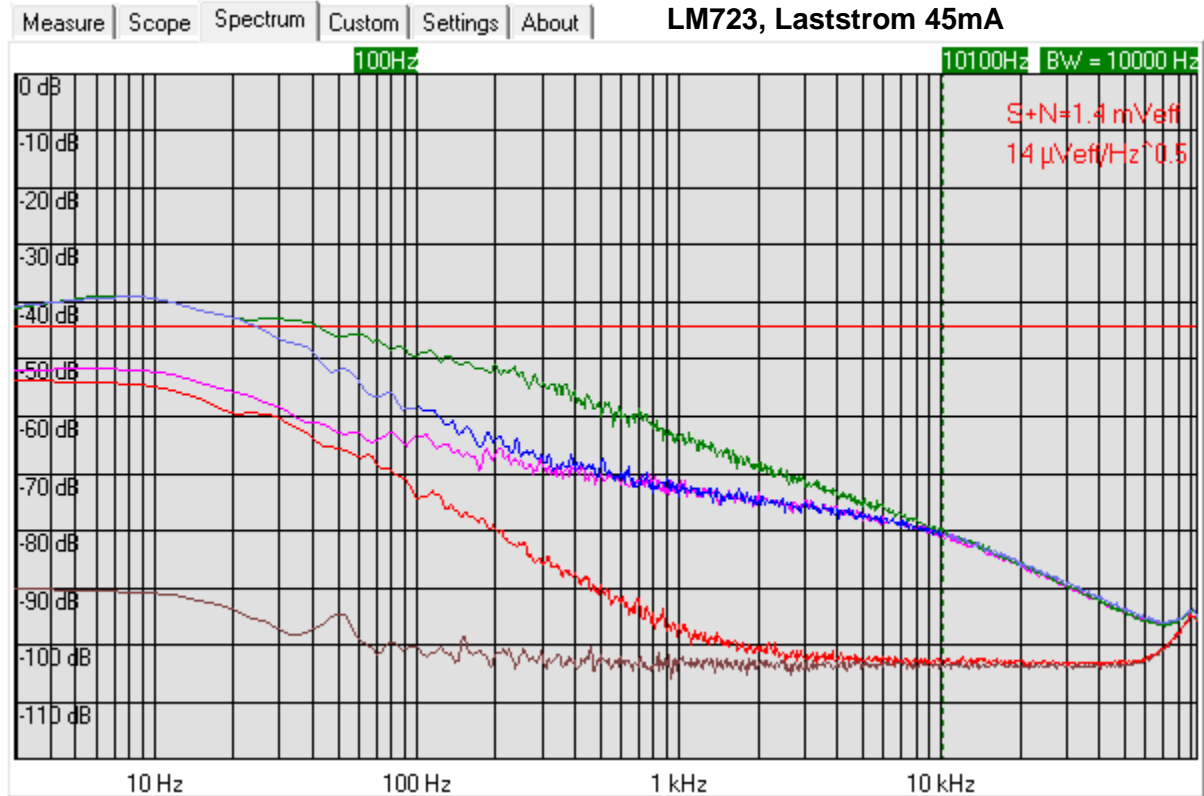


Hier die Messkurven.



In untenstehender Tabelle sind die geänderten Bauteile und Messwerte ersichtlich und können den Messkurven zugeordnet werden. Bei den Messergebnissen in der Tabelle wurden die 60 dB Verstärkung des LNA bereits berücksichtigt.

Laststrom 45mA, Messbandbreite: 10kHz (100Hz - 10.1kHz)

Nr.	Farbe	C-Ref. (C9 +C8)	RC-Filter	Spectral Density	RMS Noise
1	Grün	1000nF	---	40,6 nV _{eff} /√Hz	4,06 µV _{eff}
2	Blau	1000nF + 4,7µF	---	14,0 nV _{eff} /√Hz	1,40 µV _{eff}
2	Pink	1000nF + 220µF	---	12,6 nV _{eff} /√Hz	1,26 µV _{eff}
3	Rot	1000nF + 220µF	3R3+1000µF	1,53 nV _{eff} /√Hz	0,15 µV _{eff}
4	Braun	Messgrenze		0,51 nV _{eff} /√Hz	51 nV _{eff}

Messergebnis

Die Messungen zeigen, dass der LM723 bereits in der Standardbeschaltung (Nr.2) sehr rauscharm arbeitet und wenn man das C-Ref. großzügig dimensioniert (100µF bis 220µF), das Rauschen in niedrigen Frequenzbereich (< 100Hz) nochmals weniger wird. Auch der Kompensations-Kondensator C11 hat Einfluss auf das Rauschspektrum. Ein guter Wert scheint 330pF zu sein. Wird am Ausgang ein zusätzliches RC-Glied geschaltet (3,3Ohm + 1000µF), dann erreicht man extrem niedrige Rauschwerte (Messung Nr.3, rote Kurve), dass sogar noch etwas niedriger ist, da wir den gemessenen Wert eigentlich noch um das Grundrauschen des LNA-Verstärkers korrigieren müssen.

