

TechTalk #76

Digital-ATV – Verständnis von Symbol-Rate, FEC und HF-Bandbreite

von Ken W6HHC
mit zusätzlichen Informationen von Hans (DC8UE)
über die unterschiedliche Bandbreiten

(überarbeitet 27. Januar 2010)

(deutsche Übersetzung von Hans DC8UE)

Im Mai 2009 präsentierte TechTalk-Newsletter eine D-ATV-Einführung. Im Juni-Newsletter stieß Robbie (KB6CJZ) dazu und wir zeigten einige Anregungen zur Planung einer D-ATV-Station, die in der Auswahl von DVB-S endeten. Diesen Monat will TechTalk nun einige D-ATV-Konzepte vorstellen, die typischerweise von Amateuren und auch ATV'lern nicht verstanden werden.

Die Verwendung der DVB-S-Norm zum Senden digitaler ATV-Signale erfordert das Verständnis der folgenden Begriffe:

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) Modulation
- FEC (Forward Error Correction) Algorithmus
- MPEG-2 Daten-Kompressions-Raten für Video
- benötigte Video-Bit-Rate
- Verfügbare Netto Daten-Bit-Rate
- Symbol-Raten
- HF Bandbreit

Dieser Artikel wird nun durch diese unterschiedlichen D-ATV-Begriffe gehen und untersuchen, welchen Einfluss sie bei DVB-S auf die entstehende HF-Bandbreite haben.

Video Daten-Rate und Kompression

Für D-ATV muss der analoge Kamera-Ausgang zunächst durch die MPEG-2-Encoder-Baugruppe digitalisiert werden, und wird dann anschließend durch den MPEG-2-Algorithmus komprimiert. Dies wird in **Bild 1** gezeigt. Der Grund für die unterschiedlich komprimierten Video-Datenraten in **Tabelle 1** kommt daher, dass niedrige Werte auf wenige Änderungen im Video-Signal hinweisen und höhere Werte durch größere Veränderungen entstehen.

Man beachte in **Tabelle 1**, dass ein unkomprimiertes NTSC-Kamera-Signal eine Datenrate von 168 Mbits/sec abgibt, während das unkomprimierte Signal einer PAL-Kamera 216 Mbits/sec enthält. Die NTSC-Video-Datenrate weist daher 22% weniger Daten gegenüber einem PAL-Signal auf.

Tabelle 1 – Kamera Video-Datenrate und MPEG-2 Daten-Strom

Video-Quelle	Daten-Rate	Anmerkung
Analog NTSC Kamera	168 Mbits/sec	A/D digitalisiert unkomprimiert
NTSC MPEG-2	2-3 Mbits/sec	komprimiert
VHS MPEG-2	1-2 Mbits/sec	komprimiert
Analoge PAL Kamera	216 Mbits/sec	A/D digitalisiert unkomprimiert
PAL MPEG-2	2.5-6 Mbits/sec	komprimiert
HDTV Kamera	1-1.5 Gbits/sec	unkomprimiert
HDTV MPEG-2	12-20 Mbits/sec	komprimiert

Stefan (DG8FAC) von SR-Systems (aus Deutschland ... siehe den Link am Ende) hat mir erklärt, das in Europa viele Amateure die MPEG-2-Ausgangs-Datenrate für PAL auf 2,5 Mbit/sec eingestellt haben. Stefan hat weiterhin empfohlen, bei NTSC die gleiche MPEG-2-Ausgangs-Datenrate zu verwenden. Ich vermute dagegen eine Reduzierung von 22% im MPEG-2-Ausgang auf 2,0 Mbit/sec gegenüber PAL. Ich plane daher zunächst mit 2,5 Mbit/sec, aber wenn ich meine DVB-S-Sender endgültig aufgebaut habe, werde ich den NTSC-MPEG-2-Ausgang ausmessen, um zu sehen, ob die Video-Datenrate auf 2,0 Mbit/sec reduziert werden kann.

