

21. Rauschen

Rauschen ist eine spezielle Form statistischer Störungen. Die Intensität wird oft durch die Angabe einer Rauschtemperatur beschrieben. Je nach der Ursache für das Rauschen, gibt es verschiedene Arten.

Thermischen Rauschen (Thermal Noise): Es sind die thermische Schwingungen der Elektronen und Löcher in beispielsweise einem elektrischen Widerstand, die das Rauschen bewirken. Die Temperatur ist dabei für die Intensität des breitbandigen Rauschens entscheidend.

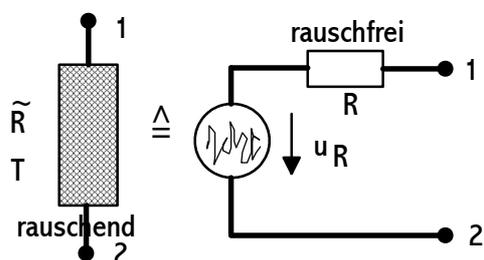
Schrotrauschen (Shot Noise): Der Elektronenstrom im Vakuum einer Röhre ist nicht gleichförmig, sondern besteht aus einer Vielzahl von Stromimpulsen. Es liegt hier eine quantisierter Stromfluß vor. Das Rauschen geschieht durch Emission der Elektronen aus dem Heizdraht der Röhre.

Diverse andere Größen sind: atmosphärisches Rauschen, kosmische Rauschen, Funkelrauschen und Phasenrauschen bei HF-Sendern, Rauschen aus pseudozufälligen Pulfolgen.

Rauschspektren: Das *Weißes Rauschen* ist mit seinem Leistungsspektrum konstant über jeden beliebigen Frequenzbereich. ($k \cdot T$). Das *Rosa (Pink) Rauschen* variiert in seiner Leistungsdichte mit $1/f$ und entspricht damit einem Weißes Rauschen, was durch einen 3dB/Oktave-Filter geleitet wird.

21.1 Rauschdefinitionen

Rauschspannung, Rauschtemperatur und Rauschleistung werden mit drei Grundgleichungen beschrieben. Aus der Grundgleichung für u_R^2 folgt die Rauschspannung.



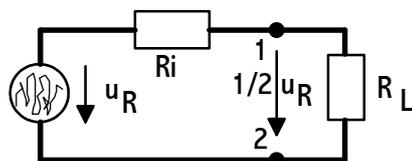
$$\bar{u}_R^2 = 4 * K * T * R * \Delta f * g\left(\frac{h * f}{K * T}\right)$$

$$\text{mit: } g\left(\frac{h * f}{K * T}\right) = \frac{\left(\frac{h * f}{K * T}\right)}{e^{\left(\frac{h * f}{K * T}\right)} - 1} \approx 1 \quad \text{für } \frac{h * f}{K * T} \ll 1 \Rightarrow$$

$$\bar{u}_R^2 = 4 * K * T * R * \Delta f \quad (21.1)$$

$$\hat{u}_{RSS} = 5 * \bar{u}_R \quad (21.2)$$

Die Rauschleistung gilt für den Fall der Anpassung, das heißt, daß die maximale Leistung an der Last anliegt.



$$Z_i \stackrel{!}{=} Z_L \Rightarrow R_i \stackrel{!}{=} R_L$$

$$P_{R_{Last}} = \frac{\bar{u}_R^2}{4R}$$

$$P_R = K * T * \Delta f \quad (21.3)$$

Aus der Gleichung 21.3 läßt sich die allgemeine Formel für die Rauschtemperatur angeben.

$$T = \frac{P_R}{K * \Delta f} \quad (21.4)$$

Die bisher angegebenen Variablen und Konstanten werden im Folgenden vorgestellt. K ist die Boltzmannkonstante und h die Planckkonstante. Die Temperatur T wird in Kelvin [K] angegeben und mit df ist die Bandbreite B des betrachteten Rauschsignals gemeint.

$$K = 1,38 * 10^{-23} \text{ [WS/K]} \quad h = 6,63 * 10^{-34} \text{ [Ws}^2\text{]}$$

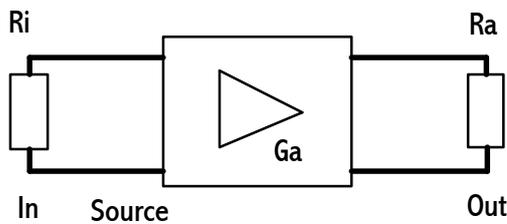
$$df = B = (f_2 - f_1) \text{ [Hz]}$$

$$K \cdot T_0 = 4 \cdot 10^{-21} \text{ [W/Hz]} = -174 \text{ [dBm/Hz]} \text{ (bei 10MHz} \Rightarrow -104\text{dBm)}$$

$$T_0 = 290 \text{ K} = 17^\circ\text{C}$$

T_0 bezeichnet man als die Normalrauschtemperatur, auf die sich bei Messungen und weiteren Definitionen häufig bezogen wird. Allgemein gilt noch $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$.

Für die Vierpolgrößen, bei denen das Rauschen von Vierpolen, wie sie Verstärker aber auch Dämpfungsglieder darstellen, werden die folgenden Betrachtungen angestellt.



Der Rauschfaktor (Noise Factor) F gibt das Signal-Rauschverhältnis des Eingangs zu dem des Ausgangs wieder. Der Faktor S/N wird als Rauschabstand bezeichnet, da er das Verhältnis von der Signalleistung S zu der Rauschleistung (Noise) N angibt.

