

Rauschen hochfrequenter Leitungen

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler - Saar
Dr. rer. nat. Schau
DL3LH**

Vorwort

Während im KW-Bereich die Verluste von Interesse sind und das Rauschen der Bauteile weniger, ist im UKW-Bereich vorrangig das Rauschen von Bedeutung. Bei der Übertragung einer Nachricht kann bei konstanter Sendeleistung die Distanz zwischen Sender und Empfänger nicht beliebig vergrößert werden, weil Störsignale dem schwachen Signal beifügt werden.

Verstärkt man das schwache Signal, werden im Übertragungskanal Störsignale in Form von Rauschen oder auch durch andere technische Einrichtungen erzeugen Störsignale dem Nutzsignal hinzugefügt.

Störsignale technischer Einrichtungen können durch einfache Schaltungstechnik aus dem Nutzsignal entfernt werden. Um Signale, die weit im Rauschen liegen zu detektieren, bedarf es ausgeklügelter Methoden der Übertragungstechnik.

1. Rauschleistung eines ohmschen Widerstandes

Die Naturwissenschaftler Nyquist und die Experimente von Johnson (1928) untersuchten die Rauschvorgänge. Sie fanden heraus, dass für das Quadrat des Effektivwertes der Spannungsschwankung folgender Zusammenhang

$$\overline{|u|}^2 = 4 k T R B \quad (\text{Gl 1})$$

gilt. Dabei ist u der Effektivwert der Rauschspannung eines Widerstandes R , bei der Bandbreite B , der sich auf der absoluten Temperatur T (Kelvin) befindet.

Rechnen wir mit den gebräuchlichen Celsius Einheiten dann ist: $T = 273^\circ + t^\circ \text{C}$, Null grad Celsius entspricht der absoluten Temperatur $T = + 273 \text{ K}$.

Die Boltzmann'sche Gaskonstante in (Gl 1) ist $k = 1.38 * 10^{-23} \text{ Ws/grad abs.}$ und hat die Dimension Energie pro Temperatur.

Wird nach (Gl 1) die absolute Temperatur $T = 0$, dann ist auch die Rauschspannung Null. Für 20°C Zimmertemperatur, folgt aus (Gl 1) die zugeschnitten Größengleichung

$$u_r = 4 \sqrt{R/M\Omega * B/KHz} \quad [\mu V]. \quad (\text{Gl 2})$$

Die maximale (verfügbare) Rauschleistung der Rauschquelle wird bei Anpassung erreicht und ist nach (Gl 1)

$$N_{vr} = \overline{|u_r|}^2 / 4 R = k T B. \quad (\text{Gl 3})$$

und nur abhängig von der absoluten Temperatur T sowie der Bandbreite B der Rauschsignals.

Befindet sich die Rauschquelle auf der Temperatur $T = 290 \text{ K}$ bezeichnet man diese als die Bezugs - temperatur T_o . Ein ohmscher Widerstand auf der Bezugstemperatur $T_o = 290 \text{ K}$ erzeugt nach (Gl 3) eine Rauschleistung $N_o = 4.0 * 10^{-21} \text{ W pro Hz}$ Bandbreite.

Die Spannungs-Ersatzschaltung für (Gl 1) ist die Reihenschaltung eines rauschen Spannungsquelle mit einem rauschfreien Widerstand.

Für die gleichwertige Parallelersatzschaltung einer Rauschstromquelle parallel zu einem rauschfreien Leitwert, wird der Kurzschlussrauschstrom aus dem Ohmschen Gesetz $i_k = u_r / R$ erhalten.

2. Signal – Rauschabstand

Bei der Übertragung analoger Signale ist das Qualitätsmaß der Übertragung der Störabstand, definiert als das Verhältnis von Signalleistung zur Störleistung am gleichen Klemmenpaar. Besteht das Störsignal nur aus Rauschen, so spricht man vom Signal zu Rauschverhältnis S/N . Rauschen N (Noise) ist ein stochastisches Signal, dass nur über die Wahrscheinlichkeitsdichte beschreibbar ist.

