

Ultra Low Noise Verstärker mit 60dB Gain

Version 1.7

Bernd Kaa - DG4RBF

Copyright by Bernd Kaa

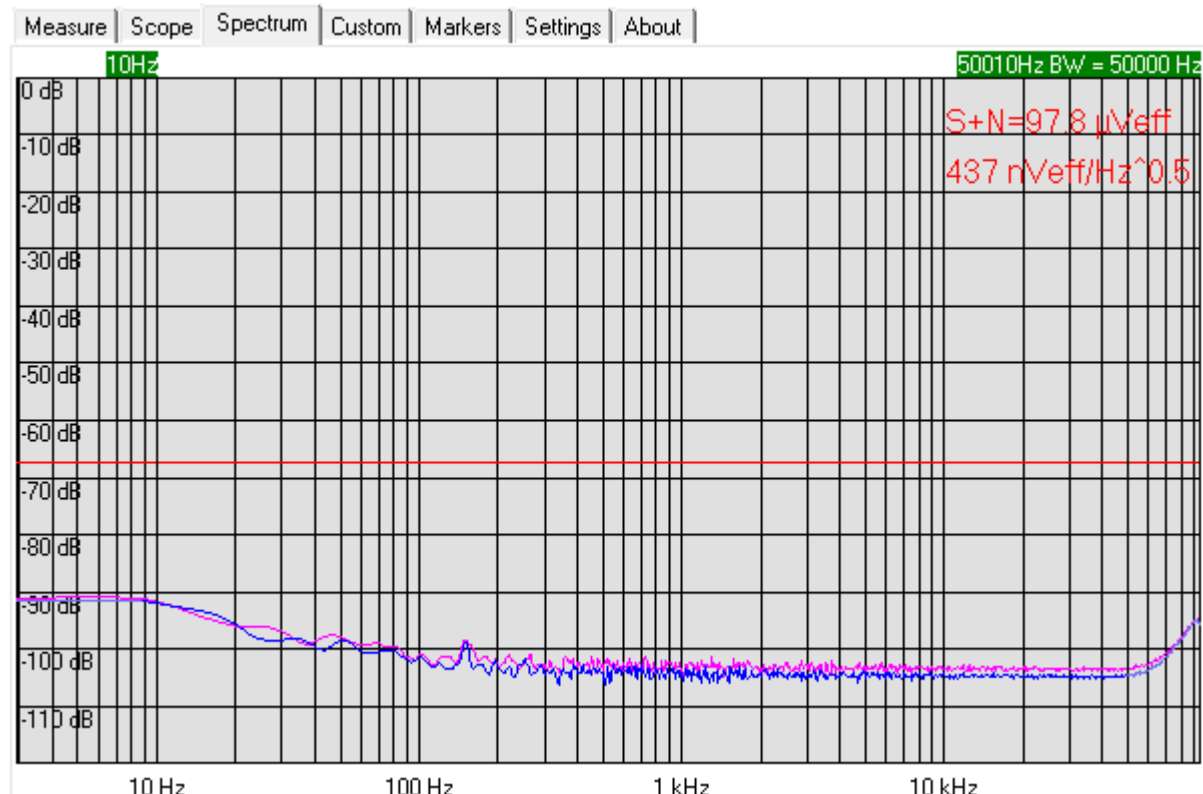
Der Artikel beschreibt einen Ultra Low Noise Verstärker für niederfrequente Messzwecke. Vorrangig wird dieser Verstärker für Rauschmessungen im Bereich von 10Hz bis 100kHz verwendet. Der Verstärker hat ein sehr niedriges Eigenrauschen. Beim Prototyp wurde ein Noise Density von nur $0,40 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$, bei einer Messbandbreite von 10Hz - 50,01kHz erreicht. Es handelt sich um eine Abwandlung und Optimierung des von Carles Wenzel vorgestellten Verstärkers [1], der ca. $0,6 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreichte. In Verbindung mit einer guten USB-Soundkarte und der PC-Software "AudioMeter" [2] von Prof. Thomas Baier können vielfältige Messungen durchgeführt werden. Die in [4] gezeigten Messungen wurden damit durchgeführt.

Als erstes möchte ich einen Blick zurück zur Entwicklung dieses Verstärkers werfen. Zunächst wurde die Anzahl der FET's erhöht und ein besserer Doppel-OPV getestet. Hier das Ergebnis in der Ausbaustufe mit 3 FET's: Die Messkurve in pink zeigt das Rauschen bei Verwendung des LM833 als OPV. Damit wurde ein Noise Density von $507 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht. Wird als OPV ein sehr rauscharmer Typ, wie der AD8599, verwendet, so kann das Rauschen auf $437 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$ gesenkt werden (Blaue Messkurve).

3 X FET R1 = 270R U-Drain: 1,9V TP= -370mV R8 = 1k5
LiPo: +- 7.4V (Ladezustand = 8.0V) 7,4mA pro FET I-gesamt = 36mA

Pink = LM833 ($507 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$)

Blau = AD8599 ($437 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$)



