

Tagungsprogramm

Samstag, 31. März 2007

	Hörsaal A	Hörsaal B
09:15 - 09:30	Begrüßung	
09:30 - 10:15	Achim Vollhardt, DH2VA High Performance Software Defined Radio, ein Open Source Design	Johannes Falk, DC5GY Antennengeometrien für 2,4-GHz-Highspeedstrecken in der Praxis
10:20 - 11:05	Jochen Jirmann, DB1NV Vom Bit zur Multiträgermodulation	Holger Flemming, DH4DAI Workshop FunkrufMaster V1.00
11:10 - 11:55	Thomas Kleffel, DG5NGI Wie funktioniert DVB-T — Vorstellung und Erklärung eines DVB-T-Modulators auf FPGA-Basis	
12:55 - 12:30	Mittagspause	
12:30 - 13:15	Marten Güttner, DG6MG Jimmy Scherer, DL1GJI Neues leistungsfähiges 32-bit-Knotenrechnersystem für Digipeater / (X)Net auf dem DLC7	Mike Zwingle, OE3MZC Robust Packet Radio
13:20 - 14:05	Felix Erckenbrecht, DG1YFE AX.E — Porterweiterung für Knotenrechner mit Ethernet	Wolf Höller, OE7FTJ Robert Kiendl, OE6RKE Aktueller Stand „digitaler Backbone OE“
14:05 - 14:20	Pause	
14:20 - 15:05	Patrick Scheele, DL1IAZ Gunter Jost, DK7WJ Statusbericht DigitalLink	Sven Vössing, DO2FOX Wetterstation im APRS betreiben und APRS nutzen bei der Sturmjagd
15:10 - 15:55	Christian Daniel, DG2NDK Datenhighway für den Amateurfunk — was wir von DVB, GSM, ... lernen	
16:00 - 16:45	Offene Diskussion: Rückbau auf DFMG-Standorten — Was nun?	
16:50 - 17:50	Joachim Sonnabend, DG3FBL ADACOM-Hauptversammlung	

Vortrag 5

DVB-T – eine Einführung & Vorstellung eines Modulators für den Amateurfunk

von

THOMAS KLEFFEL, DG5NGI

dg5ngi@maintech.de

MATTHIAS KLEFFEL

mk@maintech.de

CHRISTIAN DANIEL, DG2NDK

dg2ndk@maintech.de

STEFAN REIMANN, DG8FAC

info@sr-systems.de

Zusammenfassung — Nach einer kurzen Einführung in DVB-T und die verwendete OFDM-Modulation, möchten wir, passend zum bestehenden DATV-Konzept, einen DVB-T Modulator vorstellen.

I DVB-T – DATV reloaded

BEREITS vor fünf Jahren wurden von Dr. Thomas Sailer (HB9JNX), Prof. Dr.-Ing. Wolf-Henning Rech (DF9IC) und Stefan Reiman (DG8FAC) funktionsfähige Modulatoren für DVB-S und DVB-C vorgestellt. Diese Boards sind inzwischen in Linkstrecken, Umsetzern und bei Funkamateuren zuhause erfolgreich im Einsatz. Da allerdings weder DVB-S noch DVB-C für diese Zwecke spezifiziert wurden, ist der Anspruch an die Qualität des Übertragungskanals bei beiden Verfahren recht hoch. In den letzten Jahren wurde in Deutschland das analoge Fernsehen durch den digitalen Nachfolger DVB-T, der speziell für die terrestrische Übertragung gedacht ist, ersetzt. Die entsprechenden Empfänger sind günstigst zu bekommen und auf Senderseite sind

Encoder und Multiplexer bereits vorhanden. Beste Voraussetzungen also, um DVB-T auch im Amateurfunk nutzbar zu machen.

Der hier vorgestellte DVB-T Modulator fügt sich nahtlos in das bestehende DATV-Konzept. Encoder, Multiplexer und Decoder können weiterverwendet werden, lediglich der neue Modulator und ein Empfänger werden benötigt, um in DVB-T QRV zu werden. Zuerst jedoch eine kurze Einführung in die Technologie.