3. Rauschzahl

Aktive und passive Vierpole (VP) beinhalten immer ohmsche Widerstände mit entsprechendem Rauschbeitrag nach (Gl 1, 2). Welche Rauschleistung sich am Ausgang des VP einstellt ist abhängig von der Verteilung der Rauschquellen innerhalb des VP und wie die Rauschquellen voneinander abhängig (korreliert) sind.

Damit das Rauschen eines linearen VP charakterisiert werden kann, wurde die Rauschzahl als das Verhältnis der Signal zu Rauschabstände am Ein – und Ausgang

$$F = (S_1/N_1) : (S_2/N_2) = S_1 / S_2 * N_2 / N_1 \quad (\text{Gl 4})$$

definiert.

Sind beide „Signal zu Rauschabstände“ gleich, dann ist die Rauschzahl $F = 1$ und der VP rauschfrei.

Rauschkenngrößen werden mit der verfügbaren Leistungsverstärkung L_v /1/ vom Eingang zum Ausgang oder umgekehrt übersetzt. L_v ist das Leistungs-Verhältnis der verfügbaren Leistung am Ausgang einer Schaltung, zur verfügbaren Leistung der Quelle. L_v ist unabhängig von den ein – und ausgangsseitigen Anpassungsverhältnissen und dem Lastwiderstand, aber abhängig von der Eigenschaft der Quelle und den Parametern der elektronischen Schaltung /1/.

Die Rauschleistung am Ausgang N_2 nach (Gl 4) setzt sich immer aus zwei Beiträgen zusammen. Erstens aus dem Rauschbeitrag der Quelle, übersetzt mit der verfügbaren Leistungsverstärkung und einem zusätzlichen Rauschbeitrag des VP selbst.

Wir schreiben daher $N_2 = N_1 * L_v + N_{zu}$. Entsprechend gilt für das Nutzsignal $S_2 = L_v * S_1$ und aus (Gl 4) wird

$$F = 1 + N_{zu} / (N_1 * L_v). \quad (\text{Gl 5})$$

Der zweite Summand in (Gl 5) wird als zusätzliche Rauschzahl F_z bezeichnet, die den vom Vierpol zusätzlich erzeugten Rauschbeitrag beschreibt.

Daher ist

$$F = 1 + F_z. \quad (\text{Gl 6})$$

bzw.

$$F_z = F - 1. \quad (\text{Gl 7})$$

Befindet sich der rauschende Generator und der VP auf der Temperatur T_o , dann ist $N_1 = k T_o B$ und (Gl 7) kann in der Form

$$F_{zo} = N_{zu} / (L_v * k T_o B) \quad (\text{Gl 8})$$

geschrieben werden. Aus (Gl 8) folgt auch

$$N_{zu} = L_v * F_{zo} * (k T_o B) = L_v * k T_e B \quad (\text{Gl 9})$$

Das Produkt $T_e = F_{zo} * T_o$ ist eine Rauschtemperatur, die den VP charakterisiert und als effektive Rauschtemperatur bezeichnet wird.

Die Standard-Rauschzahl, bzw. die zusätzliche Rauschzahl F_{zo} ist eine auf die Temperatur T_o bezogene Größe. Diese Wichtigkeit ist dann von Interesse, wenn sich der rauschende Generator nicht auf der Temperatur T_o befindet.

Oftmals wird die Standard-Rauschzahl in dB angegeben und als NF_o (Noise-Figur) oder Rauschmaß bezeichnet. Es ist

$$NF_o = 10 \log F_o. \quad (\text{Gl 10})$$

Bezieht man nach (Gl 8, 9) den zusätzlichen Rauschbeitrag auf den Eingang des VP und betrachtet den VP als rauschfrei, kann der Rauschbeitrag des VP durch eine erhöhte Temperatur des rauschenden Generators beschrieben werden. Aus (Gl 9) wird bei gleichen Bandbreiten B

$$F_o = k (T_e + T_o) B / k T_o B = (T_e + T_o) / T_o \quad (\text{Gl 11})$$

mit T_e als effektive Rauschtemperatur des VP. T_e ist nicht die physikalische Temperatur, sondern lediglich

eine Kenngröße zur Beschreibung des Rauschbeitrages des VP. Mit (Gl 8, 9) wird die zusätzliche Rauschzahl

$$F_{zo} = F_o - 1 = (T_e - T_o) / T_o = T_e / T_o \quad (\text{Gl 12})$$

die nur den zusätzlichen Rauschbeitrag des VP beschreibt.

