eckwerte für die kritische Maske (UHF)	
Frequenz relativ zur Mittenfrequenz MHz	Pegel dB ¹⁾
±12.0	-120
±6.0	-95
±4.2	-83
±3.8	-32.8

¹⁾gemessen mit 4 kHz RBW

Tabelle 4.9

4.4.5 Die Mittenfrequenzen der UHF Kanäle

Im Gegensatz zu den Bildträgerfrequenzen der analogen Fernsehwelt, die im UHF Bereich bei 8 MHz Bandbreite ungerade Werte mit 250 kHz Versatz zum zum ganzzahligen MHz besitzen (z.B. 210.250 MHz für Kanal 10), haben die Mittenfrequenzen bei DVB-T gerade Werte. Der Beginn des UHF Bereichs liegt bei 470 MHz. Die Mittenfrequenzen f_{center} bei DVB-T sind ab dieser Frequenz nach folgender Gleichung zu berechnen:

UHF Band IV/V

$$f_{center} = 470 + 4 + n \times 8 \text{ MHz}$$

$$n = 0, 1, 2, 3...49$$

Der erste Kanal im UHF Bereich hat damit die Mittenfrequenz $f_{center} = 474$ MHz und der letzte Kanal im UHF Bereich die Mittenfrequenz

$f_{center} = 866$ MHz. Diese Zuordnung ist wiederum in EN 300 744 nur für den UHF Bereich festgeschrieben. Zwar ist DVB-T in VHF mit Kanalbandbreiten von 7 MHz nicht definiert, DVB-T wird aber dort ebenso übertragen. Die Gleichung für die Mittenfrequenzen ist demnach leicht modifiziert und kann lauten:

VHF Band III

$$f_{center} = 174 + 3.5 + n \times 7 \text{ MHz}$$

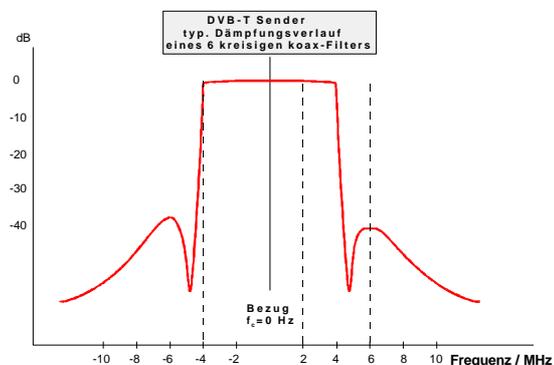
$$n = 0, 1, 2, 3...7$$

Der erste Kanal in VHF Band III hat damit die Mittenfrequenz $f_{center} = 177.5$ MHz und der letzte die Mittenfrequenz $f_{center} = 226.5$ MHz. Die Sonderaufteilung von VHF Kanälen, wie in einigen Ländern üblich ist, sollte dann diesem Raster angepasst werden.

4.4.6 Vergrößerung des Schulterabstandes

Wie in 4.4.1 Das theoretische DVB-T Spektrum zu sehen ist, muß das Spektrum Bandpaßgefiltert werden um die Anforderungen der Masken zu erfüllen. Für die normale Maske ist ein 6-Kreis-Filter ausreichend und für die kritische Maske wird schon ein 8-Kreis-Filter benötigt.

Bild 4.23 Bandpaßfilter



Diese Filter werden zwischen den Leistungsausgang des Senders und die Antenne geschaltet. So erreicht man die geforderten Schulterabstände. Das Ausgangssignal des Senders erreicht im DVB-T Sender einen Schulterabstand von etwa 50 dB, der aber durch Intermodulationsprodukte, die von Nichtlinearitäten der Senderverstärker herrühren, auf Werte um 30 dB reduziert wird. Der digitale Linearitätstzerr im Steuersender kompensiert teilweise diese Auswirkungen, so daß im Nutzspektrum Intermodulationsabstände um 40 dB erreicht werden. Mit dem zusätzlichen

Bandpaßfilter garantiert man in jedem Falle die in der Maskentabelle geforderten Werte von >36 dB. Die Maske gibt vor: $69.9 - 32.8 = 37.1$ dB als Differenz bei den Frequenzen ± 4.94 MHz und ± 3.90 MHz bei der normalen Maske. Für die kritische Maske liegt der Wert des Schulterabstandes entsprechend höher bei $83.0 - 32.8 = 50.2$ dB.

