

Fachartikel

Was ist Rauschen?

Was ist Rauschen?

Rauschen - praxisnah und verständlich erklärt

Jedem ist das Rauschen eines Wasserfalls geläufig. Eine unüberschaubare Vielzahl einzelner Tröpfchen prallt aufeinander und in die Tiefe. Die Überlagerung all der praktisch zufällig auftretenden Schallwellen ergibt das charakteristische Geräusch, das ein Kontinuum aller Tonfrequenzen darstellt und vom Infra- bis in das Ultraschallgebiet reicht.

Rauschen ist in verschiedenster Form allgegenwärtig, auch in der Elektronik.

Nimmt man das Geräusch eines Wasserfalls mit einem Mikrophon auf und bildet die entstehende elektrische Spannung mit einem Oszilloskop ab, so erhält man etwa einen Verlauf über der Zeit gemäss Bild 2. Zu einer beliebigen Zeit ist der Wert der Spannung $u(t)$ nicht vorhersagbar. Insofern ist ein völlig stochastischer Vorgang gegeben. Jedoch sind gewisse Eigenschaften des Vorganges sehr wohl feststellbar. Dazu gehören die statistische Verteilung auftretender Frequenzen (Frequenzcharakteristik) sowie der auftretenden Werte von $u(t)$ (Amplitudencharakteristik), schliesslich eventuelle innere Regelmässigkeiten des Signals wie eine Modulation der Amplitude als Folge äusserer Einwirkungen. Solche statistischen Kenngrössen geben ein aussagekräftiges Bild des zugehörigen Rauschvorganges.

Die Brownsche Bewegung zeigt, dass in der Mikrowelt ebenfalls der Zufall regiert:



Bild 1
Rauschender Wasserfall:
Unüberschaubare Vielzahl einzelner Ereignisse und Frequenzen.

Kleine Partikelchen im Wasser oder in der Luft werden von den umherwirbelnden Molekülen in unvorhersehbarer Weise angestossen und ändern ihre Position zufällig im Raum. Eine Messung der Koordinaten über der Zeit würde wieder einen Verlauf, ähnlich wie in Bild 2 dargestellt, ergeben.

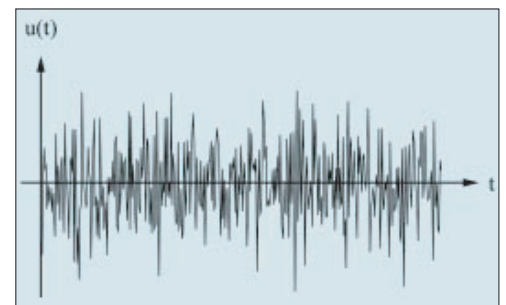


Bild 2
Zeitverlauf eines Zufallsprozesses.

Rauschen in der Elektronik

In verschiedenster Form ist Rauschen praktisch allgegenwärtig, auch in der Elektronik. Es vereitelt das Vorhaben, durch immer höhere Verstärkung beliebig kleine Signale messbar, hörbar oder sichtbar zu machen. Ob die Stereoanlage bei Pianissimo-Stellen ein Restrauschen hören lässt oder ob die Funkübertragung der Bilder von den Voyager-Sonden zur Erde eine mühselige Prozedur im Schneckentempo ist, stets ist der Grund direkt oder indirekt das Rauschen.

Formeln

$$U_r = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B} \quad (1)$$

Dabei ist $k = \text{Boltzmann-Konstante} = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ VAs/K}$
 $T = \text{absolute Temperatur}$
 $B = \text{Messbandbreite in Hz}$

$$I_r = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot (1/R) \cdot B} \quad (2)$$

$$P_r = \frac{1}{4} \cdot U_r \cdot I_r = k \cdot T \cdot B \quad (3)$$

$$k \cdot T = 1,38 \cdot 10^{23} \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{K}} \cdot 290 \text{ K} = 4 \cdot 10^{-21} \frac{\text{W}}{\text{Hz}} \quad (4)$$

$$I_r = \sqrt{2 \cdot e \cdot I \cdot B} \quad (5)$$

Dabei ist $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
 $B = \text{Messbandbreite in Hz}$

$$U_{\text{eff}} \approx 0,2 \cdot U_{\text{SS}} \quad (\text{für Analog-Oszilloskop}) \quad (6)$$

$$U_{\text{eff}} \approx 0,167 \cdot U_{\text{SS}} \quad (\text{für DSO}) \quad (7)$$

