

Regelbarer ZF-Verstärker mit hoher IM-Festigkeit

An die regelbare ZF-Eingangsstufe eines SSB-Empfängers bestehen hohe Anforderungen in Bezug auf Rauschen, Verstärkung, Stabilität und Linearität. Die Kaskoden-FET-Schaltung in **Bild 1 und 8** kommt diesen Forderungen nach. Die Schaltung enthält zwei FET's, wovon der erste in empfindlicher Source-Schaltung und der zweite in großsignalfester Drain-Schaltung arbeitet.

Die Verstärkung der Kaskode wird durch die Steilheit der Source-Schaltung bestimmt und beträgt 12...14dB in Abhängigkeit des Drain-Widerstands (TR2), ausgeführt in breitbandiger oder selektiver Schaltung. Mit einem Source-Widerstand von etwa 120 Ω stellt sich ein gemeinsamer ID von 17 mA ein. Die Rauschzahl der Schaltung liegt bei ca. 0,8 dB. Mit den angegebenen Ringkernen und Wickeldaten liegen Eingangs- und Ausgangswiderstand der Kaskode nahe bei 50 Ω . Das Eingangs-SWR beträgt <1,2 und das Ausgangs-SWR 1,03.

1.) Breitbandiger, regelbarer ZF-Verstärker hoher Dynamik

Als Eingangs- und Ausgangsübertrager (TR1 und TR2) wird ein Ferritkern mit hoher Permeabilität verwendet, ein FT23-77. Der nutzbare Frequenzbereich beträgt ca. 1-40MHz. Im Beispiel wird der Verstärker als Eingangsstufe einer **9 MHz ZF** verwendet.

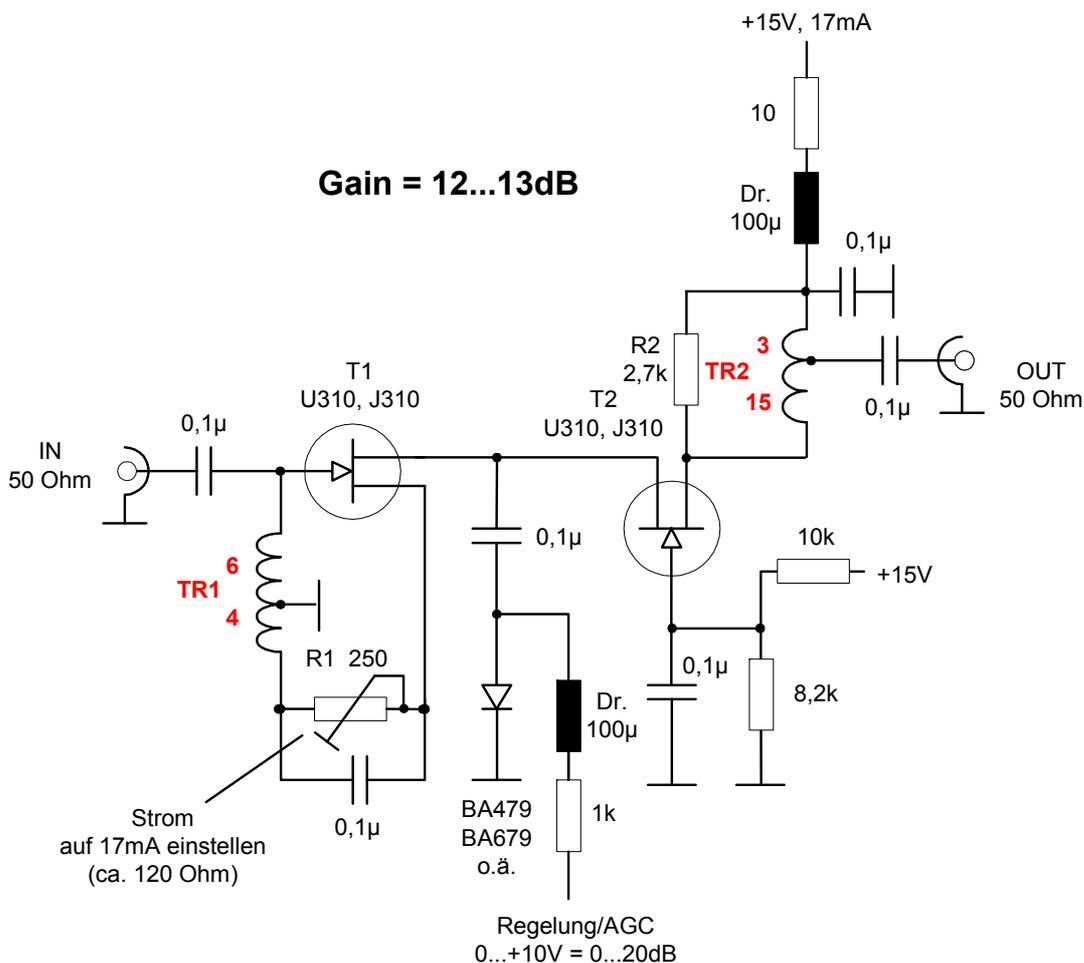


Bild 1: Breitbandiger, regelbarer ZF-Verstärker mit hoher Dynamik, Frequenzbereich 1-40MHz

