

Rauschmessungen

Rauschen wird durch thermische Elektronenbewegung hervorgerufen und ist ein statistisch schwankendes Signal. Weißes Rauschen (Random Noise) wird deswegen als Leistung /Bandbreite (in dBm/Hz) angegeben. Rauschen (P_{Noise}) ist abhängig von der Temperatur (T) und von der Übertragungsbandbreite (B). Der theoretische Grenzwert beträgt

$$P_{\text{Noise}} = K \times T_0 \times B = -174\text{dBm/Hz}$$

$$K = 1,38 \times 10^{-23}\text{Ws}$$

$$T_0 = 290\text{ K}$$

$$B = 1\text{ Hz}$$



Bei konstanter Temperatur ist die Rauschleistung demnach direkt proportional zur Systembandbreite und es gilt $P_{\text{Noise}} \sim B$, was im völligen Gegensatz zu Sinussignalen steht. Die Bestimmung des mittleren Rauschpegels (U_{eff}) ist oft schwierig, da die statistischen Schwankungen des Rauschens als ein „Rauschteppich“ wirken.

Nachfolgend zeige ich die Messung von leistungsgleichen Sinus- und Rauschsignalen über ein Multimeter, RF-Power-Meter, True RMS Voltmeter, Oszilloskop und Spektrum Analysator. Bei Ermittlung des Rauschpegels entstehen oft Fehler, die man frühzeitig erkennen und möglichst korrigieren sollte. **Bild 1** skizziert die Messung von Sinus- und Rauschsignalen mit unterschiedlichen Messinstrumenten.

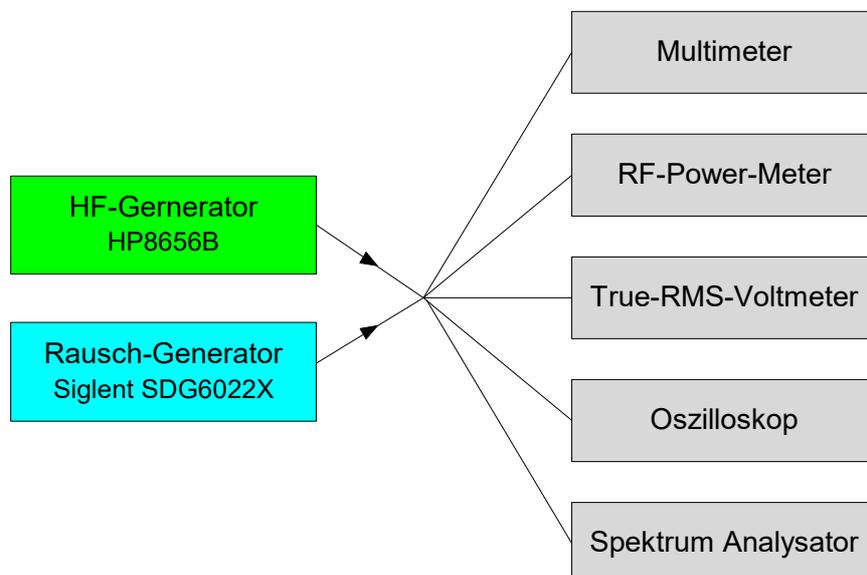


Bild1: Messung von Sinus- und Rauschsignalen mit unterschiedlichen Messinstrumenten

Multimeter

Multimeter zeigen den Effektivwert niederfrequenter Wechselfspannungen (ACV) an, indem sie die Spitzenspannung ($U_{\text{ss}}/2$) messen und mit 0,707 multiplizieren. Ein 10kHz Sinus-Signal von 0dBm Leistung (224mVeff) wird mit einem Multimeter (im Eingang mit 50 Ohm abgeschlossen) noch korrekt angezeigt (**Bild 2 links**), ein weißes Rauschsignal gleicher Leistung jedoch völlig falsch (**Bild 2, rechts**), weil die Spannungsanzeige von Multimetern nur auf Sinus-Signale kalibriert ist.



Multimeter
Z=50 Ohm

Bild 2: Sinussignal 0dBm, korrekt

Rauschsignal 0dBm, falsch

Verbesserungen schaffen sog. „RMS Multimeter“, die Wechselfspannungen mit einem hohen Crest-Faktor messen können (**Bild 3**). Die effektive Spannung des weißen Rauschsignals von 0-10kHz mit einer Leistung von 224mVeff an 50 Ohm wird mit 218mVeff noch relativ genau angezeigt (**Bild 3, rechts**). Allerdings ist der nutzbare Frequenzbereich solcher RMS Multimeter meist auf nur 100kHz begrenzt, so dass sie für Rauschmessungen im HF-Bereich nicht geeignet sind.



