

Ergänzung zum Beitrag in FA 6/14, S. 614 ff. „Spektrumanalysator-Vorsatz mit 75 Hz Analysebandbreite“

Die Empfindlichkeit des SAZ-1 wird durch das Breitbandrauschen des Detektors mitbestimmt. Um sie zu vergrößern und damit den Dynamikbereich zu erweitern, könnte man die ZF-Verstärkung schaltbar in zwei Stufen um jeweils 20 dB erhöhen. Beim SAZ-2 habe ich das realisiert. Mit den Änderungen ergibt sich eine Empfindlichkeit bis zu $-162,5$ dBm/Hz, außerdem erweitert sich der Empfangsbereich bis 150 MHz. Die Einschränkung auf Messungen nur im Nahbereich bleibt bestehen. Die Schaltung und der modifizierte Aufbau werden vorgestellt. Nach dem Ausmessen der technischen Daten werden praxisnahe Messungen vorgestellt, die mit kommerziellen Analysatoren oft nicht so darstellbar sind.

■ Schaltungsbeschreibung SAZ-2

Die Version 1 ist in zwei Punkten zum SAZ-2 modifiziert. Die Version 2 behebt die mangelhafte Weitabselektion zur Frequenzerweiterung und erhöht die Empfindlichkeit. Die Weitabselektion in Bild 7 ist nicht ausreichend, um den LO-Durch-

schlag (Isolation des Mischers hier viel geringer und 53-dB-Verstärker zu breitbandig) über 40 MHz zu unterdrücken. Die Folge ist eine Erhöhung der Grundlinie, da der Detektor ein Dauersignal erhält. Ein Tiefpassfilter im ZF-Verstärker könnte Abhilfe schaffen. Da auch die Empfindlichkeit verbessert werden sollte,

wurde die Selektion in die Zusatzverstärkung verlegt.

Die modifizierte Schaltung mit nun acht Moduleinheiten ist in Bild 10 dargestellt. Die zusätzliche Verstärkung von 40 dB wird durch Absenkung der Eingangsdämpfung um 3 dB und eine ZF-Verstärkung von 37 dB erreicht.

