FreeDV-060 Radio Autoencoder (RADE) V2 Testbericht

David Rowe VK5DGR

21. November 2026 Git: 2b0902e auf der Filiale dr-v2-report-phase-d

Übersetzung von DD8JM für die eigene Nutzung.

1 Einführung

Dieses Dokument beschreibt die auf der RADE V2-Wellenform durchgeführten Tests und stellt die Testergebnisse dar. Die Tests wurden vom Autor mithilfe von Softwaresimulationen (Phase A), vom Autor mit Funkgeräten und HF-Funkkanälen (Phase B) sowie durch Crowdsourcing von Save-File-Ergebnissen (Phase C) und Echtzeit-PTT (Phase D) über die Antenübertragung aus der Amateurfunk-Community durchgeführt.

Das RADE-Konzept entwickelte sich aus einer Diskussion zwischen Jean-Marc Valin und David Rowe, woraufhin Jean-Marc Ende 2023 schnell eine erste Proof-of-Concept-Demo zusammenstellte. Im Laufe des Jahres 2024 baute David auf dieser Arbeit auf, um eine praktische Funkwellenform über HF-Funkkanäle zu entwickeln. Diese Wellenform wird als RADE V1 bezeichnet. Im Verlauf von 2025 und Anfang 2026 hat David RADE V2 entwickelt, das mehrere Innovationen aufweist, die sowohl für Amateur- als auch für professionelle Funkkommunikation neu sind:

Einsatz von ML zur Bewältigung von HF-Kanalphasenverzerrungen, Feinfrequenz- und Timing-Offsets.

Keine Pilot- oder eindeutige Wortsymbole, was Bandbreite und Strom spart.

Eine Nc = *14 Trägerwellenform mit einer 800 Hz 99 % leistungsbezogenen Bandbreite (OBW), die schmaler und sauberer ist als V1.*

PAPR wurde durch Training definiert, was es relativ unempfindlich gegenüber Senderfilterung macht.

Niedriglatenzrahmen von etwa 40 ms im Vergleich zu 180 ms bei vergleichbaren (z. B. RADE V1 oder klassischen) Wellenformen.

ML-basierte Frame-Synchronisation, die ohne Pilot- oder eindeutige Wortsymbole funktioniert.

Jean-Marc unterstützte erneut mit Vorschlägen für den Timing- und Frequenzverschiebe-Schätzalgorithmus basierend auf der Autokorrelation des empfangenen Signals.

Das FreeDV-Projektleitungsteam und viele andere haben bei Unterstützung und Tests geholfen. Die Beiträge von David und dem FreeDV PLT wurden großzügig durch einen Zuschuss von Amateur Radio Digital Communications (ARDC) unterstützt.

Tabelle 1: Glossar.

Begriff	Beschreibung
Übernahme	Der Prozess, ein RADE-Signal zu finden und zu beginnen, es zu dekodieren.
AGC	Automatische Verstärkungskontrolle.
AWGN	Additives weißes Gaußisches Rauschen – ein Kanalmodell ohne Fading.
Verlust	Ein dimensionsloses Maß für Verzerrungen in unserem ML-Modell, basierend auf dem Abstand zwischen den Vocoder-Featurevektoren am Encoder und Decoder.
EOO	End-of-Over-Detektionssystem, ein spezieller Frame, der vom Sender verwendet wird, um dem Empfänger zu sagen, er solle die Dekodierung sofort einstellen.
ML	Maschinelles Lernen.
MPD	Multipath Disrupted – ein Kanalmodell für einen sehr schlechten HF-Kanal mit 2 Hz Fading und 4 ms Verzögerungsstreuung.
MPP	Multipath Poor – ein Kanalmodell für einen schlechten HF-Kanal mit 1 Hz Fading und 2 ms Verzögerungsstreuung.
OBW	(99 % Leistung) Belegte Bandbreite – die Bandbreite in Hz, die 99 % der übertragenen Leistung enthält.
OTA	Über Funk
Pilotsymbole	Symbole, die in ein übertragenes Signal eingefügt werden, um die Synchronisation zu erleichtern. Dieser Ansatz wurde für RADE V1 verwendet, verbraucht jedoch Trägerleistung und HF-Bandbreite.
PAPR	Spitzen- zu Durchschnittsleistungsverhältnis, ein niedriges PAPR ist wünschenswert.
PNR	Spitzenleistungs-zu-Rausch-Verhältnis – eine nützliche Kennzahl für SSB-Funksender, die durch ihre Spitzenleistung begrenzt sind.
SNR	RMS-Signalleistungs-zu-Rausch-Verhältnis, eine nützliche Kennzahl für Empfänger.
RADE	Funkautoencoder

2 Phase A – Simulationstests

2.1 Konfiguration

Tabelle 2: Konfiguration für Testkampagne.

Datum	Feb–März 2026
Git Hash	3e06b6 8. April 2026
ML-Encoder/Decoder	250725
ML-Synchronisation	250725a ml Synchronisation

2.2 Allgemeine Leistung

Das Skript *./compe-Modelle inf.sh -p 260203 _inf* wurde verwendet, um Verlust-gegen-SNR/PNR-Kurven (dargestellt in Abbildung 1) für folgende Bedingungen zu erzeugen:

RADE V1.

RADE V2 250725 Netzwerk ohne Timing-Schätzer, Zustandsmaschine oder Frequenzabsatzschätzer (bezeichnet als Genie).

RADE V2 250725 Netzwerk mit realen Schätzern und einer Zustandsmaschine (bezeichnet als rx2).

Alle Wellenformen wurden für Additive White Gaussian Noise (AWGN) und Multipath Poor (MPP)-Kanäle dargestellt.

Die RADE V1-Simulation wird mit dem *inference.sh-Skript* mit Phasenausgleich, jedoch ohne Timing-Schätzung durchgeführt. Stichprobentests von RADE V1 zeigen, dass die Einbeziehung des Timing-Schätzers keinen messbaren Einfluss auf den Verlust im Vergleich zum SNR hat.

Die V2-250725-Kurven mit (beschriftet *rx2*) und ohne (markierte *Genie*) Schätzer sind gleichfällig, was zeigt, dass Schätzeralgorithmen nur einen geringen Einfluss auf die Leistung haben.

Der hohe Verlust auf der grünen V2-Kurve bei weniger als -1 dB ist ein Messartefakt, das dadurch verursacht wird, dass die Zustandsmaschine bei niedrigen SNR gelegentlich aus dem Takt gerät; dekodiertes Audio ist weiterhin möglich, während es sich erholt und neu synchronisiert.

Bei Untersuchung der AWGN-Kurven im Verlust-gegens-SNR-Diagramm ist bei jedem SNR über 5 dB der Verlust von V2 kleiner als V1.

Das Leistungsziel für V2 lag bei 3 dB gegenüber V1. Unter Berücksichtigung der PAPR-Gewinne (Verlust-gegens-PNR-Kurve) sind Gewinne über V1 von etwa 3 dB bei niedrigen PNR-Werten auf den MPP-Kurven zu beobachten.

2.3 MPD-Kanal

Die Zielkanäle für RADE V2 sind AWGN und MPP (Doppler 1 Hz, Verzögerung 2 ms), möchten wir jedoch, dass RADE V2 Sprache, die über Multipath Disturbed (MPD)-Kanäle gesendet wird, erfolgreich dekodiert, die einen Doppler von 2 Hz und eine Verzögerung von 4 ms haben. Ein zusätzlicher Verlust über MPP ist akzeptabel (z. B. entspricht einigen dB mehr für die Aufrechterhaltung eines konstanten Verlustes), aber ein vollständiger Zusammenbruch ist es nicht. Für *diesen Test wurde das v2-spot.sh-Tool* verwendet, und der Verlust aus der rx2.sh-Stufe wurde in Tabelle 3 dargestellt. Sowohl der Verlust als auch die dekodierte Sprache aus den MPD-Kanälen waren durchaus akzeptabel und erfüllten die Anforderungen.

2.4 Belegte Bandbreite und PAPR

Tabelle 4 vergleicht die 99 % leistungsbezogene Bandbreite (OBW) und PAPR für RADE V1 und RADE V2. Die 56 Sekunden lange Testdatei *all.wav* wurde für diesen Test verwendet, und beide Signale wurden durch einen simulierten SSB-Filter eingeschränkt (etwa 400–2600 Tabelle 3: Verlust nach Kanal

Kanal	EbNodB	SNR (dB)	Verlust
AWGN	100	100	0.080
AWGN	10	3.56	0.136
MPP	100	100	0.104
MPP	10	3.56	0.182
MPD	100	100	0.107
MPD	10	3.56	0.193

Hz). Wir messen PAPR anhand der Spitzenstärke über eine gesamte Probe (100 % CCDF), da selbst ein gelegentlicher Peak einen typischen SSB-Sender-ALC für mehrere Sekunden senken lässt. Das PAPR variiert je nach Ausgangsmaterial tendenziell um einen Bruchteil eines dB. Abbildung 2 zeigt das Leistungsspektrum beider Wellenformen, das RADE V2-Signal ist deutlich sauberer. Das RADE V1 OBW wird effektiv durch die Bandbreite des SSB-Filters bestimmt. OTA-Messungen von OBW in Phase D (Abschnitt 5.1) eine enge Übereinstimmung mit diesen simulierten Ergebnissen darstellen.

Tabelle 4: Belegte Bandbreite und PAPR für *all.wav*.

