

"When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it. But when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind. It may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of *Science*,"

Sir William Thomson, Lord Kelvin, 1824 - 1907

Basteltagebuch

IP3-Messung

Version 007

Jörn Bartels, DK7JB

49088 Osnabrück

mail@dk7jb.de

www.bartelsos.de

24. Januar 2016

(nur einige Links verbessert)

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Vorwort</i>	5
2	<i>Literatur</i>	6
3	<i>Messaufbau von Uli DK4SX</i>	6
4	<i>Aufbau von Jörn DK7JB – alte Version bis 08.2013</i>	7
5	<i>Überprüfung der Messanordnung (08.2013)</i>	10
5.1.1	Schnelltest	10
5.1.2	Test auf Intermodulation auf Fehlabschluss am Ausgang des Combiners (Teil 1)	10
5.1.3	Test auf Intermodulation (Teil 2)	11
5.1.4	Test auf Intermodulation (Teil 3)	12
5.1.5	Test auf Intermodulation (Teil 4)	12
5.1.6	Test auf Intermodulation – Übersichtsmessung des Spektrums (Teil 5)	13
5.1.7	Überprüfung der Messgenauigkeit der Pegel beim HP8594Q	13
6	<i>Der neue Messaufbau – ab 08.2013</i>	14
7	<i>Hinweise für Nachbauer</i>	14
7.1	Combiner	14
7.2	Verstärker	15
7.2.1	Verstärker	15
7.3	Berechnung der Frequenzen	15
7.4	Eingangs-IP3 des Spektrum Analysers	15
7.5	Hinweise zur Genauigkeit	15
7.6	Tone Generator für 145 Mhz	17
8	<i>Messablauf: Schritt für Schritt</i>	17
9	<i>IP3 Messungen an Quarzfiltern</i>	20
9.1.1	Berechnung des IIP3 und des OIP3 bei Quarzfiltern oder anderen Filtern	20
10	<i>IP3-Messung an Mischern</i>	20
10.1	Tiefpass 4,9 MHz für die IP3 Messungen	21
11	<i>IP3-Messungen an PAs – Eine Sammlung von Ideen</i>	21
12	<i>Emailverkehr mit Uli DK4SX</i>	22
13	<i>Ergebnisse von IP3-Messungen an einigen Objekten (DL7LA Okt. '12)</i>	24
14	<i>Aufbau mit einem resistiven Combiner (von Horst dj6ev)</i>	25
15	<i>Messungen ohne Spektrum Analyser</i>	25
15.1	Messungen mit dem SDR	25
15.2	Messungen mit dem Empfänger (von Horst dj6ev)	26
16	<i>IM-Messungen mit einem nicht-idealen Messplatz (von Horst dj6ev)</i>	29

17	Tiefpässe für die IP3-Messung	30
17.1	160m Band	30
17.2	80m Band	31
17.3	40m Band	31
17.4	30m Band	32
17.4.1	Tiefpass 30m (3dB 12,5 MHz)	32
17.4.2	Tiefpass 30m (3dB 12,6 MHz)	32
17.5	20m Band	33
17.5.1	Tiefpass 20m (3dB 16,9 MHz)	33
17.5.2	Tiefpass 20m (3dB 17,3 MHz)	33
17.6	17m Band	34
17.7	15m Band	34
17.8	12m Band	35
17.9	10m Band	35
17.10	Sonstige Tiefpässe	36
17.10.1	Tiefpass 4,47 MHz und 5,64 MHz	36
17.10.2	Tiefpass	36

1 Vorwort

In meiner TRX-Baumappte und in unterschiedlichen Internetforen habe ich von meinen Erfahrungen mit der IP3-Messung berichtet. Da nun in meinem Umfeld einige OMs ihre Messplätze aufrüsten und sich dabei viele Fragestellungen ergeben, habe ich begonnen in einem extra Basteltagebuch alles zusammen zu fassen, was ich hierzu geschrieben habe oder was mir hierzu einfällt.

An dieser Stelle möchte ich nicht über die globale Sinnhaftigkeit von IP3-Messungen diskutieren. Wenn meine Familie oder Arbeitskollegen fragen, warum ich das alles tue antworte ich meist sinngemäß: „... weil es mir Freude macht.“ Von der Freude am Erkenntnisgewinn und vom Forscherdrang wage ich dann in der Regel nicht zu sprechen (grins).

Will man dieses Thema ernsthaft angehen, artet es schnell in eine Materialschlacht und ein Studium der Literatur aus. ;-) - IP3 Messungen die auch belastbar sind, sind kein Anfängerprojekt!

➔ Je größer der zu bestimmende IP3 Wert sein soll, umso größer wird auch der Messgerätepark.

In diesem Basteltagebuch gehe ich daher davon aus, dass ihr die im nächsten Kapitel vorgestellte Literatur gelesen habt und dass ihr Zugang zu einem Spektrum Analyser habt und ihn bedienen könnt. Weiterhin gehe ich davon aus, dass ihr einen VNWA (zur Not auch NWT) besitzt. Meine Ausführungen richten sich somit an den „fortgeschrittenen Anfänger“ (grins).

Die IP3 Messung von hohen Interceptpunkten artet in eine Materialschlacht aus. Damit du dir eine Bild davon machen kannst, hier mal eine Auswahl von Geräten, die bei meinen IP3-Messungen eingesetzt werden: 2 Quarzgeneratoren, 3 DDS Generatoren, 7 getrennte Spannungsversorgungen (tw Akkus), einige Tiefpässe, sehr guter Combiner, sehr viele Dämpfungsglieder, 1 schaltbares Dämpfungsglied, 4 Verstärker, Semi-rigid Kabel, Spektrum Analyser, Leistungsmesser, VNWA, ...

Letztlich wird da alles aufgefahren, was sich so mit der Zeit angesammelt hat und nur mit Selbstbau bleibt es bezahlbar. Genauso wichtig ist aber ein erfahrener OM im Hintergrund, der einem auf die Finger klopft, wenn ihm etwas komisch vorkommt ;-)). Fehler kommen bei dieser Thematik immer wieder vor und man fällt in fast jede Fallgrube, die sich einem auftut. ;-)

Mit diesem langen Beitrag möchte ich euch warnen. Hoffentlich habe ich deutlich machen können, wo man landet, wenn man einfach mal ganz unschuldig einen IIP3 Wert bestimmen möchte ;-)). Was kommt dann? Wenn man den IP3 Wert eines Mischer, Verstärkers oder Filters bestimmen kann, fängt man an, nach den anderen Kenndaten zu fragen (Rauschmaß, ...). Dann beginnt der ganze gigantische Messaufbau wieder von vorne - arrrrg. Du solltest dir also genau überlegen, welche Messungen du wirklich durchführen möchtest.

Lemma 1: Je größer der zu bestimmende IP3 Wert, um so größer muss der Messgerätepark sein.

Solltest du dich im Anschluss an die IP3-Messungen für die Messung des Rauschmaßes interessieren, findest du hierzu Hinweise in meinem TRX2012-Basteltagebuch Band 1.

Zum Abschluss noch zwei Bitten an den geneigten Leser:

- Wenn dir dein Diskussionspartner sagt, dass ein resistiver Combiner ausreicht, werde misstrauisch. Das funktioniert in der Regel nicht, außer man macht es so wie Horst es im Kapitel 14.
- Dokumentiere deine Arbeit sehr sorgfältig (Text und Bild), sonst sind deine Messwerte nichts wert, da sich die Messanordnung und dein Vorgehen nicht mehr überprüfen lassen. Gerade am Anfang.

Die IP3-Messung ist kein Projekt für einen verregneten Nachmittag. Hier müssen dicke Bretter gebohrt werden. Es lohnt sich aber, weil es Freude macht.

Auf dem Deckblatt findet ihr alle notwendigen Kontaktinformationen, damit ihr mich erreichen könnt.

Viel Spaß beim Lesen. Jörn, DK7JB

Meinen aktuellen Aufbau findet ihr in Kapitel 6.

2 Literatur

- Lies die APP-Notes der großen Messgerätehersteller sehr gründlich.
- IP3-Messungen – Messbeispiele und Beschreibung der Verstärker
<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/experimente-am-k2-mit-baumappe> Kapitel 18
- Messbeispiele : <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/selbstbau-trx-2012> Band 1
 Messungen an Quarzfiltern Kapitel 8.8 und 8.9
 Messungen an Bandfiltern Kapitel 7 und Band 3
- Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge und der Messverfahren hat Uli DK4SX einige Artikel in der CQDL veröffentlicht
 Heft 11-98: "Warum so messen?"
 Heft 12-97 und Hefte 1 bis 4-98: "Was sollen gute Amateurempfänger können?"
 Heft 7-2000: "Messung von FM-Geräten"
 Heft 6 bis 8-2002: "Empfänger-Intermodulation, Theorie und Praxis"
 Heft 5-2004: "Intermodulation 2. Ordnung"
- Werner Schnorrenberg (<http://www.dc4ku.darc.de/>) hat auch sehr gute Artikel geschrieben.
http://www.dc4ku.darc.de/Nichtlineare_Verzerrungen.pdf
- http://www.dc4ku.darc.de/Messungen_nichtlinearer_Verzerrungen.pdf
- <http://www.designers-guide.org/analysis/intercept-point.pdf>
- http://www.cliftonlaboratories.com/measuring_ip3.htm
- www.minicircuits.com/app/AN00-008.pdf
- Uli Graf DK4SX beschreibt einen einfach aufzubauenden IP3-Messplatz: www.mydarc.de/dk4sx siehe auch FUNKAMATEUR 11/03
 oder als Ergänzung für die Praktiker
- <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/selbstbau-trx-2012> Band 1 Anhang A
- (Dieses Dokument) <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/ip3-messungen>
- <http://217.34.103.131/app/AN00-008.pdf>
www.w4uoa.net/TARCPresentationv14.ppt
http://www.cliftonlaboratories.com/measuring_ip3.htm
<http://217.34.103.131/app/AN00-009.pdf>
<http://217.34.103.131/pdfs/Dynamic%20Range%20Optimization%20Article%20May%202010.pdf>

3 Messaufbau von Uli DK4SX

Uli Graf DK4SX beschreibt einen einfach aufzubauenden IP3-Messplatz: www.mydarc.de/dk4sx

Dort findet ihr unter "Projekte" einen einfachen IM3- Messplatz, der auch für die Ermittlung hoher Interzeptpunkte geeignet ist. Dies ist ein toller Aufbau, der nur mit sehr viel Aufwand zu toppen ist.

Wenn von euch jemand einen Speki hat und in die IP3 Messung einsteigen möchte, empfehle ich euch besonders diese Schaltung. Mit einem Nachbau dieser Schaltung habe ich auch meine ersten Messungen durchgeführt. Bei diesen Messaufbauten ist eine extrem gute Entkopplung der Versorgungsspannung besonders wichtig.

Will man noch bessere Interzeptpunkte messen, braucht man noch größere Pegel. Hier helfen nur Verstärker, denen Tiefpässe und Dämpfungsglieder zur besseren Entkopplung nachgeschaltet werden. Dies muss alles sehr gut geschirmt aufgebaut werden. Siehe hierzu auch meinen Weg, welcher in dieser Baumappe in Kapitel 4 bis 6 beschrieben werden.

Den von Uli gebauten Combiner möchte ich euch besonders an Herz legen. Zu dem Übertrager hatte ich Uli vor zwei Jahren eine Email geschrieben und sinngemäß folgende Antwort erhalten:

Er war sich zu dieser Zeit sicher, dass er einen Siemens Doppellochkern 7x7x4 mm aus dem Material N30 verwendet hat. Er hat dann noch geschrieben, dass Doppellochkerne weniger Windungen als Ringkerne benötigen und fester

koppeln. Wenn man nun doch einen Ringkern BN34-2402 verwendet, sollte man wenigsten 8 Windungen trifilar (0,2 CUL) aufbringen. Die dritte Wicklung mit offenem Ende ist korrekt im Schaltplan eingezeichnet. Sie dient der Verteilung des kapazitiven Wicklungsbelags und ermöglicht eine präzise Symmetrie.

Uli hat mal über seinen Aufbau folgendes in einem Forum geschrieben: „Es gab eine Zeit da konnte ich nur IM-Messungen durchführen bis zu einem IPE3 von etwa +25 dBm. Mehr erlaubte die mangelhafte Isolation der R&S-Generatoren, des Summierers, der Dämpfungsglieder und die Dynamik des Analyzers nicht. Mit der auf meiner Webseite vorgestellten Messeinrichtung kann man bis zu einem IPE3 von etwa +42 dBm messen. Dazu benötigt man aber einen Analyzer, der einen Dynamikbereich von mindestens 80, besser 90 dB hat. Da hatten wir in unserem QRL nur einen einzigen!“

4 Aufbau von Jörn DK7JB – alte Version bis 08.2013

Meinen eigenen Messaufbau habe ich in dem Baubericht Band 1 von meiner TRX2012 berichtet (<http://www.bartelos.de/dk7jb.php/selbstbau-trx-2012>). Diesen Text habe ich hier auf der nächsten Seite übernommen. Auch in den anderen Kapiteln findet ihr Hinweise zu meinen IP3 Messungen.

Es wurde ein (aus meiner Sicht) sehr großer Aufwand betrieben um IP3 Werte jenseits der +30dBm messen zu können - auch wenn der Spektrum Analyser nur einen IMD-freien Bereich von 75dB hat (HP8594Q). Das Geheimnis sind hierbei die größeren Pegel, die zur Verfügung gestellt werden.

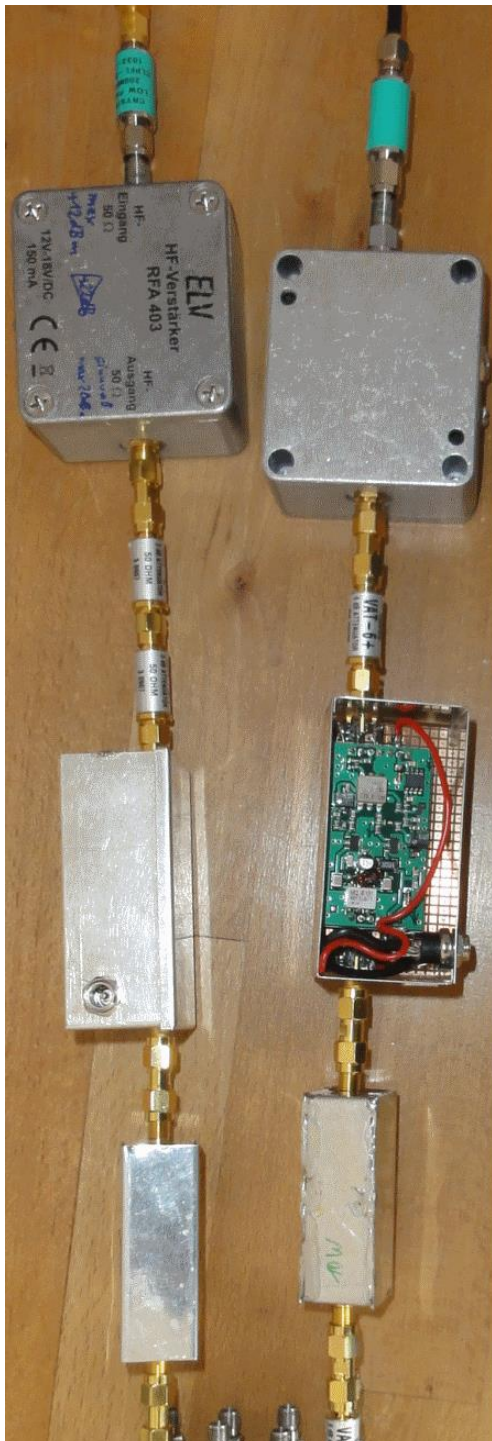
Anmerkung: Man darf natürlich keine Genauigkeit von 0,1dB Schritten erwarten ;-) und muss immer versuchen die eigenen Ergebnisse nach Fehler zu überprüfen. Außerdem fehlt einem als Amateur die Möglichkeit die eigenen Messergebnisse in einem Profi-Labor überprüfen zu lassen.

In meinem TRX2012 Baubericht findet ihr am Ende des Anhang A noch eine ergänzende Literaturliste.

Anhang A: Mein Messplatz (siehe auch hier auf der nächsten Seite)

Messungen an Quarzfiltern Kapitel 8.8 und 8.9

Messungen an Bandfiltern Kapitel 7 und Band 3



200MHz Tiefpass
3dB Pad
Verstärker RFA403
6dB Pad
1W PA
Tiefpass 40m
3dB Pad

Um auch höhere IP3 Werte an passiven Bauteilen mit einer gewissen Dämpfung messen zu können, werden hohe Pegel und eine sehr gute Entkopplung benötigt. Die Schirmung wird gewährleistet, da alle Baugruppen in HF-dichte Gehäuse gebaut worden sind und alle Leitungen mit SemiRigid-Kabeln ausgeführt werden.

Versorgt wird mein IP3 Messplatz vom FA-IQ-DDS, der zwei unabhängige Signale abgeben kann, die sehr gut voneinander entkoppelt und zusätzlich rauscharm sind.

Der gesamte Messplatz ermöglicht am Ausgang zwei Doppeltöne von bis zu +12dBm. Um die 1W PA zu schonen wird aber der Pegel auf möglichst +10dBm abgesenkt. (Ausgang des Combiners)

Je Signal sieht der Pad so aus:

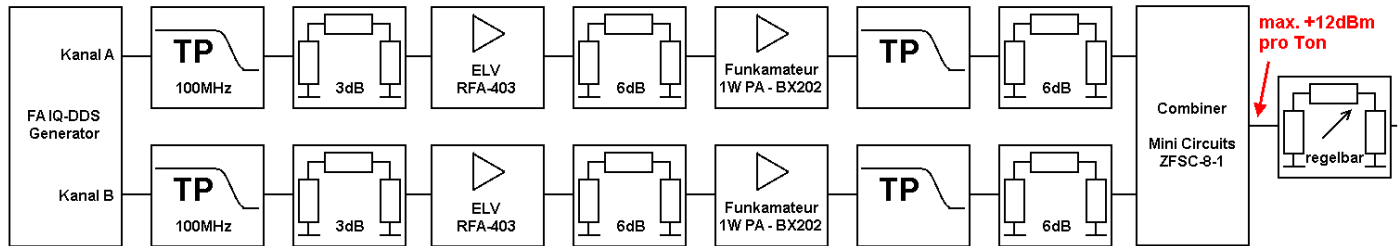
- FA-IQ-DDS-Generator: Der Ausgangspegel wird per Software um ca. 2dB abgesenkt, um die 1W PA zu entlasten und um exakt gleiche Pegel zu erzielen.
- 200MHz-Tiefpass: Alle Spurs des Generators entfernen.
- 3 dB Pad: Pegel absenken um die 1W PA nicht zu überlasten
- RFA403 Verstärker, +22dB
- 6dB Pad: Um die 1W PA nicht zu überlasten und die Entkopplung zu verbessern.
- 1W-PA
- Tiefpass 40m mit einer sehr guten Sperrdämpfung. Mit dem SA sind keine Oberwellen mehr messbar.
- 6 dB Pad: Zur Isolation und zum Schutz des Combiners vor zu großen Pegeln.
- ZFSC-8-1: Dieser Combiner von Mini-Circuits wird an allen nicht benutzten Ports mit 30dB oder 50 Ohm abgeschlossen. Wenn auch der Ausgang reell mit 50 Ohm abgeschlossen wird, weist er ein $S_{21}=55-60\text{dB}$ von Port 1 zu Port 7 auf. Diese Traumwerte sind mit Selbstbauten nur sehr schwer zu erreichen. Die Durchgangsdämpfung beträgt 9,2 dB
- Isolation bei Fehlanpassung am Ausgang:
 - Ausgang offen: Isolation (S_{21}) von 17,3 dB
 - Ausgang nur mit 3dB Pad abgeschlossen: $S_{21}=24,0\text{dB}$
 - Ausgang nur mit 10dB Pad abgeschlossen: $S_{21}=38\text{ dB}$
- Hinter dem Combiner wird möglichst noch ein 3-10dB Pad geschaltet.
- Um eine maximale Entkopplung der Versorgungsspannungen zu erreichen werden vier verschiedene Spannungsquellen verwendet: 2 Akkus und zwei gute Steckernetzteile.