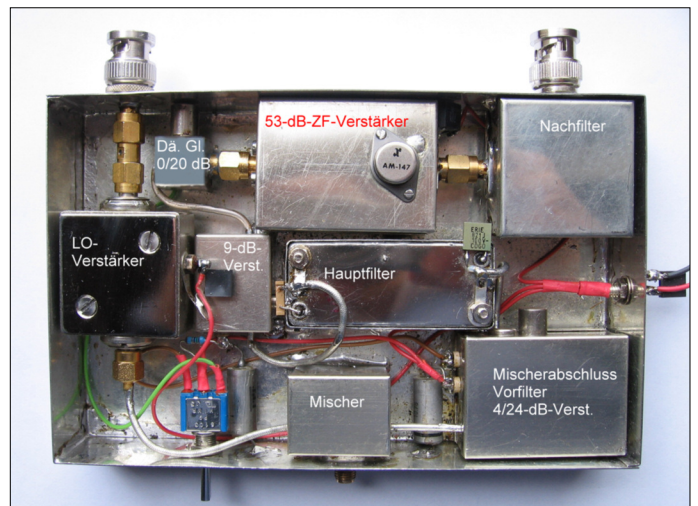


Bild 11:
Der SAZ-2 besteht aus acht Einzelmodulen
Fotos und Screenshots: DJ9DN

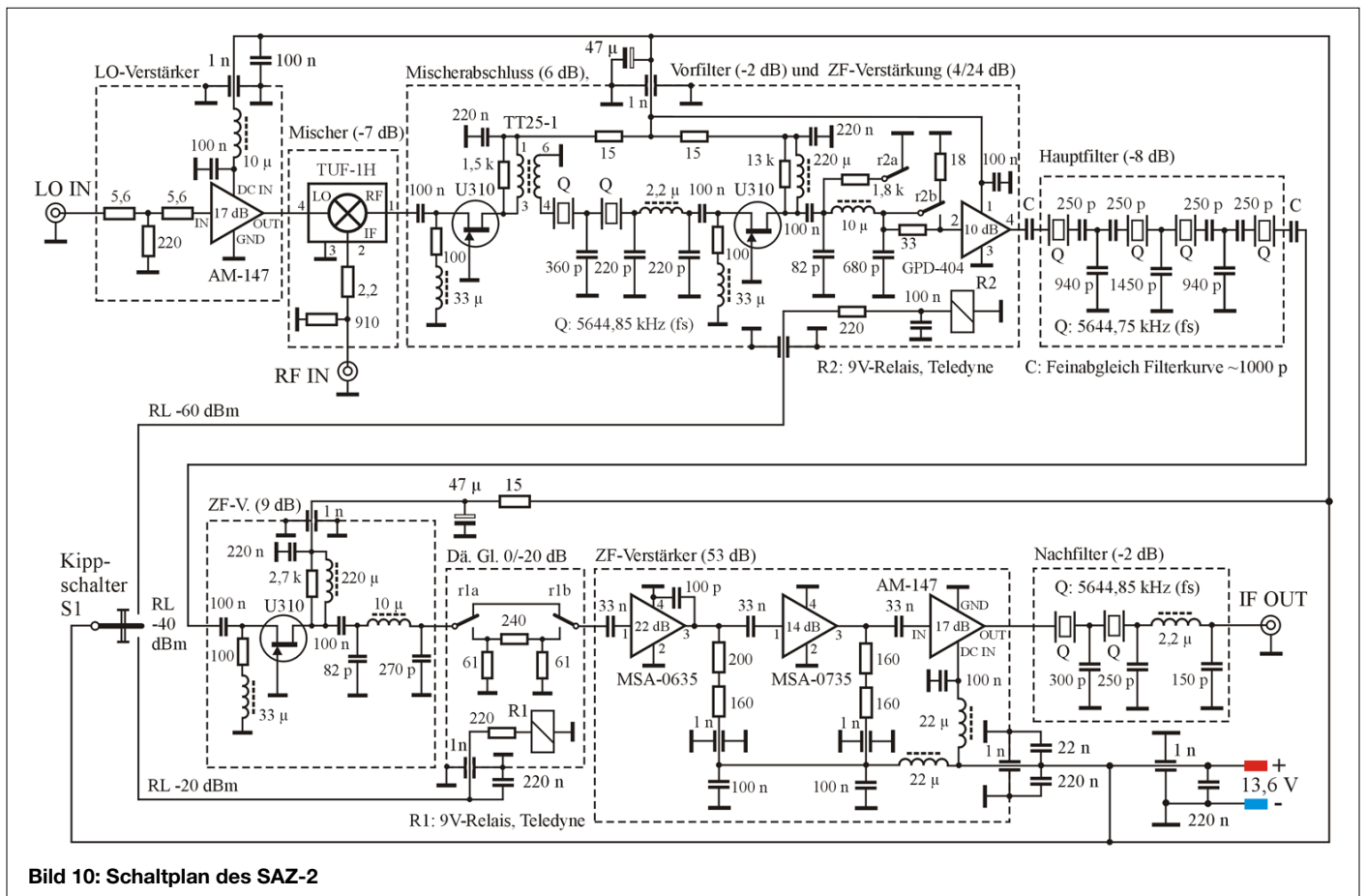


Bild 10: Schaltplan des SAZ-2

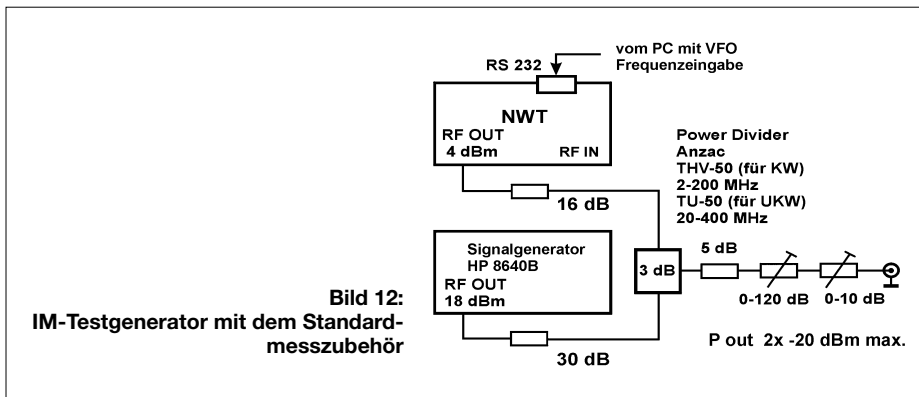


Bild 12:
IM-Testgenerator mit dem Standardmesszubehör

Die Hauptverstärkung mit 24 dB ist vor dem 75-Hz-Hauptfilter vorgesehen, da die Dämpfung 8 dB beträgt und das 75-Hz-Rauschen dominant am ZF-Ausgang erscheinen soll. Zur Erhaltung der IM-Festigkeit werden nach dem Mischer ein Ver-

