

Alle folgenden Messungen wurden an einem TRX-DUO mit der MAC 00-26-32-F0-02-C1 durchgeführt.

RX- und TX-Messungen

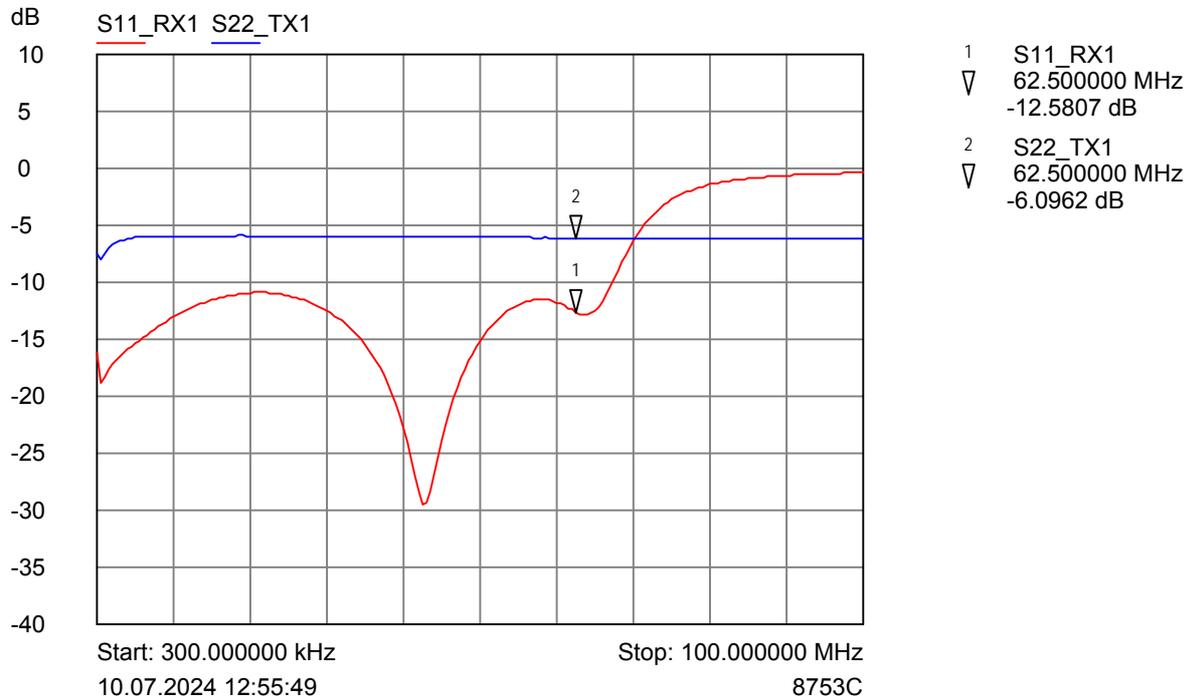


Bild 1 Reflexionsdämpfung am RX-Eingang und am TX-Ausgang

Die Messungen erfolgten mit -24dBm Pegel, um Übersteuerungen zu vermeiden. Sowohl die RX- als auch die TX-Ergebnisse sind unabhängig von der eingestellten Frequenz und Sendung bzw. Empfang. Am RX-Eingang bildet sich die Reflexionsdämpfung des internen Aliasing-Tiefpasses ab. Am TX-Ausgang ist ein solcher anscheinend nicht vorhanden (siehe auch spätere Sendermessungen).

Entkopplung TX1 zu RX2

Der TX1 wird mit Drive = 100% auf 29MHz mit 50 Ohm abgeschlossen betrieben. Das von RX2 am Spektrumdisplay angezeigte Signal wird mit dem aus einem Signalgenerator substituiert. Es wird eine Entkopplung von 80dB erreicht, was für den Betrieb mit einer TX-Vorverzerrung mehr als ausreichend ist.

Stromaufnahme aus 5V USB-Netzteil

Empfang mit RX1 1,3A, Sendung mit TX1 1,35A, Empfang mit RX1 und 2 1,3A

Sendermessungen

Spektrale Reinheit des Senders

In Bild 2 wird der TX auf 7,2MHz betrieben. In der ersten Nyquistzone (bis 62,5MHz) bleiben Ober- und Nebenwellen deutlich unter -70dB. Bei 125MHz-7,2MHz erscheint ein Aliassignal, das nur etwa 25dB gegenüber dem Nutzsignal gedämpft ist. Mit einem externen 55MHz-Tiefpass lässt sich das Problem beheben.

Bild 3 zeigt die gleiche Situation bei 29MHz. Das jetzt niederfrequenter Aliassignal bei Marker 2 ist nur noch ca. 11dB unterdrückt. Außerdem sind Nebenwellen hinzugekommen, die aber noch mit über 60dB unterdrückt sind.