Wellenform	OBW	PAPR (100 % CCDF)
RADE V1	2109	4.20
RADE V2	867	3.48

Cmd-Linie für RADE V1

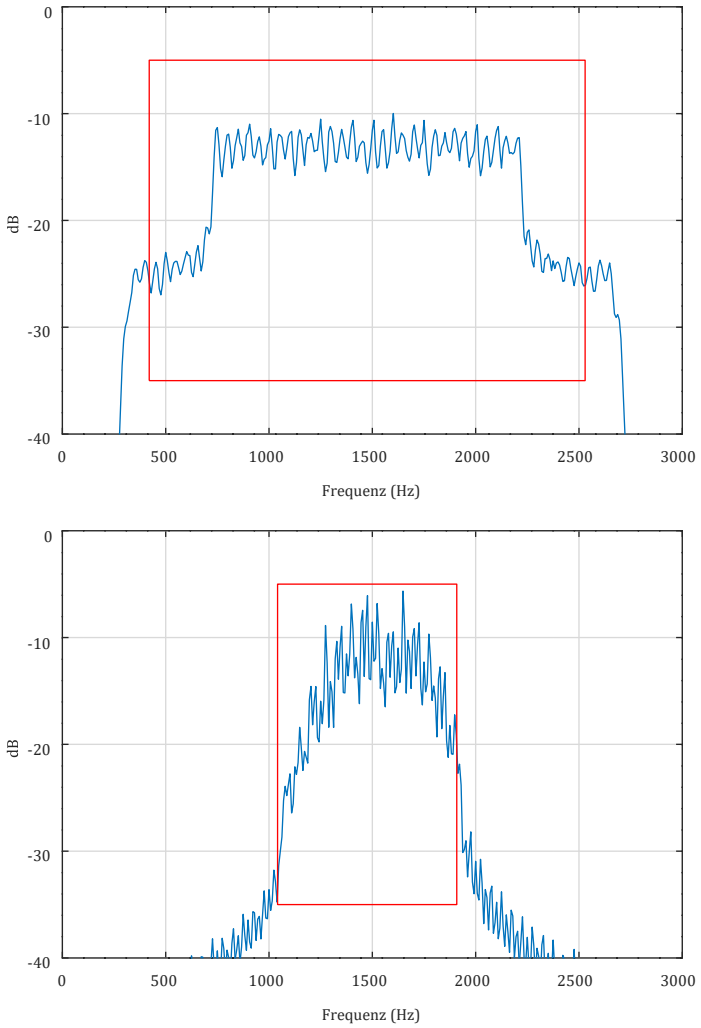
```
./inference.sh model19_check3/Checkpoints/checkpoint_epoch_100.pth wav/all.wav
```

/dev/null --rate_Fs --Piloten --pilot_eq --eq_ls --cp 0,004 --Engpass 3
--auxdata --write_rx rx.f32 --tanh_clipper --ssb_bpf

CMD-Linie für RADE V2

./inference.sh 250725/Checkpoints/checkpoint_epoch_200.pth wav/all.wav
/dev/null --rate_Fs --latent-dim 56 --Peak --cp 0,004 --time_offset -16
--correct_time_offset -16 --auxdata --w1_dec 128 --write_rx 250725_rx.f32
--freq_offset 25 --correct_freq_offset --ssb_bpf

Abbildung 2: Leistungsspektrum von RADE V1 und V2 mit SSB-Filter.



2.5 Übernahme

Mehrere Eigenschaften des Erwerbssubsystems wurden getestet:

1. Erfassungszeit vom Beginn eines RADE V2-Signals bis zur Aufnahme unter verschiedenen Kanalbedingungen.

2. Wahrscheinlichkeit der falschen Erfassung bei Rausch- oder Einzelträgersinuswellensignalen, wenn kein RADE V2-Signal vorhanden ist.

3. Fähigkeit zur Aufnahme, wenn ein Sinuswellensignal vorhanden ist, und dann die Synchronisation zu verlieren, wenn das V2-Signal aufhört.

4. Fähigkeit, ein zweites RADE V2-Signal (mit anderer Frequenzabsatz und Timing) kurz nach dem Ende des ersten V2-Signals wieder aufzunehmen.

Die Erschaffungszeit wurde mithilfe *von v2 spot.sh charakterisiert*. Beachten Sie, dass wir in diesen Tests 1 Sekunde Stille voraussetzen, die für die angegebene *ACQ-Zeit _ abgezogen wird*, um die Ergebnisse in Tabelle 5 zu erhalten. Die Erfassungszeit wird länger, wenn SNR sinkt, was durchaus akzeptabel ist. Eine hohe SNR-Erfassungszeit auf einem guten Kanal von 200 ms ist nutzbar (ähnlich wie bei RADE V1), aber angesichts der Decoderlatenz von 40 ms etwas langsam, daher wäre es wünschenswert, dies für weitere Arbeiten zu verbessern. Dies liegt teilweise an dem Zustandsmaschinendesign, das für Kanäle mit niedrigem SNR optimiert ist. Es kann möglich sein, die Zustandsmaschine so zu modifizieren, dass sie schnell übergeht, wenn die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Signals hoch ist, zum Beispiel die Wahrscheinlichkeiten bis zum Erreichen eines Schwellenwerts summiert werden, anstatt eine feste Zeit (Zustandsmaschinenzähler) zur Validierung des Signals zu verwenden.

Tabelle 5: Zeit bis zum Erwerb *von Taq*.

Kanal	EbNodB	SNR (dB)	*Taq* (ms)
AWGN	100	100	200
AWGN	10	3.56	240
AWGN	1	-5.44	1080
MPP	10	3.56	320
MPP	5	-1.44	1040

Beispiel-Befehlszeile für MPP-Tests:

```
./test/v2_acq.sh --EbNodB 5 --g_file g_mpp.f32
```

Die Wahrscheinlichkeit der falschen Erfassung bei Störgeräuschen wurde mit *v2-acq.sh* getestet, das 600 Sekunden (10 Minuten) AWGN-Rauschen in den *rx2.sh-Empfänger* abspielt. Die Anzahl der Erkenntnisse *n acq* ist am Ende

aufgedruckt und sollte null sein. Über mehrere Durchläufe gab es null Erkenntnisse innerhalb von 10 Minuten, was die durchschnittliche Zeit für falsche Erkenntnisse *von Tfalse* > 600s angibt.

Beispiel-Befehlszeilen für Erschaffungstests:

./test/v2_acq.sh --n_secs 600
./test/v2_acq.sh --n_secs 600 --sinus
./test/v2_acq.sh --n_secs 60 --sinus --ausführlich

Die Wahrscheinlichkeit der falschen Erfassung von Rauschen plus einer additiven Sinuswelle wurde mit *v2-acq.sh* _ unter Verwendung der – sinus-Option getestet. Dies testet die Tendenz des Empfängers, mit der Dekodierung des Audios zu beginnen, wenn eine Trägerwelle (z. B. eine Station abstimmt) vorliegt und kein gültiges Signal vorhanden ist. Eine 1000-Hz-Sinuswelle plus Rauschen führte über einen 10-minütigen Lauf zu keinerlei falschen Erkenntnissen, was ein Durchlauf ist.

Die Fähigkeit zur Erfassung mit additiver Sinuswelle wurde mit *v2-spot.sh* _ *getestet*, wobei die Ergebnisse in Tabelle 6 dargestellt werden. In allen Fällen wird die Aufnahme (Sync) mit einer Sinuswelle erzielt und nicht gehalten (Sync ging verloren), sobald das V2-Signal entfernt wurde. Eine Sinuswelle außerhalb des V2-Spektrums (z. B. 1000 Hz) hat nur einen geringen Einfluss auf den Verlust. Eine Sinuswelle innerhalb des V2-Signals (z. B. 1505 Hz) hat einen größeren Einfluss auf den Verlust, aber V2 fällt nicht um – das gewünschte Ergebnis. Wenn der Sinuswellenpegel auf nahe dem V2-Niveau (etwa 1,0) ansteigt, wird es schließlich unmöglich, Sync zu erreichen. Eine erfolgreiche Synchronisation bei einer Sinuswellenamplitude von 0,5 bedeutet, dass additive Sinuswellen bis zu -6 dBc toleriert werden können – ein akzeptables Ergebnis.

Tabelle 6: Erfassung und Verlust der Synchronisation mit der additiven Sinuswelle

Kanal	Sinusfrequenz (Hz)	Sinusverstärker	EbNodB	SNR	Verlust	Synchronisation	Synchronisation verloren
AWGN	-	0.0	100	93.5	0.080	Y	Y
AWGN	1000	0.2	100	93.5	0.083	Y	Y
AWGN	1000	0.2	3	-3.4	0.298	Y	Y
MPP	-	0.0	100	93.5	0.100	Y	Y
MPP	1505	0.2	100	93.5	0.179	Y	Y

MPP	1505	0.2	6	-0.4	0.276	Y	Y
AWGN	1000	0.5	10	3.6	0.147	Y	Y
AWGN	1000	1.0	10	3.6	-	N	-

Beispiel-Befehlszeilen für Erfassungstests mit additiver Sinuswelle:

```
./test/v2_spot.sh --sine_amp 0,2 --sine_freq 1505
--g_file g_mpp.f32 --ausführlich
```

Betrachten wir den Fall, in dem Signal1 auf Signal 2 folgt, sodass keine Lücke zwischen ihnen besteht. Dies wird das Erwerbssystem belastet, da es schwierig ist, für ein System zu entwerfen, das das Verschwinden von Signal2 für kurze Zeit in einen Fade unterscheiden kann, von dem Fall, in dem Signal1 Signal2 ersetzt. Die Fähigkeit, ein neues Signal schnell wieder zu empfangen, wurde mit folgender Befehlszeile getestet:

```
./test/v2_spot.sh --ausführlich --prepend_signal2 --prepend_noise 0,31
--EbNodB 10 --reset_output_on_resync
```

Dies erzeugt ein Signal2 (-25 Hz Frequenzabsatz), das direkt vor dem Zielsignal1 (25 Hz Frequenzverschiebung) mit 0 ms Verzögerung platziert wird. Der Test misst dann den Signalverlust1; ein geringer Verlust wird erwartet, wenn die erneute Erfassung erfolgreich ist. Das *Prepend-Rauschargument* _ wurde so gewählt, dass der Timing-Offset nur an einer Symbolgrenze ($\delta\hat{} \approx 160$) lag, einem Worst-Case-Standort für das Erfassungssystem. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse einiger Punkttests. Die Verluste sind in allen Fällen ungefähr gleich denen für Signal1 allein, was auf erfolgreiche Wiedererfassung und Bestand hinwies. Der kontraintuitive niedrigere Verlust für das MPP-Ergebnis mit zwei Signalen lässt sich dadurch erklären, dass der MPP-Kanal im Durchschnitt über den längeren Testzeitraum etwas harmloser ist (signal2 10 Sekunden, signal1 ist 56 Sekunden lang).