RMS Multimeter
Z=50 Ohm

Bild 3: Sinussignal 0dBm, korrekt

Rauschsignal 0dBm, geringer Fehler

RF Power-Meter

Ein „RF Power-Meter“ zeigt die Leistung eines HF-Signals (CW-Signal) ziemlich genau an. Im Beispiel verwende ich ein einfaches RF-Power-Meter (**Bild 4**) mit einem Pegelmessbereich von -75dBm bis +18dBm im Frequenzbereich von 0,1-1000MHz. Die Leistung eines 10MHz-Trägersignals mit 0dBm (1mW) Leistung wird exakt angezeigt (**Bild 4, links**). Aber auch HF-Leistungsmesser sind nur für Pegelmessungen von Sinus-Signalen konzipiert. Versucht man die Messung mit weißem Rauschen von 0-10MHz identischer Leistung zu machen, entsteht ein Messfehler von -2,4dB (**Bild 4, rechts**). Egal mit welcher Rauschbandbreite oder Pegel gearbeitet wird, der Messfehler bleibt immer bestehen.



Bild 4: Sinussignal 0dBm, korrekt



Rauschsignal 0dBm, Fehler: 2.4dB

RF Power-Meter
Z=50 Ohm

True RMS Voltmeter mit Thermokoppler

Der sicherste Weg, den Effektivwert beliebig geformter Signale fehlerfrei zu erfassen, bieten „True RMS Voltmeters mit Thermokoppler“ (Bild 5). Hier wird die Heizleistung der Wellenform angezeigt, die proportional zum Quadrat des Effektivwerts der Spannung ist. Das RMS Voltmeter HP3403C misst z.B. Effektivwerte von 2mV bis 1000V über einen Frequenzbereich von 10Hz bis 100MHz. Egal welche Signalform (Crest-Faktor >15) dem Thermokoppler angeboten wird, ob Sinus, Puls, Rechteck oder Rauschen, das True RMS Voltmeter zeigt immer die korrekte, effektive Spannung des Signals an.

Sinussignal, 50MHz, 224mVeff



Weißes Rauschen, 0-50MHz, 224mVeff



True RMS Voltmeter, 224mVeff, 1mW an 50 Ohm



Z_{IN} = 50 Ohm

Bild 5: True RMS Voltmeter mit echter Effektivwert-Anzeige von Sinus- und Rauschsignalen

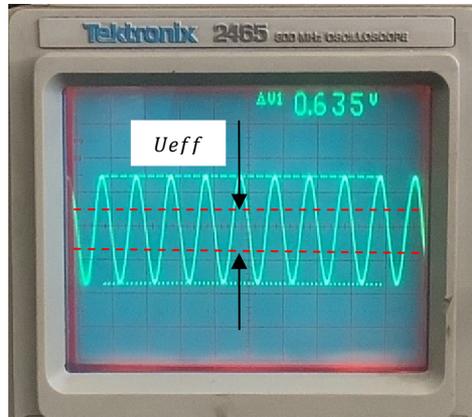
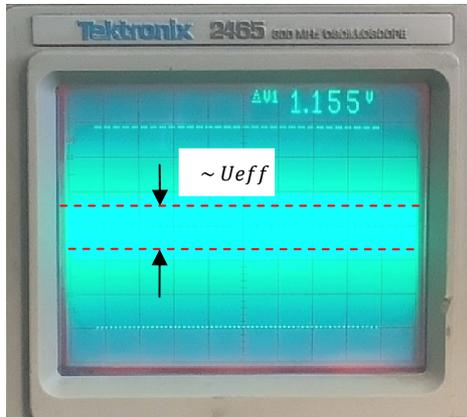
Oszilloskop

Eine einfache, wenn auch ungenaue Methode ist die Rauschmessung über ein Oszilloskop. Als Testsignal (Bild 6, links) wird weißes Rauschen von 0-10MHz mit U_{eff} = 224mV (1mW) verwendet, wobei der hochohmige Eingang des Scopes mit 50 Ohm abgeschlossen ist. Mit ausgeschalteter Triggerung lässt sich der Spitze-Spitze-Wert des Rauschens über die Marker-Linien nur schwer abschätzen, im Beispiel bei etwa 1,155Vss. Multipliziert man den Messwert mit einem Korrekturwert von 0,2 (Faustformel), ergibt sich ein U_{eff} von

$$U_{\text{eff}} \approx 0,2 \times 1,155V \approx 231mV_{\text{eff}}$$

resultierend in einem Fehler von 7mV. Demgegenüber wird ein 10MHz-Sinussignal (**Bild 6, rechts**) eindeutig und fehlerfrei angezeigt.