(TT25-1) oder über eine π -Anpassung. Damit ist eine ausreichende Selektion gegeben. Die Weitabselektion wird durch den Tiefpass nach dem zweipoligen Vorfilter weiter verbessert. Dieses Quarzfilter ist das schwächste Glied für das IM-Ver-

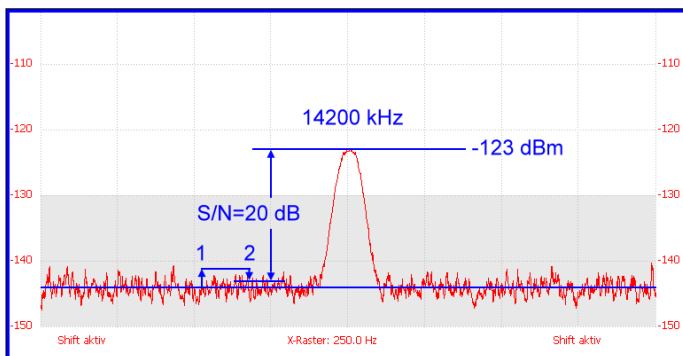
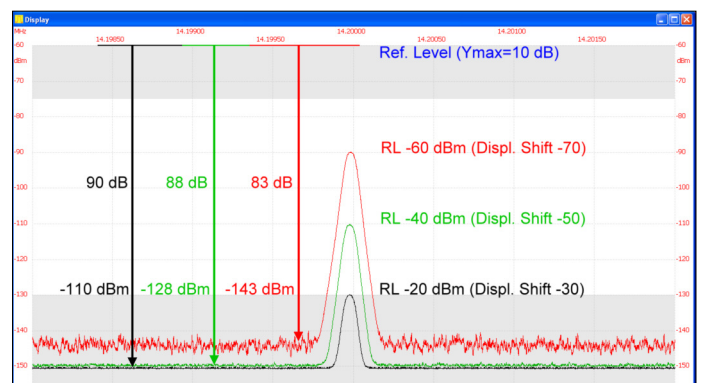


Bild 13:
Messung des S/N-Abstands (Ausschnitt)

stärker als Mischerabschluss und ein Vorfilter zwischengeschaltet. Die Verstärkung ist mit 6 dB klein gehalten, um selbst und im Filter wenig IM zu erzeugen. Die Dämpfung des Vorfilters beträgt nur 2 dB (entspricht dem Nachfilter). Die restliche Verstärkung von 9 dB erfolgt nach dem Hauptfilter.

Die Verstärker bestehen aus drei diskreten Stufen mit rauscharmen Feldeffekttransistoren in Gateschaltung und einem monolithischen Breitbandverstärker von Avantek (10 dB). Die Gateschaltung hat einen niederohmigen Eingang, die Verstärkung wird über die Höhe des Ausgangswiderstandes eingestellt. Transformiert auf $\sim 50 \Omega$ wird über einen Breitbandtransformator

Bild 15:
Empfindlichkeit und Signal mit -90 dBm bei den drei Verstärkungseinstellungen



halten. Gegenüber der Version 1 wird dieses Roofing-Filter mit 9 dB höherem Pegel angesteuert. Eingesetzt sind selektierte Quarze mit den kleinsten IM-Produkten. Mit dem Vorfilter verringert sich die Bandbreite auf einen Wert unter 70 Hz. Die Verstärkung wird über Relais in zwei Stufen von je 20 dB (Änderung Referenz-Level) auf die Funktion des SAZ-1 ($R_L -20 \text{ dBm}$) abgesenkt. Der Schaltplan ist in der mittleren Empfindlichkeitsstufe gezeichnet ($R_L -40 \text{ dBm}$). Dabei wird mit

den Relaiskontakten r_{2a} und r_{2b} die Verstärkung der Gateschaltung durch Bedämpfung am Ein- und Ausgang der Anpassschaltung herabgesetzt. Erst das Einschalten von Relais 2 in der oberen Stellung des Kippschalters ergibt die volle Empfindlichkeit ($R_L -60 \text{ dBm}$). In der unteren Stellung wird über Relais 1 das 20-dB-Dämpfungsglied eingeschaltet ($R_L -20 \text{ dBm}$).

■ Aufbau des SAZ-2

Die Modifizierung ist als Erweiterung der Version 1 im selben Aufbau durchgeführt (Bild 11). Die Kapselung in einzelne Module ist notwendig, um die nötige Entkopplung des LO auf den ZF-Ausgang und die maximale Weitabselektion des Auflösungsfilters zu erhalten.