II Quellcodierung

DVB benutzt eine konstante Paketlänge von 188 Bytes. Diese Länge entsteht durch die Nutzung von vier ATM-Zellen mit je 54 Bytes abzüglich ATM-Header und Adaptionsschicht. In den meisten Fällen wird ATM als Transportnetz für DVB-Sender verwendet. Jedes Paket beginnt mit einem Sync-Byte (0x47), gefolgt vom Transport Stream Header mit verschiedenen Flags, der Packet ID (PID) und eine laufende Paketnummer (continuity counter). Jeder Dienst im Transport Stream nutzt eine eigene PID, wobei die PIDs von 0x0000 bis einschließlich 0x003F für spezielle Dienste (DVB) reserviert sind. Typischerweise enthält ein Transport Stream mehrere TV-Programme und Zusatzdienste. Der Demultiplexer im Empfänger verwendet die PIDs, um die gerade benötigten Datenströme auszufiltern. Der continuity counter ermöglicht die Erkennung von verlorenen oder duplizierten Paketen.

Zusätzlich kann dem normalen TS-Header ein sogenanntes „adaption field“ folgen. Dieses kann u.a. die „Programm Clock Reference“ (PCR), ein Timestamp zur Synchronisation des Empfängers mit der 27 MHz Referenz des Senders, enthalten.

Vor dem Senden müssen die Datenpakete verschiedener Quellen zu einem Transport Stream mit der exakten Sendedatenrate gemultiplext werden. Auch wenn der Modulator nur einen TS-Stecker besitzt, enthält er einen Multiplexer der z.B. von der CPU erzeugte Daten oder – falls nötig – Füllpakete mit der PID 0x1FFF mit dem Datenstrom am TS-Stecker multiplext und letztendlich den gesendeten Datenstrom erzeugt.

Da der Multiplexer zwangsläufig einzelne Pakete verzögert, muss ein eventuell im Header vorhandener PCR-Timestamp entsprechend abgeändert werden (PCR-Korrektur).

III Kanalcodierung und Modulation

Für die DVB-T Modulation ist es besonders wichtig, daß der gesendete Datenstrom möglichst zufällig aussieht. Regelmäßigkeiten im Datenstrom würden letztendlich zu einer ungleichmäßigen Energieverteilung im Spektrum führen. Ein solch ungleichmäßiges Spektrum könnte den Dynamikbereich des Systems nurnoch eingeschränkt nutzen. Da der DVB-Datenstrom häufig Null-Pakete oder regelmäßig auftretende Paket-Header enthält, wird der Inhalt jedes Paketes mit Daten aus einem Pseudozufallsgenera-

tor (PRNG) verknüpft (XOR). Dieser Vorgang wird als „energy dispersion“ bezeichnet. Nach jeweils acht Paketen wird das Sync-Byte einmal invertiert (0xB8) gesendet und der PRNG zurückgesetzt. Dies erlaubt dem Empfänger, sich zu synchronisieren und die Energy Dispersion rückgängig zu machen.

Im nächsten Schritt wird jedes Paket mit 16 Bytes Reed-Solomon Code zur Fehlerkorrektur versehen. Damit können bis zu acht fehlerhafte Bytes im Paket, das nun insgesamt 204 Bytes enthält, korrigiert werden. Dieser Schritt wird auch als „outer coding“ bezeichnet. Für DVB-T und DVB-S wird später (nach dem Interleaver) noch eine zweite Fehlerkorrektur (Convolution Coder), der sogenannte „inner coder“ angewendet. Da der Reed-Solomon Code auf Bytes basiert – ein defektes Byte zählt als genau ein Fehler, unabhängig davon, wieviele Bits in diesem Byte betroffen sind – eignet er sich besonders gut, um die Blockfehler zu korrigieren, die auftreten, falls der Viterbi Decoder die Synchronisation verliert. Erzeugt der Viterbi Decoder (inner coder) z.B. 16 falsche Bits am Stück, zählen diese nur als zwei oder drei Fehler für den Reed-Solomon Decoder (outer coder).

