

Ergänzung zum Beitrag in FA 11/25, S. 870 f. „Selektivverstärker mit Tastkopf für Messungen bis 300 kHz“

Die Bilder A1 bis A5 verdeutlichen die Aufbauschritte der Komponenten. Insbesondere bei der Tastkopfplatine ist auf Sauberkeit und hohe Isolationswiderstände zu achten. Flussmittelreste sind mit Äthanol oder Isopropanol gründlich abzuwaschen. Handelsüblicher Brennspritus enthält manchmal Fremdstoffe, die nach dem Trocknen als weißer Belag auf der Platine verbleiben. Diesbezüglich besser ist Kaminäthanol 100 %. Dessen Vergällungsmittel (MEK) verdunstet rückstandsfrei.

■ Rauschmessungen

Bild A6 zeigt das verstärkte thermische Rauschen eines 10-k Ω -Widerstands. Die mit Cursorlinien markierte Spitzen-Spitzen-Amplitude beträgt 424 mV. Selbstverständlich weist ein gaußverteiltes Rauschen keine wirklichen Spitzenwerte

auf, theoretisch sind (wenn auch extrem selten) sogar beliebige Amplituden möglich. Jedoch zeigt die Erfahrung, daß die subjektiv als U_{SS} -Wert ermittelte Amplitude ungefähr dem sechsfachen des Effektivwertes entspricht, was gleichbedeutend mit der 3-sigma-Grenze ist. Eine ausführliche Erläuterung zur Thematik bietet [2]. Die 424 mV, dividiert durch 6, ergeben 71 mV. Fast dasselbe hat die den gesamten Kurvenverlauf rechnerisch auswertende Effektivwertanzeige des Oszilloskops als V_{rms} : 70,4 mV ausgegeben.

Dieser Wert, der sich auf die gesamten 300 kHz Bandbreite bezieht, ist nun durch $\sqrt{300 \text{ kHz}}$ und durch die Verstärkung von 10000 zu dividieren, um die eingangsbezogene Rauschspannungsdichte zu erhalten. Das Ergebnis von 12,9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ stimmt gut mit dem theoretischen



Bild A6: Rauschen eines 10-k Ω -Widerstands am Eingang des Tastkopfs, gemessen bei $f_U = 0,3 \text{ Hz}$, $f_O = 300 \text{ kHz}$ und $V_U = 10000$

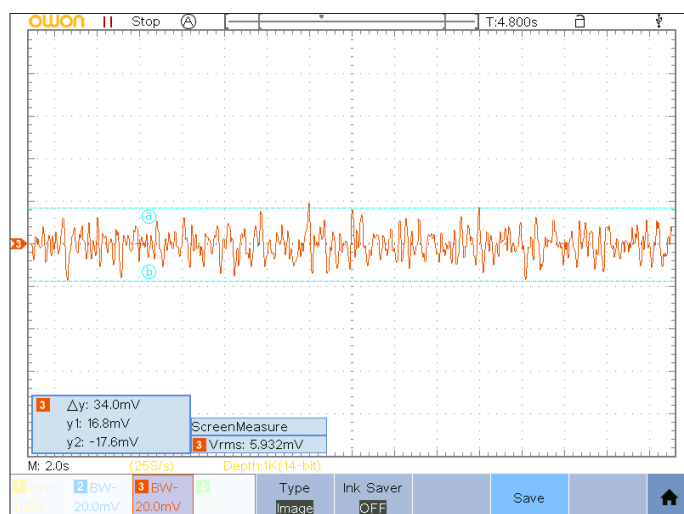


Bild A7: Rauschen des 10-M Ω -Eingangswiderstands im Tastkopf, gemessen bei $f_U = 1 \text{ Hz}$, $f_O = 3 \text{ Hz}$ und $V_U = 10000$

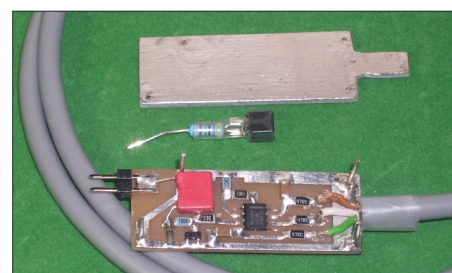


Bild A1: Bestückte Platine des Tastkopfes, daneben die Messspitze und die Abschirmplatine; der Stummel an beiden dient zum Fixieren des Kabels mittels Schrumpfschlauch.



