

Digitale Betriebsarten auf Kurzwelle

- Digimodes, QRP und Selbstbau in der Praxis -

Wolfgang Müller DB2MWA, C13

- 1) Digimodes auf Kurzwelle und Funkbetrieb mit kleiner Leistung (QRP)
 - Warum passen Digimodes und QRP gut zusammen?
- 2) QRP-Betrieb und Selbstbau
 - Zusammenhang Digimodes, QRP und Selbstbau
- 3) Funkbetrieb mit Digimodes
 - Was wird benötigt (Stations-Ausrüstung und Software)?
- 4) Einige Digimodes in Beispielen
 - PSK, OLIVIA, FT8
- 5) Ausbreitungsbedingungen: die eigene QRP-Station als WSPR-Bake
- 6) Funkpraxis: was ist mit der QRP-Station in den Digimodes zu erreichen?

(1) Digimodes auf Kurzwelle und Funkbetrieb mit kleiner Leistung (QRP)

Übliche „klassische“ Definition von QRP-Betrieb:

Max. **5 W** in CW, **10 W** SSB.

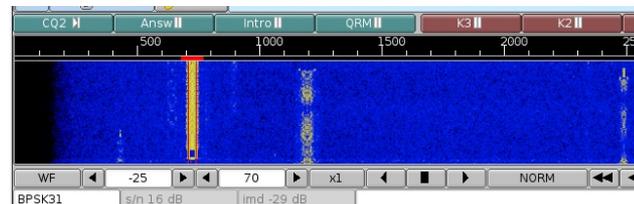
Aber: die eigentliche **Idee** hinter QRP ist, die Station – unter Ausnutzung aller technischen und betriebstechnischen Mittel – möglichst **effizient** zu betreiben.^[1]

Die Digimodes haben das Potenzial die HF-Kommunikation sehr **effizient** zu machen:

- Oft sehr schmalbandig. Die Sendeenergie, die die Information überträgt, wird in einem schmalen Teil des Spektrums konzentriert. Beispiele: CW = „älteste digitale Betriebsart“, PSK31, JT9 (Submodus JT9-1 belegt eine Bandbreite von **15.6 Hz**)
- Hoch entwickelte Algorithmen erlauben Dekodierung „im Rauschen“, z.B. JT9 mit **-27 dB SNR**

Digimodes passen gut zu QRP, da die geringe Leistung der Aussendung effizient genutzt wird. Das ist nicht neu: Kommunikation mit kleiner Leistung wurde schon früher bevorzugt in CW abgewickelt.

PSK31-Signale im Wasserfalldiagramm



^[1] ARRL's Low Power Communication, The Art and Science of QRP, 2nd Ed., Richard Arland, K7SZ, Chapter 5, p. 18.

(1) Digimodes auf Kurzwelle und Funkbetrieb mit kleiner Leistung (QRP)

...Allerdings bekommt man - wie immer - nichts umsonst: ^[1]

Je schmalbandiger und empfindlicher die Betriebsart ist, um so langsamer ist die Informationsübertragung.

Beispiele:

- PSK31: **31 Bits/s**, für 100% fehlerfreie Dekodierung ist die SNR-Schwelle +12 dB, lesbare Dekodierung noch bis herunter zu ca. +3 bis +6 dB (Erfahrungswert) ^[2]
- JT9, Submodus 1 (1 Minute/Durchgang, QSO mit 6 Durchgängen, **6 Min.**): **15.6 Hz** Bandbreite, **-27 dB** SNR-Dekodierschwelle ^[2]
- JT9, Submodus 10 (10 Minuten/Durchgang, QSO mit 6 Durchgängen, **60 Min.**): **1.3 Hz** Bandbreite, **-37 dB** SNR-Dekodierschwelle ^[2]
- FT8, Zeit pro Durchgang 15 s, belegte Bandbreite **47 Hz**, **-20 dB** SNR-Dekodierschwelle ^[2]

^[1] Wie im richtigen Leben, hi!

^[2] Nutzsignalleistung bezogen auf Rauschleistung bei 2500 Hz Bandbreite

(1) Digimodes auf Kurzwelle und Funkbetrieb mit kleiner Leistung (QRP)

Wenn also Digimodes und QRP gut zusammen gehen, stimmt dann der Satz der QRO-Anhänger:

„Das Leben ist zu kurz für QRP“ ?

Überlegung:

Wollen wir das Signal beim Empfänger um eine S-Stufe = **6 dB** erhöhen, so müssen wir die Sendeleistung um einen **Faktor 4** (!) anheben.

Nehmen wir einmal an, unser 100 W Sender wird mit S9 gehört. Verringern wir nun die Leistung, dann sieht die Tabelle so aus:

| S-Stufe | Leistung, W |
|---------|-------------|
| S9 | 100 |
| S8 | 25 |
| S7 | 6.25 |
| S6 | 1.56 |
| S5 | 0.39 |

Bei Erreichen des „QRP-Bereichs“ (ca. 6 W) haben wir also gerade einmal 2 S-Stufen eingebüßt!

- Da das Signal-Rauschverhältnis (SNR) wesentlich wichtiger ist als die absolute S-Stufe, können wir mit rund 5 - 10 W (oder weniger) fast immer noch einwandfreie QSOs fahren.

(2) QRP-Betrieb und Selbstbau

Wenn QRP-Betrieb gut mit Digimodes zusammenpasst, warum bietet sich dann das Thema Selbstbau an?

Kleine Leistungen sind mit Amateur-Mitteln leichter beherrschbar, z.B.:

- Endstufen unkritisch bzgl. Wärme-Management, Spannungen, Sicherheitsabschaltungen etc.
- Antennen und Antennen-Anpassgeräte brauchen keine Bauteile mit sehr hohen Spannungsfestigkeiten
- Geräte werden kleiner und leichter: Fielddays, SOTA, Outdoors-Aktivitäten.
- Bauteile leichter zu beschaffen, geringere Kosten



Beispiel:

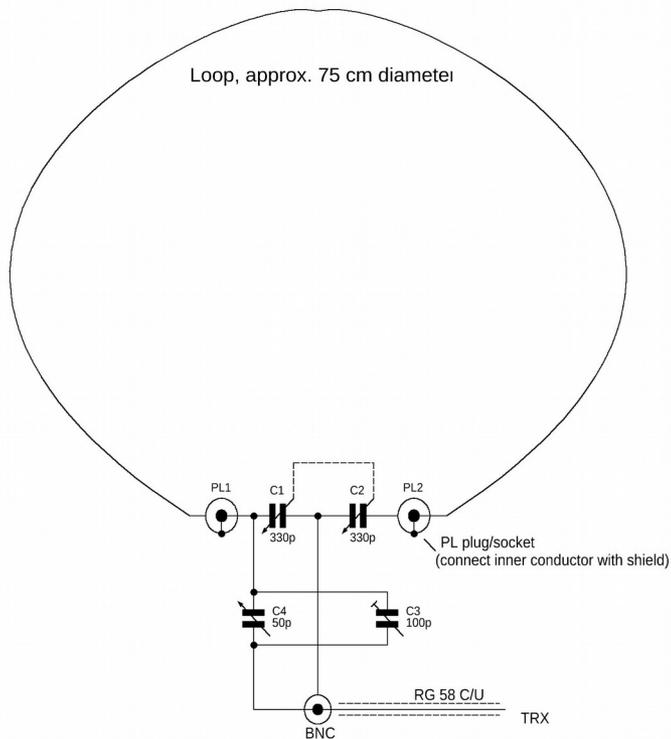
Z-Match mit Rundfunk-Drehkondensatoren und T 130-6 Ringkern (Komplett-Eigenbau)

QRP Transceiver Elecraft K2 (Eigenbau aus Bausatz)

(2) QRP-Betrieb und Selbstbau

Beispiel:

Diese Eigenbau Magnetloop-Antenne (zerlegbar) für 30, 20 und 17 m kommt mit gewöhnlichen Rundfunk-Drehkondensatoren aus und ist bis ca. 15 W HF belastbar.