Tabelle 7: Wiedererwerbstest.

Fall	Kanal	EbNodB	SNR	Verlust
signal1	AWGN	100.0	3.6	0.083
signal2 gefolgt von signal1	AWGN	100.0	3.6	0.083
signal1	AWGN	10.0	3.6	0.134
signal2 gefolgt von signal1	AWGN	10.0	3.6	0.135
signal1	MPP	10.0	3.6	0.181
signal2 gefolgt von signal1	MPP	10.0	3.6	0.102

2.6 Automatische Verstärkungsregelung (AGC)

ML-Netzwerke neigen dazu, über einen begrenzten dynamischen Bereich zu arbeiten, daher ist ein AGC erforderlich. Das Skript *./comply-Modelle inf.sh -p 260830 inf* wurde verwendet, um Verlust-gegen-SNR-Kurven für die ersten drei unten folgenden AGC-Bedingungen zu erzeugen, und *./comparte-Modelle inf.sh -p 260831 inf* für den vierten (in Abbildung 3 dargestellt) auf dem Worst-Case-MPP-Kanal:

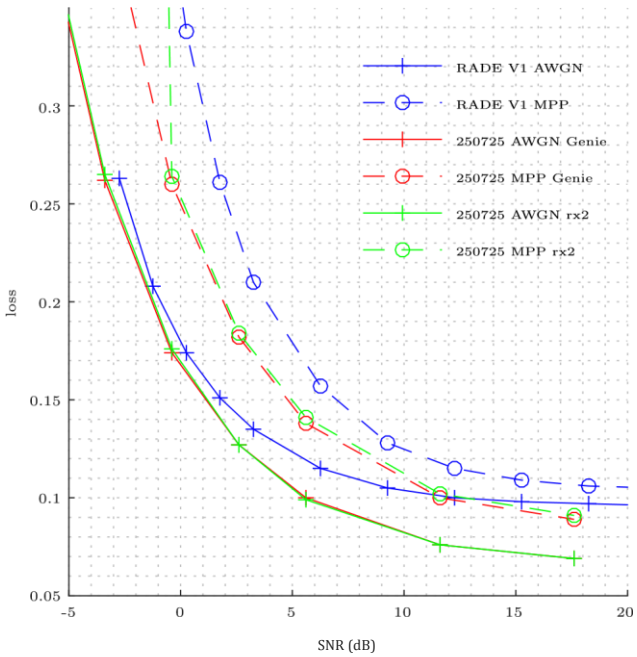
1. Baseline ohne AGC.
2. AGC mit +20 dB Verstärkung (lineare Verstärkung von 10).
3. AGC mit -20 dB Verstärkung (lineare Verstärkung von 0,1).
4. AGC aktiviert mit 0 dB Verstärkung (lineare Verstärkung von 1,0) mit drei verschiedenen Verzögerungen (Timing-Offsets).

Dieser Abschnitt (Abbildungen 3, 4 und Tabelle 8) wurde am 1. September 2026 mit *radae* commit 73f7183 und *rade_c* commit 6d89585 regeneriert, beide später als die Kampagnenkonfiguration in Tabelle 5.

Die AGC-Kurven stimmen mit der Basiskurve überein, was darauf hinweist, dass AGC einen geringen Einfluss auf die Leistung über eine Bandbreite von Gewinnen und Timing-Offsets hat. Tabelle 8 zeigt Ergebnisse für einen fein abgeschnittenen Verlustdurchgang gegen Verzögerung bei einem hohen SNR, um zu bestätigen, dass der aus dem Verifikationsverfahren erzielte Verlust unempfindlich gegenüber beliebigen Timing-Offsets in Echtzeitsystemen ist.

Der AGC-Betrieb ist auf ±20 dB ab dem nominellen Spitzenwert von $A = 1$ begrenzt. 0 oder 0. $1 < A < 10$. 0 . Daher kann ein manueller Verstärkungsterm erforderlich sein, um von einem typischen Spitzenpegel von ±215, wie es bei Einsätzen üblich ist, auf den Bereich 0 zu skalieren. $1 < A < 10$. *0 am Eingang des V2-Empfängers. Was die RMS-Pegel angeht, hätten wir bei einem 3 dB PAPR gerne Arms = 0*. 707 am Empfängereingang.

Abbildung 1: Verlust versus SNR und PNR für verschiedene RADE V1 und RADE V2 mit und ohne Schätzer.



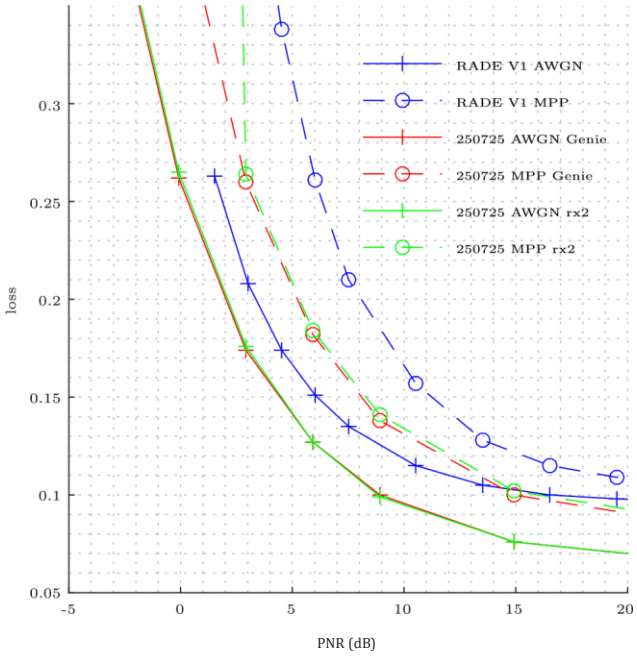
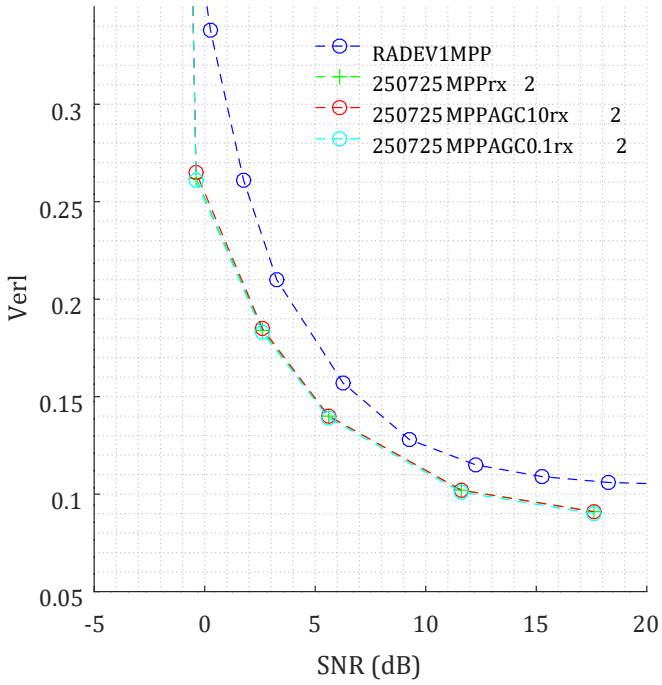


Abbildung 3: Verlust versus SNR für verschiedene AGC-Bedingungen.