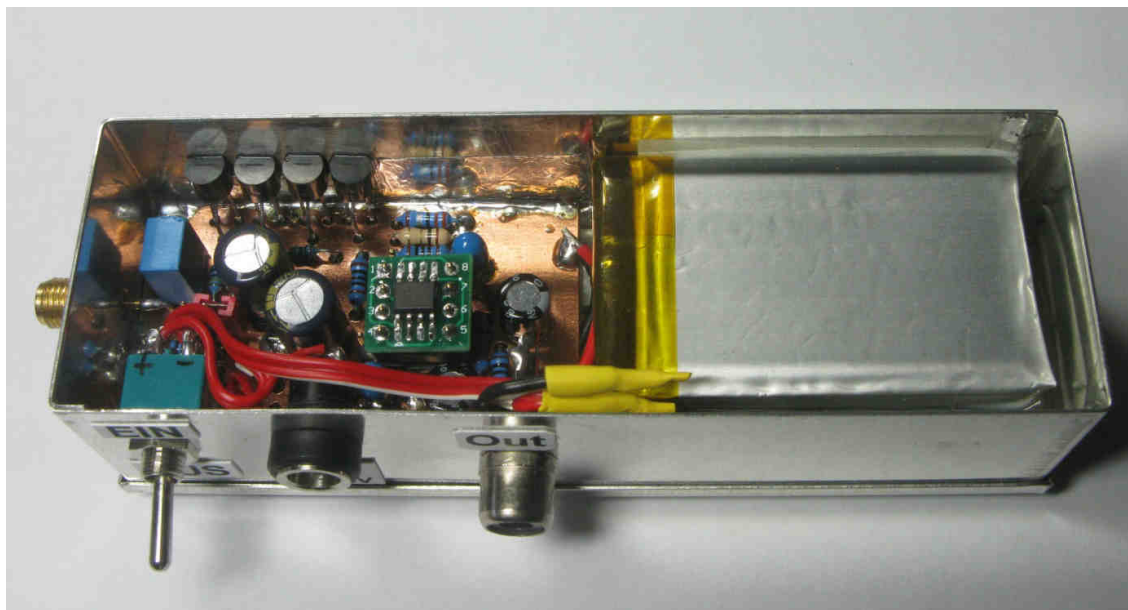
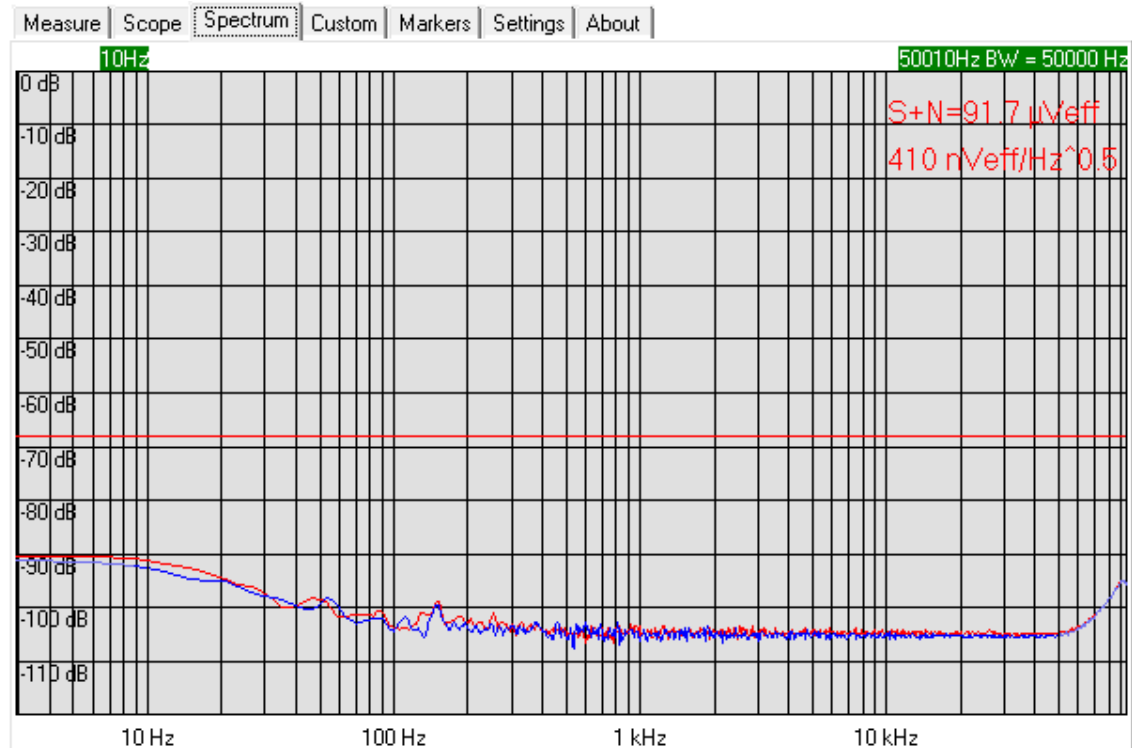
Die nächste Messung zeigt den Unterschied zwischen 3 und 4 FET's. Bei Verwendung von 4 Fet's wurde ein Noise Density von $410 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht, was zurückgerechnet auf den Eingang $0,41 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$ sind. Zu beachten ist auch, dass dieser sehr niedrige Wert bei einer sehr großen Messbandbreite von 10Hz - 50,01kHz erreicht wurde.

R1 = 240.5R U-Drain: 1,64V TP= -430mV R8 = 1k8
 LiPo: +- 7.4V (Ladezustand = 8.0V) 6,8mA pro FET I-gesamt = 40 mA

Rot = 3 X FET ($437 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$)

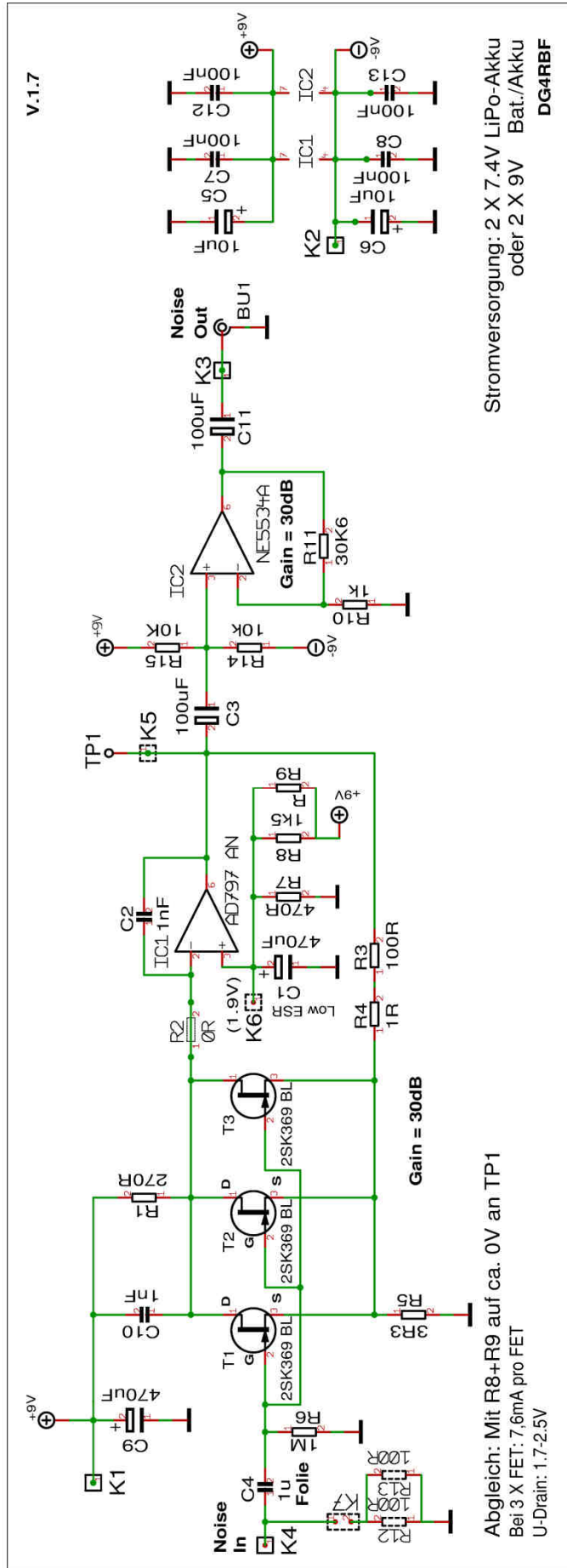
Blau = 4 X FET ($410 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$)

R1 wurde angepasst R1 = 270R + 2k2 Paralell (240.5R)



Im Bild sieht man den Prototyp (Nr.2), mit dem obige Messungen gemacht wurden, bestückt mit 4 FET's und dem Doppel-OPV AD8599 auf einer Adapterplatine. Die FET's sind mit Wärmeleitkleber an das Gehäuse geklebt. Als Spannungsversorgung wurden 2 X 7,4V LiPo's verwendet.