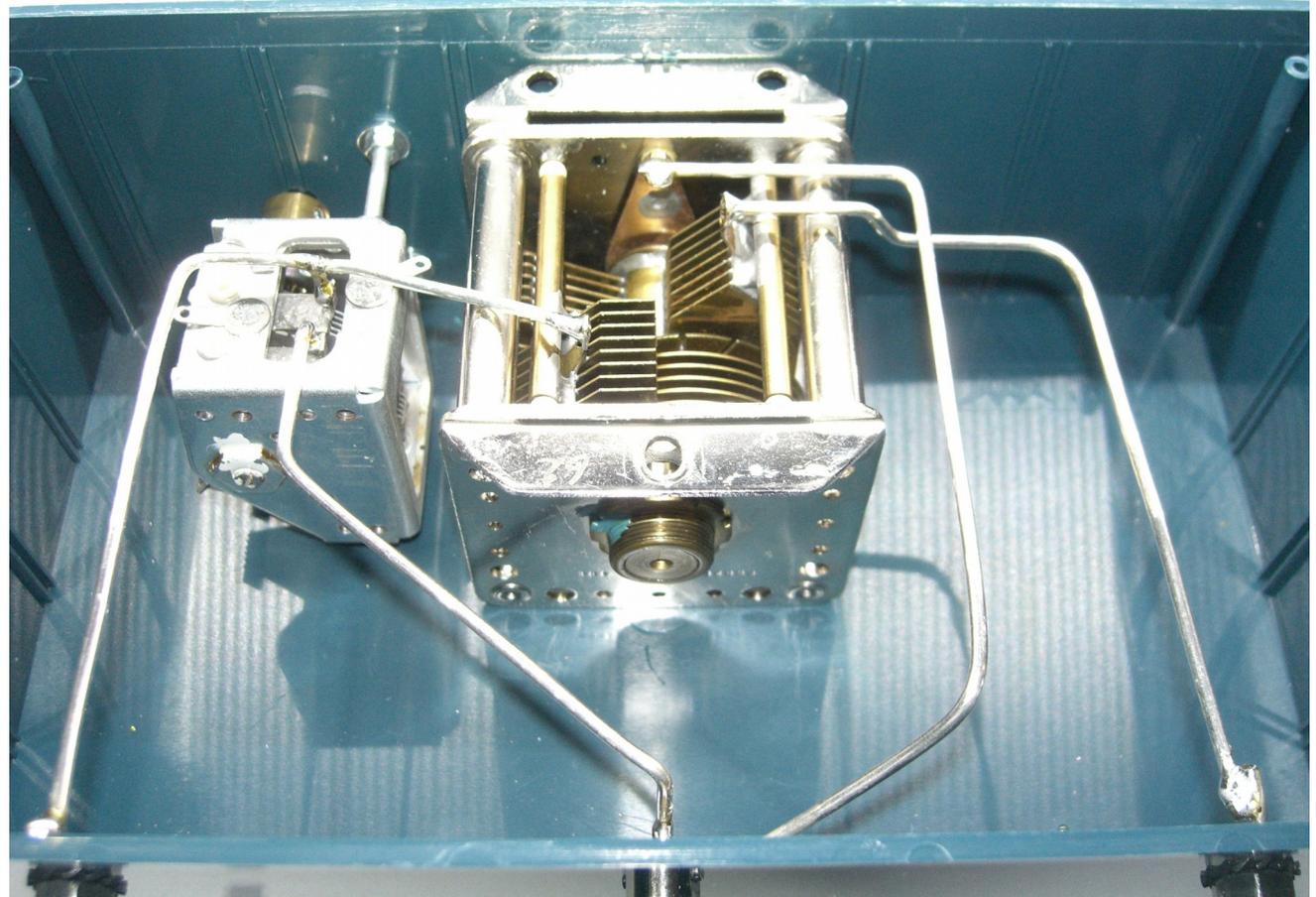
QRP Magloop ermöglicht auch das Funken aus dem Shack

(2) QRP-Betrieb und Selbstbau

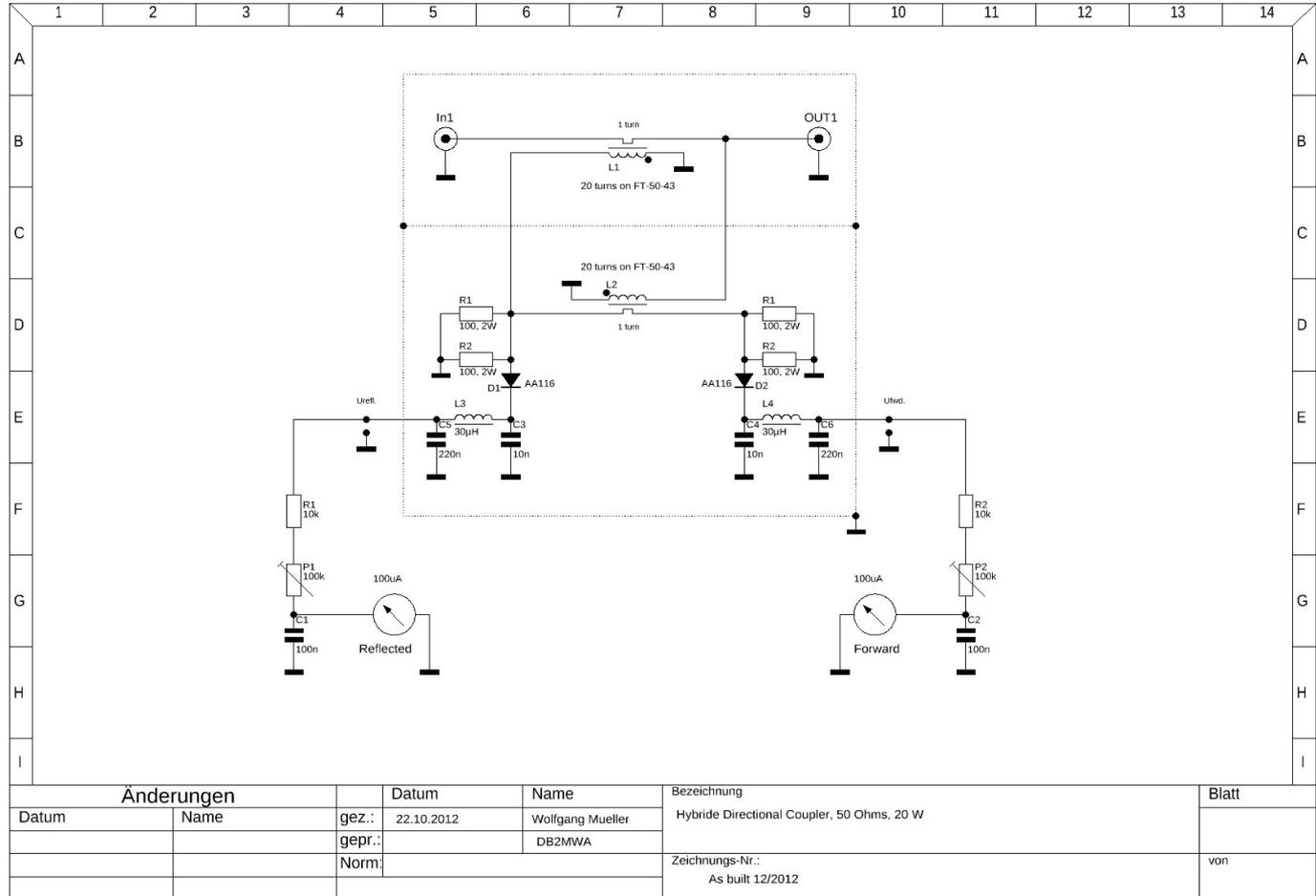
Beispiel: Eine neuere Variante der Abstimmereinheit der zerlegbaren Magloop für QRP-Betrieb.