■ Technische Daten

Durch die schaltbare Verstärkung lässt sich die Empfindlichkeit erhöhen. Da der IP3 gleich bleibt, ergibt sich eine Erhö-

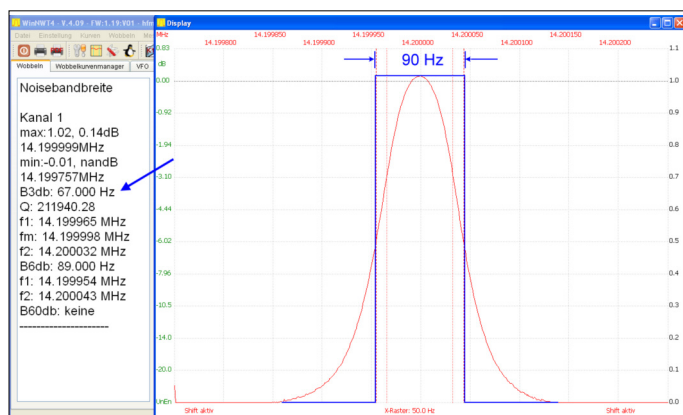


Bild 14:
Bestimmung der äquivalenten Rauschbandbreite

hung des IM-freien Dynamikbereiches über den Anzeigebereich hinaus (beim SAZ-1 entspricht der Anzeigebereich dem Dynamikbereich).

Leider verursacht der Wobbelbetrieb (DDS) im Nahbereich ein zusätzliches Spektrum. Für die Messungen wird der Standardmessaufbau nach Bild 12 eingesetzt (HP 8640B ersatzweise verwendet). Wichtig zur Dokumentation der Messergebnisse ist die Verwendung des Videofilters beim NWT.

Empfindlichkeit (gemessen auf 14,2 MHz)

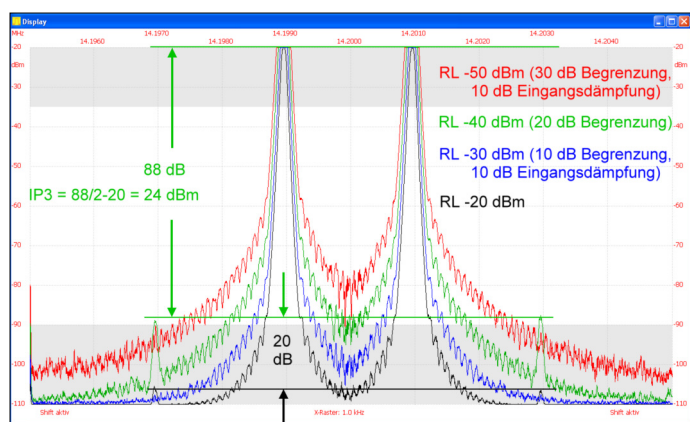
Mit der maximalen ZF-Verstärkung ($R_L -60 \text{ dBm}$) wird das bandbreitenspezifische Grundrauschen angezeigt. Zur Auswertung eines S/N-Abstands (Bild 13) müssen Korrekturfaktoren bestimmt werden.

Die Anzeige ist auf sinusförmige Signale kalibriert. Für Rauschpegel ergibt sich durch die Logarithmierung ein zu kleiner Wert (systematischer Fehler, Faktor 1 in Bild 13), bezogen auf den Spitzenwert des Sinussignals. Außerdem muss die äquiva-

lente Rauschbandbreite bekannt sein. Diese ist größer als die 3-dB-Bandbreite, d. h. es wird zu viel Rauschen angezeigt (Faktor 2). Beide Faktoren können selbst bestimmt werden. Dazu muss am ZF-Ausgang des SAZ (gemessen mit Empfänger oder einem empfindlichen Effektivwertmessgerät) ein 20-dB-S/N-Abstand eingestellt werden. Der dazu notwendige Eingangspegel minus 20 dB ergibt die Empfindlichkeit von -143 dBm. Angezeigt wird das optisch gemittelte Rauschen mit -144 dBm. Danach wird die Rauschbandbreite durch eine Darstellung mit dem Linear-detektor im Bild 14 bestimmt. Die Umwandlung des Auflösungsfilters in ein flächengleiches Rechteck ergibt die äquivalente Rauschbandbreite. Sie ent-