Die Anforderung an die Außerbandanteile eines COFDM Signals für DVB-T sind sehr groß, wie man den Grenzwerten der Masken entnehmen kann. Wie schon oben beschrieben, ist der Schulterabstand am Senderausgang nicht ausreichend und wird deshalb durch die erwähnten Bandpaßfilter erhöht. Die Filter haben speziell im Durchlaßbereich nahe den Bandgrenzen einen Dämpfungsanstieg. Der sehr steile Dämpfungsverlauf in den Sperrbereich hinein bewirkt auch den entsprechend steil ansteigenden Verlauf der Gruppenlaufzeit. Der aufgezeigte Amplitudenfrequenzgang und die auftretende Gruppenlaufzeit wird zum größten Teil mit den digitalen Entzerrern im Steuersender kompensiert.

Je nach der Weitabunterdrückung des Bandpasses ist unter Umständen noch ein Filter zur Unterdrückung der LO Oberwellen nötig.

Nachdem bisher noch keine genauen Spezifikationen der zulässigen Restabweichung vom idealen Filter von den offiziellen Normungsgremien definiert wurden, sind 1998 für die Einrichtung des MFN (Multi Frequency Network) in Großbritannien vorläufige Werte bestimmt worden. Sie sind aus dem nachfolgenden Bild 4.24 ersichtlich.

Als Meßmittel bieten sich hier an:
Die Spektrumanalysatoren FSEx und FSP deren Daten auf Seite 19 erklärt sind und der DVB-T MESSEMPFÄNGER/MESSDEMODULATOR EFA in den Varianten 40 bzw. 43.

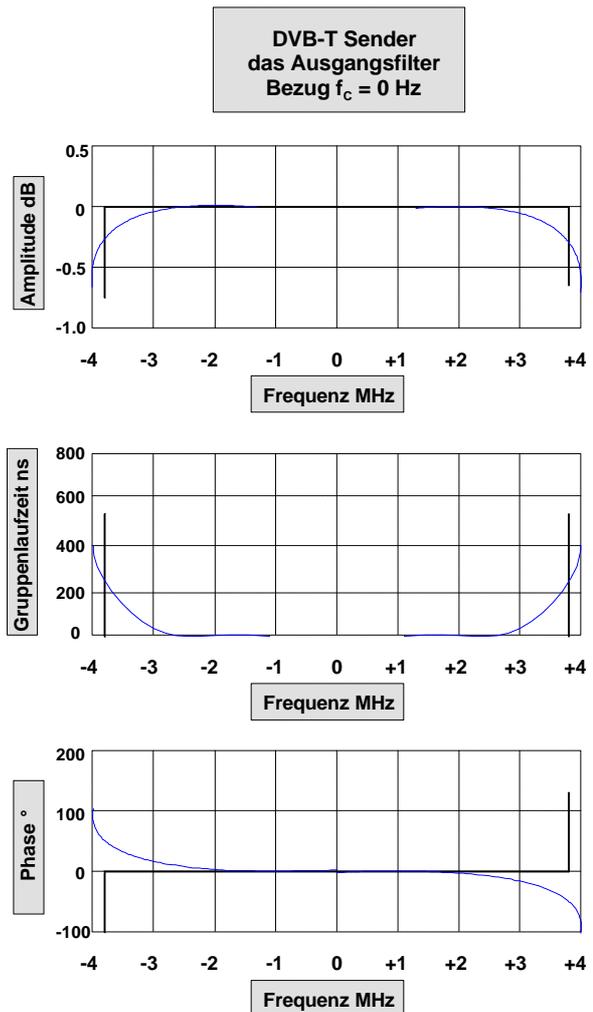


Bild 4.24 Vorschlag für Bandpaßcharakteristik

Entzerrter Amplitudenfrequenzgang
 ≤ 0.3 dB ripple und
 Gruppenlaufzeit ≤ 250 ns (!)





Kurzdaten EFA Varianten 40/43

Frequenzbereich	45...1000 MHz, 5...1000MHz mit Option Selektion (EFA-B3)
Eingangsbereich	-47...+14 dBm -84...+14 dBm (low noise) mit Option Selektion (EFA-B3)
Bandbreiten FFT Modus	6/7/8 MHz 2k / 8k
Modulation	QPSK, 16 QAM 64 QAM hierarchisch / nicht ~
Schutzintervall Punktierungsrate	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
BER Auswertung Fernsteuerung	vor Viterbi, vor und nach Reed Solomon
Meßfunktionen/ Graphiken	Pegel, BER, MER, Trägerunterdrückung, Quadraturfehler, Phasenjitter, Amplitudenimbalance, FFT Spektrum Konstellationsdiagramm, MER (f), I/Q (f), Spektrum
Ausgangssignale Optionen	MPEG2 TS: ASI, SPI MPEG2 Meßdekoder, HF Vorselektion