Ultra Low Noise AMP mit 60dB Gain



Anpassung:

Bei 3 FET: R1 = 270 Ohm

Bei 4 FET: R1 = 220 Ohm

Schaltung und Bauteilewahl

Das Besondere an der Schaltung sind die 3-4 parallel geschalteten rauscharmen J-FET's, die mit dem ersten OPV in Kaskade geschaltet sind. Durch diese Schaltungsvariante wird das Rauschen des OPV deutlich verringert. Die Verstärkung der ersten Stufe wird durch R5 sowie R4+R3 bestimmt. Sie berechnet sich zu $V = 1 + (R4 + R3) / R5$, also $V = 1 + (100 + 1) / 3.3 = 31.6$, dies entspricht 30dB Spannungsverstärkung. Als zweite Stufe folgt ein normaler OPV mit einer festen Verstärkung von 30dB, so dass sich eine Gesamtverstärkung von 60db ergibt. Die Rauscheigenschaften der zweiten Stufe spielen keine besondere Rolle mehr. Es hat sich aber gezeigt, dass bei Verwendung eines sehr rauscharmen OPV in der ersten Stufe das Rauschen nochmals deutlich gesenkt werden kann. Der Doppel-OPV AD8599 ist hierfür gut geeignet, allerdings ist er nicht so leicht erhältlich. Wegen der leichteren Beschaffbarkeit habe ich mich dafür entschieden, zwei einzel OPV's zu verwenden. Dies hat außerdem noch den Vorteil, dass man bei der Auswahl geeigneter OPV's deutlich flexibler ist. Als erster OPV wird jetzt der sehr rauscharme AD797 verwendet. Als zweiter OPV kommt der NE5534A zum Einsatz. Beide OPV's sind bei [3] erhältlich. In der aktuellen Version 1.7 wurde der zweite OPV als nichtinvertierender Verstärker beschaltet und der Frequenzgang verbessert. Der zweite OPV ist sehr entscheidend für die zu erreichende Bandbreite. Bei Verwendung des NE5534A liegt die 3dB Bandbreite bei ca. 800kHz. (Siehe Abschnitt Frequenzgang)

Stromversorgung

Da ein zusätzliches Rauschen durch die Stromversorgung vermieden werden sollte, muss die Schaltung aus zwei Akkus oder Batterien versorgt werden. Zu empfehlen sind 9V Akkus oder leistungsstärkere 7,4V LiPo oder Li-Ionen Akkus. Ich betreibe die Schaltung mit zwei 7,4 V LiPo Akkus, die eine Kapazität von 820mAh haben. Achten Sie darauf, dass die Versorgungsspannungen nicht zu weit voneinander abweichen, da sonst wegen R14 und R15 ein zu großer Gleichspannungs-Offset entsteht und der Verstärker nicht mehr funktioniert.

Gehäuse

Die Platine kann wahlweise in ein 37mm oder 55mm breites Weißblechgehäuse eingebaut werden. Ebenso ist es möglich ein stabiles Aluminium Druckgussgehäuse zu verwenden. Zum Beispiel das preiswerte Gehäuse von HAMMOND (Nr: 1550Z106) erhältlich bei [3]

Anordnung der FET's

Bei der Erstellung des Layouts wurde darauf geachtet, dass die FET's am Platinenrand sitzen, so dass das Weißblechgehäuse zur Ableitung der in den FET's entstehenden Wärme benützt werden kann. Auch dieses Detail trägt zum Erreichen des extrem niedrigen Rauschens bei.

Anpassung bei 4 FET's

Wenn 4 FET's verwendet werden, muss R1 auf 220 Ohm verkleinert werden.

Abgleich

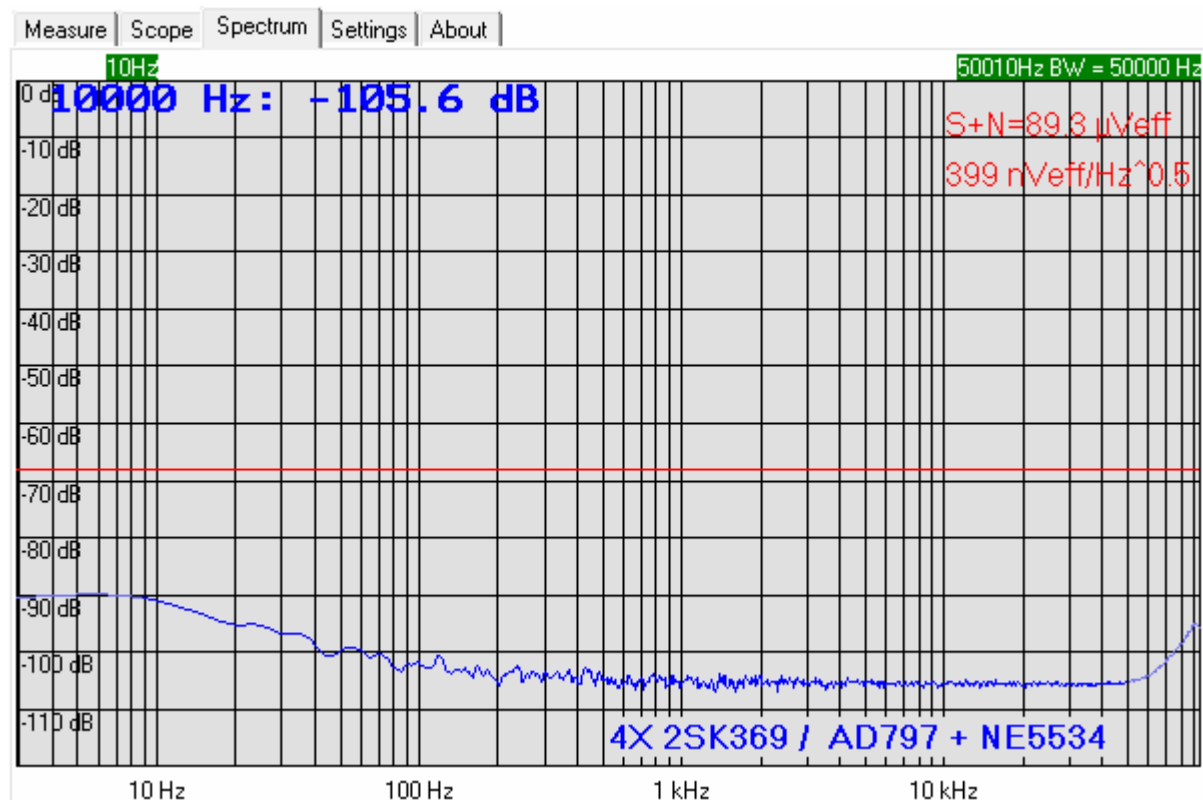
R8 und R9 (Spannungsteiler an Pin3 von IC1a) müssen so angepasst werden, dass an TP1 ca. 0 Volt bis -1 Volt anliegen. Hierzu schlage ich folgendes Vorgehen vor:

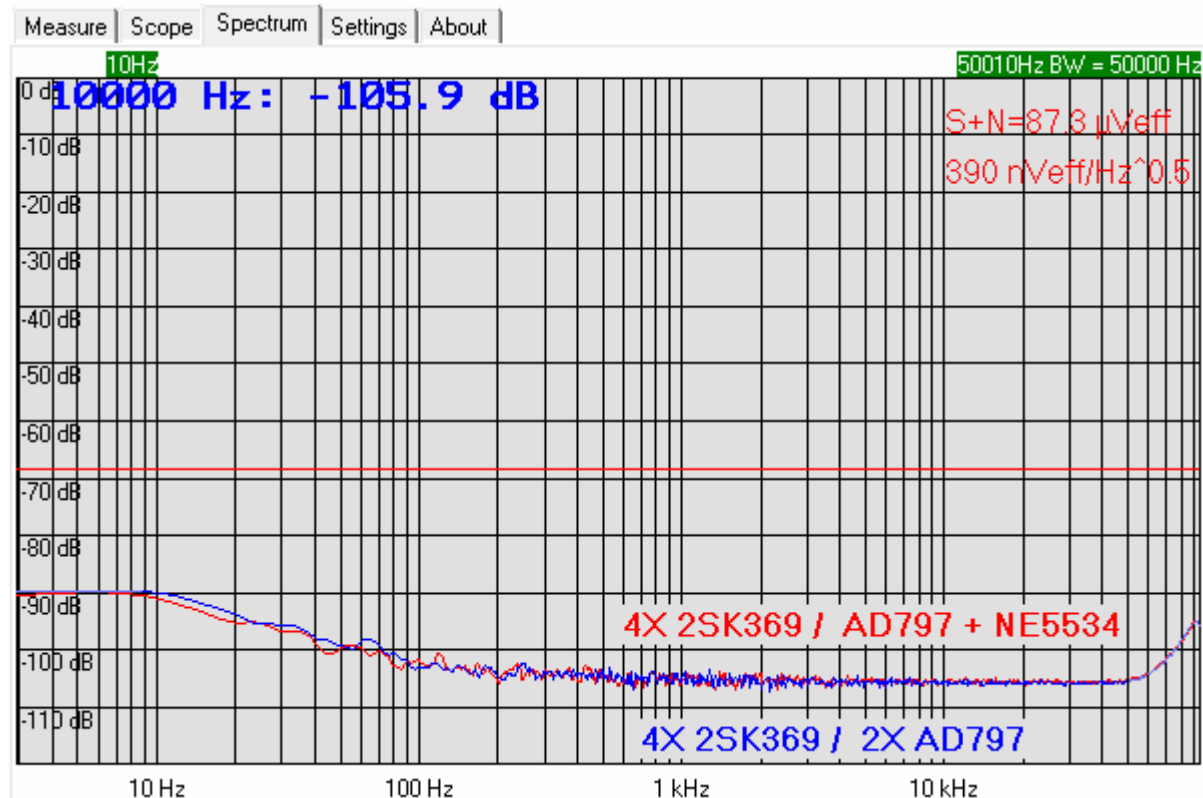
- R8 wird vorübergehend durch einen 2kOhm Spindeltrimmer ersetzt.
- Mit R8 wird die Offsetspannung an Pin3 so eingestellt, dass an TP1 ca. 0 V anliegen.
- Jetzt wird R8 wieder ausgebaut, gemessen und durch einen Metallfilmwiderstand ersetzt.

Möglicherweise muss der benötigte Widerstand aus zwei Widerständen zusammengesetzt werden. Hierfür ist R9 vorhanden. Die richtige Offsetspannung ist von der Steilheit der FETs abhängig. Die FETs hatten die Kennung BL1D. Bei den ersten Aufbauten wurden die FET's nicht selektiert.

Aktuelle Version 1.7 mit zwei einzel OPV

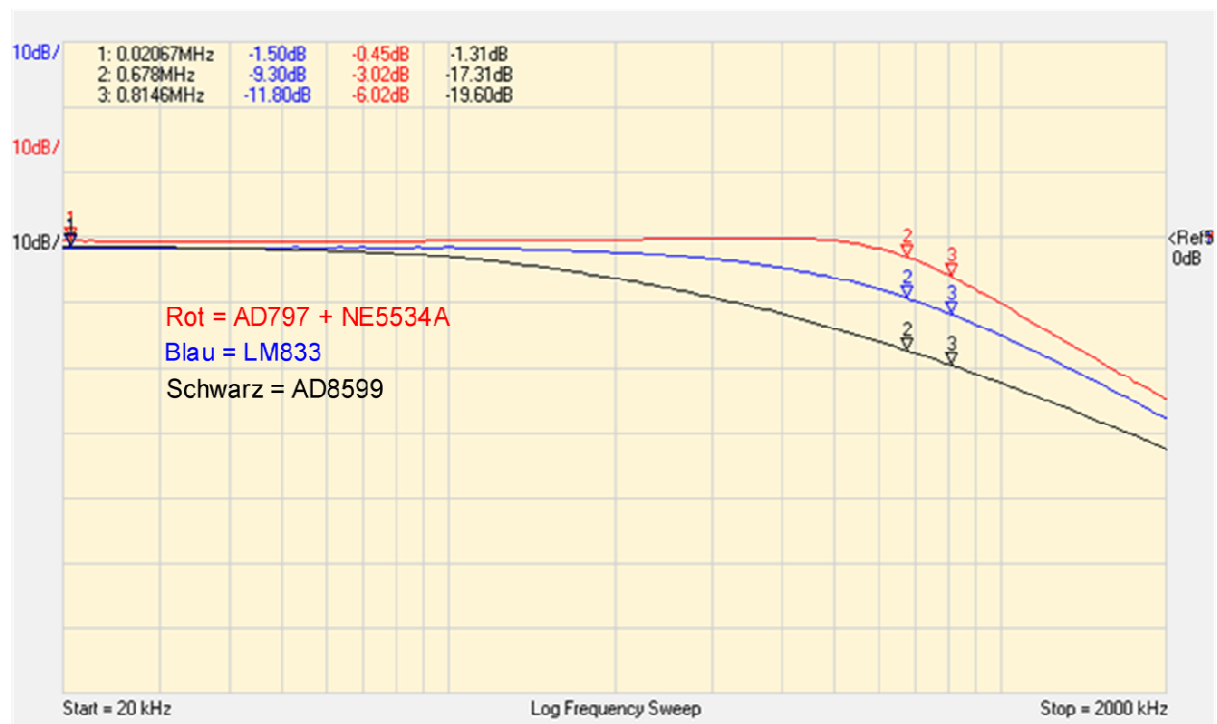
Bei der aktuellen Version 1.7 wurden die verwendeten FET's ausgemessen und auf gleiche Pinch-Off Spannung gepaart. Als Gehäuse wurde hier das Aluminium Druckgussgehäuse der Firma HAMMOND gewählt. Bei Verwendung von 4 FET's und einer OPV Bestückung mit AD797 + NE5534A wurde ein Noise Density von $399 \text{ nVeff} / \sqrt{\text{Hz}}$ bei 60 dB Verstärkung gemessen. Verwendet man nur 3 FET's, so steigt das Noise Density auf ca. $440 \text{ nVeff} / \sqrt{\text{Hz}}$ an. Würde man als zweiten OPV auch einen AD797 verwenden, so sinkt das Rauschen auf $390 \text{ nVeff} / \sqrt{\text{Hz}}$. Wenn man diese Messungen mit den Messungen der Vorgänger Version vergleicht, so scheint es, dass das Selektieren der FET's nochmals eine kleine Reduzierung des Rauschens gebracht hat.