Der Pegel darf am Ausgang des Combiners nicht **+12dBm** überschreiten, damit die einzelnen Baugruppen nicht überlastet werden!!!

Nachtrag: Hinreichend genaue Messwerte erhält man nur, wenn der Abstand zw. den Doppeltönen und den Intermodulationsprodukten mehr als 60dB beträgt. Das stellt hohe Anforderungen an den Spektrum Analyser. Wenn sehr hohe IP3-Werte gemessen werden sollen, muss bei Bedarf noch ein Tiefpass eingeschleift werden um eine Übersteuerung zu vermeiden.

Piktogramm auf der nächsten Seite

Variante bis 08.2013

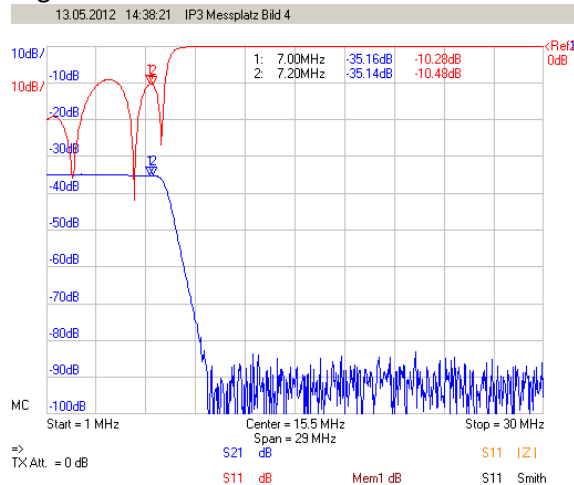


Verschiedene Messsituationen:

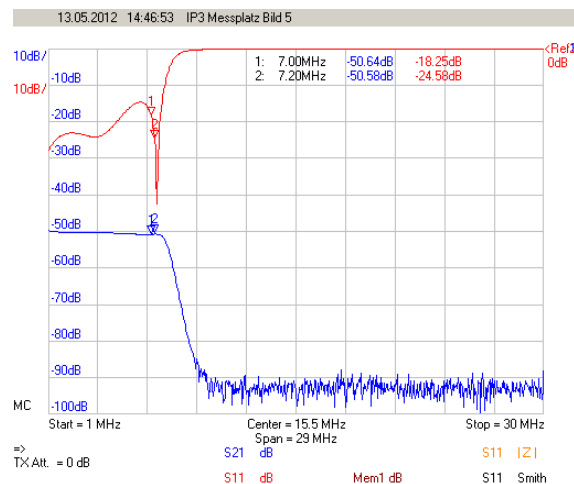
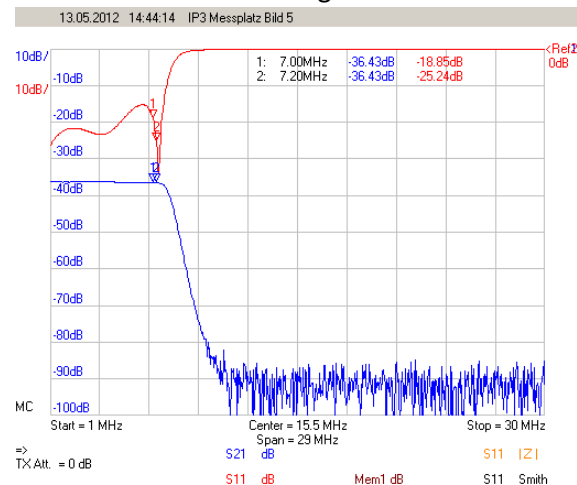


Gemessen wird von Bandpass-Eingang des einen Ports bis zum Bandpass (s. Foto). Der Ausgang des Combiners wird dann unterschiedlich abgeschlossen.

Der Ausgang des Combiners wird mit 10 Ohm abgeschlossen: $S_{21} = 35 \text{ dB}$



Der Ausgang des Combiners wird nur mit einem 3 dB Pad abgeschlossen: $S_{21} = 36 \text{ dB}$



Der Ausgang des Combiners wird nur mit einem 10 dB Pad abgeschlossen: $S_{21} = 50 \text{ dB}$

Nimmt man noch in der Kette die 1W-PA mit hinzu erreicht man im ungünstigsten Fall (Combiner am Ausgang offen) einen Wert für S_{21} von -64 dB (schlechtester Wert). Nimmt man die vollständige Verstärkerkette, ist der Wert für S_{21} besser -100 dB .

Etwas weiter hinten wird mein aktualisierter Aufbau beschrieben, der deutlich einfacher gestaltet ist. Kapitel 6

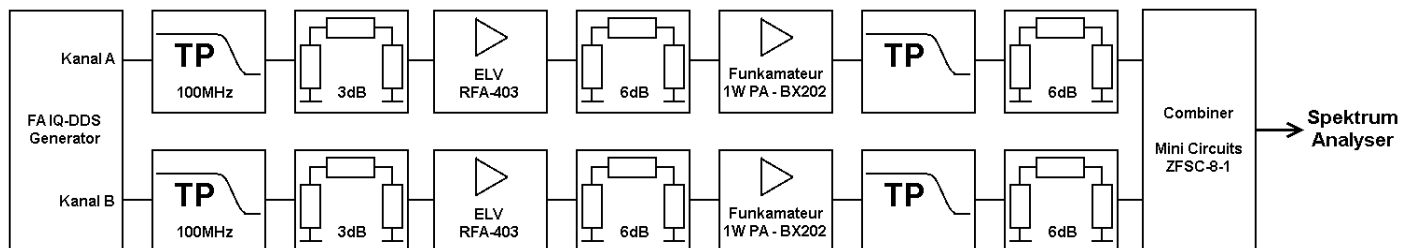
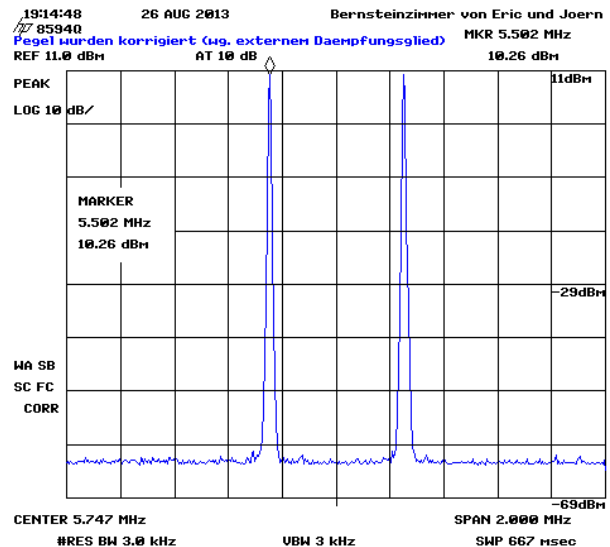
5 Überprüfung der Messanordnung (08.2013)

5.1.1 Schnelltest

Es war mal wieder an der Zeit die eigene Messanordnung zu überprüfen. Zuerst soll getestet werden, ob Eigen-Intermodulationen festgestellt werden können. Im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** habe ich meine übliche Messanordnung beschrieben. Hiervon ausgehend beschreibe ich an dieser Stelle meine Untersuchungen.

Als erstes wurde direkt am Ausgang mit dem Spektrum Analyser gemessen. Die Doppeltöne haben am Ausgang des Combiners einen Pegel von je +10 dBm. Zum Schutz des Spektrum Analysers wurde ein 30 dB Dämpfungsglied dazwischen geschaltet. Im Bild wurde diese Dämpfung aber wieder heraus gerechnet, so dass die Pegelangaben korrekt sind.

Rechnerisch ergibt sich ein IP3 von **besser +45 dBm**. Wie gut er wirklich ist, kann ich mit diesem SA so ohne weiteres nicht mehr messen.

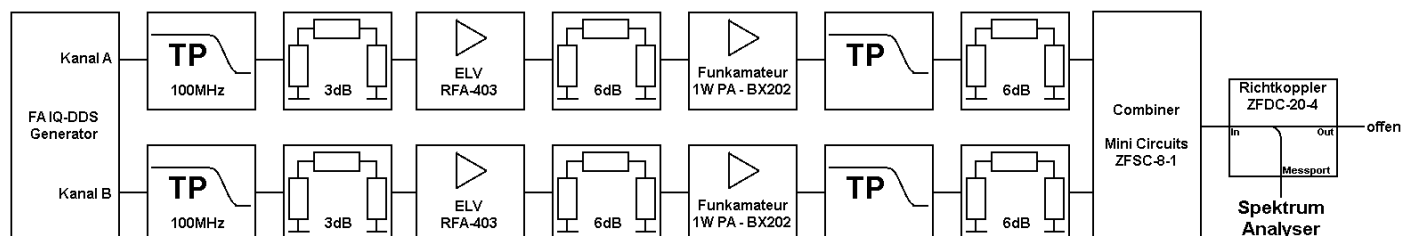


Um sich dem wirklichen IP3-Wert weiter zu nähern, werden Schritt für Schritt die Bedingungen verschärft.

5.1.2 Test auf Intermodulation auf Fehlabschluss am Ausgang des Combiners (Teil 1)

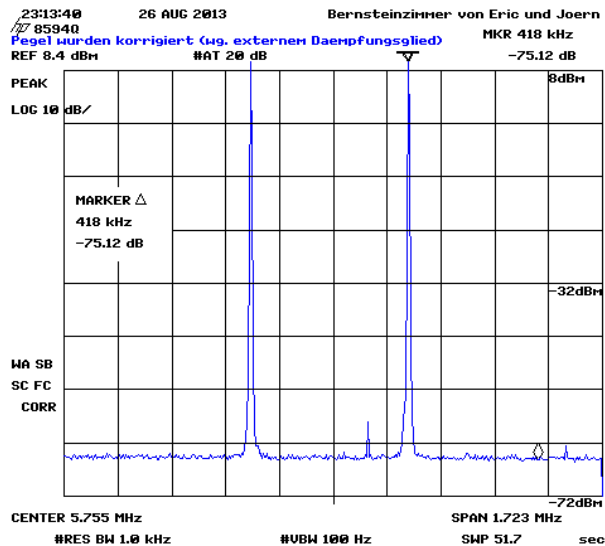
Als erstes soll untersucht werden, ob ein Fehlabschluss am Ausgang des Combiners Intermodulationen hervorruft. Ganz so einfach kann dann aber nicht mehr gemessen werden, da der Spektrum Analyser eine Impedanz von 50 Ohm aufweist. Hier habe ich mir mit dem Richtkoppler ZFDC-20-4 von Mini-Circuits geholfen.

Datenblatt: www.minicircuits.com/pdfs/ZFDC-20-4.pdf



Wie im Bild abgebildet habe ich ihn angeschlossen. Bei der ersten Messung wollte ich testen, ob Intermodulationsprodukte zu sehen sind, wenn der Ausgang des Richtkopplers offen bleibt – also $|Z| = \infty$ oder auch Totalreflexion.





Totalreflexion am Ausgang des Combiners.

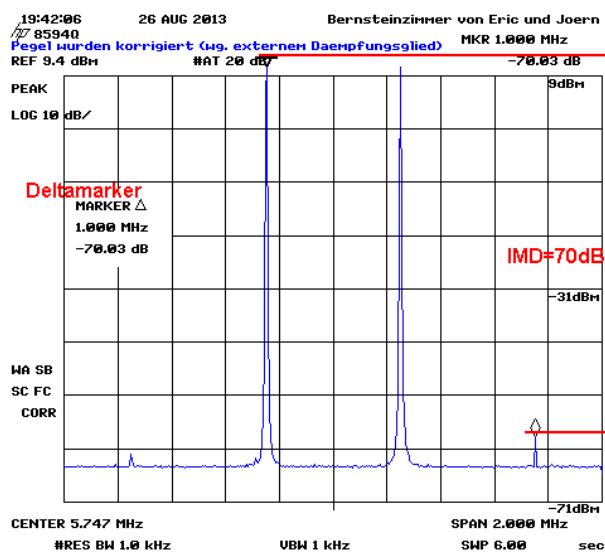
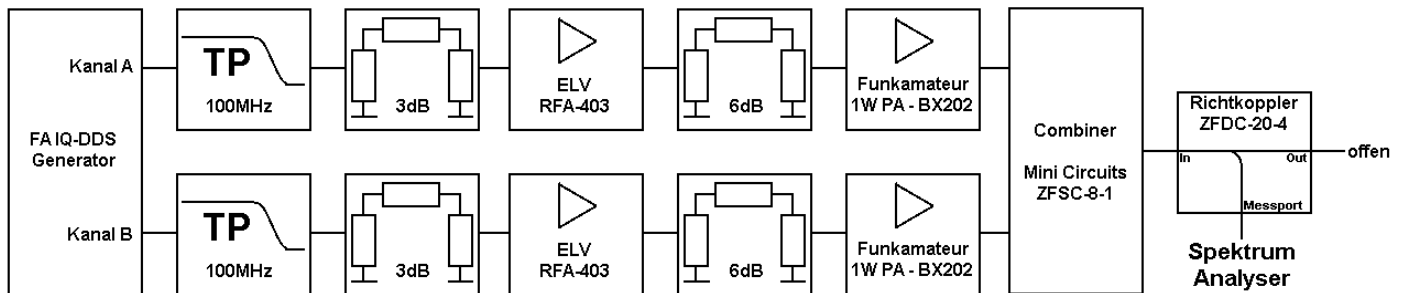
Auch bei diesem Bild wurde die Koppel-Dämpfung wieder heraus gerechnet und korrigiert.

Es ist sehr erfreulich, dass selbst bei einer Totalreflexion am Ausgang des Combiners keine Intermodulationsprodukte nachweisbar sind. Die kleine Nadel am rechten Bildrand stammt vermutlich von Intermodulationen im SA. Hier bin ich aber so am Rande der Spezifikationen, dass es nicht sicher festzustellen geht.

Es lässt sich feststellen, dass eine Totalreflexion bei mir nicht zu einer messbaren Verschlechterung führt. Das ist sehr beruhigend.

5.1.3 Test auf Intermodulation (Teil 2)

Nun wurden die PAs direkt an den Combiner angeschlossen und auf die Tiefpässe und die 6dB Pads verzichtet. Der Ausgang des Richtkopplers wird offen gelassen.

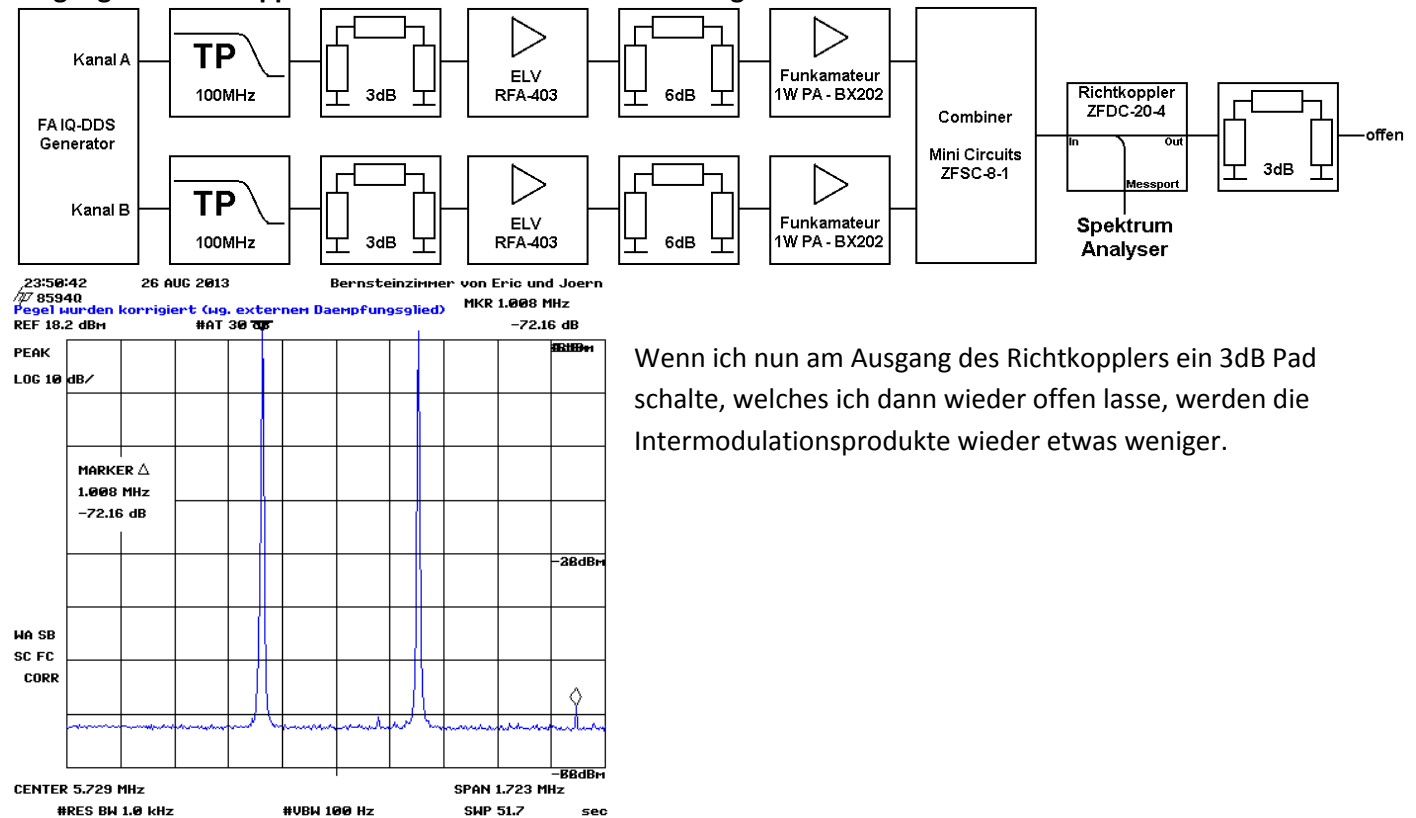


Direkt hinter dem Combiner wurde wieder am Richtkoppler gemessen, während der **Ausgang des Richtkopplers offen** gelassen wurde. Auch hier betragen die Pegel der Doppeltöne jeweils +10dBm.

Nun werden die ersten Intermodulationsprodukte mit einem intermodulationsfreien Raum von IMD=70dB auf. Hieraus lässt sich für diesen ungünstigen Fall ein IP3 Wert von +45dBm berechnen – und dass ohne irgendwelche zusätzliche Dämpfungsglieder!