Das gemessene Spectral Density von 1530 nV_{eff} /√Hz abzüglich dem Grundrauschen des Verstärkers von 510 nV_{eff} /√Hz ergibt ein Rauschen von:

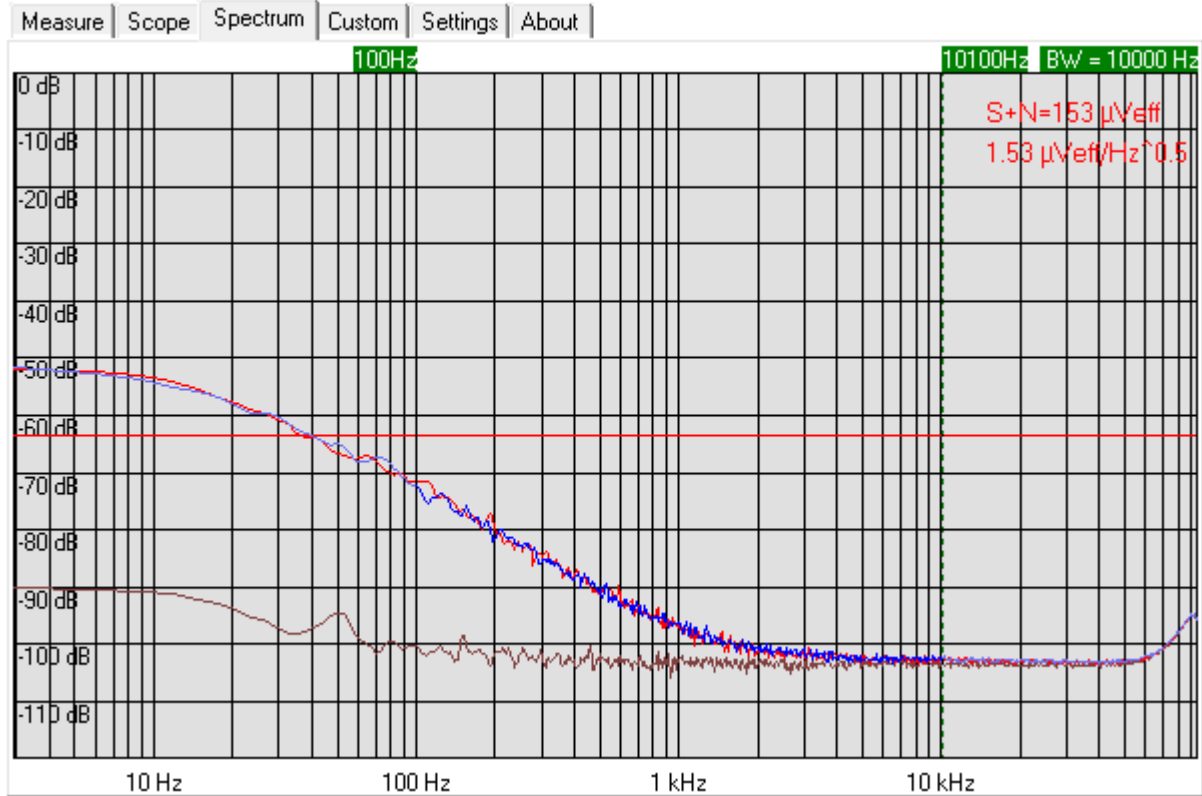
$$U_{\text{eff}} = \sqrt{1530^2 - 510^2} = 1442 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$$

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

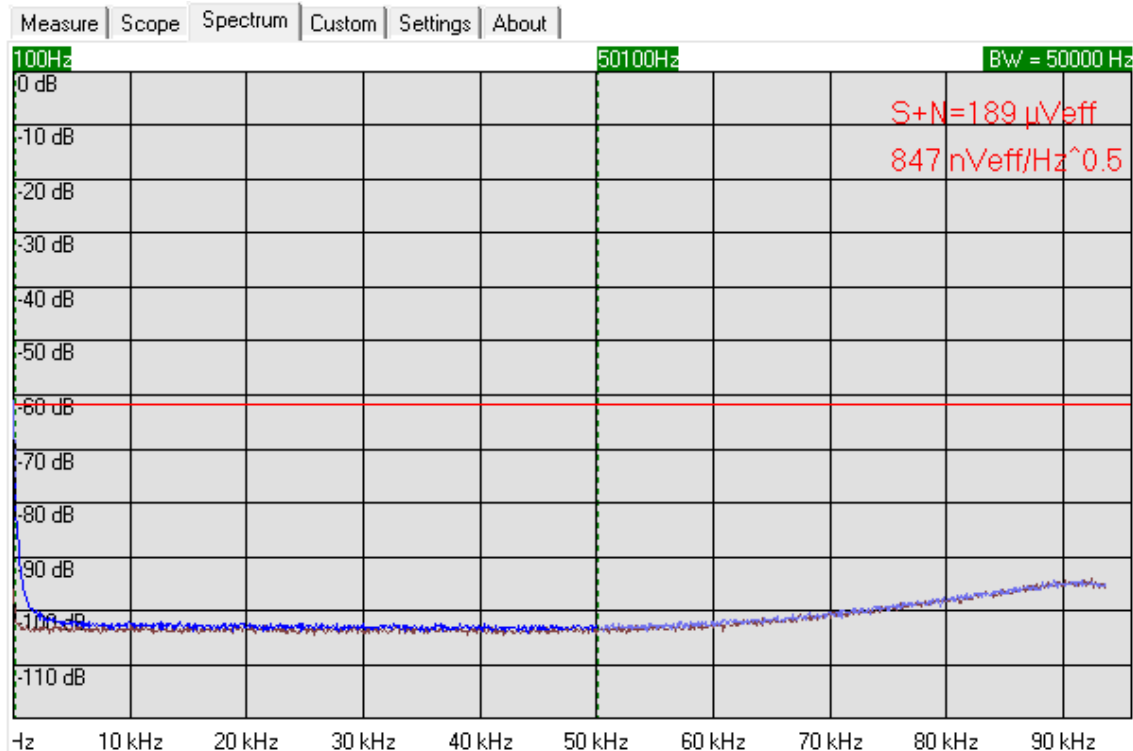
$$1442 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}} / 1000 = \mathbf{1.44 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}}$$