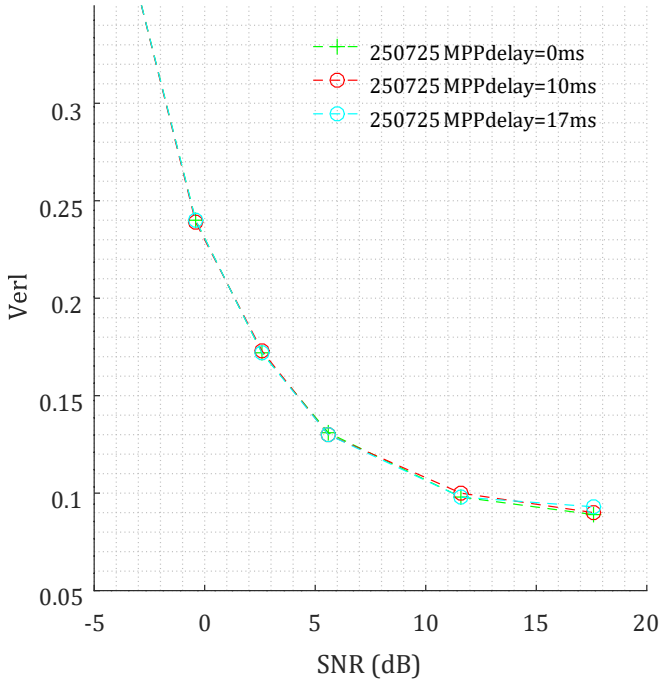


Abbildung 4 und Tabelle 8 wurden erstellt mit:

PY_OPTS="--agc" RESULTS=v2_delay_loss.txt PLOT=v2_delay_loss ./test/v2_c_timing.sh 0 0,04 40

Abbildung 4:

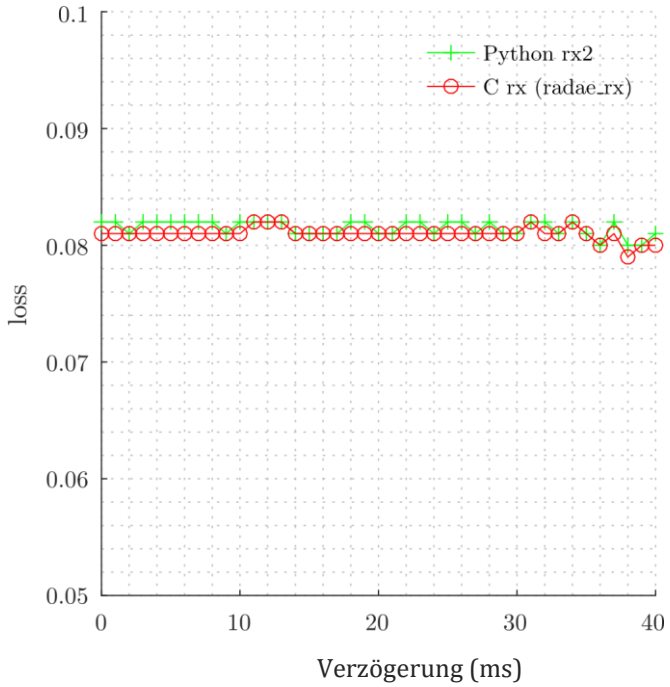


Tabelle 8: Verlust-gegen-Timing-Verzögerung, EbNodB=100 (AWGN, effektiv kein Kanalrauschen), Wav/all.wav, 0-40ms Sweep (41 Punkte, umfasst mehr als zwei Symbolperioden, *M* = 128 Stichproben = 16 ms).

Empfänger	Min Loss	Maximaler Verlust	Mittlerer Verlust	Std Dev
Python (rx2.py)	0.080	0.082	0.0815	0.0006
C (radae rx –v2)	0.079	0.082	0.0810	0.0005

2.7 Beispieltests für Takt- und Frequenzdrift

Ein Tx/Rx-Taktversatz von ±25 ppm (z. B. *Fs* = 8000 Hz am Tx und *Fs* = 8000. 2 Hz am Rx) wurde über die 56 Sekunden *all.wav* Probe getestet. Es wurde keine signifikante Veränderung des Verlustes beobachtet und der Empfänger blieb synchron. ./test/v2_spot.sh --sample_clock_offset 7999,8 --write_Ry_smooth Ry_smooth.c64

--write_delta_hat delta_hat.f32 --pad_samples 120

Es wurde ein Rx-Frequenzverschiebungsabweichen bei -5 Hz pro Minute getestet. Es wurde keine signifikante Veränderung des Verlustes beobachtet und der Empfänger blieb synchron.

```
delta=0.02 ./test/v2_spot.sh --g_file g_mpp.f32 --EbNodB 10 --df_dt -0.1
```

2.8 Ende der Übererkennung

Dieser Abschnitt beschreibt die End-of-Over-(EOO)-Systemleistung. Wenn die Übertragung kurz vor dem Ende steht, wird ein spezieller EOO-Frame gesendet, der den Empfänger anweist, die Dekodierung sofort einzustellen. Dies verhindert, dass am Ende einer Übertragung unerwünschte empfangene Signale und unerwünschte "R2D2"-Töne aus dem Decoder kommen. Das Designziel ist ein zuverlässiger Betrieb in gutartigen Kanälen mit hohem SNR. Bei schlechten Kanälen (z. B. niedrigem SNR-MPP) ist es akzeptabel, eine geringere EOO-Erkennung zu haben, da das Clean End of Over-Verhalten im Anwendungsfall mit niedrigem SNR eine sekundäre Anforderung ist. In allen Kanälen wird der Katerzähler in der Empfängerzustandsmaschine nach einigen Sekunden die Dekodierung eingestellt, falls der EOO-Rahmen nicht erkannt wird.

Das *Skript eoo detect prob.sh* erzeugt N = 20 x 9 Sekunden Dauerproben (extrahiert aus *all.wav*), die jeweils in einem EOO-Frame enden und über *tx2.py* → *Kanal* → rx2.py *übertragen werden*, sodass sowohl Payload als auch EOO-Frame tatsächlich vom Kanal ausgefadet und gefiltert werden (eine frühere Version dieses Tests hat einen ausschließlich für AWGN bedachten EOO-Tail auf den Kanalausgang eingeschnitten, sodass Multipath-Fading den EOO-Rahmen nie tatsächlich erreichte – siehe Ausgabe #1). Die Anzahl erfolgreicher EOO-Detektionen wird gezählt, um die EOO-Erkennung für jede Bedingung zu bestimmen. Die Dauer von 9 s wird gewählt, um sicherzustellen, dass sich die Ausrichtung zwischen *all.wav* und *g mpp.f32 verschiebt,* während die Versuche modulo um jede Datei rotieren. Die AWGN-Detektionswahrscheinlichkeit sinkt stetig von 65 % bei 4,3 dB SNR auf 5 % bei 0,3 dB SNR; MPP ist bei vergleichbarem SNR schwächer und sinkt von 55 % bei 8,3 dB SNR auf 10 % bei 2,3 dB SNR, da gelegentlich ein echter Fade auf dem EOO-Frame selbst landen kann.

Tabelle 9: Ende-of-Over-Detektionswahrscheinlichkeit über N = 20 Studien

Kanal	SNR3k (dB)	P(detect)
AWGN	80.3	0.95
AWGN	4.3	0.65
AWGN	2.3	0.40
AWGN	0.3	0.05
MPP	80.3	0.85
MPP	8.3	0.55
MPP	5.3	0.25
MPP	2.3	0.10

Das Skript *eoo_false_prob.sh* zählt, wie oft das EOO-Erkennungssystem einen EOO-Frame erkennt, wenn keiner vorhanden ist (falsche Erkennung), z. B.

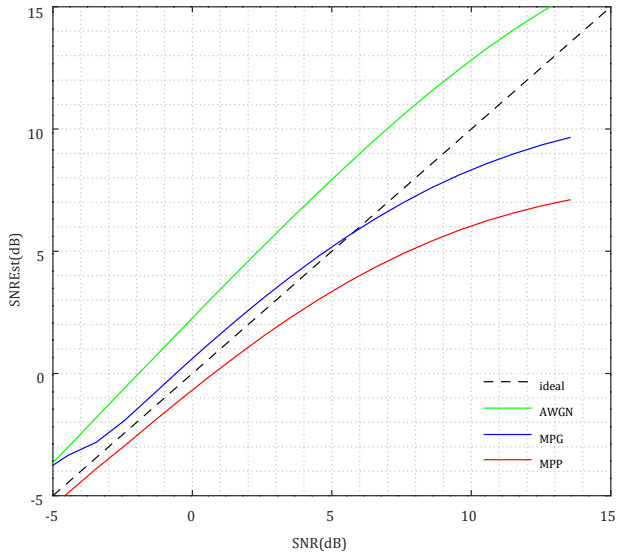
aufgrund der regulären V2-OFDM-Symbole der Nutzlast, die einem EOO-Frame ähneln. Dies ist unerwünscht, da der Empfänger die Dekodierung mitten im Over aufhören würde und erneut abrufen müsste. Die längste getestete Quelldatei wurde *bei 540 Sekunden bei 540 Sekunden librispeech.wav (für ASR-Tests verwendet) ohne Fehlerkennungen. Bei* N *= 20 Versuchen wurden auf* all.wav bei 4,4 dB SNR über AWGN oder 5,4 dB SNR über MPP keine falschen Erkennungen beobachtet. Beispiel-Befehlszeilen:

```
./test/eoo_detect_prob.sh --Kanal-MPP --Nr. -25
./test/eoo_false_prob.sh
```

2.9 SNR-Schätzer

Abbildung 5 veranschaulicht die Leistung des SNR-Schätzers. Die SNR-Schätzung für RADE V2 ist aufgrund des Fehlens von Pilotsymbolen herausfordernd. Der verwendete Algorithmus basiert auf der Autokorrelation zyklischer Präfixe und funktioniert gut für AWGN-Kanäle, doch die Genauigkeit leidet unter Mehrpfadkanälen. Eine gerade Linienkorrektur wurde angewendet, um den Fehler über drei gängige Kanäle im Bereich von -5 bis +5 dB zu minimieren. Sie ist am genauesten für langsam abblendende Kanäle (MPG).

Abbildung 5: Mittlerer geschätzter SNR im Vergleich zum tatsächlichen SNR für mehrere Kanäle mit Rauschen, gemessen in einer 3 kHz Bandbreite. Im Intervall von -5 bis +5 dB beträgt der RMS-Fehler 1,5 dB bei 2,8 dB im schlimmsten Fall.