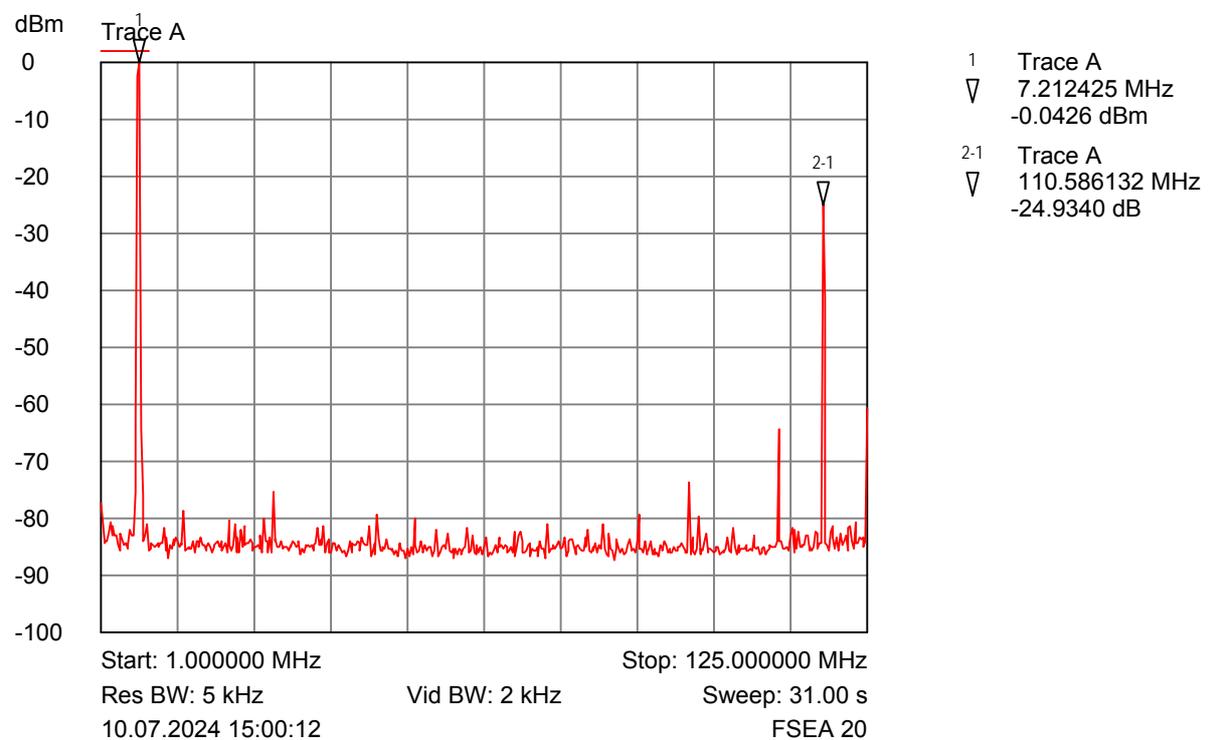


Bild 2 Tuning, Drive 100%, f=7,2MHz

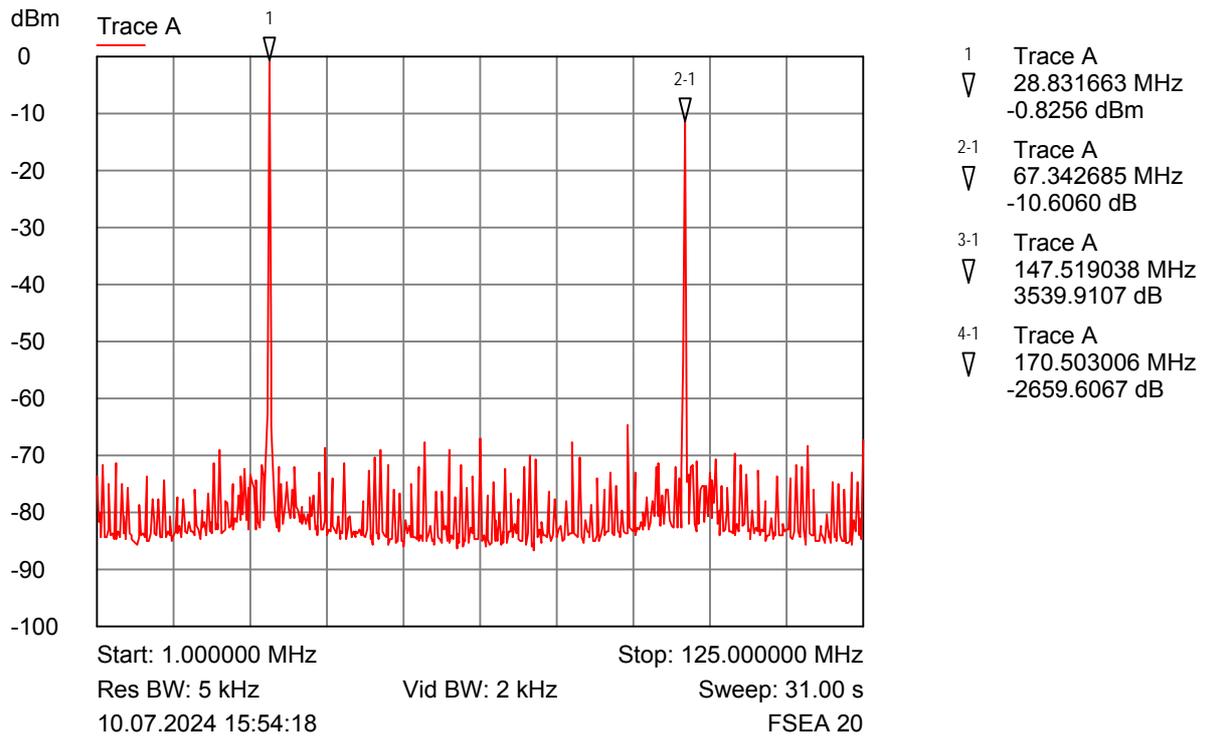


Bild 3 Tuning, Drive 100%, f=29MHz

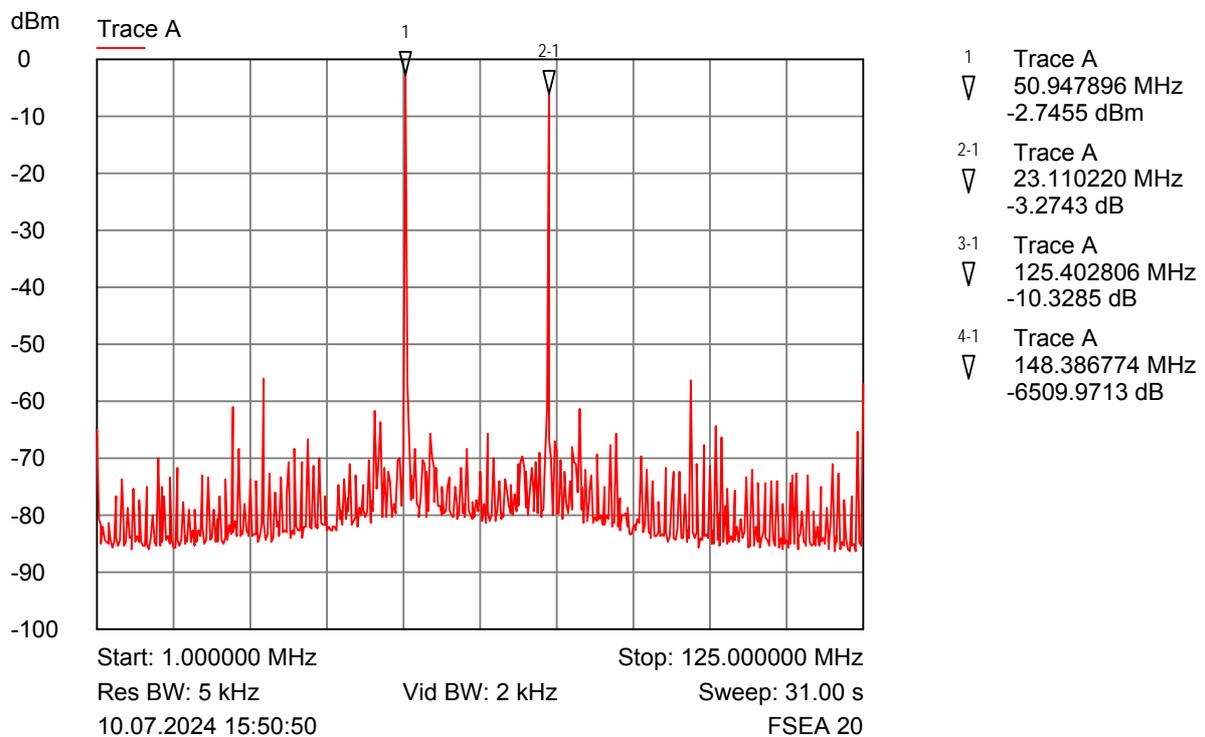


Bild 4 Tuning, Drive 100%, f=51MHz

In Bild 4 ist alles noch etwas schlechter geworden. Man sieht, dass das notwendige externe Aliasingfilter mit etwa 55MHz Grenzfrequenz bei 125-51=74MHz in der zweiten Nyquistzone bereits

über 60dB Dämpfung bringen müsste, um einen sauberen Sendebetrieb zu erlauben. Beim Betrieb an einer Halbleiterendstufe sollten auch die unterhalb des 6m-Bandes liegenden Nebenwellen durch ein zusätzliches Bandpassfilter gedämpft werden. Auch bei den niedrigeren Amateurbändern wäre ein zusätzliches Bandpassfilter angeraten. Diese Bandpässe brauchen keine hohe Weitabselektion zu haben. 30dB würden dafür ausreichen. Dabei ist es naheliegend, sie auch im Empfangskanal zu verwenden.

In Bild 5 ist zu sehen, dass auch in der 3. Und 4. Nyquistzone bei Marker 3 und 4 noch kräftige Signale entstehen. D.h. das notwendige externe Filter darf auch bei hohen Frequenzen nicht in der Dämpfung nachlassen.