FEC Vergrößerung der Video Strom Daten-Rate

Forward Error Correction (FEC) ist eine Technologie, die nicht nur Fehler im Empfangssignal aufspüren kann, sondern zusätzlich genügend redundante Daten einfügt, um damit fehlerhafte Daten-Bits korrigieren zu können. Man kann zwei fehlerhafte Bit-Arten korrigieren. Da Redundanz die Datenrate erhöht, gilt es eine Abwägung zwischen mehr Redundanz und der benötigten Video-Datenrate zu treffen, sonst wird die Datenmenge zu groß. Wie wir ein wenig später in diesem Artikel noch sehen werden, ist die benötigte HF-Bandbreite umso breiter, je höher die Video-Datenrate ist. Ab einem Punkt hat der FEC-Algorithmus nicht genügend Redundanz um zu viele Fehler zu reparieren, dann wird der D-ATV-Schirm dunkel.

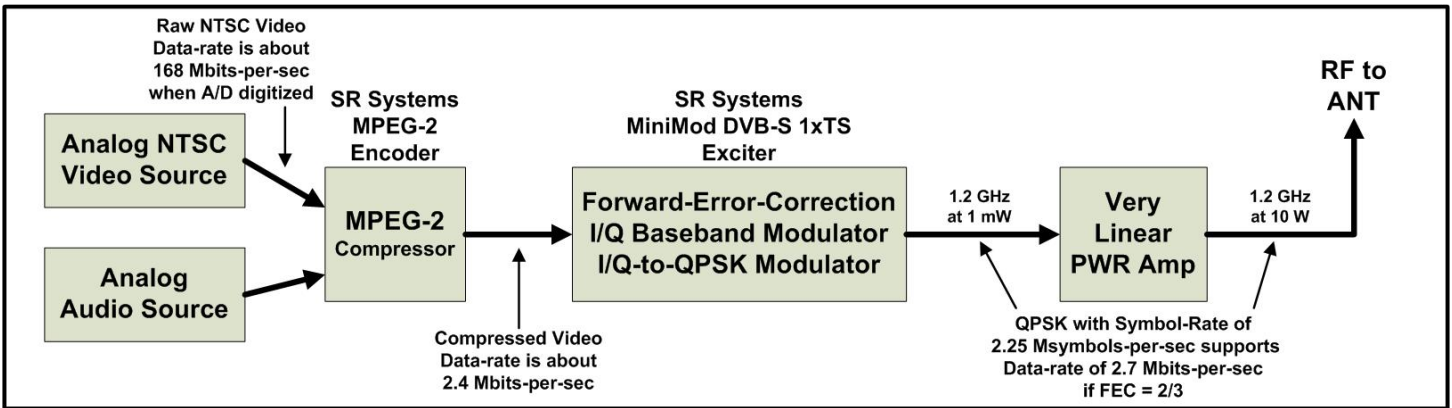


Bild 1 – das D-ATV Block-Schaltbild zeigt verschiedene Daten- und Symbol-Raten für DVB-S QPSK (für 2,25 Msymbols-pro-Sec., die Bandbreite beträgt 3 MHz)

TechTalk – D-AVT – Fortsetzung von Seite 1

Die kommerzielle DVB-S-Fernseh-Norm verwendet zwei unterschiedliche Forward-Error-Correction-(FEC)-Algorithmen, um Schutz gegen Rausch-Störungen und Multi-Path-Fehler zu bieten. Der erste FEC-Algorithmus wird Viterbi-Code genannt, den zweiten FEC-Algorithmus bezeichnen wir als Reed-Solomon-Code.

Der Viterbi-FEC-Algorithmus kann auf unterschiedliche Fehlerkorrektur-Stufen eingestellt werden. Diese unterschiedlichen Viterbi-Konstellations/Redundanz-Einstellungen sind üblicherweise: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 und 7/8. Die erste Zahl ("1" im Falle von 1/2) ist die Anzahl an Input-Bits. Die zweite Zahl ("2" im Falle von 1/2) ist die Anzahl der Ausgangs-Bits des FEC_{viterbi}-Algorithmus. Somit wird der MPEG-2-Ausgangs-Datenstrom bei einem auf 1/2 eingestellten FEC-Algorithmus um 100% vergrößert. Das bedeutet ... für jedes Bit, das wir in die FEC-Berechnung hineingeben, kommen zwei Bit wieder heraus. Ein für 3/4 konfigurierter FEC_{viterbi}-Algorithmus würde zum Beispiel den MPEG-2-Ausgangs-Datenstrom um 33% vergrößern. Daher können die unterschiedlichen FEC-Stufen die in den HF-Modulator gehende Datenrate erheblich vergrößern. Der MPEG-2-Algorithmus komprimiert zwar den Video-Datenstrom, aber der FEC-Algorithmus vergrößert danach die benötigte Daten-Bit-Rate erneut.