Aus (Gl 12) wird die Bedeutung der zusätzlichen Rauschzahl besonders deutlich, denn die Rauschtemperatur beschreibt den VP eindeutig.

Ist der Quellwiderstand auf einer anderen Temperatur als T_o , dann muss die zusätzliche Rauschzahl nach (Gl 12) auf die Temperatur T_1

$$F_{zT1} = F_{zo} T_o / T_1 \quad (\text{Gl 13})$$

umgerechnet werden.

Aus (Gl 13) ergibt sich die wichtige Beziehung

$$F_{zT1} * T_1 = F_{zo} * T_o = T_e = \text{Konstant} \quad (\text{Gl 13a})$$

d.h. die effektive Rauschtemperatur eines VP ist eine Konstante und nur von den Rauscheigenschaften des VP abhängig.

Ist die Temperatur $T_1 < T_o$ vergrößert sich die zusätzliche Rauschzahl nach (Gl 12) oder die Rauschzahl

$$F_{T1} = (F_o - 1) T_o / T_1 - 1 \quad (\text{Gl 14})$$

des VP, die bei Umgebungstemperatur T_o gemessen wurde. Die einfachere Beziehung ist (Gl 13), die zusätzliche Rauschzahl wird im Verhältnis der Temperaturen umgerechnet.

Beispiel 3.1

Das Rauschmaß eines LNC ist mit $NF = 1.2$ dB angegeben. Stillschweigend wird vorausgesetzt, dass das Rauschmaß sich auf T_o bezieht.

Die Rauschzahl ist nach Umstellung der (Gl 10) $F_o = 1.3182$ bzw. $F_{zo} = 0.3182$ und die effektive Rauschtemperatur $T_e = 92.29$ K.

Wird der LNC auf den Weltraum mit der Hintergrundtemperatur $T_1 = 58$ K gerichtet, dann ist die zusätzliche Rauschzahl bezogen auf T_1 nach (Gl 13) $F_{zT1} = 290 / 58 * 0.3182 = 1.591$ und die $NF_{T1} = 4.1$ dB. Die effektive Rauschtemperatur bleibt $T_e = 92.29$ K. Das gleiche Ergebnis liefert natürlich (Gl 14), aber etwas umständlicher. Für den Signal-Rauschabstand ist die Rauschzahl maßgeblich.

4. Die Grenzempfindlichkeit

In linearen, analogen Systemen ist die Grenze für die Erkennung eines Nutzsignals dann vorhanden, wenn das Nutzsignal gerade die Rauschgrenze nach (Gl 1) erreicht hat.

Der VP hat bei linearen Schaltungen immer eine Rauschzahl $F > 1$. Bei konstanter Bandbreite und Umgebungstemperatur T_o ist die Grenzspannung nach (Gl 1) folglich

$$|u_{\text{grenz}}|^2 = F * 4 (k T_o B) R \quad (\text{Gl 15})$$

und ist definiert als die Grenzempfindlichkeit eines Empfangssystems.

Manche Definition der Grenzempfindlichkeit verwendet auch den 3 dB - Punkt. Dabei liegt das Nutzsignal 3 dB über dem Rauschen. Die Bestimmung erfolgt mit einem 3 dB Dämpfungsglied, damit die Eigenschaften des Messwerkes eliminiert werden.

Mit (Gl 4) kann bei bekannter Rauschzahl der eingangseitige Signal-Rauschabstand berechnet werden, wenn der ausgangsseitige Signal-Rauschabstand gefordert wird.

Mit der Freiraumdämpfung, der Sendeleistung und den Antennengewinnen von Sende- und Empfangsantenne berechnet sich die maximal mögliche Entfernung der Übertragungsstrecke im Freiraum. Bei terrestrischen Verbindungen hat die Erdkrümmung entscheidenden Einfluss auf die Distanz der Übertragungsstrecke.