Man sieht:

- Dank QRP keine sehr hohen Spannungen
- Moderate Drehkondensator-Plattenabstände genügen

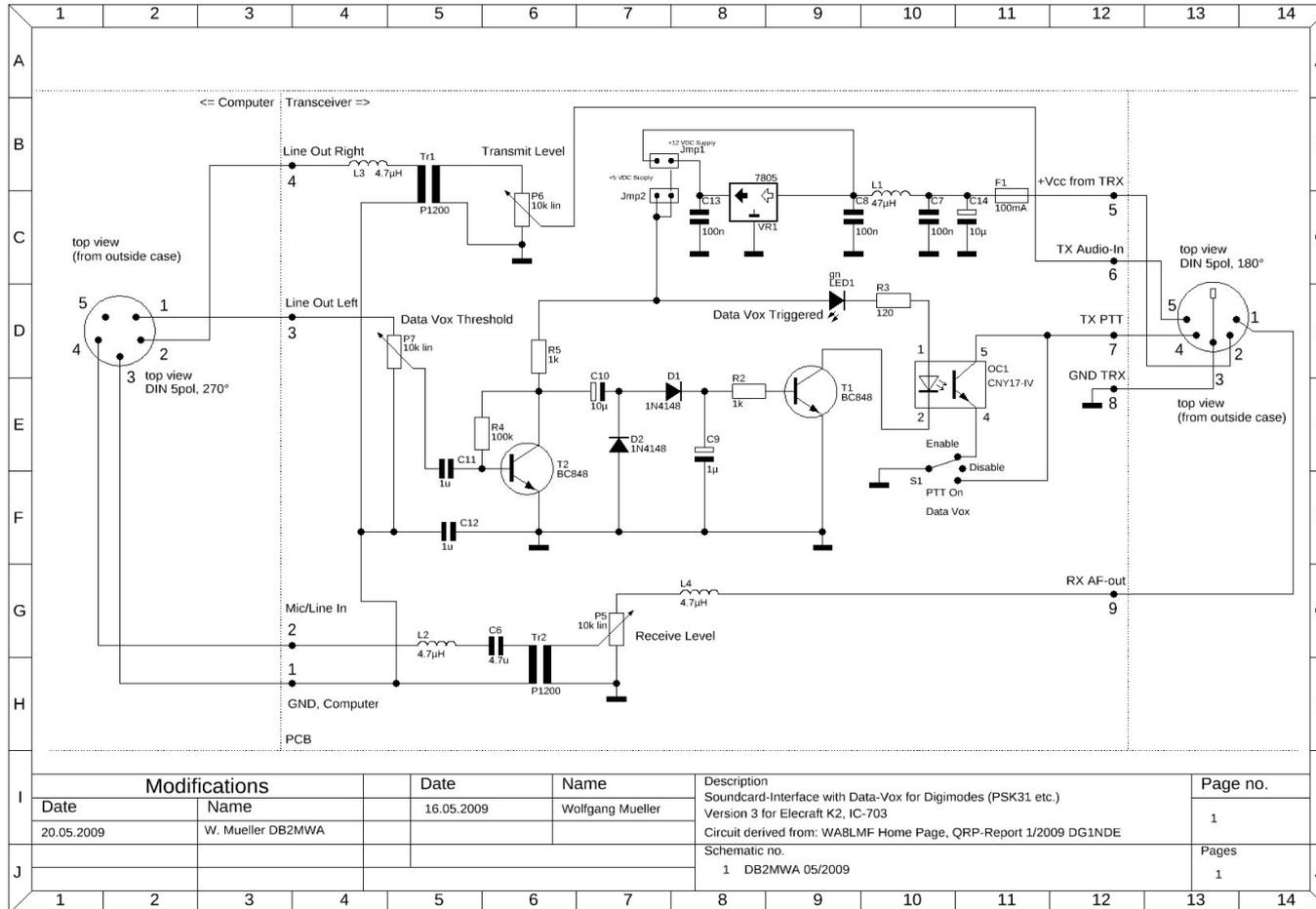


(2) QRP-Betrieb und Selbstbau



Richtkoppler für SWR-Meter der QRP-Station, 160 – 10 m

(2) QRP-Betrieb und Selbstbau



Soundkarten-Interface für Digimodes mit NF-Vox und galvanischer Trennung von Computer und TRX.

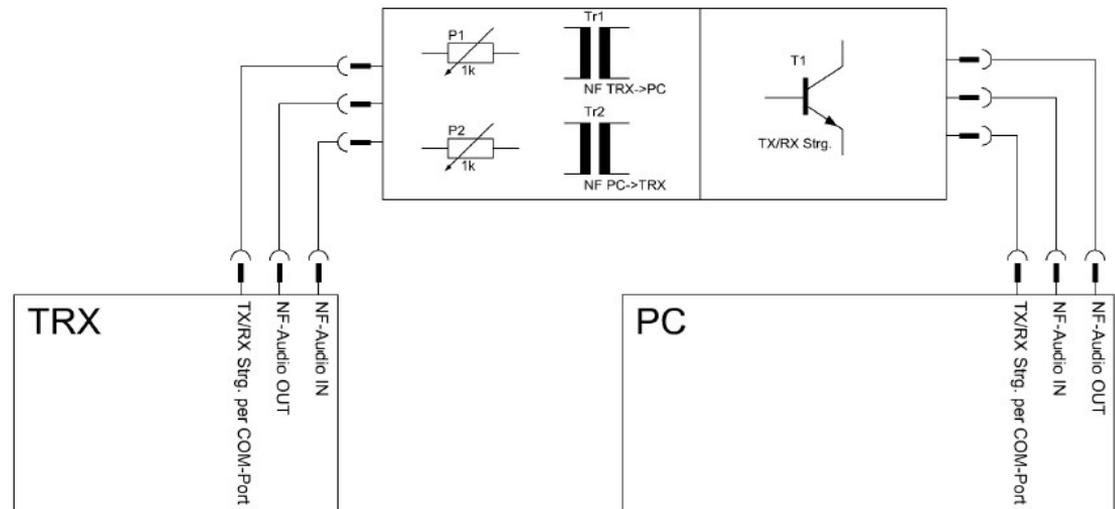
(3) Funkbetrieb mit Digimodes

Was wird benötigt?

Hardware

- Computer mit Soundkarte
- TRX: NF-out, NF-in, evtl. CAT-Schnittstelle zur PTT-Steuerung
- Galvanische Trennung Computer/TRX, optional
- PTT-Steuerung: CAT-Schnittstelle, COM-Port (RS232, USB) oder NF-Vox

Optionales „Soundkarten-Interface“ mit NF-Vox und galvanischer Trennung von Computer und TRX.



Manche Transceiver haben bereits Ein-/Ausgänge für die Computer-Soundkarte mit galvanischer Trennung durch z.B. Trenntrafos. Beispiel: Elecraft K3, K3S.

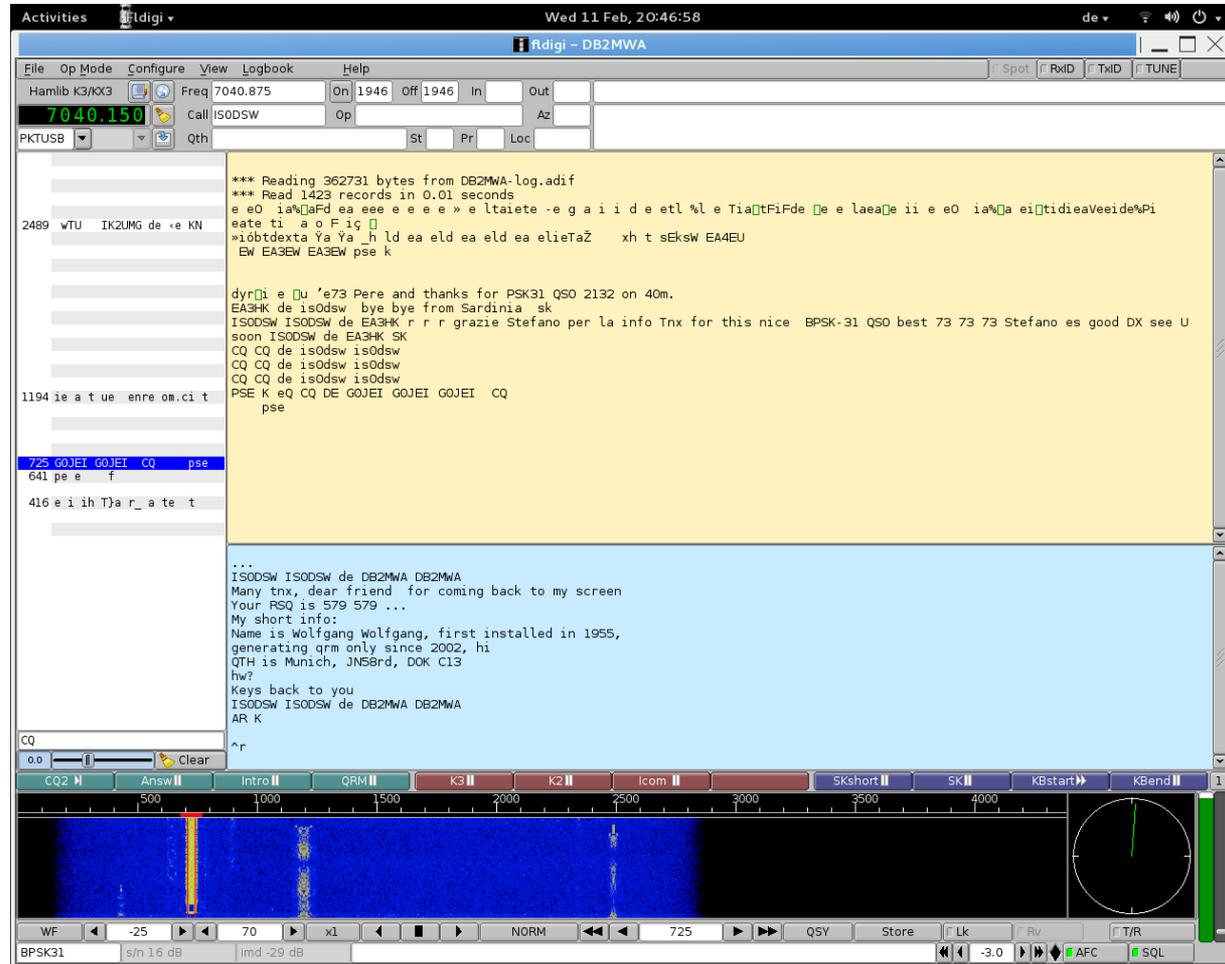
(3) Funkbetrieb mit Digimodes

Was wird benötigt?