Rauschen bei Belastungsänderung

Nachfolgend wurde untersucht, wie sich das Rauschen der Schaltung verhält, wenn die Belastung geändert wird (45mA). Die beiden Kurven (Blau + Rot) zeigen die Schaltungsvariante Nr.3 mit und ohne Belastung. Die sehr guten Rauschwerte bleiben so gut wie unverändert. Zur Information wurde die braune Kurve noch eingeblendet, die die Messgrenze des Ultra-Low-Noise-Verstärkers zeigt.



Nachfolgendes Bild zeigt die selbe Messung mit linearer Frequenzachse und 50kHz Messbandbreite. Der kleine Rauschanstieg im unteren linken Eck ist kaum zu erkennen.

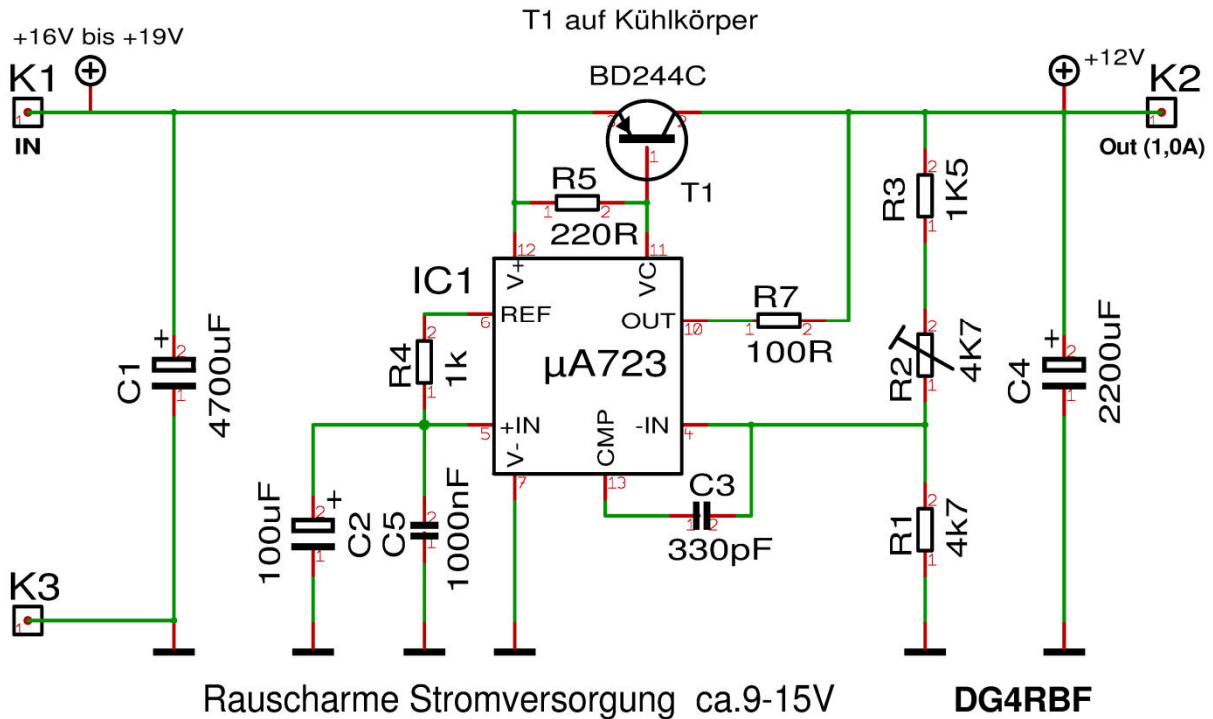


Mehr Strom mit zusätzlichem PNP Transistor

Wird mehr als 150mA Strom benötigt, so kann die Schaltung mit einem Leistungstransistor erweitert werden. Für ein niedriges Rauschen ist es von entscheidender Bedeutung, dass man die Variante mit dem PNP Transistor verwendet, da diese Version wesentlich rauschärmer arbeitet als die sonst übliche Schaltung mit einem NPN Emitterfolger.