5.1.4 Test auf Intermodulation (Teil 3)

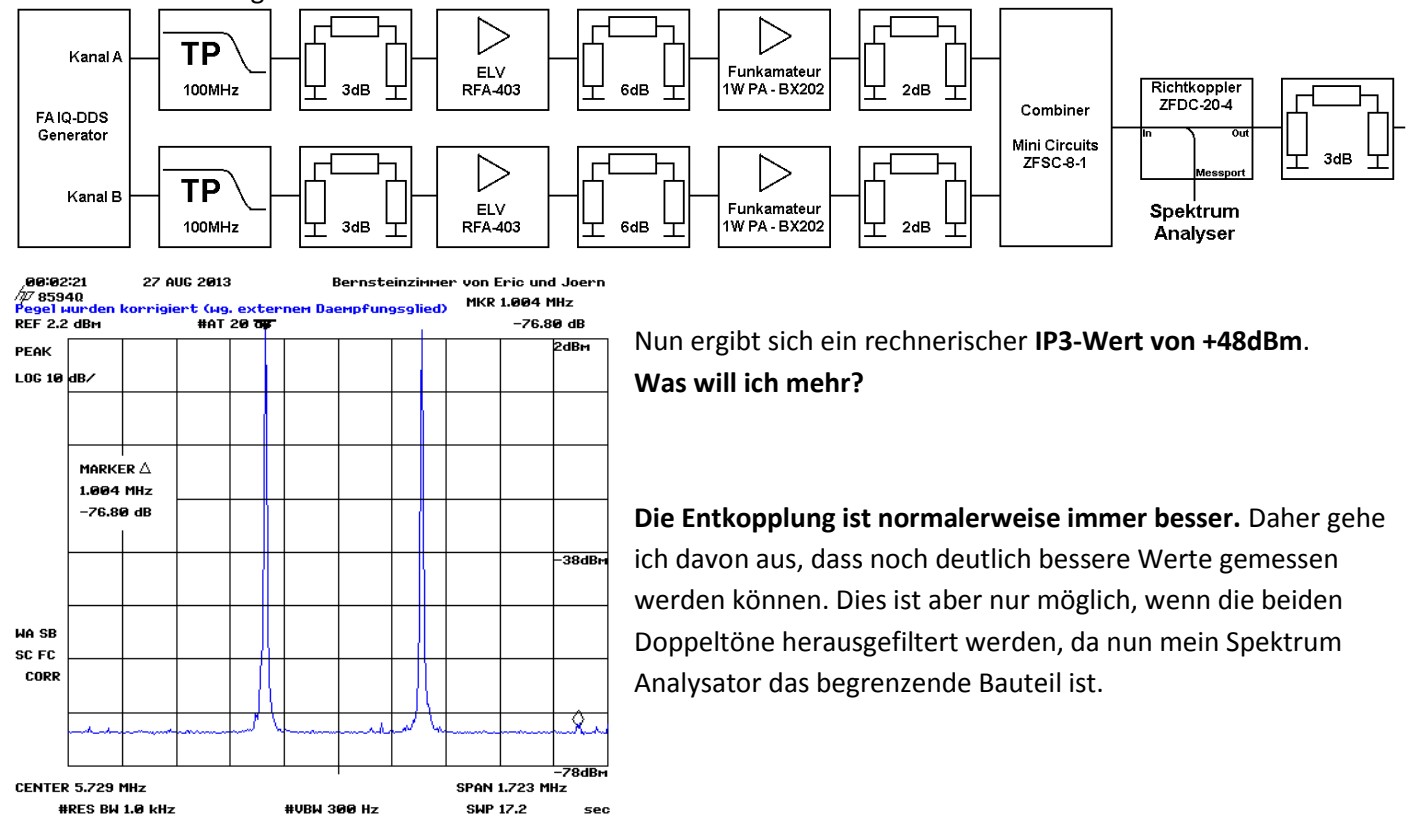
Nun wurden die PAs direkt an den Combiner angeschlossen und auf die Tiefpässe und die 6dB Pads verzichtet. Der Ausgang des Richtkopplers wird nach einem 3dB-Pad offen gelassen.



Wenn ich nun am Ausgang des Richtkopplers ein 3dB Pad schalte, welches ich dann wieder offen lasse, werden die Intermodulationsprodukte wieder etwas weniger.

5.1.5 Test auf Intermodulation (Teil 4)

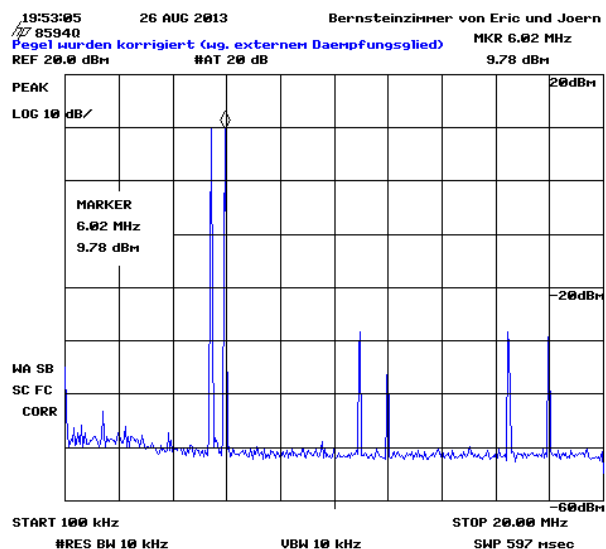
Nun wurde der Combiner an den beiden Eingängen mit jeweils 2db Pads abgeschlossen und am Richtkoppler gemessen, während der Ausgang des Richtkopplers mit einem 3dB Pad abgeschlossen wurde, welches an seiner anderen Seite offen gelassen worden ist.



Nun ergibt sich ein rechnerischer IP3-Wert von +48dBm.
Was will ich mehr?

Die Entkopplung ist normalerweise immer besser. Daher gehe ich davon aus, dass noch deutlich bessere Werte gemessen werden können. Dies ist aber nur möglich, wenn die beiden Doppeltöne herausgefiltert werden, da nun mein Spektrum Analysator das begrenzende Bauteil ist.

5.1.6 Test auf Intermodulation – Übersichtsmessung des Spektrums (Teil 5)



Zum Abschluss wird das Spektrum hinter dem Combiner gemessen, wenn die Eingänge mit 6dB abgeschlossen sind. Die 1W PAs müssen also richtig arbeiten. Trotzdem sind die Oberwellen noch fast 40dB kleiner. Ich denke, dass die Tiefpässe wirklich überflüssig sind.

5.1.7 Überprüfung der Messgenauigkeit der Pegel beim HP8594Q

In meiner großen IP3-Zusammenfassung findet ihr die wichtigsten Überprüfungen.

Die Genauigkeit, mit der mein Spektrum Analyser Pegel misst. Als Pegelgenerator habe ich den XG2 von Elecraft verwendet und ihn auf 7,039 MHz gestellt. Dieser Pegelgenerator kann einen -73dBm und einen -107dBm Pegel abgeben.

-117dBm: Egal was ich am Spektrum Analysator einstelle, werden -74,25dBm bis -74,62dBm angezeigt. (RES BW 300Hz oder 1kHz) und (VBW 10Hz bis 1kHz)

-107dBm: Es werden 107,00dBm angezeigt (Punktlandung ;-)) mit RES_BW 300Hz und VBW 1Hz

-110dBm mit 3dB Dämpfungsglied erreicht: Das Rauschen wird nun stärker und liegt bei -115dBm. Das Signal liegt bei -108,9dBm bis -110,5dBm.

-113dBm mit 6dB Dämpfungsglied erreicht: Das Rauschen liegt nun zwischen -114,5dBm und -115,7dBm. Das Signal liegt bei -111,6dBm bis -112,9 dBm.

Die Messungen haben gezeigt, dass bei niedrigen Frequenzen die Pegelanzeige bei Sinussignalen ausgezeichnet ist. Was will man mehr!

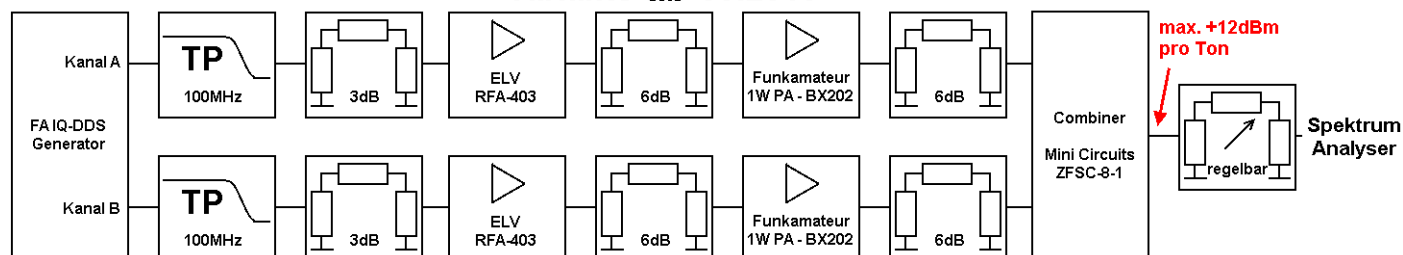
6 Der neue Messaufbau – ab 08.2013

Die Messungen haben gezeigt, dass meine bisher verwendeten Tiefpässe nicht notwendig sind. Auch mit wenigen Dämpfungsglieder können noch IP3-Werte von deutlich besser als +45dBm gemessen werden.

Ab jetzt werde ich den Combiner an den beiden Eingängen mit jeweils 6dB abschließen. Am Ausgang wird ein schaltbares Dämpfungsglied eingeschleift. Der Combiner könnte lt. Datenblatt theoretisch am Ausgang Doppeltöne mit einem Pegel von jeweils +12dB verkraften. Ich bleibe aber bei meinen +10dB.

Meine neue Messanordnung ist also ohne Einschränkungen gut genug für alle meine Messungen.

Variante ab 08.2013



7 Hinweise für Nachbauer

7.1 Combiner

Wenn ihr den von mir genannten Splitter/Combiner kauft, achtet bitte darauf, dass ihr die 50 Ohm Version erwischt!

Die Einfügedämpfung beträgt rund 9,5dB. Weiterhin sind nur die Ports 1&7 wirklich gut entkoppelt. Die anderen Ports müssen jeweils mit 50 Ohm abgeschlossen werden. Wird der Combiner an allen Ports richtig abgeschlossen, könnt ihr eine sichere Entkopplung von über 55 dB erzielen – aber nur dann. Ist der Ausgang völlig falsch abgeschlossen (offen) erzielt ihr nur eine Entkopplung von der Höhe der doppelten Einfügedämpfung. Im ungünstigsten Fall erreicht ihr also die Werte, die ihr mit einer rein resistiven Entkopplung erzielen würdet. Ein solcher Fall tritt aber selten ein, da die Entkopplung viel besser ist. Aus diesem Grund sind Dämpfungsglieder an den Eingängen und an den Ausgängen des Combiners sehr wichtig.

Wirklich gute Isolationswerte erhält man nur, wenn alle drei Ports genau mit 50 Ohm abgeschlossen sind. Schließe den Ausgang mal versuchsweise mit 10, 30, 50, 100, 400 Ohm ab. Du wirst dann sehen, warum im Bereich des Combiners immer mit sehr vielen Dämpfungsgliedern gearbeitet und auf einen möglichst genauen Abschluss der drei Ports geachtet wird.

Als Minimum würde ich vorschlagen: An den Eingängen je 6dB (besser >10dB) und am Ausgang 10dB (besser mehr). Weiterhin sollte man immer für die beiden Einzeltöne die Maximalpegel wählen, die der Combiner an seinen Eingängen verträgt. So kann man möglichst große Dämpfungsglieder wählen.

Wenn du später Objekte mit nicht ganz so guten IP3-Werten vermisst, würde ich die Pegel der beiden Töne nicht verändern, sondern am Ausgang des Combiners das Dämpfungsglied vergrößern, indem ein schaltbares Dämpfungsglied in 1dB Schritten nachgeschaltet wird. Hier gilt: Viel hilft viel 😊.

Bei besonderen Messungen (z.B. Quarzfilter und Bandfilter oder anderen Baugruppen mit sehr hohen Interceptpunkten) sollten versuchsweise auch mal die Dämpfungsglieder am Eingang des Combiners vergrößert werden.

Der Combiner von Uli DK4SX hat den Vorteil, dass die Symmetrie nachjustiert werden kann.

7.2 Verstärker

7.2.1 Verstärker

Damit man genügend Pegel hat, wird man (immer) einen Verstärker mit Tiefpass vorschalten. Mit deinem VNWA kannst du leider nur Kleinsignal-S2P-Parameter bestimmen, da der VNWA etwa -17dBm abgibt. Viele Verstärker verändern aber bei anderen Verstärkungen ihre Impedanz. Das kann bei diesem Anwendungszweck zu Problemen führen. Hier helfen nur Dämpfungsglieder an den Ausgängen der PAs.

Es ist übrigens egal, welcher Port falsch abgeschlossen wird. Die Auswirkungen auf die Isolation sind immer gleich schlecht. Daher werden später Messungen schwieriger, wenn die Objekte eine von 50 Ohm stark abweichende Impedanz haben und gleichzeitig einen sehr hohen Interzeptpunkt, wie z.B. Filter.

Die HF-Generatoren der großen renommierten Hersteller sind aufgrund ihrer Pegelregelung oftmals besonders anfällig. Hier helfen eigentlich nur noch gute Zwischen-/Isolationsverstärker.

In meiner K2-Baumappte werden die benötigten Verstärker ausführlicher beschrieben:

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/experi...k2-mit-baumappte>

Wir raten beim ELV-Verstärker dringend zu den Umbauvorschlägen, die hier beschrieben werden:

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/experimente-am-k2-mit-baumappte> Seite 131-135

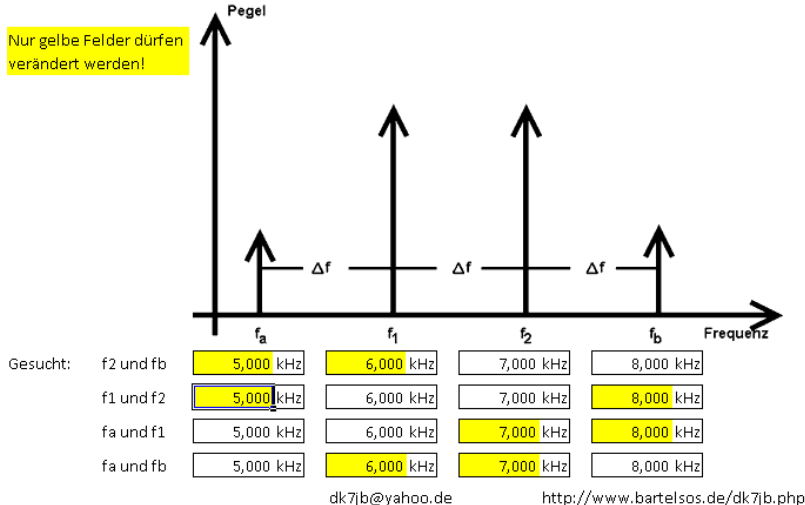
Beim ersten Aufbau lassen sich die selbst gewickelten Drosseln sehr viel leichter auflöten. Später ist das eine elende Fummelei.

7.3 Berechnung der Frequenzen

Berechnung der Frequenzen für eine IP3-Messung

Es werden mehrere Fälle behandelt

Nur gelbe Felder dürfen verändert werden!



Um mir die IP3-Messungen zu erleichtern, habe ich ein kleines Excel-Sheet (*.xlsx) geschrieben. So lassen sich schnell die Frequenzen berechnen, die man für den Messvorgang einstellen muss.

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/ip3-berechnungen>

Vielleicht hilft es euch bei euren Messungen.

7.4 Eingangs-IP3 des Spektrum Analysers

Bei den meisten Spektrum Analysatoren ist der intermodulationsfreie Bereich nur bei etwa 70dBc. Daher muss bei jeder Messung überprüft werden, wo man reale Intermodulationen des DUT misst oder ob der SA nicht schon intermoduliert. Gott sei Dank kann diese Überprüfung sehr leicht durchgeführt werden, indem man den Eingangsabschwächer vergrößert. Wenn dann die angezeigten Intermodulationen kleiner werden, war es der SA und wenn die angezeigten Intermodulationen gleich bleiben, sind es reale Werte des DUT.

7.5 Hinweise zur Genauigkeit

Einige Anmerkungen zur Genauigkeit möchte ich mir an dieser Stelle doch nicht verkneifen, bevor ich auf die IP3-Messung eingehe.

Nur weil einige Messgeräte Pegel in 0,01dB Schritten anzeigen, entspricht dies natürlich nicht einer absoluten Genauigkeit – auch nicht bei den renommierten Messgeräteherstellern (außer bei ganz wenigen Ausnahmen, die hier aber keine Rolle spielen). Viele Spektrum Analysatoren messen über den gesamten Frequenz- und Pegelbereich auch

nur mit +/-2dB Genauigkeit! Da hilft es nur, wenn man bei jeder sich bietenden Gelegenheit die Messeräte mit sehr guten Geräten von anderen OMs vergleicht. Die doch recht großen Fehler des SA kann man verkleinern, wenn man in regelmäßigen Abständen die Selbstkalibrier-Routinen des SA durchlaufen lässt. Wenn ich im Bereich der Kurzwelle die Pegelmessung des SA mit der eines HP436A vergleicht, beträgt die Abweichung meist weniger als 0,5dB. Bei dieser Kontrollmessung kann man leicht in eine Falle tappen: Der SA misst selektiv und der Pegelmesser kumuliert die Pegel des Signals und auch alle Obertöne. Abhilfe: guten Tiefpass einschleifen.

Nochmals zu der Anzahl von Nachkommastellen. Da die Messgeräte bei einem automatischen Auslesen zu viele Stellen anzeigen, geben ich sie in meinen Bautagebüchern trotzdem an. Für mich ist es sehr viel einfacher, wenn der Leser weiß, dass man keine Pegel auf 1/100dB mit einer absoluten Genauigkeit angeben kann. Wenn ich z.B. Frequenzen automatisch von meinem Zähler einlese, werden die Stellen auf 10^{-10} angegeben. Das entspricht bei mir aber nicht der absoluten Genauigkeit. Es macht viel zuviel Arbeit jedes automatisch generierte Diagramm zu retuschieren ...

Weiterhin ist die Baumappte primär für mich als Nachschlagewerk gedacht und da arbeite ich immer mit den gleichen Messgeräten und bin natürlich an einer stark erhöhten relativen Genauigkeit interessiert. Wenn mir z.B. mein VNWA anzeigt, dass der Frequenzgang eines 10dB Dämpfungsgliedes im Bereich von 1-100MHz bei 1/100 dB liegt und das Messgerät von Eric unabhängig die gleichen Werte anzeigt (anderes Gerät, anderer Ort, andere Zeit), bin ich zufrieden und kann damit arbeiten und bin glücklich (grins). Und noch glücklicher bin ich, wenn auch die absolute Dämpfung auf 0,01dB den gleichen Wert anzeigt. Ich gehe aber davon aus, dass sie bei der PTA abweichende Werte messen würden....

(P.S. Schmunzeln ist beim Lesen dieses Absatzes erlaubt ;-)) Bitte nicht jedes Wort auf die Goldwaage legen.)

Wenn ihr in meiner TRX-Baumappte bei Bandpässen IP3-Werte von +50dBm findet, haben meine Messungen diesen Wert wirklich ergeben. In diesem Bereich erwarte ich aber keine Genauigkeit von 1dB mehr. Hier bewegen wir uns in der „Voodoo-Zone“, da Materialübergänge zwischen Stecker und Kabel schon ähnliche Intermodulationen hervorrufen. Vielmehr ist es als Bereich zu verstehen. Und „Messwerte“ von +50dB sind eben besser als Messwerte von +40dB ;-). Ich gehe einfach davon aus, dass der kundige Leser weiß, wie groß in diesem Bereich die Genauigkeit sein kann. Daher gebe ich in der Regel auch die Randbedingung der Messung mit an. Zu der Problematik eines IP3-Wertes bei Filtern gehe ich an späterer Stelle ein (s. auch TRX-Basteltagebuch).

Sei kritisch mit deinen Messwerten. Fallen gibt es reichlich. Eine gewisse Leidenschaft ist notwendig um die Hürden zu überwinden.

Diese Messungen zur Überprüfung der Linearität von Baugruppen und Bauteilen ist nicht trivial. Ich hoffe, dass ich deutlich gemacht habe, dass man sich mit seinen Messgeräten und dem Messverfahren sehr gut auskennt. Genauso wichtig ist auch, dass man die mathematischen Hintergründe der Störentstehung und den Grundgedanke des IP3-Messverfahrens verstanden hat. Hier empfehle ich euch die ausgezeichneten Artikel von Uli DK4SX.

Zur Kontrolle der Messeinrichtung als solches und ob das Messobjekt korrekt messtechnisch erfasst worden ist, bietet sich ein einfaches Verfahren an. Hier zitiere ich Uwe DK4SX: „Reduziert man den Pegel beider als Störer fungierenden Messgeneratoren um jeweils 1 dB, so müssen Intermodulationsprodukte 2. Ordnung um 2 dB und solche 3. Ordnung um 3 dB zurückgehen. Ist das nicht der Fall, wird entweder bereits der Messplatz übersteuert oder Messplatz plus Messobjekt oder nur das Messobjekt. Ein nicht mehr dem mathematischen Zusammenhang resultierendes Ergebnis bedeutet, dass bei zu hoher Aussteuerung bereits Störprodukte höherer Ordnung entstehen, die sich mit den zu messenden überlagern. Folglich muss mit geringeren Störpegeln gemessen werden. Das bedeutet aber auch, dass u. Umständen der Spektrumanalyzer einen höheren Dynamikbereich aufweisen muss um, die IM-Produkte noch richtig anzeigen zu können. Selbstverständliche Voraussetzung ist natürlich, dass die Signalabschwächung um 1 dB präzise genug ist und der Analyzer das Ergebnis auch präzise anzeigen kann.“

Für den wichtigsten Hinweis habe ich noch nicht den richtigen Ort gefunden:

Eure Messergebnisse sind nur dann real, wenn ihr euch weit außerhalb des 1dB-Kompressions-Bereiches befindet.