Empfindlichkeit bei Verstärkungsänderung

Die Empfindlichkeit bei den drei Schalterstellungen ist in Bild 15 ausgewertet. Das Eingangssignal beträgt jeweils -90 dBm, gemessen wurde auf 14,2 MHz. Es zeigt den Signalanstieg und den Rauschanstieg durch die erhöhte ZF-Verstärkung. Die Auswertung des Grundrauschens als Maß für die Empfindlichkeit ist eingezeichnet. Bei der geringen Empfindlichkeit (R_L -20 dBm) wird das Rauschen durch das Quantisierungsrauschen gebildet. Auch danach mit 20 dB mehr ZF-Verstärkung (R_L -40 dBm) ist der Rauschanstieg gering und immer noch geprägt durch den logarithmischen Detektor. Erst mit der vollen ZF-



spricht hier etwa der 6-dB-Bandbreite. Damit ergibt sich der Korrekturfaktor 2 mit $10 \log(90/67) = 1,3 \text{ dB}$ (für Gaußfilter 0,8 dB). Da der gemittelte Grundrauschpegel ungefähr 1 dB abweicht, ergibt sich der systematische Fehler (Faktor 1) mit 2,3 dB (entspricht der allgemeinen Angabe von 2,5 dB, die auch übernommen wurde). Für die Bandbreitennormierung auf 1 Hz erhält man den Wert $10 \lg 90 = 19,5 \text{ dB}$ und daraus abgeleitet eine Empfindlichkeit von -162,5 dBm/Hz (-143 dBm -19,5 dB). Die Differenz zu -174 dBm (Bezugsrauschleistung bei Zimmertemperatur und 1 Hz Bandbreite) ergibt das Rauschmaß von 11,5 dB (beim Nachmessen müsste man das Spiegelrauschen berücksichtigen, oder ein Filter vorschalten).

Unter Berücksichtigung der Mischdämpfung (6 bis 7 dB) erhält man das Rauschmaß des ZF-Verstärkers von 5 dB. Dies ist ein plausibler Wert, da das Rauschmaß der Eingangsstufe 2 bis 3 dB beträgt und durch die geringe Verstärkung durchaus ein Zusatzrauschen bis zu 3 dB dazu kommt. Mit der Bandbreitennormierung und dem systematischen Fehler der Rauschanzeige lässt sich auch der Kalibrierfaktor bestimmen: $-19,5 \text{ dB} + 2,5 \text{ dB} = -17 \text{ dB}$. Dieser Wert wird als Skalierungsfaktor beim Messen des Phasenrauschens benötigt.

Bild 16:
IM-Abstände
14,2 MHz,
 $\Delta f = 2 \text{ kHz}$

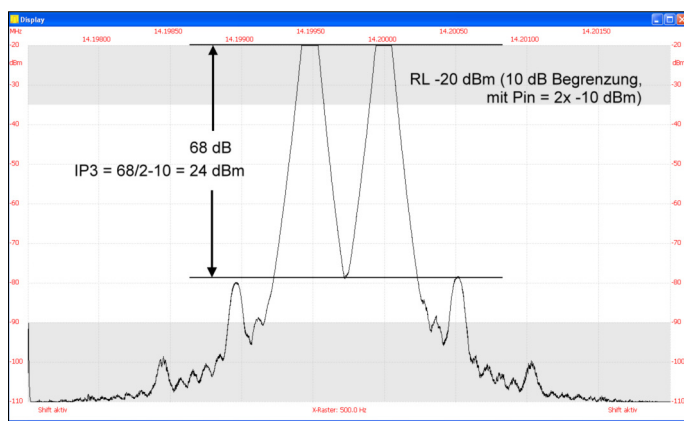


Bild 17:
IM-Abstände
14,2 MHz,
 $\Delta f = 500 \text{ Hz}$

Verstärkung (R_L -60 dBm) wird die Empfindlichkeit allein durch das Eingangsteil gebildet. Die Empfindlichkeit ist durch weitere Messungen bis 150 MHz bestätigt.

Interceptpunkt 3. Ordnung

Das Bild 16 zeigt die Auswertung des IP mit einem Pegel von $2 \times -20 \text{ dBm}$ im Abstand von 2 kHz bei der unteren (schwarz) und mittleren (grün) Verstärkungseinstellung auf 14,2 MHz. Bei der mittleren (blau) und oberen (rot) Einstellung, mit ei-