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_0}{N_0}} \geq 1 \quad (21.5) \quad \text{mit } T_{\text{Signal}} = T_0$$

F in dB wird als Rauschzahl (Noise Figure) bezeichnet und kann alle positiven Werte annehmen. F_Z ist die zusätzliche Rauschzahl.

$$F[\text{dB}] = 10 \log F \quad (21.6)$$

$$F_Z = F - 1 \quad (21.7)$$

Für den Vierpol ist G (G_a) der Gewinn (Gain) und ähnlich wie bei der Dämpfung das Leistungsverhältnis von Ausgang und Eingang.

$$G = \frac{P_{\text{out(Last)}}}{P_{\text{in(Generator)}}} = \frac{S_0}{S_i} \quad (21.8)$$

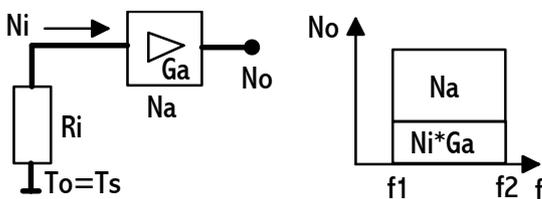
Der Quellenrauschfaktor F_q gibt das Temperaturverhältnis der Quelle zur Normaltemperatur an.

$$F_q = \frac{T_q}{T_0} \quad (21.9)$$

Mit Gleichung 21.8 in 21.5 eingesetzt folgt für F eine vereinfachte Definition.

$$F = \frac{N_0}{N_i \cdot G} \quad (21.10)$$

Die Rauschleistung am Ausgang des Vierpols setzt sich aus dem Zusatzrauschen N_a (added) und dem Eingangsrauschen zusammen. Diese Rauschanteile werden addiert und können dann in die Gleichung 21.10 für den Rauschfaktor eingesetzt werden.



$$N_0 = N_a + N_i \cdot G_a \quad (21.11)$$

$$N_i = K \cdot T_S \cdot \Delta f = K \cdot T_0 \cdot B \quad (21.12)$$

Die Gleichung 21.12 ist aus 21.3 abgeleitet.

$$F = \frac{N_a + K \cdot T_0 \cdot B \cdot G_a}{K \cdot T_0 \cdot B \cdot G_a} \quad (21.13)$$

Als Ersatz für N_a und (+) einem rauschfreien Vierpol ist die effektive Rauschtemperatur eingeführt worden. Es wirken somit am Eingang des Vierpols die Quelltemperatur und T_e . Eingeführt wurde T_e um das Rauschen eines Vierpols oder einer Kettenschaltung als Ersatzgröße an den Eingang zu transformieren und dann die Vierpole als rauschfrei betrachten zu

können. Aus den Gleichungen 21.11 und 21.12 werden in diesem Fall dann die beiden folgenden Formeln.

$$N_a = K * T_e * B * G_a \quad (21.14)$$

$$T_e = \frac{N_a}{K * B * G_a} \quad (21.15)$$

Mit Gleichung 21.15 und 21.13 folgt:

$$F = \frac{T_e + T_0}{T_0} \quad (21.16)$$

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (21.17)$$

$$T_e = T_0 * (F - 1) \quad (21.18)$$

21.15 u. 21.18 =>

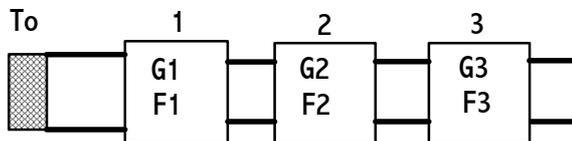
$$N_a = K * T_0 * B * G_a * (F - 1) \quad (21.19)$$

$$21.19 \text{ u. } 21.11 \text{ u. } T_0 = T_s \Rightarrow N_0 = K * T_0 * B * G_a * (F - 1) + K * T_0 * B * G_a \quad (21.20)$$

$$21.18 \text{ u. } 21.20 \Rightarrow N_0 = K * G_a * B * (T_e + T_0) \quad (21.21)$$

aus 21.21 bei $T_e = -T_0 \Rightarrow N_0 = 0$

Eine Kettenschaltung (Kaskade) ist eine Schaltung von Vierpolen hintereinander gereiht mit je Gewinn G_a und Rauschfaktor F_x . Für den Summenrauschfaktor ist der erste Term entscheidend. Hier soll das Rauschen gering und die Verstärkung (Gewinn) groß sein. Eine Verringerung der Bandbreite dient allgemein zur Rauschminderung der Ausgangsstufe.



Hier soll das Rauschen gering und die Verstärkung (Gewinn) groß sein. Eine Verringerung der Bandbreite dient allgemein zur Rauschminderung der Ausgangsstufe.

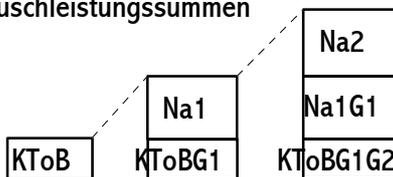
$$G_S = G_1 * G_2 * G_3 * \dots \quad (21.22)$$

$$F_S = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 * G_2} + \dots \quad (21.23) \quad \text{mit } B_{n-1} \geq B_n$$

Beachte für die zweistufige Kaskade mit $B_1 < B_2$ die spezielle Gleichung 21.24.

$$F_S = F_1 + \left(\frac{F_2 - 1}{G_1} * \frac{B_2}{B_1} \right) \quad (21.24) \quad \text{mit } B_1 < B_2$$

Rauschleistungssummen



Auch für die Temperatur gibt es entsprechende Gleichungen.

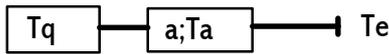
$$T_{eS} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 * G_2} * \dots \quad (21.25)$$

Für eine Rauschtemperaturquelle mit einem Dämpfungsglied gilt für die transformierte Ersatztemperatur mit a ($0 \dots 1$) dem Dämpfungsfaktor die

Gleichung 21.26. $\{10 * \log(a)\}$

$$T_e = T_a + a * (T_q - T_a) \quad (21.26)$$

$$T_e = a * T_q + (1 - a) * T_a \Rightarrow T_e = T_a + 10^{\left(\frac{-A[\text{dB}]}{10}\right)} * (T_q - T_a) \quad (21.27)$$



mit: $a = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ und $T_u = T_a = 296\text{k} (23^\circ\text{C})$

$T_{e(x)}$ ist die vor die Kette (jeden Vierpol) transformierte Ersatztemperatur für die (den) dann rauschfreie (n) Kette (Vierpol). Für die Gleichung 21.27 gilt mit 21.3 die

Formel 21.28.

$$N_0 = a * K * T_q * B + (1 - a) * K * T_a * B = K * B * T_e \quad (21.28)$$

Mit Gleichung 21.10 und $N_i = K T_0 B$ und $G = a$ und $T_a = T_0$ folgt Gleichung 21.29, wobei T_0 rauschende Quelle und Dämpfungsglied ist.

$$F = \frac{1}{a} \Big|_{T_a = T_s = T_0} \quad (21.29)$$

Das Rauschmaß (Noise Measure) wird mit M bezeichnet.

$$M = \frac{(F-1)}{1-\frac{1}{G}} \quad (21.30)$$

Für die Kaskade mit $G = G_x$ und $F = F_x$ gilt für F_s die folgende Gleichung.

$$F_s = 1 + M \quad (21.31)$$

Für die praktischen Messungen besonders mit dem Y-Faktor gelten die nun vorgestellten Meßgleichungen. Grundsätzlich wird bei fast allen Formeln die Betrachtung von Anpassung und Reflexion weggelassen, obwohl dies bei den Rauschleistungsmessungen dann zu erhöhten Fehlern führen kann. Das ENR (Excess-Noise-Ratio) ist der bei Rauschquellen angegebene Wert für die Stärke der Rauschleistung in dB. Er gibt die Differenz von heißer Temperatur T_h (hot) zu der Vergleichstemperatur T_0 (290K) bezogen auf T_0 an.