Wenn ihr die Pegel so wählt, dass ihr einen IMD-freien Bereich von 60dB messen könnt, dürft ihr euch zurücklehnen und den Wert dokumentieren. Die im vorhergehenden Absatz beschriebene Kontrollmessung wird dann in der Regel immer bestanden. Diesen Trick habe mal in deiner AppNote von Mini-Circuits gelesen.

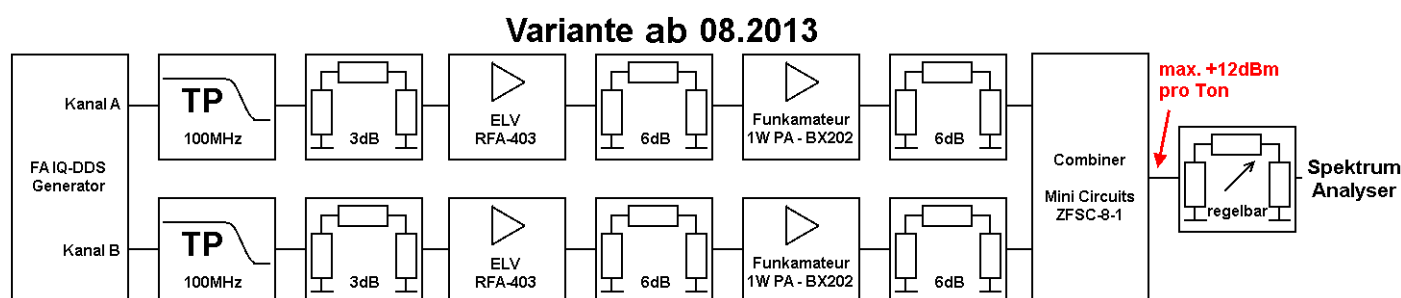
7.6 Tone Generator für 145 Mhz

In der Zeitschrift VHF Communications ist 04/2002 von Wolfgang Schneider DJ8ES ein 2-Ton-Generator beschrieben worden, der für 145 MHz eine Ausgangsleistung von 13 dBm je Doppelton liefert:

<http://www.vhfcomm.co.uk/pdf/Two%20Tone%20Generator.pdf>

8 Messablauf: Schritt für Schritt

Hier folgt eine Schritt für Schritt Anleitung, wie Eric sie sich gewünscht hat ;-). Ich beziehe mich auf den neuen Messaufbau, der in Kapitel 6 (Seite 14) beschrieben wurde.



1. Alles wie oben gezeigt aufbauen. Das regelbare Dämpfungsglied auf 0dB stellen. Es muss überprüft werden, dass bei Durchlass die Dämpfung kleiner 2dB ist. Der Grund ist, dass am Ausgang des Combiners die beiden Töne nicht jeweils mehr als +12dBm haben dürfen und wir am Ausgang des regelbaren Dämpfungsgliedes mindestens +10dBm haben wollen.
2. Vor dem Einschalten müssen die Pegel am IQ-DDS-Generator leicht abgesenkt werden (Grund: Schutz).
3. Den Spektrum Analyser an den Ausgang des regelbaren Dämpfungsgliedes anschließen. Zum zusätzlichen Schutz des Spektrum Analysators muss ein 10dB Dämpfungsglied in einer 2W Ausführung dazwischen geschaltet werden. Natürlich muss dieses Dämpfungsglied bei den weiteren Berechnungen wieder heraus gerechnet werden. Der sachkundige Bediener darf selbst entscheiden, wann er auf dieses paranoiae Schutzhilfsmittel verzichten möchte ☺.
4. Nun werden die gewünschten Frequenzen mit meinem Excel-Sheet berechnet (s. Homepage) und eingestellt (z.B 6,5MHz und 7MHz; die IP3-Produkte werden dann bei 6,0MHz und 7,5MHz liegen).
5. Die Pegel werden nun am Generator so eingestellt, dass am Ausgang des regelbaren Dämpfungsgliedes je +10dBm anliegen. An dieser Stelle vergisst man gerne das Schutz-Dämpfungsglied (vor dem SA) zu berücksichtigen. Dieser Fehler wird gern immer wieder gemacht – leidvolle Erfahrung...
6. Nun muss der Eigen-IP3 der ganzem Anordnung überprüft werden: An unserem Spektrum Analyser (HP8594Q) wird nun alles so eingestellt, dass die Doppeltöne hart an der oberen Bildschirmgrenze zu sehen sind (oder sehr leicht darüber). Mit dem Schutzdämpfungsglied (10dB) ergibt sich ein Referenzpegel von -1dBm! Nun muss der Span und die Mittenfrequenz so eingestellt werden, dass die möglichen Intermodulationsprodukte sich in der Nähe vom Bildschirmrand befinden. Resolution- und Video-Bandwidth müssen sinnvoll angepasst werden, um eine möglichst rauschfreie Darstellung zu gewährleisten. Wenn die Messanordnung sehr gut ist, sollten bei Eric und mir keine Intermodulationsprodukte zu sehen sein.

Wenn wir also einen realen Pegel von je +10dBm messen und der Spektrum Analysator einen intermodulationsfreien Raum von 75dB hat, folgert daraus ein IP3 der Messanordnung von $(75\text{dB}/2)+10\text{dBm}=48\text{dBm}$. Hier ziehen wir zur Sicherheit noch einige dB ab und lehnen uns dann glücklich zurück, weil dieser Wert unsere Träume mehr als erfüllt. Nun können wir mit den Messungen beginnen:

7. Nun messen wir als erstes Versuchsobjekt einen dritten ELV-Verstärker RFA-403. Bevor wir ihn anschließen, wird das regelbare Dämpfungsglied auf 30dB gestellt (Schutz). Der Verstärker wird dann angeschlossen.
8. Nun wird langsam die Dämpfung verringert, bis die ersten Intermodulationsprodukte sichtbar werden. Hierbei muss der Referenzpegel des Spektrum Analysers immer wieder so angepasst werden, dass die beiden Doppeltöne sich in der Nähe des Referenzpegels, am oberen Rand des Displays befinden. Vereinfacht: Die Spitzen sollen immer oben bleiben, damit die Intermodulationsprodukte unten aus dem Rauschen heraus wachsen können.
Achtung: Achtet immer darauf, dass ihr immer weit entfernt genug vom zulässigen Maximalpegel des SAs bleibt. Auch eine sehr kurze Spitze kann das teure Messgerät für immer in die Jagdgründe entführen... ☹
9. Die Erfahrung zeigt, dass realistische IP3-Messwerte erst bei einem intermodulationsfreien Bereich von größer 60dB sicher erhalten werden. (Quelle ‚minicircuits‘ -> Kapitel 2)
10. Hier eine Messung an einer recht linearen 1W-PA (ich möchte nicht wissen wie ‚nicht-lineare‘ PAs aussehen)

Pegel vor dem Verstärker (Sicherheits-Dämpfungsglied heraus gerechnet)	Pegel nach dem Verstärker (Sicherheits-Dämpfungsglied heraus gerechnet)	Pegel des größten Intermodulationsproduktes (Sicherheits-Dämpfungsglied heraus gerechnet)	Intermodulation sfreier Bereich	OIP3	IIP3
a [dBm]	b [dBm]	c [dBm]	b – c [dB]	(b-c) / 2 + b	OIP3 - Gain
-6,1	+13,6	-35	48,6 *)	+37,9	+18,2
-14,3	+5,4	-55,5	60,9	+35,9	+15,6
-16,0	+3,7	-62,5	66,2	+36,8	+17,1

Gain wird einmal für die Frequenz bestimmt, z.B. mit dem VNWA (hier Gain = 19,7dB).

*) Dieser geringe Wert führt in der Regel zu verfälschten Ergebnissen

Für eine intensive Messung solle man die Pegel in 1dB-Schritten langsam verkleinert und alle Ergebnisse sauber dokumentieren. Beispiele findet ihr in meinen Baumappen.

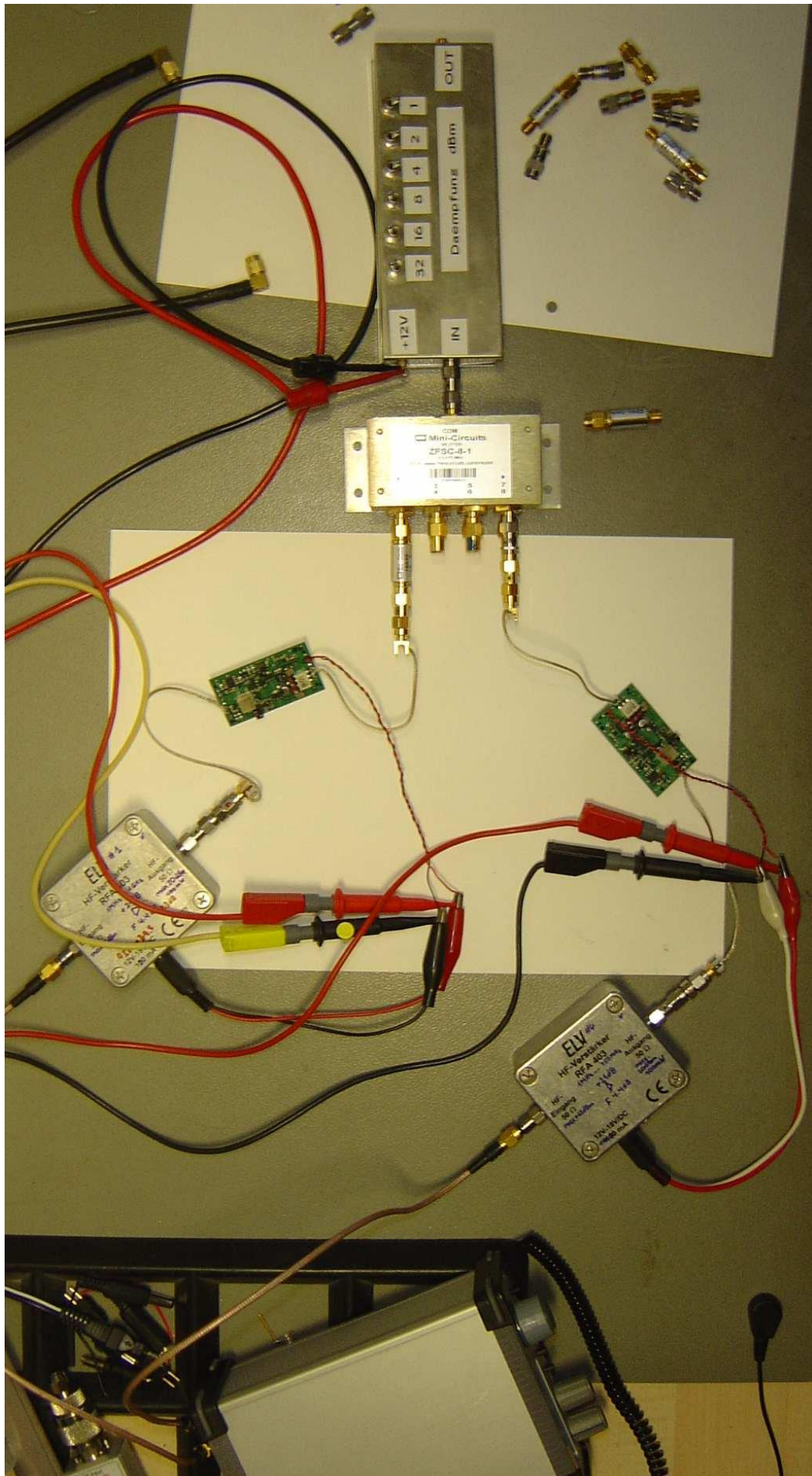
Achtung: Bei jeder Messung muss überprüft werden, dass der Spektrum Analyser nicht eigene Intermodulationen erzeugt!!! Dies ist eigentlich sehr einfach. Man muss nur die Automatikregelung abschalten, die die internen Dämpfungsglieder steuert, damit man sie testweise um weitere 10dB oder 20dB stufenweise vergrößern kann. Nur wenn die Höhe der angezeigten Intermodulationsprodukte hierbei konstant bleibt, liefert der SA keine zusätzlichen eigenen Beiträge. Typischerweise zeigen sich solche internen Intermodulationsprodukte beim Umschalten der internen Dämpfungsglieder durch plötzlich Sprünge. Dann muss einfach solange das interne Dämpfungsglied vergrößert werden, bis der Effekt verschwunden ist. Leider steigt dann auch der Rauschpegel an. Es gibt eben nichts umsonst...

11. Wie sind diese Messdaten der 1W-PA zu bewerten?

Wenn man diese sehr gute 1W-PA (+30dBm) als ultra-linearen Verstärker betreiben möchte, darf sie bestenfalls +5dBm abgeben (d.h. 3,3mW!). Um die Kirche im Dorf zu lassen... Eine solche Linearität wird vielleicht in Kabelnetzwerken verlangt, aber nicht von einer normalen CW oder SSB-PA. Daher reicht im normalen PA-Sendebetrieb etwas 30dB intermodulationsfreier Raum. Die bei diesen Messungen angesetzten 60dB intermodulationsfreier Raum waren aber notwendig um den künstlichen IP3-Wert korrekt bestimmen zu können.

12. Ein kurzer Hinweis noch für den interessierten Leser: Wenn der Eingangspegel um 1dB verändert, müssen die Intermodulationsprodukte sich um 3dB auch verändern. Bei dieser ersten kurzen Anleitung habe ich auf explizite Überprüfung verzichtet.

Hier noch zum Abschluss der erste fliegende Aufbau von Eric:



9 IP3 Messungen an Quarzfiltern

Die IP3-Messung an Quarzfiltern weist einige Schwierigkeiten gegenüber der Messung an Verstärkern auf:

- Quarzfilter dürfen nicht mit großen Pegeln gemessen werden, damit sie nicht zerstört werden. Bis ich genauere Informationen habe, werden Quarzfilter im Sperrbereich maximal mit 0dBm und im Durchlassbereich mit -5dBm gemessen. Diese Pegel sind eigentlich für einen Quarzfilter sehr hoch und stellen eher eine Obergrenze dar, damit sie nicht beschädigt werden.
Sehr hohe Interzeptpunkte bei Pegel von unter 0dBm zu messen stellt sehr hohe Ansprüche an den Dynamikbereich des Spectrum Analyser. Wie gut diese Messungen mit dem FA-SDR durchgeführt werden können, muss sich auch erst noch herausstellen.
Dass stellt eine sehr hohe Anforderungen an den Spektrum Analyser.
- Bei Inband-Messungen müssen die beiden Töne sehr dicht beieinander liegen. Mein SA ist ein HP8594Q und hat eine minimale ResBW von 1kHz, was hierfür viel zu wenig ist.

9.1.1 Berechnung des IIP3 und des OIP3 bei Quarzfiltern oder anderen Filtern

Die Berechnung des IP3-Wertes bei Quarzfiltern bedarf einer Absprache, da bei Außerbandsignalen die beiden Töne durch den Filter stark abgeschwächt werden und nicht mehr am Ausgang des Filters gemessen werden können. Es besteht aber die Möglichkeit die IP3-Werte analog zum normalen Verfahren zu berechnen, wenn man die Gleichung so umstellt, dass man sich auf den Eingangspegel bezieht und die Verstärkung (Beim Quarzfilter -2dB) mit einrechnet. Auch wenn diese Umrechnung strenggenommen nur für Verstärker gilt (Umrechnung von (I) nach (II)), ist dies Vorgehen sinnvoll -> Wie soll man sonst vorgehen? ;-)

$$(I) \quad OIP3 = 0,5 \cdot (IMD3) + P_{OUT}$$

IMD3:=Intermodulationsfreier Raum

$$\text{mit } IMD3 = P_{OUT} - P_{IM3} \text{ ergibt sich}$$

P_{OUT} := P_{Ton} am Ausgang

$$OIP3 = 0,5 \cdot (P_{OUT} - P_{IM3}) + P_{OUT}$$

P_{IM3} := Leistung des Intermodulationsprodukts

$$\text{mit } P_{OUT} = P_{IN} - G \text{ ergibt sich}$$

P_{in} := P_{Ton} am Eingang

$$OIP3 = 0,5 \cdot (P_{IN} - G - P_{IM3}) + P_{IN} - G$$

$$(II) \quad OIP3 = 1,5 \cdot (P_{IN} - G) - 0,5 P_{IM3}$$

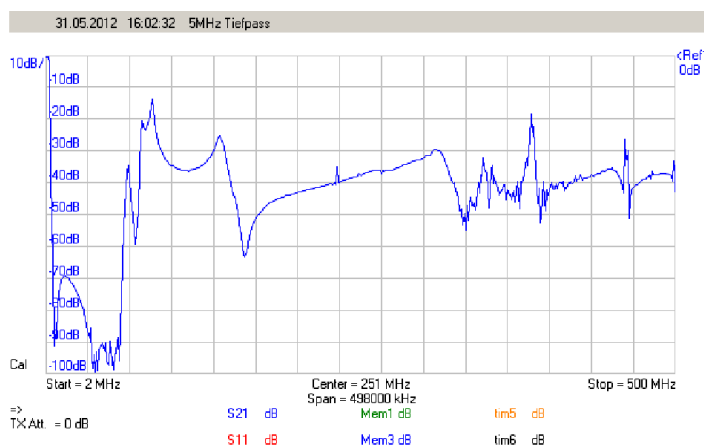
Siehe hierzu auch in der TRX-Baumappte Band 1 Kapitel 8!

10 IP3-Messung an Mischern

Bei Mischern im Kurzwellenbereich kommt als Schwierigkeit hinzu, dass das Ausgangs-Spektrum des zu untersuchenden Mischers bis in den GHz hinein reicht und so den Dynamikbereich des Spektrum Analysers verringert. Bei meinen Messungen an Schaltmischern habe ich dieses Problem so gelöst, dass ich den Mischer direkt mit einem 10dB Dämpfungsglied abgeschlossen habe. Hierauf folgt dann ein Tiefpass, der bei 4,9MHz (bei mir) scharf abschneidet. Auf diese Weise kann der Messbereich wieder um einige dB erweitert werden. Das Dämpfungsglied hinter dem Mischer ist wichtig, damit der Mischer richtig abgeschlossen ist und um den Pegel zu senken. Wird z.B. der Pegel nicht gesenkt, verfälscht der IP3 Wert des Tiefpasses wiederum die Messwerte. Man kommt vom "Höckchen aufs Stöckchen". Schaltmischer vertragen auch nur einen bestimmten Maximalpegel, damit die FETs im Mischer nicht anfangen durchzuschalten. Um hohe IP3 Werte messen zu können, ist aber ein gewisser Pegel wieder

notwendig, weil sonst der Dynamikbereich des Spektrum Analysers nicht ausreicht. Da beißt sich die Katze in den Schwanz. Hier könnte man natürlich einen hochmodernen Spektrum Analyser von R&S einsetzen, die mittlerweile einen gigantischen Dynamikbereich haben. Leider sind diese Geräte nicht zu bezahlen und schenken will mir auch keiner einen. Auch wenn ich unser Familienauto verkaufen würde, könnte ich davon vermutlich gerade das Stromkabel und die Anleitung kaufen hihihi . (Das ist jetzt kein Kaufgesuch)

10.1 Tiefpass 4,9 MHz für die IP3 Messungen



Auch wenn aufgrund der Folienkondensatoren der Sperrbereich über 60 MHz sehr schlecht ist, erfüllt der Tiefpass bei der verbesserten Messung der IP3 Werte bei Mischern seine Dienste. Im Bereich bis 60MHz ist die Filterwirkung sehr gut.

Der IP3 Wert des Filters ist schlechter als der der IP3 Wert des Mischers. Bei der Messung stört dies aber nicht, da direkt hinter dem Mischer 10-20dB Dämpfungsglieder eingeschleift werden. Daher reicht der IP3 Wert des Filter allemal aus.