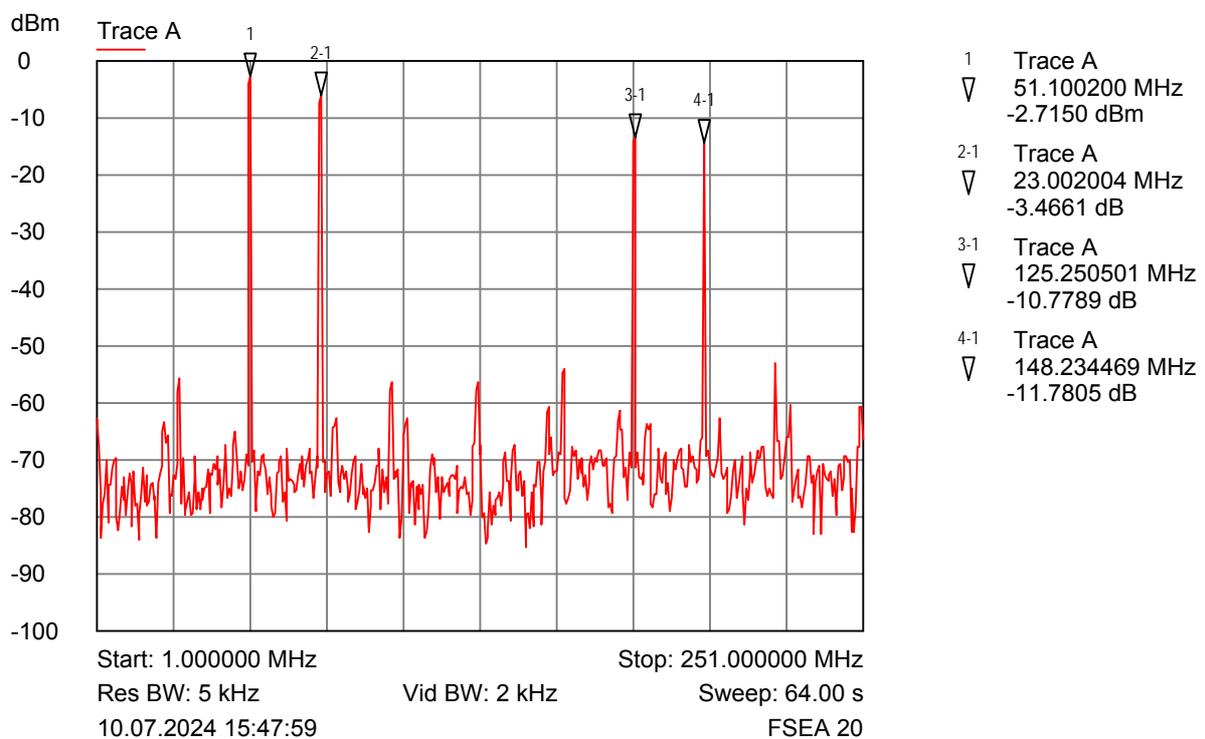


Bild 5 Tuning, Drive 100%, f=51MHz

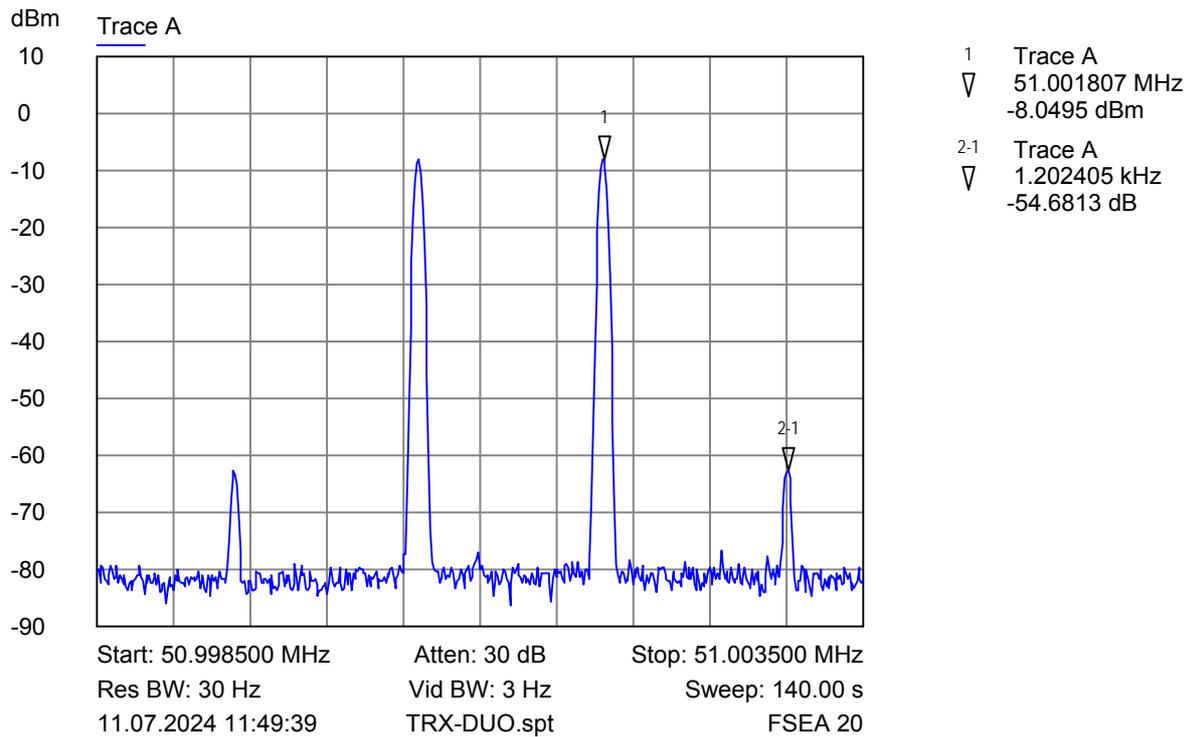


Bild 6 Produktbildung 3.Ordnung bei 51MHz und maximaler Leistung von -2dBm PEP

Wie Bild 7 zeigt, wird das bei tieferen Frequenzen deutlich besser.