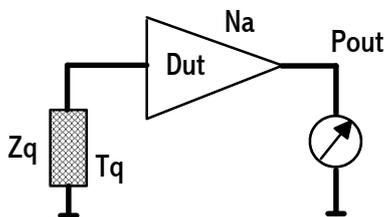
$$ENR = 10 \log \frac{T_h - T_0}{T_0} \quad [\text{dB}] \quad (21.32)$$

$$T_h = \left[10^{\frac{ENR[\text{dB}]}{10}} + 1 \right] * T_0 \quad [\text{k}] \quad (21.33)$$

$$ENR = F[\text{dB}] - 10 \log(Y - 1) \Big|_{T_c = T_0} \quad (21.34)$$

Es gilt: $T_h = T_{on} = \text{hot} \Rightarrow N_2$ und $T_c = T_{off} = \text{cold} \Rightarrow N_1$. In der Praxis ist mit Reflexionen zu rechnen (siehe auch A22??).

$$T_h = T_q * (1 - r^2) \quad (21.35)$$



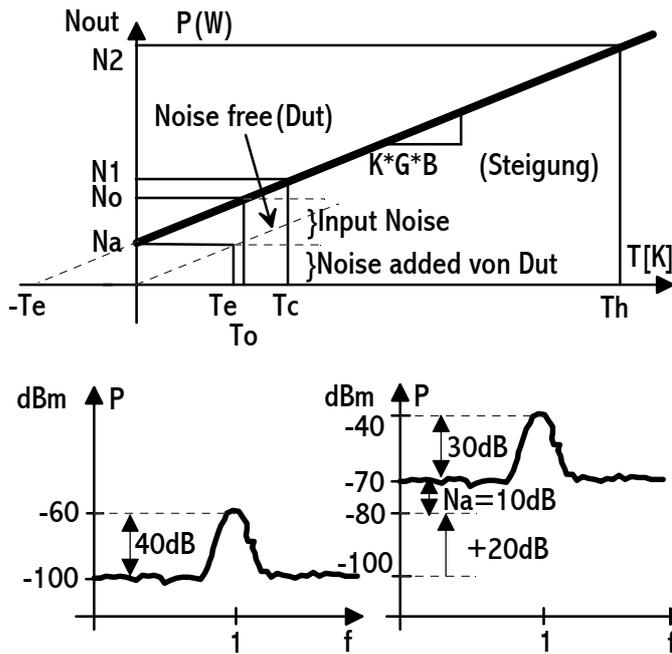
DUT = Device under Test entspricht dem Prüfling. Mit einer Zweipunktmessung kann über die Rauschleistungen, die bei heißer und kalter Temperatur feststellbar sind, der Y-Faktor und so auch der Rauschfaktor bestimmt werden. Dies wird aus der folgenden Abbildung verständlich. Für den Leistungsfaktor Y gilt per Definition die Gleichung 21.36.

$$Y \stackrel{!}{=} \frac{N_2}{N_1} = \frac{K * G * B * (T_h + T_e)}{K * G * B * (T_c + T_e)} \quad (21.36) \quad \text{mit 21.11}$$

Y ist mit den beiden Leistungen N_2 und N_1 bestimmbar. T_h (heiß) zum Beispiel von einer Rauschquelle und T_c (kalt) zum Beispiel die Raumtemperatur (T_0) sind bekannt. Daraus läßt sich dann T_e die Rauschtemperatur des Prüflings bestimmen.

$$T_e = \frac{T_h - Y * T_c}{Y - 1} \quad (21.37)$$

Gleichung 21.37 in 21.16 eingesetzt wird zu 21.38 für F.



$$F = \frac{(\frac{T_h}{T_0}-1)-Y*(\frac{T_c}{T_0}-1)}{Y-1} \quad (21.38)$$

Beispiel: Rauschender Verstärker:

Input: $S_i/N_i = 40\text{dB}$

Gain: $G = 20\text{dB}$

Output: $S_o/N_o = (G*S_i)/(N_a+G*N_i) = 30\text{dB}$

=> $S_i/N_i - S_o/N_o = 10\text{dB} = F[\text{dB}]$

In der zweiten Abbildung auf der linken Hälfte dieser Seite ist der Zusammenhang dargestellt. Zwischen dem linken Bild und dem rechten ist eine Verstärkung von 20 dB dazugekommen.

21.2 Rauschquellen

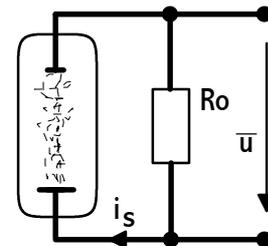
Rauschquellen sind spezielle elektrische technische Einrichtungen, die künstlich eine definierte Rauschtemperatur beziehungsweise Rauschspannung erzeugen. Sie liegt meistens über der Raumtemperatur und sollte ein über die Anwendungszeit stabiles Verhalten haben. Rauschquellen werden zum Teil auch getaktet, also nicht im Dauerbetrieb, angewendet. Die gebräuchlichen werden im Folgenden dargestellt.