Daten

Verstärkung: 12..13dB

Empfindlichkeit: 0,8dB

Bandbreite: 1-40MHz, breitbandig

Regelbereich der Dämpfung, AGC: 0-20dB

Betriebsspannung 12...15VDC, Strom 17mA

Verwendete Ringkerne

TR1: 6+4 Wdg. Ferrit-Ringkern, grau, FT23-77, AL420

TR2: 15+3 Wdg. Ferrit-Ringkern, FT23-77, AL420

Z in: Rückflußdämpfung=22dB, Stehwellenverhältnis=1,17

Z out: Rückflußdämpfung>35dB, Stehwellenverhältnis=1,03

R1: auf einen Stromverbrauch von $I_D=17\text{mA}$ einstellen (100...120Ohm)

R2: ca. 2,7kOhm

Ausgangs Anpassung (Z out):

R2 so wählen (2..4kOhm, testen!), dass die Spannung am Ausgang mit einem Scope gemessen auf die Hälfte abfällt, wenn der offene Ausgang mit 50Ohm abgeschlossen wird.

Rückwärtsentkopplung: >40dB (verursacht durch T2 in Gateschaltung)

IM₃-Festigkeit:

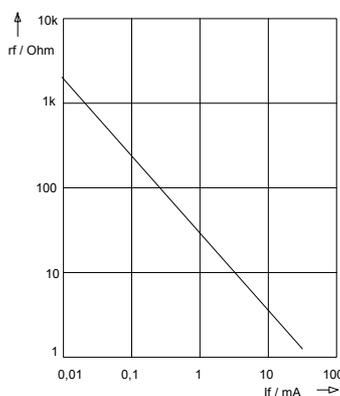
Bei AGC=0dB: IP₃=+21dBm

Bei AGC=20dB: IP₃=+27dBm

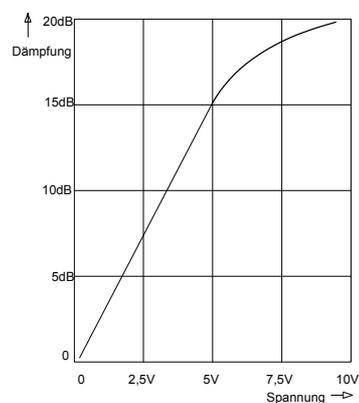
1dB-Kompression bei: +6dBm bei AGC=0

Regelung, AGC

Die Regelung der Kaskodenschaltung übernimmt eine Pin-Diode, BA479, zwischen Drain von T1 und Gate von T2, die ihren Durchgangswiderstand in Abhängigkeit des eingepprägten Regelstroms verändert (**Bild 1**). Bei 0 mA Regelstrom ist die Pin-Diode hochohmig (>10 kΩ) und beeinflusst die Verstärkung nicht. Bei 10mA Diodenstrom (10 Volt) sinkt ihr Widerstand auf etwa 5 Ω ab und die maximale Dämpfung der Stufe ist erreicht. Die Arbeitspunkte beider FET's werden durch den Regelvorgang nicht verändert. Der Regelungsbereich der Schaltung mit PIN-Diode beträgt 20 dB (**Bild 2**).



Durchlaßwiderstand (rf) einer PIN-Diode in Abhängigkeit vom Durchlaßstrom (If)



Dämpfungsverlauf (dB) in Abhängigkeit der Regelspannung (V)

Bild 2: PIN-Dioden Regelung in der Kaskodenschaltung

1.3) Zin, Eingangsanpassung an $Z=50\ \Omega$

Die Messung der Anpassung des Verstärkers an $Z=50\ \Omega$ erfolgt mit Hilfe einer VSWR-Brücke, einem Spektrumanalysator und Tracking-Generator. **Bild 5** zeigt die gewobbelte Rückflußdämpfung (Anpassung) von 0...20MHz mit einem Messergebnis von 22dB bei 9MHz.