Beispiel-Befehlszeile:

```
./test/snr_est_test.sh --Kanal-MPP | Tee snr_est_mpp.txt
```

2.10 Streaming-Text

Die RADE V2-Wellenform stellt ein 1 BPSK-Symbol/Bild (25 Bit/s) für Hilfstextinformationen wie Rufzeichen und Rasterquadrat bereit. Für Framing und Fehlerkorrektur ist eine externe Bibliothek erforderlich. Tabelle 10 zeigt die unkodierte BER-Leistung des BPSK-Bitstreams. Die 49-Sekunden-Wellendatei *all.wav* wurde für die Quellsprache verwendet (insgesamt 1400 Bit).

Tabelle 10: BPSK-Bitfehlerrate (BER) für verschiedene Kanäle

Kanal	EbNodB	SNR (dB)	BER
AWGN	100	100	0.00
AWGN	10	3.5	0.01
AWGN	6	-0.5	0.047
AWGN	3	-3.5	0.103
MPP	100	100	0.005
MPP	10	4.5	0.035
MPP	6	-0.5	0.086
MPP	3	-3.4	0.136

Ein moderner FEC-Code kann Fehler im Bereich von mehreren Prozenten korrigieren und bei etwa 10 % BER ausbrechen. Das deutet darauf hin, dass eine zuverlässige Textübertragung auf AWGN-Kanälen bis etwa -3 dB und bei Fading-Kanälen bis zu 0 dB erfolgen kann. Es ist akzeptabel, wenn die Textübertragung bei sehr niedrigen SNRs ausfällt, da wir Sprache bei niedrigen SNRs bevorzugt würden. Die Textinformationen werden meist wiederholt, daher ist es nicht notwendig, jeden codierten Textrahmen zu empfangen; selbst eine gelegentliche Dekodierung eines Textrahmens wäre über mehrere Minuten hinweg akzeptabel.

3 Phase B – Erste terrestrische Tests

Dieser Abschnitt beschreibt erste OTA-Tests mit dem gespeicherten Dateitestsystem, das vom *Skript OTA test.sh implementiert wurde*. Diese wurden vom Autor durchgeführt. Ziel dieser Tests war (a) zu prüfen, ob RADE V2 tatsächlich über reale HF-Kanäle funktioniert, (b) V2 mit RADE V1 zu vergleichen, um festzustellen, ob es bei niedrigen und hohen SNRs eine Verbesserung gibt. Die oben dargestellten simulierten Ergebnisse sagen bei niedrigen SNRs eine Steigerung der Sensitivität um 3 dB voraus. Bei hohen SNRs ist der ML-Netzwerk-"Verlust" für V2 deutlich geringer, aber wir sind uns nicht sicher, was das in Bezug auf Sprachqualität bedeutet.

Das *OTA test.sh* Skript erzeugt eine Datei, die aus einem Chirp besteht – SSB RADE V1 – RADE V2 in der Reihenfolge. Dieser wurde von der Heimatstation des Autors (IC7200-Sender) an verschiedene KiwiSDRs in ganz Australien übertragen. Der Chirp wird verwendet, um die SNR des Kanals zu schätzen, und SSB sowie RADE V1 werden zum Vergleich enthalten. Indem alle 4 Signale

ungefähr zur gleichen Zeit gesendet werden, gehen sie über ungefähr denselben HF-Kanal. Zusätzlich wurden mehrere Tests "Over The Cable" (OTC) durchgeführt – mit einem lokalen (FT817) Empfänger, der über Dämpfer und Kabel mit dem Sender verbunden war – und so einen "perfekten" Kanal bereitgestellt wurde. Im März 2026 wurden insgesamt 17 Tests durchgeführt. In jedem Fall funktionierte RADE V2 gut auf echten HF-Kanälen und unterstützte damit das obige Funktionstestziel (a). Ausgewählte Sprachproben sind hier verfügbar.

Es kann schwierig sein, feine Unterschiede in Sprachproben mithilfe von Ad-hoc-Hörtests zu erkennen. Um dieses Problem zu beheben, misst die OTA-Testsoftware den "Verlust" zwischen den Vocoder-Funktionen am Eingang des RADE-Encoders und dem Ausgang des RADE-Decoders. Tabelle 11 ist eine Tabelle mit dem "Verlust" für eine Auswahl von OTA- und OTC-Proben. Es ist zu sehen, dass die RADE V2-Samples beim Senden über denselben Kanal (nahezu zur gleichen Zeit) einen gleichen oder geringeren Verlust erzielen als RADE V1, was die oben genannten Simulationsergebnisse unterstützt.

Tabelle 11: Verlust für verschiedene Proben aus der OTA-Testkampagne. Die "Software"-Spalten sind der Verlust ausschließlich durch Softwarekodierung, vor der Übertragung über den Kanal. Ein perfekter Kanal (wie v216) erreicht diese Verlustwerte sehr nahe.

Beispiel	Sprecher	V1-Software	V2-Software	Kanal	V1 OTA	V2 OTA
v208	David	0.102	0.077	NVIS	0.132	0.132
v209	David	0.102	0.077	NVIS	0.141	0.125
v211	David	0.102	0.077	DX	0.520	0.154
v216	Brian	0.115	0.086	OTC	0.123	0.096
v217	Brian	0.115	0.086	DX	0.311	0.198

Die OTC-Tests (z. B. v216) zeigen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Verlustmetrik und zeigen, dass die Signalverarbeitung über zwei typische HF-Radios (USB-Soundhardware, SSB-Filter, PA, Up- und Down-Konversion) nur sehr wenig Einfluss auf die RADE-Wellenformen hat. Dies legt nahe, dass Verlustmessungen als Kennzahl für die "Typgenehmigung" der RADE-Integration verwendet werden können, z. B. mit SDR, Endanwenderanwendung oder Hardwarefunk.

4 Phase C – Crowdsourcing-Save-File OTA-Tests

Dieser Abschnitt beschreibt die Testergebnisse, die aus der Crowdsourcing-Savedatei-OTA-Testkampagne gesammelt wurden. Die Ziele dieser Testkampagne waren:

1. Weitere gespeicherte Datei-OTA-Proben sammeln, um die Ergebnisse von Phase A & B zu unterstützen, jedoch aus einer breiteren Bandbreite an Lautsprechern, HF-Kanälen und Funkhardware.

2. Wenn Gegenbeispiele zu den Ergebnissen von Phase A & B auftreten, untersuchen und beheben Sie Fehler, falls vorhanden.

3. Messungen von PAPR von anderen Funkgeräten und Testgeräten.

4. Falls vorhanden, erkunde das Artefakt der "Unterwasser"-Stimmenmodulation, das oft auf V1-Samples zu hören ist, die in sozialen Medien gepostet werden.

5. Proben aus Echtzeit-PTT-Nutzung von RADE V2 sammeln, wenn es in Drittanbieter-Anwendungen oder Funkgeräte integriert wird.

6. Sammeln Sie Erfahrung bei Drittanbietern bei der Integration und Überprüfung des RADE V2-Betriebs in ihrer Anwendung/Funkfunktion. Nutzen Sie diese Informationen, um das Integrations- und Verifizierungsverfahren zu verbessern.

Lizenzierte Amateurfunker aus aller Welt wurden eingeladen, eine 10–60 Sekunden lange Eingabeprobe ihrer eigenen Stimme aufzunehmen. Diese wurde in eine RADE V1- und V2-Wellenformsample umgewandelt und mit einer Hilbert-komprimierten Version desselben Eingangssamples kombiniert, um ein analoges SSB-Signal mit einem 6-8 dB PAPR zu emulieren. Die Teilnehmer spielten dann die verkettete Probe über ihre SSB-Sender über reale HF-Funkkanäle an entfernte KiwiSDR-Empfänger ihrer Wahl (KiwiSDRs sind SSB-Funkempfänger, die mit dem öffentlichen Internet verbunden sind). Das empfangene Off-Air-Signal wurde verarbeitet, um eine Datei mit SSB- und RADE-Ausgangssprachproben sowie eine Schätzung des SNR des Kanals zu erhalten. Die Verwendung gespeicherter Dateien ermöglichte es, dasselbe Tx-Signal unter unterschiedlichen Kanalbedingungen und unterschiedlichen Sendeleistungsstärken an verschiedene KiwiSDR-Empfänger zu übertragen. Das *ota-test.sh-Skript* führte die Tx- und Rx-Verarbeitung mit der referenzbasierten Python-Implementierung von RADE V2 durch. Der Bequemlichkeit halber wurde dies so konfiguriert, dass es von einem Webserver aus ausgeführt wurde.

Die Verfahren für gespeicherte Dateitests sind hier dokumentiert.

Zu den eingereichten Beispielen gehörten das an den RADE-Encoder eingespeiste Quellaudio sowie das empfangene Off-Air-Signal. Die Idee ist, genügend Informationen zu haben, um die Ergebnisse zu reproduzieren (z. B. durch den RADE-Decoder) und den Verlust im Vergleich zu einer Softwaresimulationsreferenz zu messen. Sie wurden auf dem FreeDV-Projekt-Shared-Laufwerk archiviert.

Tabelle 12 fasst die Testergebnisse zusammen. Insgesamt wurden 58 Proben entnommen. Besonderer Dank gilt Rick W7YC, Kanda JH0PCF (lange Proben), Yuichi JH0VEQ und Take JS1MAV für Ihre Proben.