4.4.7 Messung des Schulterabstandes mit dem DVB-T MESSEMPFÄNGER / DEMODULATOR EFA

Mit der EFA Funktion FREQUENCY DOMAIN / FFT läßt sich der Schulterabstand leicht bestimmen. Geht man von DVB-T im 8 MHz Kanal aus, und wählt den Frequenzbereich - 4.48 MHz (Startfrequenz) bis + 4.48 MHz (Stopfrequenz), ist der Schulterabstand anhand des im Display gezeigten Spektrums sofort abzulesen. EFA 40/43 bestimmt den Schulterabstand automatisch und mit objektiver Messung nach der Norm ETR 290, die alle Meßmethoden und Meßparameter beschreibt.

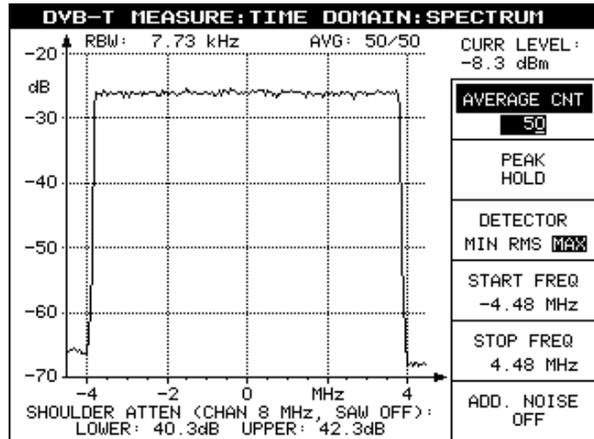


Bild 4.25 Schulterabstand eines COFDM Signals

Gemäß ETR 290 ist der Schulterabstand zwischen den Maximalwerten des Nutzspektrums (hier etwa -26 dB) und den (bewerteten) Maximalwerten der Außerbandanteile im Bereich 300 kHz bis 700 kHz vom letzten Nutzträger entfernt (hier etwa - 66 dB bzw. 68 dB), zu messen. Die Darstellung mit dem "MAX DETECTOR" erleichtert die Bestimmung des Schulterabstandes wesentlich.

Die Messung des LO Oberwellenabstandes verlangt aber noch den Spektrumanalysator.

4.4.8 Bestimmung des Schulterabstandes gemäß ETR 290

Im europäischen technischen Report ETR290 wird eine Methode zur Bestimmung des Schulterabstandes beschrieben. Diese Methode ist verhältnismäßig zeitintensiv, liefert aber vergleichbare Meßwerte. Die Messung mit dem MESSEMPFÄNGER EFA in den Versionen 40 bzw. 43 liefert identische Werte, solange die Außerbandanteile ab 300 kHz neben dem letzten COFDM Träger eben verlaufen. Diese Annahme trifft beim COFDM Betrieb fast immer zu.

Die Messung nach ETR 290 läuft nach folgendem Schema ab. Bild 4.26 veranschaulicht die Auswertung:

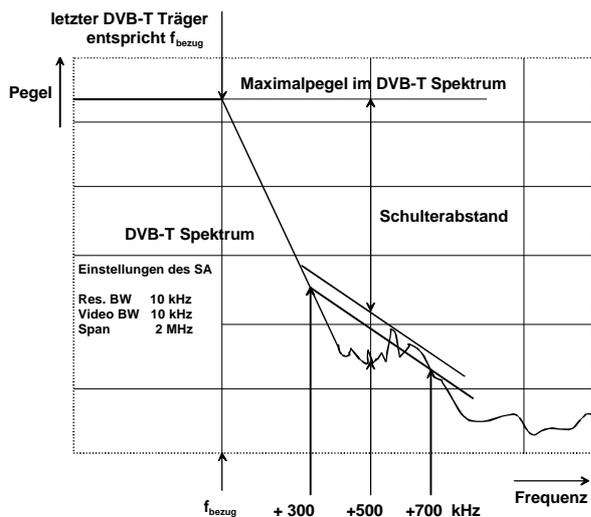


Bild 4.26 Schulterabstand nach ETR290

1. bestimmen des Maximalpegels des DVB-T Spektrums (Max Hold)
2. ziehen einer Linie vom Pegelwert des Spektrums 300 kHz über (unter) der Frequenz des letzten (ersten) Trägers im DVB-T Spektrum zum Pegelwert des Spektrums 700 kHz über (unter) der Frequenz des letzten (ersten) Trägers im DVB-T Spektrum
3. ziehen einer Parallelen zu obiger Linie, die den Maximalwert des DVB-T Spektrums im Bereich zwischen 300 kHz und 700 kHz über (unter) der Frequenz des letzten (ersten) Trägers im DVB-T Spektrum berührt
4. messen der Pegeldifferenz zwischen dem Maximalpegel des DVB-T Spektrums und dem Pegelwert der parallelen Linie 500 kHz über (unter) der Frequenz des letzten (ersten) Trägers im DVB-T Spektrum. Der kleinere Wert ist gültig.