$$U_{\text{rausch,gesamt}} = \sqrt{(U_{\text{rausch},1})^2 + (U_{\text{rausch},2})^2 + \dots + (U_{\text{rausch},k})^2} \quad (8)$$

$$B_{\text{rausch}} = \frac{\pi}{2} \cdot B_{\text{signal}} \quad (9)$$

$$B_{\text{rausch}} = \frac{1}{1 + \frac{f_U}{f_0}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot f_0 \quad (10)$$

$$n = \frac{P_{\text{rausch}}}{k \cdot T_0 \cdot B} = F \quad (11)$$

$$F' = 10 \cdot \log(F) \quad (12)$$

$$T_{\text{rausch}} = (F - 1) \cdot T_0 \quad (13)$$

Auch die Digitaltechnik kann dessen Störmöglichkeiten nicht neutralisieren, sondern nur aus Teilbereichen, wie der Erzeugung, Duplizierung und Speicherung von Informationen, weitgehend verdrängen. Wo jedoch Signale erfasst, verstärkt, gemessen und übertragen werden, ist stets dem Rauschen mehr oder weniger Beachtung zu schenken. Es ist Aufgabe des Schaltungsentwicklers, mit angemessenem Aufwand eine möglichst gute Annäherung an die von der Natur gesetzten Grenzen bezüglich Rauschminimierung und damit einen bestmöglichen Signal-Rausch-Abstand zu erzielen.

Ursachen des Rauschens

Nachfolgend werden verschiedene Arten von Rauschen und deren Charakteristik besprochen. Es wird dabei auf einen möglichst grossen Praxisbezug Wert gelegt.

Thermisches Rauschen (auch Johnson- oder Nyquist-Rauschen genannt)

Diese Rauschart tritt infolge der Brownschen Bewegung der Ladungsträger in allen Wirkwiderständen bereits im stromlosen Zustand auf. An den Enden eines Widerstandes R ist eine Leerlauf-Rauschspannung gemäss Formel (1) messbar (siehe Kasten).

Hierbei ist U_r der Effektivwert (RMS) der Rauschspannung, deren Momentanwerte $u_r(t)$ wieder einen Verlauf ähnlich Bild 2 nehmen. Schliesst man die Enden des Widerstandes kurz, so fliesst ein Kurzschluss-Rauschstrom, der sich nach Formel (2) berechnet.

Klemmt man an einen Widerstand R_1 einen als rauschfrei angenommenen gleich grossen Widerstand R_2 an (praktisch realisierbar durch Kühlung von R_2 auf Null Kelvin),

dann empfängt R_2 von R_1 eine Rauschleistung P_r gemäss (3).

Da $R_2 = R_1$ ist, herrscht Leistungsanpassung. Die Grösse kTB ist die maximal verfügbare Rauschleistung eines thermisch rauschenden Widerstandes R . Es ist üblich, für T eine Temperatur von 290 K anzusetzen und die Rauschleistung auf 1 Hz Bandbreite zu beziehen, so dass man eine Rauschleistungsdichte festlegen kann, die sich aus (4) mit $4 \cdot 10^{-21}$ W/Hz ergibt.

Schrotrauschen

Das Schrotrauschen tritt nur dort auf, wo Strom fliesst, jedoch nicht immer. Ursache des Schrotrauschens ist die nicht unendlich kleine Einheit der Elementarladung e . Fliesst Strom durch einen Draht, so bewegen sich die einzelnen Elektronen mit einer gewissen Ordnung und gegenseitiger Abhängigkeit, vergleichbar etwa einer Marschkolonie im Gleichschritt. Die pro Zeiteinheit den Drahtquerschnitt passierende Elektronenanzahl ist konstant, der Stromfluss gleichmässig, und es tritt kein Schrotrauschen auf. Wird ein Drahtwiderstand in den Stromkreis geschaltet, ist an diesem nur die thermische Rauschspannung gemäss Gleichung (1) messbar. Anders ist es, wenn Ladungsträger eine Potentialschwelle überwinden und das mit ihrer kinetischen Energie bewerkstelligen müssen. Diese ist statistisch verteilt. Das Analogon dazu wäre eine grössere Anzahl Spaziergänger, die unabhängig voneinander einen Boulevard in einer Richtung entlang flanieren, jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Das Resultat ist eine geringe Schwankung der Flussdichte um einen Mittelwert. Für einen Gleichstrom I errechnet sich bei Vorliegen der genannten Bedingung (Potentialschwelle) die Grösse des wieder als Effektivwert angegebenen Rauschstromes nach Formel (5).