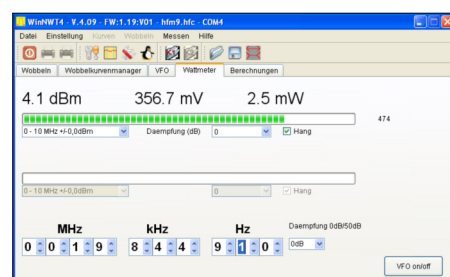


Bild 18: Ausgang, $f_e = 14\,200 \text{ kHz}$ mit -70 dBm

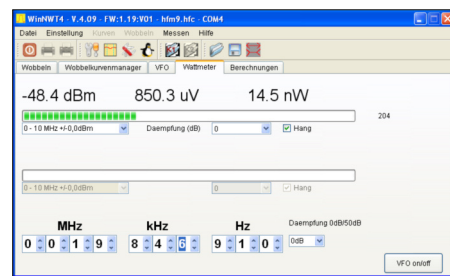
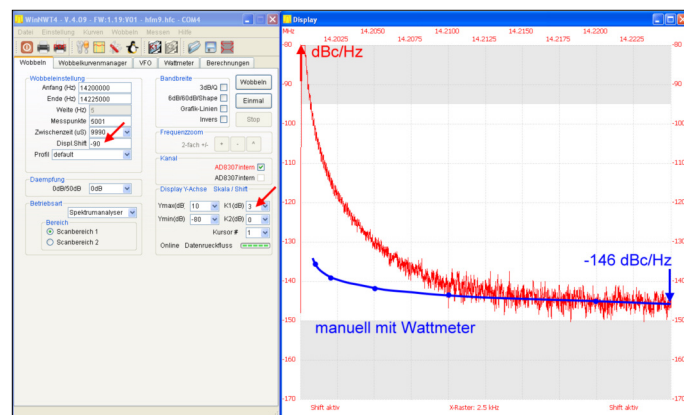
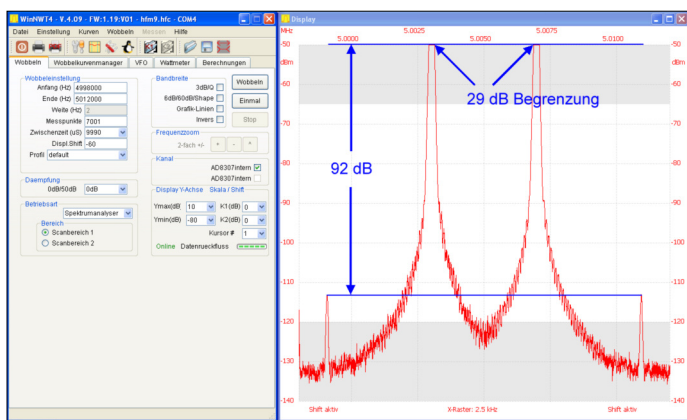


Bild 19: Ausgang, $f_e = 14\,202 \text{ kHz}$ mit 0 dBm

nem Dämpfungsglied am Eingang von 10 dB verschwinden die IM-Produkte unter das Wobbelspektrum (gleichmäßige Seitenbänder) oder das Phasenrauschen. Die IM-Produkte im Abstand von 500 Hz sind nur nachweisbar durch Pegelerhöhung des Testgenerators (Verringerung der Dämpfungsglieder am Power Divider um 10 dB). Es ergibt sich der gleiche IP3 wie im Abstand von 2 kHz (Bild 17). Der IP3 ist frequenzabhängig, er fällt von 26 dBm auf 3,65 MHz bis 20 dBm auf 144,2 MHz.

Bild 20:
Phasenrauschen
des LO auf 14,2 MHz
(einschließlich NWT-Generator)





Dynamikbereiche

Mit der Empfindlichkeit und dem Interceptpunkt lassen sich die zu erwartenden Dynamikbereiche berechnen. Im Nahbereich bestehen jedoch Einschränkungen durch das Wobbelspektrum und das Phasenrauschen. Durch Vorschalten von Damp-

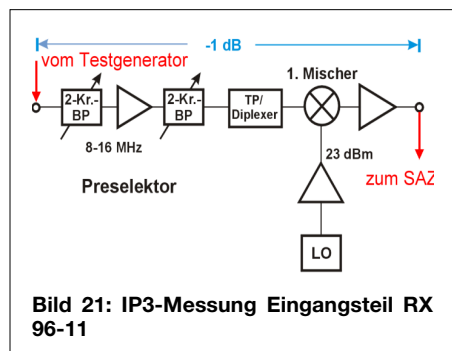


Bild 21: IP3-Messung Eingangsteil RX 96-11

fungsgliedern lässt sich der Dynamikbereich nach höheren Pegeln verschieben.