Da diese Methode ohne Ausdruck des Spektrums auf Papier und dann nur mit Hilfe von Winkel und Lineal möglich ist, wird sie wohl nur in Ausnahmefällen angewandt werden. Abweichungen zur direkten Messung mit EFA Varianten 40/43 werden nur in seltenen Fällen auftreten, nämlich nur dann wenn die Außerbandanteile stark mit Störern überlagert sind. Selbst in diesem Fall ist die doch etwas langwierige Methode nach ETR 290 noch mit dem Meßdemodulator EFA nachzuvollziehen, weil der Frequenzbereich der FFT von -4.48 MHz nach +4.48 MHz relativ zur

Kanalmittenfrequenz genau den vorgeschriebenen Bereich umfaßt.

4.4.9 Linearitäts - Entzerrer und Schulterabstand

Eingangssignal	Ausgangssignal	
	Inphase	Quadratur
0,000	0,000	0,000
0,300	0,295	0,013
0,500	0,492	0,015
1,000	1,000	0,000
1,500	1,500	-0,070
3,000	2,300	-0,900
Crestfaktor 7,235 /dB (über Spitzenleistung berechnet)		

Tabelle 10 Verstärkercharakteristik

Die Tabelle 10 zeigt den Linearitätsverlauf eines typischen Leistungsverstärkers, wie er auch im DVB-T Sender eingesetzt wird. Deutlich zu sehen ist der anfangs lineare Zusammenhang des Eingangs- und des Ausgangssignals, bis bei größeren Aussteuerungen das Ausgangssignal stark begrenzt wird. Aus Inphase- und Quadraturkomponente kann der Phasengang bestimmt werden. Bezogen auf den normierten Nominalwert "1" ist eine Aussteuerung von "2.3" möglich. Größere Pegel werden begrenzt. Aus der Amplitudenverteilung und der Begrenzung bei 2.3 (Tabelle 10) läßt sich der Crestfaktor in dB berechnen.

4.4.10 Wie ist der Crestfaktor definiert?

Der Crestfaktor ist ein Parameter, der ein Spannungsverhältnis wiedergibt. Dabei wird der Quotient von effektivem Spannungswert U_{eff} und Spitzenspannungswert U_s gebildet und als logarithmisches Verhältnis K_{CREST} ausgedrückt:

$$K_{CREST} = 20 \times \log(U_s / U_{eff}) \text{ dB}$$

Die Linearitätsuntersuchungen der Tabelle 10 wurden mit einem Spektrumanalysator vom Typ FSP mit der CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) Meßmöglichkeit durchgeführt. Hierbei wird die Spitzenleistung der Signalhüllkurve zugrunde gelegt und nicht die absoluten Spannungsspitzen, die im Verstärker auftreten. Wegen dieser Unterschiede der Signalbewertung muß der in der Tabelle 10 berechnete Wert noch dem Faktor $\sqrt{2}$ oder 3.01 dB korrigiert werden. Der echte Crestfaktor liegt also

bei 10.245 dB. Im Weiteren wird nur noch vom Crestfaktor K_{CREST} die Rede sein, der von den absoluten Spannungsspitzen abgeleitet ist. Eine ausführliche Erläuterung der unterschiedlichen Signalbewertung befindet sich im Anhang 4A.

Wegen der (typischen) nichtlinearen Kennlinie von Leistungsverstärkern treten Intermodulationsprodukte immer auf. Diese verschlechtern den Schulterabstand am unfilterten Senderausgang auf etwa 34 dB.