Der Reed-Solomon FEC-Algorithmus hat eine feste Einstellung. Er vergrößert den Datenstroms um 188/204. Daher kommen für jeweils 188 in den FEC_{reed-solomon}-Algorithmus hineingehende Bits 204 Bits wieder heraus ... das ergibt eine zusätzliche FEC-Vergrößerung von 8.5%.

Digitale Modulation Symbole und Symbol-Raten

Digitale Modulations-Technologien wie BPSK (zum Beispiel PSK-31), QPSK (Quad Phase Shift Keying – wie bei DVB-S) und QAM256 (Quadrature Amplitude Modulation mit 256 "Konstellations- Punkte") haben die Fähigkeit mehr Informationen in einem schmalen Frequenz-Spektrum zu übertragen, als analoge Modulation. Die Komplexität der

digitalen Modulation erlaubt uns, mehrere "Daten-Bits" mit jedem SYMBOL zu übertragen. Tabelle 2 listet auf, wie viele Daten-Bits für die verschiedenen bekannten Modulations-Arten in ein Symbol gepackt werden können.

Tabelle 2 – Symbol pro Bit-Packungsdichte für verschiedene digitale Modulations-Technologien

Modulations-Art	Data Bits pro Symbol
BPSK	1
QPSK	2
8-VSB	3
QAM16	4
QAM256	8

Tabelle 2 zeigt, dass QPSK zwei Datenbits in jedes Symbol packt, das moduliert wird. Wenn wir die endgültige Ausgangs-Datenrate (ich nenne diese durch die FEC vergrößerte Datenrate "Brutto-Datenrate") kennen, die wir für das Fernseh-Signal benötigen, dann ist die "Symbol-Rate" exakt die Hälfte der Daten-Bitrate. Zum Beispiel:

Brutto Daten-Bit-Rate = 4.5 Mbits/sec

Benötigte Symbol-Rate = 2.25 Msymbols/sec

Die benötigte Formel für die Symbol-Raten-Einstellung für einen DVB-S-Sender lautet:

benötigte Symbol-Rate = NDBR / (Me x CRv x CRrs)

Dabei sind:

NDBR = Netto Data Bit Rate (genannt: Informations-Rate) wie auch MPEG-2 Ausgangs-Datenrate in Tabelle 1

Me = Modulations- Effizienz (2 für QPSK in Tabelle 2)

CRv = Korrektur Einstellung für Viterbi (1/2, 3/4, usw.)

CRrs = Korrektur-Wert für Reed-Solomon ist 188/204

Ich werde anschließend ein Beispiel für QPSK rechnen, wobei der MPEG-2-Ausgang 2.4 Mbits/sec und die FEC_{viterbi} 1/2 ist.

Tabelle 3- Netto-Daten-Bit-Raten für DVB-S bei einer gegebenen HF-Bandbreite

Modulation	FEC Coderate	DVB-S RF BANDWIDTH for DATV (RF BW = SymbolRate x 1.33)					
		2.0 MHz (SR = 1.5 MS/sec)	2.5 MHz (SR = 1.88 MS/sec)	3.0 MHz (SR = 2.25 MS/sec)	4.0 MHz (SR = 3.0 MS/sec)	5.0 MHz (SR = 3.75 MS/sec)	6.0 MHz (SR = 4.50 MS/sec)
QPSK	1/2	1.38	1.73	2.07	2.76	3.46	4.15
	2/3	1.84	2.30	2.76	3.69	4.61	5.53
	3/4	2.07	2.59	3.11	4.15	5.18	6.22
	5/6	2.30	2.88	3.46	4.61	5.76	6.91
	7/8	2.42	3.02	3.63	4.84	6.05	7.26

(NOTE-1: NTSC Analog Camera produces about 2.4 to 2.5 Mbits-per-sec of MPEG-2 output for Ham Radio type broadcasts)

(NOTE-2: The Net Data Bit-Rate values inside the Table need to be at 2.4 Mbps or larger to support the expected camera data rate coming from MPEG-2 encoder)

(NOTE-3: The Net Data Bit-Rate values inside the Table shown in RED (with strikethrough) are Net Data Bit-Rates that will not support the video data stream.)