Software

Es gibt eine große Auswahl an Digimode-Programmen für Windows, MacOS X, Linux etc.:

- DigiPan, MixW, Mmvari, Psk31 Deluxe, u.v.m.
- Beispiel hier: Fldigi für z.B. PSK31, PSK63, OLIVIA, RTTY



Fldigi im PSK31 - Betrieb

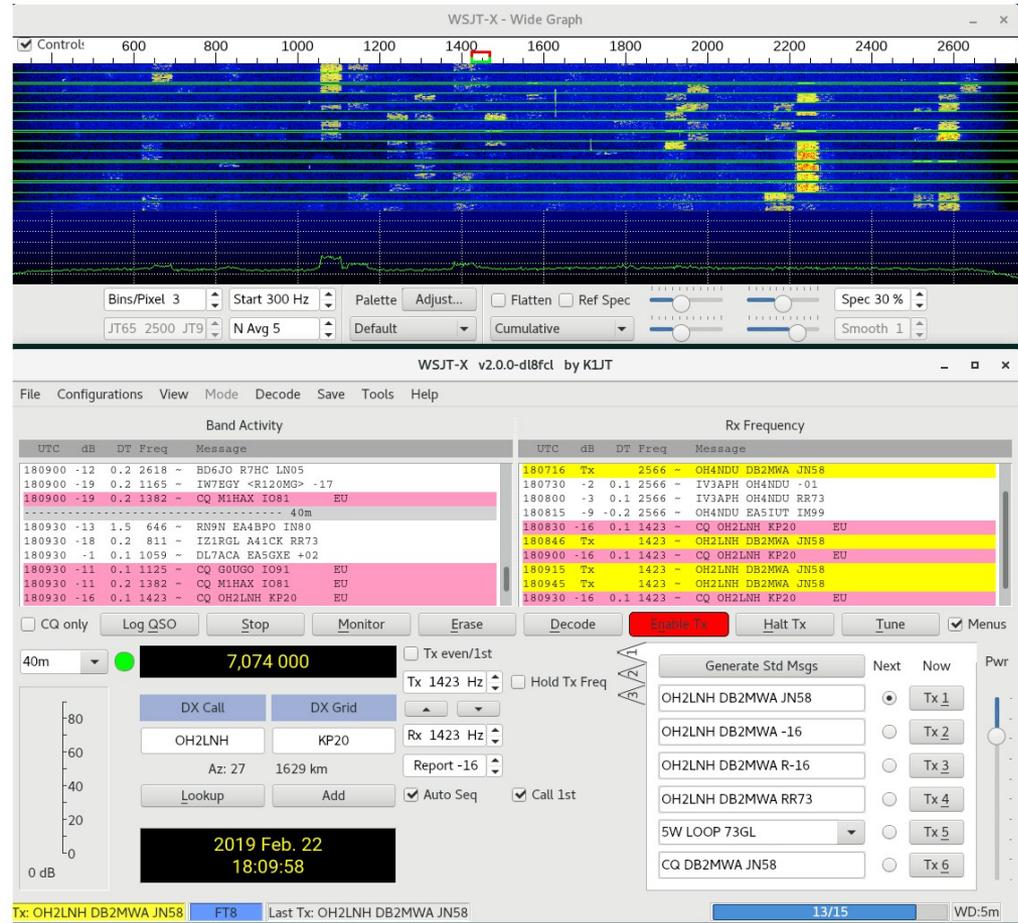
(3) Funkbetrieb mit Digimodes

Was wird benötigt?

Software

Eine Besonderheit unter den Digimode-Programmen: WSJT-X

- Betriebsarten z.B. JT9, JT65, FT8, WSPR (sowie Weitere)
- Decodiert extrem schwache Signale auch „im Rauschen“
- Sehr gut geeignet für QRP-Betrieb
- Freie Software unter GNU General Public License



The screenshot displays the WSJT-X software interface. The top window, titled 'WSJT-X - Wide Graph', shows a waterfall plot of the 40m band from 600 to 2600 kHz. The bottom window, titled 'WSJT-X v2.0.0-dl8fcl by K1JT', contains the main control and monitoring area. It features a 'Band Activity' table on the left and an 'Rx Frequency' table on the right. The control panel includes buttons for 'CQ only', 'Log QSO', 'Stop', 'Monitor', 'Erase', 'Decode', 'Enable Tx', 'Halt Tx', and 'Tune'. A central display shows the current frequency (7,074 000) and a signal strength indicator. Below this, there are fields for 'Tx 1423 Hz' and 'Rx 1423 Hz', along with a 'Report -16' setting. A 'Generate Std Msgs' section lists various call signs and messages, such as 'OH2LNH DB2MWA JN58' and 'OH2LNH DB2MWA -16'. The status bar at the bottom indicates the current mode as 'FT8' and the last transmitted message as 'OH2LNH DB2MWA JN58'.

| Band Activity | | | | Rx Frequency | | | | | |
|---------------|-----|-----|------|---------------------|--------|-----|------|------|--------------------|
| UTC | dB | DT | Freq | Message | UTC | dB | DT | Freq | Message |
| 180900 | -12 | 0.2 | 2618 | BD6JO R7HC LN05 | 180716 | Tx | 2566 | - | OH4NDU DB2MWA JN58 |
| 180900 | -19 | 0.2 | 1165 | IW7EGY <R120MG> -17 | 180730 | -2 | 0.1 | 2566 | IV3APH OH4NDU -01 |
| 180900 | -19 | 0.2 | 1382 | CQ MIHAX IOB1 EU | 180800 | -3 | 0.1 | 2566 | IV3APH OH4NDU RR73 |
| | | | | ----- 40m | 180815 | -9 | -0.2 | 2566 | OH4NDU EAS1UT IM99 |
| 180930 | -13 | 1.5 | 646 | RN9N EA4BPO IN80 | 180830 | -16 | 0.1 | 1423 | CQ OH2LNH KP20 EU |
| 180930 | -18 | 0.2 | 811 | IZ1RGL A41CK RR73 | 180846 | Tx | 1423 | - | OH2LNH DB2MWA JN58 |
| 180930 | -1 | 0.1 | 1059 | DL7ACA EASCKE +02 | 180900 | -16 | 0.1 | 1423 | CQ OH2LNH KP20 EU |
| 180930 | -11 | 0.1 | 1125 | CQ GUGUQ IOB1 EU | 180915 | -16 | 0.1 | 1423 | OH2LNH DB2MWA JN58 |
| 180930 | -11 | 0.2 | 1382 | CQ MIHAX IOB1 EU | 180945 | Tx | 1423 | - | OH2LNH DB2MWA JN58 |
| 180930 | -16 | 0.1 | 1423 | CQ OH2LNH KP20 EU | 180930 | -16 | 0.1 | 1423 | CQ OH2LNH KP20 EU |