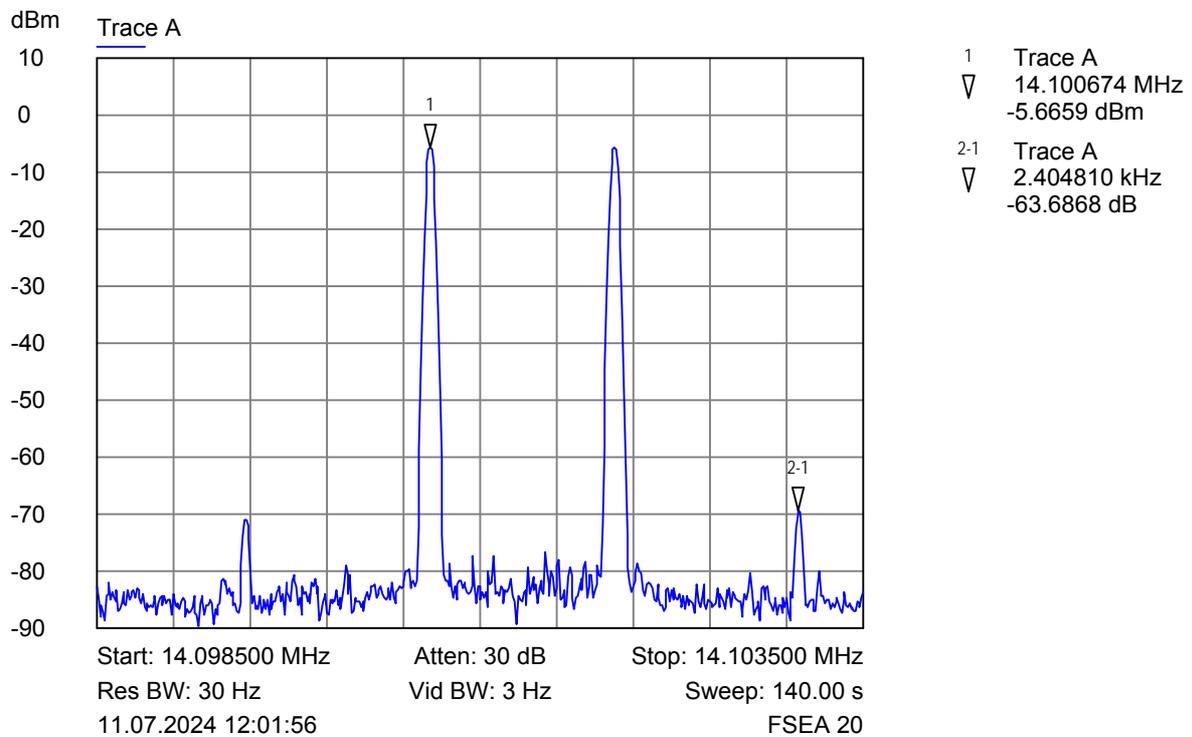


Bild 7 Produktbildung 3.Ordnung bei 14,1MHz und maximaler Leistung von 0dBm PEP

Noch tiefere Frequenzen bringen keine Verbesserung mehr, weshalb ich mir weitere Messungen erspare. Im Vergleich zum alten 14Bit Red Pitaya fällt auf, dass die maximale Ausgangsleistung beim TRX-DUO um ca. 10dB niedriger liegt. Im nachfolgenden Sendeverstärker muss deshalb höher verstärkt werden, so dass meine alte Bandpassplatine nicht mehr ausreicht, um z.B. eine LDMOS-PA direkt anzusteuern.

Empfängermessungen

Rauschmaß

Für alle RX-Messungen wurde der RX erst einmal bei 7,2MHz im Pegel kalibriert. Er zeigt dann bei 51MHz einen Abfall des angezeigten Pegels um etwa 1dB. Bei 7,2MHz liegt der mit einer Bandbreite von 1kHz bewertete Rauschpegel bei -109dBm. Das entspricht auf 1Hz bezogen -139dBm und liegt damit bei 35dB Rauschmaß. Bis 51MHz erhöht sich das Rauschmaß um ein weiteres dB auf 36dBm. Das reicht für die niedrigen Bänder aus. Für höhere Bänder und „kleine“ Antennen wäre eine zuschaltbare Vorverstärkung von 20dB sicher sinnvoll. Dabei ließe sich der RX immer noch bis auf -20dBm aussteuern.

Pfeifstellen

Um Pfeifstellen ermitteln zu können, werden der RX1-Eingang mit 50 Ohm abgeschlossen, die Abstimmschrittweite auf 50kHz eingestellt und der Bereich von 1MHz bis 51MHz unter Beobachtung des Spektrumdisplays durchgestimmt. Dabei konnten folgende Pfeifstellen (Pfeifstellengruppen) ermittelt werden. Die Pegelbewertung erfolgt bei 3kHz Bandbreite.

Frequenz	Pegel in dBm	Bemerkungen
1,36	-95	Rauschberg von DC-Wandler?
8,324	-100	Gruppe von 2 diskreten Pfeifstellen
16,671	-100	Gruppe von 4 diskreten Pfeifstellen
25	-95	Gruppe mehrerer Pfeifstellen von -95 bis -100dBm
50	-95	Gruppe mehrerer Pfeifstellen von -95 bis -100dBm

Das ist auch wegen der geringen Anzahl und deren niedriger äquivalenter Pegel ein sehr gutes Ergebnis.

Durchschlag aus zweiter Nyquistzone

fe in MHz	fs in MHz	auf fe angezeigter relativer Pegel
51	74	-9dB
45	80	-15dB
40	85	-21dB
35	90	-27dB
30	95	-33dB
25	100	-40dB
20	105	-48dB
10	115	-56dB

Der im TX-DUO eingebaute Aliasing-Tiefpass genügt den Anforderungen für den Empfangsbetrieb in keiner Weise. UKW-Rundfunksender schlagen heftig in die KW-Bänder durch. Es muss ein externer Tiefpass verwendet werden, der bei einer Grenzfrequenz von etwa 53MHz bei 70MHz möglichst

schon 60dB Dämpfung erreicht. Dieser sollte unter Umgehung des internen TP über die auf der Platine des TRX-DUO vorhandene CFL-Buchse angeschlossen werden.

RX-Seitenbandrauschen

Als Testsignal dienen 10MHz aus einem Rubidium-Frequenznormal, die über ein 10MHz-Quarzfilter mit 300Hz Bandbreite geführt wurde. Es steht mit maximal +5dBm zur Verfügung und wird mit 0dBm an den Eingang von RX1 angeschlossen.

Ablage in kHz	bei B=500Hz gemessener Pegel	Seitenbandrauschen in -dBc
1,5	-104dBm	131
2,5	-105dBm	132
10	-108dBm	135
20	-110dBm	137
40	-111dBm	138
100	-112dBm	139

Der im RX verfügbare Dynamikbereich begrenzt die Messwerte zu höheren Ablagen hin bei etwa -140dBc. Die bei kleinen Ablagen gemessenen guten Werte sind für den praktischen Betrieb entgegen der unter Amateuren weit verbreiteten gegenteiligen Annahme nicht relevant. Auch ein mit adaptiver Vorverzerrung betriebener Sender ist mit seiner Produktbildung in 2,5 oder 10kHz Abstand immer das schwächste Glied der Kette. Empfänger Vergleiche jenseits -110dBc bei kleinen Frequenzablagen sind reine Werbeargumente und gehen an der Praxis vorbei. An dieser Stelle sei noch bemerkt, dass beim Anlegen des starken Testsignals um dieses herum zahlreiche schwache Nebensignale entstehen. Diese habe ich bei der Wahl der Frequenzablagen gemieden. Diese Nebenwellen würden aber im praktischen Betrieb noch vor dem LO-Seitenbandrauschen stören.