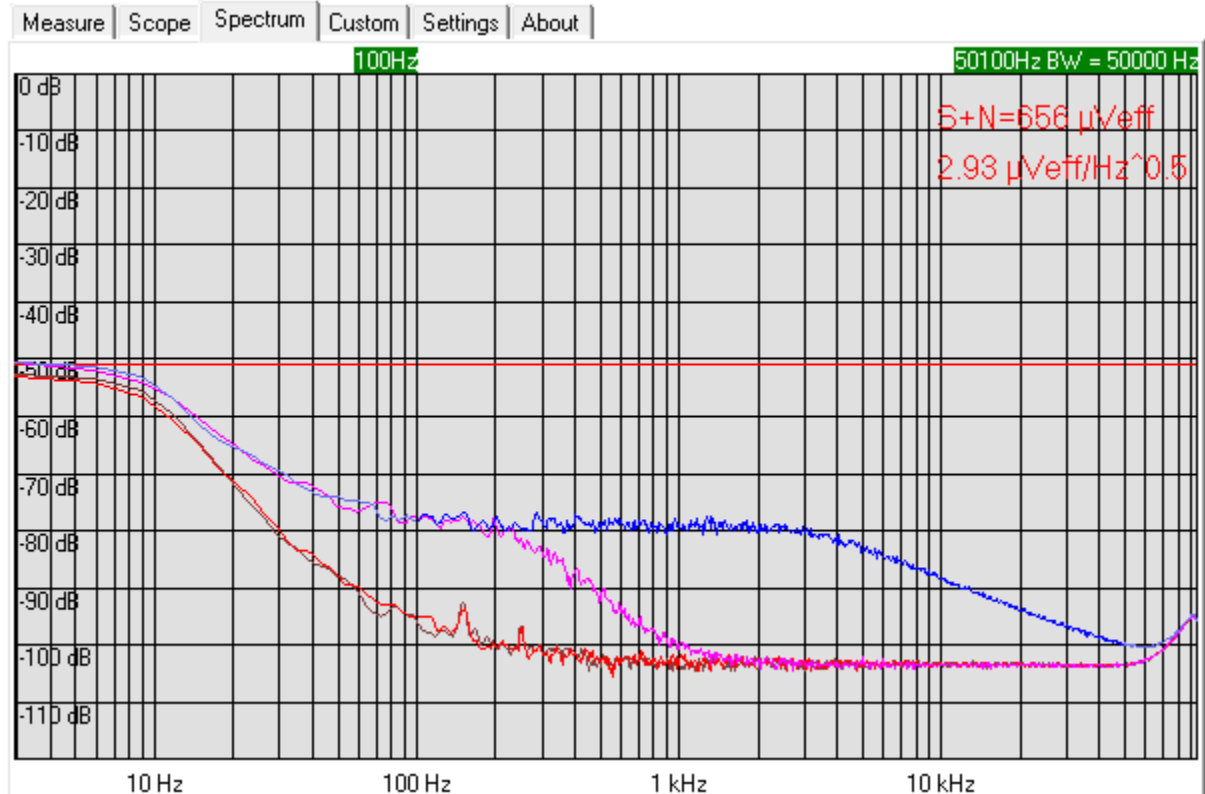
Hier die getestete **Schaltung (B)**

Low Noise Power Supply



Rauschmessungen der Schaltung (B) mit PNP Transistor

Messungen bei U-Out: 9.2V



Messbandbreite: 50kHz (100Hz - 50.1kHz)

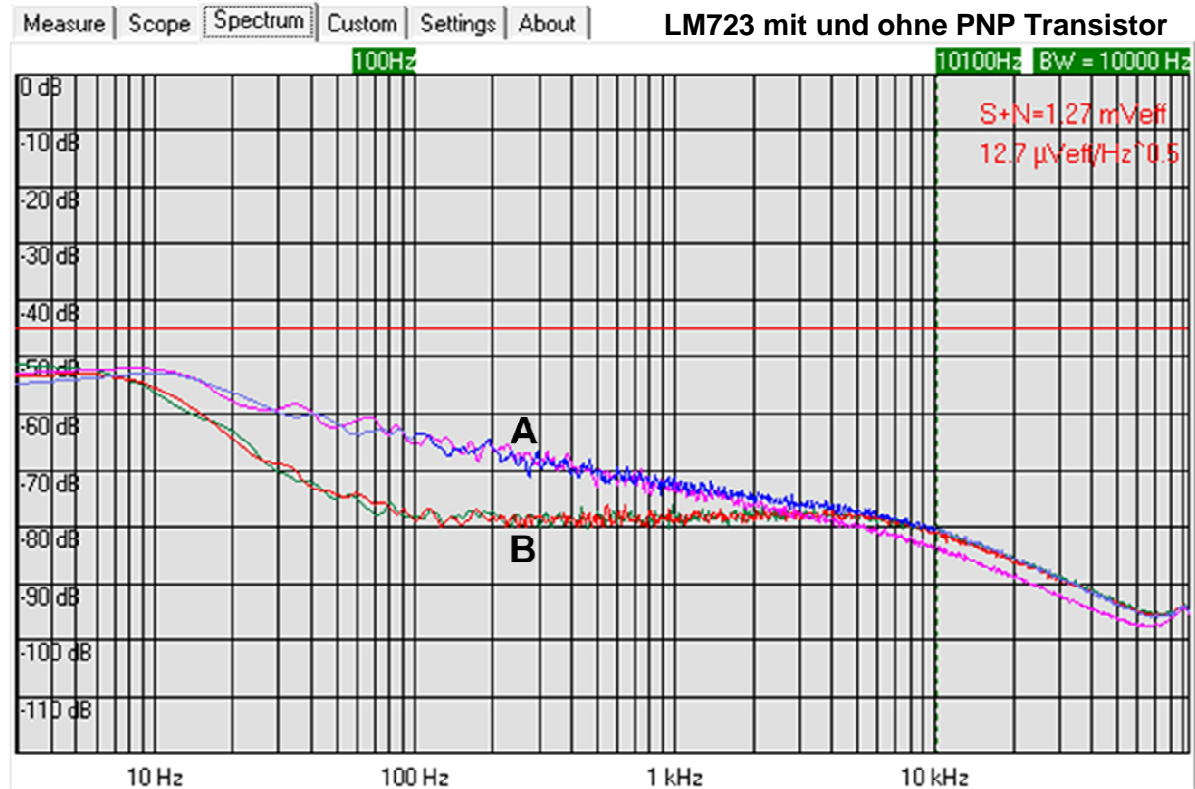
C2 = 100µF, C3 = 330pF

Nr.	Farbe	RC-Filter	Laststrom	Spectral Density	RMS Noise
1	Braun	3R3+4700µF	---	0,50 nV _{eff} /√Hz	114 nV _{eff}
2	Rot	3R3+4700µF	180 mA	0,51 nV _{eff} /√Hz	114 nV _{eff}
3	Pink	---	---	0,74 nV _{eff} /√Hz	165 nV _{eff}
4	Blau	---	180 mA	2,93 nV _{eff} /√Hz	656 nV _{eff}