11 IP3-Messungen an PAs – Eine Sammlung von Ideen

Auf der Interradio 2012 habe ich mich mit zwei sehr netten OMs über die IP3 Messung an PAs unterhalten. Auf dem Nachhauseweg ist mir noch einiges durch den Kopf gegangen, was ich hiermit zur Diskussion stellen möchte:

Wenn man IP3-Messungen an PAs durchführen möchte, müssen die beiden Doppeltöne häufig einen Pegel von bis zu 30-35 dBm haben.

Das Problem ist, dass man bei der Erzeugung der Doppeltöne nicht beliebig die Pegel erhöhen kann, da sich solche Pegel nur noch sehr schwer verarbeiten lassen. Auch ist es sehr schwer die notwendige Entkopplung der beiden Signale zu gewährleisten. Nicht ohne Grund fordern die großen Messgerätefirmen wie Agilen oder MiniCircuits, dass der Combiner an allen Ports mit hohen Dämpfungsgliedern abgeschlossen wird. Der Hauptgrund ist, dass die Impedanzen an den drei Ports normalerweise nicht 50 Ohm entsprechen. Auch mit dem VNWA kann dies nicht sicher gemessen werden, da wir keine Hot-Messung durchführen können. Es sind eben nur Kleinsignalmessungen! Nach meinem Kenntnisstand haben PA selten eine Impedanz von 50 Ohm über ihren gesamten Leistungs- und Frequenzbereich. Vermutlich ist das größere Problem der gesamte Leistungsbereich. Aus diesem Grund bin ich der Meinung, dass auf hohe Dämpfungsglieder an allen Ports des Combiners nicht verzichtet werden kann.

Meine Idee ist, dass man am Ausgang des Combiners (nach dem Dämpfungsglieder von min. 10dB) einen Verstärker schaltet, der im Bereich bis 40dBm keine messbaren Intermodulationen erzeugt. Wenn sie deutlich kleiner sind, als die zu erwartenden Intermodulationen der zu untersuchenden PA, ist dies auch kein Problem. Wenn man aber eine hochlineare PA untersuchen möchte, ist es nicht einfach einen solchen Treiberverstärker zu finden, der diese Anforderungen erfüllt. Die Lösung von diesem Problem müsste eigentlich eine zweite hochlineare PA sein – und zwar das gleiche Modell, wie es untersucht werden soll! Die zu untersuchende PA soll bei viel höheren Pegeln (z.B. >100W) sehr wenig Intermodulation aufweisen. Wenn eine solche PA aber nur so schwach angesteuert wird, dass sie 40dBm abgibt, dürften keine Intermodulationsprodukte nachweisbar sein (oder sie sind sehr klein). Damit dürfte das Problem gelöst sein.

Warum soll der Verstärker nach der PA einen Pegel von +40dBm abgeben, auch wenn dies eigentlich nicht notwendig ist. So kann ich zwischen dem Nachverstärker und der zu untersuchenden PA noch einen Tiefpass und eine Dämpfungsglied schalten. Hier zählt jedes dB.

Nun noch zur Frage der Pegelverstellung. Der beste Ort ist zwischen Nachverstärker (+Tiefpass) und der zu untersuchenden PA, da so die Anpassung erhöht werden kann. Da kein OM verstellbare Leistungsdämpfungsglieder hat, kann an dieser Stelle die Regelung nur grob erfolgen. Die Feinregelung sollte mit einem verstellbaren Dämpfungsglied direkt hinter dem Combiner erfolgen. Ich bin der festen Überzeugung, dass auf die Dämpfungsglieder nach dem Combiner nicht verzichtet werden kann.

12 Emailverkehr mit Uli DK4SX

Hallo Jörn,

vielen Dank für die schöne Zusammenfassung und das Beisteuern vieler eigener Ideen. Habe Deine Doku gleich mal abgespeichert.

Zwei Anmerkungen möchte ich machen - Du kannst mir sicher dazu noch etwas sagen:

1) Ich habe jetzt noch nicht bis ins Detail gelesen, aber wozu sind die Tiefpässe bei der IM-Messung gut? Auch Schnorrenberg schließt an seine Generatoren für den IM-Messplatz Tiefpässe nach. Er ging davon aus, dass gemäß der mathematischen Beziehung die Frequenzen $2 * f_1 \pm f_2$ usw. die doppelten der Eingangsfrequenzen für präzise Ergebnisse zu unterdrücken sind. Dabei hat er (und manch anderer) jedoch nicht beachtet, dass das nur die mathematische Beziehung ist, wogegen in der Realität die Frequenzen $2 * f_1$ und $2 * f_2$ in der dritten Potenz (der Potenz der Entstehung der IM3) gar nicht vorkommen! Also sind - wenn das der Grund ist für das Anschalten der Tiefpässe - diese völlig unnütz. Auch bei der Messung von Mischern, die per se alle Mischprodukte und deren Oberwellen erzeugen, ist die Vorschaltung von Tiefpässen im Prinzip sinnlos. M. E. sind die Tiefpässe insofern eher schädlich, als sie eine breitbandige Anpassung an 50 Ohm und eine breitbandige Isolation ausschließen.

2) Der Grund, warum auch ich in meinen ersten Jahren im QRL, wo ich mich intensiv mit IM-Messungen beschäftigte, diese für Quarzfilter immer falsch (zu niedrig) bestimmte, war, dass der Kombiner bei nur schmalbandigem Abschluss und daher breitbandigem Fehlabschluss (das gilt allgemein für alle selektiven Schaltungen) einen Gutteil seiner Isolation einbüßte und daher das IM-Produkt zu hoch und daher der IM-Abstand zu gering ausfiel. Darauf ist sehr sorgfältig zu achten und es ist sinnvoll, hier das Messobjekt stark vom Kombiner zu entkoppeln.

73, Uli, DK4SX

Hallo Uli,

schön mal wieder von dir zu hören. Ich bin gespannt, ob meine Antwort ausreichend ist, da sie noch etwas unstrukturiert ist.

Du hast richtig die Problematik mit dem schmalbandigen Abschluss bei Messungen an Quarzfiltern beschrieben. Ich stimme dir voll zu ;-). Wenn man sich viele Schaltungen von Empfängern ansieht, sieht man häufig einen Mischer, der mit einem Diplexer abgeschlossen wird und anschließend gleich den Quarzfilter. Hier wird der Mischer dann trotz Diplexer nicht richtig abgeschlossen und man erzeugt so schlechtere IP3-Werte. Hier fehlt dann ein guter breitbandiger Trennverstärker.

Wenn ich mit großen Pegeln arbeiten möchte, verstärke ich die Signale vom HF-Generator mit Vorverstärkern und 1W-PAs. Hierbei treten natürlich bei Vollauststeuerung viele starke Oberwellen auf. Jetzt kann man sich natürlich die Frage stellen, ob sie stören können. In den meisten Fällen wohl eher nicht.

Wenn man aber alles am Anschlag betreibt, weil man Verstärker vermessen möchte, die einen IIP3 von über +40dBm haben oder man Bandfilter vermisst und sie mit +10dBm beaufschlagt und dann nach Intermodulationsprodukten kleiner -100dBm sucht, möchte ich sicher sein, dass nicht irgendwelche Störungen mit das Leben schwer machen. Es

soll einfach nur eine Fehlerquelle ausgeschlossen werden, indem die Messanordnung entlastet werden soll. Siehe hierzu auch den folgenden Text zu den Quarzfiltern.

Meine Tiefpässe haben ein sehr gutes S11 und S22 und reichen eher die vermutlich mittelprächtige Anpassung der PAs weiter. Am Eingang des Combiners sind dann, wie du auch geschrieben hast, wieder Dämpfungsglieder notwendig.

Auch wenn ich auf die Dämpfungsglieder verzichte, ist es mir noch nie gelungen Eigen-Intermodulationsprodukte nachzuweisen. Da begrenzen eher die Maximalleistung von meinem Combiner und mein Spektrum Analysator (HP8594Q) das Messgeschehen. Auch mit einem modernen SA von R&S ist es mir nicht gelungen.

Die Vermessung von Quarzfiltern sind eine spezielle Sache. Auch hier stimme ich dir zu. Hier würde ich das schaltbare Dämpfungsglied (am Ausgang des Combiners) möglichst groß einstellen. Vermutlich reichen hier 12 dB noch nicht aus, wenn man IPs von bis zu +40dBm sicher messen können möchte. Letztlich ist es aber egal, wo am Combiner die Dämpfungsglieder sitzen.

Im Sperrbereich würde ich bei Quarzfiltern für die beiden Doppeltöne Signale von bis zu 0dBm wählen.

Auf der kommenden UKW Tagung wird Henning Weddig einen Vortrag zu IP3-Messungen an Quarzfiltern halten.

Wenn man bei Mischern IP3-Werte von größer +40dBm messen möchte, muss der Mischer am Ausgang erst mit einem 10-20dB Dämpfungsglied abgeschlossen werden. Nun muss dann ein guter Tiefpass folgen. Fehlt dieser Tiefpass, wird aufgrund der ganzen Störungen der Eingangsmischer des Spektrum Analysators völlig überfahren. Bei Messungen an Mischern habe ich diese Übersteuerung des SA-Eingangsmischers schon nachweisen können (TRX2012 Baumappe Band 1 Seite 84 Kapitel 6.2.1.). Das ist auch der Grund, warum ich bei anderen Messungen auf die Tiefpässe vor dem Combiner nicht verzichten möchte. Der für den Spektrum Analysator angegebene Bereich von 75dB (bei meinem SA) gilt auch nur für ein Doppeltonsignal und nicht für ein ganzes Spektrum.

Ich freue ich schon auf deine Antwort und möchte dich bitten meine Dokumente sehr konstruktiv kritisch zu lesen.

Wenn du nichts dagegen hast, werde ich diese Korrespondenz mit in das Basteltagebuch aufnehmen. Sie ist für andere Leser bestimmt sehr interessant und ruft dann weitere interessante Antworten hervor. Änderungswünsche kann ich dann natürlich hinterher immer noch berücksichtigen.

Grüße Jörn

13 Ergebnisse von IP3-Messungen an einigen Objekten (DL7LA Okt.'12)

Günter DL7LA hat einen IP3-Meßplatz aufgebaut, der meinem sehr ähnelt und erst einmal alles vermessen, was ihm in die Finger gekommen ist ;-). Die Messwerte beziehen sich auf die persönlichen Messobjekte von Günter. Der Rückschluss auf andere Exemplare ist nur sehr bedingt möglich. Es wurde auch nicht untersucht, warum bestimmte Werte von Herstellerangaben abweichen. Der Abschnitt wurde von Günter verfasst.

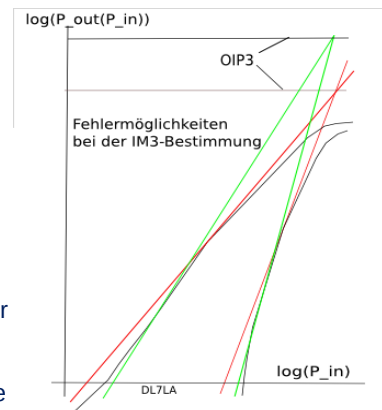
Alle Werte werden in dBm angegeben. Alle Werte beziehen sich auf den Output-Intercept (OIP3), also z.B. ohne Berücksichtigung von Mischdämpfung oder -Gain (z.B. bei AD-831), für Filter sind es in-Band-Werte.

Ergebnisse mit * sind unsicher, weil jenseits der Messmöglichkeiten oder zu inkonsistente Ablesungen (z.B. unterschiedlich hohe IM-Produkte). Bei hochlinearen Bauelementen wird die Bestimmung aus den Transferkennlinien systembedingt immer unsicher sein (vgl. Graphik).

Bei digitalen Systemen ist die differentielle Nichtlinearität der Transferkennlinien häufig unabhängig vom Pegel, dazu kommen Fehler in den Algorithmen.

Gemessen wurde jeweils beim deutlichen Einsetzen von IM3 am 50-Ohm-Analysator Takeda Riken TR-4172 (eigener IP3-Punkt 47 dBm bei 40 dB Input-Attenuation), wenn 3-dB-Sprünge im Eingang (P_{in}) zu >3dB-Sprüngen, vorzugsweise ca-10-dB-Sprüngen am Ausgang P_{out} führten. Quellen für Testsignale waren der Messplatz nach DK7JB oder für Verstärker der direkte DAC-Ausgang des Eigenbau-N2ADR-Transceivers, der 2 x -7 dBm bei einem IM-Abstand von >78 dB liefert (HiQSDR ist wegen des integrierten Nachverstärkers mit 55 dBc nur bedingt einsetzbar).

LO-Signale für Mischmessungen aus einem DDS mit einem AD9912, Zweitonsignale > 10 MHz aus zwei HP-8654-Generatoren, < 10 MHz aus einem ELV-DDS und einem Funktionsgenerator HP-3314, jeweils alles getrennte Netz-Speisungen und Versorgungsnetzteile. Die Ausgänge der Messobjekte (sofern anwendbar) waren perfekt terminiert.



Perseus (Serial# 607) +25 (statt propagierter +31 dBm) 14-Bit ADC
 N2ADR Eigenbau und HiQSDR je +25 (14-Bit-ADC)
 Yaesu FT890 (Ringmischer mit 4 FETs) Bj. ca. 1995 +25
 DL7AV-Preselektor mit T622-Trafos und 12,5-mm-Ringkernen @20 MHz +38
 50-kHz-Raster-10.7MHz-Filter (ex BOSCH KFT-160, 70/80er Jahre) +35
 21,4-Mc-FM-Filter aus prof. Handfunk-Gerät +25.
 AD-831, Gilbert-Zelle mit Nachverstärker, $a_{mix} = 0$ dB +24
 PA3AKE-Mixer, T4-1-Trafos mit 2 x FSA-3157 und ACT04, ZF 9 MHz >+40 (*)
 dito, ZF = 40 MHz +25
 dito, mit Trafos T1-6T ZF 40 MHz +25
 dito, ZF 10,7 MHz, f_e ca 10 MHz, f_{LO} ca 20 MHz +37
 dito, ZF 21,4 MHz, f_e 7 MHz, f_{LO} ca 28,4 MHz +30
 dito, mit Trafos T1-6T ZF 9 MHz >+40(*)

MCL-RAY-3 (Level-23-Mixer) @ZF = 80 MHz +35
 MCL ZFY-11 Level 23 Ringmischer +32
 MCL-SRA-3H Level 17 +25
 IE1-Ringmischer (Level 7) +16
 KVG-Quarzfilter XF-41 SO1, 41 MHz, BW = 10 kHz +31
 Networks-Intl. Corp, Quarzfilter 40,368 MHz, BW 36 kHz +35
 versch. ITT / Cathodeon-Quarzfilter 1,4 MHz, 50 Ohm, durchschnittlich +30

RFT-MF200-Serie, mech. Filter 200 kHz +20 bis +24
 ZFSC-2-1 Combiner (BNC-Buchsen) von MCL +35
 PSC-2-1 MCL, Combiner, +35
 ZF-DC-20-5, MCL, 20-dB-Koppler +30
 ANZAC Mod. 102, Combiner 10...1200 MHz (SMA-Conn) bei 10 MHz +30
 ANZAC, dito bei 70 MHz +36
 Cathodeon 81,4-n4 Quarzfilter 50 Ohm, 81 MHz, BW 16 kHz +25
 RFT MQF 70,2-1600/2, Quarzfilter 3 kOhm, 3 Quarze und 2 LC-Glieder +20
 Eigenbau-Breitbandverstärker mit GALI-5 und GALI-51 +30
 WJ-6201-59 Watkins-Johnson, 30-dB-Verstärker 5...1000 kHz +5*
 WJ-6201-85, dito, 40 dB, 10...1000 kHz +11

Die Ergebnisse der Schottky-Ringmischer entsprechen im Wesentlichen den MCL-Mitteilungen, dass ihr OIP3 etwa 10 dB über der drive-power liegt. In Filtern des MF-200-Typs von RFT sind die Treiberspulen auf Ferritkernen, ebenso enthält das 70,2-MHz-Filter 2 LC-Kreise mit Ferrit-Abgleich. Bei der Messung hochohmiger Filter (Keramik-Anregung) wären daher Transformationskreise möglichst nur mit Luftspulen zu bilden.

Ich bedanke mich bei Günter für diese Messungen. Viel Spaß bei weiteren Versuchen.

14 Aufbau mit einem resistiven Combiner (von Horst dj6ev)

Zu den IP3-Messungen noch mein Senf:

Solche Teilmengen des Bastelbuchs sind sehr schön, weil sie sich auf einen Aspekt konzentrieren, vielen Dank.

Die Trafo-Combiner-Brücke ist nur dann notwendig, wenn man mit relativ kleinen Ausgangsleistungen (+30dbm) der Generatoren ausgeht. Wir haben uns früher das Leben leicht gemacht, indem beide Generatoren (mit je ECL86) ca. fast 10W lieferten. Hier kann man generell im effizienten C-Betrieb arbeiten, da nur je ein Träger erzeugt wird. Mit Leistungsabschwächern von je 35-40db ist die gegenseitige Entkopplung von 70-80db schon so hoch, dass hier auch ein resistiver Combiner ausreicht. Die Ausgangskreise der ECL86 waren als Pi-Filter ausgeführt (Anpassung + Harmonischendämpfung). Die Harmonischen waren dann so weit abgesenkt, dass sie die Messungen von IP3 nicht mehr verfälschten.

(Also, heute mit 2 10W-PA's im C-Betrieb hihhi). Oder mit zwei alten TRXen.....(bei mir z.B. K2 und FT757 oder FT200).

Ich neige eben zu brauchbaren Primitivlösungen ;-))).

Übrigens muss man die Isolation der Trafo-Combiner gar nicht bis aufs letzte dB ausknutschen, da wir ja keine hochgenauen Messungen kleinster Reflexionswerte durchführen wollen. Eine Isolation von 40db zwischen beiden Zweigen reicht hier sicher aus.

Ich werde mich wohl nicht mehr überwinden, einen dedizierten Messplatz aufzubauen. Wozu habe ich denn Jörn&Co? :>)))) (Anmerkung der Redaktion: Horst lässt andere für sich basteln (breites grinsen))

15 Messungen ohne Spektrum Analyser

15.1 Messungen mit dem SDR

Kann man mit dem SDR auch IP3-Messungen durchführen?

Da in den meisten Fällen der IIP3 Wert des SDR nicht gut genug ist, muss dem DUT ein gutes Dämpfungsglied nachgeschaltet werden. Dieses Dämpfungsglied muss so lange vergrößert werden, bis der SDR keine Intermodulationserscheinungen mehr zeigt.

Die Pegelanzeige des SDR muss auch kalibriert werden.

Messungen mit dem SDR, können klappen - oder auch nicht. Ich bin da sehr misstrauisch.

Wie Uli DK4SX in einem Forum mal schrieb, sind IP3 Messungen auch ohne Spektrum Analysator möglich. Er schreibt: „Man sollte nur vorab mit einem präzisen Generator das S-Meter eichen, dann ist dieses als Indikator völlig ausreichend. Und bei Messungen an z. B. Verstärkern oder Sendern reicht eine Analyzer-Dynamik von höchstens 60 dB völlig aus. Man kann also auch mit bescheidenerem Budget und ordentlichen gebrauchten Messgeräten noch hinreichend genaue Messungen durchführen.“

15.2 Messungen mit dem Empfänger (von Horst dj6ev)

Von Horst dj6ev habe ich noch die folgenden Hinweise erhalten: „Die IP3-Messung an Empfängern ohne Spektrum-Analysator wird seltsamerweise recht stiefmütterlich behandelt, obwohl sie schon lange bekannt ist und bei der ARRL als "-97dbm-Methode" (S5) als Standard angewendet wird. Wäre wert, das in den Quellenangaben zu erwähnen. Dietmar hatte diese Methode damals an seinem Hobo zur IP3-Messung angewendet. Ich hatte daraufhin eine kleine Fehlernanalyse beigeleitet. (siehe unten)

Betrachtungen über die IP3-Messung nach der -100dbm Methode

Diese Art der Messung wurde von der ARRL als die der Wirklichkeit am nächsten kommende empfohlen. Sie hat den Vorteil, auch mit einfachen Mitteln durchführbar zu sein (der Empfänger selbst fungiert hier als "Spektrum-Analysator"). Dass man auch hier etwas aufpassen muss, wird nachfolgend beschrieben.