Um den Datenstrom noch robuster zu machen, folgt ein Interleaver. Dieser wird als „outer interleaver“ bezeichnet, da bei DVB-T später noch ein „inner interleaver“ folgt. Jedes Paket wird mit den zwölf vorhergehenden Paketen verschachtelt. Dabei wird das erste Byte des Paketes nicht geändert, das zweite Byte wird durch das zweite Bytes des vorangehenden Paketes ersetzt, das dritte Byte wird durch das dritte Byte des zweitletzten Paketes ersetzt, usw... Das dreizehnte Byte des Paketes wird wiederum nicht geändert. Dieser Vorgang wiederholt sich 17 mal (204 durch 12 ergibt genau 17). Das Interleaving lässt die Sync-Bytes (0x47 oder 0xB8) am Anfang der Pakete unangetastet. Der Reed-Solomon Decoder kann in Kombination mit dem Interleaving Blockfehler von bis zu 704 Bits korrigieren.

Ab dieser Stelle wird der Datenstrom als Bitstrom betrachtet, der nun durch einen Convolution Coder geführt wird. Dieser erzeugt zwei Bits für jedes Eingangsdatenbit und verdoppelt damit die Datenrate. Ein Viterbi-Decoder, der diesen Datenstrom wieder decodiert, funktioniert am besten, wenn die zu korrigierenden Fehler möglichst zufällig verteilt sind. Diese Eigenschaft passt zu der Aufgabe des „inner coders“, das bei der Übertragung anfallende (zufällige) Rauschen zu korrigieren (Forward Error Correction). Dies reduziert das für den Empfang notwendige SNR. Da für jedes Nutzdatenbit zwei Datenbits erzeugt werden, wird dieser Modus als „1/2 FEC“ bezeichnet. Bei geringem Rauschen und gutem SNR ist es unerwünscht, einen solch großen Anteil der verfügbaren Bandbreite für die – dann unnötige – Fehlerkorrektur zu verschwenden. Aus diesem Grund können periodisch Bits aus dem Datenstrom entfernt werden. Wird z.B. jedes vierte Bit entfernt, werden für zwei Nutzdatenbits effektiv drei Datenbits erzeugt. Dieser Modus wird daher als „2/3 FEC“ bezeichnet. Das Entfernen der ungewollten Bits wird auch als Punktuiierung bezeichnet. Der Empfänger muss das Punktuiierungsmuster kennen und darauf synchronisieren. Er kann dann die fehlenden Bits als defekt ansehen,