Messung Nr. 3 zeigt das Rauschen der Schaltung (B) ohne Laststrom. Bei der Messung Nr.4 wurde die Schaltung mit 180mA Strom belastet und man sieht, dass das Rauschen ab ca.500Hz zwar ansteigt, aber trotzdem auf einen sehr niedrigen Level bleibt. Bei Messung Nr.1 und Nr.2 wurde am Ausgang der Schaltung ein zusätzliches RC-Filter mit 3,3Ohm und 4700µF angebracht. Damit lassen sich extrem niedrige Rauschwerte erzielen. Der niedrige Rauschwert bleibt auch bei Belastung erhalten. Diese Messungen wurden mit 50kHz Messbandbreite durchgeführt.

Vergleich der Schaltungen A und B

Nachfolgend werden die beiden Schaltungsvarianten A und B miteinander verglichen. Außerdem wird der Laststrom verdoppelt, um zu überprüfen, welchen Einfluß der Laststrom auf das Rauschen hat. Bei diesem Test wurde kein zusätzliches RC-Filter am Ausgang verwendet. Um die ermittelten Rauschwerte einfacher mit den Werten im Datenblatt zu vergleichen, wurden die folgenden Messungen mit einer Bandbreite von 10kHz durchgeführt.



Messbandbreite: 10kHz (100Hz - 10.1kHz)

Ohne RC-Filter

Nr.	Farbe	PNP Transistor	Laststrom	Spectral Density	RMS Noise
1	Grün	Ja (B)	180 mA	8,78 nV _{eff} /√Hz	0,88 µV _{eff}
2	Rot	Ja (B)	360 mA	8,73 nV _{eff} /√Hz	0,87 µV _{eff}
3	Pink	Nein (A)	96 mA	11,1 nV _{eff} /√Hz	1,11 µV _{eff}
4	Blau	Nein (A)	45 mA	12,7 nV _{eff} /√Hz	1,27 µV _{eff}

Messbandbreite: 90kHz (10Hz - 90.01kHz)

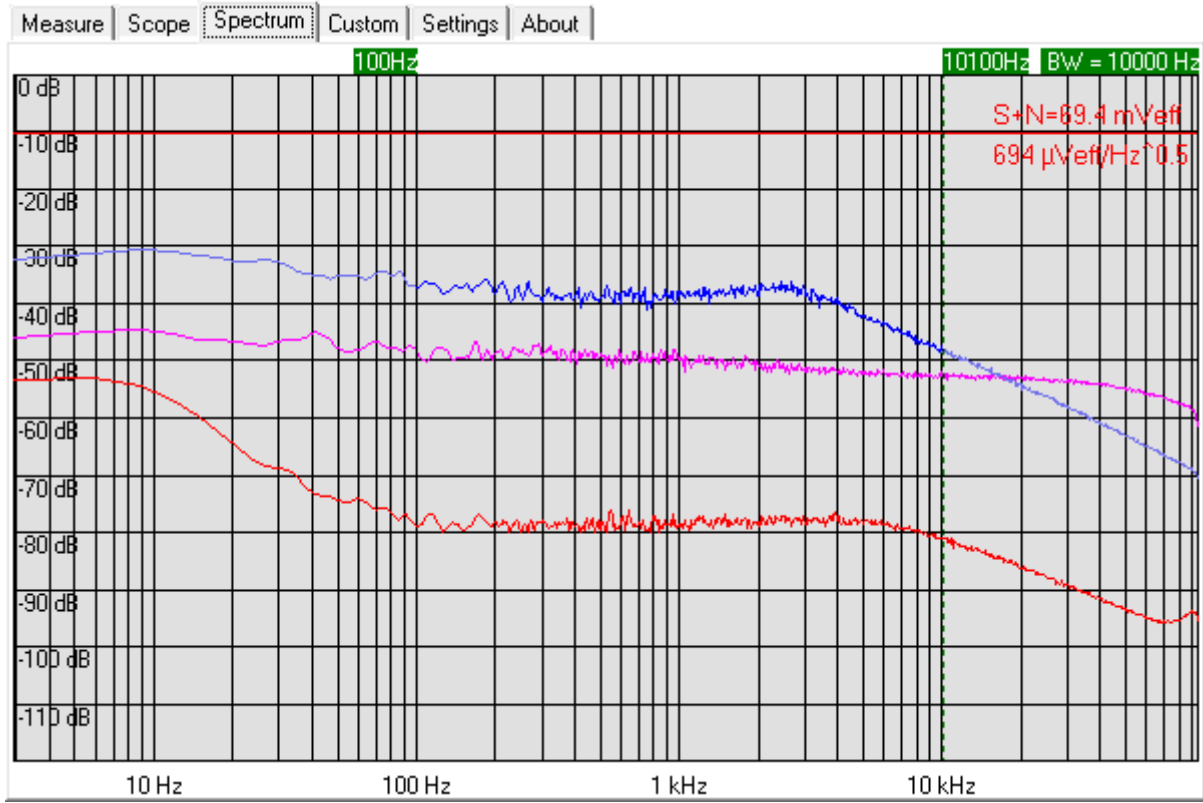
4	Blau	Nein (A)	45 mA	4,85 nV _{eff} /√Hz	1,46 µV _{eff}
---	------	----------	-------	-----------------------------	------------------------