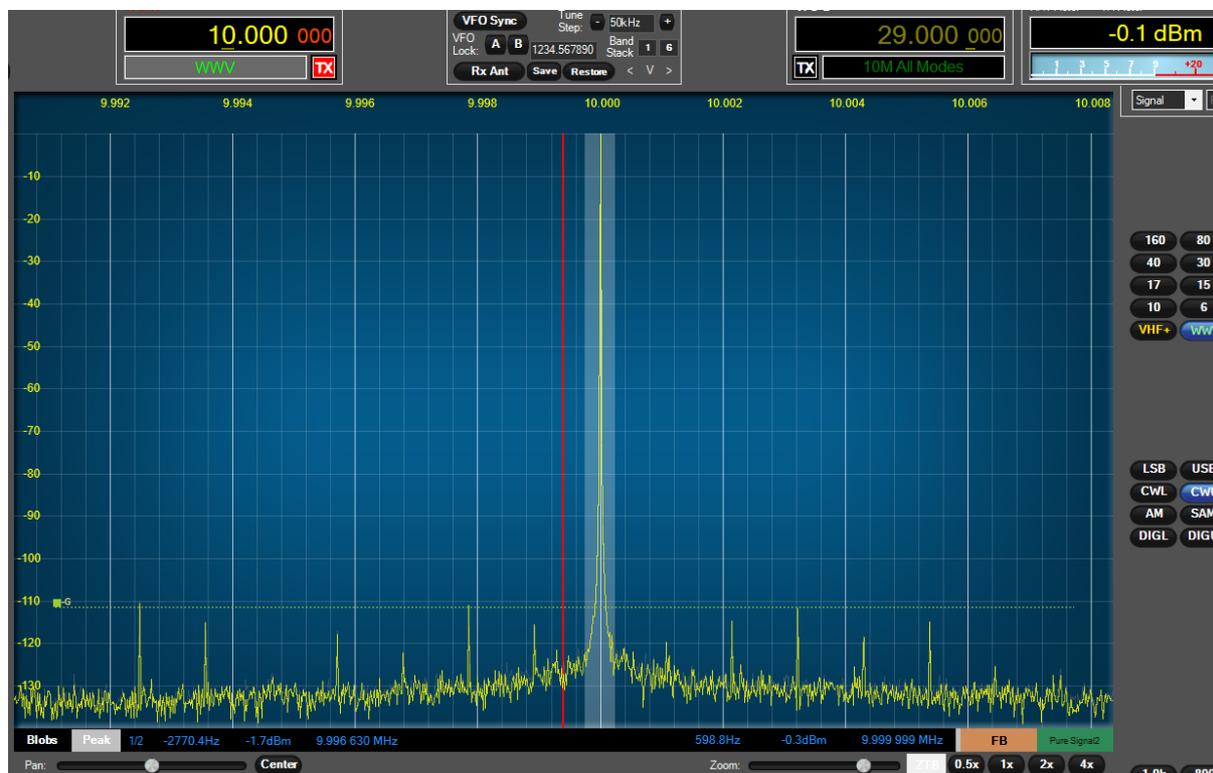


Bild 8 Hier sind die oben erwähnten Nebenwellen zu sehen.

Produktbildung

Anstatt einer klassischen Intermodulationsmessung für Produkte 2. Und 3. Ordnung soll hier eine NPR-Messung zur Anwendung kommen. Dabei wird die Rauschleistung über den vollen RX-Bereich bis über 50MHz angelegt. Ein 100dB-Notchfilter auf 21,084MHz wird zur Bewertung der entstehenden Produkte herangezogen. Die Rauschleistung stammt dabei aus einer von mir entwickelten Leistungsrauschquelle, deren Rauschdiode auf konstanter Temperatur gehalten wird (siehe Anhang). Sie liefert über einen Frequenzbereich bis 300MHz eine konstante Leistung von -82dBm/Hz. Rauschleistungsunterschiede über den Frequenzbereich kommen durch das nicht ganz ideale Verhalten des Notchfilters zustande. Bei 1kHz Bewertungsbandbreite wurden frequenzabhängig folgende Rauschleistungen über das Filter hinweg gemessen.

F in MHz	Rauschleistung in dBm
2	-48
12	-49
22	-49
32	-50
42	-52
50	-55

Bei 21,084MHz im Notchbereich geht die Anzeige auf -108dBm zurück. Das Noise Power Verhältnis liegt also bei $108 - 49 = 59\text{dB}$. Das ist verglichen mit anderen veröffentlichten Werten von bekannten Transceivern ein recht gutes Ergebnis. Vor allem, wenn man bedenkt, dass hier unter möglichst brutalen Bedingungen über den ganzen RX-Bereich ohne Vorfilter gemessen wurde.

Nachfolgend danke ich Herrn W. Raufer für den mir für die Messungen bereitgestellten TRX-DUO.