Bild A2: Tastkopf in Seitenansicht; durch den Schrumpfschlauch mit Schmelzkleber liegt das Kabel nun fest.

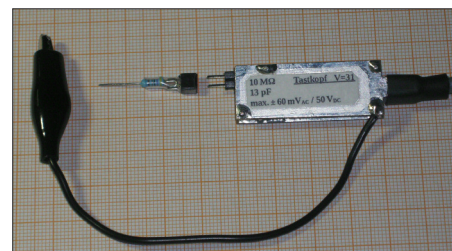


Bild A3: Tastkopf mit Beschriftung

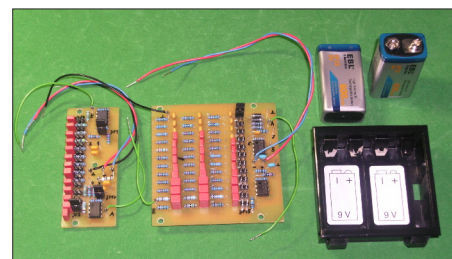


Bild A4: Baugruppen des Selektivverstärkers; vor dem Einbau sind beide Leiterplatten separat mit Funktionsgenerator und Oszilloskop zu prüfen.

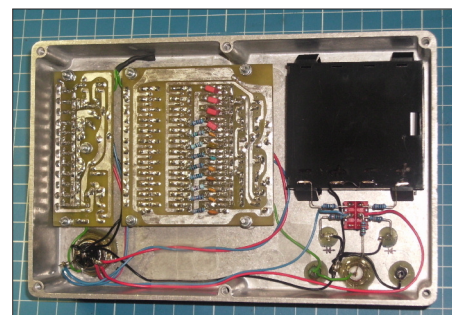


Bild A5: Innenansicht des Selektivverstärkers; erkennbar sind die an den Lötösen jeder RC-Kombination des Nachverstärkerplatine angelöteten Abgleichwiderstände und -kondensatoren, siehe Beitrag.

schen Wert gemäß $\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R}$ für den 10-k Ω -Widerstand überein.

Bild A7 wurde mit 10^5 -fach langsamerer Oszilloskop-Zeitablenkung aufgenommen. Sinngemäß derselbe Rechengang, führt von den ablesbaren 34 mV zu einer Rauschdichte von 400 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, in guter Übereinstimmung mit den 405 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, die ein 10-M Ω -Widerstand bei Raumtemperatur haben sollte. Der angezeigte Effektivwert von $U_{\text{eff}} = 5,932 \text{ mV}$ wiederum ergibt rechnerisch 419 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ – im Rahmen der erwartbaren Messgenauigkeit ebenfalls ein brauchbares Ergebnis. Bild A8: In der Betriebsart FFT zeigt das Oszilloskop das Rauschspektrum (violett) von 100 k Ω am Tastkopfeingang. Bei der vorliegenden Abtastrate von 2,5 kS/s kann gemäß Abtasttheorem mit korrekter Messung im Bereich 0 Hz bis 1,25 kHz gerechnet werden. Die eingestellte obere Grenzfrequenz von 300 Hz dämpft 1,25 kHz bereits um mehr als 26 dB (vgl. Bild 5 im Beitrag und Datei *Bild_5_Frequenzgangmessungen.ods* in der Ergänzung), sodass keine Alias-Frequenzen in das hier dargestellte Frequenzband von 0 Hz bis 70 Hz gespiegelt werden. Man erkennt den ebenen Verlauf (weißes Rauschen) oberhalb etwa 5 Hz. Für diese und die folgende Messung war das Oszilloskop auf *display persist infinite* geschaltet, um innerhalb einiger Minuten viele Einzelspektren zu summieren und dadurch stochastische Schwankungen auszugleichen.

Das Rauschspektrum in Bild A9 weist erst in Bildmitte, bei 175 kHz, einen beginnenden Amplitudenabfall um etwa

Bild A8:
Die untere Bildhälfte zeigt das Rauschspektrum eines 100-k Ω -Widerstands bei $f_U = 0,3 \text{ Hz}$, $f_o = 300 \text{ Hz}$ und $V_U = 10\,000$. Die Vertikalempfindlichkeit ist auf 10 dB/Div. eingestellt.