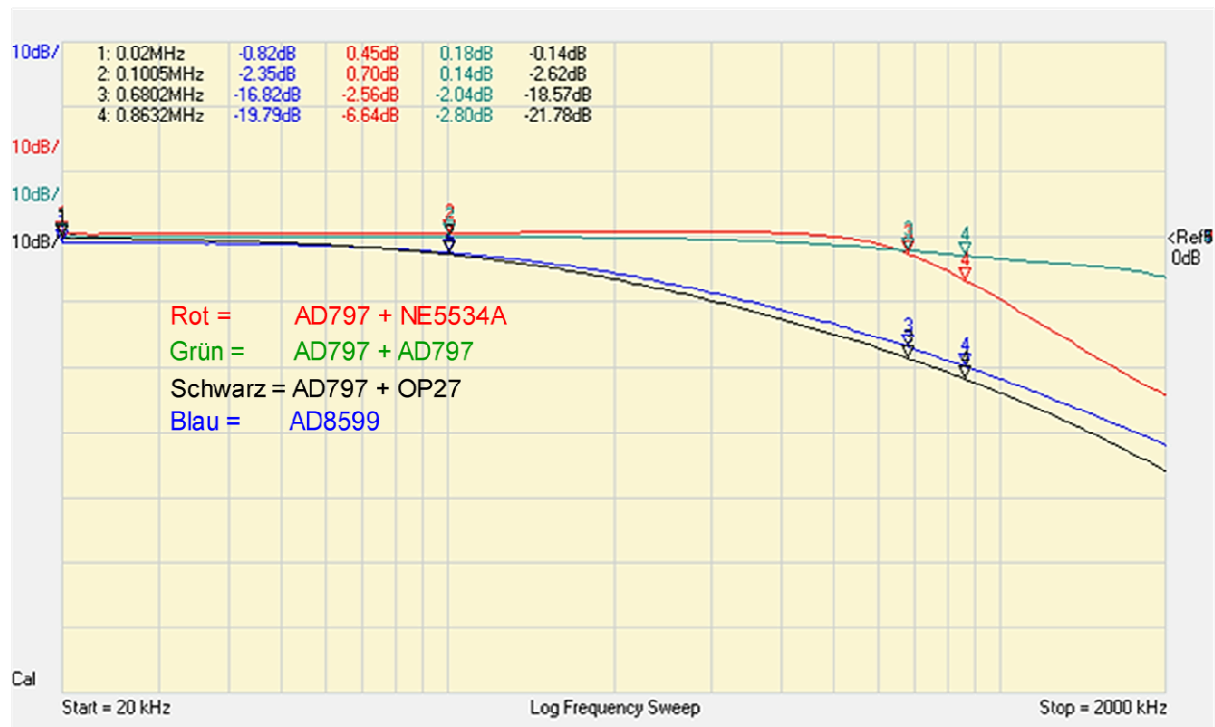


Frequenzgang

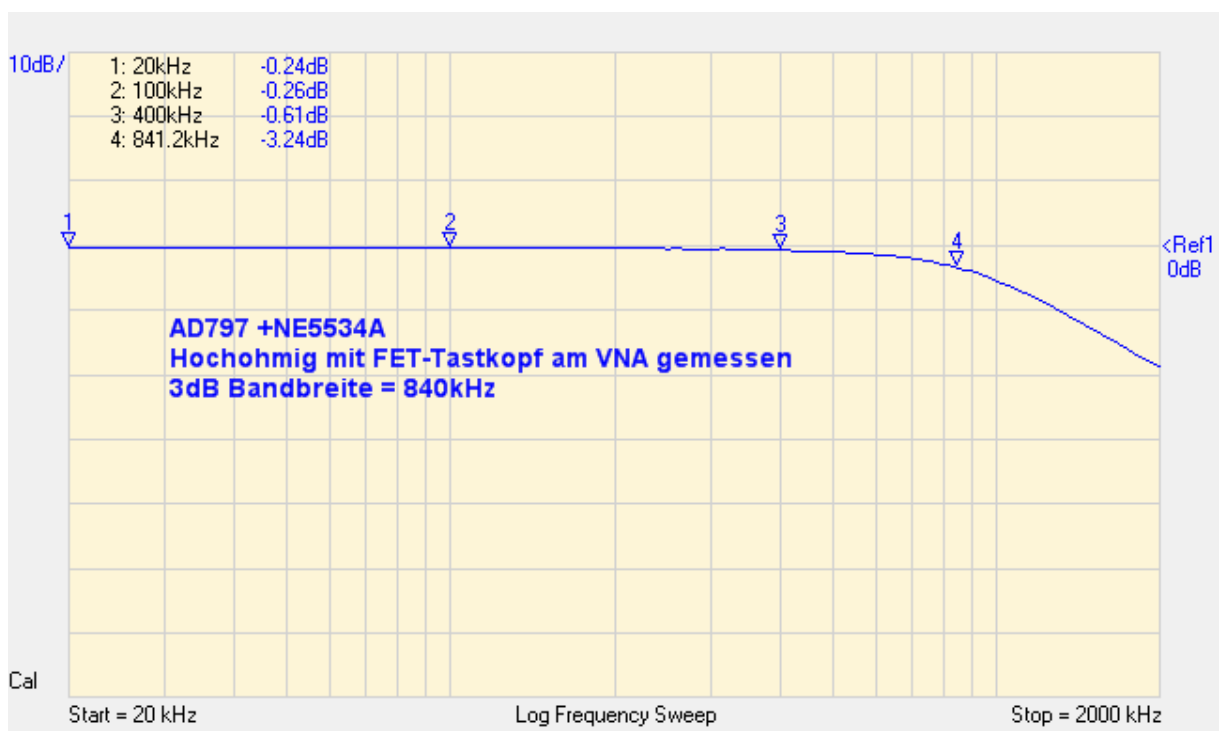
Neben dem Rauschen ist die Auswahl der OPV's auch entscheidend für den Frequenzgang und die zu erreichende Bandbreite des Verstärkers. Nachfolgende VNA-Messung (50 Ohm) zeigt den Frequenzgang des Verstärkers mit verschiedenen OPV's. Bei Verwendung des AD797 + NE5534A ergibt sich ein sehr gerader Frequenzgang bis ca. 500kHz. Die 3dB Bandbreite liegt hier bei ca. 700kHz (Rote Kurve).