Typische Beispiele für das Auftreten von Schrotrauschen sind:

- Sperrströme bei Dioden und Transistoren, Bias- und Gateleckströme
- Photostrom und Dunkelstrom bei Photodioden und Vakuum-Photozellen
- Anodenstrom von Hochvakuum-Röhren

Der Strom durch einen in Durchlassrichtung gepolten pn-Übergang, z.B. durch eine Halbleiterdiode, ist für die meisten praktischen Belange (Messung des Stromes im

äusseren Kreis bzw. des Spannungsabfalles an einem von diesem Strom durchflossenen Widerstand) hingegen als frei von Schrotrauschen anzusehen.

Das Schrotrauschen selbst ist gemäss Gleichung (5) temperaturunabhängig. Oft ist jedoch der verursachende Strom I (Bias-Strom, Sperrstrom) stark temperaturabhängig, weshalb durch Kühlung der betreffenden Bauelemente eine deutliche Rauschverringerung erreichbar ist.

Andere Rauscharten

Bei stromdurchflossenen Kohleschichtwiderständen (bei Metallschichtwiderständen wesentlich weniger) tritt ein zusätzliches Rauschen auf, das mit der Stromstärke zunimmt und meist Stromrauschen genannt wird.

Ursache hierfür ist die Zusammensetzung der Widerstandsschichten aus kleinen Partikelchen, zwischen denen beim Stromfluss winzige Potentialunterschiede überwunden werden müssen. Es besteht also eine gewisse Verwandtschaft zum Schrotrauschen. Das Stromrauschen hängt jedoch stark von der Technologie und Qualität bei der Erzeugung der Widerstandsschichten ab und ist bei Drahtwiderständen überhaupt nicht vorhanden. Im Zweifelsfall müssen die Herstellerangaben zugrunde gelegt werden.

In der Praxis ist es daher günstig, an den rauschkritischen Stellen möglichst Metallschichtwiderstände nicht zu kleiner Bauform einzusetzen.

Das Funkelrauschen ist bevorzugt in tieferen Frequenzbereichen (Hz bis kHz) anzutreffen und hat ebenfalls viel mit der Qualität der betreffenden Bauelemente zu tun. Bei Elektronenröhren resultiert es aus langsam veränderlichen Emissionen einzelner Gebiete der geheizten Katode infolge spontaner Umkristallisationen. Bei Halbleitern gibt es verschiedene Ursachen für dieses Phänomen, die bislang nur teilweise erforscht worden sind. Vorausberechnen lässt sich das Funkelrauschen vom Anwender nicht. Es müssen die Datenblattangaben der Hersteller zu Rate gezogen werden. Mitunter lohnt sich eine messtechnische Nachprüfung, weil die Streuungen gegenüber den als typisch angegebenen Werten gelegentlich gross sind. Es gibt weitere Rauschursachen (Popcorn-Rauschen bei Operationsverstärkern, f^2 -

Rauschen bei sehr hohen Frequenzen, Barkhausen-Rauschen bei Spulen und Transformatoren u. a.), jedoch spielen diese in der täglichen Praxis eine geringe Rolle.

Zuletzt wäre noch das Lawinenrauschen zu nennen, das bei Z-Dioden, bei oberhalb ihrer Sperrspannung betriebenen pn-Übergängen, Gasentladungsröhren und Avalanche-Photodioden auftritt. Es hat eine im Vergleich zum fließenden Strom verhältnismässig hohe Intensität, die zudem temperatur- und exemplarabhängig ist.

Eine Konsequenz für die Schaltungsentwicklung besteht darin, stabilisierte Spannungen von Z-Dioden oder Bandgap-Referenzelementen nicht direkt an die Eingänge rauscharmer Verstärkerstufen anzuschliessen, sondern das Lawinenrauschen mittels Kondensator oder Tiefpass zu unterdrücken.

Amplitudencharakteristik

Wie sich aus theoretischen Betrachtungen und aus Messungen ergibt, haben die meisten Rauscharten, darunter das thermische Rauschen und das Schrotrauschen, eine Gaußsche Amplitudenverteilung gemäss Bild 3.