6. Der Rauschbeitrag eines Dämpfungsgliedes

Ein Dämpfungsglied besteht aus rauschenden Widerständen beliebiger Anordnung. Wird das Dämpfungsglied für Rauschmessungen als Eichteiler verwendet, zeigt die Skala nur dann korrekte Werte, wenn das Dämpfungsglied am Ein – und Ausgang mit der Systemsimpedanz abgeschlossen ist $/1/$.

Da das Dämpfungsglied nur aus Widerständen besteht, ist nach dem Gleichverteilungsgesetz die Rauschleistung bei Zimmertemperatur am Ausgang immer $N_2 = k T_o B$, wenn sich am Eingang eine Rauschquelle auf T_o befindet. Diese Rauschleistung ist unabhängig von der eingestellten Dämpfung D_v .

Man kann sich das so vorstellen, dass zwar die Rauschleistung der Quelle mit D_v verringert wird, doch die internen Rauschquellen des DG (DG auf der Temperatur T_o) diesen Verlust wieder ausgleichen.

Das Verhältnis der Signal zu Rauschabstände am Ein – und Ausgang nach (Gl 4) ist

$$F_{D_o} = (S_1 S_2) * (N_2/N_1) = (S_1/L_v S_1) * kT_oB / kT_oB$$

und mit

$$D_v = 1 / L_v$$

folgt der wichtige Zusammenhang

$$F_{D_o} = D_v. \quad (\text{Gl 16})$$

Ein Dämpfungsglied auf der Temperatur T_o rauscht mit seiner verfügbaren Dämpfung D_v .

Die Dämpfung D_v ist abhängig von der verfügbaren Rauschleistung der Quelle, der verfügbaren Leistung des VP am Ausgang und von den Parametern des VP, nicht aber von der Lastimpedanz und den Anpassungsverhältnissen am Ein – und Ausgang.

Beispiel 5.1

Welche Rauschzahl hat ein 12 dB Dämpfungsglied? Nach (Gl 16) ist das Rauschmaß $NF_o = 12$ dB. Die Rauschzahl $F_o = 15.84$. Die zusätzliche Rauschzahl ist $F_{z_o} = F_o - 1 = 15.84 - 1 = 14.84$ und die Rauschtemperatur $T_D = F_{z_o} * T_o = 4303.6$ K. Der Generator liegt auf einer Temperatur $T_e + T_o = 4303.6$ K + 290 K = 4593.6 K.

7. Die Kettenschaltung rauschender Vierpole

Werden rauschende Vierpole in Kette (Reihe) geschaltet, berechnet sich die Gesamttrauschzahl aus der Friisschen Gleichung zu

$$F_{\text{ges}} = F_1 + F_{z2}/L_{v1} + F_{z3}/L_{v1}L_{v2} + \dots \quad (\text{Gl 17})$$

Besteht die Kette nur aus zwei Stufen, dann ist

$$F_{z12} = F_{z1} + F_{z2}/L_{v1} \quad (\text{Gl 18})$$

die zusätzliche Gesamttrauschzahl.

Der Rauschbeitrag der ersten Stufe geht in vollem Umfang in die Rauschzahl ein.

Hat die erste Stufe eine verfügbare Leistungsverstärkung $L_v > 1$ (Verstärkung) wird der Rauschbeitrag der zweiten Stufe vermindert. Hat die erste Stufe eine verfügbare Leistungsverstärkung $L_v < 1$ - also eine Dämpfung - dann wird das Rauschen der zweiten Stufe vergrößert. Schreibt man (Gl 17) etwas um,, dann wird mit den Temperaturen

$$T_{\text{ges}} = T_1 + T_2/L_{v1} + T_3/L_{v1}L_{v2} + \dots \quad (\text{Gl 19})$$

die Rauschtemperatur des Systems erhalten und als Systemrauschtemperatur bezeichnet.