Phasenrauschen SAZ-2 auf 14,2 MHz

Zur Orientierung über das Seitenbandrauschen (Phasenrauschen und AM-Rauschen) dient das Bild 20. Dabei wurde der SAZ-2 mit einem Signal von 0 dBm von dem NWT des Testaufbaus angesteuert, damit

Berechnete Dynamikbereiche	$R_L -20 \text{ dBm}$	$R_L -40 \text{ dBm}$	$R_L -60 \text{ dBm}$
$f = 3,65 \text{ MHz}$	90,6 dB	102,6 dB	112,6 dB
$f = 14,2 \text{ MHz}$	89,3 dB	101,3 dB	111,3 dB
$f = 144,2 \text{ MHz}$	86,6 dB	98,6 dB	108,6 dB

ergibt sich mit der hohen ZF-Verstärkung ($R_L -60 \text{ dBm}$) eine Begrenzung von 60 dB (Y_{max} der Display-Achse 10 dB). Die große Messdynamik setzt eine hohe Weitabselektion des Auflosungsfilters von $>130 \text{ dB}$ im Abstand von 1 kHz voraus. Mit der Display-Shift und der Skala-Shift lässt sich die Skalierung direkt in dBc/Hz einstellen. Dazu müssen der Kalibrierfaktor von -17 dB (Bandbreitennormierung auf 1 Hz) und der Fehler der Rauschanzeige berücksichtigt werden. Dabei gehen -20 dB zu der Display-Shift von -70 dB (Referenz-Level $- Y_{\text{max}}$) und ergeben die Einstellung -90 dB .

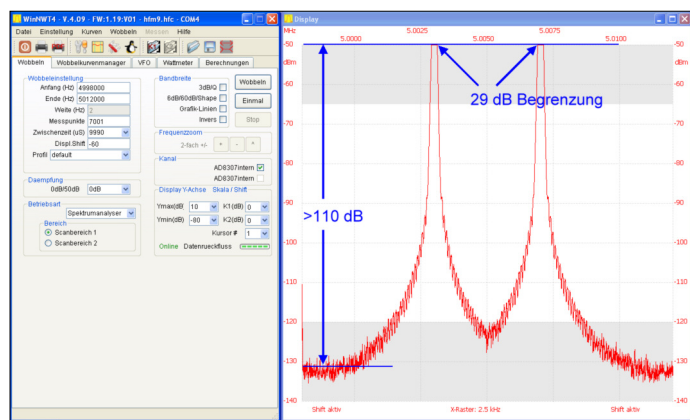
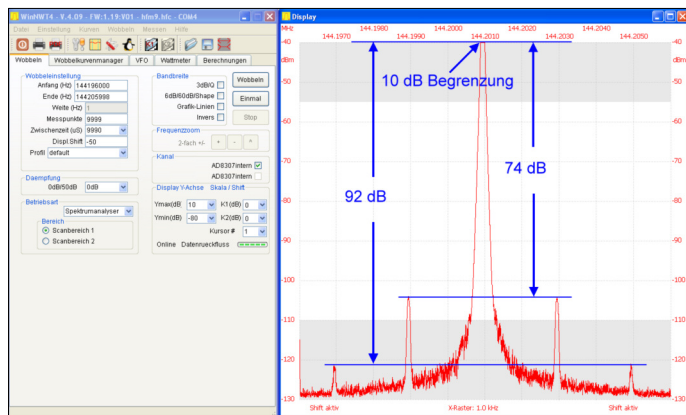


Bild 25: NF-Rauschen bis 10 kHz beim RX 96-11

Die restliche Korrektur (+3 dB) erfolgt durch die Skala-Shift. Der Messbereich geht nun bis zur normierten Empfindlichkeit von $-162,5 \text{ dBm/Hz}$, die Auswertung gilt nur für das Rauschen; da der Eingang

Bild 22: IM-Abstand bei 14,2 MHz mit $2 \times -20 \text{ dBm}$, $\Delta f = 4 \text{ kHz}$

mit 0 dBm angesteuert wird, ergibt sich die Skalierung direkt in dBc/Hz. Auswertbar ist der Schrieb bei diesem Pegel des DDS erst ab einem Frequenzabstand von 15 kHz, das



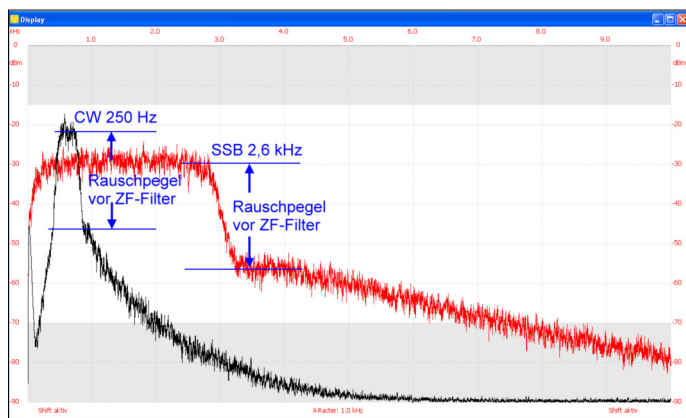
Wobbelspektrum überlagert das Seitenbandrauschen.