Für die Momentanwerte des Rauschens bestehen Wahrscheinlichkeiten, die für kleine Amplituden höher sind als für grosse. Theoretisch können beliebig hohe Momentanwerte $U(t)$ in positiver oder negativer Richtung auftreten, jedoch ist dies sehr

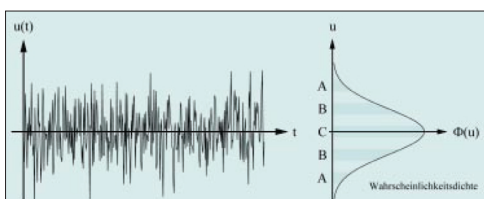


Bild 3:
Amplitudenverteilung von Gaußischem Rauschen.

unwahrscheinlich. So wird sich $U(t)$ häufiger im Intervall C aufhalten als in einem der Intervalle B, und noch seltener wird $U(t)$ in den Intervallen A anzutreffen sein. Integriert man $U(t)$ über eine längere Zeit, so ist das Integral gleich Null, dem Mittelwert oder Erwartungswert dieser Gaußverteilung. Die Standardabweichung δ hingegen entspricht dem Effektivwert (RMS) der Rauschspannung. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich $U(t)$ zu einem beliebigen Zeitpunkt im Intervall $\pm \delta$ aufhält, ist 68,3%. Für

das Intervall $\pm 2\delta$ sind es bereits 95,5%, für $\pm 3\delta$ 99,7% und schon für $\pm 3,1\delta$ ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit über 99,9%.

Messen der Rauschintensität

Rauschintensitäten werden gewöhnlich als Effektivwerte angegeben, so auch in den Gleichungen (1) bis (5). Steht für Messungen kein echter Effektivwertmesser im benötigten Frequenzbereich zur Verfügung, kann auch ein gewöhnliches Wechselspannungsvoltmeter verwendet werden. Zu beachten ist jedoch, dass solche Geräte auf den linearen Mittelwert des gleichgerichteten Signals (Gleichrichtwert) reagieren. Die Skala ist in Effektivwerten kalibriert, was dann aber nur für sinusförmige Signale korrekt ist.

Der Quotient aus Effektivwert und Gleichrichtwert ist für Sinusspannungen und Vollweg-Gleichrichtung 1,11, für gaußverteiltes Rauschen jedoch 1,25. Will man also Rauschspannungen mit einem für Sinussignale kalibrierten Voltmeter richtig messen, so muss man die Anzeigewerte mit dem Korrekturfaktor 1,128 multiplizieren.

Eine bequeme, wenn auch ungenauere Rauschmessung kann oszilloskopisch erfolgen. Bei mittlerer eingestellter Helligkeit wird $U(t)$ dargestellt und visuell die Höhe des Rauschbandes, also der Spitze-Spitze-Wert, geschätzt. Dies ist natürlich etwas willkürlich, da es einen Spitzenwert beim gaußverteilten Rauschen nicht gibt, aber man wird mit der Faustregel (Formel 6):

$$U_{\text{eff}} \approx 0,2 \cdot U_{\text{SS}} \quad (\text{für Analog-Oszilloskope})$$

meist auf etwa 10 bis 20% Genauigkeit kommen, eine für Rauschmessungen ganz akzeptable Präzision. Mathematisch bedeutet Gleichung (6) ein Intervall von $\pm 2,5\delta$, verbunden mit einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Momentanwertes $U(t)$ von ca. 99%.

Bei der Verwendung digitaler Speicher-Oszilloskope (DSO) hat sich die Beziehung gemäss Formel (7) bewährt:

$$U_{\text{eff}} \approx 0,167 \cdot U_{\text{SS}} \quad (\text{für DSO})$$

Der Grund für diese Abweichung ist, dass bei einem DSO auch die seltener erreichten Amplitudenwerte wegen der Speicherung beliebig lange dargestellt werden und nicht der Gewichtung infolge der begrenzten

Nachleuchtdauer des Schirmmaterials unterliegen wie bei den Analog-Oszilloskopen. Man schätzt daher den Spitze-Spitze-Wert grösser, was durch den etwas kleineren Faktor wieder kompensiert wird.

Frequenzcharakteristik

Das zumeist relevante thermische Rauschen und das Schrotrauschen haben von Natur aus eine konstante Leistungsdichte über die Frequenz, d.h. in jedem gleichgrossen Intervall auf der Frequenzachse ist eine gleich grosse Rauschleistung enthalten. Man spricht dann von weissem Rauschen (Bild 4). Betrachtet man statt der Rauschleistung die Rauschspannung oder den Rauschstrom, so folgt wegen $P \sim U^2$ bzw. $P \sim I^2$ die Tatsache, dass in einem n -fach grösseren Frequenzintervall die n -fache Rauschleistung, jedoch nur die \sqrt{n} -fache Rauschspannung bzw. der \sqrt{n} -fache Rauschstrom vorhanden ist.