Ausführliche Beschreibungen dieser Messmethode und des prinzipiellen Messaufbaus sind sowohl im "EMRFD" - Buch (Seiten 7.19-7.21) als auch im ARRL-Handbuch zu finden

Ein teurer Spektrum-Analysator ist also für IM3-Messungen an Empfängern gar nicht notwendig

Es wurde schon mehrfach der Einfluss der endlichen Weitabselektion des ZF-Filters auf die Messgenauigkeit der o.g. Methode erwähnt. Ich versuche hier mal, die ganze Geschichte etwas differenziert zu betrachten.

Verwendete Größen und Formeln:

Pim3 = erzeugtes IM3-Signal

Pzw = Zweitonsignal

$P_{im3} = 3 * P_{zw} - 2 * IP3$ Alle Größen im logarithmischen Maßstab (dbm) !

$P_{zw} = (P_{im3} + 2 * IP3) / 3$ (Vorzeichen bei den dbm-Werten beachten)

$IP3 = (3 * P_{zw} - P_{im3}) / 2$

Zweiton-Leistung (je Signal), um $P_{im3} = -100\text{dbm}$ zu erzeugen

Pzw = -33,3dbm bei IP3 = 0dbm

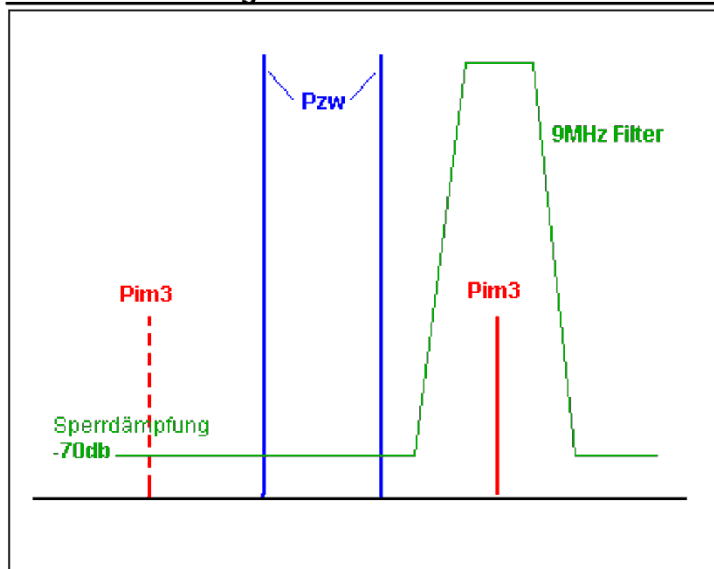
Pzw = -26,7dbm bei IP3 = +10dbm

Pzw = -20,0dbm bei IP3 = +20dbm

Pzw = -13,3dbm bei IP3 = +30dbm

Diese Eingangsleistungen garantieren, dass der Mischer noch weit unterhalb seiner Begrenzung angesteuert wird, also noch im nominal linearen Bereich arbeitet.

Fehler durch mangelnde Weitabselektion des ZF-Filters:



Für alle Berechnungen wird eine Weitabselektion (Sperrdämpfung) des ZF-Filters von -70db angenommen.

Dadurch schlagen die beiden Zweitontträger um 70db abgeschwächt durch und addieren sich zum im Filterdurchlassbereich liegenden IM-Produkt P_{im3} .

(Das "andere" P_{im3} -Produkt hat keinerlei Einfluss auf die Messung).

Da die beiden Signale P_{zw} als gleich groß angenommen werden, addiert sich ihre Leistung:
 $\rightarrow P_{zw} + 3\text{db}$.

Ein breitbandiger Detektor misst nun bei gleichen Eingangssignalen P_{zw} statt der -100dbm für P_{im3} folgende Werte (Die Leistungswerte wurden richtig de-logarithmiert addiert):

(-70 db ↓)

Pzw = -33,3dbm (IP3 = 0dbm) → -103,3dbm +3db (2xPzw) & -100dbm →	Pim3' = ~ -97,1dbm
Pzw = -26,7dbm (IP3 = +10dbm) → -96,7dbm +3db →	Pim3' = ~ -92,8dbm
Pzw = -20,0dbm (IP3 = +20dbm) → -90,0dbm +3db →	Pim3' = ~ -86,8dbm
Pzw = -13,3dbm (IP3 = +30dbm) → -83,3dbm +3db →	Pim3' = ~ -80,3dbm

Dadurch wird der IP3 um ca. folgende Werte zu niedrig ermittelt: (bei 70db Sperrdämpfung)

IP3-Fehler bei IP3 = 0dbm: ~ -1,5db → ~ -1,5 dbm
 IP3-Fehler bei IP3 = +10dbm: ~ -3,5db → ~ +6,5 dbm
 IP3-Fehler bei IP3 = +20dbm: ~ -6,5db → ~ +13,5 dbm
 IP3-Fehler bei IP3 = +30dbm: ~ -10 db → ~ +20 dbm

Man kann sehen, dass bei der Messung höherer IP3-Werte der Fehler drastisch ansteigt. Bei Zweittonleistungen ab -20dbm misst man im Prinzip gar nicht mehr das IM3-Produkt, sondern überwiegend nur noch die unzureichend unterdrückten Zweitontträger!

Allerdings treten diese Fehler nur bei einem breitbandigen Detektor (AGC-Diode! – siehe unten) auf. **Aber:** Der Empfänger hat ja einen Produktdetektor mit NF-Tiefpass.

Normalerweise erzeugt man mit dem Produktdetektor einen NF-Überlagerungston (z.B. 1kHz), dessen Amplitude dann mit einem NF-Voltmeter zur IP3-Messung ausgewertet wird.

Wenn man nun einen Zweittonabstand von 20kHz annimmt, liegen die durch den "Durchschlag" des ZF-Filters erzeugten Signale weit oberhalb der oberen Grenzfrequenz des NF-Teils. In diesem Beispiel beträgt die nächste Störfrequenz mindestens **19kHz**. Selbst eine Dämpfung dieser Frequenz um nur 20db im NF-Teil (ist ja kein HiFi-Verstärker) erzeugt schon keine messbare Verfälschung des IM3-Produktes mehr.

Da nun die erzeugten HF-Signale sehr kleine Amplituden haben (< -80dbm), kann man davon ausgehen, dass die von ZF-Verstärker und Produktdetektor selbst erzeugten IM-Produkte dermaßen klein sind, dass das Messergebnis davon keinesfalls beeinflusst wird.

Hinweis:

Bei einem Zweitonsignal mit nur 5kHz Abstand wird die Sache schon etwas kritischer. Hier kann es passieren, dass die Signale bei mäßig guten Filtern schon auf der Filterflanke liegen und dort nicht nur ungleich große Störsignale erzeugen, sondern u.U. auch deutlich weniger abgeschwächt werden. Evtl. hilft es dann auch schon, auf das "untere" Pim3 Signal abzustimmen, um die steilere hochfrequente Flanke eines Ladderfilters auszunutzen. Sonst kann es hier schon passieren, dass die simplen RC-Tiefpässe im NF-Zweig nicht mehr ausreichen, um eine Störfrequenz von 4 oder 6kHz genügend (min. 20db) gegenüber dem 1kHz-Messton abzusenken.

Meine Empfehlung ist daher, diese Messung grundsätzlich mit einem möglichst schmalbandigen CW-Filter im RX (<400Hz) mit einer entsprechend hohen Weitabselektion durchzuführen (>70db bei ca. 2 kHz Abstand). Dann kann man IM3-Messungen selbst bei nur 2kHz Abstand der beiden Messträger noch zuverlässig durchführen.

Diese Methode ist eine reine Pegel-Verhältnismessung. Daher sind (neben den gut entkoppelten Signalquellen) nur schaltbare Abschwächer notwendig. Solche Dinger kann man mit völlig ausreichender Genauigkeit gut selbst bauen. Bei Empfängern mit höherer Empfindlichkeit (MDS -130dbm oder besser bei b3=500Hz) kann man die Signalpegel sogar noch verringern, um ganz sicher im linearen Bereich zu bleiben.

Der Einfluss der automatischen Empfängerregelung (AGC):

Problematisch kann u.U. der Einfluss der AGC werden, da die AGC-Spannung normalerweise vor dem Produktdetektor – also breitbandig – durch Diodengleichrichtung erzeugt wird. Damit werden auch die unerwünschten Störsignale erfasst.

Solange die eingespeisten Signale so klein sind, dass die AGC noch nicht aktiviert wird, liefern die Messungen korrekte Ergebnisse. Ein Beispiel: die Amplitude aller Signale sei -101dbm ($\sim 2\mu\text{V}$ an 50 Ohm), der Empfänger habe 90db Gesamtverstärkung. Die erzeugte Spitzenspannung von rund 100mV am ZF-Ausgang reicht daher noch nicht aus, um die Schwellenspannung selbst einer Schottky-Diode zu überschreiten. Bei Empfängern mit einer AGC-Schwelle ("Verzögerung") bei z.B. $10\mu\text{V}$ haben eben alle Signale unterhalb dieser Schwelle noch keine Auswirkung.

Völlig anders sieht es aber aus, wenn die AGC schon bei niedrigeren Eingangsspannungen ($\rightarrow$ höhere Verstärkung) oder durch stärkere Eingangsspannungen (Stör- plus Nutzsignal) aktiviert wird und damit die Gesamtverstärkung reduziert. Das kann aber leicht passieren, wenn man den Empfänger "überfährt" oder die Sperrdämpfung des Quarzfilters schlecht ist.

Da bei dem Referenzsignal von -100dbm die Regelung sicher noch nicht anspricht, aber bei den höheren Zweitonsignalen schon herunterregeln kann, wird dann der **Wert für IP3 immer zu hoch** ausfallen. (Durch entsprechendes Überfahren mit noch höheren Zweitonsignalen kann damit - je nach Wirksamkeit der AGC - fast beliebige IP3-Werte erhalten, hi).

Man muss also sicherstellen, dass bei der Messung die AGC entweder noch nicht aktiv ist, oder sie abschalten. Noch besser ist es, sie durch eine fest einstellbare Spannung zu ersetzen, die zwischen Referenz- und Zweitonmessung nicht verändert wird.

So, das wär's zu diesem Thema. Für Hinweise auf Denk- oder grobe Rechenfehler bin ich dankbar.

Horst, DJ6EV 29.8.2008

P.S.: Noch ein paar Amerkungen zu solchen Messungen am HOB0

Das 4-polige SSB-Filter besitzt bei 5kHz Abstand auf der unteren Filterflanke eine Sperrdämpfung von nur max. 50db , auf der oberen Flanke liegt sie bei ca. 70db . Bei der -100dbm -Messung sollte daher auf jeden Fall das Zweiton-Signal oberhalb der Filterfrequenz liegen, um die geschilderten Messfehler zu vermeiden.

Noch besser wäre die IM3-Messung unter Verwendung des CW-Filters. Dort reicht die nominelle Sperrdämpfung auf beiden Seiten auf jeden Fall aus.

Allerdings sollte man vorher mal messen, wie hoch die maximal erreichte Sperrdämpfung der Filter überhaupt ist (kein Aufbau der Filter in geschirmten Kästchen). Sie sollte mindestens die 70db -Marke erreichen, ansonsten gibt es die geschilderten Messfehler unabhängig vom Abstand des Zweiton-Signals.

16 IM-Messungen mit einem nicht-idealen Messplatz (von Horst dj6ev)

Gegeben sei ein Zweitongenerator mit einem eigenen Intermodulationsabstand von nur $IM = 40\text{dbc}$.

Dann ergibt sich bei einer Gesamtmessung Generator + DUT ($IM3'$):

Messung: eff. $IM3$ des DUT:

$IM3' = -30\text{dbc} \rightarrow IM3 = -30,5\text{dbc}$

$IM3' = -37\text{dbc} \rightarrow IM3 = -40\text{dbc} <<<<<$

$IM3' = -38\text{dbc} \rightarrow IM3 = -42,3\text{dbc}$ (→ siehe "Beispiel #2" im Cascade-Prog.)

$IM3' = -39\text{dbc} \rightarrow IM3 = -45,8\text{dbc}$

$IM3' = -40\text{dbc} \rightarrow$ Messung überprüfen, hihi

(oder $IM3\text{-Abst.} = >>50\text{dbc}$)

Beispiel (normiert auf 1mW Träger (0dbm) und $v_{DUT}=1$):

Messung $IM3' = -39\text{dbm} \rightarrow 0,126\mu\text{W}$

Generator- $IM3 = -40\text{dbm} \rightarrow 0,1\mu\text{W}$

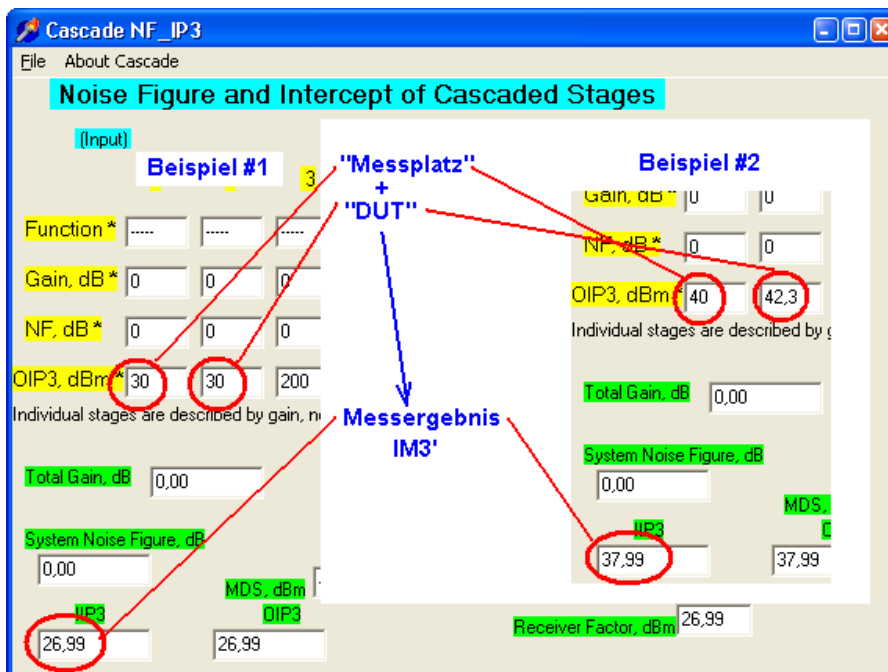
Differenz (zusätzlich generiert im DUT) = $0,026\mu\text{W} \rightarrow -45,8\text{dbm}$

Beliebig skaliert bezüglich Eingangsleistung und Verstärkung

ergibt sich dann eben: $DUT_IM3 = -45,8\text{dbc}$

Durch die Differenzbildung wird's natürlich etwas ungenauer, je kleiner die $IM3$ des DUTs ist.

Mit dem Cascade-Programm kann man die Berechnung einfach durchführen. Dabei ist es egal, ob man mit $IP3$ oder IM -Abstand arbeitet, solange alle Werte die gleiche Dimension besitzen. **Beispiel:**



Man justiert den Wert für "DUT" solange, bis unten "IP3" (oder "OIP3") dem Messergebnis (→ $IM3'$) entspricht.

73, Horst dj6ev

17 Tiefpässe für die IP3-Messung

Die Messungen, die ich Ende August 2013 durchgeführt habe, haben gezeigt, dass normalerweise keine Tiefpassfilter mehr vor dem Combiner notwendig sind. Trotzdem lasse ich diese Sammlung in diesem Dokument.

Hier werden nur 7-poliger Cauerfilter beschrieben.

[80 m Band \(3.500 MHz - 3.800 MHz\)](#)

[40 m Band \(7.000 MHz - 7.200 MHz\)](#)

[30 m Band \(10.100 MHz - 10.150 MHz\)](#)

[20 m Band \(14.000 MHz - 14.350 MHz\)](#)

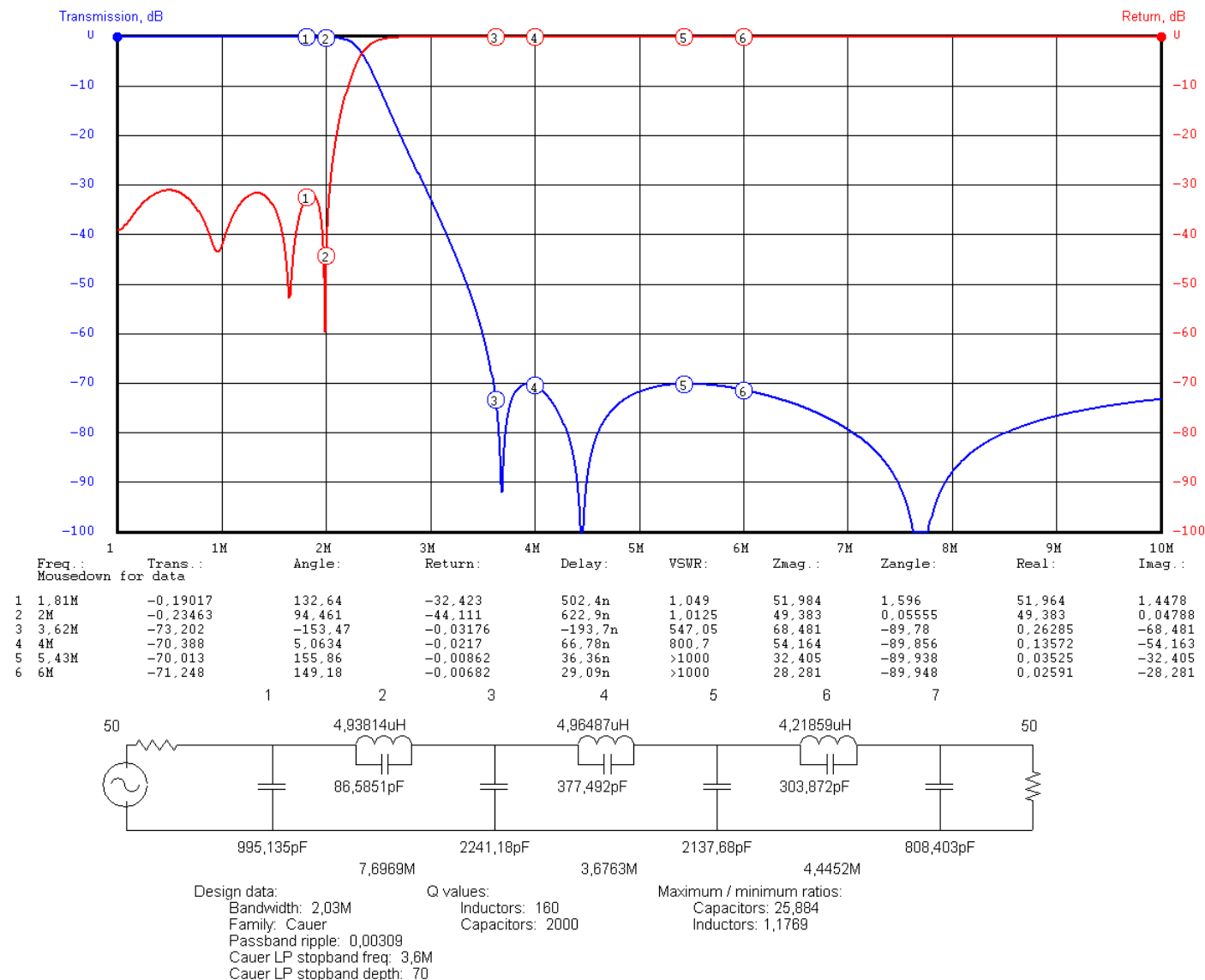
[17 m Band \(18.068 MHz - 18.168 MHz\)](#)

[15 m Band \(21.000 MHz - 21.450 MHz\)](#)

