

VI Das Rauschen

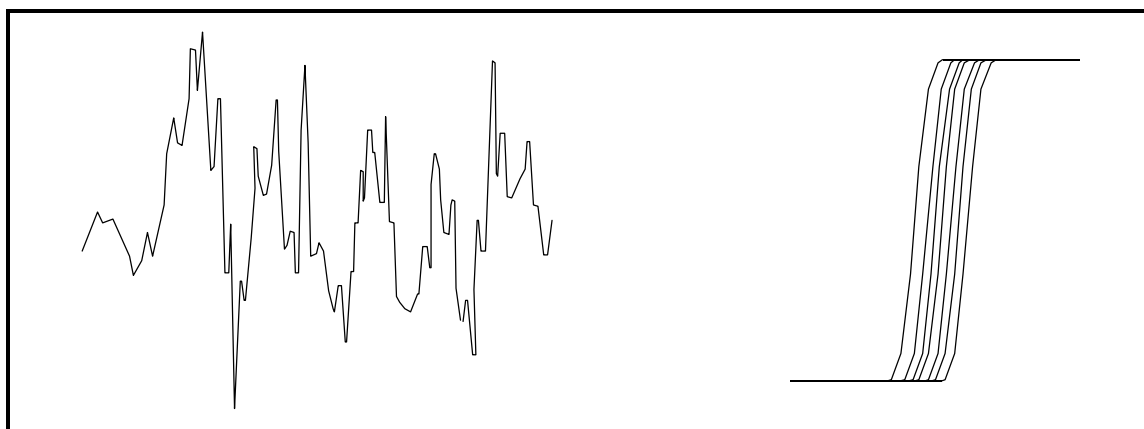


Abb. 6-1: Amplitudenrauschen und Jitter

VI.1 Rauschen und Nutzsignal

Rauschen ist ein breitbandiges Signal mit einem völlig zufallsbedingtem Spannungsverlauf. Wegen des Fehlens jeglicher Gesetzmäßigkeit kann das einem Nutzsignal beigemischte Rauschen aus dem Frequenzbereich des Nutzsignals nicht mehr herausgefiltert werden. Dadurch kann der Anteil des Rauschens an einem Signal bei jeder Verarbeitung nur zunehmen oder bleibt im Idealfall gleich.

Das Maß für den Rauschanteil in einem Signal ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR = Signal to Noise Ratio), das durch den Quotienten definiert ist:

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signal} + \text{Rauschen}}{\text{Rauschen}}$$

Zur Bestimmung mißt man das verrauschte Signal und bei abgeschaltetem Signal das Rauschen allein.

Messungen von Rauschspannungen oder verrauschten Signalen dürfen nur mit Meßgeräten erfolgen, welche den Effektivwert der Spannung bzw. des Stroms bestimmen. Nur so werden die schmalen, hohen Spitzen kor-

rekt erfaßt. Die 3 Buchstaben rms = Root-Mean-Square stehen für die Rechenoperationen zur Ermittlung des Effektivwerts. Zuerst berechnet man aus der Spannung die Leistung, mittelt diese dann und rechnet sie in Spannung zurück. Der Effektivwert ist damit die Wurzel aus dem zeitlichen Mittelwert der quadrierten Spannungswerte.

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\overline{U^2}}$$

Meßgeräte für den echten Effektivwert sind oft mit trms (True Root Mean Square) beschriftet. Sofern nicht ausdrücklich anders erwähnt sind Spannungs- oder Stromangaben von Wechselsignalen immer die Effektivwerte.

Ein wichtiger Begriff bei allen Wechselspannungssignalen ist der Crestfaktor. Er ist der gleich der Maximalamplitude des Signals geteilt durch den Effektivwert. Jedem bekannt ist der Crestfaktor $\sqrt{2}$ der Sinuswelle. Beim Rauschen kann man keinen Crestfaktor angeben, sondern eine Liste der zeitlichen Wahrscheinlichkeiten, daß ein Crestfaktor überschritten wird. Die nachfolgende Liste gilt für weißes Rauschen, das alle

Frequenzen mit gleicher Amplitude enthält.

Amplitudenverteilung von weißem Rauschen

Crestfaktor	Wahrscheinlichkeit
1	32 %
2	4,8 %
3	0,37 %
3,3	0,1 %
3,9	0,01 %
4	63 ppm
4,4	10 ppm
4,9	1 ppm
6	$2 \cdot 10^{-9}$

Für einen Fehler von 1% muß ein Meßgerät Crest-Faktoren bis 5 korrekt verarbeiten können. Deshalb hat man für die Praxis den Crestfaktor von weißem Rauschen (willkürlich) auf 5 festgelegt.

Die Spannungspegel digitaler Signale werden in jedem Gatter regeneriert, wodurch kein Amplitudenrauschen auftreten kann. Die Umschaltflanke eines digitalen Signals hat jedoch immer eine endliche Anstiegszeit. Während der Flanke kann überlagertes Amplitudenrauschen zu kleinen Zeitverschiebungen beim Überschreiten der Umschaltchwelle führen. Der Umschaltzeitpunkt des Ausgangssignals eines Gatters variiert damit zeitlich etwas gegenüber dem Eingangssignal. Dieses Rauschen im Zeitbereich wird als Jitter (Bibbern) bezeichnet.

VI.2 Rauscharten

Nach ihren Eigenschaften unterscheidet man 3 Arten von Rauschen:

Weißes Rauschen ist frequenzunabhängig und tritt im Bereich von 0 Hz bis ca. 100 THz auf. Die Bezeichnung "weiß" wird von weißem Licht über-

nommen, das alle Frequenzen des optischen Spektrums in gleicher Stärke enthält.