TechTalk – D AVT – Fortsetzung von Seite 2

$$\text{benötigte Symbol-Rate} = \frac{2.4 \text{ Mbit/sec}}{2 \text{ bits/symb} * (1/2) * (188/204)}$$

$$\text{benötigte Symbol-Rate} = \frac{2.4 \text{ Mbit/sec}}{0.921 \text{ bits/symbol}}$$

$$\text{benötigte Symbol-Rate} = 2.65 \text{ Msymbol/sec}$$

wenn ich die FEC_{viterbi}-Einstellung auf 3/4 ändere, wird der CRv-Wert zu 3/4 und das Ergebnis lautet:

$$\text{benötigte Symbol-Rate} = 1.73 \text{ Msymbol/sec}$$

Die benötigte Symbol-Rate hat sich verkleinert, weil die für die FEC-Redundanz benötigten "Zusatz-Daten" reduziert wurden. Wenn man auf **Tabelle 3** auf der vorangehenden Seite schaut, sieht man die Netto-Daten-Bit-Raten, die von einer bestimmten Symbolrate bei den diversen FEC-Einstellungen unterstützt werden. Die FEC-Einstellung benötigt ein Netto-Daten-Bit-Raten-Ergebnis von mindestens 2,4 Mbits/sec. Die roten Werte in der Tabelle zeigen FEC-Einstellungen oder Symbol-Raten, die eine Netto-Daten-Rate von weniger als 2,4 Mbits/sec erzeugen. Diese Qualität habe ich mir als mein Ziel für den MPEG-2-Video-Datenstrom-Ausgang gesetzt.

HF-Bandbreite für DVB-S D-ATV

Es zeigt sich, dass es einer der Vorteile von digitalem ATV ist, mehr Bandbreiten-Effizienz als analoges ATV zu besitzen. Mit QSPK-Modulation hat man derzeit die Möglichkeit die D-ATV HF-Bandbreite ohne wahrnehmbare Qualitätsverluste auf 2 MHz oder 3 MHz zu verringern. Dies kommt daher, weil die kommerziellen DTV-Normen so ausgelegt sind, dass sie mehrere Fernseh-Programme innerhalb der normalen (alten) HF-TV-Bandbreite übertragen können.

Hier ist die endgültige Formel für die D-ATV-Bandbreite (BW). Für QPSK-Modulation lautet sie:

$$\text{HF-BW}_{\text{allocation}} \sim = 1.33 \times \text{Symbol-Rate}$$

Diese Bandbreite beschreibt den Abstand, den die Mittenfrequenzen verschiedener D-ATV-Stationen haben müssen, wenn sie nebeneinander angesiedelt sind. Es ist der Wert, bei dem der Pegel um -26 dB oder mehr abgesenkt ist.

(Anmerkung – man beachte auch die erweiterte Bandbreiten- Diskussion auf Seite 4)

Der Ausdruck "occupied bandwidth" wird (fälschlich) manchmal benutzt, um eine Bandbreite zu beschreiben, die das 1,19-fache der Symbolrate darstellt, und wo der Pegel um nur -10 dB abgesenkt ist.

Wenn die benutzte Symbol-Rate 2,25 Msymbols-per-sec beträgt, ergibt sich:

$$\text{RF BW} = 1,33 \times 2,25 \text{ Msymbols/sec} = 3,0 \text{ MHz}$$

Wenn wir eine Symbol-Rate von nur 1.5 Msymbols/sec verwenden, dann reduziert sich die Bandbreite auf:

$$\text{RF BW} = 1,33 \times 1,5 \text{ Msymbols/sec} = 2,0 \text{ MHz}$$

Erneut, **Tabelle 3** auf der vorangegangenen Seite gibt einen Überblick, welche HF-Bandbreite man wählen kann was sich dabei für eine Netto-Daten-Bit-Rate bei der jeweils unterschiedlichen FEC-Wahl ergibt.

Zusammenfassung

Nach Überdenken der Ergebnisse in **Tabelle 3**, habe ich entschieden, dass ich eine HF-Bandbreite von 2,5 MHz für das NTSC MPEG-2-Signal mit 2,4 Mbits/sec und eine FEC-Wahl von 3/4 einsetzen werde. Ich plane, bald eine D-ATV-Station aufzubauen. Wenn diese einmal fertiggestellt ist, werde den wirklich benötigten MPEG-2-Video-Datenstrom messen. Ich vermute, dass ich eine NTSC MPEG-2-Video-Datenrate von etwa 2 Mbits/sec bestätigen kann. Dann werde ich wahrscheinlich auf 3 MHz HF-BW durch die Verwendung einer FEC-Einstellung von 1/2 wechseln. Dieser FEC-Wert erzeugt eine hohe D-ATV-Signal-Korrektur-Kapazität bei der halben normalen 6 MHz Bandbreite einer analogen ATV-Station.