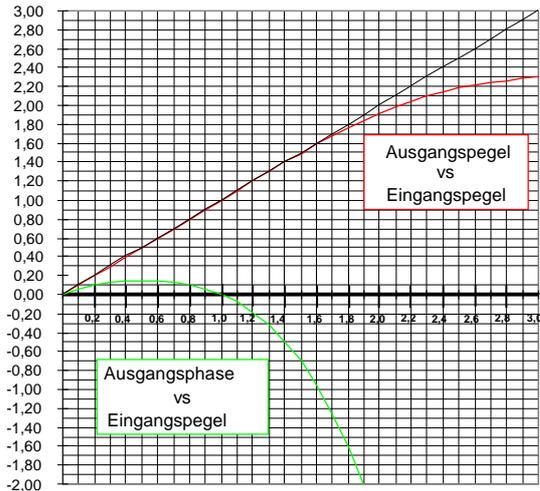


Bild 4.27 Verstärkercharakteristik

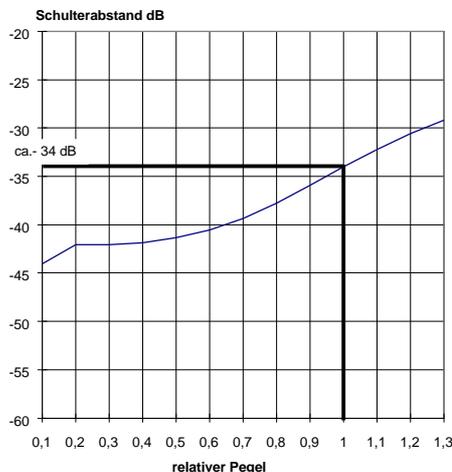


Bild 4.28 Schulterabstand in Abhängigkeit vom nominellen Eingangspegel.

Im Steuersender wird nun durch die digitale Vorentzerrung nicht nur der Amplitudenfrequenzgang und die Gruppenlaufzeit, sondern auch die Verstärkerkennlinie optimal linearisiert.

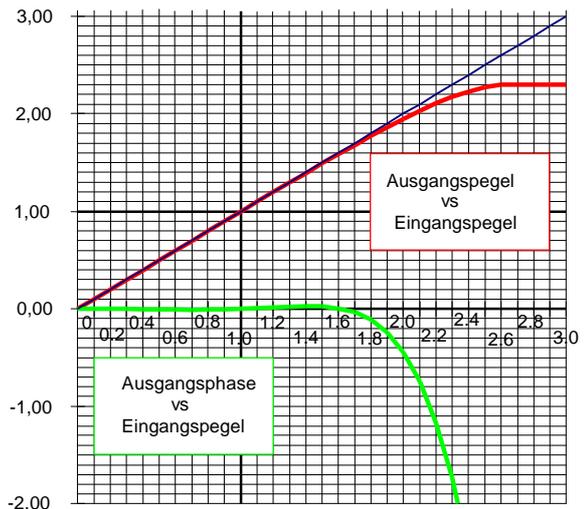


Bild 4.29 typische Kennlinie für Verstärkung und Phase eines entzerrten Verstärkers

Ein Verstärker mit dieser typischen Kennlinie - der normierte Ausgangspegel läuft bei ca. 2.3 in die Sättigung und die entzerrte Phase ist Null bis zum normierten Eingangspegel "1" und kippt dann ins Negative - erreicht einen Schulterabstand von ca. 42 dB beim Nennpegel.

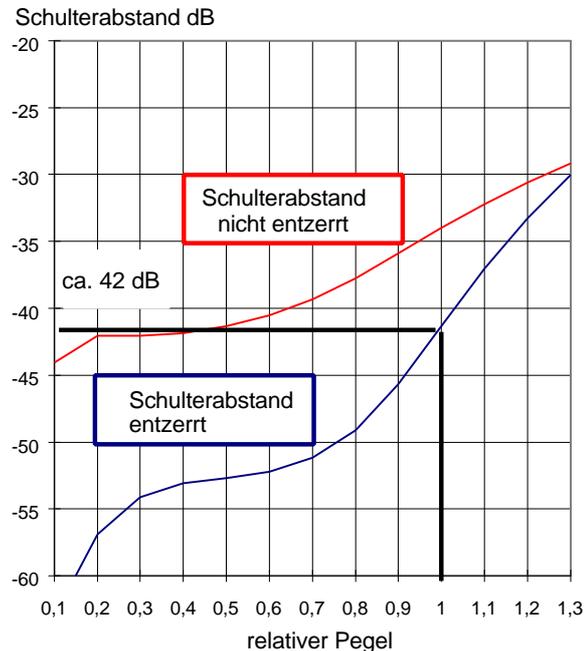


Bild 4.30 Schulterabstand für entzerrten und nicht entzerrten Verstärker

4.4.11 Crestfaktor, und Pegelbegrenzung im DVB-T Sender

Im theoretischen Falle, daß alle Träger des dem weißen Rauschen sehr ähnlichen COFDM Zeitsignal zum gleichen Zeitpunkt den Maximalwert bzw. dem Minimalwert besitzen, addieren sich alle Trägeramplituden zur größtmöglichen Spitzenamplitude $U_{S \text{ MAX}}$. Diese Spitzenamplitude bedingt dann im 8k Mode einen Crestfaktor von