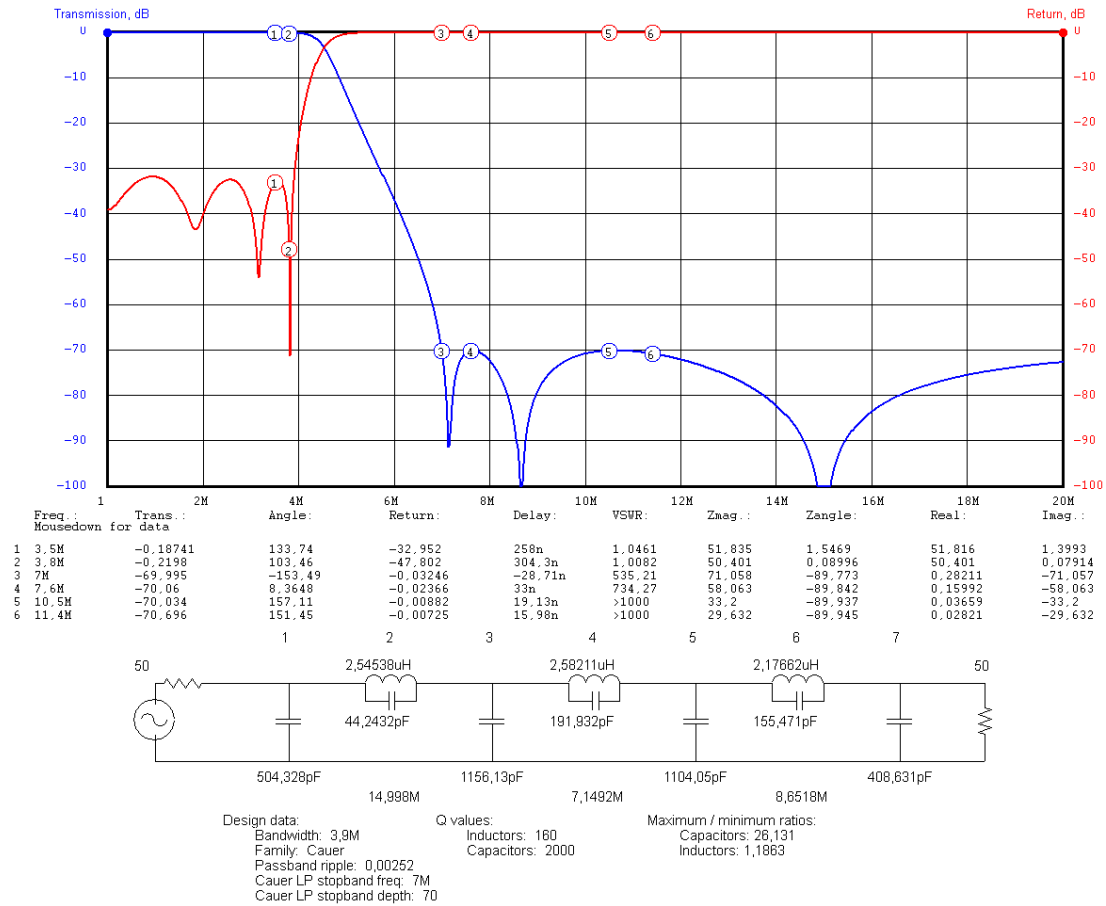
[12 m Band \(24.890 MHz - 24.990 MHz\)](#)

[10 m Band \(28.000 MHz - 29.700 MHz\)](#)

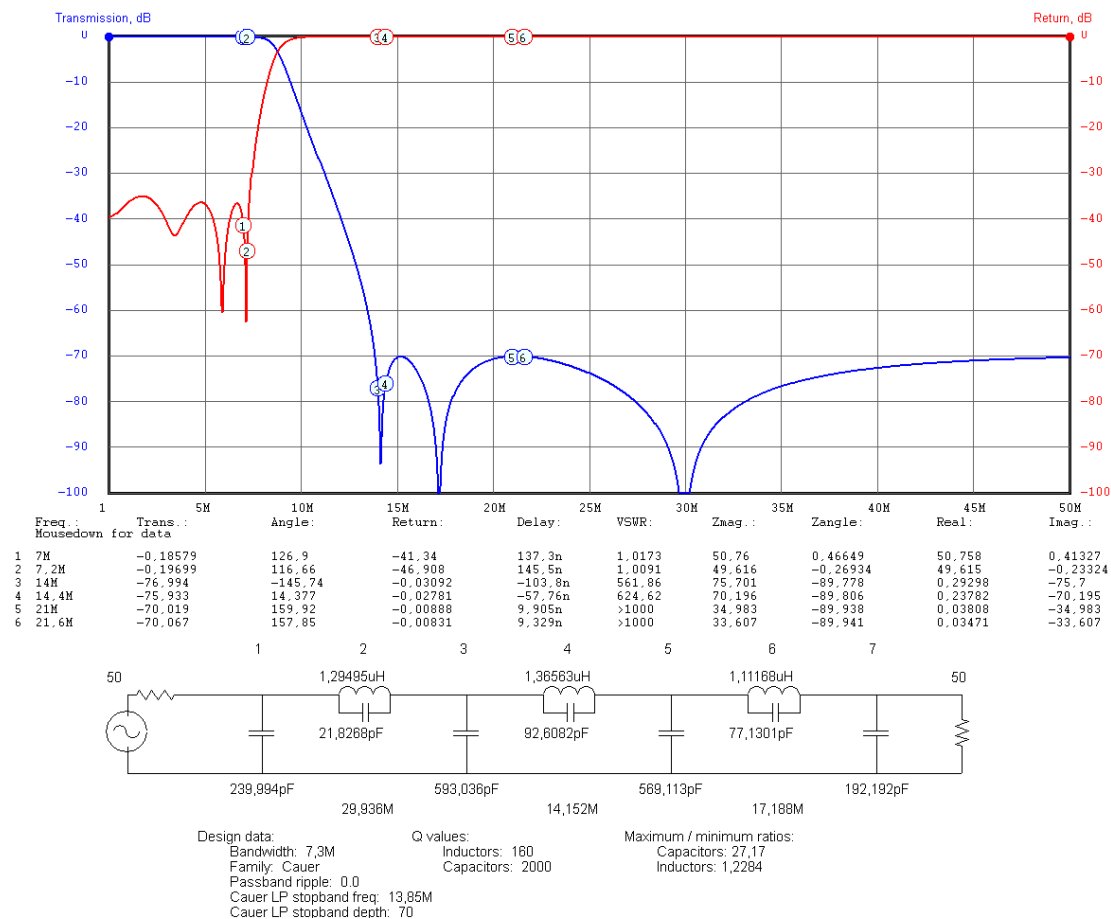
17.1 160m Band



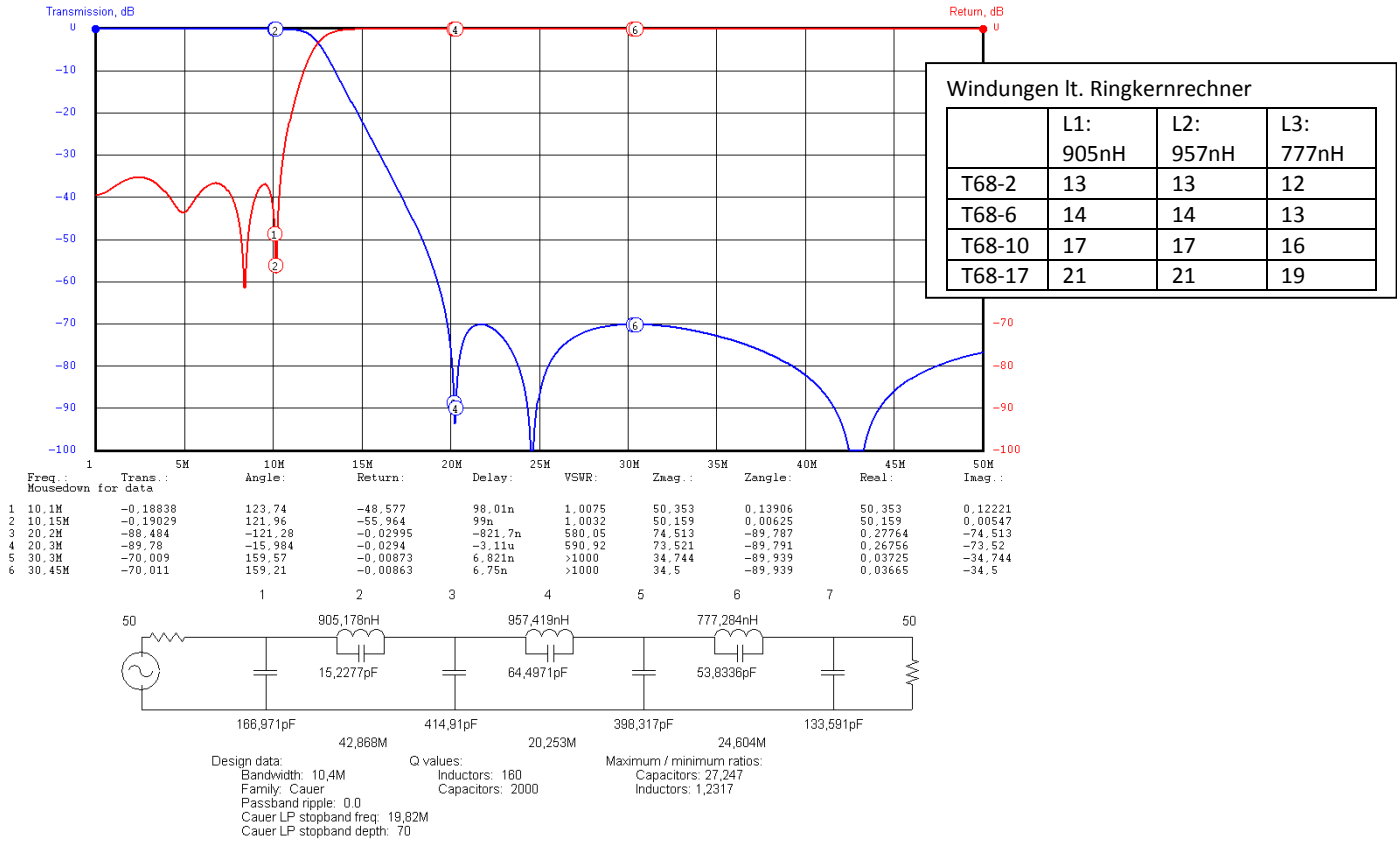
17.2 80m Band



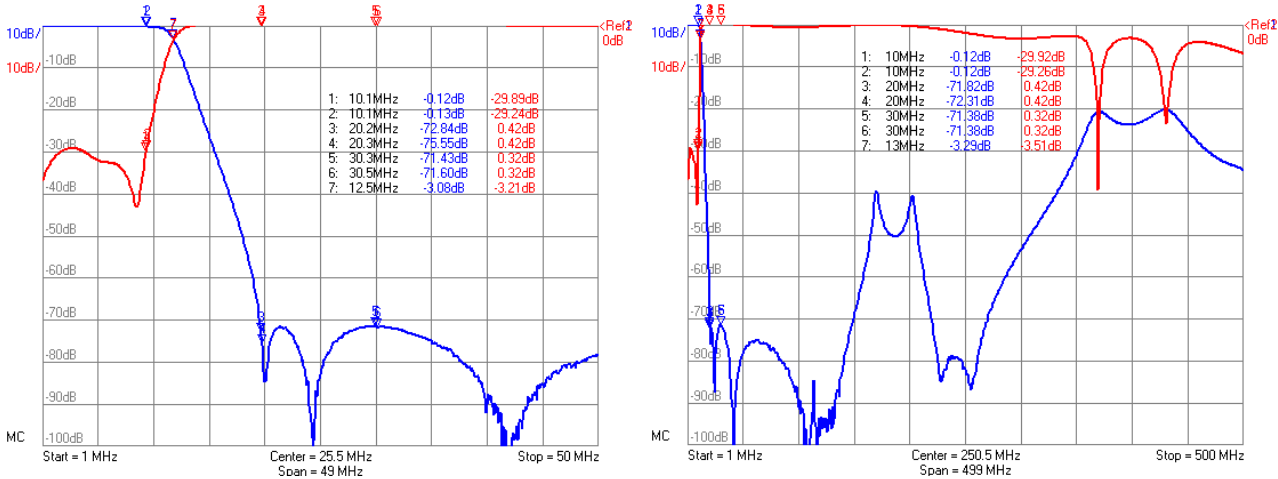
17.3 40m Band



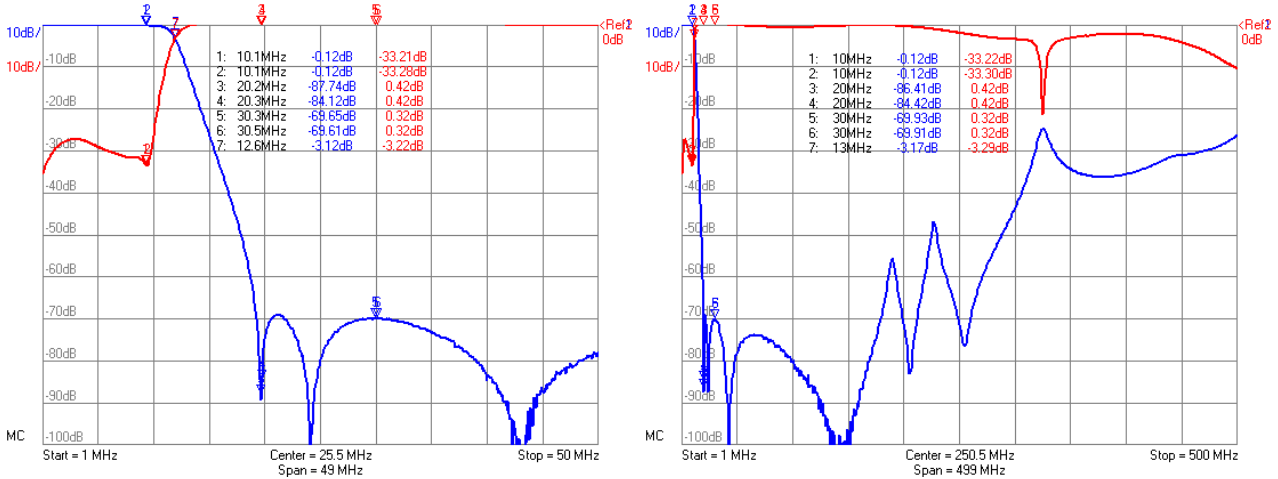
17.4 30m Band



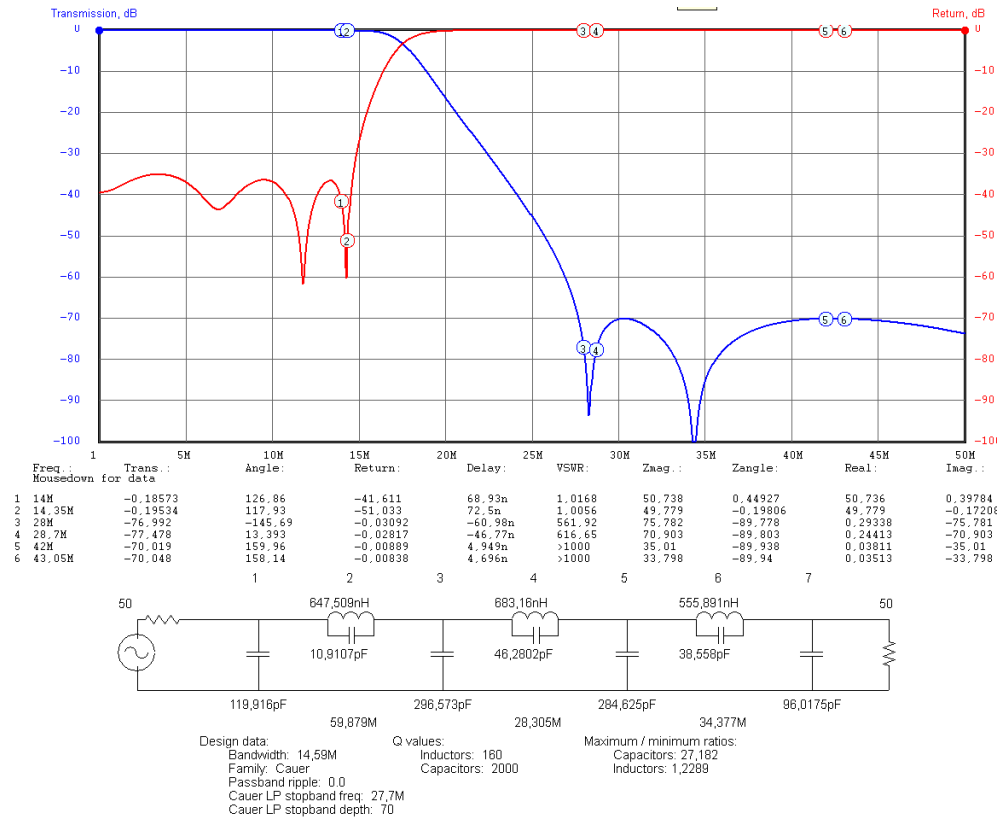
17.4.1 Tiefpass 30m (3dB 12,5 MHz)



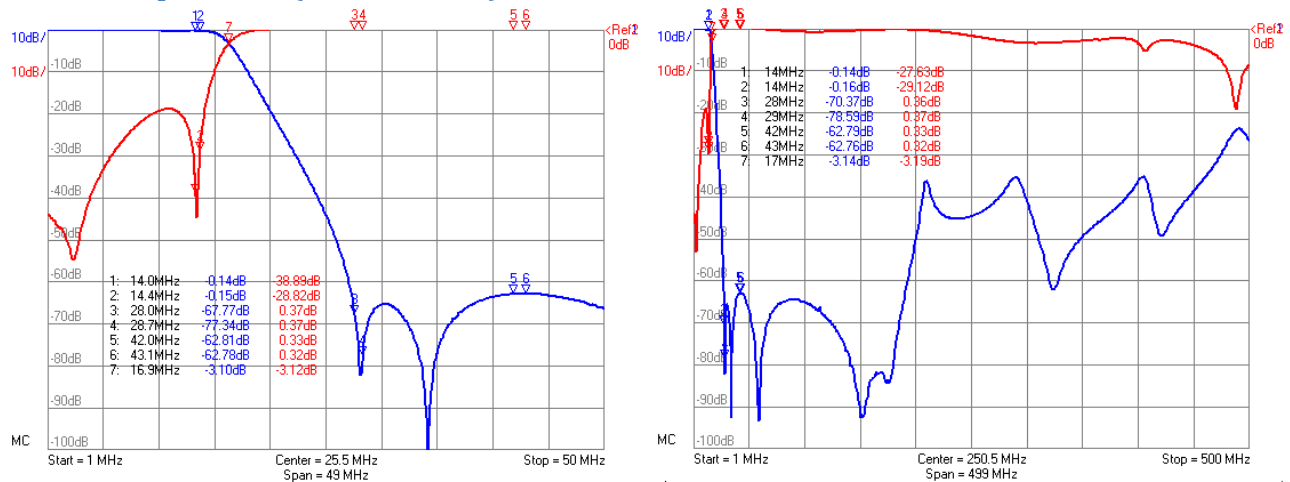
17.4.2 Tiefpass 30m (3dB 12,6 MHz)