Interessante D-ATV Links

- AGAF D-ATV Komponenten (Boards) – siehe www.datv-agaf.de und www.AGAF.de
- SR-Systems D-ATV Komponenten (Boards) – see www.SR-systems.de
- British ATV Club - Digital Forum – siehe www.BATC.org.UK/forum/
- DXzone links on Digital-ATV – siehe [www.DXzone.com/catalog/Operating Modes/Digital ATV/](http://www.DXzone.com/catalog/Operating%20Modes/Digital%20ATV/)
- Amateur Television of Central Ohio – siehe www.ATCO.TV
- OCARC Newsletter Einführungs-Artikel "ATV – Die Digitale Weg-Gabelung" – siehe www.W6ZE.org/DATV/TechTalk74-DATV.pdf
- OCARC Newsletter Artikel "Die Planung einer Digital-ATV Station" – siehe www.W6ZE.org/DATV/TechTalk75-DATV.pdf
- Orange County ARC Newsletter umfangreiche ATV-Artikel-Serie – siehe www.W6ZE.org/DATV/
- Rob-MØDTS D-ATV Seite einschließlich F4DAY-Details – siehe www.MODTS.co.uk/datv.htm
- Online HF-Bandbreiten-Rechner für DVB-S & DVB-S2- siehe www.satellite-calculations.com/Satellite/bitrates.htm
- Ultimative Quelle für Digital Amateur Television – siehe www.D-ATV.com

Anmerkungen über die DVB-S HF-Bandbreite

Bei meiner Suche im Internet habe ich festgestellt, dass es mindestens drei verschiedene Definitionen zur Beschreibung der HF-Bandbreite beim Einsatz der QPSK-Modulation gibt. Hans (DC8UE) war im Folgenden so freundlich, mich mit weiteren Informationen über die verschiedenen Varianten der Bandbreiten-Beschreibung zu versorgen. Der Beitrag von Hans (DC8UE) ist dabei in [BLAU](#) wiedergegeben:

[Beigestellt von DC8UE - Für die Definition der HF-Bandbreite für QPSK-Modulation habe ich noch einige Anmerkungen, wie diese Begriffe im professionellen Umfeld (zum Beispiel bei Satelliten-Übertragungen) gebraucht werden.. Diese Definitionen weichen teilweise von Ken's vorangegangenen Aufstellungen ab. Daher werden sie hier noch einmal zur eigenen Bewertung gegenübergestellt.]

“minus 3 dB” Bandbreite

Bei dieser Methode wird die Bandbreite an den Punkten gemessen, an denen die Leistung um 3 dB abgefallen ist. Diese Methode ist typisch für die Messung von Filter-Bandbreiten und repräsentiert den „Halbe-Leistungs-Punkt“, wenn man auf dem Spektrum-Analyzer schaut. (Symbol-Rate ist dargestellt als S/R.)

Mathematisch entspricht $BW_{-3dB} \sim S/R$ für diese Definition.

[Beigestellt von DC8UE - Die -3dB-Bandbreite ist bei der Bandbreiten-Bewertung von digitalen Signal-Übertragungsstrecken weniger nützlich, da durch die Modulation mit digitalen (rechteckigen) Modulations-Signalen keine gauß-förmigen Signalfanken entstehen.]

Besetzte (belegte) "occupied" Bandbreite

Die besetzte „occupied“ Bandbreite ist definiert als $BW_{occupied} = 1.19 \times S/R$

Dieser Signal-Pegel entspricht dem -10dB-Punkten an den Flanken der „occupied“ (besetzten) Bandbreite.

[Beigestellt von DC8UE - Im Standard 3GPP TS 34.121 Abschnitt 5.8 wird die Occupied Bandwidth (OBW) als der Bereich definiert, in dem sich 99% der gesendeten Leistung befindet. Während der Messung wird ein Gauß-Filter mit einer Bandbreite größer 10MHz und einer Auflösungs-Bandbreite (Resolution Bandwidth RBW) von 30KHz oder kleiner benutzt, um die Verteilung des Leistungs-Spektrums zu messen.