$$K_{\text{CREST MAX}} = 10 \times \log(6817) = 38.3 \text{ dB}$$

und im 2k Mode

$$K_{\text{CREST MAX}} = 10 \times \log(1705) = 32.3 \text{ dB}$$

Diese maximalen Werte werden aber im praktischen Falle nie auftreten. So rechnet man für beide Modi mit dem realen Wert von

$$K_{\text{CREST}} \geq 15 \text{ dB}$$

bei einer Wahrscheinlichkeit von 1×10^{-7} .

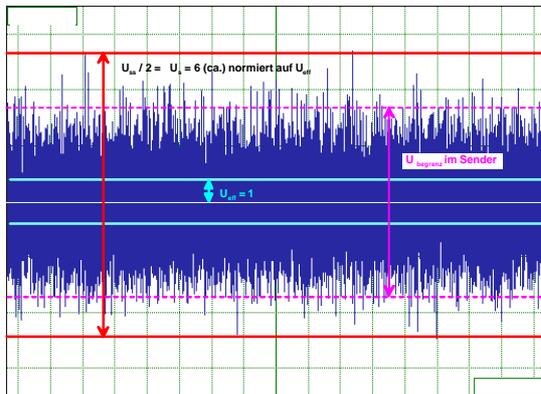


Bild 4.31 Das DVB-T Zeitsignal

Dies entspricht dem Verhältnis $U_S / U_{\text{EFF}} \sim 6$. Für die Senderleistung heißt das aber, daß im Verhältnis zur mittleren Leistung eine 36 fache Spitzenleistung als Reserve vorgehalten werden muß. Bei diesem Faktor würden noch alle Signalanteile, die auch das resultierende Bitfehlerverhältnis BER beeinflussen, noch übertragen werden können. Aus der Sicht des Wirkungsgrades ist dies aber nicht vertretbar. Weitere Untersuchungen zeigten, daß beim Crestfaktor $K_{\text{CREST}} \sim 13 \text{ dB}$ noch keine relevante Beeinflussung des BER entsteht. Für die Sender ist eine Reserveleistung mit dem 9 fachen der mittleren Sendeleistung aber immer unrentabel. Daher sind alle DVB-T Sender im Crestfaktor auf $K_{\text{CREST}} = 10 \dots 11 \text{ dB}$ begrenzt. In der Leistungsbilanz heißt das etwa 7dB Reserve.

Das bedeutet aber schon die meßbare Verschlechterung des BER. Die BER erreicht dann zusammen mit dem Einfluß der Kanalfilterung zur Anhebung des Schulterabstandes

Werte um BER (vor Viterbi) = $1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-6}$ an der Sendeantenne.

Die neue Generation der Solid State Verstärker benutzt hochlineare LD-MOS Transistoren. Damit sind die Forderungen an den digitalen Vorentzerrer nicht mehr so hoch wie bei den Vorgängertypen mit bipolarer bzw. MOS Technik. Zum Schutz der Transistoren wird aber zusätzlich eine Begrenzung bei etwa $K_{\text{CREST}} = 10 \text{ dB}$ eingesetzt. Spannungsspitzen, die die Verstärkertransistoren zerstören könnten, werden damit abgefangen.

Die Crestfaktormessung, die für die Lebensdauer der Leistungstransistoren sehr wichtig ist, ist am Senderausgang also ein unabdingbarer Vorgang.

Als Meßmittel dient auch hier wieder der MESSEMPFÄNGER EFA in den Versionen 40 bzw. 43.

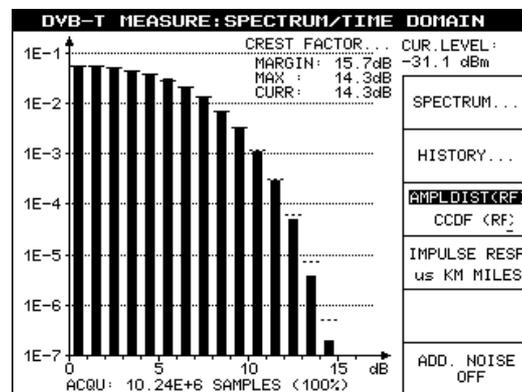


Bild 4.32 Crestfaktormessung mit EFA Var. 40 oder 43

Anhand der Wahrscheinlichkeit der Amplitudenverteilung berechnet der MESSEMPFÄNGER EFA in den Versionen 40 bzw. 43 den Crestfaktor. Abzulesen sind am Display dann der Crestfaktor im Zeitintervall der Messung (10.24×10^6 Meßwerte), der maximale Crestfaktor seit Beginn der Messung und zusätzlich die aktuelle Meßgrenze für die gewählte Meßeinstellung.