Tabelle 12: Testergebnisse der Phase C

Ziel	Ziel	Tatsächlich
Anzahl der entnommenen Proben	20	58
Anzahl der Sprachen	3	3
PAPR-Messungen	3	1

Wir erreichten das Ziel erfolgreicher funktionaler Tests über verschiedene Sprachen, Funkgeräte und HF-Kanäle hinweg, ohne Gegenbeispiele zu den Phase-A- & B-Ergebnissen. Es wurden keine Beispiele für einen vollständigen Zusammenbruch von V2 gefunden, wenn V1 funktionierte. Diese Tests legten das funktionale Ziel fest, zu zeigen, dass RADE V2 (klassische DSP- und ML-Subsysteme) über reale HF-Kanäle funktioniert. Die Teilnehmer wurden gebeten, jede Stichprobe und eine einfache binomische Tabelle 13: Subjektive Rangfolgeergebnisse (n = 58, 1=beste, 3=schlechteste) zu bewerten.

	Mittel Rang	Std	vsSSB	
			Sieg / Niederlage / Unentschieden	p
SSB	3.00	0.00	—	—
V1	1.48	0.50	58 / 0 / 0	< 0.001
V2	1.33	0.47	58 / 0 / 0	< 0.001
V2 vs V1			28 / 19 / 11	0.12

Angewandter statistischer Test (Tabelle 13). Es gab eine klare Präferenz sowohl für RADE V1 als auch für V2 gegenüber SSB ($p < 0.001$), allerdings erreichte die Präferenz für V2 gegenüber V1 keine statistische Resignifikanz ($p = 0.12$). Dieses Ergebnis ist zu erwarten; ein Unterschied von 3 dB ist für das menschliche Ohr schwer zu erkennen, insbesondere gegenüber realen nicht-stationären HF-Kanälen. Innerhalb statistischer Grenzen entspricht die Rangfolge den oben genannten Simulationsergebnissen. Es wurden keine Hinweise (weder in V1- noch in V2-entschlüsselten Samples) für das "Unterwasser"-Sprachmodulationsartefakt gefunden, das zuvor auf YouTube-Samples von RADE V1 zu hören war.

Es wurde nur eine PAPR-Messung eingereicht (Tabelle 14, danke Take). Diese erfolgte auf dem Basisbandsignal mit Audacity und stimmte mit den Simulationsergebnissen überein. Als weitere Arbeit wäre es sinnvoll, PAPR-Messungen am PA-RF-Ausgang zu erhalten.

Tabelle 14: PAPR-Ergebnisse der Phase C aus Take

	CHIRP	SSB	RADE V1	RADE V2

	0	7	4.20	3.50
PEAK	-6.02	-6.02	-6.02	-6.02
RMS	-9.03	-18.29	-12.66	-12.26
PAPR(dB)	0.00	9.26	3.63	3.23

5 Phase D – Echtzeit-PTT-OTA-Tests

Dieser Abschnitt beschreibt die Testergebnisse, die aus der crowdsourceten PTT OTA-Testkampagne gesammelt wurden. Die Ziele dieser Testkampagne waren:

1. Funktionales Testen von RADE V2 OTA in PTT-Gesprächen in der realen Welt. Es sollte erfassen, synchronisieren und dekodieren, ohne größere Fehler wie Abstürze oder verzerrte Sprache.

2. Erfolgreiche Integration der 40-ms-Verzögerung, zum Beispiel keine Klicks im Audio (kurze Puffer können die Soundtreiber belasten) sowie die Bewertung der PTT-Umlaufzeit im Vergleich zu RADE V1 (180ms).

3. Sammeln Sie Erfahrung bei Drittanbietern bei der Integration und Verifizierung des RADE V2-Betriebs in ihrer Anwendung/Funkanlage (z. B. Software und Tests über Kabelverluste). Nutzen Sie diese Informationen, um das Integrations- und Verifikationsverfahren zu verbessern.

4. Sammeln Sie weitere Beispiele für Off-Air-empfangene Signale und decodierte V2-Sprache, um die vorherigen Testergebnisse zu unterstützen, jedoch in Echtzeit aus verschiedenen Lautsprechern, HF-Kanälen und Funkhardware.

5. Wenn bei verifizierten *Integrationen Probleme auftreten*, erkunden und beheben Sie Fehler.

6. Messungen von PAPR am PA-Ausgang und Vergleich mit Simulation.

7. Falls vorhanden, erkunde das Artefakt der "Unterwasser"-Stimmenmodulation, das oft auf V1-Samples zu hören ist, die in sozialen Medien gepostet werden.

8. Es fällt nicht in den Anwendungsbereich dieser Testphase, die Sprachqualität zu bewerten (z. B. im Vergleich zu V1 oder SSB), da keine Möglichkeit ist, kontrollierte Tests durchzuführen.

Das Testverfahren ist hier dokumentiert. Alle Ergebnisse müssen von einer Anwendung oder einem Funkgerät stammen, dessen RADE V2-Integration mit diesem Verfahren überprüft wurde . Alle Anwendungen, die an dieser Testkampagne beitragen, müssen in der Lage sein, eine empfangene Off-Air-Signal-Beispieldatei sowie eine decodierte V2-Sprachdatei zu exportieren.

Da Echtzeit-PTT-Stichproben keine Referenzdaten haben, kann der Verlust nicht gemessen werden, weshalb die Ergebnisse der Phase D qualitativ sind. Die Kampagne lief etwa drei Wochen. Tabelle 15 fasst die gesammelten Proben zusammen, die die Ziele nicht erreichten. Vielen Dank an alle teilnehmenden Hams und ein besonderer Dank an Rick W7YC, Yuichi JH0VEQ und Taku Kudo JK1GPC für ihre Proben.

Tabelle 15: Testzusammenfassung der Phase D.

Ziel	Zielproben	Gesammelte Proben
Anzahl der zu entnehmenden OTA-Proben	20	12
Anzahl der Sprachen	3	2
PAPR-Messungen	3	2

Die Ergebnisse gegen jedes Tor waren:

1. Funktionale Tests: Fünf Tester meldeten über Gespräche mit vielen anderen Stationen einen Bestand, und es wurden keine Fehler gemeldet. Einige Tester verwendeten Thetis, eine Integration, die nicht verifiziert wurde, mit ähnlichen Ergebnissen wie freedv-gui.

2. 40 ms Verzögerung und PTT-Umdrehung: Rick W7YC meldete gute PTT-Umlaufzeiten, schneller als RADE V1, einschließlich schneller Tx/Rx-Umschaltvorgänge über einen 66 km langen NVIS-Pfad mit flachem und frequenzselektivem Fading. Es wurden keine Probleme wie Audioklicks gemeldet.

3. Drittanbieter-Integration: Integration und Verifizierung von freedv-gui und FreeDV Neo (intern im FreeDV-Projekt) fand Fehler in V2 und half bei der Anpassung des Verifikationsverfahrens. Es wurden keine Drittanbieter-Anwendungen verifiziert.

4. Off-Air-Proben: Rick W7YC lieferte Proben aus mehreren Funkgeräten (Flex, IC-7300, IC-7100) auf 20 und 80 m, darunter 2 bis 200 W-Signale, die von entfernten WebSDR- und KiwiSDR-Empfängern empfangen wurden, sowie zweiseige Kontakte. Yuichi JH0VEQ und Taku Kudo JK1GPC lieferten japanischsprachige Beispiele. Die entschlüsselten Proben stimmten mit den vorherigen Testergebnissen überein.

5. Probleme: Ein Problem wurde festgestellt, eine falsche Synchronisation, wenn der Abstimmungsfehler den ±32-Hz-Bereich des V2-Frequenzversatz-Schätzers übersteigt. In Yuichis Japan–Australien-Sample wurde ein +44-Hz-Abstimmungsfehler auf −18 aliased. 5 Hz und V2 synchronisierten sich

sicher auf der falschen Frequenz, wodurch verzerrte Sprache entstand, während V1 dasselbe Signal decodierte. Nach der Korrektur des Frequenzabsatzes in der Software wurden die V2-Samples erfolgreich decodiert. Dies ist ein Randfall, der eine kleine Anzahl von Kontakten betrifft. Es befindet sich im klassischen DSP, daher würde eine Reparatur die Kompatibilität nicht unterbrechen (keine Neuaufbereitung).

6. PAPR: Taku JK1GPC und Babis SV1UH lieferten nach der Kampagne PAPR-Messungen, siehe Abschnitt 5.2.

7. "Unterwasser"-Artefakt: Einige von Ricks Proben könnten Beispiele dieses Artefakts enthalten, die eigentliche Ursache ist jedoch noch unbekannt. Simulationen deuten darauf hin, dass es vom Sprecher abhängig sein könnte, aber die Ergebnisse sind nicht schlüssig. Bemerkenswert ist, dass der betreffende Operator die RADE-Sprachqualität als sehr gut beschrieb.

Abgesehen von dem Fall der Frequenzversatz-Falsch-Synchronisation kommen wir zu dem Schluss, dass RADE V2 für reale PTT-OTA-Gespräche funktioniert.