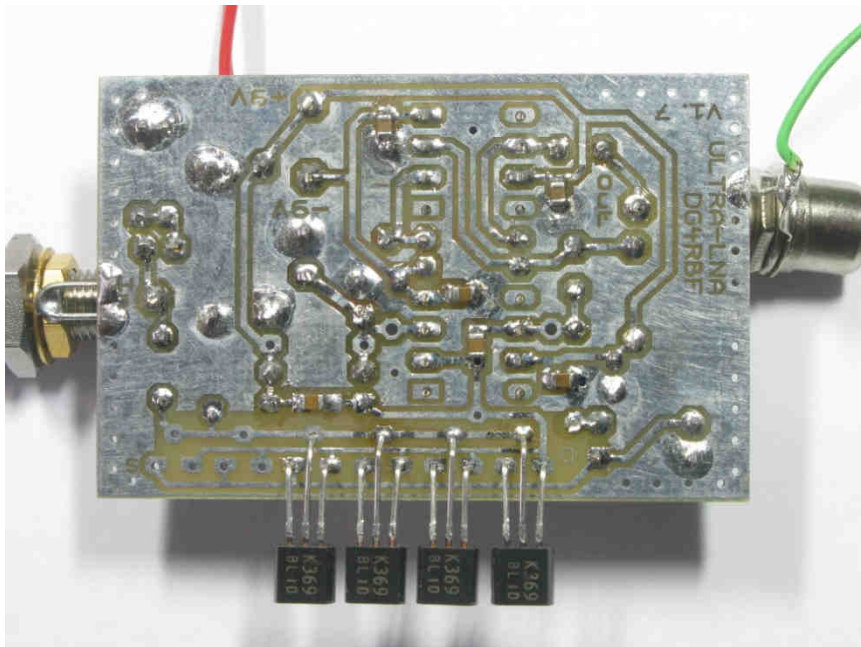
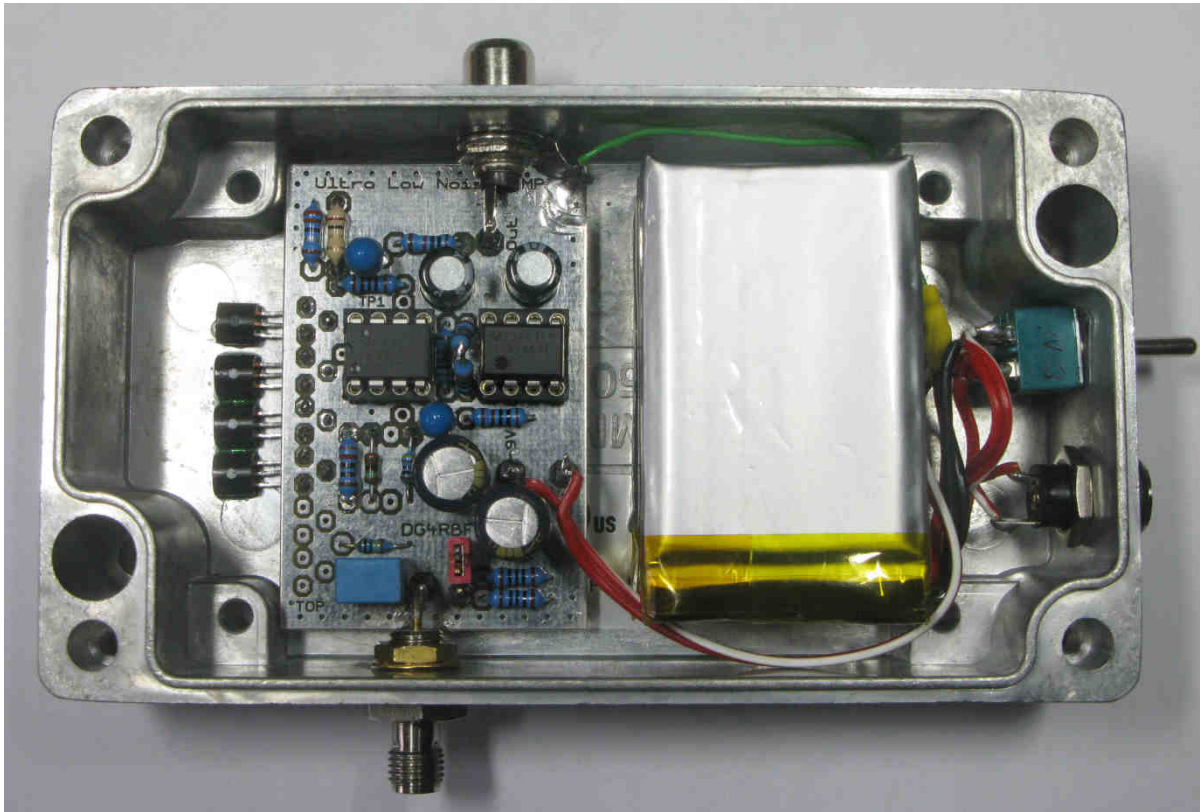


Die nachfolgende Messung zeigt, wie sich der zweite OPV auf den Frequenzgang und die zu erreichende Bandbreite auswirkt. Massnahmen zur Frequenzgangkompensation wurden nicht getestet.