Anmerkung:

Wie in 4.4.10 beschrieben, zeigt die Messung des Crestfaktors mit einem Spektrum Analysator (z.B. FSP) einen um 3 dB kleineren Wert an, weil die Spitzenleistung an der Signalhüllkurve gemessen wird (siehe auch Anhang 4 A).

4.5 Leistungsmessung bei DVB-T Sendern Messung der mittleren Leistung

Die Leistungsmessung bei analogen Sendern bestimmt die Spitzenleistung im Bereich des Synchronimpulsbodens des modulierten FBAS Signals. In der analogen Fernsehwelt ist der Synchronimpulsboden immer der Bezug, weil dieser Signalanteil ohne Stauchung und sonstige Verzerrungen übertragen werden muß.

Anders dagegen sind die Verhältnisse bei DVB. Durch den Funktionsblock "Sync 1 Inverter und Verwischung" im DVB Modulator (siehe EN 300 421 oder EN 300 429 oder EN 300 744) wird eine konstante mittlere Senderausgangsleistung erzeugt.

Zu messen ist daher nicht die Spitzenleistung, die über den Crestfaktor bestimmt werden könnte, sondern die mittlere Ausgangsleistung. Heute sind dazu drei Methoden bekannt:

a Messung der mittleren Leistung mit einem thermischen Leistungsmesser Typ NRVS



Kurzdaten NRVS
mit Leistungsmeßkopf NRV-Z51

NRVS	
Frequenzbereich	DC...40 GHz,
Pegelbereich	100 pW...30 W (je nach Meßkopf)
Meßwertdarstellung absolut	W, dBm, V, dBmV
relativ	dB, %W oder %V bezogen auf einen einen gespeicherten Referenzwert,
Fernsteuerschnittstelle max. Eingangsspannung	IEC 625 Bus 50 V
NRV-Z51	
Leistungsmeßkopf	thermisch
Impedanz	50 O
Anschluß	System N
Frequenzbereich	DC ... 18 GHz
Pegelbereich	1 µW ... 100 mW

Ein thermischer Leistungsmesser liefert die genauesten Ergebnisse, wenn nur ein Fernsehkanal im Gesamtspektrum vorhanden ist. Zudem ist die Kalibrierung eines solchen

Leistungsmessers sehr einfach mit einer hochgenau gemessenen Gleichspannung, wenn der Meßkopf auch DC Messungen zuläßt.

b Messung der mittleren Leistung mit einem Spektrumanalysator von Typ FSEx oder FSP

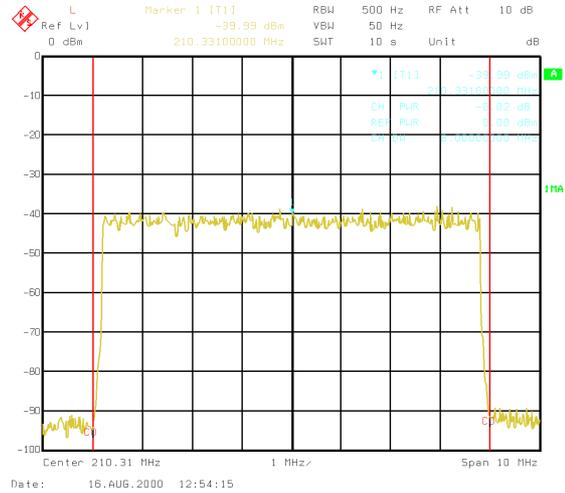


Bild 4.33 Leistungsmessung mit Frequenzcursor

Je ein Frequenzcursor wird an Anfangsfrequenz und Endfrequenz des DVB Kanals gesetzt. Der Spektrumanalysator errechnet dann die Leistung in der dazwischenliegenden Bandbreite. Da an der DVB-T Sendeantenne im Normalfall die Nachbarkanäle nicht belegt sind, ist die Meßgenauigkeit ausreichend.