Anhang

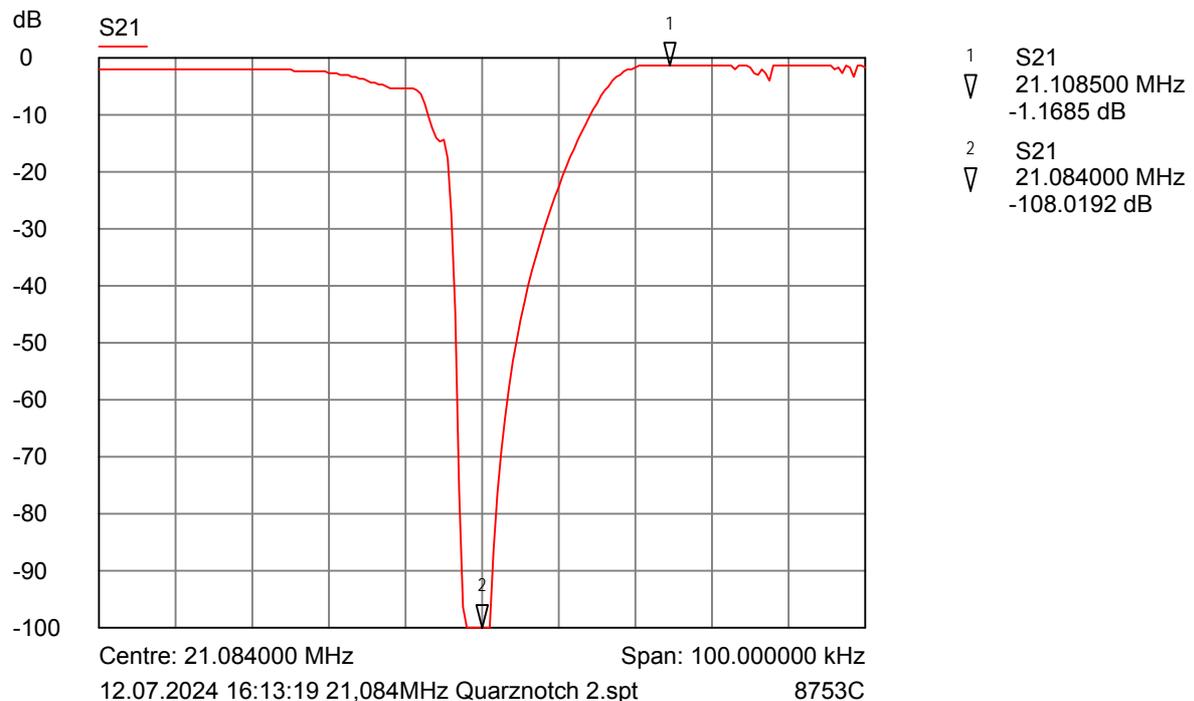


Bild 9 Das mit 7 Quarzen realisierte Notchfilter

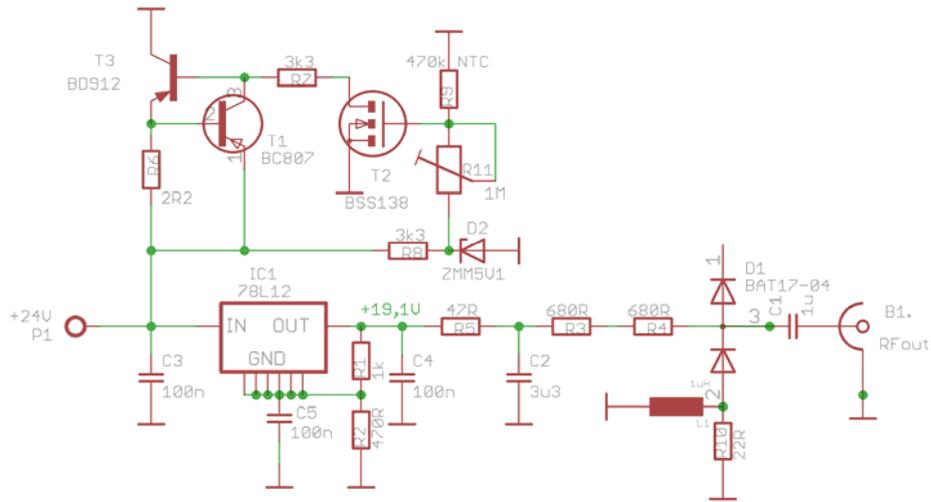
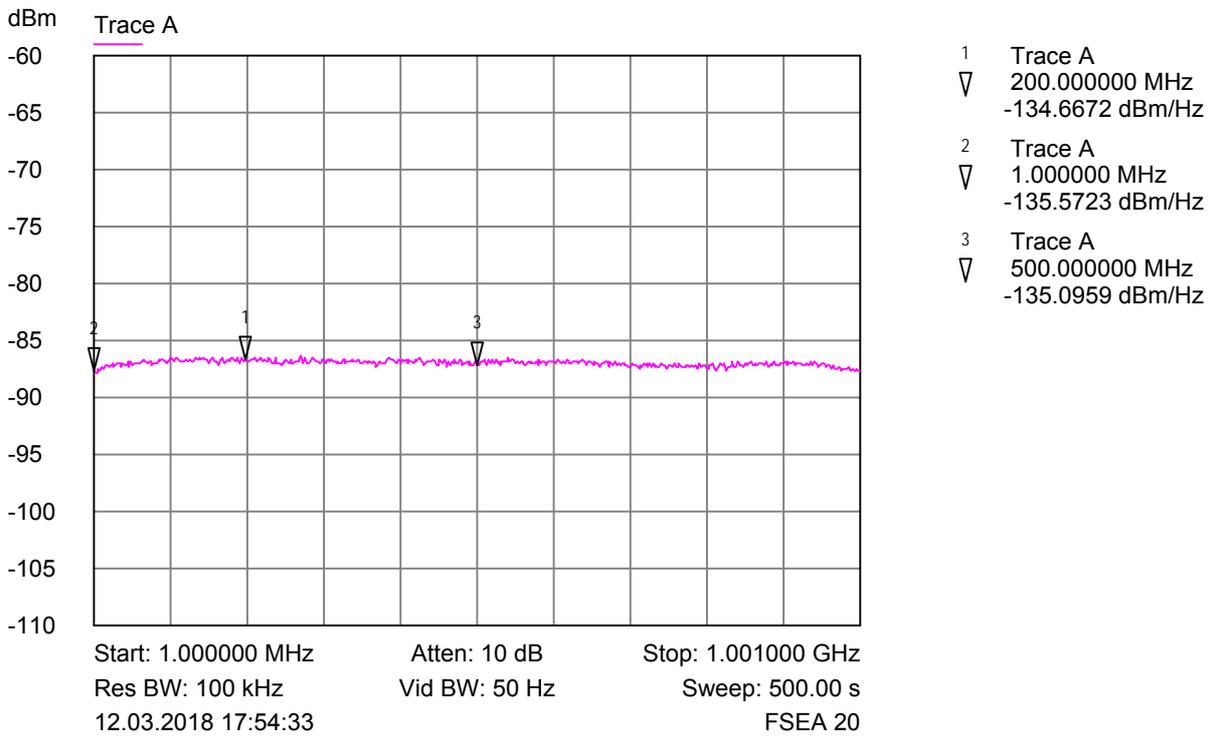


Bild 10 Schaltbild der Rauschquelle

Der untere Teil der Diode D1 wird im Durchbruch betrieben. R11 bestimmt in Verbindung mit R9 die Temperatur, auf die T3 die Diode aufheizt. T1 dient während des Anheizens der Strombegrenzung.



temperaturgeregelte Leistungsrauschquelle

Bild 11 Die Rauschquelle gibt an einen 50Ω Widerstand -135dBm/Hz ab.