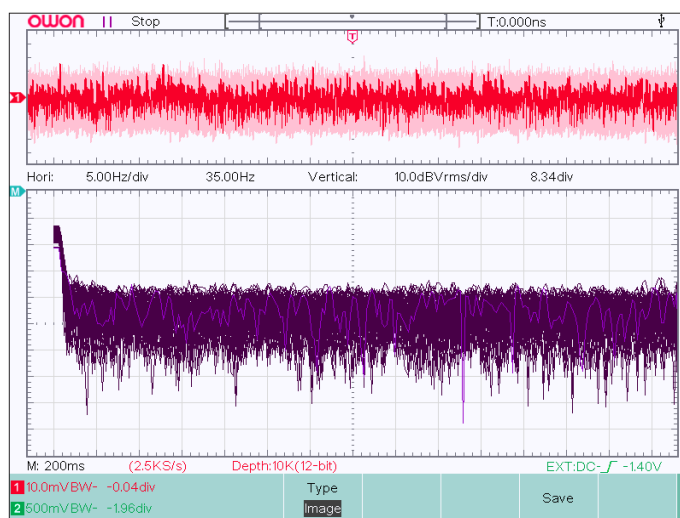


Bild A9:
Die untere Bildhälfte zeigt das Rauschspektrum eines 10-k Ω -Widerstandes bei $f_U = 1 \text{ Hz}$, $f_o = 300 \text{ kHz}$ und $V_U = 10\,000$. Die Vertikalempfindlichkeit ist auf 5 dB/Div. eingestellt.



1 dB auf, darunter liegt weißes Rauschen vor. Die NF-seitig weite Überlappung mit der Frequenzspanne üblicher Spektrumanalysatoren ab 10 kHz bis in den

Gigahertzbereich erlaubt Vergleiche und Anschlussmessungen, sodass der HF-Anwender dem Rauschen seiner Schaltungen auch bis hinunter in den Bereich weniger Hertz nachspüren kann.

Rauschmessung an Spannungsreglern

In Bild A10 ist als untere durchgezogene Kurve die eingangsbezogene Rauschspannungsdichte des im Tastkopf verwendeten OPA828 gemäß Datenblatt aufgetragen. Nun wurde das Eigenrauschen des Tastkopfs bei kurzgeschlossenem Eingang in Halbdokaden-Bändern gemessen, also 0,3 Hz bis 1 Hz, 1 Hz bis 3 Hz, 3 Hz bis 10 Hz usw. Wie im Abschnitt *Rauschmessungen* erläutert, erfolgte jeweils eine Division des auf dem Oszilloskop abgelesenen Spitze-Spitze-Rauschens durch 6, dann durch die Wurzel aus der eingestellten Bandbreite (0,7 Hz, 2 Hz, 7 Hz usw.), schließlich durch die am Gerät gewählte Verstärkung. Das Ergebnis stimmt oberhalb 300 Hz recht gut mit der OPA828-Kurve überein. Die Zunahme bei tiefen Frequenzen wird von der höheren thermischen Rauschspan-