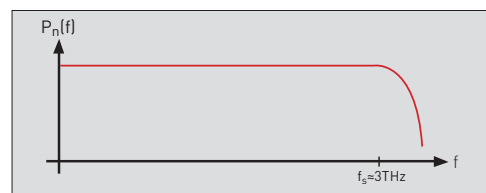


Bild 4
Rauschdichte für weisses Rauschen.

Die gestrichelte Fortsetzung der Geraden deutet an, dass bei extrem hohen Frequenzen (THz-Bereich) ein Abfall der Rauschdichte einsetzt, was durch die Quantentheorie erklärt wird, in der Elektronik-Praxis aber keine Rolle spielt. Aus den Gleichungen (1) bis (5) und dem oben Gesagten folgt auch die wichtige Regel, dass bei der Zusammenführung verschiedener und damit nicht korrelierter Rauschquellen sich die Rauschleistungen linear addieren, die Rauschspannungen bzw. -ströme jedoch nur geometrisch (pythagoräisch, gemäss Formel [8]).

Rauschbandbreite

Im Zusammenhang mit dem weissen Rauschen ist auch der Begriff der Rauschbandbreite von Bedeutung (siehe Bilder 5a und b).

In Bild 5a ist der Amplitudenfrequenzgang eines Tiefpasses dargestellt. Als Bandbreite wird meist die 3-dB-Grenzfrequenz definiert. Wird diesem Tiefpass weisses Rauschen zugeführt, so passieren ihn auch Frequenzanteile oberhalb f_0 (schraffiert, II).

Dagegen werden Anteile unterhalb f_0 (schraffiert, I) bereits unterdrückt. Bei einem idealen Tiefpass (Bild 5b) wären solche Betrachtungen überflüssig. Für den realen Tiefpass ist die Rauschbandbreite f'_0 , diejenige Bandbreite, die ein idealer Tiefpass haben müsste, um bei Zufuhr weissen Rauschens am Ausgang dieselbe Rauschleistung aufzuweisen wie der reale Tiefpass mit der Signalbandbreite f_0 . Rausch- und Signalbandbreite sind nicht identisch. Für einen Tiefpass 1. Ordnung (einfaches RC-Glied) gilt beispielsweise Formel (9) mit:

$$B_{\text{Rausch}} = (\pi/2) \cdot B_{\text{Signal}}$$

Für einen einfachen Bandpass, bestehend aus Tiefpass 1. Ordnung (mit Grenzfrequenz f_0) und Hochpass 1. Ordnung (mit der unteren Grenzfrequenz f_U), gilt die Beziehung gemäss Formel (10).

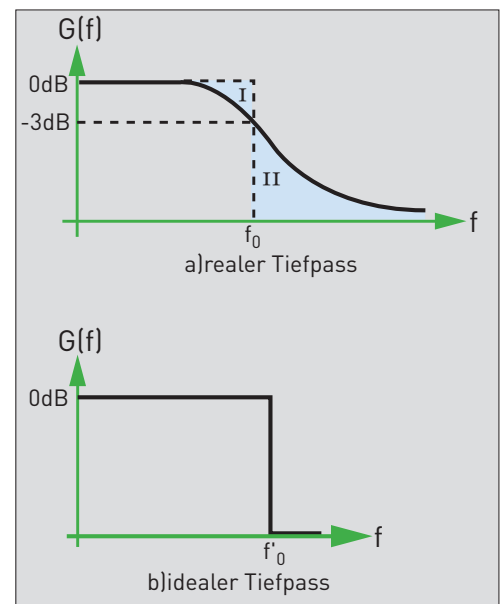


Bild 5
Rausch- und Signalbandbreite eines realen und eines idealen Tiefpasses.

Für Filter höherer Ordnung mit entsprechend steileren Flanken nähern sich die Verhältnisse zunehmend dem Idealfall (Bild 5b), Rausch- und Signalbandbreite fallen immer weiter zusammen. Die hier geschilderten Zusammenhänge müssen in Berechnungen und Messungen mitunter berücksichtigt werden, ansonsten macht man Fehler von bis zu 57%. Bei Rauschmessungen mit Hilfe eines Rauschgenerators braucht man derlei jedoch nicht zu berücksichtigen, da es sich um Vergleichs-

messungen handelt und die entstehenden Fehler sich herauskürzen.

Rosa Rauschen

Neben dem weissen Rauschen gibt es noch das rosa Rauschen (Bild 6), bei dem die tieferen Frequenzen bevorzugt auftreten.