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{ss}}/2 \times \sqrt{2} = 0,635V_{\text{ss}}/2 \times 1,414 = 224mV_{\text{eff}} \text{ an } 50 \text{ Ohm} = 0\text{dBm}.$$



Scope

Bild 6: Rauschen 0-10MHz, 0dBm, $U_{\text{ss}} \approx 1.155V$ Sinussignal 10MHz, 0dBm, $U_{\text{ss}} = 0.635V$, korrekt

Spektrum Analysator

Spektrum Analysatoren eignen sich sehr gut zur Messung von Rauschen. Sie bieten gleichzeitig den Vorteil, den Frequenzverlauf des Rauschens „sichtbar“ zu machen, so dass es mit anderen Signalen vergleichbar ist.

Zur Unterscheidung eines CW- mit einem Rauschsignal zeigt **Bild 7** das Spektrum eines 7MHz-CW-Signals sowie ein weißes Rauschband von 0-10MHz, beide mit einer Leistung von 0dBm, über einen Span von 0-20MHz. Berechnet man die kumulative Leistung des Rauschens, kommt man auf einen Wert von

$$P_{\text{Noise}} = U^2/R = (0,224\text{Volt}^2/50\text{Ohm}) = 1 \times 10^{-3}W = 1mW, \text{ entsprechend } 0\text{dBm an } 50 \text{ Ohm}.$$

Bezogen auf die gewählte Auflösungsbandbreite des Analysators von $RSB=100\text{kHz}$ beträgt die Rauschleistung bei z.B. $f=7\text{MHz}$

$$P_{\text{Noise}} = 0\text{dBm} - 10\log(\text{Rauschbandbreite}/\text{RBW}) = 0\text{dBm} - 10\log(10\text{MHz}/100\text{kHz}) = -20\text{dBm}$$

Der Marker im Display zeigt jedoch einen Messwert von **-22,65dBm** an. Wo liegt denn hier der Fehler?

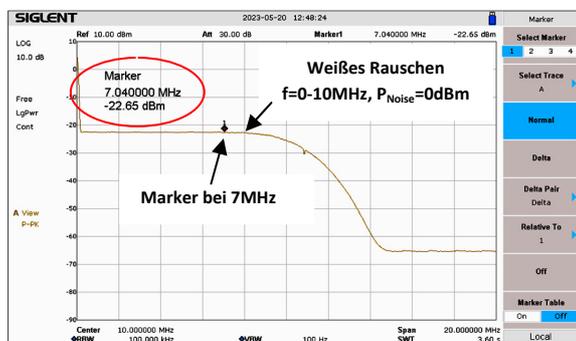
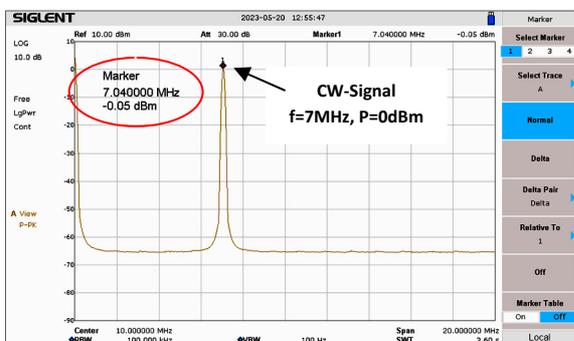


Bild 7: 7MHz-Signal mit 0dBm Leistung (links) und Rauschen von 0-10MHz mit 0dBm Leistung (rechts)

Moderne Analysatoren verfügen für Rauschmessungen über einen sog. „Noise-Marker“. Nach Aktivierung des Noise-Markers (**Bild 8**), wird das Rauschsignal bezogen auf eine Bandbreite von 1Hz

angezeigt und das Messergebnis gleichzeitig auf die „Rauschbandbreite“ des verwendeten Auflösungsfilters bezogen. Hierzu sind im Analysator die Rauschbandbreiten aller Auflösungsfilter (10Hz bis 1MHz) abgespeichert und werden automatisch zur Berechnung der Rauschleistung herangezogen.