Röhrendiode: Eine Röhrendiode wird im Sättigungsbetrieb gefahren. Es handelt sich um eine niederfrequente Rauschquelle. Für den Rauschstrom gilt Gleichung 21.39 und daraus folgt die Rauschleistung 21.40 mit der Elementarladung e [As].

$$i_R^{-2} = 2 * e * i_S * \Delta f \quad (21.39)$$

$$P_R = \frac{e * i_S * \Delta f * R_0}{2} \quad (21.40)$$

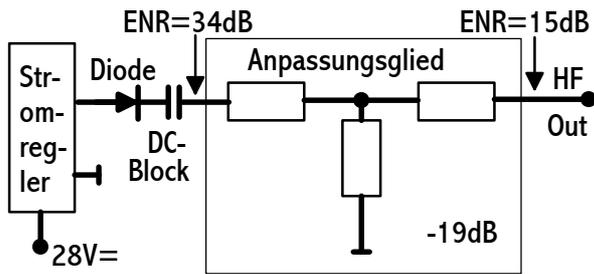
Die Rauschleistung ist proportional zum Heizstrom i_S und daher mit diesem regelbar. Die Formel gilt für das Schrotrauschen; jedoch gibt es Funkelrauschanteile, die durch die Schwankungen des Kathodenstromes bei kleinen Frequenzen hervorgerufen werden.



$$F = \frac{e * i_S * R_0}{2 * K * T_0} \quad (21.41)$$

Beispiel: SKTU von R&S: $i_S = 6,66\text{mA}$ für: $F = 8\text{dB}$
 $i_S = 33,3\text{mA}$ für: $F = 15\text{dB}$ mit $R_0 = 50\text{ Ohm}$
 Unsicherheit: 1 bis 300 Mhz $dF = \pm 0,5\text{dB}$ 300 bis 1000 Mhz $dF = \pm 1\text{dB}$

Halbleiterdiode: Sehr verbreitet, besonders mit koaxialer Anschlußtechnik, wegen ihrer leichten Handbarkeit, dem weiten Frequenzbereich bis 50 GHz und ihrer guten elektrischen Werte, ist die Halbleiterdiode. Es werden von außen 28 Volt Gleichspannung angelegt. Diese speist einen Stromregler (Konstantstromquelle), der der Rauschdiode einen definierten Strom zur Verfügung stellt. Die Diode selbst ein Avalanche-Typ (Lawineneffekt-



Trägerpaardurchschlag) wird im Gegensatz zur Zenerdiode im Durchlaß betrieben. Die Gleichspannung ist bei CW-Betrieb (Continuous-Wave) konstant, kann aber auch im getasteten Modus betrieben werden. Ein DC-Block trennt den Gleichspannungsteil von dem HF-Anpassungsglied. Dies ist ein Dämpfungsglied von etwa 19 dB, das die schlechte Anpassung der

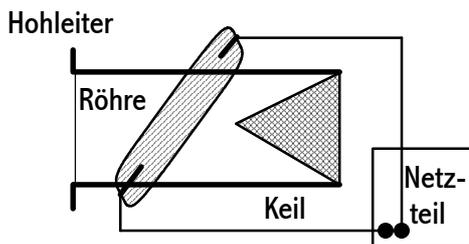
Diode an das 50 Ohm System verbessert. Es gibt auch Rauschquellen, die unter in Kaufnahme der schlechten Anpassung, mit einem ENR von etwa 34 dB ($T_e=730000K$) angeboten werden. Wenn die Diode ausgeschaltet ist, verhält sich die Schaltung wie ein Abschluß auf Raumtemperatur.

Beispiel: Rauschdiode; 10Mhz bis 18 Ghz; ENR=15dB ($T_e=9460K$)

Rauschleistung mit Gl.21.3: $P=KTdf=1,38*10^{-23}*9460*18*10^9 [(Ws*K)/(K*s)] = 2,3*10^{-9} [W] \Rightarrow$ mit Gl.14.8: $P[dBm]=10*\log(P/1mW)=-56,4 dBm$. Bei einer Bandbreite von nur 1Ghz gilt: $P=-68,8dBm$

Für HP 346B gilt: 10Mhz bis 18 Ghz; ENR=(15,2±0,3)dB \Leftrightarrow (-56±4)dBm; Uns. der Messung ±(0,1 bis 0,19)dB; SWR 1,15 bis 1,3; dENR<0,01dB/°C; Im Taktbetrieb: An/Aus 20µs/80µs.

Gasentladungsröhre: Die Säule einer Gasentladung, ionisiertes Gas, gibt ein konstantes Rauschspektrum. Für die Rauschröhre wird eine mit einem speziellen Gas gefüllte kleine Glasröhre, die mit elektrisch Anschlüssen versehen ist, schräg in einem Hohlleiter plaziert. Ein Dämpfungskeil am geschlossenen Ende sorgt für die nötige HF-Anpassung. Die Rauschtemperatur der Röhre ist stark abhängig von der verwendeten Gasart, aber nur geringfügig von dem Gasdruck und dem Entladungsstrom. Zum Betrieb werden spezielle Gleich-Hochspannungsnetzteile gebraucht, die eine Zündspannung von etwa 1,8kV und eine Arbeitsspannung von 100 bis 300 Volt liefern. Der Dauerstrom beträgt zwischen 50 mA und 200mA, je nach Ausführung. Die Röhren sind auch mit 1000 Hz tastbar. Die Lebensdauer von etwa 10 Jahren und die große Langzeitstabilität verbunden mit einem guten Frequenzgang, macht sie ideal als Referenznormal für die Rauschleistung. Die folgende Tabelle gilt einen Überblick über die Rauschgase und deren ENR.



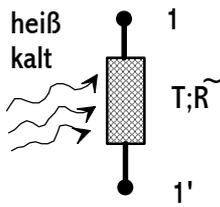
Gas	$T_{e,[K]}$	ENR [dB]
He	29000	20
Ne	25000	19
A	15000	17
Xe	9000	15
Hg	11000	16
N ₂	11500	16

Die Leistungsbetrachtung ergibt bei 100V und 200mA eine Verlustleistung von 20 W. Die

Rauschröhrennormale haben üblicherweise ein ENR von (15,5±0,08) dB.