(4) Einige Digimodes in Beispielen

PSK 31

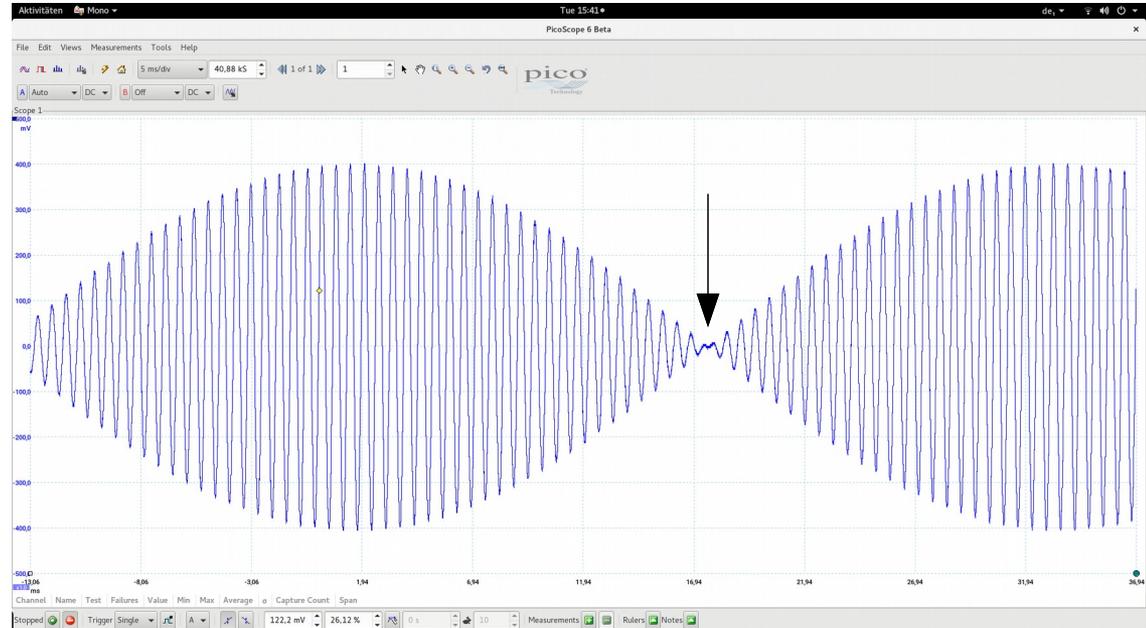
- Von OM Peter Martinez, G3PLX.
- Wie RTTY eine Art von Funkfern schreiben von Tastatur zu Tastatur mit freiem Text und Macros (vorformulierten Textbausteinen). Jedoch kein FSK (Frequency Shift Keying) -Verfahren!
- PSK31, PSK63 usw. ist ein Phase Shift Keying -Verfahren, also eine Phasenumtastung womit die Bitfolge realisiert wird.
- BPSK: Eintönenverfahren mit 180° Phasendrehung (**B**inary **P**hase **S**hift **K**eying)
- Bandbreite nicht viel größer als die Baudrate. Theoretische Bandbreite eines PSK31-Signals ist nur 31.25 Hz, in der Praxis ca. 50-70 Hz, z.B. wegen nicht-idealer Eigenschaften der Computer-Soundkarte.
- Keine Fehlerkorrektur, wie bei **QPSK31** (Quadratur Phase Shift Keying). Das Gehirn korrigiert bei BPSK falsch übertragene Zeichen.

(4) Einige Digimodes in Beispielen

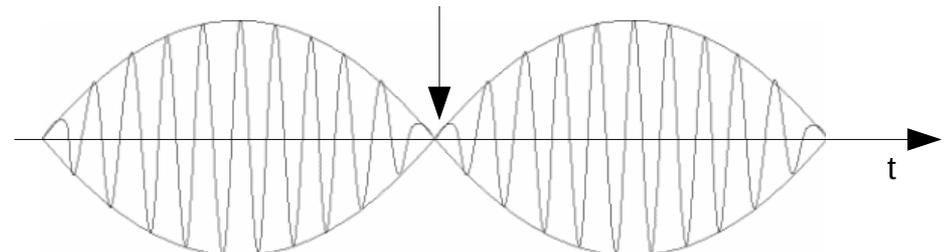
PSK 31

PSK31 erreicht eine Schmalbandigkeit, die sogar die Effizienz von CW übertrifft. Wie wird das erreicht?

- Die Signalamplitude wird zum Phasenumschaltzeitpunkt hin auf Null reduziert (Amplitudenmodulation mit cosinus-förmigen Signal).
- Bei einem abrupten Phasenwechsel ohne Reduzierung der Amplitude auf Null träten hohe Frequenzanteile auf, welche ein breitbandiges Signal zur Folge hätten.
- Bei genauer Betrachtung sieht man den Phasensprung in dem Oszillogramm an dem Punkt wo die Amplitude abschwilt, gerade bevor sie erneut ansteigt (Pfeil).



Phasensprung um 180° ,
schematisch; Phasensprung = 0,
kein Phasensprung = 1



(4) Einige Digimodes in Beispielen

PSK31

Häufiger Betriebstechnischer Fehler:

- Übersteuerung des eigenen Sendesignals
- Manchmal sieht man PSK31-Signale mit Seitenlinien, die einige hundert Hz belegen

Dies ist nicht nur rücksichtslos gegenüber anderen HAMS, es ist auch völlig sinnlos, da wertvolle Sendeenergie in die Seitenfrequenzen geht und die eigene Lesbarkeit deutlich leidet.

Merke:

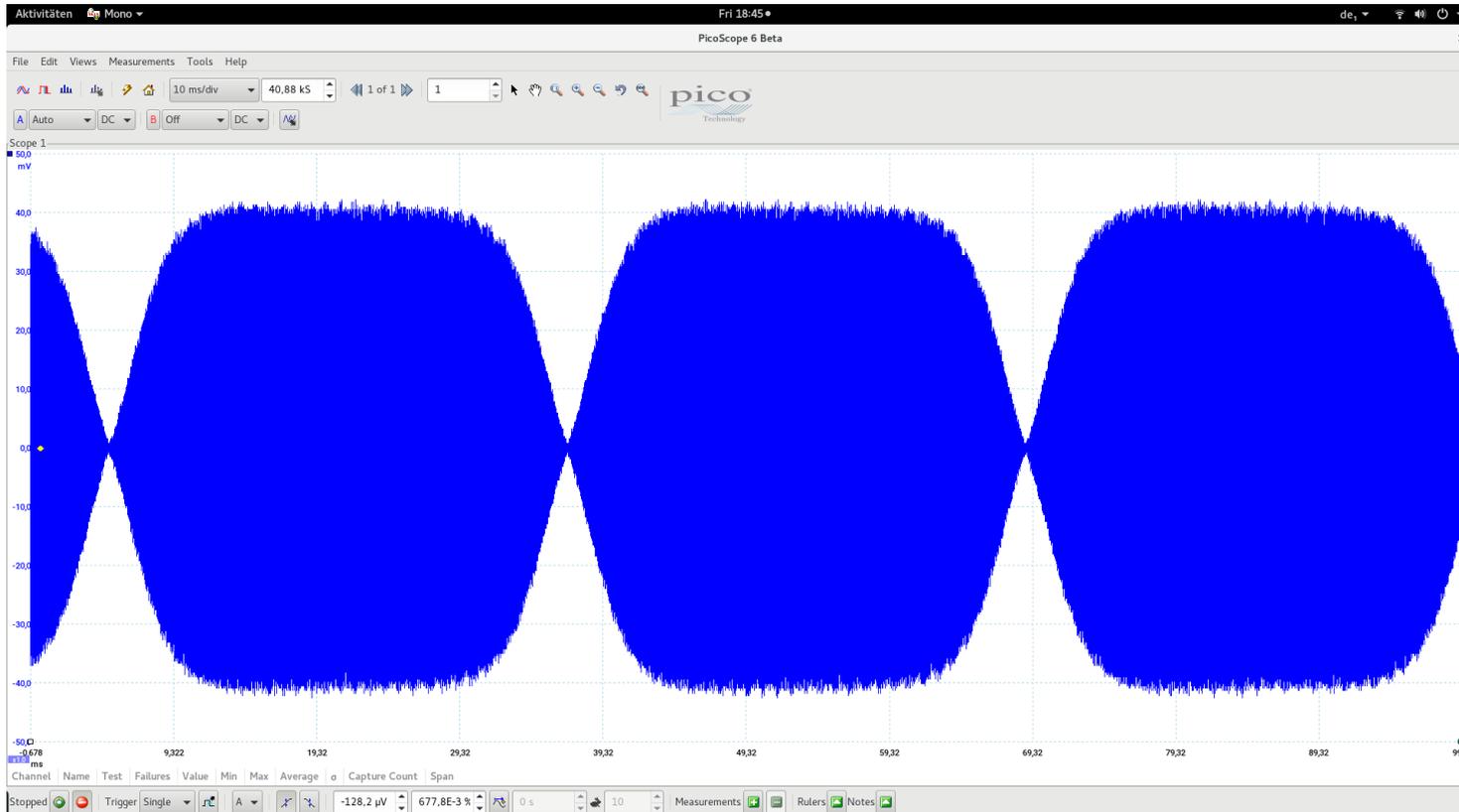
Viel hilft hier also nicht viel, sondern schadet nur.