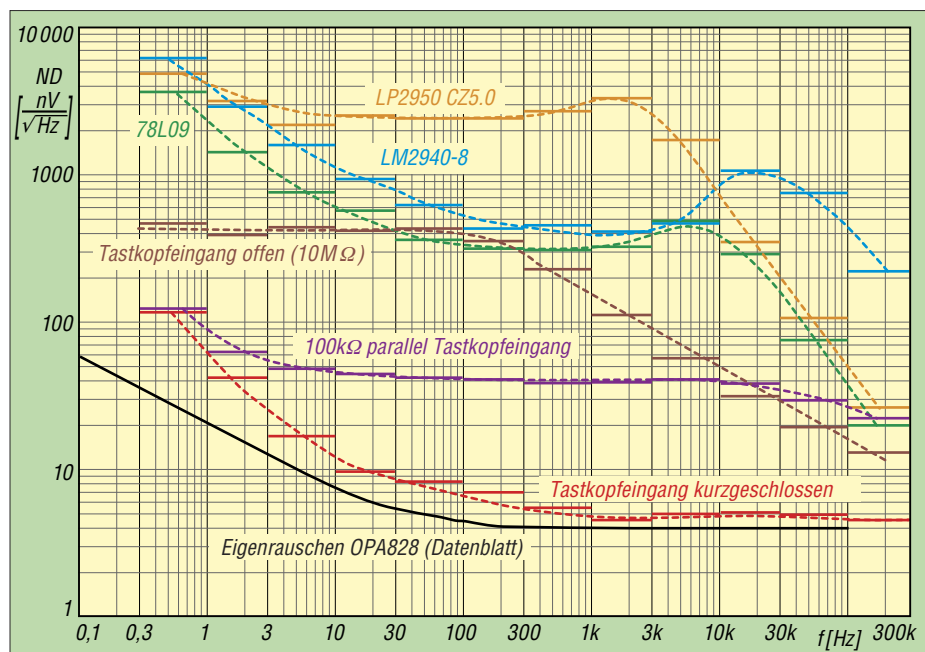


Bild A10: Rauschspannungsdichte, gemessen an zwei Widerständen und drei Festspannungsreglern

nung von R2 ($405 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) verursacht, die von C1 im Tastkopf wegen dessen in Richtung Gleichspannung anwachsender Impedanz $|Z_C| = 1/(2\pi f \cdot C)$ immer weniger kurzgeschlossen wird. Ein größerer Wert für C1 ließe diesen Anstieg milder ausfallen. Aufgrund der dann höheren Zeitkonstante $C_1 \cdot R_2$ müsste man beim Anschließen des Tastkopfs an einen Gleichspannung führenden Messpunkt allerdings proportional länger bis zum Abklingen des Ladestromstoßes warten, bevor ungestört mit der Wechselspannungsmessung begonnen werden kann.

Mit einem $100\text{-k}\Omega$ -Widerstand am Tastkopfeingang und der dabei notwendigen Abschirmung ließen sich die violett dargestellten Werte messen. Die Rauschamplitude stimmt recht gut mit dem Rechenwert von $40,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ überein. Im Bereich von 3 Hz bis 30 kHz könnte der Aufbau jetzt auch als Generator definierter weißen Rauschens eingesetzt werden. Bei offenem Tastkopfeingang wirkt fast nur R2 mit $405 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ als Rauschquel-

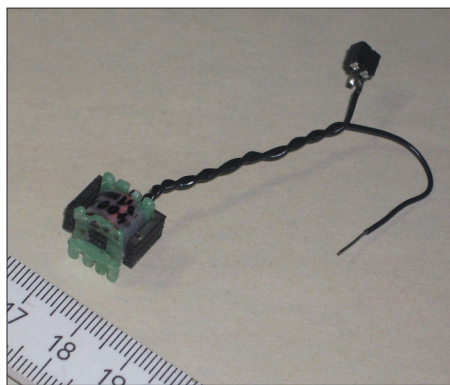


Bild A12: improvisierte H-Feld-Sonde aus dem NF-Übertrager eines alten Taschenradios, bewickelt mit 400 Wdg Kupferlackdraht. Die E-Kernbleche sind nur von einer Seite eingesteckt.

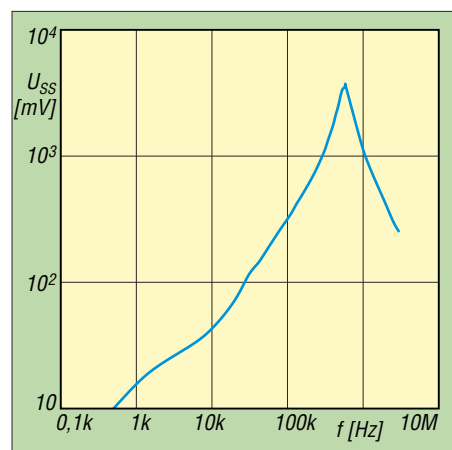


Bild A13: Gemessener Frequenzgang der in der H-Feld-Sonde induzierten Leerlaufspannung bei ungefähr gleicher Wechselstrom-Magnetflussdichte; über weite Bereiche besteht Proportionalität, wie laut Theorie zu erwarten.