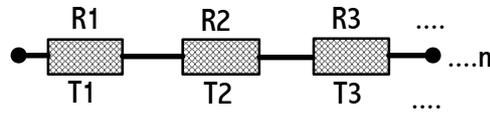
Beispiel: Für eine Leuchtstofflampe, die auch eine Rauschquelle darstellt, gilt: $T_e = 10000 K$ (geschätzt) bei 1Mhz Bandbreite. Mit 21.3 $\Rightarrow P = 1,38*10^{-23}*10000*1*10^6 = 1,38*10^{-13} [W] = -98,6 dBm$

Widerstände: Heiße oder kalte Widerstände die als HF-Abschlüsse mit 50 Ohm ausgebildet sind, dienen als physikalische Rauschquellen. Es wirken T_h und T_c als Temperaturpunkte für eine Zweipunktmessung mit Y-Faktor. Besonders im niederfrequenten Bereich in dem es keine Hohlleiterquellen gibt, werden diese Widerstände als Normale für Präzisionsmessungen eingesetzt. Wenn man sich die obere Abbildung auf Seite 21.5 ansieht fällt auf, daß ein nahes Zusammenliegen der beiden Temperaturpunkte und damit auch der Leistungen N_1 und N_2 , die



korrekte Bestimmung der Gradensteigung erschwert. Dadurch wird auch die Bestimmung des Y-Faktors oder der Rauschtemperatur des Prüflings ungenauer. Genau dies ist bei der Messung mit Widerständen das Hauptproblem, da aus physikalisch Gründen die heiße Temperatur nicht so hoch sein kann. Für die echte kalte Temperatur verwendet man flüssigen Stickstoff

mit 77K und für die heiße Temperatur einen Ofen mit 373K. So sind Rauschmolekularbewegungen bis 100 Ghz zu erzeugen. Für die Reihenschaltung von Widerständen ist Gleichung 21.42 anzuwenden.



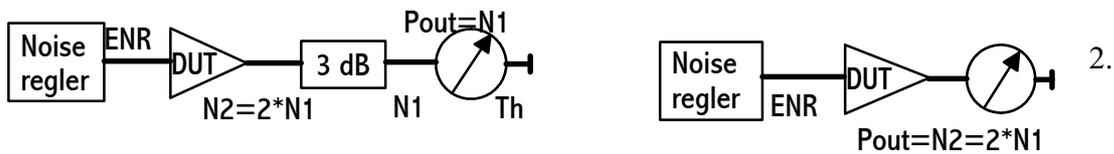
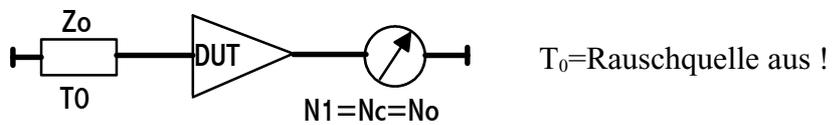
$$T_S = \sum_{n=1}^N \frac{R_n}{R} * T_n \quad (21.42)$$

21.3 Rauschmessverfahren

Es gibt verschiedene Rauschleistungsmessverfahren mit oder ohne Rauschquellen. Mit dem HP Noise-Figure-Meter 8970A ist eine automatische Messung auf dem Y-Faktorverfahren aufbauend möglich. Es wird F des Prüflings (DUT) festgestellt.

3 dB-Methode: Bei der 3dB-Methode wird die Leistungsverdopplung zur Messung verwendet. Hier werden nun zwei Verfahren nebeneinander dargestellt.

Mit 3dB Dämpfungsglied	Mit 2*P _{out}	Schritt
Referenzmessung bei T ₀	Referenzmessung bei T ₀	1.



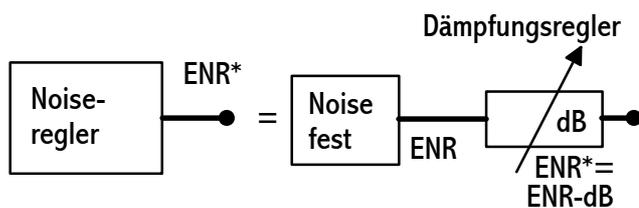
ENR der Rauschquelle so einstellen, daß P_{out}=N₁ entspricht 2*N₁ wegen 3 dB.

ENR der Rauschquelle so einstellen, daß P_{out}=2*N₁=N₂

Mit $Y = \frac{N_2}{N_1} = \frac{2*N_1}{N_1} = 2$ mit $T_c=T_0$ in Gleichung 21.38 folgt: $F = \frac{T_h-T_0}{T_0} \Leftrightarrow$ zu Gleichung 21.32. 3.

Fehlermöglichkeit durch 3 dB-Fehlanpassung.

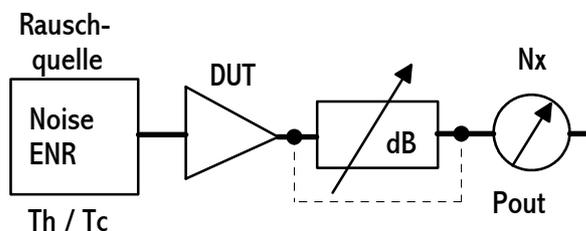
Ungenau wenn Leistungsmesser nicht linear genug ist.



Ein Hauptnachteil der 3dB-2*P_{out}-Methode ist, daß die Messungen lange dauern und so die Bauteile und Umgebungstemperatur während der Messung sehr stabil sein müssen. Es ist keine

Echtzeitmessung möglich. Die 3 dB-Methode ist ein Spezialfall der Y-Faktor-Methode. Eine regelbare Rauschquelle setzt sich aus einer Rauschquelle und einem veränderbaren Dämpfungsglied zusammen.

Y-Faktor-Methode: Bei dieser Methode wird der Leistungsunterschied zwischen ein- und ausgeschalteter fester Rauschquelle direkt gemessen oder durch einen Abschwächer auf den kalten Wert gebracht. Hierzu ist die Abbildung oben auf Seite 21.5 zu beachten. Es wird die Rauschquelle ausgeschaltet, was bedeutet: $T_0=T_c$ und N_1 . Dann wird im eingeschalteten Betrieb gemessen: T_h mit N_2 . Nun gilt, daß Y das Verhältnis der bestimmten Leistungen ist oder bei der Methode mit zusätzlichem Dämpfungsglied, das Dämpfungsverhältnis, um das in der Messung nachgeregelt wurde. Ohne das eingezeichnete Dämpfungsglied zu verwenden, siehe die gestrichelte Gerade, wird Gleichung 21.36 für Y und 21.38 für F mit T_h der Rauschquelle verwendet.



$$Y = \frac{N_2(\text{hei\ss e Leistung})}{N_1(\text{kalte Leistung})} \quad (21.34)$$

Mit dem eingefügten Dämpfungsglied wird dies bei eingeschalteter Rauschquelle (T_h) so lange verstellt, bis wieder $N_2 = N_1$ gilt. Dies entspricht einer HF-Substitution der Leistungen. Der große Vorteil hierbei ist, daß der Detektor im selben Meßbereich arbeitet und daher nur stabil sein muß, aber nicht mit seinen Anzeigefehlern in Erscheinung tritt. Das Dämpfungsglied ist bei dieser Messung entscheidend und geht mit seiner Genauigkeit voll in die Gesamtmeßunsicherheit ein. Mit T_h von der Rauschquelle in Gleichung 21.38 und Beachtung der folgenden Gleichung (x =Dämpfereinstellung).

$$Y = 10^{\left(\frac{x[dB]}{10}\right)} \quad (21.35)$$

Für $T_c = T_0$ gilt mit Gleichung 21.38 die Formel 21.36 und in dB 21.37.