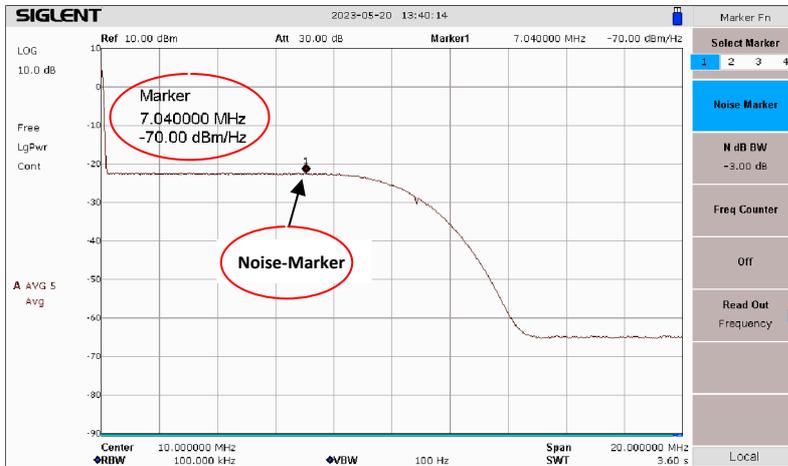


Bild 8: Rauschsignal wie in Bild 7, gemessen über den Noise-Marker: $P_{\text{Noise}} = -70\text{dBm/Hz}$

Mit aktiviertem Noise-Marker, zeigt der Analysator einen Rauschpegel von $P_{\text{Noise}} = -70\text{dBm/Hz}$ an. Stimmt -70dBm/Hz mit der zuvor berechneten Rauschleistung von $-20\text{dBm}/100\text{kHz}$ überein? Kalkuliert man $P_{\text{Noise}} = -70\text{dBm/Hz}$ zurück auf 100kHz , ergibt sich ein Pegel von $P_{\text{Noise}} = -70\text{dBm/Hz} + 10\lg(100\text{kHz}/1\text{Hz}) = -70\text{dBm} + 50\text{dB} = -20\text{dBm}$. Der über den „Noise-Marker“ ermittelte Rauschpegel ist demnach korrekt!

Misst man das Rauschen nicht über den Noise-Marker, entsteht ein Messfehler von $-22,65\text{dBm} - (-20\text{dBm}) = -2,65\text{dB}$. Ergebnis: Filterbandbreite und Rauschbandbreite sind nicht identisch. Hier ist deutlich zu erkennen, wie leicht Messfehler bei der Ermittlung von Rauschpegeln entstehen können.

Erfassung von Signalen an der Rauschgrenze des Analysators

In der Praxis kommt es häufig vor, dass kleine Signale in der Nähe der Rauschgrenze des Analysators gemessen werden. Liegt ein Signal z.B. um 3dB oberhalb des Rauschens des Analysators und man misst dessen Pegel mit Hilfe eines Markers, entsteht schon ein Fehler von 3dB . Obwohl das Signal deutlich mit 3dB über dem Rauschen erkennbar ist (**Bild 9**), hat es die gleiche Leistung wie das um 3dB tiefer liegende Rauschen, weil sich beide Signale gemäß $(S+N)/N=2$ addieren. Der tatsächliche

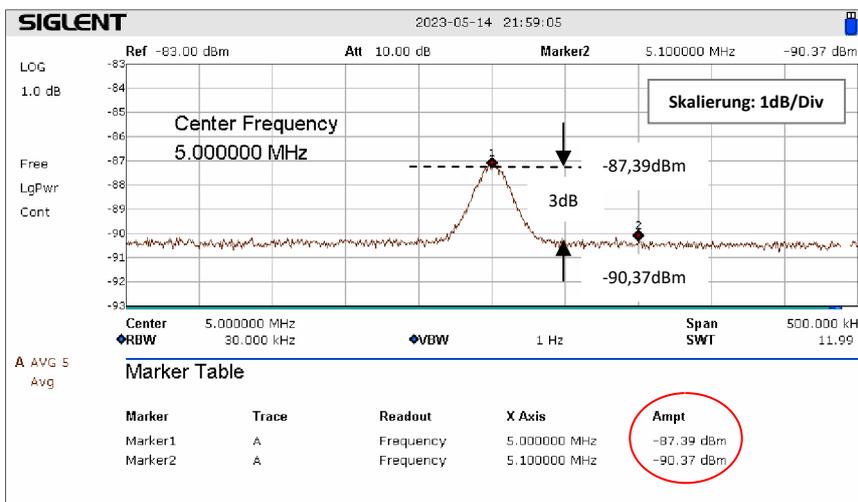


Bild 9: CW-Signal mit 3dB über dem Rauschen

Pegel des CW-Signals beträgt also -90,37dBm und nicht -87,39dBm. Selbst wenn das CW-Signal um 10dB über dem Rauschen liegt, ist immer noch ein Messfehler vorhanden, nur wird er dann so klein, dass er meist vernachlässigt wird.