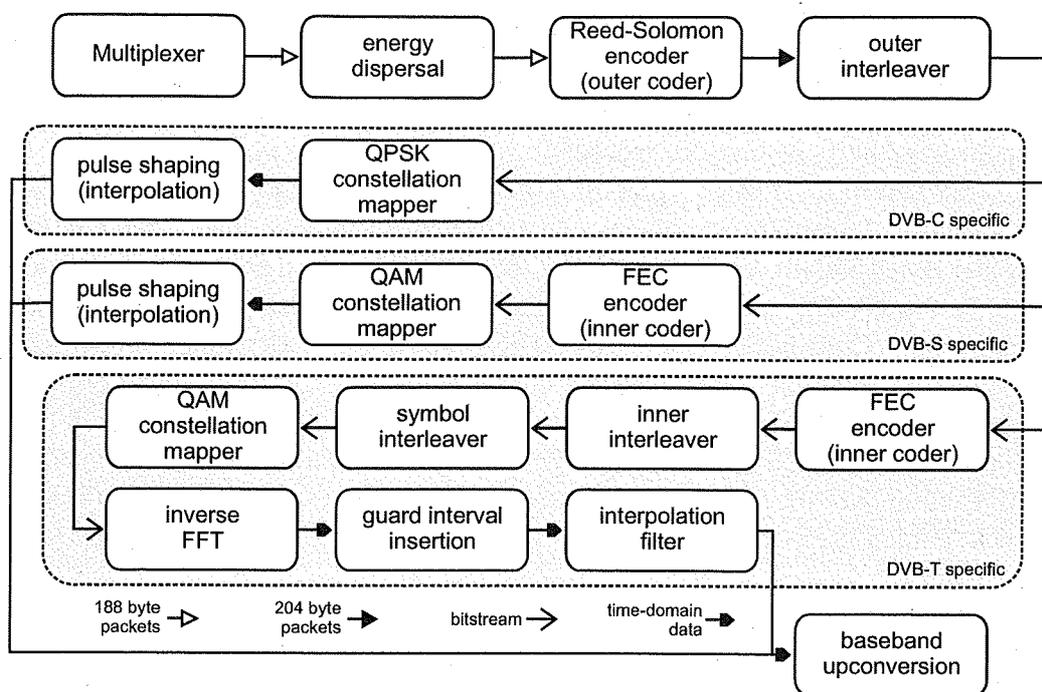


Abbildung III-1: DVB Modulator – Schema

was natürlich die Anzahl der korrigierbaren echten Fehler reduziert. Es kann hier also zwischen Datenrate und Fehlerkorrektur abgewogen werden. Der DVB-Standard sieht 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 und 7/8 FECs vor.

An dieser Stelle wäre für die Modulation eines DVB-S Signals nur noch das Symbol-Mapping notwendig. Für DVB-T ist die Modulation deutlich komplizierter. Während DVB-S lediglich für die Strecke zwischen Satellit und Empfangsschüssel bestimmt ist, wurde DVB-T entwickelt, um die typischen Probleme bei terrestrischer Übertragung (Multipfadausbreitung, Reflexionen, Fading, ...) zu kompensieren.

DVB-T verwendet eine OFDM-Modulation (Orthogonal Frequency Division Multiplex) und damit eine große Zahl schmaler Träger (1705 im 2k-Modus oder 6817 im 8k-Modus) um ein ca. 8 MHz breites Signal zu erzeugen. Die Symbolrate der einzelnen Träger ist entsprechend gering, die Datenrate kommt durch die massiv parallele Übertragung der Symbole zustande. Die parallele Übertragung jeweils eines Symbols pro Träger wird auch als OFDM-Symbol bezeichnet. Jeder einzelne Träger wird mit QPSK, QAM16 oder QAM64 moduliert.

Um die Effekte von Interferenz und Fading zu minimieren, wird der Datenstrom ein zweites mal verschachtelt („inner interleaver“). Dazu wird der Bitstrom in n separate Ströme parallelisiert, die jeweils in 126 Bit Blöcken verschachtelt werden. Dabei ist n

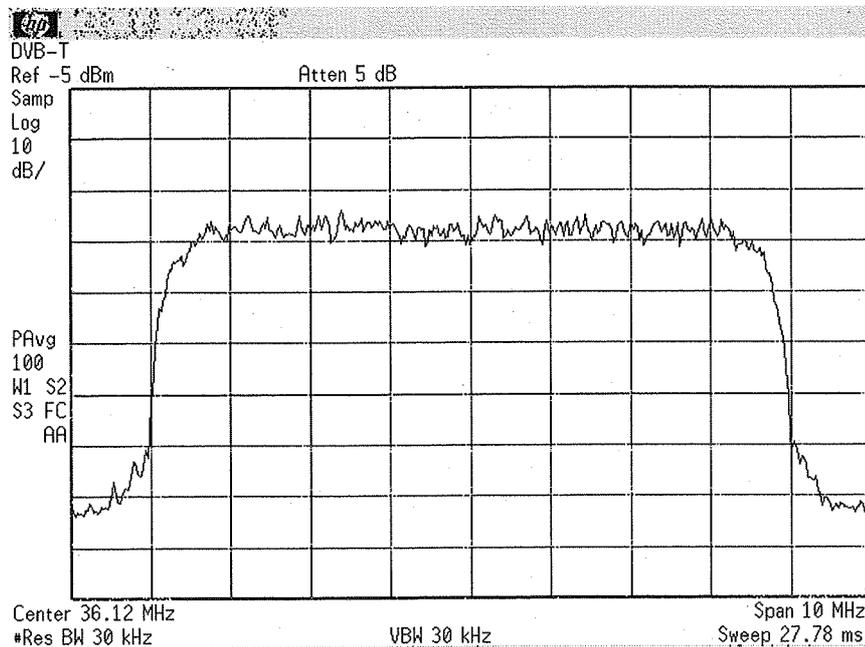


Abbildung III-2: Typisches Spektrum eines DVB-T Signals

genau die Anzahl der Bits ist, die pro Symbol und Träger übertragen wird (2 bei QPSK, 4 bei QAM16, 6 bei QAM64).