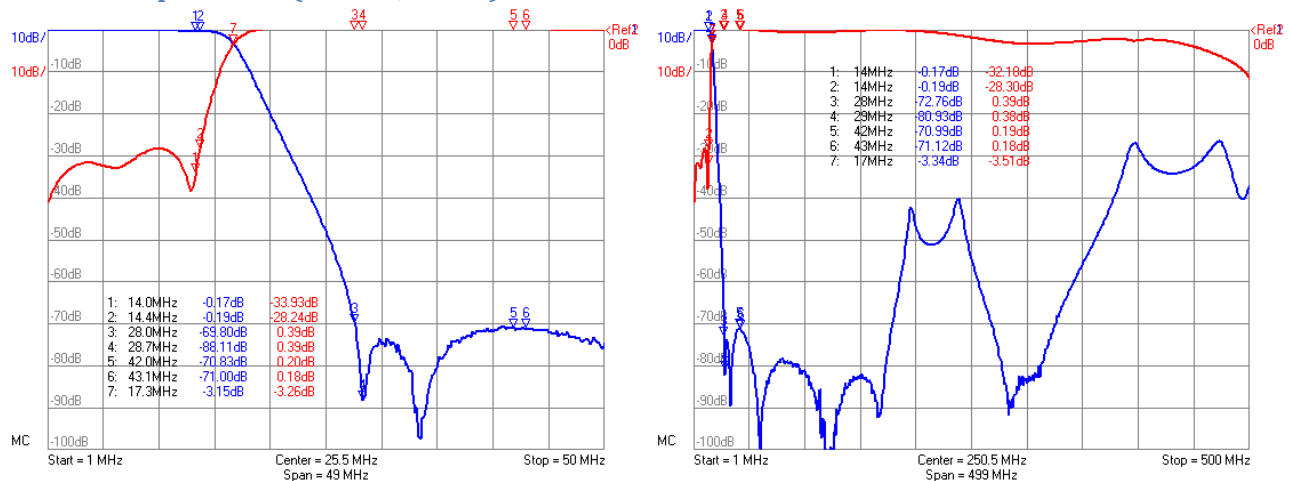
17.5 20m Band



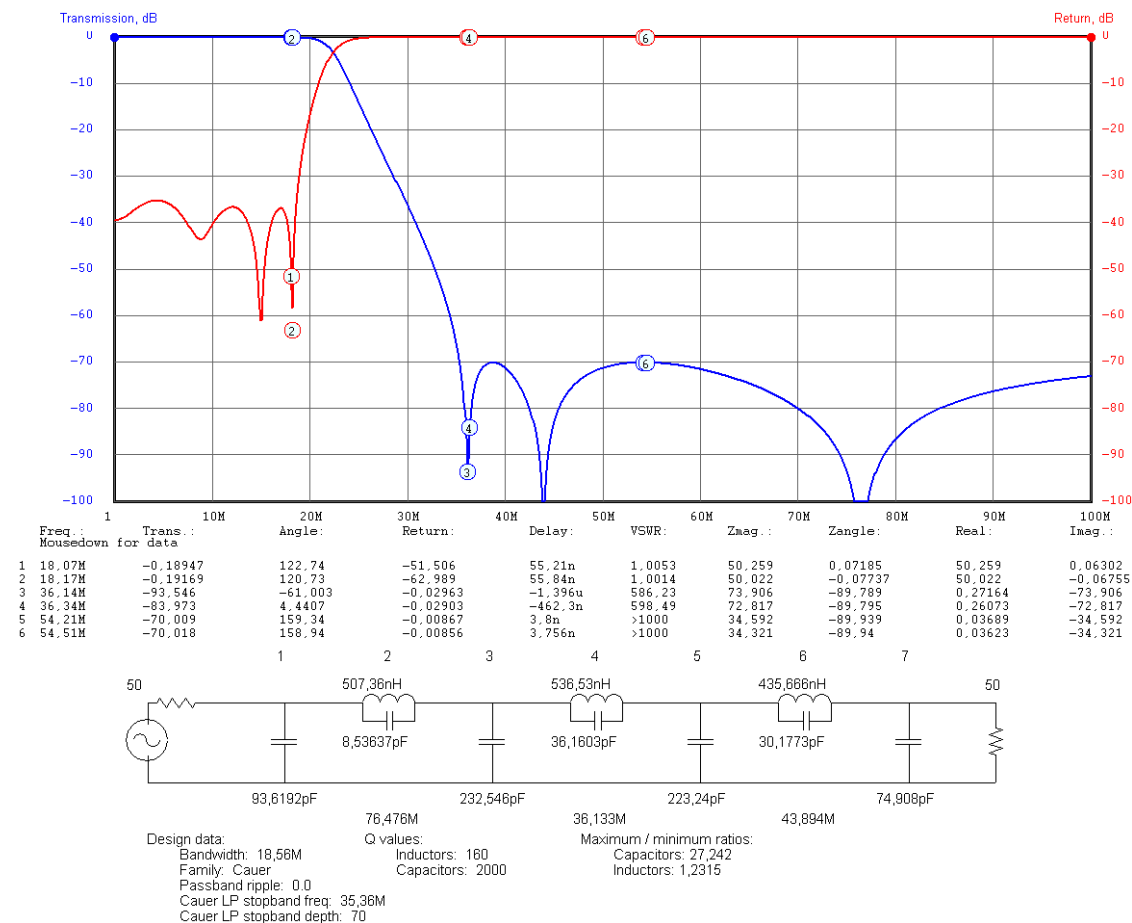
17.5.1 Tiefpass 20m (3dB 16,9 MHz)



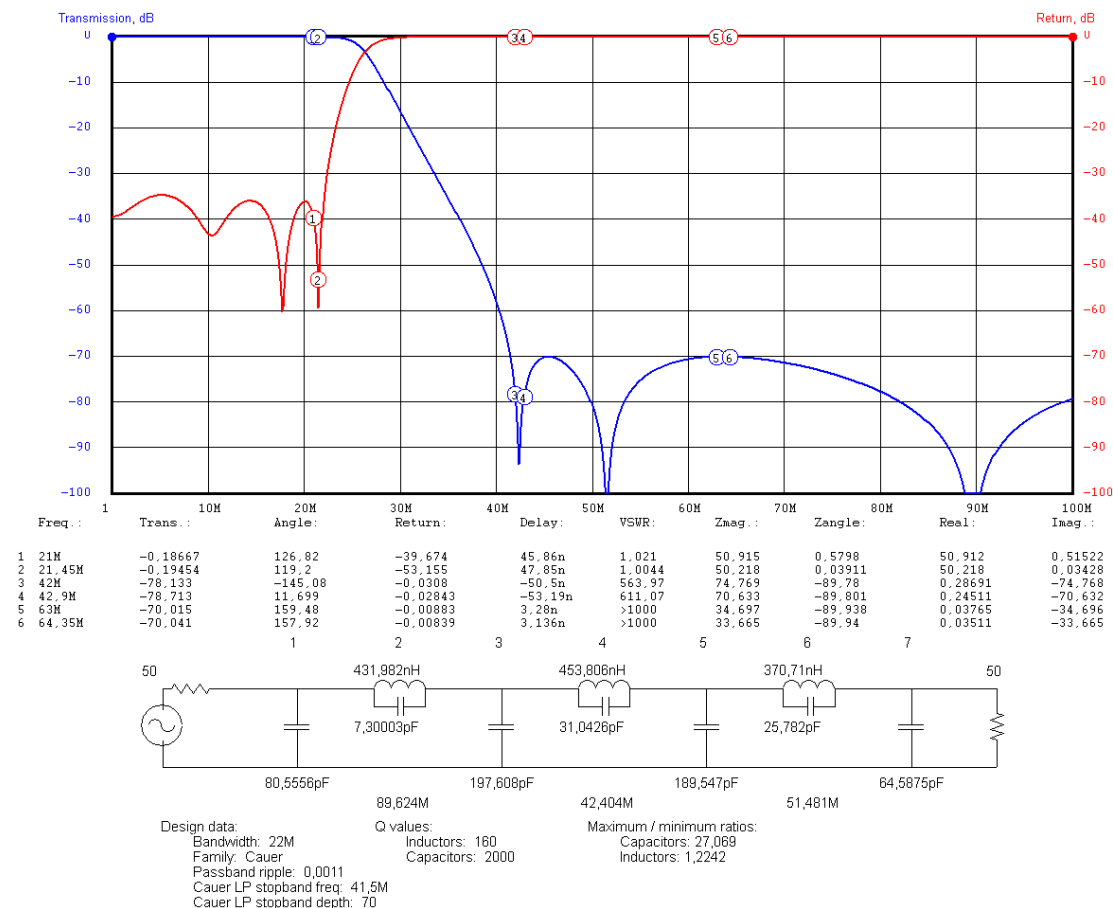
17.5.2 Tiefpass 20m (3dB 17,3 MHz)



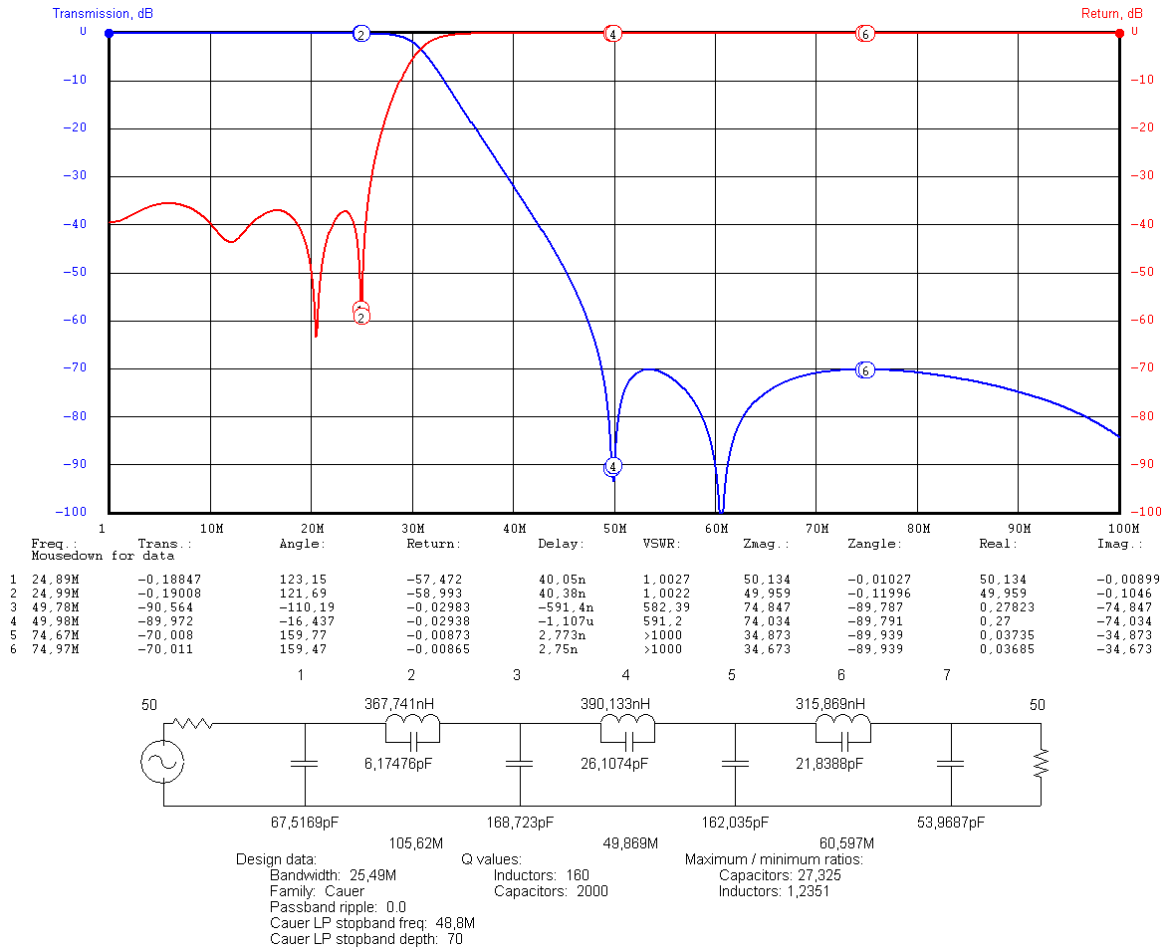
17.6 17m Band



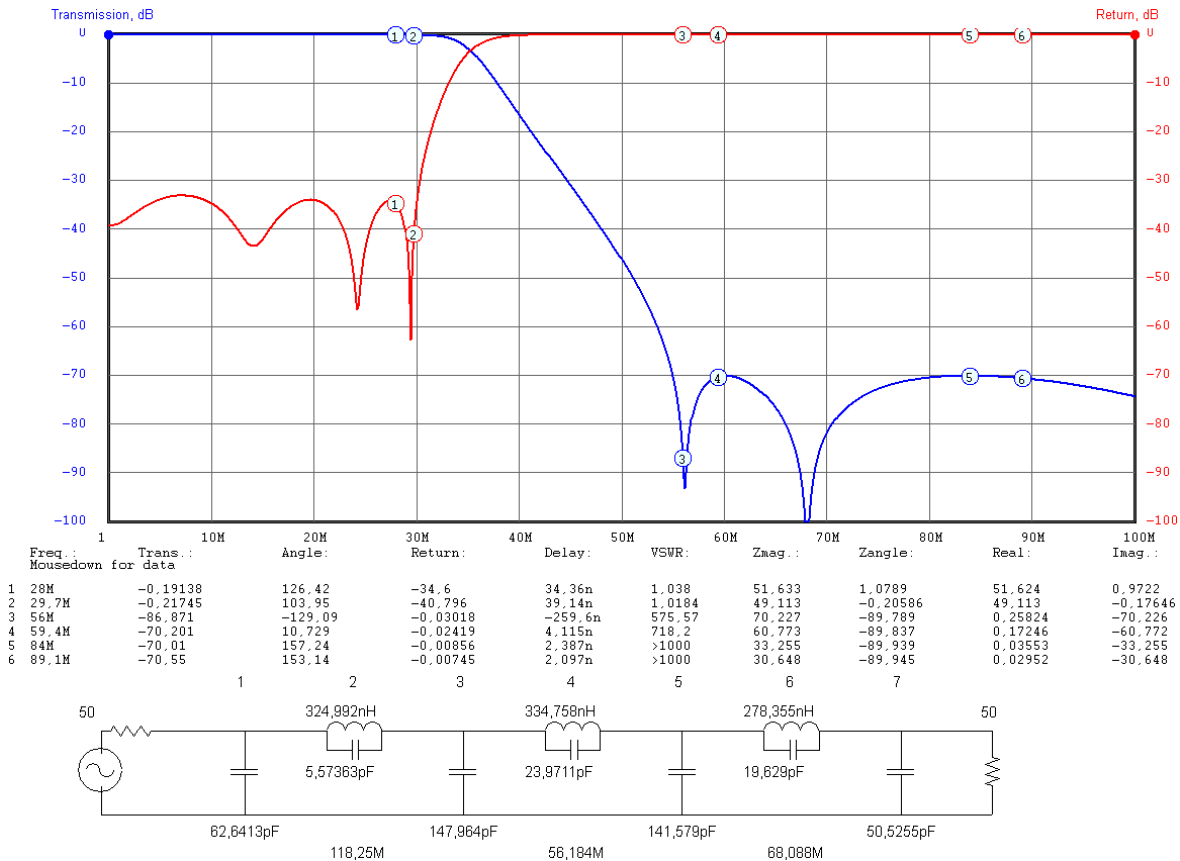
17.7 15m Band



17.8 12m Band

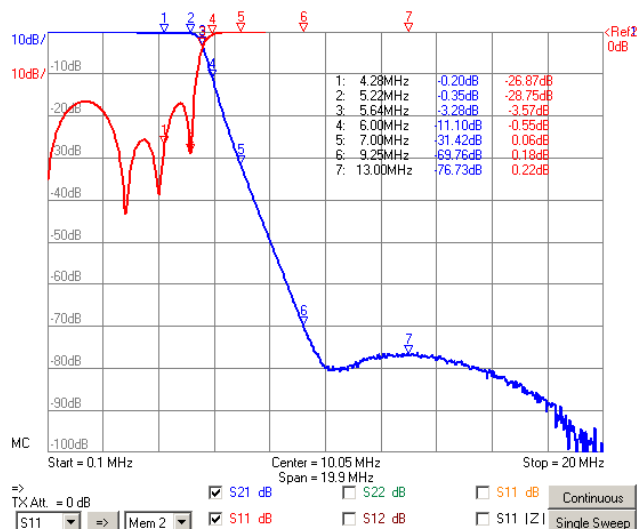
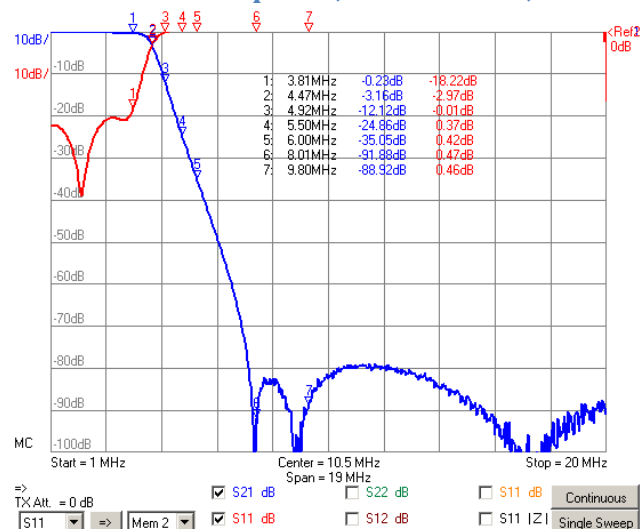


17.9 10m Band

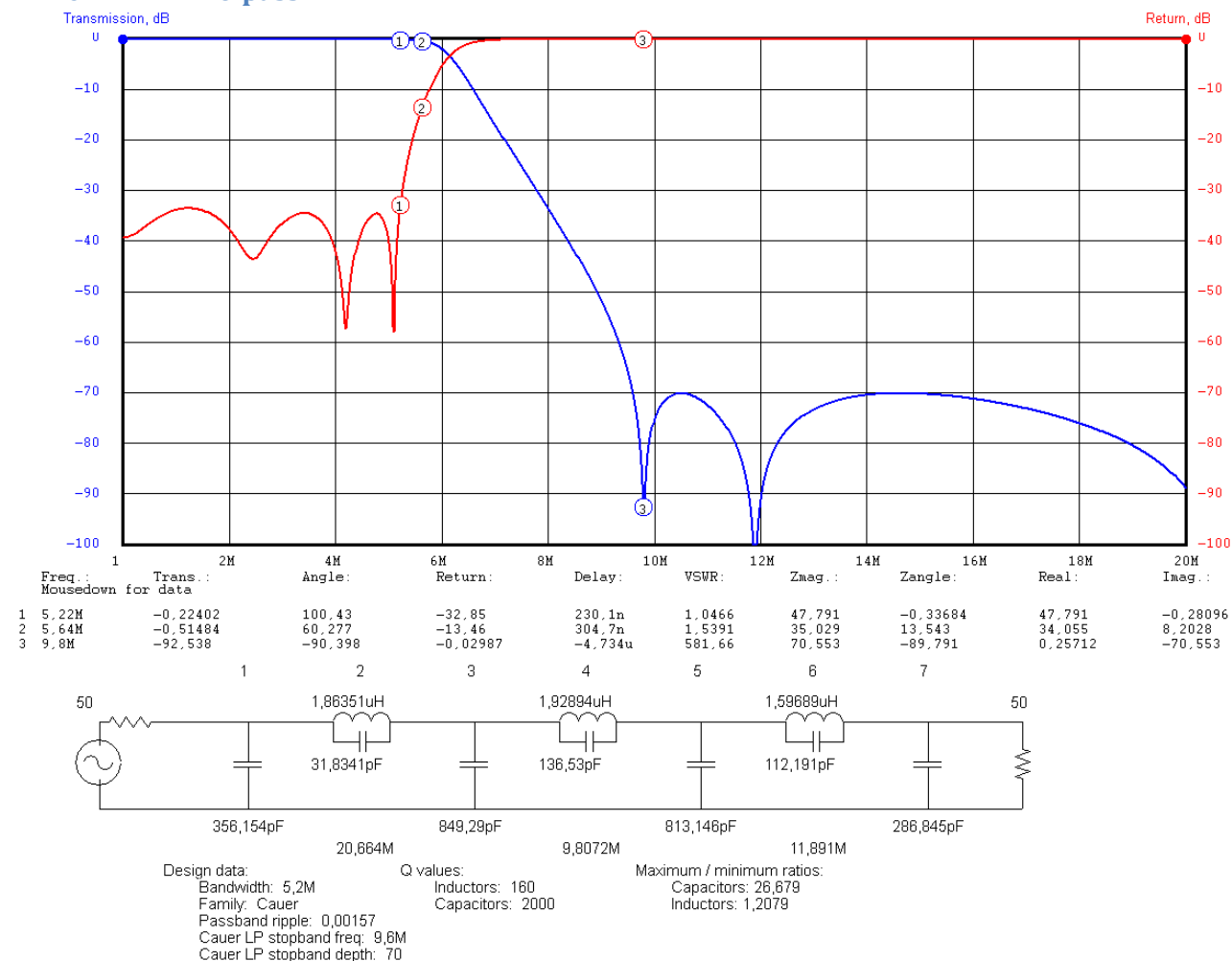


17.10 Sonstige Tiefpässe

17.10.1 Tiefpass 4,47 MHz und 5,64 MHz



17.10.2 Tiefpass



Windungen lt. Ringkernrechner

	L1: 1,864uH	L2: 1,929uH	L3: 1,597uH
T68-2	18	18	17
T68-6	20	20	18