Abhilfe:

Der Sender sollte mit dem NF-Pegel aus der Computer Soundkarte so eingestellt werden, dass die Sender-ALC (Automatic Level Control) gerade eben nicht anspricht.

(4) Einige Digimodes in Beispielen

PSK31

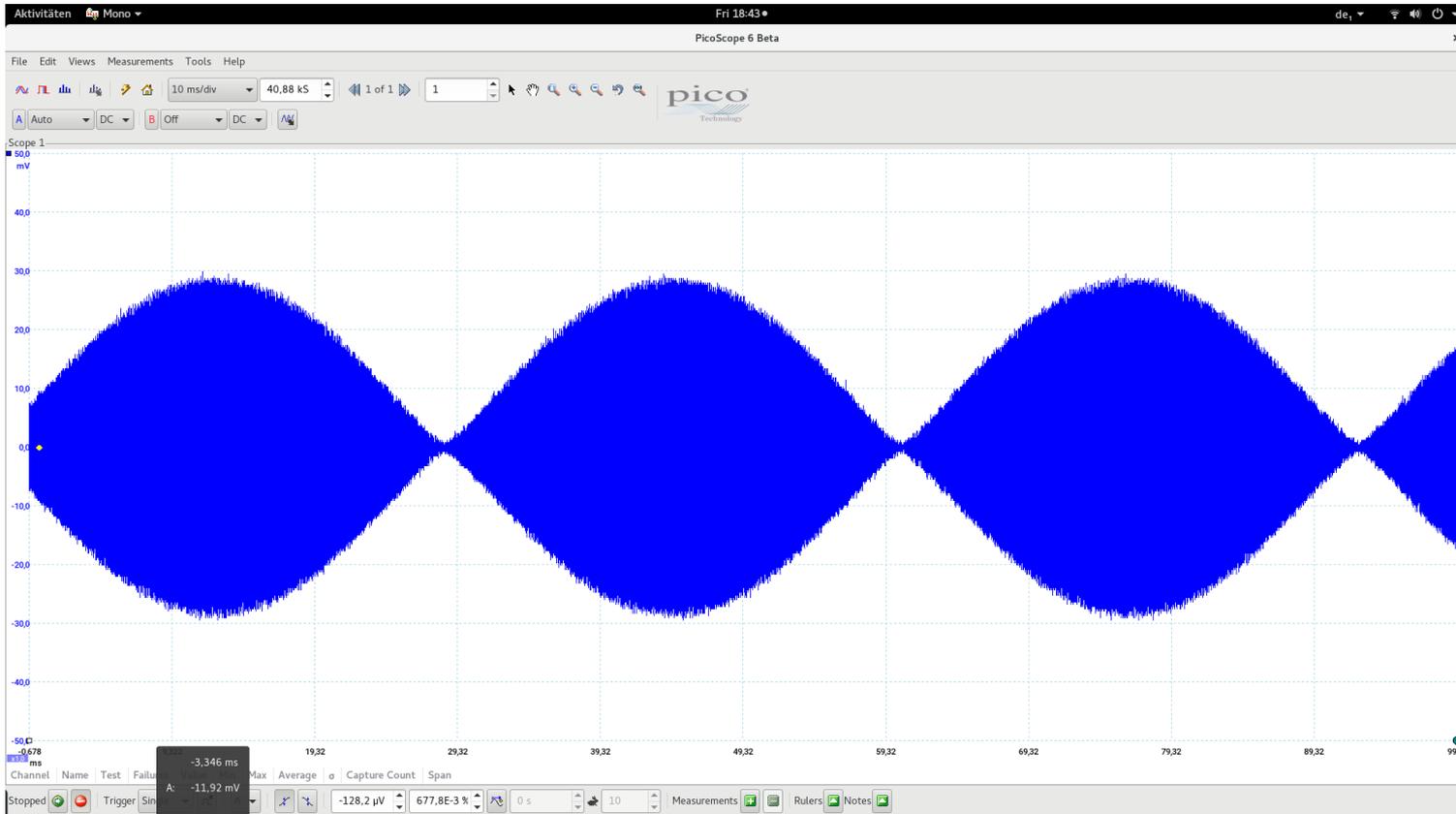


Falsch!

Oszillogramm eines völlig übersteuerten PSK31-Signals

(4) Einige Digimodes in Beispielen

PSK31



Richtig!

Oszillogramm eines richtig ausgesteuerten PSK31-Signals

(4) Einige Digimodes in Beispielen

Fazit PSK31

- Eignet sich gut auch für längere QSOs mit frei formulierten Textnachrichten
- Mischung freier Text und fertigen Textbausteinen (Makros) möglich und teilweise sinnvoll (CQ, 73 SK...)
- Freies Tippen gut möglich da Baudrate gut zur „Tipprate“ passt
- Sehr schmalbandig, hohe Effizienz
- Keine Fehlerkorrektur, falsch übertragene Zeichen muss das Gehirn korrigieren/ersetzen
- Kleinbuchstaben bevorzugt, da der Varicode dafür kürzer ist (nicht wie bei RTTY!)
- Schnellere Varianten wie PSK63, PSK128 existieren, jedoch eher geeignet für Makros, Contest-Style QSOs

Interessante neue Variante:

SIM31 (**S**tructured **I**ntegrated **M**essage BPSK 31), robuster gegen Störungen und Fading, Kodierung von üblichen Makros in nur wenigen Bytes (6-Zeichen Code), Forward Error Correction toleriert 1 Fehlerbit/Zeichen.

(4) Einige Digimodes in Beispielen

OLIVIA

Fldigi beherrscht über PSK hinaus auch noch viele andere digitale Betriebsarten

- Beispiel: OLIVIA von Pavel Jalocha, SP9VRC
- Funktioniert noch mit 10 bis 15 dB unter dem Rauschflur
- Bietet eine echte Fehlerkorrektur
- Oft kann man die Signale kaum noch oder gar nicht mehr auf dem Wasserfalldiagramm erahnen und es geht immer noch
- OLIVIA ist ein MFSK-Verfahren mit FEC (MFSK = Multi Frequency Shift Keying. FEC = Forward Error Correction^[3])
- Mehrere Formate: Anzahl Töne-Bandbreite z.B. 32-1000, 16-1000, 8-500, 4-500, 8-250, 4-250
- Sehr hohe Toleranz gegen Fading, Doppler, Aurora und Mehrwegausbreitung

^[3] Der Sender kodiert die zu übertragenden Zeichen redundant: Empfänger korrigiert Übertragungsfehler ohne Rückfrage

(4) Einige Digimodes in Beispielen

FT8

Eigenschaften

- Von Steven J. Franke, K9AN, und Joseph H. Taylor, K1JT
- FT8 ist ein Frequency Shift Keying Verfahren mit **8** Tönen (8-FSK)
- Sehr junge digitale Betriebsart (Beta Release Juli 2017)
- Wurde schnell populär, in neuerer Zeit entwickelte sich ein regelrechter Hype um FT8
- Sehr gut geeignet für QRP-Betrieb und für Stationen mit Behelfsantennen
- Neue Versionen von WSJT-X ab 2.0.0 unterstützen schon seit 12/2018 nur noch das neue 77 Bit-Protokoll von FT8, nicht mehr das alt 75 Bit-Protokoll (aktuell 2.0.1 vom 25.02.2019)
- Keine QSOs im alten 75 Bit-Modus mehr möglich
- FT8 hat viele Gemeinsamkeiten mit JT65, JT9 etc., aber der zeitliche Ablauf ist organisiert in Durchgängen von nur 15 s Dauer
- QSOs in FT8 sind viermal schneller als in JT65 und JT9

(4) Einige Digimodes in Beispielen

FT8

Eigenschaften

- WSJT-X kann die Auswahl der jeweils folgenden Nachricht im FT8 QSO automatisch zu auswählen und senden (automatischer QSO-Ablauf)
- Das ist erforderlich, weil man für einen Mausklick nach der Dekodierung der jeweils vorigen Nachricht nur maximal 1.5 s Zeit hat
- Die PC-Uhr muss sehr genau gehen (auf besser ca. 1 s, z.B. SyncNTP^[4])
- In einer Aussendung werden maximal 13 ASCII Zeichen übertragen
- Es werden nur Rufzeichen, Rapport in dB und Locator (4 Stellen) übertragen
- Zusätzlich kann eine „individuelle“ Nachricht mit max. 13 Zeichen übertragen werden
- Der Tonabstand ist 5.86 Hz, Bandbreite 47 Hz