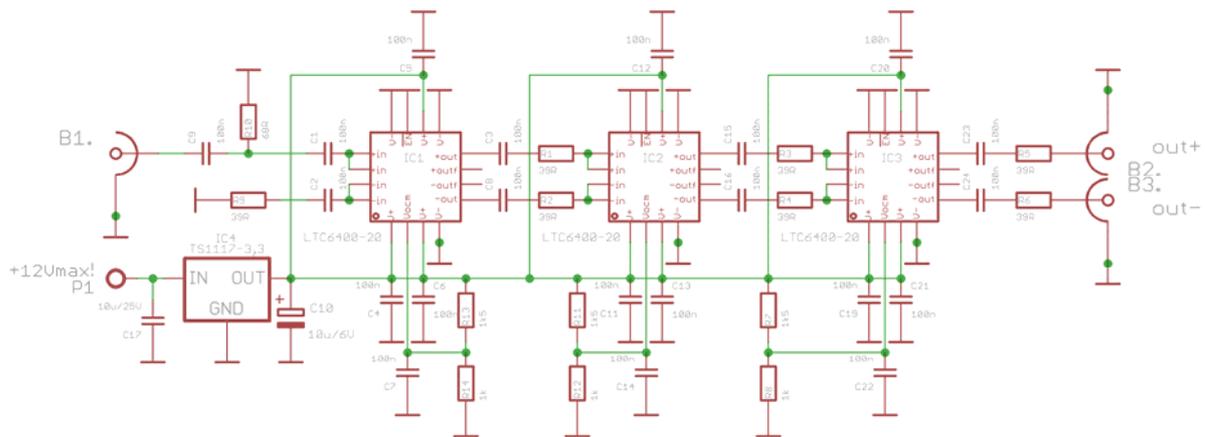


Bild 12 Der nachfolgende Breitbandverstärker hebt den Rauschpegel auf zweimal -82dB/Hz an (siehe Bild 13).

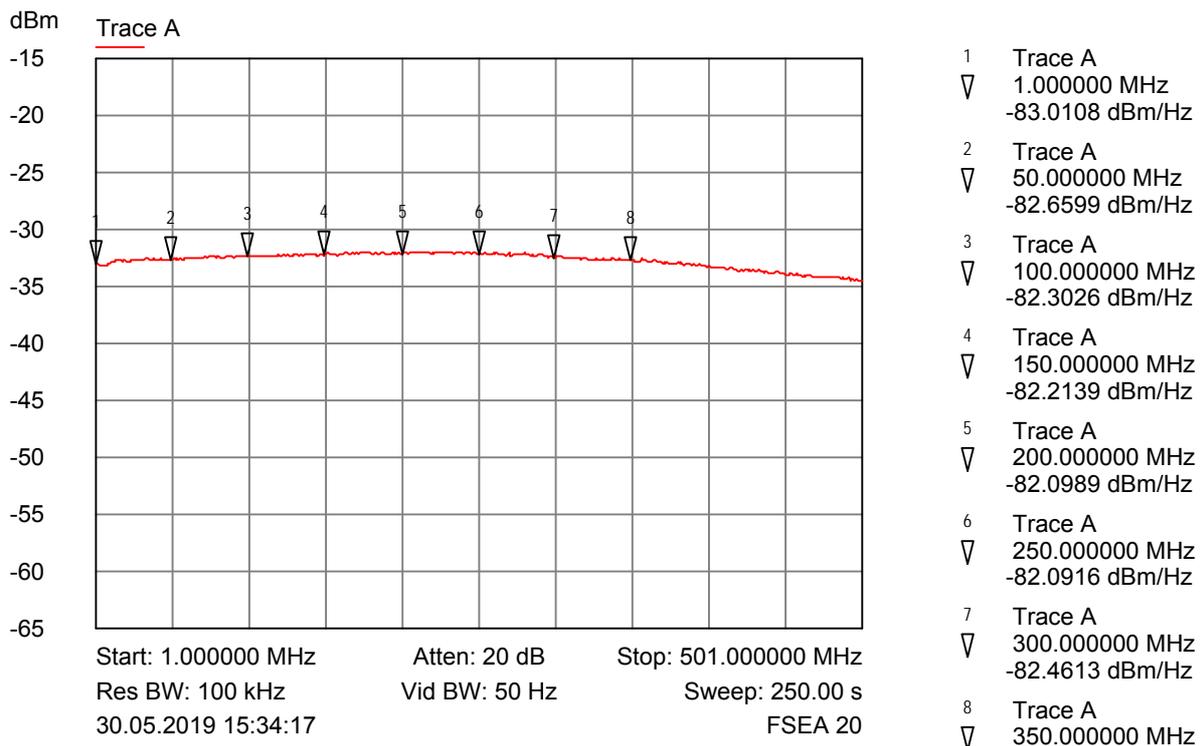


Bild 13 Messung an Ausgang 1. Ausgang 2 ist dabei abgeschlossen. Die Verstärkung ist über den Temperaturbereich wegen der internen Gegenkopplung der ICs sehr stabil. Bei einer Bandbreite von 500MHz beträgt die Summenleistung an jedem Ausgang $-82 + 10 \cdot \log(500 \cdot 10^6) = +5\text{dBm}$.