Beispiel: Der Rauschpegel (P_A) eines Spektrumanalysators beträgt -70dBm und durch ein CW-Signal steigt die Anzeige des Markers auf -65dBm (P_{tot}) an. Wie groß ist die Leistung des CW-Signals in dBm?

Zunächst ermittelt man die Leistung (mW) beider Signale

$$P_A = -70\text{dBm} = 10^{-7}\text{ mW} \quad \text{und} \quad P_{tot} = -65\text{dBm} = 3.16 \times 10^{-7}\text{ mW}$$

Die Leistung des CW-Signals alleine, erhält man durch Substruktion beider Leistungswerte

$$P_{\text{Signal}} = P_{tot} - P_A$$

$$P_{\text{Signal}} = (3.16 \times 10^{-7}\text{ mW}) - (1 \times 10^{-7}\text{ mW}) = 2.16 \times 10^{-7}\text{ mW}$$

entsprechend einer Leistung in dBm von

$$L_{P/1\text{mW}} = 10\log 2.16 \times 10^{-7}\text{ mW} = -66,65\text{dBm}$$

Der tatsächliche Signalpegel des eingespeisten CW-Signals beträgt demnach -66,65dBm und nicht -65dBm. Ohne Korrektur, wird das CW-Signal am Analysator um 1,65dB zu hoch angezeigt. Selbst wenn das Signal mit 10dB über dem Rauschen liegt, wird es durch das additive Grundrauschen des Analysators noch um 0,45dB zu groß angezeigt, wobei dieser Fehler in der Praxis meist ignoriert wird. Das Beispiel zeigt, wie kritisch die Messungen kleiner Signale in der Nähe von Grundrauschen sind.

Rauschmaß (F_{dB}) eines SSB-Empfängers

Ein typisches Beispiel einer Rauschmessung, ist die die Ermittlung des Rauschmaß eines Empfängers. Als Testgerät verwende ich einen IC-7300 mit den Einstellungen: SSB, $B=2,4\text{kHz}$ und $f_e=7,1\text{MHz}$. Zunächst wird der Empfänger im Eingang mit 50 Ohm abgeschlossen und die Lautstärke am NF-Ausgang so eingestellt, dass am RMS-Voltmeter eine relative Spannung von z.B. $100\text{mV}_{\text{eff}}$ angezeigt wird (**Bild 10**).



Bild 10: Messung Rauschmaß (F_{dB})

Dann den Empfänger mit einem kalibrierten Rauschgenerator verbinden und die Rauschleistung so einstellen, dass die Spannung am NF Ausgang um Faktor $\sqrt{2}=1,414$ von 100mV auf $141,4\text{mV}$ oder bei logarithmischer Anzeige um $20\log 1,414 = +3\text{dB}$ ansteigt. Bei einer Rauschbandbreite von 0-10 MHz, war hierzu eine Rauschleistung erforderlich von

$$P_{\text{Noise}} = -88\text{dBm}/10\text{MHz} = -158\text{dBm}/\text{Hz}$$

Das resultierende Rauschmaß (Noise Figure) des Empfängers, ergibt sich aus der Differenz von eingespeister Rauschleistung $-158\text{dBm}/\text{Hz}$ zum Rauschgrenzwert von $-174\text{dBm}/\text{Hz}$

$$\text{Rauschmaß (F}_{\text{dB}}) = -158\text{dBm/Hz} - (-174\text{dBm/Hz}) = 16\text{dB}$$

entsprechend einer Rauschzahl (F) von

$$\text{Rauschfaktor (F)} = 10^{\text{Rauschmaß}/10} = 10^{16/10} = 40$$

Mit anderen Worten, der Signal/Rausch-Abstand eines empfangenen Signals verschlechtert sich um 16dB zwischen Eingang und Ausgang des Empfängers.

Die Vorteile der Rauschmessung liegen auf der Hand: Da es sich um eine reine Vergleichsmessung handelt, brauchen die Rauschbandbreiten der Filter nicht mehr bekannt zu sein, da sie sich heraus kürzen. Sind beide Seiten von den gleichen Fehlereinflüssen betroffen, heben sie sich gegenseitig auf. Alles was man braucht, ist ein Rauschgenerator mit einstellbarer Leistung und Bandbreite. Die Messung ist im Prinzip einfach bedarf keiner Korrektur.

Werner Schnorrenberg
DC4KU
12.11.2023

Literatur:

(1) MDS und Noise Figure, DC4KU

https://dc4ku.darc.de/Messung_von_Rauschmass_und_Empfindlichkeit_eines_Empfaengers.pdf