Bei Messung Nr. 3 und Nr.4 wird der LM723 in Schaltungsvariante (A) mit unterschiedlichen Lastströmen, auf sein Rauschen überprüft. Bei den Messungen Nr.1 und Nr.2 wird der LM723 in Schaltungsvariante (B), ebenfalls mit anderen Lastströmen gemessen. Festzustellen ist, dass bei beiden Schaltungsvarianten das Rauschen durch eine Erhöhung des Laststroms kaum verändert wird. Interessant ist, dass die Schaltung B mit dem PNP Transistor noch weniger rauscht als der LM723 alleine.

Zum Vergleich zwei übliche "Dreibein- Regler":

78S75 (7,5V Stabi mit 10µF am Eingang und 1000µF am Ausgang)

LM317 (9,0V mit 10µF am Eingang und 1000µF am Ausgang)



Messbandbreite: 10kHz (100Hz - 10.1kHz)

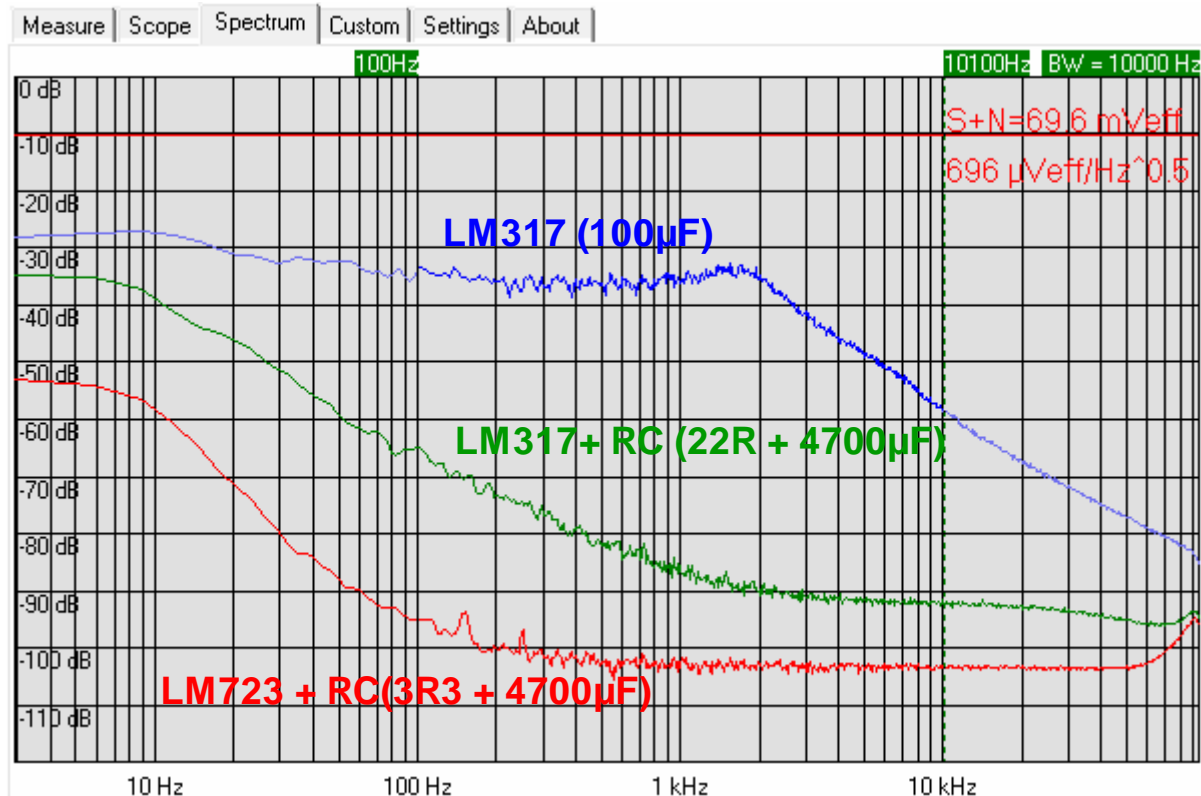
Messungen ohne RC-Filter

Nr.	Farbe	Regler	Laststrom	Spectral Density	RMS Noise
2	Rot	LM723 + T1 (9.2V)	360 mA	8,73 nV _{eff} /√Hz	0,87 µV _{eff}
3	Pink	78S75 (7,5V)	157 mA	201 nV _{eff} /√Hz	20,1 µV _{eff}
4	Blau	LM317 (9V)	185 mA	694 nV _{eff} /√Hz	69,4 µV _{eff}

Diese Messungen vergleichen den LM723 in Schaltungsvariante(B) mit zwei oft verwendeten Spannungsreglern den 78SXX, in diesem Falle mit 7,5V Ausgangsspannung und den LM317, der auf 9V Ausgangsspannung beschaltet wurde. Alle Regler wurden unter Belastung gemessen. Diese Messungen zeigen eindrucksvoll, wie viel weniger die Schaltung mit dem LM723 rauscht.