Tabelle A1: Rauschspannungsdichte ND [$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$] einiger Spannungsregler und Widerstände in Abhängigkeit von der Messbandbreite bei $V_U = 10\,000$

f [Hz]	LP2950CZ5.0	LM2940-8	78L09	10 M Ω ¹⁾	100 k Ω ²⁾	0 Ω ³⁾
0,3 ... 1	4800	6000	3600	480	120	120
1 ... 3	3100	2830	1400	400	65	42
3 ... 10	2100	1580	760	450	50	17
10 ... 30	2450	890	580	420	45	9,8
30 ... 100	2400	620	360	430	43	8,4
100 ... 300	2400	424	311	350	42	7
300 ... 1000	2640	450	302	227	38	5,3
1 k ... 3 k	3130	400	313	112	38	4,5
3 k ... 10 k	1670	480	478	57	40	4,8
10 k ... 30 k	353	1000	283	31	38	5,1
30 k ... 100 k	105	775	75	19	30	4,9
100 k ... 300 k	27	224	20	13	22	4,47

¹⁾ Tastspitzeingang offen, bei $V_U = 1000$

²⁾ parallel zum Tastspitzeingang

³⁾ Tastspitzeingang kurzgeschlossen

le; der Beitrag von IC1 ist vernachlässigbar. Die gestrichelte braune Kurve zeigt ein weißes Rauschen zwischen 0,3 Hz und 300 Hz. Der Abfall bei höheren Frequenzen wird von der Eingangskapazität des Tastkopfs verursacht, die zunehmend R2 kurzschließt. Spätestens mit dieser Messung – offener Tastkopfeingang – lässt sich der beträchtliche Störeinfluss kapazitiv eingestreuten 50-Hz-Netzbrummens beobachten, aber auch dessen Neutralisierbarkeit durch die Abschirmwirkung des beim Tastkopf praktizierten Faradayschen Käfigs.

Die restlichen dargestellten Verläufe der Rauschspannungsdichte über der Frequenz habe ich am Ausgang einiger gebräuchlicher Festspannungsregler gemessen (orange → LP2950CZ5.0, blau → LM2940-8, grün → 78L09), siehe Bild A11. Man ahnt, dass die direkte Versorgung sensibler analoger Schaltungen aus Festspannungsreglern den Signal-Rausch-Abstand verschlechtern kann. Dann empfiehlt sich eine nachträgliche Siebung der Betriebsspannung mittels RC- oder LC-Tiefpassfiltern. Spezielle Linearregler wie z. B. der ADM7151 [3] sind oberhalb 10 Hz bis 100 Hz sehr viel rauschärmer als die hier untersuchten Standardtypen.

■ Suche nach Magnetfeldern bis 1 MHz

Aus einem Miniaturübertrager wurde ein magnetischer Aufnehmer angefertigt, siehe Bild A12. Sodann erfolgte die Ermittlung von dessen Frequenzgang unter Leerlaufbedingungen. Zur Anregung diente das Wechselmagnetfeld einer über einen $100\text{-}\Omega$ -Vorwiderstand mit sinusförmigem Strom gespeisten kleinen Luftspule, die daraus ein näherungsweise frequenzunabhängiges H-Feld erzeugte. Der 10:1-Tastkopf eines Oszilloskops war direkt an den magnetischen Aufnehmer angeschlossen. Das Diagramm in

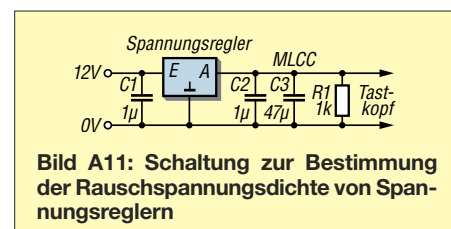


Bild A11: Schaltung zur Bestimmung der Rauschspannungsdichte von Spannungsreglern

Bild A13 zeigt einen sich über drei Größenordnungen erstreckenden, halbwegs proportionalen Zusammenhang zwischen Spannung und Frequenz, bis oberhalb der Resonanzfrequenz aus Spuleninduktivität und Streukapazität die Empfindlichkeit wieder abfällt. Diese H-Feld-Sonde fungierte nun, siehe Bild A14, als Signalquelle für den Eingang des im Beitrag beschriebenen hochohmigen Tastkopfes. Am Selektivverstärker waren $f_U = 30 \text{ Hz}$ und $f_O = 30 \text{ kHz}$ gewählt, für die Gesamtverstärkung sind $V_U = 1000$ und $V_O = 10\,000$ sinnvoll. Das verstärkte Ausgangssignal gelangte parallel zu einem hochohmigen Kopfhörer und einem Kleinstoszilloskop. Das Abschreiten der Wohnung mit diesem Aufbau brachte interessante Resultate. Bei $V_U = 1000$ lassen sich unter Putz verlegte Stromleitungen räumlich recht scharf anhand des 50-Hz-Netzbrummens orten, sobald sie stromdurchflossen sind. Bereits ein kleiner Verbraucher (LED-Lampe) genügt hierfür.