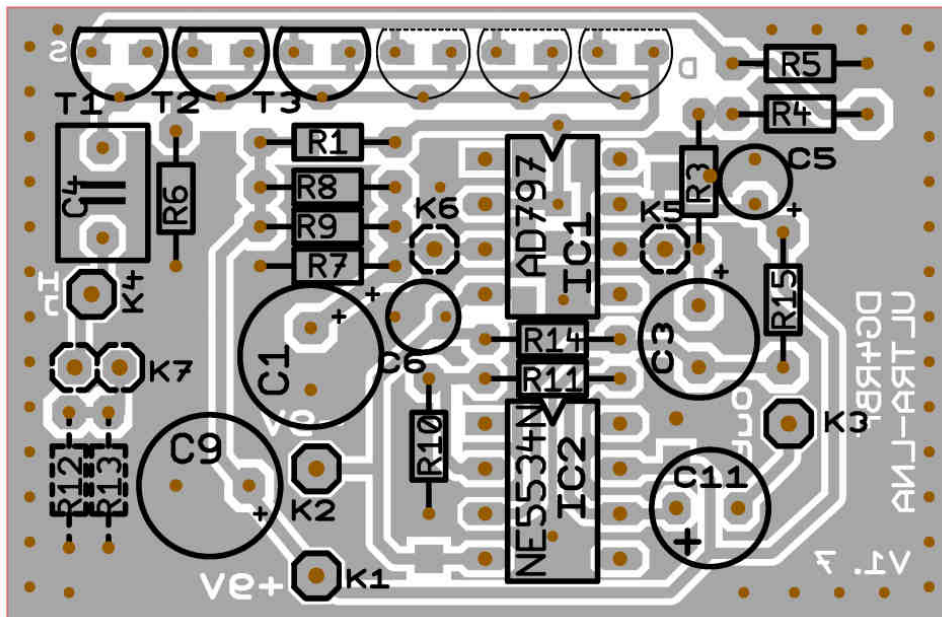


Zu beachten ist, dass die Messungen im 50 Ohm System gemacht wurden und somit der Ausgang des Verstärkers stärker belastet wurde als bei der üblichen Anwendung. Wird die 3dB Bandbreite ohne den 50Ohm Eingangswiderstand im Verstärker mit einem Messsender + Oszilloskope (1MOhm) ermittelt, oder benützt man einen hochohmigen FET-Tastkopf am Eingang des VNA, so liegt die 3dB Bandbreite sogar bei 840kHz.

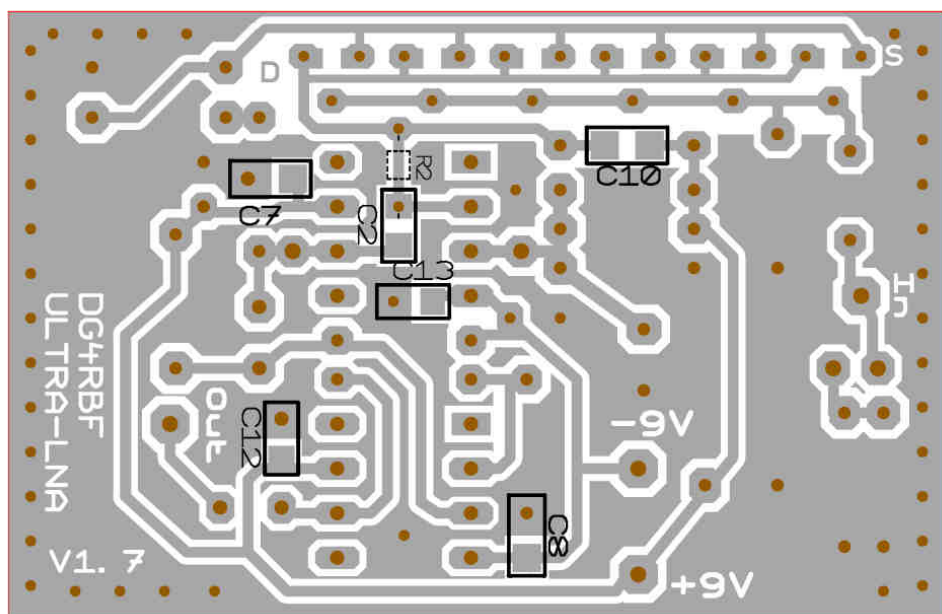




Bestückungspläne



Bestückung oben (nicht maßstäblich)



Bestückung unten (nicht maßstäblich)

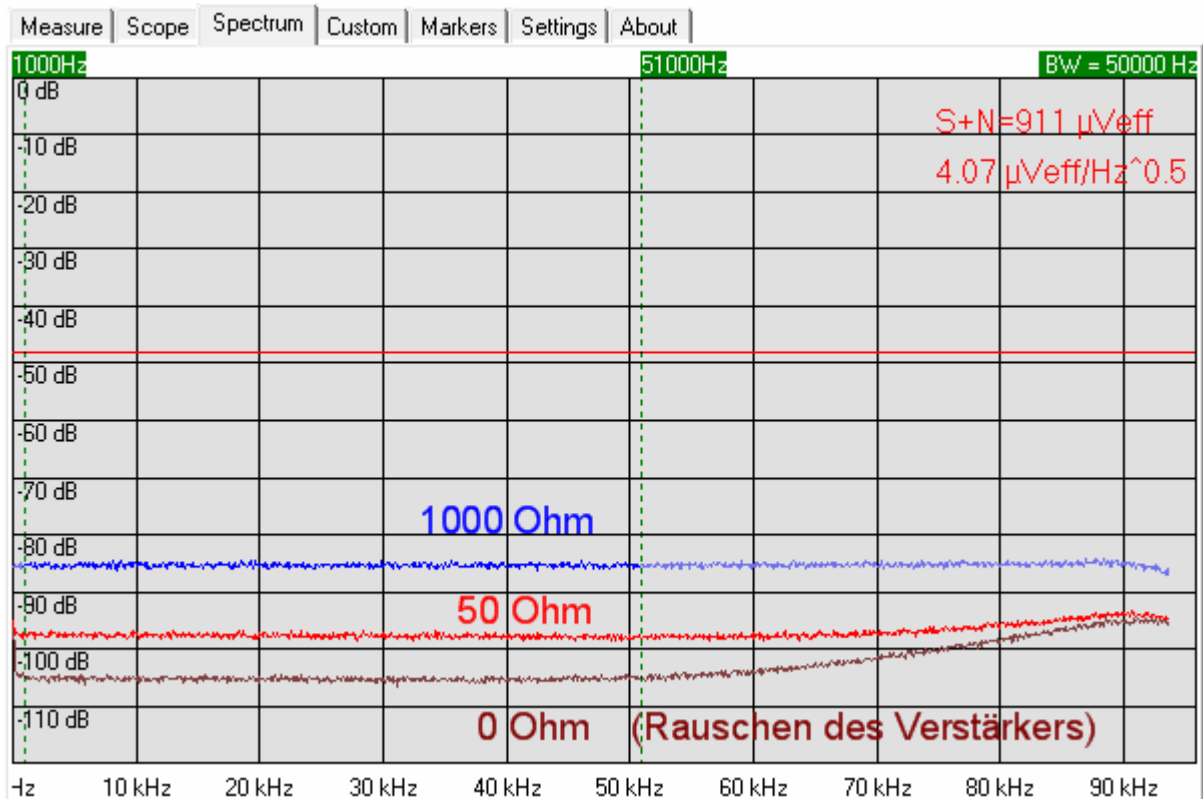
Platinen können beim Autor angefragt werden.