Besteht das Systems nur aus 2 VPen, dann gilt entsprechend (Gl 19)

$$T_{12} = T_1 + T_2 / L_{V1} \quad (\text{Gl 20})$$

8. Rauschbeitrag einer verlustbehafteten Leitung

Eine verlustbehaftete Leitung ist ganz allgemein gesehen ein VP mit Eingangs- und Ausgangsklemmen. Es ist ein Dämpfungsglied auf der Temperatur T_o , wenn die Leitung nicht gekühlt wird. Der Verlust einer Leitung berechnet sich /1/ zu

$$T_L = [(a^2 - |\underline{r}_2|^2) / a (1 - |\underline{r}_2|^2)] \quad (\text{Gl 21})$$

und da der Verlust meist in dB angegeben wird

$$T_L = 10 \log [(a^2 - |\underline{r}_2|^2) / a (1 - |\underline{r}_2|^2)] \quad (\text{Gl 22})$$

mit dem Dämpfungsfaktor

$$a = 10^{ML/10} \quad (\text{Gl 23})$$

und

$$|\underline{r}_2| = (VSWR_2 - 1) / (VSWR_2 + 1)$$

als Betrag des Reflexionsfaktors am Ende der Leitung und ML als „Matched-Line-Loss“.

Im UKW – Bereich ist das Rauschen vordergründig und es wird mit angepassten Leitungen gearbeitet. Bei Anpassung am Ende der Leitung ist $\underline{r}_2 = 0$ und nach (Gl 21) wird

$$T_L = a. \quad (\text{Gl 24})$$

Mit den Leitungskonstanten berechnet sich folgender Zusammenhang /1/

$$a = e^{2\alpha l} \quad (\text{Gl 25})$$

oder auch mit dem Dämpfungswert ML in dB

$$a = 10^{ML/10} \quad (\text{Gl 26})$$

der aus Tabellen der Hersteller entnommen werden kann.

Für die Umrechnung der Dämpfungswerte nach (Gl 25) benötigen wir den Umrechnungsfaktor zwischen dB und Neper. Dieser Faktor ist 1 dB entspricht 0.115 Neper.

Mit dem Zusammenhang nach (Gl 11) rauscht eine Leitung mit dem Dämpfungswert nach (Gl 24). Ist die Leitung auf der Temperatur T_o , so ist die Rauschzahl

$$F_o = a \quad (\text{Gl 27})$$

bzw.

$$F_{zo} = F_o - 1 = (a - 1). \quad (\text{Gl 28})$$

Von der Antenne zur TRX ist eine Leitung erforderlich. Aus der Friis'schen Gleichung (Gl 17, 19) wird ersichtlich, dass die Leitung immer hinter einem rauscharmen Verstärker angeordnet sein muss, da sonst die Rauschzahl des Verstärkers durch die Dämpfung der Leitung und die Grenzempfindlichkeit reduziert wird.

Beispiel 8.1

Eine koaxiale Leitung habe lt. Tabelle bei $f = 145$ MHz einen Dämpfungswert von $ML = 10$ dB /100 m.

Wir verwenden 20 m dieser Leitung und berechnen den Dämpfungswert zu $D = 2.5$ dB/20 m.

Das Rauschmaß ist $NF_o = 2.5$ dB. Nach (Gl 27) ist die Rauschzahl $F_o = a = 1.7782$ und die effektive Rauschtemperatur $T_e = 0.17782 * 290 \text{ K} = 225.70 \text{ K}$.

Mit der Phasenkonstanten $\beta = 360^\circ/\lambda$ kann leicht der Imaginärteil des Wellenwiderstandes ($-j Z_o \alpha/\beta$) /1/ bestimmt werden. Die Leitungskonstante α folgt aus (Gl 25) $\alpha = \ln a / (2 l) = \ln (1.7782) / 40 \text{ m} = 0.01439 \text{ N/m}$.

Beispiel 8.2

Eine koaxiale Leitung nach Beispiel 8.1 wird in einer terroristischen Anwendung zwischen Antenne und rauscharmen Verstärker eingesetzt.

Für den rauscharmen Verstärker im 2 m Band wird ein Rauschmaß $NF_o = 1.4$ dB angegeben. Welche Gesamtrauschzahl hat die Anordnung?