Nicht alle Träger in einem QFDM-Symbol werden mit einem Symbol bestückt, um Daten zu übertragen. Da die verschiedenen Träger auf knapp 8MHz übertragen werden, können sich die Kanaleigenschaften der einzelnen Träger stark voneinander unterscheiden. Um diese Effekte zu kompensieren, muss der Empfänger den Kanal genau kennen. Dies wird ihm durch spezielle Einzelträger (sogenannte „Piloten“) erlaubt. Zum einen sind 45 (bzw. 177 im 8k-Mode) Träger immer als kontinuierliche Piloten belegt; auf ihnen wird immer ein bekannter Wert übertragen. Zum anderen wird auch jeder zwölfte Träger als Pilot genutzt – dieses Muster wird nach jedem Symbol um 3 Träger weitergeschoben. Alle Piloten werden mit besonders hoher Amplitude moduliert, um dem Empfänger die Erkennung zu erleichtern.

Um ein empfangenes Signal zu decodieren, muss der Empfänger die Modulationsparameter (FEC, Konstellation, FFT-Mode, ...) genau kennen. Alle diese Parameter werden in einer 37 Bit langen Struktur (68 Bit mit Padding und Fehlerkorrektur), dem TPS (Transmission Parameter Signalling) Block kodiert. In jedem OFDM-Symbol werden einige Träger (17 im 2k-Mode, 68 im 8k-Mode) ähnlich wie die Piloten verwendet, um diesen Block zu übertragen. Dabei wird pro OFDM-Symbol genau ein Bit der TPS gleichzeitig auf allen TPS-Trägern moduliert. So wird alle 68 OFDM-Symbole genau

ein TPS Block übertragen. Diese 68 OFDM-Symbole werden auch als OFDM-Frame bezeichnet.

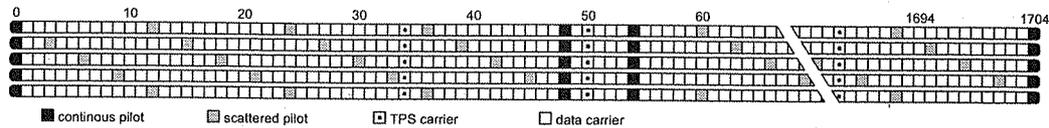


Abbildung III-3: Trägerbelegung für fünf aufeinanderfolgende DVB-T OFDM-Symbole (2k-Mode)

Nach der Belegung der Piloten und TPS-Träger sind noch 1512 der 1705 Träger (6048 von 6817 im 8k-Mode) für die Nutzdaten übrig. Der Symbolinterleaver ordnet den vom „inner interleaver“ erzeugten Bitstrom in n-Tupeln den einzelnen Träger zu. Nach diesem Schritt wird das Zeitsignal für das OFDM-Symbol durch eine inverse Fourier Transformation erzeugt. Dazu wird eine IFFT mit 2048 oder 8192 Punkten verwendet. Das Basisbandsignal besteht für jedes OFDM-Symbol aus den Ausgangsdaten der IFFT-Transformationen. Um die Symbole vor Intersymbolinterferenz zu schützen, wird ein Schutzintervall (Guard) zwischen den Symbolen eingefügt. Die Länge des Intervalles kann 1/4, 1/8, 1/16 oder 1/32 der Symbollänge betragen. Während dieser Zeit wird einfach der Beginn des letzten Symbols wiederholt.