^[4] Network Time Protocol NTP

(4) Einige Digimodes in Beispielen

FT8

Eigenschaften

- Die Wellenform hat stetige Phasenübergänge und eine konstante Einhüllende, erlaubt die Verwendung von nichtlinearen HF-Endstufen
- Vorwärtsfehlerkorrektur per sogenanntem „Low Density Parity Check Code“
- Wird mit einem „Soft-Output“ Franke-Taylor Algorithmus dekodiert, veröffentlicht 2016 von Steven J. Franke K9AN und Joseph H. Taylor K1JT
- Der Dekoder wurde nicht patentiert
- FT8 Empfangssignale erfolgreich dekodierbar bis hinunter zu ca. -20 dB SNR
- Erlaubt das Arbeiten von Stationen, deren Signale mit dem menschlichen Ohr kaum mehr wahrgenommen werden.
- Wurde speziell für Multihop-Sporadic-E entworfen: schwache Signale und kurze Bandöffnungen

(5) Ausbreitungsbedingungen: die eigene QRP-Station als WSPR-Bake

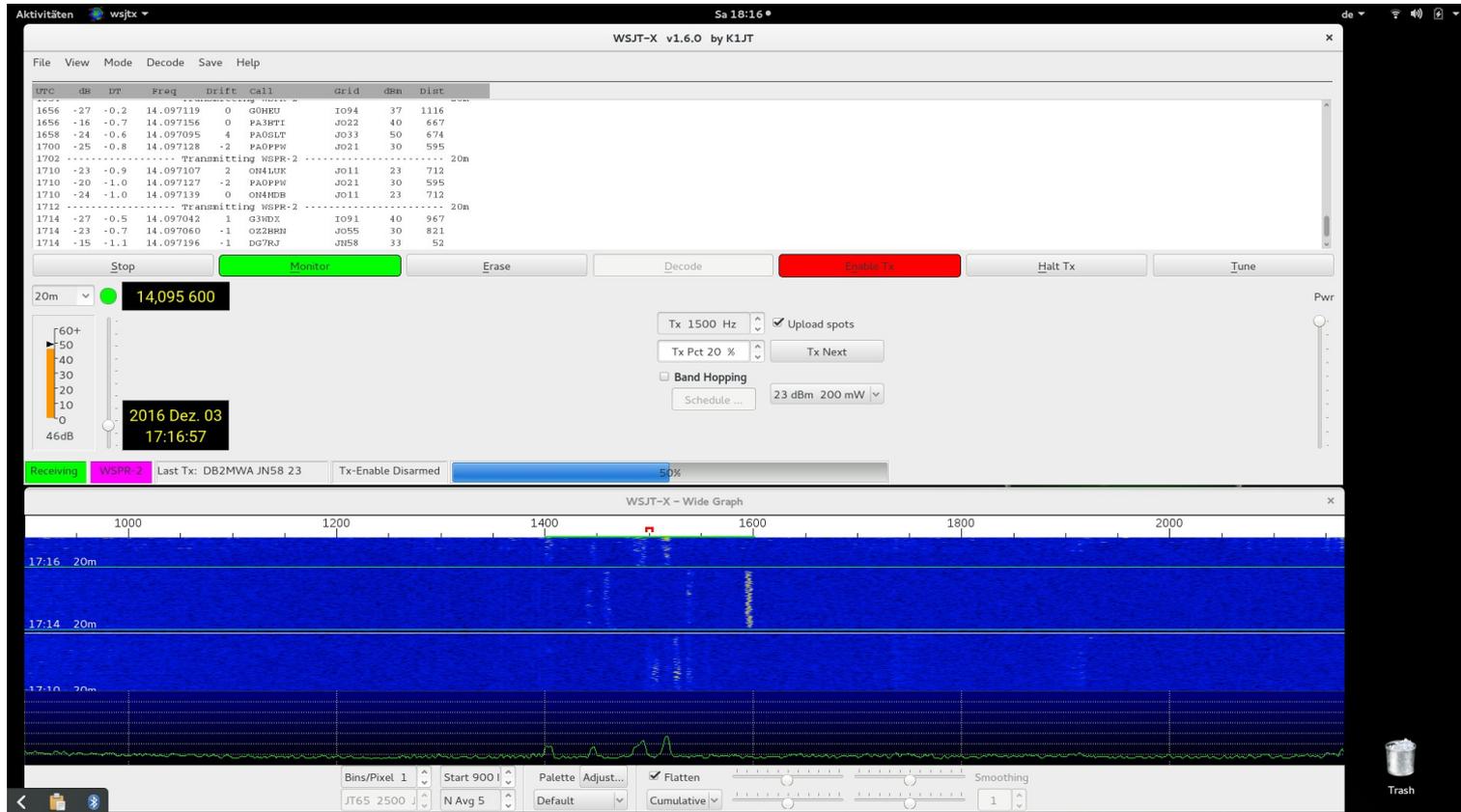
Was ist WSPR?

Weak Signal Propagation Reporter (WSPR)

- WSPR ist eine „Baken Betriebsart“: mein Sender wird zur Bake, viele empfangen meine Bake und laden ihre Spots auf die Internet Seite WSPRnet (<http://wsprnet.org>)
- Umgekehrt: ich empfangen viele andere WSPR-Baken und lade meine Spots automatisch auf <http://wsprnet.org> hoch
- Sehr hohe Reichweite mit geringster Sendeleistung auch bei gestörtem Übertragungskanal
- Übertragen werden Rufzeichen, Locator, Sendeleistung (dBm)
- 50 Bit Daten aber durch Vorwärtsfehlerkorrektur 162 Bit gesamt
- Dauer einer Aussendung 110,6 Sekunden, Start immer zur vollen geraden Minute (NTP/GPS)
- Vierfach Frequenzumtastung (4-FSK), Töne im Abstand von 1,46 Hz
- Bandbreite eines WSPR Signals 5.9 Hz