Der lineare Wert der Rauschzahl des Verstärkers ist $F_o = 1.380$ und daraus mit (Gl 17) $F_{oges} = 1.7782 + 1.380 * 1.7782 = 4.232$. Die Gesamtrauschzahl ist $F_o = 4.232$ oder auch $NF_{oges} = 6.26$ dB und die effektive Rauschtemperatur der Kettenschaltung $T_e = 923.28 \text{ K}$.

Beispiel 8.3

Wir vertauschen die Reihenfolge der Vierpole nach Beispiel 8.2. Der Verstärker mit dem Rauschmaß $NF_o = 1.4$ dB wird direkt an der Antenne betrieben und habe eine verfügbare Verstärkung $L_v = 15$ dB (Faktor 31.62).

Welche Gesamtrauschzahl stellt sich jetzt ein? Nach (Gl 17) wird $F_{ges} = 1.380 + 1.7782 / 31.62 = 1.4362$. Die effektive Rauschtemperatur der Kettenschaltung hat sich gegenüber Beispiel 8.2 auf $T_e = 0.4362 * 290 \text{ K} = 126.50 \text{ K}$ reduziert.

9. Weitere Beispiele zum Verständnis

Beispiele zu Abschnitt 1

Beispiel 1.1

Wir berechnen die Rauschspannung eines ohmschen Widerstandes $R = 1 \text{ M}\Omega$ auf der Temperatur $t = 20^\circ\text{C}$ und einer Frequenzbandbreite $B = 1 \text{ KHz}$.

Mit (Gl 1) wird $|u|^2 = 4 * 1.38 * 10^{-2} * 293 (\mu\text{V})^2$ und daraus die Rauschspannung $u_r = 4.02 \mu\text{V}$. Die Rauschspannung liegt in der Größenordnung unserer Nutzsignale.

Beispiel 1.2

Bei einem Frequenzband im Fernsehen von rd. $B = 7 \text{ MHz}$ und einem Widerstand von $R = 1 \text{ M}\Omega$ tritt nach (Gl 2) eine Rauschspannung von $u_r = 4 \sqrt{1 * 7000} = 334 \mu\text{V}$ oder rd. $u_r = 0.34 \text{ mV}$ auf. Die Rauschleistung ist nach (Gl 3) bei Raumtemperatur $N = 28.01 * 10^{-15} \text{ W}$ und unabhängig vom Wert des Widerstands.

Beispiel 1.3

Zwei rauschende Widerstände auf Raumtemperatur T_o sind in Reihe geschaltet. Der eine hat einen Wert von $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, der zweite einen Wert $R_2 = 50 \text{ K}\Omega$. Welche Rauschspannung kann am Gesamtwiderstand gemessen werden, wenn die Betriebsbandbreite $B = 10 \text{ KHz}$ beträgt?

Nach (Gl 2) erzeugt der Widerstand R_1 eine Rauschspannung $u_{r1} = \sqrt{0.01 * 10} = 1.26 \mu\text{V}$ und der Widerstand R_2 entsprechend $u_{r2} = \sqrt{0.05 * 10} = 2.237 \mu\text{V}$. Um die Summenrauschspannung zu berechnen, erinnern wir uns daran, dass unkorrelierte Spannungen sich quadratisch addieren [17]. Die Summenrauschspannung ist daher $u_{\text{ges}} = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2} = \sqrt{1.26^2 + 2.237^2} = 2.56 \mu\text{V}$. Der Gesamtwiderstand ist $R_{\text{ges}} = 60 \text{ K}\Omega$. Wir überprüfen die Rechnung mit dem Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = 60 \text{ K}\Omega$ und erhalten nach (Gl 2) $u_{r_{\text{ges}}} = 4 \sqrt{0.06 * 10} \mu\text{V} = 2.56 \mu\text{V}$. Beide Ergebnisse sind natürlich identisch. Die Rauschleistung in der Bandbreite $B = 10 \text{ KHz}$ ist $N = k T_o B = 4.0 * 10^{-17} \text{ W}$.