Das rosa Rauschen ist für Zwecke der Akustik interessant, denn hier ist für Messungen oftmals ein Rauschsignal erwünscht, das gleiche Leistung nicht pro absolutem Frequenzintervall (in Hz) enthält, sondern pro relativem Frequenzintervall (Oktave oder Terz). Um dies zu erreichen, muss die Rauschdichte mit der Frequenz abnehmen, wie in Bild 6 angedeutet. Technisch wird rosa Rauschen durch Frequenzgangfilterung aus weissem Rauschen erzeugt. Man bezeichnet es auch als $1/f$ -Rauschen. Das im Abschnitt über die Ursachen des Rauschens erwähnte Funkelrauschen weist oftmals ebenfalls eine $1/f$ -Charakteristik auf, jedoch gibt es mitunter Abweichungen, d.h. steilere oder flachere

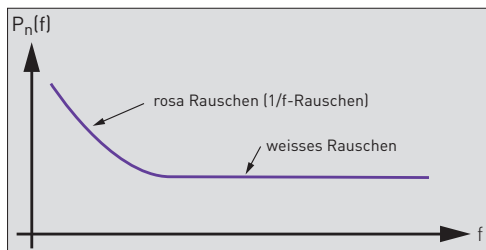


Bild 6:
Rauschdichten für rosa Rauschen (beide Scalen logarithmisch).

Anstiege. Die naheliegende Frage, ob beim $1/f$ -Rauschen für die Frequenz Null (Gleichspannung) beliebig hohe Amplituden auftreten, lässt sich aus mathematischen und physikalischen Gründen verneinen. Für Spezialanwendungen werden aus dem weissen Rauschen eines Generators durch Frequenzfilterung auch andere Testsignale erzeugt, z.B. f^2 – oder Dreiecksrauschen für Messungen in der UKW-FM-Technik oder auch Rauschen mit Frequenzgangverläufen, die der Hörempfindlichkeit des menschlichen Ohres angepasst sind.

Rauschmessungen in der HF-Technik

Man kann das Rauschen einer HF-Baugruppe, z.B. eines Verstärkers, wie folgt messen: Dem Ausgang der Baugruppe

werden ein Bandpass entsprechend dem interessierenden Frequenzbereich sowie ein Effektivwertmesser nachgeschaltet. Das Ausgangsrauschen wird gemessen und mittels Division durch die Verstärkung in ein äquivalentes Eingangsrauschen umgerechnet. Das heisst, es wird fiktiv angenommen, alle Rauschquellen der Baugruppe seien in konzentrierter Form an deren Eingang versammelt und die restliche Baugruppe sei rauschfrei. Dieses Eingangsrauschen entspricht dann der Amplitude, die ein eingangsseitiges Nutzsignal haben müsste, um gerade einen Signal Rausch-Abstand von 1 (entsprechend 0 dB) zu erzeugen.

Diesen Wert bezeichnet man auch als Grenzempsfindlichkeit.

Man sieht sofort, dass für korrekte Messungen mehrere Parameter bekannt sein müssen: Die Empfindlichkeit des Effektivwertmessers, die Rauschbandbreite des Bandpasses (und gegebenenfalls noch dessen Verstärkung) sowie die Verstärkung der Baugruppe. Um die damit verbundene Möglichkeit sich addierender Fehler zu vermeiden, haben sich einfachere Methoden eingebürgert, deren Grundform nachfolgend beschrieben ist.

Messung mit Rauschgenerator

Man gibt auf den Eingang der Baugruppe ein Rauschen definierter Intensität, indem man einen kalibrierten Rauschgenerator anschliesst. Dieser ist zunächst ausgeschaltet. Mit der oben genannten Messanordnung stellt man am Effektivwertmesser eine gewisse Anzeige der Ausgangsrauschleistung fest, deren Absolutwert uninteressant ist.

Jetzt wird der Rauschgenerator eingeschaltet und sein Pegel so justiert, dass am Messgerät die doppelte Rauschleistung bzw. die $\sqrt{2}$ -fache Rauschspannung angezeigt wird. Da die Rauschbeiträge von Baugruppe und Rauschgenerator unkorreliert sind, addieren sich ihre Rauschleistungen linear, und die gesuchte äquivalente Eingangsrauschleistung der Baugruppe ist somit gleich der am Generator eingestellten Ausgangsrauschleistung. Die Vorteile dieser Methodesind klar: Statt des Effektivwertmessers kann ein gewöhnliches HF-Messgerät eingesetzt werden, die Verstärkungen von Baugruppe und Bandpass sowie die Rauschbandbreite brauchen

nicht mehr bekannt zu sein, da sich alle diese Grössen herauskürzen. Man benötigt lediglich einen kalibrierten Rauschgenerator, der im zu messenden Frequenzbereich ein weisses Rauschen einstellbarer Intensität abgibt. Dieses sollte sich über einen möglichst grossen Frequenzbereich erstrecken, damit man für alle Anforderungen gerüstet ist.