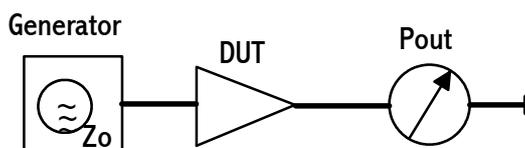
$$F = \frac{\frac{T_h}{T_0} - 1}{Y - 1} \quad (21.36)$$

$$F[dB] = 10 \log\left(\frac{T_h}{T_0} - 1\right) - 10 \log(Y - 1) = ENR_{dB} - 10 \log(Y - 1) \quad (21.37)$$

Signalgeneratormethode: Diese Methode ist heute nicht mehr üblich. Sie wurde angewendet, als es noch keine Rauschquellen gab. Es wird nach der zwei-Punkte-Methode, siehe Abbildung auf Seite 21.5 oben, ein Punkt auf der Graden und deren Steigung bestimmt. Mit Gleichung 21.10 und 21.12 ergibt sich 21.38.

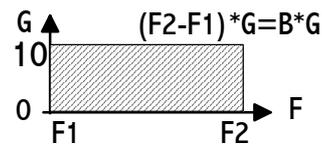
$$F = \frac{N_0}{K * T_0 * B * G} \quad (21.38)$$

Die Messung wird in der Folge so durchgeführt.



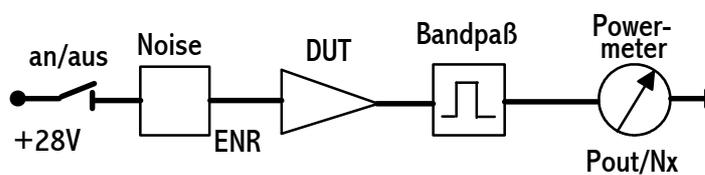
- 1.) N_0 mit Powermeter bei ausgeschaltetem Generator bestimmen ($T_0=T_c$). Dies entspricht dem Punkt N_1 der Graden.
- 2.) Messung der Verstärkung (Gain) G über der Frequenz bei eingeschaltetem Generator. Der Prüfling wird bei einem großen Pegel überprüft.

3.) Es folgt die Berechnung der Steigung: $K \cdot G \cdot B$. Dann für $N_a=0$?? den zweiten Punkt $T_h(N_2)$ und die übliche Berechnung ??.



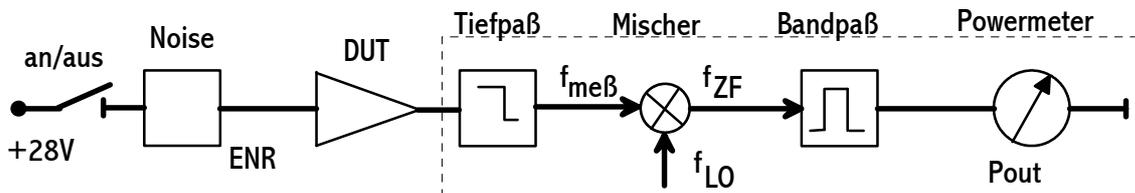
Hot-Cold-Messung: Hierbei wird die Meßtechnik der Y-Faktor-Methode zusammen mit der physikalischen Erzeugung von Rauschen angewendet. Die Messungen sind sehr aufwendig, dauern lange, aber sind zum Kalibrieren die genauesten. Sie sind auch mit dem HP 8970A durchführbar. Hauptnachteil, wie auch schon vorher erwähnt wurde, ist das nahe Beieinanderliegen der Meßtemperaturen zum Beispiel 80K und 380K. Es wird Y in Abhängigkeit von N_x bei den gegebenen Temperaturen T_h und T_c mit Gleichung 21.38 bestimmt.

Direktmessung mit 8970A: Die direkte Rauschmeßmethode verwendet eine Rauschquelle, wie sie der 3dB-Version aber ohne Dämpfungsregelung. Es wird auch der Y-Faktor angewendet.



- 1.) Noise aus $\Rightarrow N_1$
 - 2.) Noise an $\Rightarrow N_2$
- $\Rightarrow Y = (N_2 / N_1) \Rightarrow F$
- In der Praxis muß mit einem Bandpaß gemessen werden, um so das Rauschen bei einer bestimmten Frequenz zu erhalten.

Um in einem ganzen Frequenzband zu messen, muß man eine andere Methode anwenden, da die hier vorgestellte zu umständlich ist. Bei dieser kommt ein Mischverfahren zum Einsatz.



Beispiel: $f_{ZF} = 2\text{GHz}$ mit $f_{LO} = 2$ bis $3,5\text{ GHz} \Rightarrow f_{meß} = 0$ bis $1,5\text{ GHz}$

$$f_{meß} = f_{LO} - f_{ZF} \quad (21.39)$$

21.4 Noise-Figure-Meter (8970)

Das 8970 von HP arbeitet nach dem zuletzt beschriebenen Verfahren mit einer Meßbandbreite von 4Mhz bei 10Mhz bis 1500 Mhz Eingangsruschen. Es ist das Blockschaltbild im Anhang zu beachten. Die technischen Daten lauten: Frequenz: 10 bis 1500 Mhz; Noisemessung: 0 bis 30 dB $\pm 0,1\text{dB}$; Gainmessung: -20 bis +40 dB $\pm 0,15\text{dB}$.