5.1 Gemessene belegte Bandbreite

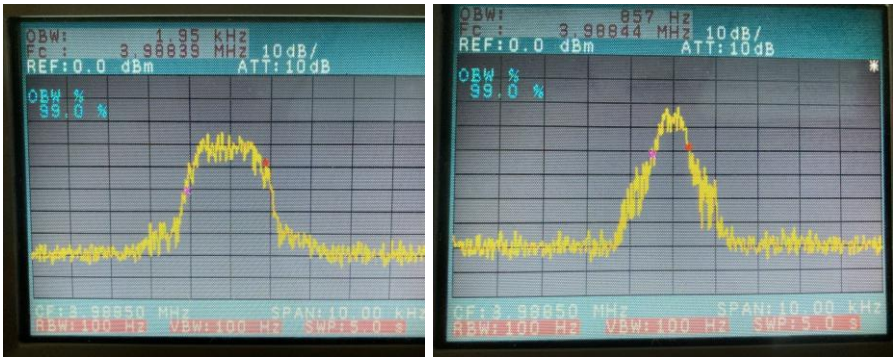
Obwohl dies nicht zu den Zielen der Phase D gehörte, maß Rick W7YC unabhängig die 99 % leistungsbezogene Bandbreite (OBW) der übertragenen RADE V1- und V2-Signale mithilfe eines Advantest U3641-Spektrumanalysators (Abbildung 6). Die Signale wurden auf 80 m von einem IC-7300 mit einem 2000 Hz (500–2500 Hz) Sende-SSB-Filter übertragen. Die Analysatoreinstellungen waren 10 kHz Spannweite, 100 Hz Auflösung und Videobandbreite sowie ein 5 Sekunden langer Sweep. Mehrere Läufe variierten leicht, aber nicht signifikant.

Tabelle 16 vergleicht die Messungen mit den simulierten Ergebnissen in Tabelle 4. Wie erwartet wird der RADE V1 OBW durch die Bandbreite des Transmit-SSB-Filters bestimmt, der etwas schmaler ist als der simulierte SSB-Filter. Die RADE V2-Messung entspricht der Simulation nahe. Der OBW variiert leicht je nach Ausgangsmaterial (z. B. verschiedener Lautsprecher) und der Mittelzeit.

Tabelle 16: Gemessene und simulierte 99 % belegte Bandbreite.

Wellenform	Gemessenes OBW (Hz)	Simuliertes OBW (Hz)
RADE V1	1950	2109
RADE V2	857	867

Abbildung 6: Gemessen 99 % OBW von RADE V1 (links, 1,95 kHz) und RADE V2 (rechts, 857 Hz), übertragen von einem IC-7300, mit freundlicher Genehmigung von Rick W7YC.



5.2 Gemessener PAPR

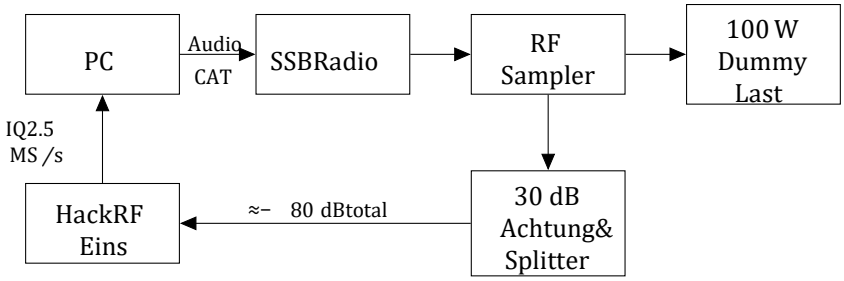
Nach der Kampagne maßen Taku JK1GPC und Babis SV1UH den PAPR des übertragenen V2-Signals, indem sie das RF mit einem SDR sampelten, was die Messungen in diesem Abschnitt auslöste (auch Dank an Take JS1MAV, Helmut DC6NY und Rick W7YC für die Diskussion). Ziel war es, den PAPR am PA-Ausgang realer SSB-Funkgeräte zu messen und die Effekte des Funkgeräts von der Wellenform zu trennen.

Abbildung 7 zeigt die Testkonfiguration. Das Testsignal wurde *mit David vk5dgr.wav* (11,6 Sekunden) mit rade_tx wav --v2 moduliert, mit aplay in die USB-Audioschnittstelle des Funkgeräts abgespielt, das Radio im Datenmodus (LSB-D) bei 7,175 MHz, der Sprachkompressor des Funkgeräts ausgeschaltet und die HF-Leistungsregelung auf Maximum. Die Antriebspegel wurde durch die Audiopegel eingestellt. PTT und die Geräte des Funkgeräts (Leistung, ALC, SWR, Versorgungsstrom) wurden gesteuert und über CAT mit Hamlib protokolliert. Ein RF-Sampler, Dämpfer und Splitter stellten ≈ 80 dB Kopplung zu einem HackRF One bereit

(Hackrf-Übertragung_-f 7100000 -s 2500000 -A 0 -L 32 -g 20), wobei der Eingang bei 100 W unter −25 dBm gehalten wurde. Die Kupplung wurde mit einem Tracking-Generator kalibriert, und die absolute Leistung ist auf etwa ±0 genau. 5 dB. Zwei 100-W-Funkgeräte wurden getestet, ein IC-7200 und ein IC-7300.

Die IQ-Proben wurden auf das Basisband gemischt, auf 100 kHz dezimiert und das Band auf 4 kHz (Nullphase) begrenzt, zentriert auf das Signal. In der Simulation bleibt das PAPR für Messbandbreiten oberhalb von 1,6 kHz unverändert, und das gemessene SNR in 4 kHz betrug 46 bis 55 dB, genug, um den Rauschbeitrag zu PAPR unter dem Niveau zu halten

Abbildung 7: PAPR-Testsetup.



0,02 dB. Die erste Sekunde nach PTT wurde ausgeschlossen, da sich die Verstärkung beider Funkgeräte in diesem Zeitraum um etwa 1 dB stabilisierte. Zur Überprüfung maß bei Vollantrieb ein einzelner Ton 0,06 dB PAPR (ideal 0 dB), und ein Zweitonsignal lag innerhalb von 0,1 dB vom idealen 3,01 dB. Die Aufnahmen waren zudem zeitlich mit dem gesendeten Signal ausgerichtet, sodass wir die AM-AM- und AM-PM-Antwort des Funkgeräts messen und die aufgenommenen Signale decodieren konnten, um den Verlust zu messen.

Tabelle 17 listet die für diese Tests verwendete Konfiguration auf.

Tabelle 17: Konfiguration für PAPR-Tests.

Datum	November 2026
RADE Tx	rade c rade tx wav --v2, git 54613bb (signal identisch mit dem haupt-4a31f25)
Verlustmessung	radae loss.py, git e5d4c15
ML-Encoder/Decoder	250725
Testsignal	*David _vk5dgr.wav*, 11,6 s
SDR	HackRF One, hackrf-Transfer git-1408473
Funksteuerung	Hamlib 4.3.1 Richtig

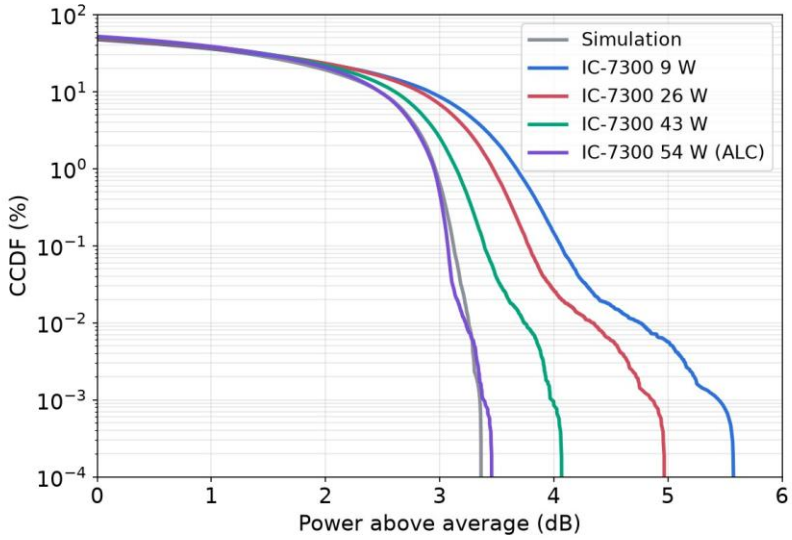
Tabelle 18 fasst die Ergebnisse zusammen, mit PAPR-Werten von 100 % CCDF (Spitzen) und 0,1 % CCDF, die von niedriger bis hoher Leistung reichen. Abbildungen 8 und 9 zeigen die IC-7300 CCDF- und AM-AM-Ergebnisse bei vier Leistungsstufen.

Tabelle 18: Gemessener PAPR von RADE V2 bei 100 % und 0,1 % CCDF, von niedriger bis hoher durchschnittlicher Leistung.

Quelle	Sender	Leistung (W)	100% (dB)	0,1 % (dB)
Sim. *all.wav*	-	-	3.48	3.06
Sim. *David vk5dgr.wav*	-	-	3.36	3.12

Taku JK1GPC	IC-7300MK2	10 - 80	5.5 - 4.5	-
Babis SV1UH	-	0.5 - 60	8.4 - 6.5	5.3 - 4.6
Dieses Werk	IC-7200	7 - 44	5.0 - 3.5	4.2 - 3.2
Dieses Werk	IC-7300	8 - 54	5.6 - 3.5	4.1 - 3.1

Abbildung 8: Gemessener CCDF des IC-7300 RADE V2-Signals bei vier durchschnittlichen Leistungspegeln im Vergleich zur Simulation. Der PAPR ist die Leistung, bei der die Kurve auf die untere Achse trifft (100 % CCDF).