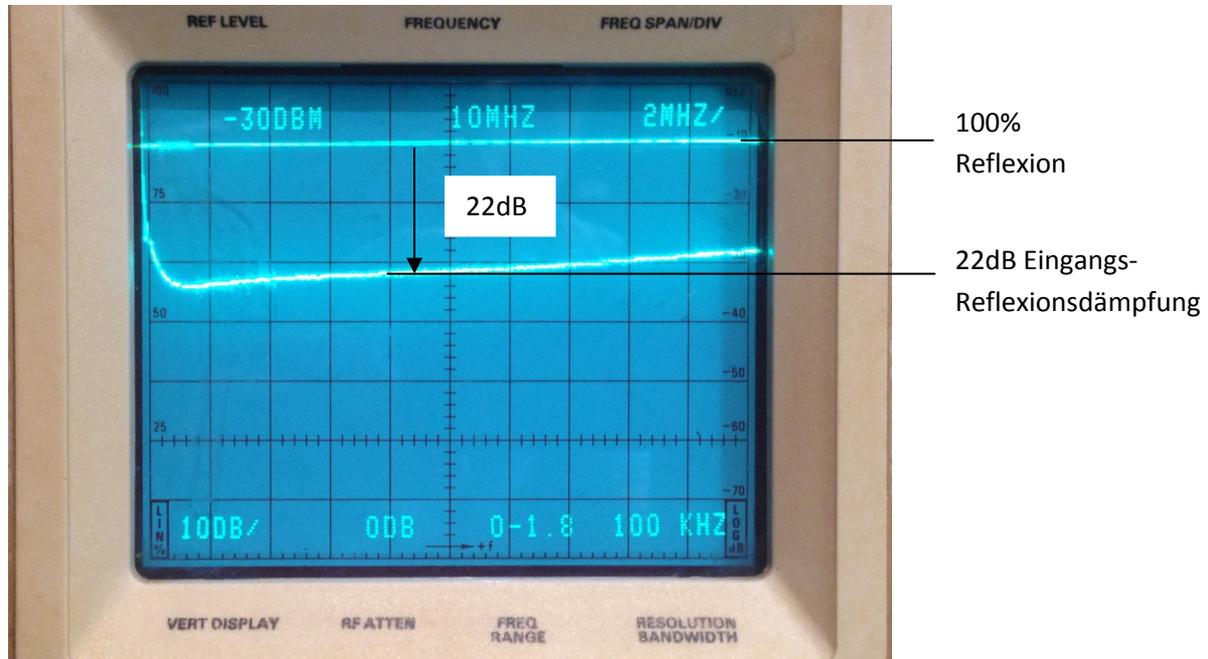


Bild 5: Gewobbelte Eingangs-Rückflußdämpfung 22dB bei 9MHz, SWR=1,17

1.4) Intermodulation, IP_3 , Intercept-Point

Die verwendete Schaltung erreicht einen IP_3 von +21dBm bei AGC=0. Zwei Eingangssignale P_e von jeweils -6 dBm lassen am Ausgang des Verstärkers IM_3 -Produkte mit 54 dBc Abstand entstehen.

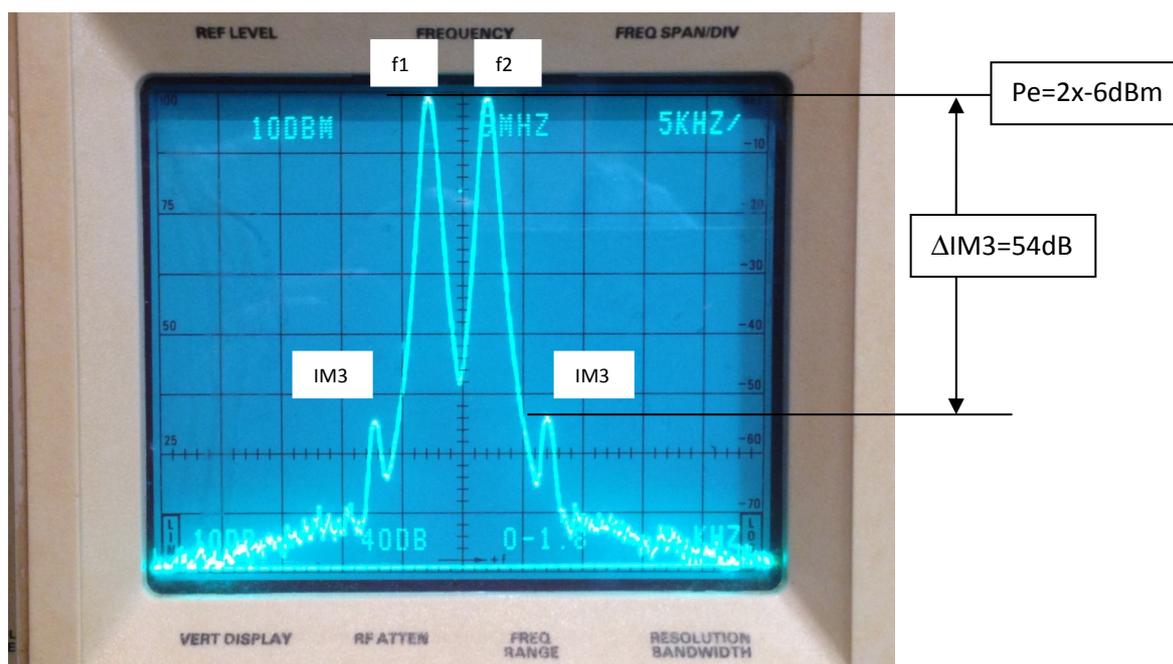


Bild 6: Intermodulation am Ausgang des ZF-Verstärkers, $P_e=2x-6\text{dBm}$, $IM_3=54\text{dBc}$ bei AGC=0