Als erstes wird die gesamte Leistung in dem gemessenen Frequenzbereich berechnet. Dann wird aufsteigend und ausgehend von der tiefsten Frequenz, die Leistung bei jeder Frequenz gemessen und aufaddiert, bis eine Leistung von 0,5% der Gesamt-Leistung erreicht ist. Dies ergibt den unteren Frequenz-Grenzwert. Als nächstes wird absteigend von der höchsten Frequenz ebenfalls die Leistung gemessen, bis wiederum 0,5% der Leistung aufaddiert wurde. Damit ist die obere Frequenz-Grenze ermittelt. Die Bandbreite zwischen den beiden 0,5%-Punkten wird als „Occupied Bandwidth“ (also als „besetzte“ oder „belegte“ Bandbreite) bezeichnet.]

Zugeteilte (überlassene) "allocation" Bandbreite

Diese Methode benutzt ein zusätzliches kleines Sicherheits-Polster (guard-band) zwischen benachbarten D-ATV Signalen. Die zugeteilte überlassene „allocation“ Bandbreite verwendet die Formel $BW_{allocation} \sim = 1.33 \times S/R$ Dies entspricht einer Messung im unteren Bereich bei den -17 dB-Punkten.

[Beigestellt von DC8UE - Die „Allocation Bandwidth“ (also die „zugeteilte“ oder „überlassene“ Bandbreite) ist von den großen Satellitenbetreibern, (wie zum Beispiel im Intelsat Earth Station Standard 420: (IESS420e.pdf) als der Bereich festgelegt, in dem die Leistung auf -26dB abgefallen ist. Dabei wird eine Filterung (meistens per Software) des Signals an den Signal-Flanken durchgeführt, die dafür sorgt, dass das Spektrum in den Randregionen weich ausrollt. Der Grad des Ausrollens wird durch den sogenannten Roll-off-Faktor angegeben. Dieser stellt das Verhältnis der Hälfte des Auslaufbereiches zur Hälfte der erwünschten Kanalbreite dar.

Bei DVB-S arbeitet man mit einem Roll-off-Faktor von 0,35. Es ist allerdings ein cosinusquadrat-förmiges Auslaufen im Randbereich erwünscht. Das Filter erzeugt zunächst aber nur eine Wurzelcosinusquadrat-Form. Erst in Kombination mit einem baugleichen Filter im Empfänger stellt sich dann die gewünschte Kurvenform ein. Nach dem Sender „On Air“ (in der Luft) ist also noch die breitere (in [Bild 3](#) gepunktete) Signal-Kurve zu finden!]

[Fortsetzung der Beigestellung von DC8UE –

Die Allocation Bandwidth ergibt sich dabei aus $1 + \text{Roll-off-Faktor} \times \text{Symbol-Rate}$ entsprechend der Formel

$$(B_{\text{Wallocation}} = 1.35 \times S/R) \quad (\text{bei einem } 0.35 \text{ Roll-off-Faktor}).$$

Als Standard bei DVB-S gilt ein Roll-off-Faktor von 0,35 für Video-Übertragungen und 0,4 bei Daten-Übertragungs-Geräten. Bei neueren professionellen Geräten finden wir auch 0,25 und der neue Standard DVB-S2 kennt zusätzlich auch noch den Faktor 0,2. Dann ist die benutzte Bandbreite nur noch 20% größer als die Symbol-Rate.

Die „Allocation Bandwidth“ ist in der Praxis tatsächlich die sinnvollste Angabe zum real belegten Frequenzbereich.]