Gebräuchliche Rauschparameter

$k \cdot T_0$ -Einheit und Rauschzahl
 Wie aus den Gleichungen (3) und (4) ersichtlich, ist die Rauschleistung, die ein idealer (rauschfreier) Empfänger vom Quellwiderstand R_1 eines Generators empfangen kann, gleich $k \cdot T_0 \cdot B$. In Bild 7 ist G ein Signal- oder Rauschgenerator, Z_w ist der Wellenwiderstand des Verbindungskabels und R_2 ist der Eingangswiderstand des Empfängers, meist ist das kein gegenständlicher Widerstand. In der HF-Technik ist es zur Vermeidung von Reflexionen durch Fehlanpassung notwendig, dass $R_1 = Z_w = R_2$ ist. Z_w ist meist 50Ω , in der Videotechnik hat man sich auf 75Ω festgelegt, in der UKW-Technik sind ferner noch 60Ω sowie 240Ω gebräuchlich. Wie zuvor beschrieben, wird zunächst der Generator ausgeschaltet (gedanklich wird G in Abbildung 7 vorübergehend durch einen Kurzschluss ersetzt). Der Empfänger erhält nun von R_1 eine Rauschleistung von kT_0B . Anschliessend wird der Rauschgenerator nach Erfordernis (Rauschleistungsverdopplung am Empfängerausgang) eingestellt und führt nun dem Empfänger zusätzlich zu kT_0B eine Rauschleistung P_{rausch} zu. Diese wird am Generator abgelesen und ins Verhältnis zur Einheit kT_0B gesetzt (Formel 11).

Der Faktor n bzw. die Rauschzahl F ist also die Anzahl an zusätzlichen kT_0 -Einheiten, die einem Empfängereingang zugeführt werden müssen, um am Empfängerausgang eine Rauschleistungsverdopplung (Erhöhung um 3 dB) zu erzielen. Für einen rauschfreien Idealempfänger wäre $F = 1$.

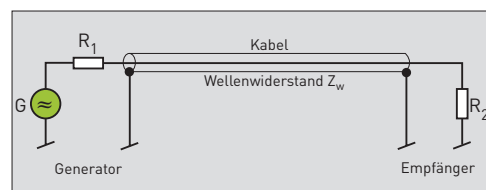


Bild 7
 Anschluss eines HF-Empfängers an einen Generator.

Das Rauschmass (noise figure)

Das Rauschmass, oft mit F^* oder F' bezeichnet, ist definiert in Formel 12 zu:

$$F = 10 \cdot \log(F)$$

Der rauschfreie Idealempfänger hat also ein Rauschmass von $F' = 0$ dB.

Die Rausch-Temperatur

Anstatt bei der zuvor beschriebenen Messprozedur den Rauschgenerator G (Bild 7) einzuschalten, wäre es auch möglich, R_1 zu erwärmen. Gemäss Gleichung (3) würde die von R_1 an R_2 gelieferte Rauschleistung proportional zur Kelvin-Temperatur ansteigen. Die gegenüber der Referenztemperatur von 290 K nötige Temperaturerhöhung von R_1 zur Rauschleistungsverdopplung am Empfängerausgang, abzüglich 290 K , bezeichnet man Eingangsausgangstemperatur des Empfängers. Es gilt also auch Gleichung (13):

$$T_{\text{rausch}} = (F - 1) \cdot T_0$$

Der rauschfreie Idealempfänger hat eine Rauschtemperatur von 0 K . Diese ist eine reine Rechengrösse und keinesfalls etwa mit der realen Temperatur identisch, auf der sich der Empfänger befindet. Die Rauschtemperatur kann durchaus kleiner sein als die reale Temperatur, allerdings bei nicht optimalen Empfängern auch sehr viel höher.