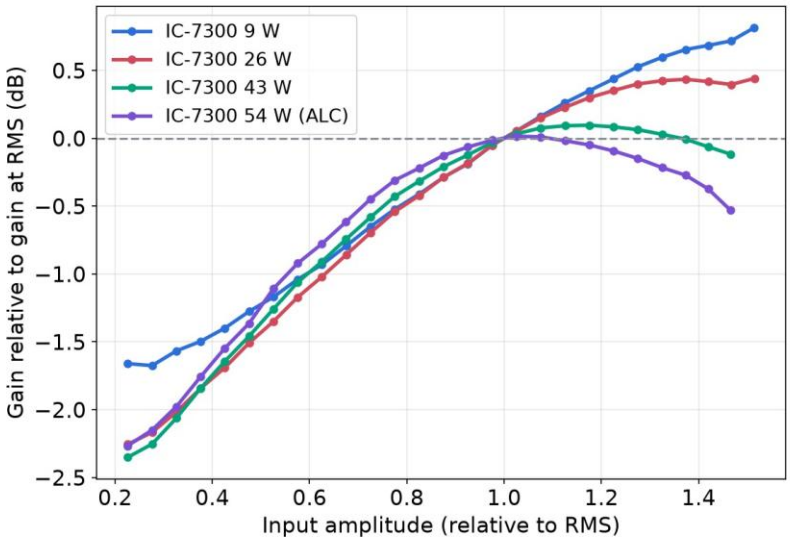
Unsere Ergebnisse waren:

1. Der gemessene PAPR fällt mit steigender Leistung ab, was mit Takus Ergebnissen übereinstimmt. Bei niedriger bis mittlerer Leistung zeigen beide Funkgeräte eine Verstärkungserweiterung (Abbildung 9), wobei die Verstärkung um ≈ 2 ansteigt. 5 dB von niedrigen Amplituden bis zu den Spitzen, was den PAPR um ≈ 1 dB erhöht. Nahezu bei voller Antriebsgeschwindigkeit komprimiert die PA die Spitzen, wodurch die Ausdehnung aufgehoben wird, und der PAPR nähert sich dem simulierten Wert. Die Sendefilterung der Funkgeräte fügt 0,2 bis 0,5 dB hinzu, und der AM-PM ist vernachlässigbar (< 2 ◦). Zwei-Tontests ergaben eine IMD dritter Ordnung von -23 bis -35 dBC, typisch für HF-SSB-Sender.

2. Mit 100 W Spitzenwerte und ohne ALC-Wirkung lieferten beide Funkgeräte eine durchschnittliche Leistung von 43 bis 45 W, also die Spitzenleistung abzüglich PAPR. Mit erhöhtem Antrieb, bis der ALC nur noch reagiert, lieferte der IC-7300 54 W und 59 W bei 6 dB in den ALC, mit leichtem ALC-"Pumpen" (≈ 1 dB Verstärkungsvariation).

3. Der Decoderverlust der erfassten Signale entsprach dem sauberen simulierten Signal auf allen Laufwerksniveaus (einschließlich 6 dB in den ALC) und allen getesteten SNRs. Zumindest bei diesen Funkgeräten erscheint RADE V2 unempfindlich gegenüber dem Laufwerkpegel. Ein einfaches Einrichtungsverfahren besteht darin, die HF-Leistungsregelung auf Maximum zu setzen und das Audiolaufwerk zu erhöhen, bis der ALC nur noch reagiert.

Abbildung 9: Gemessene AM-AM-Antwort des IC-7300 bei vier durchschnittlichen Leistungspegeln. Die steigenden Kurven zeigen eine Verstärkungsausdehnung; bei 43 und 54 W komprimiert die PA die Spitzen.



4. Zum Vergleich übertrug wir dieselbe Sprache wie SSB über den IC7300 bei derselben Spitzenleistung. Unkomprimiertes SSB lag im Durchschnitt bei 2 bis 4 W, das in unseren Simulationen verwendete Hilbert-komprimierte SSB (OTA test.sh) 21 bis 27 W, und die Stimme des Autors über das Mikrofon mit dem Icom-Sprachkompressor 12,5 W. RADE V2 liefert etwa 6 dB mehr Durchschnittsleistung als komprimiertes SSB in der realen Welt. Die SSB-Peaks überschritten zudem kurzzeitig den ALC-Einstellwert (117 bis 163 W), was eine Quelle von Spritzern war.

5. Babis hat mit einem SDRplay-Empfänger off-Air gemessen, daher umfassen seine Ergebnisse Rauschen und HF-Kanaleffekte, die dazu neigen, den gemessenen PAPR zu erhöhen.

6. PA-Heizung: Bei einer PA der Klasse B ist der Gleichstrom proportional zur HF-Amplitude *a* und die HF-Leistung zu *a2*, sodass die Dissipation

proportional zu $-a2\ ist$, die bei ≈ 0 ihren Höhepunkt erreicht . 64 der maximalen Amplitude. Bei einer PAPR von ≈ 3 dB beträgt die RMS-Amplitude von RADE V2 ≈ 0. 7 des Spitzenpunkts, nahe am schlimmsten Fall. Von der Versorgungsspannung und dem Strom des IC-7300 verteilte das Funkgerät 178 auf 190 W mit RADE V2 bei durchschnittlich 43 bis 59 W, verglichen mit 134 bis 141 W bei einem konstanten Träger von 89 bis 100 W. Wie bei anderen kontinuierlichen digitalen Modi belasten Longovers bei hoher durchschnittlicher Leistung die PA thermisch stärker als SSB-Sprache.

Empfehlungen für den Betrieb von RADE V2 mit einem SSB-Funkgerät:

1. Nutze den Datenmodus mit ausgeschaltetem Sprachkompressor, stell die RF-Leistungsregelung auf Maximum und erhöhe das Audio-Laufwerk, bis der ALC nur noch reagiert. Ein bisschen Überfahren kostet wenig.

2. Stellen Sie eine niedrigwiderstandsfähige Gleichstromversorgung und eine gute Übereinstimmung auf (z. B. prüfen Sie einen internen Tuner). Während dieser Tests wurden ein hochwiderstandsfähiger Gleichstromkabel (11 V am Funkgerät) und ein falsch abgestimmter interner Tuner (SWR 2:1, 2 dB Verlust) gefunden und behoben.

3. Erwarten ≈ 45 bis 55 % der angegebenen Spitzenleistung als Durchschnittsleistung und dass der Leistungsmesser des Funkgeräts schwankt. Die erste Sekunde jedes Over ist nicht repräsentativ, da sich die Verstärkung des Funkgeräts stabilisiert.

4. Für lange Übergänge sollte man die HF-Leistung reduzieren, um die PA-Heizung zu steuern. Die decodierte Sprachqualität ist bei guten Verbindungen nicht sehr empfindlich gegenüber Strom.

5. Weitere Arbeiten: Testfunkgeräte mit unterschiedlichen PA- und ALC-Designs (z. B. NonIcom, SDR-basiert).

6 Fazit

In Tabelle 19 werden die Ergebnisse aus Phase A, B, C und D zusammengefasst und mit Anforderungen verglichen, die aus FreeDV-038 extrahiert wurden. Es wurden nur Leistungs- und Funktionsanforderungen extrahiert (z. B. berücksichtigen wir keine Implementierungsprobleme wie einen C-Port oder eine Verpackung).

6.1 Weitere Arbeiten

Themen für zukünftige Entwicklung. Es könnte möglich sein, diese parallel zu Crowdsourcing-V2-Tests durchzuführen, da sie nur wenig Einfluss auf Kernanforderungen wie Sprachqualität und Robustheit haben.

1. Verkürzen Sie die Erwerbszeit für harmlose Kanäle.
2. Verbesserte EOO-Leistung bei niedrigeren SNRs.
3. Erweitern Sie den Bereich der Frequenzabsatzschätzung auf ±50Hz.

Tabelle 19: Testergebnisse im Vergleich zu Leistungsanforderungen

Anforderung	Met	Kommentar
Sprachqualität vs. SNR ≥ RADE V1 auf AWGN & MPP.	Pass	≈ 3 dB Verstärkung von V2/V1 in Simulationen, aber statistische Signifikanz in OTA-Tests nicht erreicht (erwartetes Ergebnis).
Behandelt den MPD-Kanal ohne Ausfall	Pass	
PAPR < 1 dB – durch einen typischen SSB-Bandpassfilter.	Teilweise	Diese Anforderung stellte sich als fehlerhaft heraus: Die PAPR von RADE V1 in der realen Welt lag > 4 dB. Wir haben mit V2 einen PAPR von ≈ 3 dB erreicht, also eine Verstärkung von 1 dB auf V1. Gemessen von 3,1 bis 3,5 dB am PA-Ausgang bei voller Antrieb.
OBW < 2000 Hz	Pass	V2 OBW wurde mit ≈ 860 Hz gemessen, also deutlich saubereres Spektrum.
Beispiel-Taktabweichungen ±125 ppm	Pass	Kein signifikanter Verlust bei ±125 ppm, Synchronisation und Dekodierung bei ±250 ppm.
Frequenzabweichungen ±50 Hz	Teilweise	Der aktuelle Algorithmus verarbeitet nativ ±32 Hz, es sollte möglich sein, dies mit weiterer Arbeit zu erweitern. Eine Phase-D-Probe mit einem Offset von +44 Hz verursachte eine falsche Synchronisation.
Reinigung der Übererkennung innerhalb von 100 ms	Pass	EOO funktioniert gut bei mittleren bis hohen SNRs.
25 Bit/s Streaming-Text für das Rufzeichen	Pass	Waveform kann 1 Bit/Frame über einen Kanal senden, der von einer externen Bibliothek unterstützt wird.

SNR-Schätzung	Pass	Fehler von 1,5 dB RMS (±maximal 3 dB) bei -5 bis +5 dB.