(5) Ausbreitungsbedingungen: die eigene QRP-Station als WSPR-Bake

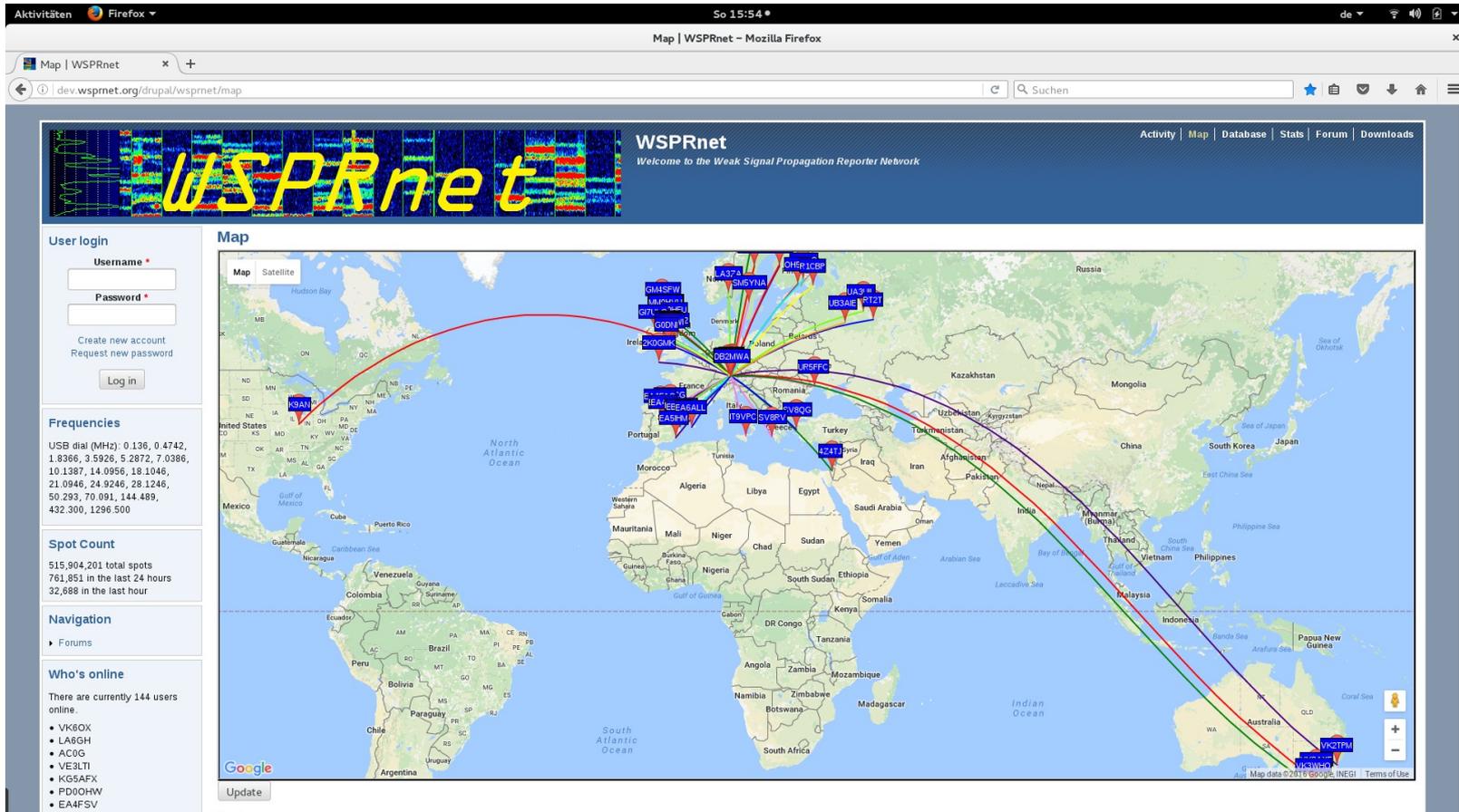
Weak Signal Propagation Reporter



Screenshot WSJT-X (von Joe Taylor, K1JT) im WSPR-Mode: die eigene QRP-Station als WSPR-Bake im 20 m – Band mit 200 mW. Meine „Spots“ werden automatisch ins Internet hochgeladen (Checkbox „Upload Spots“).

(5) Ausbreitungsbedingungen: die eigene QRP-Station als WSPR-Bake

Wo wird mein Signal gehört ? Die Internet-Seite WSPRnet zeigt es an (Screenshot):

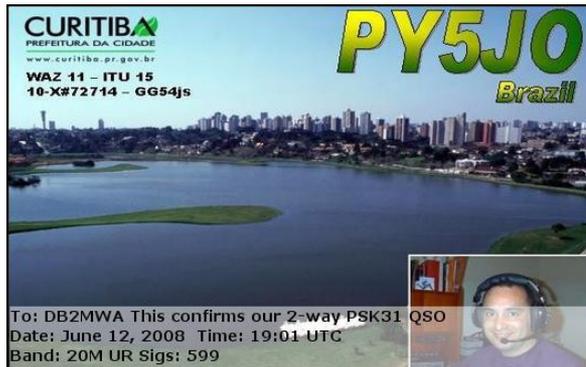


Beispiel hier: ganz Europa kann gearbeitet werden, USA und Australien möglich. Versuche mit JT9, JT65, FT8 oder sogar PSK31 können sinnvoll sein.

(6) Funkpraxis: was ist mit der QRP-Station in den Digimodes zu erreichen?

Wenn es die Ionosphäre erlaubt, sind auch mit kleinen Leistungen beeindruckenden DX-Verbindungen möglich. Abschätzung der Chancen mittels WSPR sinnvoll.

- Elecraft K2, **PSK31, 10 W, 20 oder 17 m Band**, End-gespeiste $\lambda/2$ Drahtantenne mit Z-Match: Antarktis-Stationen (King George Island), Südamerika (Chile, Argentinien, Brasilien...), USA (East Coast, Midwest, Puerto Rico...), China (Hongkong, Shanghai)
- Elecraft K2, **FT8, 5 W, 20 m Band**, verkürzte $\lambda/4$ vert. am Fensterbrett (Little Tarheel II Mobilantenne): USA (Midwest), Russland (Sibirien)



CURITIBA
PREFEITURA DA CIDADE
www.curitiba.pr.gov.br
WAZ 14 - ITU 15
10-X#72714 - GG54js

PY5JO

Brazil

To: DB2MWA This confirms our 2-way PSK31 QSO
Date: June 12, 2008 Time: 19:01 UTC
Band: 20M UR Sigs: 599



KP4ED

Luis
Versalles, U-6, Street 3A
Bayamon, Puerto Rico, 00959-2
USA
Loc:FK68WJ ITU:11 CQ:8
IOTA:NA-099
Icom IC-7600
Kenwood TS-2000
Force 12
GAP Titan DX Vertical

To: DB2MWA This confirms our 2-way PSK63 QSO
Date: August 25, 2010 Time: 20:07 UTC
Band: 15M UR Sigs: 599
Tnx fb QSO es best 73 de Luis, KP4ED



N2BJ

Barry J. Cohen | 456 Sycamore Street | New Lenox, IL 60451-1034 S.M.C.
IRLP NODE #4050 N2BJ/R 444.400 |
Loc:EN61am ITU:8 CQ:4 Will County
10-10:27639
IC7600, IC756PROII, TS2000X, Alpha 87A, | SPE Expert 1K, TH11DX, Hygain
7-2 40M Beam
CushCraft Bombers, 23 Ft Loop 1.2GHZ, | 1-5/8 HELIX

To: DB2MWA This confirms our 2-way PSK31 QSO
Date: September 27, 2006 Time: 20:37 UTC
Band: 20M UR Sigs: 599

(6) Funkpraxis: was ist mit der QRP-Station in den Digimodes zu erreichen?

Mein persönliches Fazit:

WSPR ist sehr gut zum Abschätzen der eigenen Chancen für DX-QSOs.

FT8 ist sehr spartanisch (Contest-Style) und wenig individuell. Jedoch sind die Reichweiten selbst mit QRP-Stationen oder für „Antennen-geschädigte“ HAMS extrem erstaunlich.

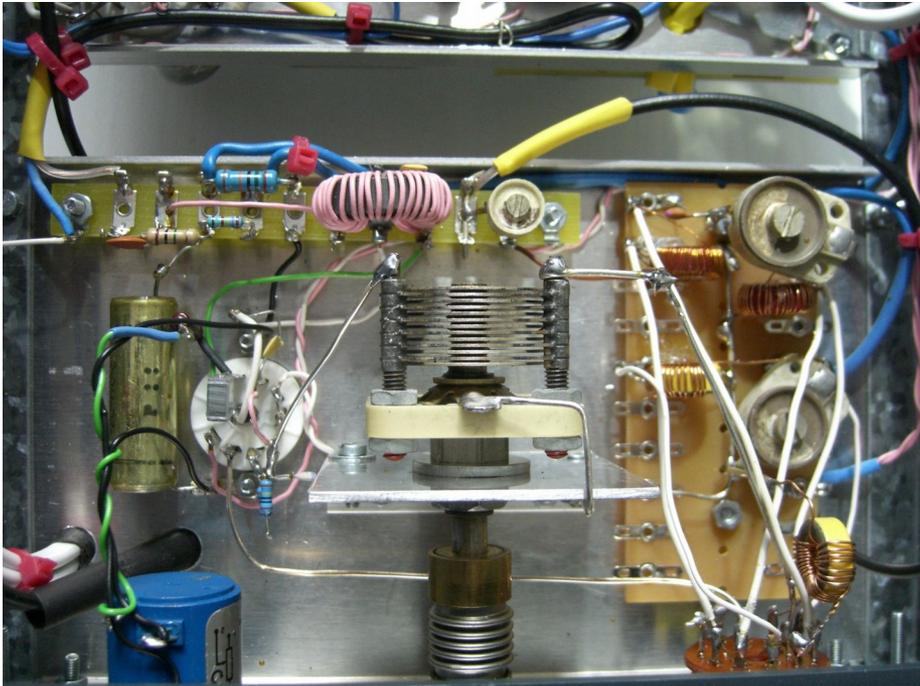
Man hat ja die Möglichkeit mit einem zusätzlichen 13-Zeichen Durchgang eine individuelle, nahezu frei formulierte, Nachricht abzusetzen und so dem FT8-QSO eine persönliche Note mitzugeben (hi!).

PSK31 erlaubt „richtige“ QSOs mit frei formulierten (auch langen) Nachrichten. Allerdings werden ohne Not und wohl oft aus Bequemlichkeit zu viele Standard-Makro-QSOs geführt.

OLIVIA ist die „Rag Chewing“ (also „Klönschnack“) - Betriebsart mit erstaunlichen Eigenschaften bzgl. korrekter Dekodierung und Empfindlichkeit. Leider mittlerweile etwas wenig Aktivität.

<https://www.darc-c13.de>

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!



Impressionen aus dem Selbstbau: Nostalgie – Röhrenaudio (1V2).

Abstimm-Drehko und Audion-Schwingkreise (oben)

Audion-Röhre ECC81 Doppel-Triode (rechts)