Um unterhalb zu korrekten Ergebnissen zu gelangen, gibt es die Möglichkeit in der Wattmeter-Stellung manuell abzustimmen ($f_o = f_e + f_{zf}$).

Die Bilder 18 und 19 zeigen das Ergebnis für den 2-kHz-Abstand.

Zum besseren Ablesen ist das Videofilter beim NWT in der Zeitkonstante um den Faktor 10 zu vergrößern. Der Pegelunterschied beträgt $(70 + 4,1) - (-48,4) = 122,5 \text{ dB}$. Mit dem Kalibrierfaktor erhält man $-139,5 \text{ dBc/Hz}$. Beide NWT (LO und der Generator) verursachen das Phasenrauschen, zusätzlich ist AM-Rauschen durch die D/A-Wandlung vorhanden, besonders beim NWT-Generator (wird beim LO durch Begrenzung reduziert). Der Einfluss des Spiegelempfangs ist gering, da auch

Bild 23: Referenzschrieb, Testgenerator auf ZF



mit einem Tiefpassfilter keine Verbesserung möglich ist.

Praxisnahe Messbeispiele

Die vielseitige Anwendung des SAZ-2 wird an einigen Messbeispielen aufgezeigt.

IP3-Messung beim RX 96-11 auf 14 200 kHz

Der Testgenerator und der SAZ-2 werden nach Bild 21 angeschlossen, die ZF-Ver-

stärkung ist auf $R_L -60$ dBm gestellt. Da der Mischer eine Vielzahl von Mischprodukten liefert, die auf einen mehrdeutigen Eingang am SAZ treffen, ist bei dieser Anwendung ein Tiefpassfilter (z. B. 10 MHz) vorzuschalten.

Ansonsten erscheinen störende Linien im Schrieb. Außerdem ist der IP3 durch ein 10 dB Dämpfungsglied zu erhöhen (Display-Shift -60 dB ergibt nun $R_L -50$ dBm), das zwischen Filter und SAZ eingeschaltet wird.

Das Ergebnis zeigt Bild 22, mit 92 dB Abstand beträgt der IP3 26 dBm, bezogen auf den Eingang des Empfängers.

Dass der Spektrumanalysator die 29 dB Begrenzung verträgt, zeigt Bild 23. Hier sind die Generatoren auf die ZF um 5005 kHz abgestimmt und direkt auf den SAZ-2 gegeben, mit dem Ausgangspegel des Ein-

gangsteils (-21 dBm) und gleichem Frequenzabstand. Dabei wird durch die maximale Verstärkung am SAZ-2 ein Dynamikbereich von >110 dB erzielt. Diese Messung zeigt die hohe Qualität der Analyse!

HP-Synthesizer 8656B auf 144 201 kHz

Als Messbeispiel für eine UKW-Anwendung wird das Spektrum des HP-Synthesizers 8658B auf 144 201 kHz untersucht. Dabei wird der SAZ-2 auf $R_L -40$ dBm eingestellt (Display-Shift -50 dB) und direkt vom Synthesizer mit -30 dBm angesteuert.

Den ausgewerteten Schrieb zeigt Bild 24. Hier sind Nebenlinien vorhanden, die durch die Frequenzaufbereitung in die PLL-Bandbreite fallen.

NF-Rauschen

Die Messungen im unteren Frequenzbereich (NF-Analyse) sind in den Empfängerberichten erfasst. Sie sind im untersten Pegelbereich ($R_L -20$ dBm) mit dem SAZ-2 genauso möglich. Als Beispiel ist das NF-Rauschen beim RX 96-11 dargestellt, jetzt sogar mit einer besseren Unterdrückung der Nulllinie (rd. 10 dB, Bild 25). Dies ist gegenüber dem SAZ-1 auf die Absenkung der Eingangsdämpfung um 3 dB (damit 3 dB geringere ZF-Verstärkung), sowie einem unsymmetrischen Dämpfungsglied von 20 dB zurückzuführen. Durch den höheren Eingangswiderstand erhöht sich die Isolation des Mixers. Mit der Eingangsdämpfung von 20 dB ergibt sich der Referenz-Level von 0 dBm, dazu eingestellt zur korrekten Skalierung die Display-Shift mit -10 dB.