Kontrolle der richtigen Funktion: Messen des thermischen Rauschen von Widerständen

1000Ω Widerstand = 4070 nV_{eff} /√Hz

50Ω Widerstand = 980 nV_{eff} /√Hz

0Ω Widerstand = 410 nV_{eff} /√Hz (Eigenrauschen des Verstärkers)



Vergleich zur Theorie

Thermisches Rauschen eines 1000 Ohm Widerstandes:

Das gemessene Spectral Density von 4070nV_{eff} /√Hz abzüglich dem Grundrauschen des Verstärkers von 410 nV_{eff} /√Hz ergibt ein Rauschen von:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{4070^2 - 410^2} = 4049 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$$

Zurückgerechnet, ohne die 60dB Gain des Verstärkers, ergibt sich ein Rauschen von:

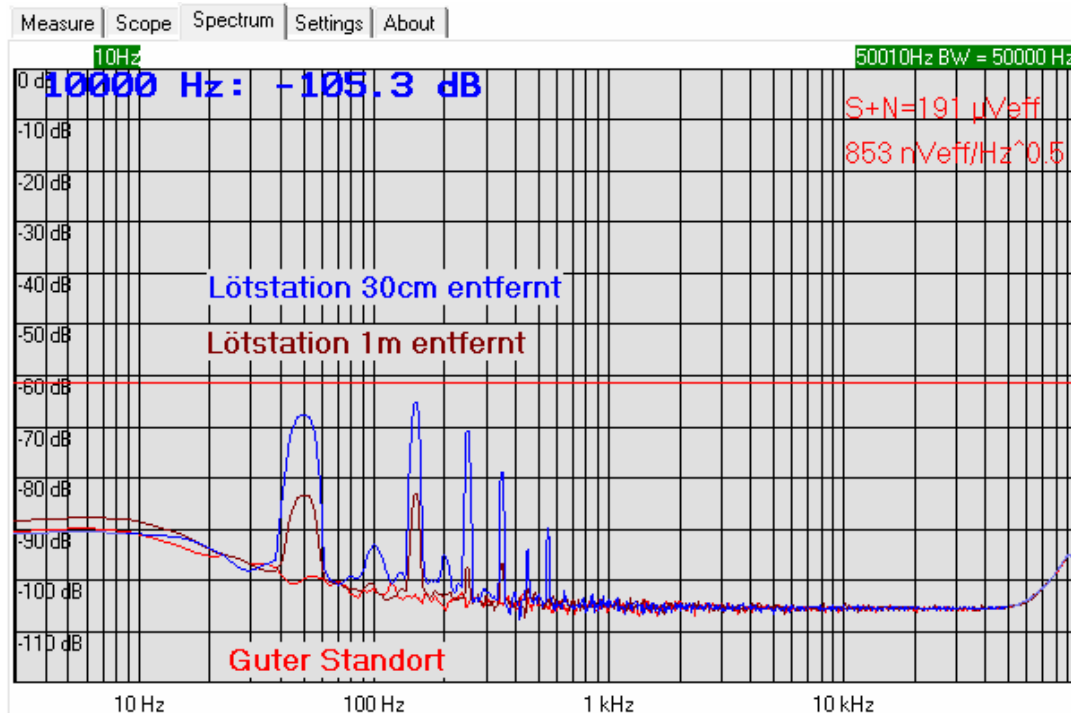
$$4049 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}} / 1000 = 4.05 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$$

=> Stimmt gut mit der Theorie überein!

Temperatur ϑ	25	° Celsius
Messbandbreite Δf	1	Hz
Widerstand R	1000	Ohm
↓		
Berechnen Rücksetzen		
Rauschspannung U_R	0.00405779	μV (Mikrovolt)
Rauschpegel L_u	-165.615727	dB _u
Rauschpegel L_v	-167.834215	dB _v

Hinweise:

- Zur Überprüfung des Eigenrauschens des Verstärkers muss sein Eingang kurzgeschlossen werden.
- Wird die Verstärkung (60dB) mit einem Messsender überprüft, so muss der Eingang des Verstärkers mit 50 Ohm abgeschlossen werden. Hierfür ist ein Jumper vorhanden.
- Das Messsystem reagiert trotz guter Abschirmung sehr sensibel auf Netzstörungen. Deshalb macht es Sinn, den Verstärker nicht neben anderen Elektrogeräten zu positionieren. Suchen Sie einen Platz, der ein paar Meter von potentiellen Störquellen entfernt ist.



Bauteilhinweise

- Alle Widerstände Metallschicht 1%
- Der Widerstand R11 (30k6) wird aus zwei Widerständen zusammengesetzt. (27k + 3k6) erhältlich bei [3]
- Keine Trimmer verwenden. (Rauschen zu stark)
- Die FET's wurden aus einer Produktionsserie (BL1D) verwendet. Wichtig ist die Bezeichnung BL, da dies die **Idss** classification (8.0~16.0mA) angibt.
- Stromversorgung: Li-Po Akku (Ub: 7,4V - 8,2V)
- Die Platine kann wahlweise in ein 37mm oder 55mm breites Weißblechgehäuse eingebaut werden. Ebenso kann ein Aluminium Druckgussgehäuse verwendet werden.

Noise Density im Vergleich

Die besten rauscharmen OPV's erreichen : $0,9 \text{ nVeff}/\sqrt{\text{Hz}}$

Der original Wenzel-Verstärker erreicht : $0,6 \text{ nVeff}/\sqrt{\text{Hz}}$

Der Ultra LNA (DG4RBF) erreicht : $0,4 \text{ nVeff}/\sqrt{\text{Hz}}$

Literatur und Quellen:

- (1) <http://www.techlib.com/files/lowamp.pdf>
- (2) AudioMeter Download: <http://www.dg8saq.darc.de/AudioMeter/index.shtml>
- (3) Reichelt Elektronik
- (4) Kaa, Bernd, DG4RBF: Rauscharme Stromversorgung mit dem Spannungsregler LM723. FA 12/2014 Seiten 1296-1299
- (5) <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-rauschen.htm>

Stückliste

Alle Widerstände Metallschicht 1%

C1	470uF	Low ESR	R3	100R
C2	1nF	SMD	R4	1R
C3	100uF		R5	3R3
C4	1uF	Folie	R6	1M
C5	10uF		R7	470R
C6	10uF		R8	1k5
C7	100nF	SMD	R9	Siehe Text
C8	100nF	SMD	R10	1k
C9	470uF		R11	30K6 (27k + 3k6)
C10	1nF	SMD	R12	100R
C11	100uF		R13	100R
C12	100nF	SMD	R14	10k
C13	100nF	SMD	R15	10K
IC1	AD797	AN	T1	2SK369 BL
IC2	NE5534A		T2	2SK369 BL
			T3	2SK369 BL
R1	270R	(220R) Siehe Text	(T4	2SK369 BL)
R2	----			

DG4RBF

Copyright by Bernd Kaa, DG4RBF

Artikel im FUNKAMATEUR 10 / 2015