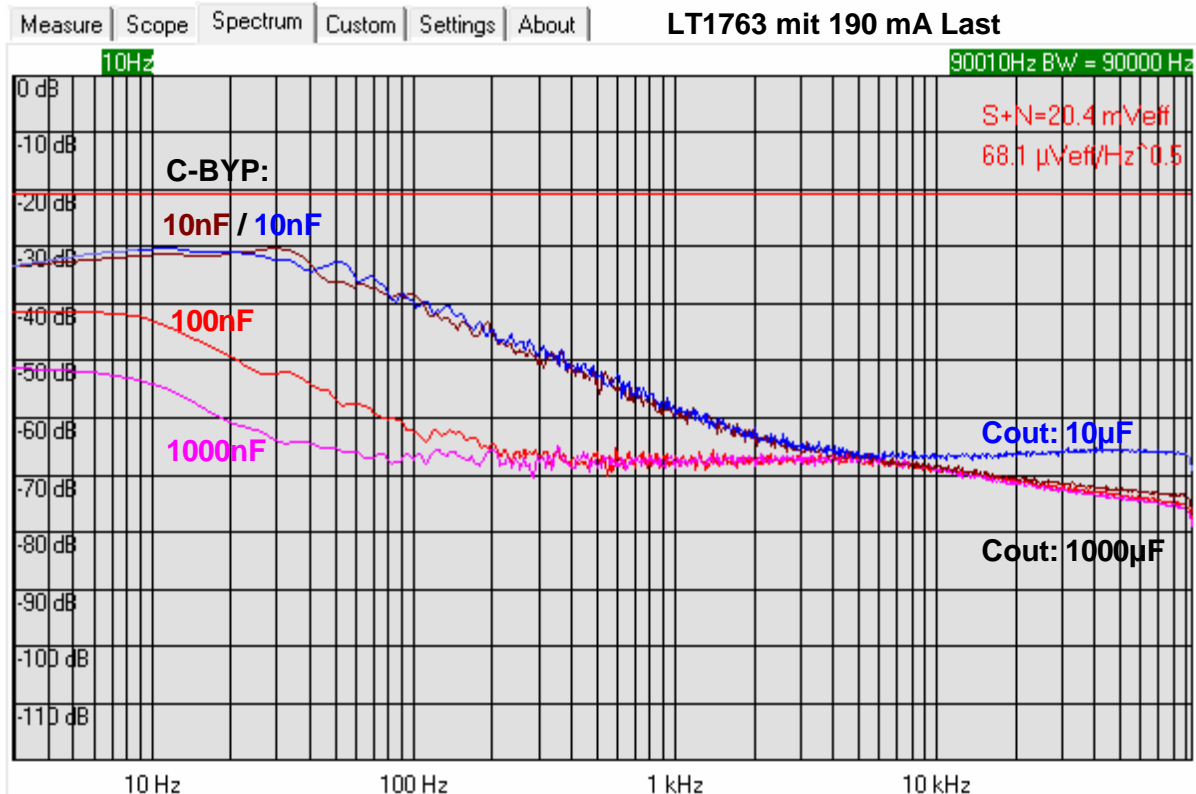
Der LM317 mit RC-Filter

Da vorausgegangene Messungen gezeigt haben, dass ein RC-Filter am Ausgang eine starke Reduzierung des Rauschens bewirkt, habe ich mit der nachfolgenden Messung überprüft, wie viel ein "dickes" RC-Glied beim stark rauschenden LM317 bewirkt. Die blaue Messkurve zeigt den LM317 nur mit einem 100µF Kondensator am Ausgang. Die grüne Kurve zeigt den LM317 mit einem RC-Filter (22 Ohm + 4700µF) am Ausgang. Man sieht zwar eine deutliche Reduzierung des Rauschens, aber obwohl der Widerstand mit 22 Ohm schon extrem groß gewählt wurde, kommt man nicht an die Rauschkurve des LM723 mit nur 3,3 Ohm am Ausgang heran.



LT1763 ein Low-Noise Spannungsregler

Dass der LM723 wesentlich weniger rauscht als die normalen Regler, haben die Messungen jetzt bewiesen. Aber kann er auch mit einem modernen Low Noise Spannungsregler, wie den LT1763, mithalten? Die nachfolgenden Messungen sollen dies zeigen. Hier wurde der Low-Noise Spannungsregler LT1763 im 8-poligen SMD Gehäuse für 9,6V Ausgangsspannung beschaltet und gemessen. Für den Test wurden unterschiedliche Bypass Kondensatoren verwendet. Laut Datenblatt kann der Bypass Kondensator, der für die Rauschminderung verantwortlich ist, max.10nF betragen. Versuchsweise wurde der Kondensator bis auf 1000nF erhöht. (Evtl. negative Auswirkungen wurden nicht berücksichtigt.) Um die ermittelten Messwerte mit dem LM723 vergleichen zu können, wurden die Messungen bei 10kHz Messbandbreite und einem C-Out von 1000µF ermittelt (Messungen Nr.1-3). Zusätzlich wurde noch eine Messung für den Vergleich mit dem Datenblatt des LT1763 gemacht (Messung Nr.4). Hier wurde ein Bypass Kondensator von 10nF und ein C-Out von 10µF verwendet. Die Messbandbreite wurde dabei auf 10Hz - 90,01kHz eingestellt, so ist der Wert besser mit dem Datenblatt vergleichbar.