Daraus folgt ein Intercept-Point dritter Ordnung von

- Eingangsfrequenzen: $f_1 = 9\text{MHz}$, $f_2 = 9,005\text{MHz}$
- Eingangspegel: $P_{e_{f_1}}$, $P_{e_{f_2}} = 2 \times 6\text{dBm}$, Ausgangspegel: $P_{a_{f_1}}$, $P_{a_{f_2}}: 2 \times 8\text{dBm}$

$$IP_3 = (\Delta IM_3/2) + P_e = (54\text{dB}/2) - 6\text{dBm} = +21\text{dBm}$$

Der Klirrfaktor (Signalverzerrung) innerhalb der ZF beträgt demnach $<1\%$.

IP3 mit aktiver AGC

Bei eingestellter AGC (Dämpfung) von 10 bzw. 20dB entsteht ein Intermodulationsspektrum nach **Bild 7**. Der Abstand der Nutzprodukte zu den Störprodukten 3. Ordnung beträgt 58dBc.

Daraus berechnet sich der IP_3 zu:

$$IP_3 = \Delta IM_3/2 + P_e = 58\text{dB}/2 - 6\text{dBm} = +23\text{dBm}$$

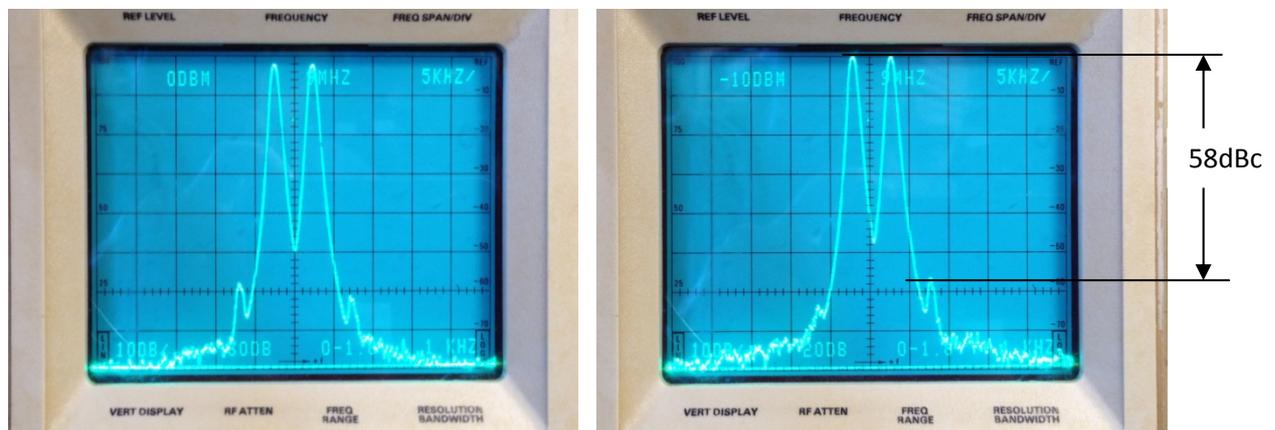


Bild 7: Intermodulation des ZF-Verstärkers bei AGC=10dB (links) und AGC=20dB (rechts)

Die Intermodulation des Verstärkers ändert (verschlechtert) sich demnach durch die AGC-Regelung der Pin-Diode nicht.

Verwendete Ringkerne

TR1: Kern FT37-72, FT37-77, Ferrit-Kern, AL=880, 5+3 Windungen

TR2: Kern T50-6, AL=4, Eisenpulver-Kern, primär 27 Wdg., sekundär 3 Wdg.

R1: auf einen ID von ca. 17mA einstellen

R2: ca. 4,7kOhm

Z in: Rückflußdämpfung=20dB; VSWR= 1,22; Reflexionsfaktor=0,1

Z out: Rückflußdämpfung>30dB; VSWR= 1,06; Reflexionsfaktor=0,03

Einstellung der Ausgangsanpassung (Z out):

R2 so wählen, dass die Spannung am Ausgang mit einem Scope gemessen auf die Hälfte abfällt, wenn der offene Ausgang mit 50 Ohm abgeschlossen wird.