Vier OFDM-Frames, mit jeweils 68 OFDM-Symbolen, werden zu einem Superframe gruppiert. Im 2k-Mode mit QPSK und 1/2 FEC enthält ein solches Superframe genau 411264 Nutzdatenbits (vor Anwendung der FEC). Dies ergibt genau 51408 Bytes, die wiederum genau 252 Reed-Solomon geschützte DVB-Pakete mit je 204 Bytes enthalten. Die Länge der Frames und Superframes wurde so gewählt, daß die Anzahl der Bytes in jedem Superframe ein Vielfaches von 204 ergibt und damit das erste Byte in jedem Superframe auch immer das erste Byte eines DVB-Paketes ist. Zusätzlich werden Pseudozufallszahlengenerator, Punktierungsmuster und Interleaver am Anfang eines Superframes zurückgesetzt. Ein Superframe ist damit die größte zusammenhängende Struktur im DVB-T Signal, zu dessen Beginn ein Empfänger einfach aufsynchronisieren kann.

IV Bedeutung für den Amateurfunk

Die Vielzahl an Parametern erlaubt es, die Modulation gut an die vorhandenen Bedingungen anzupassen. Während Mehrwegeausbreitung durch längere Guard-Intervalle kompensiert werden kann, ist bei starkem Rauschen die Anpassung der Konstellation oder der FEC möglich. Im 2k-Mode kann der Empfänger leichter mit Dopplerverschiebung umgehen, während der 8k-Mode wiederum unempfindlicher gegenüber Intersymbolinterferenz ist.

Die meisten Empfänger können mit 6, 7 und 8 MHz Bandbreite umgehen. Es besteht die Möglichkeit, kleine Bereiche des Spektrums auszusparen (z.B. für Baken oder Fonie-Relais) indem die entsprechenden Träger nicht moduliert werden.

Diese Eigenschaften machen DVB-T zum einen zur idealen Spielwiese für interessierte Funkamateure, zum anderen aber auch zu einem Weg um zuverlässige Linkstrecken und Umsetzer aufzubauen.

V DVB-T Modulatorboard

Die Modulation erfolgt in einem Xilinx Virtex II-Pro FPGA vom Typ XC2VP7, dem drittkleinsten Baustein der Virtex II-Pro Serie [Xi07]. Als DAC kommt ein TxDAC 9772A von Analog Devices zum Einsatz [An03]. Zum Laden des FPGA und zur Steuerung des Bedienteils wird ein Microcontroller von Fujitsu verwendet.

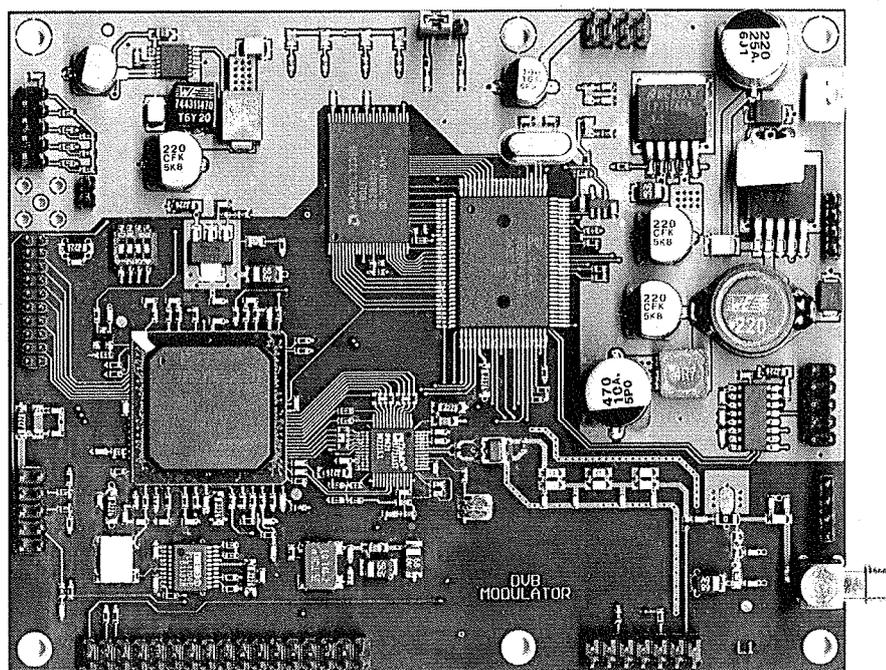


Abbildung V-1: DVB-T Modulatorboard

Der Modulator beherrscht sämtliche im DVB-T Standard beschriebenen Modulationsparameter einschließlich der im asiatischen Raum verwendeten 5 MHz Bandbreite. Die

Parameter können per serieller Schnittstelle oder mit dem bereits bekannten Bedienteil festgelegt werden.