Auf dem Mini-Oszilloskop in Bild A14 ist eine 32-Hz-Impulsfolge sichtbar, die vom Testobjekt, dem abgebildeten Wecker, als schwaches Magnetfeld emittiert wird und sich im Kopfhörer als Rattergeräusch bemerkbar macht. Ein anderes Fabrikat ließ dagegen ein 1-Hz-Ticken hören, entsprechend den kurzen Stromstößen, die den Sekundenzeiger ruckweise antreiben.

Bild A15 demonstriert den nützlichen Nebeneffekt einer kleinen Unvollkommenheit der im Selektivverstärker eingesetzten OPVs vom Typ TLE2071. Deren

Erholzeit nach Übersteuerung ist für negative Spannungen länger als für positive. Der Mittelwert des Ausgangssignals ist dann nicht Null, sondern wird negativ. Das entspricht einer Gleichrichterwirkung. Wenn nun bei $V_U = 10\,000$ die H-Feld-Sonde mit ihrem höhenbetonten Frequenzgang einer gepulsten HF-Quelle genähert wird, dann gerät IC3 im Hochpassmodul schnell in die Übersteuerung. Der Effekt ist deutlich in Bild A15 zu sehen. Im Kopfhörer macht sich die Wiederholfrequenz von HF-Bursts je nach Quelle als Ticken, Knattern, Summen oder Pfeifen bemerkbar. Die Vielzahl solcher Quellen im elektrifizierten Haushalt ist erstaunlich: eingeschaltete Taschenrechner, Uhren, LED-Lampen, Computermaus, LCD-Bildschirme, Kabelrouter, Faxgerät, die gemultiplexte LED-Ziffernanzeige eines Funktionsgenerators – all diese Gerätschaften emittieren entweder niederfrequente und direkt mittels H-Feld-Sonde hörbare oder dank des erwähnten Gleichrichtereffekts auch in den Hörbereich übersetzte gepulste HF-Magnetfelder. Bei diesen Versuchen, die selbstverständlich nur qualitativer Natur sein können, ist zwischen



Bild A14: Mobiler Aufbau mit H-Feld-Sonde am Tastkopfeingang; ein 2-kΩ-Funkerkopfhörer und das Mini-Oszilloskop DSO-200 sind parallel am Ausgang des Bandpassverstärkers angeschlossen.

Fotos, Screenshots: Franke

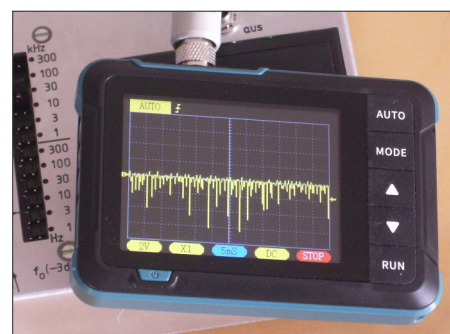


Bild A15: Bei leichter Eingangsübersteuerung wirkt ein Gleichrichtereffekt, der eine Reihe von Störquellen erst hörbar macht. Das Oszilloskop zeigt, dass dabei die Signalaussteuerung vorzugsweise in negativer Richtung erfolgt.

$V_U = 1000$ und $V_U = 10\,000$ hin- und her zu wechseln, um den jeweiligen Störer und mitunter den emittierenden Bereich auf seiner Oberfläche bestmöglich orten zu können.

emmmf@posteo.de

Literatur

- [2] Rohde & Schwarz: Was ist Rauschen? https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/TIPP/HAM_EG_WasistRauschen.pdf
- [3] Analog Devices: ADM7151. www.analog.com/en/products/adm7151.html