c Messung der mittleren Leistung mit einem Meßempfänger vom Typ EFA

DVB-T MEASURE	
SET RF	330.000 MHz
ATTEN :	LOW 100.2 dBuV
FREQUENCY/BER :	
FREQUENCY DEV	-0.068 kHz
SAMPL RATE DEV	1.0 dB
BER BEFORE VIT	6.4E-5 (1)
BER BEFORE RS	0.4E-9 (1)
BER AFTER RS	0.0E-9 (1)
OFDM/CODE RATE :	
FFT MODE	2K (TPS: 2K)
GUARD INTERVAL	1/16 (TPS: 1/16)
ORDER OF QAM	64 (TPS: 64)
ALPHA	1 NH (TPS: 1 NH)
CODE RATE	5/6 (TPS: 5/6)
TPS RESERVED	0000h
CONSTELL DIAGRAM...	
OFDM PARAMETERS...	
RESET BER	
ADD. NOISE OFF	

Bild 4.34 Meßmenue des MESSEMPFÄNGER EFA Var. 40 oder 43

In der Statuszeile des EFA Displays sind immer alle wichtigen Signalparameter angezeigt. Im rechten oberen Statusfeld findet sich die mittlere Leistung in verschiedenen umschaltbaren Einheiten. Untersuchungen an Kanalspektren, die grobe Abweichungen vom ebenen Frequenzgang zeigten, belegen die hohe Meßgenauigkeit des angezeigten Pegels. Der Pegelvergleich mit einem thermischen Leistungsmesser NRVS ergab nach einer Meßreihe mit verschiedenen EFA-Varianten bei unterschiedlichen Kanalfrequenzen und diversen nichtebenen Spektren eine größte Abweichung von kleiner 1dB. Durch die EFA internen SAW Filter mit 6, 7 und 8 MHz Bandbreite im ZF Bereich ist die Messung auch im Falle der Nachbarkanalbelegung noch höchst präzise.

Hier soll nur ein Beispiel der Meßreihe gezeigt werden:

Ein Echo mit 250 ns Verzögerung und 2 dB Dämpfung wird über die FADING Option des TV Meßsender SFQ erzeugt. Der direkte Pfad und dieses Echo liefern das Kanalspektrum nach Bild 4.35 in dem deutlich die tiefen Frequenzgangeinbrüche zu sehen sind.

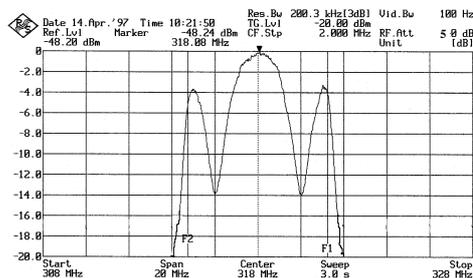


Bild 4.35 Fadingspektrum

In Tabelle 4.11 sind die Meßergebnisse bei der größten Abweichung zwischen NRVS und EFA zusammengefaßt

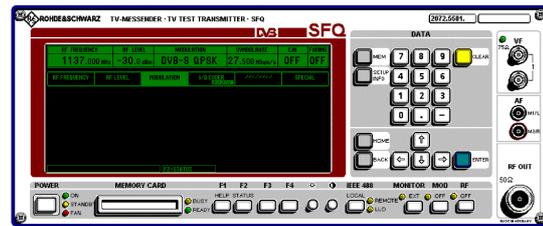
Pegelmessung mit	NRVS	EFA
	-33.79 dBm	-33.0 dBm

Tabelle 4.11 Vergleich der Meßergebnisse

Anmerkung:

Die genauen Ergebnisse dieser Pegelmessungen sind in der Application Note 7MGAN15E dargelegt (siehe auch Anhang 4B).

TV MESSENDER SFQ



Kurzdaten

Frequenzbereich	0.3 MHz...3.3 GHz
Pegelbereich	+4...-99 dBm
MPEG2 Eingänge	ASI SPI TS PARALLEL
Fehlersimulation	
I/Q Amplitudenfehler	± 25%
I/Q Phasenfehler	± 10°
Restträger	0...50 %
Spezialfunktionen	Scambler, Reed Solomon, alle Interleaver abschaltbar
DVB-C	
Modulation	16, 32, 64, 128, 256 QAM
DVB-S	
Modulation	QPSK
Punktierung	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
DVB-T	
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
	nicht hierarchisch, hierarchisch
FFT Mode	8k und 2k
Bandbreiten	6, 7, 8 MHz
Punktierung	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
ATSC	
Modulation	8 VSB
Bandbreite	6 MHz
Datenrate	19.392658 Mbit/s ± 10%
Symbolrate	10.762 MSymbols/s ± 10%
Interne Testsignale	NULL TS PACKETS NULL PRBS PACKETS PRBS (2 ²³ -1 und 2 ¹⁵ -1)
Optionen	Fading Rauschgenerator Input Interface BER Messung