Beispiel 1.4

Wir schalten die beiden Widerstände nach Beispiel 1.3 parallel und berechnen die an den Klemmen auftretende Rauschspannung. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Rauschkurzschlussstrom allgemein $i_r = u_r / R$. Daraus der Rauschstrom $i_{r1} = 1.26 \mu\text{V} / 10 \text{ k}\Omega = 0.126 \text{ nA}$ und $i_{r2} = 2.237 \mu\text{V} / 50 \text{ k}\Omega = 0.0447 \text{ nA}$. Die nicht korrelierten Rauschströme addieren sich wieder quadratisch zur $i_{r_{\text{ges}}} = \sqrt{i_{r1}^2 + i_{r2}^2} = \sqrt{(0.126)^2 + (0.0447)^2} \text{ nA} = 0.1336 \text{ nA}$.

Man kann natürlich auch mit dem Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = (10 * 50 / 60) \text{ k}\Omega = 8.333 \text{ k}\Omega$ erst die

Rauschspannung nach (Gl 2) berechnen und dann den Kurzschlussrauschstrom nach dem ohmschen Gesetz, oder man rechnet mit Leitwerten und addiert die Rauschströme quadratisch. Die Ergebnisse sind gleich. Die Rauschleistung der Widerstands-anordnung auf der Temperatur T_o ist unverändert $N_o = k T_o B$.

Beispiele zu Abschnitt 3

Beispiel 3.1

Das Rauschmaß eines Verstärkers wird mit $NF = 1.5 \text{ dB}$ angegeben. Wie groß ist der lineare Wert der Rauschzahl?

Nach (Gl 10) wird $F_o = 10^{0.15} = 1.4125$ und die zusätzliche Rauschzahl $F_{zo} = F_o - 1 = 0.4125$.

Die effektive Rauschtemperatur des Innenwiderstandes der Quelle ist nach (Gl 12) $T_e = 0.4125 * 290 \text{ K} = 119.63 \text{ K}$, der sich fiktiv auf der Temperatur $T = T_e + T_o = 290 \text{ K} + 119.63 \text{ K} = 409.63$ befindet.

Der Signal-Rauschabstand nach (Gl 4) ist $F = 1.425$ und besagt, dass dieser sich am Ausgang des VP durch dessen Rauschbeitrag auf den Wert $1/F = 0.707$ verringert hat.

Beispiel 3.2

Ein Vorverstärker ist mit $NF = 2.2 \text{ dB}$ angegeben. Dieser Verstärker wird direkt an einem Parabolspiegel betrieben, der auf einen Satelliten im Weltraum gerichtet ist. Im Weltraum herrscht eine Hintergrundtemperatur von rd. $T = 58 \text{ K}$. Welche Rauschzahl hat der Verstärker an dieser Antenne?

Die Rauschzahl ist $F = 10^{0.22} = 1.659$, bezogen auf $T_o = 290 \text{ K}$. Die zusätzliche Rauschzahl bezogen auf 58 K ist $F_{z58\text{K}} = F_{z290\text{K}} (290/58) = 0.659 * 5 = 3.295$ und das Rauschmaß jetzt $NF = 6.33 \text{ dB}$.

Die Rauschtemperatur des Vorverstärkers nach (Gl 12) ist $T_e = 0.695 * 290 \text{ K} = 191.11 \text{ K}$ und charakterisiert nur den Rauschbeitrag des Vorverstärkers. Wir rechnen rückwärts und bestimmen die Rauschzahl bezogen auf T_o .

$F_{z(T_o)} = 191.11 \text{ K} / 290 \text{ K} = 0.659$. Die Rauschzahl bezogen auf 290 K wird $F = 1 + 0.659 = 1.659$ und $NF = 10 \log 1.659 = 2.2 \text{ dB}$, wie es auch sein muss. Die Rauschtemperatur T_e ist die eigentliche Kenngröße eines n-Tores.

Beispiele zu Abschnitt 7

Beispiel 7.1

Bei hohen Frequenzen, im Mikrowellenbereich, ist die Eingangsstufe ein Gleichlage-Abwärtsmischer, da Verstärker nicht zur Verfügung stehen. Dem Mischer folgt auf der Zwischenfrequenzebene eine rauscharme Verstärkerstufe.

Schottky-Mischer ohne Beschaltung der Spiegel - frequenz haben in etwa einen Mischverlust von 6 dB. (Faktor rd. 4).