Rückwärtsentkopplung: >40dB (verursacht durch T2 in Gateschaltung)

IM₃-Festigkeit:

Bei AGC=0dB: IM₃=+18dBm

Bei AGC=20dB: IM₃=+26dBm

1dB-Kompression: +3dBm

Berechnungen von Ausgangsübertrager TR2:

$$\ddot{u}=27/3=9$$

$$Z_{in} = \ddot{u}^2 \times Z_{out} = 81 \times 50 \text{ Ohm} = 4050 \text{ Ohm}$$

$$L = N^2 \times AL = 729 \times 4 = 2,92\mu\text{H}$$

$$C = 25330 / f^2 \times L = 107\text{pF}$$

2.1) Wicklung des Ringkerns im Ausgangsschwingkreis

Als Ringkern im Ausgang wird ein Eisenpulverkern mit geringer Permeabilität verwendet, wie z.B. ein T50-6. In **Bild 9** wurde der Kern (links) trifilar 3x9:3 bewickelt und rechts mit primär 27 Windungen zu sekundär 3 Windungen, ergibt in beiden Fällen ein Verhältnis von 9:1.

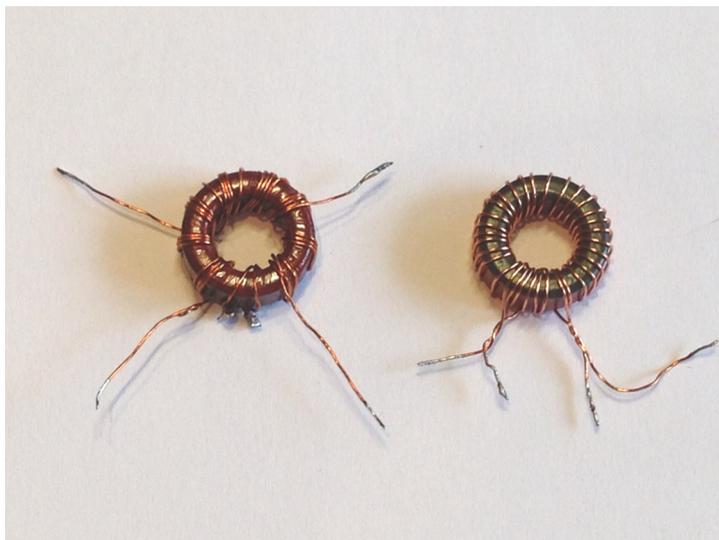


Bild 9: TR2, T50-6, trifilar mit 9x3:3=27:3 (links) oder mit einmaliger Wicklung 27:3 (rechts)

2.3) Intermodulation des selektiver Verstärkers

Die Messung der Intermodulation zeigt **Bild 12**. Zwei Nutzsignale (f_1 , f_2) mit Eingangspegeln von jeweils -6dBm erzeugen IM_3 -Produkte in einem Abstand von 38dBc . Die Verstärkung beträgt 14dB und die AGC ist auf 0dB (0 Volt) eingestellt.

- Eingangsfrequenzen: $f_1=9\text{MHz}$, $f_2=9,005\text{MHz}$

- Eingangsleistungen: $P_{e_{f_1}}$, $P_{e_{f_2}} = 2 \times -6\text{dBm}$, Ausgangsleistung: $P_{a_{f_1}}$, $P_{a_{f_2}} = 2 \times 8\text{dBm}$

$$\text{IP}_3 = \Delta\text{IM}_3/2 + P_e = (48\text{dBc}/2) - 6\text{dBm} = +18\text{dBm}$$

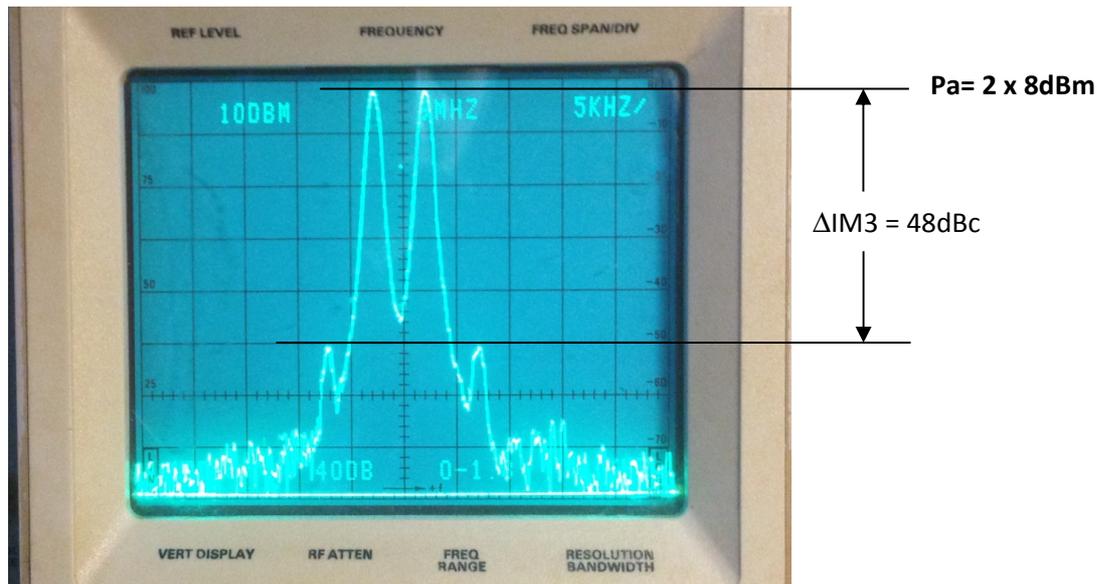


Bild 12: Intermodulation am Ausgang des ZF-Verstärkers bei $P_e = 2 \times -6\text{dBm}$, $\text{AGC} = 0\text{dB}$