Die vom Modulator erzeugte ZF kann im Bereich von 3 bis 70MHz frei gewählt werden. Dabei wird vom FPGA ein sauberes Spektrum mit 55dB SNR erzeugt, lediglich die Spiegelungen über der Nyquist-Frequenz werden nach dem DAC von einer LC-Filterkette unterdrückt.

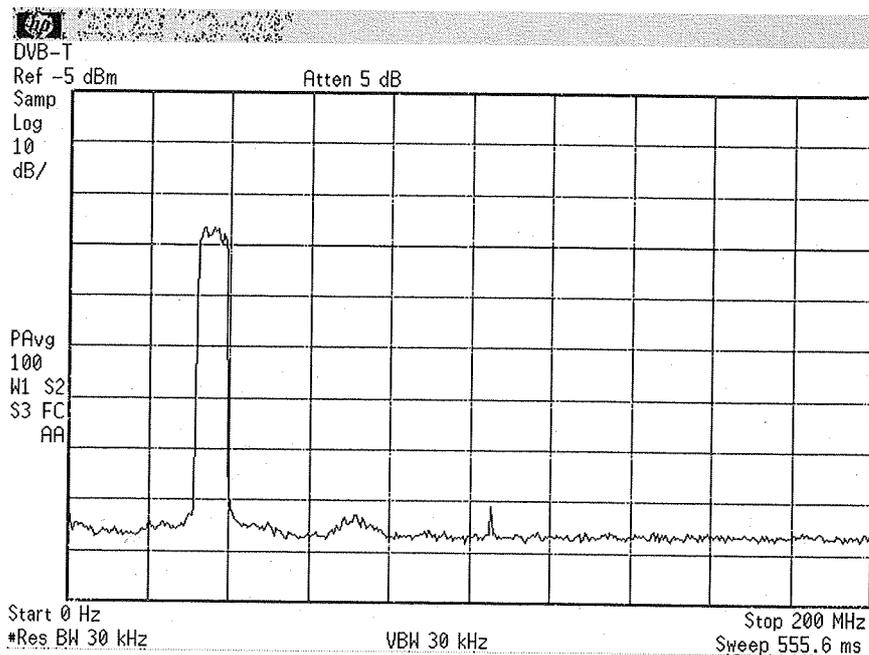


Abbildung V-2: Vom Modulator erzeugtes Spektrum bei einer ZF von 36.125 MHz

Ein Upconverter kann auf das Board aufgesteckt werden und wird von diesem mit Strom versorgt und gesteuert.

Der TS-Eingang ist zu den aktuellen DATV-Boards kompatibel. Der Modulator kann auch den bereits bekannten Encoder sowie verschiedene Tuner (NIMs) laden und steuern. Weiterhin sind auf dem Stecker Pins vorgesehen, um mit dem angeschlossenen Nachbarboard Konfigurationsdaten auszutauschen. Dieses System soll eine einheitliche Konfiguration aller DATV-Komponenten ermöglichen und wird von den zukünftig entwickelten Boards unterstützt werden.

Weiterhin ist für das DVB-T Board auch eine DVB-C Firmware erhältlich, die QAM16, QAM32, QAM64, QAM128 und QAM256 bei frei wählbarer Symbolrate (0,1 - 7 MSym/s) und frei wählbarer ZF (3 - 70 MHz) ermöglicht.

Eine überarbeitete Firmware für DVB-S und weitere Modulationsarten ist bereits in Arbeit.

VI Literaturverzeichnis

- [An03] Analog Devices Inc.: Datenblatt AD9772A
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD9772A.pdf
- [Xi07] Xilinx Inc.: Datenblatt Virtex-II Pro FPGAs
<http://direct.xilinx.com/bvdocs/publications/ds083.pdf>