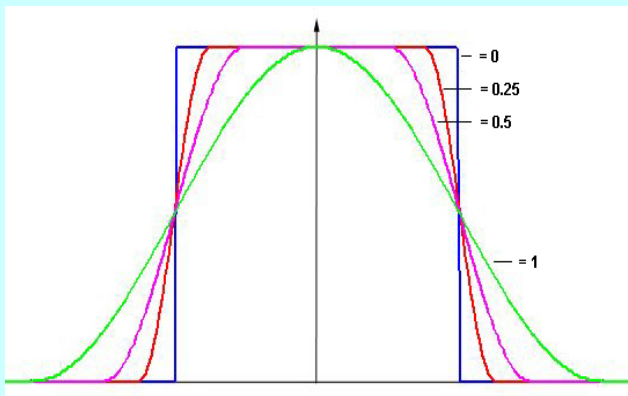


Bild 2 – Verschiedene Roll-off-Kurven für unterschiedliche Roll-off-Faktoren

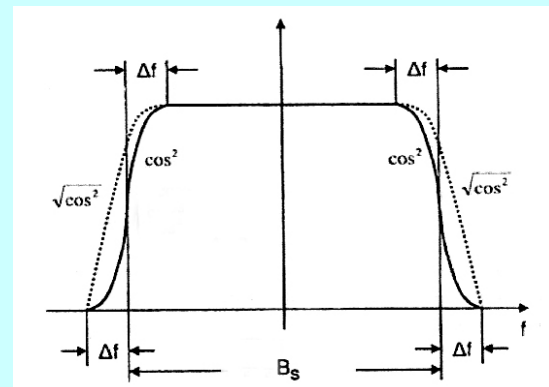


Bild 3 – das „On the Air“ DVB-S-Signal hat die gepunktet gezeichnete Kurve

[Bild 4, Das nebenstehende Spektrum zeigt ein D-ATV-S QPSK-Signal mit einer Symbol-Rate von 1,5 MSymb/s (erzeugt von einem MiniMod). Es zeigt deutlich eine belegte Bandbreite von 2,025 MHz. Unterhalb von 35dB sind zusätzliche Signal-Schultern zu sehen, die durch Intermodulation an nichtlinearen Kennlinien entstehen. Etwa 42 dB Abstand beim MiniMod sind typisch, durch die folgenden PA-Stufen wird der Abstand geringer und kann durch (z.B. übersteuerte Endstufen) auch deutlich kleinere Werte annehmen. Es ist extrem wichtig Übersteuerungen des Verstärkers zu vermeiden und den Signalweg und die PA im linearen Bereich zu betreiben.]

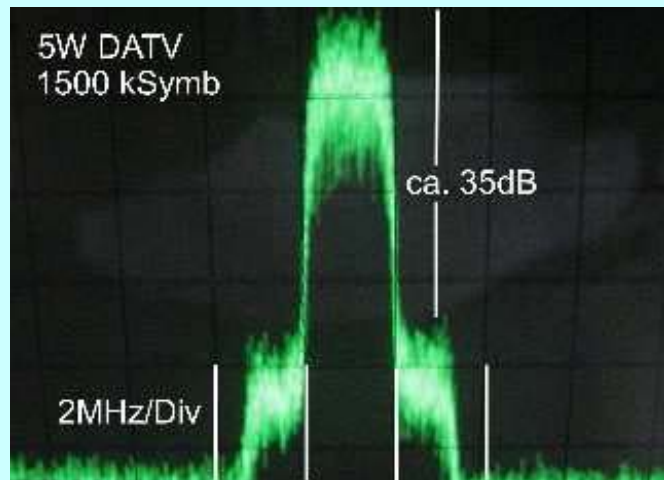


Bild 4 – das D-ATV-QPSK-Signal erzeugt mit 1,5 MSymb/sec eine Bandbreite von 2,025 MHz

Ein ONLINE BANDBREITEN CALCULATOR ist am Ende bei „Interessante D-ATV Links“ aufgelistet.

Es scheint uns, dass die "allocation" Bandbreite der am meisten aussagekräftige Wert für jene Leute ist, die versuchen, viele D-ATV-Stationen in einen Bandplan zu quetschen. Bedeutende Leistungs-Mengen würden in benachbarte Frequenzen überlappen, wenn wir mehrere D-ATV-Stationen bei ihren 1/2-Leistungs-Punkten aneinander grenzen lassen würden... ein großes Potential für Interferenzen. Dieser Ansatz, um Stationen nebeneinander zu betreiben, trägt ein hohes Potential, um gegenseitige Empfangs-Störungen zu erzeugen. Speziell dann, wenn mehrere D-ATV-Umsetzer auf dem gleichen Turm oder Hügel angesiedelt sind, so dass die jeweiligen Empfangs-Antennen in die gleiche Richtung zu den benachbarten Relais zeigen. Hans (DC8UE) und ich stimmen überein, dass Funkamateure nur den Begriff $BW_{\text{allocation}}$ benutzen sollten, wenn sie über DVB-S-Bandbreiten reden.