Bild 13 zeigt das gleiche Signal, aber mit maximal eingestellter AGC von 20dB Dämpfung. Die IM -Produkte verschwinden jetzt fast im Rauschen, sind kaum noch messbar.

$$\text{IP}_3 = \Delta\text{IM}_3/2 + P_e = 64\text{dB}/2 - 6\text{dBm} = +26\text{dBm}$$

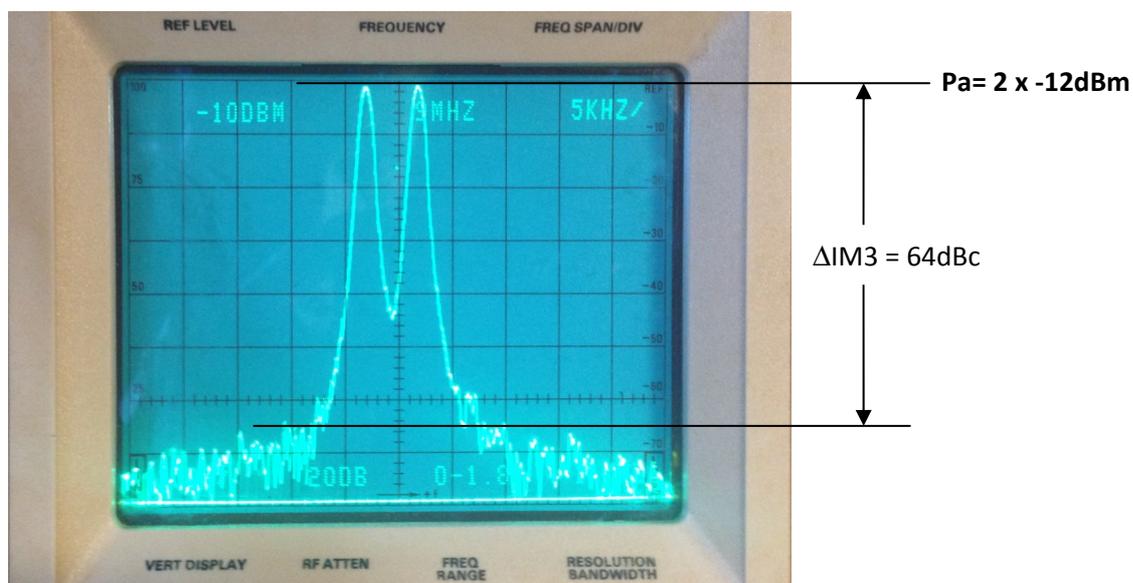


Bild 13: Intermodulation am Ausgang des ZF-Verstärkers mit $\text{AGC} = 20\text{dB}$

Ergebnis:

Bezogen auf Intermodulationsfestigkeit erreicht die breitbandige Kaskodenschaltung einen etwas höheren IP_3 , als die schmalbandige (selektive) Kaskodenschaltung mit Schwingkreis im Ausgang.

IP_3 Breitbandverstärker = +21dBm, IP_3 Schmalbandverstärker = +18dBm

Testaufbau, FET-Kaskodenschaltung, regelbarer ZF-Verstärker

Einen Experimentieraufbau zeigt **Bild 14**. Der Aufbau des Verstärkers ist unkritisch. Lediglich bei der selektiven Ausführung, die etwas höherer Verstärkung arbeitet, sollten beim zweiten FET die Anschlüsse so kurz wie möglich sein, da sonst wilde Schwingungen bei 400MHz auftauchen können.