Das *Input Section* besteht aus Tiefpaß, Verstärker und Abschwächer zur Signalselektion. Der Power Detektor dient zur Gesamtverstärkungseinstellungsmessung. Der *first Converter* bildet die Hauptmischstufe um den ganzen Frequenzbereich zu durchfahren. Die Tiefpässe trennen die Oberwellen des Mixers ab. Die Zwischenfrequenz (ZF) beträgt 2050 Mhz. Ein Isolator trennt zur nächsten Stufe. Der *second Converter* mit Bandpaß und Mischer erzeugen eine ZF von 300 Mhz. Schließlich wird das Signal nochmals in der *300Mhz IF-Section* verstärkt und auf eine ZF von 20 Mhz herabgemischt, mit der dann gemessen wird. Die *20Mhz IF-Section* besteht aus zwei Bandpässen mit 4 Mhz 3db-Bandbreite, Verstärkern und Abschwächern für eine Gesamtverstärkung von +40 bis +75 dB. Für die Frequenzkalibrierung

wird LO auf 2050 Mhz gestellt, was einer Eingangsfrequenz von etwa 0 Hz entspricht. Ein spezieller Detektor mißt dann das Maximum. Der *Noise-Power-Detektor* ist eine Leistungsmesser mit DC-Ausgang (det). Für den Anschluß eines externen Leistungsmessers ist der HF-Ausgang (IF) vorgesehen.

Für die Bedienung des 8970A ist das Bild (Nummern) der Frontplatte zu beachten.

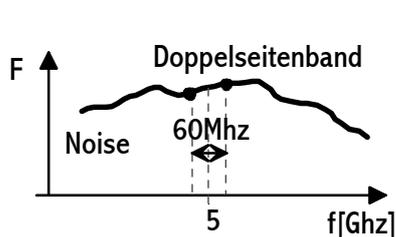
a) Grundbedienung: Power on (2); Preset (1) - Grundeinstellung; Rauschquelle an 28Volt und an den HF Eingang anschließen; ENR-Eingabe der ENR-Werte der verwendeten Rauschquelle in das 8970 eingeben (einmalig), um ein genaues Messen zu ermöglichen. (15,2 dB fest): 1.)ENR (3); 2.)"Frequenz" => Enter; 3.)"ENR-Wert" => Enter; 4.)goto 2.); Ende mit Frequency (6)

b) *Normalmessung*: Zuerst wieder Preset, dann Kalibrierung des Systems ohne Prüfling, das heißt die Rauschquelle befindet sich direkt am Eingang. Frequenzbereichsangabe mit (4) 3-mal und Ziffern (9) und Enter. Danach Calibrate (13) wählen. Die Tasten Smoothing (15) dienen zur Mittelung für eine ruhige Anzeige mit längeren Meßzeiten. Wenn vor der Kalibrierung durchführen. Die Kalibrierung dient dazu das Eigenrauschen des Meßsystems zu bestimmen und abzuspeichern. Mit Noisefigure and Gain (14) wird die eigentliche Messung eingeleitet. Nur mit der Rauschquelle alleine sollten etwa 0 dB angezeigt werden. Mit eingefügtem Prüfling (DUT) kann mit Frequency (6), (9), Enter und dann mit (7), (8) die Verstärkung (Gain) und das Rauschen (Noise) des Prüflings angezeigt werden, je einen Frequenzpunkt. Mit Noise-Figure (12) wird der unkorrigierte Wert angegeben. Das Noise Figure Meter arbeitet mit $T_{\text{cold}} = 296,5 \text{ K}$ ($23,5^\circ\text{C}$) bei Preset. Dieser Wert kann wenn nötig verändert werden.

c) *Mischermessung*: Um das Rauschen bei höheren Frequenzen zu messen, wird mit einem externen Mischer und einem Ghz-Oszillator das Signal auf eine Frequenz herabgemischt, die das 8970 verarbeiten kann. Der Frequenzdurchlauf (Sweep) kann entweder mit dem 8970 oder mit dem externen Local-Oszillator erfolgen.

LO-Sweep: Mit 1.1 und Spezial (11) einzustellen mit nachfolgender Kalibrierung, wie bei der Normalmessung. Mit LO 8672A HP gilt $f_{\text{min}} = 2\text{Ghz}$ und $f_{\text{max}} = 18 \text{ Ghz}$, was den Prüflingsfrequenzen entspricht. Als Frequenz für das 8970 wird eine ZF von 30 Mhz gewählt. Bei Doppelseitenbandmessung beträgt dann der Abstand der beiden Meßprodukte 60 Mhz. Die Messung erfolgt mit Taste 14. Eine 3 dB Korrektur ist nicht nötig. Der 8672A kann über den Bus direkt vom 8970 gesteuert werden.

$$f_{\text{meß}} = f_{\text{LO}} \pm f_{\text{ZF}} (30\text{Mhz}) \quad (21.40)$$

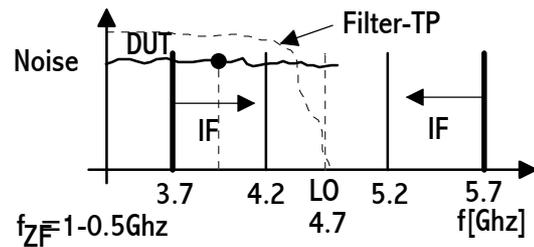


Seitenband	Vorteile:	Nachteile:
DSB	2-18Ghz	nicht 1,5-2Ghz
Doppel..	Keinen Filter	nicht für schmalbandige Prüflinge
	Mixer mit kl. ZF	gr. Eigenrauschen
SSB	Nur mit Filter	Sweep max. 3Ghz
	stark frequenzabhängige DUT	Breitbandmischer!

IF-Sweep: IF-Sweep bedeutet ZF-Sweep und entspricht einem 8970 Frequenzdurchlauf bei fester LO-Frequenz siehe Beispiel in der folgenden Abbildung. Die Messung ist eine SSB-Messung mit Filter (TP) und in der Praxis, wenn nicht nötig, nicht zu empfehlen. Mit 1.2 und Spezial (11) einzuleiten. Die maximale Frequenzdurchlaufspanne beträgt 1.5 Ghz. Die Messung läuft ähnlich wie beim LO-Sweep.

$$f_{\text{meß}|_{\text{TP}}} = f_{\text{LO}}(4.7\text{Ghz}) - f_{\text{ZF}} \quad (21.41)$$

d)Ergänzungen: Mit 1.3 und 1.4 - Spezial Funktion ist die Messung von Mixern als Prüflinge (Gain/Noise) möglich. Der Local-Oszillator sollte -130dBm/Hz Phasenrauschen haben und +10dBm Leistung dem Mixer zur Verfügung stellen (8672A). Das Noise Figure Meter 8970 ist fürs Rauschen besser geeignet, als ein Powermeter oder ein Spektrumanalysator. Es ist auch eine manuelle HOT/Cold-Messung möglich. Verluste von zum Beispiel Adaptern können kompensiert werden (34N).