Rauschmessungen in der NF-Technik

Während es im HF-Bereich aus technischen Gründen (einheitlicher Wellenwiderstand innerhalb einer Anlage) üblich ist, mit Leistungen zu rechnen, ist im NF-Bereich aus genau den umgekehrten Gründen (verschiedene Ein- und Ausgangswiderstände von Baugruppen, statt Leistungsanpassung oft Spannungsanpassung) vorwiegend gebräuchlich, mit Spannungen oder Strömen zu rechnen. Passend dazu wird die Grenzempfindlichkeit von Verstärkern usw. mit äquivalenten Eingangsausgangsspannungen (in $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$) oder Eingangsausgangsströmen (in $\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$) beschrieben. Dies sei anhand von zwei Beispielen erläutert.

Eingangsausgangsspannung

Der Eingangswiderstand des in Bild 8 dargestellten Elektrometer-Verstärkers ist sehr hoch, theoretisch unendlich, und auf

jeden Fall wesentlich grösser als der Innenwiderstand der eingangsseitig anzuschliessenden Quelle. Eine Eingangsleistung ist für diese Schaltung also kaum sinnvoll definierbar. Um die rauschbegrenzte Empfindlichkeit anzugeben, muss man die äquivalente Eingangsrauschspannung ermitteln.

Der dazu nötige Messaufbau ist ganz ähnlich wie in der HF-Technik. Ausgangsseitig werden ein Bandpass für den interessierenden Frequenzbereich und ein Wechselspannungsmessgerät angeschlossen.

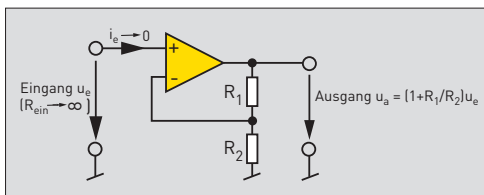


Bild 8
Spannungsverstärker mit Operationsverstärker.

Der Eingang der Schaltung wird mit dem Rauschgenerator verbunden. Dessen Quellwiderstand, z.B. 50 Ω , ist im Vergleich zum Eingangswiderstand der Schaltung praktisch als Kurzschluss aufzufassen. Für diese Messung interessiert das Generatorrauschen nicht in den für HF typischen kT_0 -Einheiten, sondern in der Dimension $V/\sqrt{\text{Hz}}$.

Zunächst wird wieder das Ausgangsrauschen der Schaltung bei ausgeschaltetem Generator gemessen, danach der Generator eingeschaltet und so justiert, dass die Rauschspannung am Ausgang der Schaltung sich um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht. Die eingestellte Rauschspannungsdichte am Generator ist dann gleich der äquivalenten Eingangsrauschspannungsdichte der Schaltung.

Eingangsrauschstrom

Diese Schaltung in Bild 9 ist zur Verarbeitung von Eingangsströmen z.B. von Photodioden ausgelegt. Die Eingangsgrösse ist hier nicht die Spannung (im Idealfall ist die Eingangsspannung und damit auch die Eingangsleistung Null), sondern der Strom. Damit ist das auf den Eingang der Schaltung bezogene Rauschen zweckmässig in $A/\sqrt{\text{Hz}}$ anzugeben. Die Messung erfolgt wie zuvor beschrieben, lediglich durch die Verwendung

eines Hilfswiderstandes R_H . Dadurch wird aus der Ausgangsrauschspannung des Generators ein Ausgangsrauschstrom erzeugt.

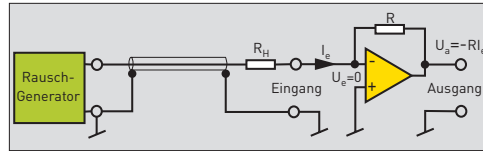


Bild 9
Stromspannungs-Wandler mit Operationsverstärker.

Einige Regeln sind zu beachten, um Messfehler zu minimieren:

- R_H sollte vom Ende des Koaxialkabels auf möglichst kurzem Weg mit dem Schaltungseingang verbunden werden.
- R_H muss recht gross gewählt werden, so dass sein eigener Rauschstrom gemäss Gleichung (2) möglichst vernachlässigbar gegenüber dem zu erwartenden Eingangsrauschstrom der Schaltung ist. Dies ist automatisch erfüllt, wenn R_H mindestens 10 mal grösser als R gewählt wird.
- Andererseits darf R_H nicht zu gross gewählt werden, denn jeder Widerstand hat eine bauformabhängige Streukapazität von ca. 0,1 bis 0,5 pF. Diese bildet bei höheren Messfrequenzen einen kapazitiven Nebenschluss zu R_H und verfälscht die Messung. Zwischen den beiden gegensätzlichen Regeln muss durch vorherige Überschlagsrechnung ein Kompromisswert für R_H gefunden werden.