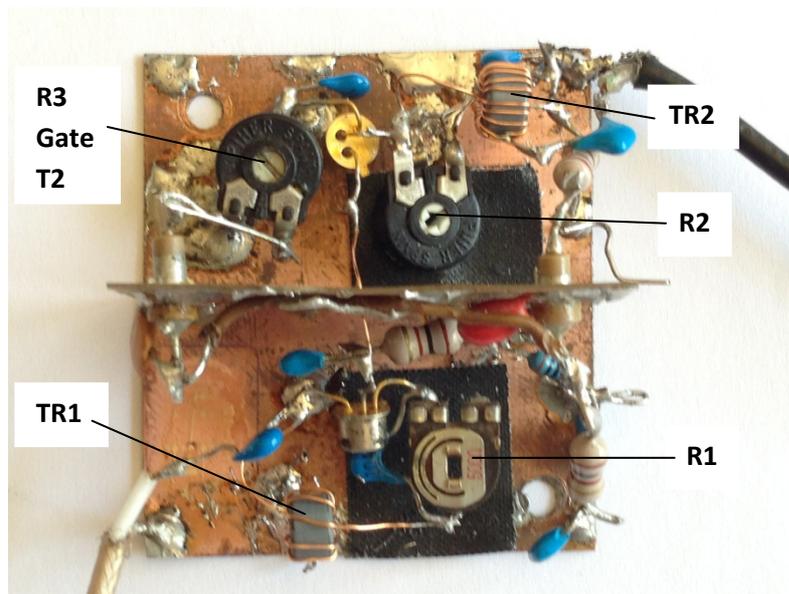
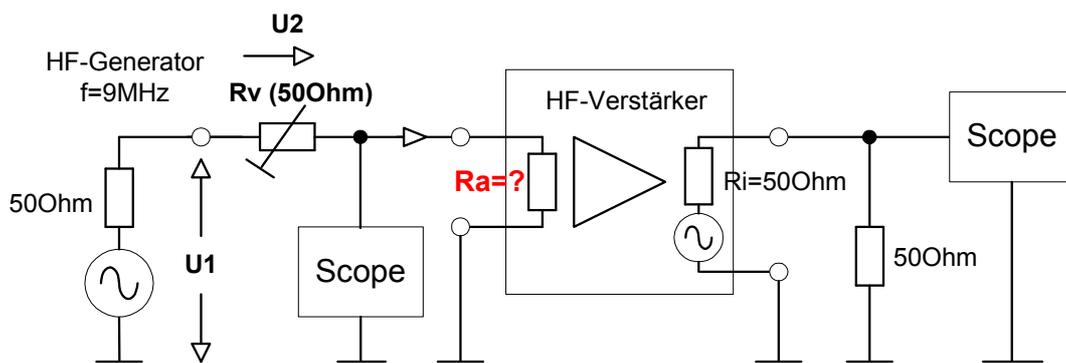


Bild 14: offener Testaufbau, Verstärker, breitbandig

Literatur

- **Low Noise AGC-Controlled IF Amplifier**
Radio Communication May 1985
- **Rauscharmer regelbarer ZF-Verstärker**
CQ DL 1/98
- **Großsignalfestes und empfindliches HF-Eingangsteil von 0,1-500MHz**
QC DL 7/8 2000
https://dc4ku.darc.de/HF_Eingangsteil.pdf
- **Dynamischer ZF-Verstärker für SSB, AM und FM**
Funkamateure 10-12/2000, 1/2001
https://dc4ku.darc.de/Dynamischer_ZF_Verstaerker.pdf
- **Messung von Eingangs- und Ausgangswiderstand**
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-EingangsAusgangsWiderstand.htm>

Appendix:**Messung der Eingangsimpedanz eines HF-Verstärkers**

$$R_a = R_v \cdot \frac{U_2}{U_1 - U_2}$$

Spannungsmessung am Eingang oder Ausgang des HF-Verstärkers:

U_1 = Generatorspannung

R_v = Vorwiderstand (bei Anpassung: 50 Ohm)

U_2 = Spannung am Vorwiderstand

R_a = Der zu berechnende Eingangswiderstand (die Eingangsimpedanz)

Wenn die Spannung U_2 der halbe Wert von U_1 ist, dann ist der gemessene Widerstandswert R_v gleich dem Eingangswiderstand R_a .

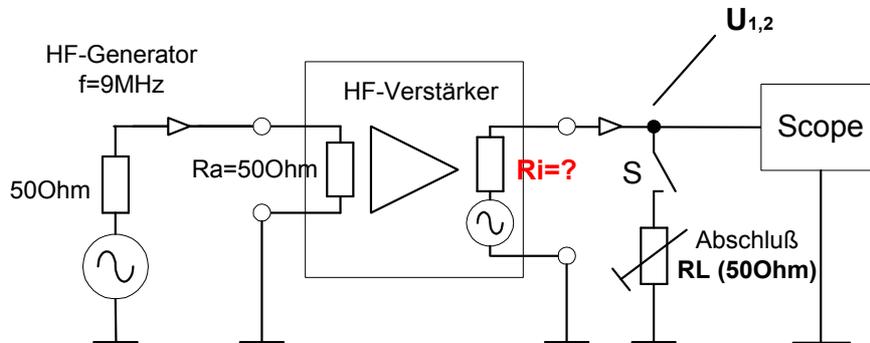
Beispiel:

Messwert $U_1=200\text{mV}$, Messwert $U_2=100\text{mV}$, $R_v=50\text{Ohm}$, $R_a=?$