21.5 Fehlerbetrachtungen

Der größte Unsicherheitsfaktor ist wieder die Fehlanpassung, wie auch bei der Leistungsmessung. Der Gesamtfehler G mit Fehlanpassung liegt bei etwa $\pm 0,24\text{dB}$. Es sind dies Second stage correction + T_c -Unsicherheit + ENR + Anzeige. Adapterverluste müssen kompensiert werden. Der Unsicherheitsterm der Fehlanpassung alleine beträgt schon $\pm 0,15\text{dB}$, kann aber durch Anpassung besonders im Hohlleiterbereich erheblich verringert werden.

$$G = \sqrt{a^2 + b^2 + \dots} \quad (21.42)$$

$$T_E = T_{eff} = T_v * (1 - r_G^2) \quad (21.43)$$

Für die Fehlerbetrachtungen müsse die Berechnungsformel für das Rauschen und seine Zwischengrößen betrachtet werden. Im folgenden Fall soll das Rauschen einer Prüflingsquelle durch Vergleich zu einer Normalquelle und einem Kaltabschluß bestimmt werden. Vor beiden Quellen kann sich eine Adapter befinden und die Reflexionsfaktoren werden in die Unsicherheitsbetrachtungen mit eingeschlossen. Es gelten für die Berechnungen der Meßwerte die Gleichungen 21.44 bis 21.49. Mit A_X ist die Dämpfung eines Adapters vor dem Normal oder Prüfling oder beiden gemeint. Die Gleichungen 22.50 bis 22.56 dienen den Unsicherheitsberechnungen.

$$Y_n = \frac{P_{hn}}{P_{cn}} \quad Y_p = \frac{P_{hp}}{P_{cp}} \quad (21.44)$$

$$T_{hn} = 296 + 10^{\left(\frac{-A_n}{10}\right)} * (T_{hn} - 296) \quad (21.45)$$

$$T_{hp} = \frac{Y_p * (T_{hn} - T_{cp}) + Y_p * Y_n * (T_{cp} - T_{cn}) + Y_n * T_{cn} - T_{hn}}{Y_n - 1} \quad (21.46)$$

$$T_{hp} = \frac{T_{hp} - 296}{10^{\left(\frac{-A_p}{10}\right)}} + 296 \quad (21.47)$$

$$A_X[\text{dB}] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (22.48) \quad 296\text{K} = 23^\circ\text{C}$$

$$ENR_p = 10 * \log\left(\frac{T_{hp}}{T_0} - 1\right) \quad (22.49)$$

Für die Indizes gilt: c=cold(kalt); h=hot(heiß); n=Normal; p=Prüfling; hstd=hot Standardabw. Die Fehlanpassung durch den Reflexionsfaktor ergibt einen Meßunsicherheitsterm bei den

Leistungsmessungen und damit zugleich bei den Y-Faktorbestimmungen. Für den Fehlanpassungsfaktor (Mismatch) gilt mit 18.36 für Z^* (max. Leistung) Gleichung 22.50.

$$M_{X\pm} = \frac{(1-R_x^2)*(1-R_L^2)}{(1\pm R_x^2*R_L^2)} \quad (22.50)$$

$$DP_{MX} = (1 - (\frac{M_{x+}+M_{x-}}{2})) * P_x \quad (22.51)$$

Die Gleichungen 22.50 und 22.51 gelten für x (Normal und Prüfling) und nur für die heiße Messung. R_L ist der Reflexionsfaktor des Meßsystems (Last). Mit der Standardabweichung, die bei der Leistungsmessung ermittelt wird, gilt 22.52 für die Gesamtleistungsunsicherheit.

$$DP_X = \sqrt{DP_{hstd}^2 + DP_{MX}^2} \quad (22.52)$$

Für die Y-Faktorbestimmung werden die folgenden beiden Unsicherheitsterme aus dem totalen Differential bestimmt, die in Gleichung 22.53 (relativ) dann linear addiert werden.

$$DY_X = \sqrt{\left(\frac{1}{P_{hx}}\right)^2 * DP_X^2 + \left(\frac{-1}{P_{cx}}\right)^2 * DP_{cstd}^2} \quad (22.53)$$

Zur Berechnung der Unsicherheit der Temperatur (T_{hp}) auf Grund der Einflüsse der fünf Variablen muß eine totale Differentiation durchgeführt werden. In Gleichung 22.54 werden dann alle Terme zur Gesamttemperaturunsicherheit addiert. DT_{hn} ist die Temperaturunsicherheit des Normals und DT_{cp} bzw. DT_{cn} gilt mit 2K für die kalte Temperatur.

$$DT_{hp}^2 = \left(\frac{Y_p-1}{Y_n-1}\right)^2 * \frac{DT_{hn}^2}{4} + Y_p^2 * \left(\frac{DT_{cp}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Y_n(1-Y_p)}{Y_n-1}\right)^2 * \left(\frac{DT_{cn}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{hn}-T_{cp}+Y_n(T_{cp}-T_{cn})}{Y_n-1}\right)^2 * DY_p^2 +$$

$$+ \left(\frac{Y_p(T_{cp}-T_{hn})+Y_p Y_n(T_{cn}-T_{cp})-Y_n*T_{cn}+T_{hn}}{(Y_n-1)^2} + \frac{Y_p(T_{cp}-T_{cn})+T_{cn}}{Y_n-1}\right)^2 * DY_n^2 \quad [K^2] \quad (22.54)$$

Die Gesamtunsicherheit für das ENR in Verbindung mit der Differentiation von 22.49 ergibt mit einem freien zusätzlichen Term Formel 22.55.

$$DENR_p = 10 * \left[\frac{1}{\left(\frac{T_{hp}}{T_0} - 1\right) * \ln 10 * T_0} \right] * \left[2 * \sqrt{DT_{hp}^2} + \left(\frac{Z_{uns}[\%]}{100} * T_{hp}\right) \right] \quad [dB] \quad (22.55)$$

$$\ln 10 = 2,303$$

Wenn noch eine Adapterkorrektur durchgeführt wird, muß die Adapterunsicherheit (DA) in dB berücksichtigt werden.

$$DENR_p = 2 * \sqrt{\frac{DENR_p^2}{4} + \frac{DA_x^2}{3}} \quad [dB] \quad (22.56)$$