Messungen mit Messbandbreite: 10kHz (100Hz - 10.1kHz) C-Out: 1000µF

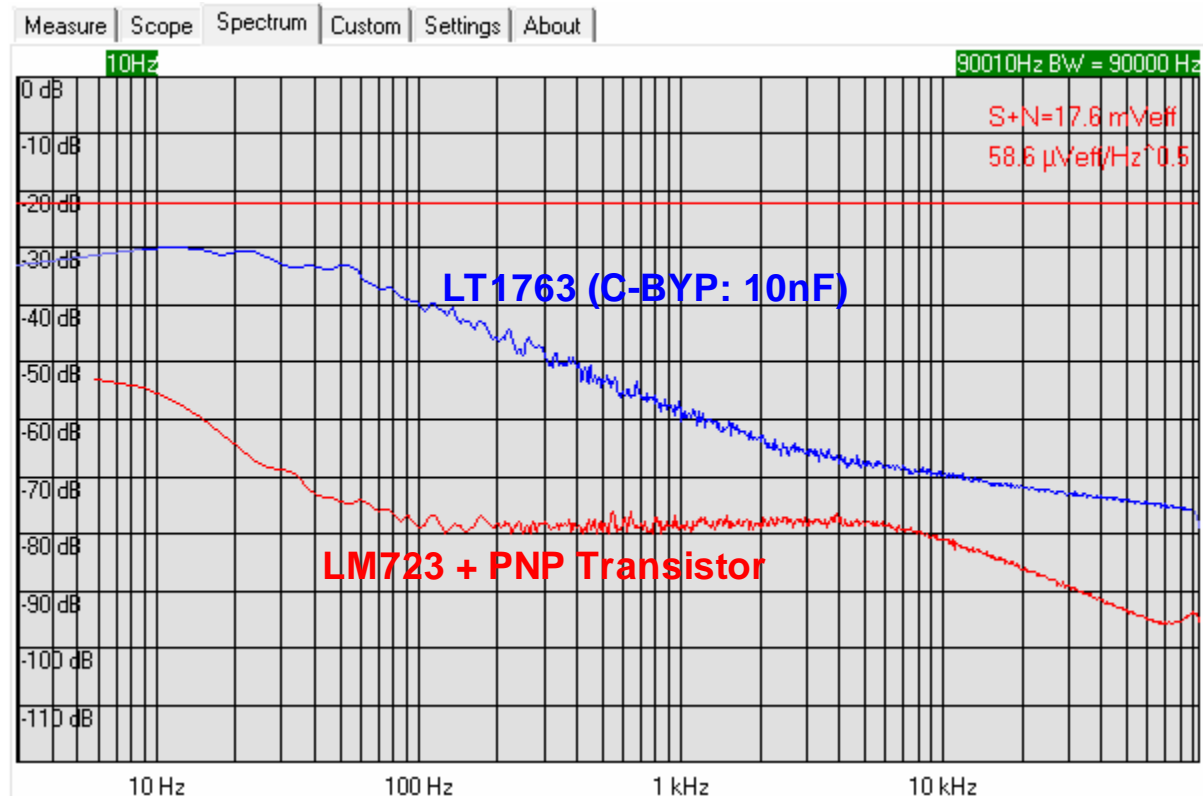
Nr.	Farbe	C-Bypass	Laststrom	Spectral Density	RMS Noise
1	Braun	10nF	190 mA	83,8 nV _{eff} /√Hz	8,3 µV _{eff}
2	Rot	100nF	190 mA	31,6 nV _{eff} /√Hz	3,15 µV _{eff}
3	Pink	1000nF	190 mA	31,3 nV _{eff} /√Hz	3,13 µV _{eff}

Im Datenblatt [2] kann aus der Grafik: **RMS Output Noise vs Load Current (10Hz to 100kHz)** ein RMS Noise von knapp 20µV abgelesen werden. (C-out:10µF, C-BYP0.01µF)
Dieser Wert passt gut mit meinem gemessenen Wert von 20,4µV_{eff} bei 90 kHz Messbandbreite zusammen.

Messungen mit Messbandbreite: 90kHz (10Hz - 90.1kHz) C-Out: 10µF

Nr.	Farbe	C-Bypass	Laststrom	Spectral Density	RMS Noise
4	Blau	10nF	190 mA	68,1 nV _{eff} /√Hz	20,4 µV _{eff}

Die folgende Grafik zeigt den LM723 mit PNP Transistor im Vergleich zum Low-Noise Spannungsregler LT1763 mit 10nF Bypass Kondensator.



Schlussbetrachtung

Die Messungen haben gezeigt, dass der LM723 sehr rauscharm arbeitet und selbst moderne Low Noise Spannungsregler übertrifft.

Bauteil

Für diese Messungen wurde der LM723 vom Hersteller **ST**Microelectronics verwendet.

Notwendiges Equipment

60 dB Ultra-Low-Noise Verstärker (Wenzel-Derivat), Eigenrauschen $0,51 \text{ nV}_{\text{eff}}/\sqrt{\text{Hz}}$

Audiointerface E-MU 0204

Software AudioMeter von Prof. Dr. Thomas Baier

Akku 12,6V

Abgeschirmte Messkammer

Literatur

[1] Baier, T., DG8SAQ: Audiometer-Software zum Messen mit der Soundkarte.

Funkamateure 63 (2014) X.10, S.1078-1080; H.11, S.1179-1181

[2] Datenblatt Linear Technology: LT1763

DG4RBF