$R_a = 50\text{Ohm} \times 100\text{mV} / (200\text{mV} - 100\text{mV}) = 50\text{Ohm}$

Der Eingangswiderstand beträgt 50 Ohm

Messung der Ausgangsimpedanz eines HF-Verstärkers



$$R_i = R_L \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Spannungsmessung am Ausgang des HF-Verstärkers:

U_1 = Leerlaufspannung (bei $R_L = \infty \Omega$, also ohne R_L , wenn Schalter S offen)

R_L = Lastwiderstand (bei Anpassung 50 Ohm)

U_2 = Spannung mit Lastwiderstand R_L

R_i = Der zu berechnende Ausgangswiderstand (die Ausgangsimpedanz)

Wenn die Spannung U_2 der halbe Wert von U_1 ist, dann ist der Ausgangswiderstand R_i gleich dem Widerstand R_L .

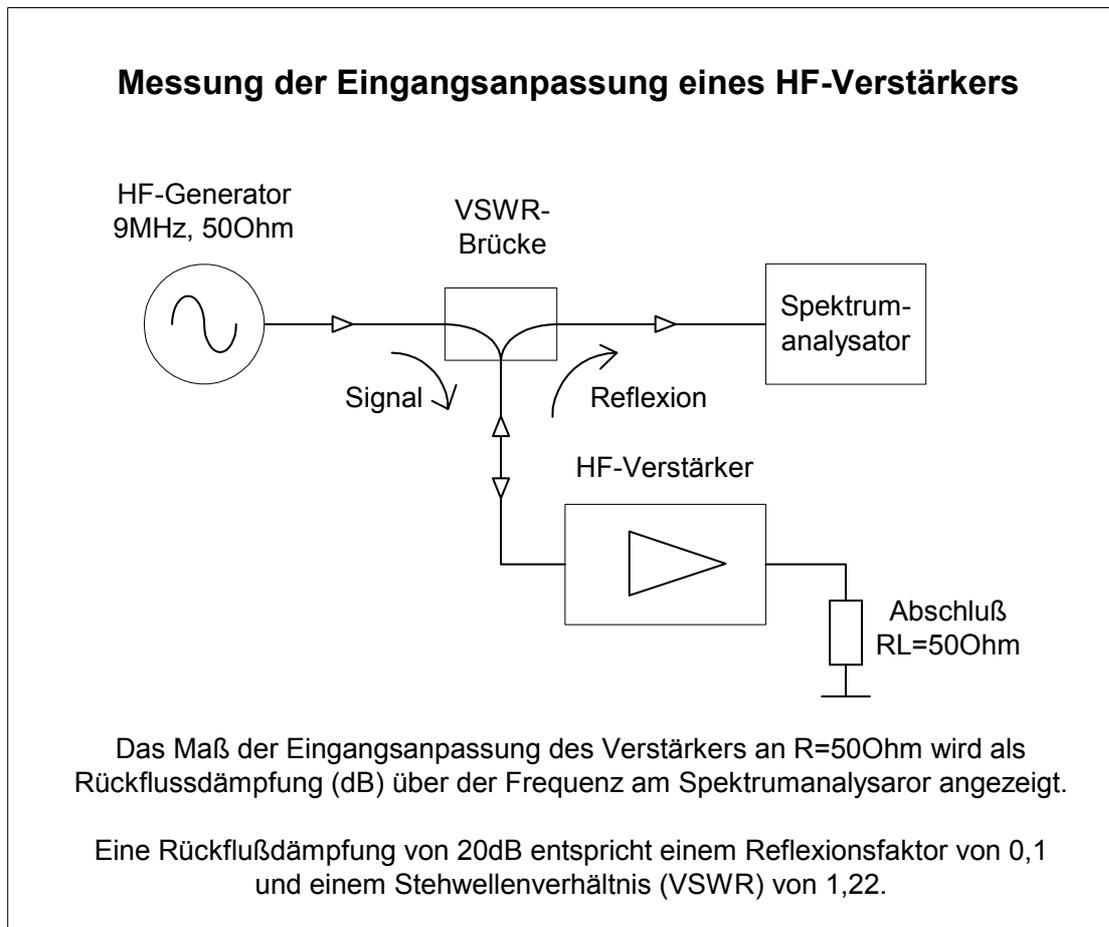
Beispiel:

Messwert $U_1=200\text{mV}$, Messwert $U_2=100\text{mV}$, $R_L=50\text{Ohm}$, $R_i=?$

$R_i=50\text{Ohm} \times (200\text{mV}/100\text{mV}-1) = 50\text{Ohm}$

Der Ausgangswiderstand beträgt 50 Ohm

Wer über eine SWR-Messbrücke verfügt, kann die Eingangsanpassung auch über die Rückflußdämpfung messen:



Werner Schnorrenberg
DC4KU, dc4ku@darc.de
26.04.2016