Ist die Rauschtemperatur des Gleichlage-Mischers $T_e = 150$ K, dann ist die zusätzliche Rauschzahl $F_{z1(T_0)} = 150 / 290 = 0.517$. Der nachfolgende, rauscharme Verstärker habe bei T_0 ein Rauschmaß von $NF_2 = 1.8$ dB. Der lineare Wert daraus $F_2 = 1.513$ und $F_{z2} = F - 1 = 1.513 - 1 = 0.513$. Nach (Gl 17) ist die Gesamtrauschzahl $F_{ges} = F_1 + F_{z2} / Lv_1 = 1.517 + 0.513 * 4 = 3.569$ oder auch $NF = 5.53$ dB. Die Gesamtrauschtemperatur der Kettenschaltung Mischer/Verstärker ist $T_{ges} = 2.568 * 290$ K = 745 K. Aus (Gl 15) kann die Grenzempfindlichkeit berechnet werden.

Beispiel 7.2

Der Gleichlage Schottky-Mischer nach Beispiel 7.1 wird direkt am Parabolspiegel betrieben, der auf einen fernen Stern gerichtet ist und die Rauschtemperatur des Weltraumes von etwa $T = 50$ K „sieht“. Die zusätzliche Rauschzahl bezogen auf die Raumtemperatur ist $F_{z1} = 150$ K / 50 K = 3. Der Verstärker ist auf Umgebungstemperatur T_0 und habe unverändert die Rauschzahl $NF = 1.8$ dB bzw. $F_{z2} = 0.513$. Nach (Gl 18) ist die zusätzliche Gesamtrauschzahl $F_{zges} = F_{z1} + F_{z2} / Lv_1 = 3 + 0.5135 * 4 = 5.052$, die sich im Vergleich zum Beispiel 6.1 wesentlich erhöht hat. Die Gesamtrauschtemperatur ist unverändert $T_{ges} = 150$ K + $0.513 * 4 * 290$ K = 745 K.

Beispiel 7.3

Ein parametrischer Gleichlage-Abwärtsmischer mit reellem Spiegelabschluss hat einen Mischgewinn von etwa 5 dB. Die Rauschtemperatur des Mischers ist ungekühlt $T_m = 65$ K, wenn der Spiegel auf Raumtemperatur liegt, was bei hohen Umsetzungsverhältnissen immer der Fall ist.

Der Verstärker auf der Zwischenfrequenz ist an den Mischer rauschangepasst und hat ein Rauschmaß $NF_0 = 1.7$ dB. Die effektive Rauschtemperatur des Verstärkers ist nach (Gl 12) $T_e = 138.94$ K und die Gesamtrauschtemperatur der Kettenschaltung Mischer/Verstärker $T_{ges} = T_m + T_e / 5dB = 65$ K + 138.94 K / 3.16 = 108.93 K.

Aufwändige, rauscharme, parametrische Systeme haben heute Rauschtemperaturen von wenigen Kelvin.

10. Zusammenfassung

Rauscharme Empfangssysteme sind notwendig um großen Entfernungen zwischen Raumsonden und Bodenstationen überbrücken zu können.

Erdnahe Satelliten haben eine Entfernung von 33000 km mit einer Streckendämpfung von rd. $D = 120$ dB. Deshalb haben LNB's für den Satellitenempfang im 10 GHz Bereich heute ein Rauschmaß von etwa $NF_0 = 0.1$ dB.

Große Entfernungen von einigen Milliarden Kilometern werden mit besonders rauscharmen Systemen und hohen Antennengewinnen der Antennen überbrückt.

Fortsetzung in Teil 2

Dr. Schau, DL3LH
wa-schau@t-online.de
www.heide-holst.de

Literatur auf ham-on-air/AFu-Wiki:

- /1/ Antenne macht die Musik, DL3LH
- /2/ Ströme, Spannungen und Verlustleistungen in Anpassnetzwerken, DL3LH
- /3/ Antennen Tuning I – IV, DL3LH
- /4/ Passive Netzwerke zur Anpassung I - VIII, DL3LH
- /5/ Antennen Messtechnik I - IV, DL3LH
- /6/ Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Karl Küpfmüller, Springer Verlag

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.