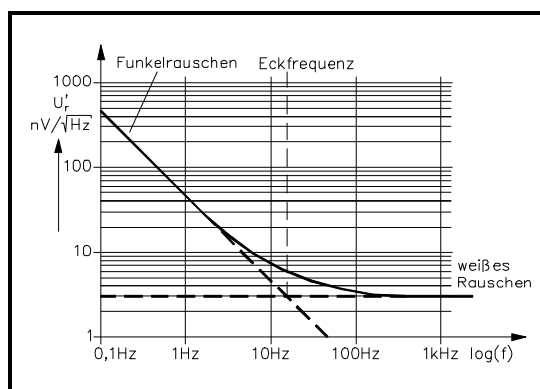


Abb. 6-2: Spektren von weißem und Funkelrauschen

Funkelrauschen hat eine proportional zu $1/f$ verlaufende spektrale Dichte. Oberhalb von etwa 100 Hz wird das Funkelrauschen vom weißen Rauschen völlig verdeckt. Viele natürliche Vorgänge wie Meeresbrandung, Wind, Wasserfälle, turbulente Strömung etc. sind Funkelrauschen. Elektrisch tritt es in allen aktiven Bauelementen (Transistor, IC, Röhre) auf. Die weltweit standardisierte Angabe der Rauschspannung im Frequenzbereich von 0,1 Hz - 10 Hz dient zur Erfassung des Funkelrauschens.

Abb. 6-2 zeigt den Verlauf der Spannungsdichte von weißem und von Funkelrauschen. Die Eckfrequenz liegt am Schnittpunkt beider Verläufe. Sie wird bei rauscharmen Verstärkern oft angegeben und sollte möglichst niedrig liegen.

Die Frage, was mit dem Funkelrauschen bei Gleichspannung (Frequenz = 0) passiert sei kurzerhand damit beantwortet, daß es $f=0$ nicht gibt. Messe ich 1 Stunde lang, so ist die niedrigste vorkommende Frequenz 0,28 mHz. Die Gesamtspannung des

Funkelrauschens als Integral von der kleinsten Signalfrequenz bis zur Eckfrequenz bleibt damit immer endlich.

Das Stoßrauschen (englisch: Pop-corn-noise) besteht aus kleinen, ruckartigen Verlagerungen des Gleichspannungspegels, die sich dem "normalen" Rauschen überlagern. Es scheint von Kristallfehlern in aktiven Bauelementen herzurühren, denn mit großer Sorgfalt hergestellte Bauelemente zeigen es nicht. Dem Stoßrauschen kann kein definierter Frequenzverlauf zugeordnet werden.

Das Schrotrauschen hat den Frequenzverlauf von weißem Rauschen. Es entsteht durch der Bewegung der Ladungsträger beim Stromfluß durch einen Leiter. Man kann es mit dem Aufprallen von Schrotkörnern auf ein Blech vergleichen.

Rauschen in elektronischen Bauelementen entsteht durch Bewegung von Ladungsträgern. Auch ohne Stromfluß verursacht die Brownsche Molekularbewegung das Widerstandsrauschen, das nur an Wirkwiderständen in Erscheinung tritt. Ideale Induktivitäten und Kapazitäten sind rauschfrei. Nur die ohmschen Verlustwiderstände realer Spulen und Kondensatoren tragen zum Rauschen bei.

VI.3 Erzeugung von Rauschen

Für Meßzwecke benötigt man reproduzierbare Rauschsignale. Man unterscheidet dabei Zufallsrauschen (random noise), das durch einen stochastischen (zufälligen) Prozeß entsteht. Pseudorandom Noise (PN) wird dagegen digital erzeugt und weist dadurch absolute Reproduzierbarkeit auf.

Zufallsrauschen, Random Noise

Zufallsrauschen kann nur mit Zufallsprozessen erzeugt werden. Es ist frequenzunabhängig mit völlig kontinuierlichem Spektrum und hat die in der Liste angegebene Amplitudenverteilung. Zur Erzeugung nutzt man das sehr breitbandige weiße Schrotrauschen bei Stromfluß durch Vakuumdioden oder die Rauschspannung von im Glüheinsatz betriebenen Glühlampen. Beide liefern nur leider nur geringe Amplituden.

Relativ hohe Rauschamplituden liefern im Durchbruch betriebene Zenerdioden.

Pseudorandom Noise (PN)

PN wird mit rückgekoppelten Schieberegistern mit N Bits erzeugt. Dabei werden das höchstwertige und die Anzapfung eines Schieberegisters über ein Exklusiv ODER Gatter auf den Eingang zurückgeführt. Unten sind Beispiele für die maximal $2^N - 1$ Zustände angegeben, der Zustand 0 kann nicht vorkommen. Das binäre Rauschsignal ist bis etwa 25% der Taktfrequenz weiß, also frequenzunabhängig.

PN-Schiebereg. mit $2^N - 1$ Zustd.

Zahl der Bit N	Anzapf bei
7	6
10	3
15	14
23	18
31	13

PN-Rauschen hat ein diskretes Spektrum mit der Wiederholfrequenz der Codes des Registers als Linienabstand. Durch Vergrößern der Länge kann man beide beliebig klein machen. Der große Vorteil ist die absolute Reproduzierbarkeit.

VI.4 Meßgrößen des Rauschens

Alle folgenden Betrachtungen gelten nur für weißes Rauschen!

Jeder ohmsche Widerstand gibt eine Rauschleistung P_r ab, die unabhängig vom Wert des Widerstands ist. Sie hat den Wert:

$$P_r = 4 \cdot k \cdot T \cdot B$$

k: Boltzmann Konstante
= $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T: absolute Temperatur in K

B: Bandbreite in Hz

Jede Abhängigkeit der Rauschleistung vom Wert des Widerstands würde dazu führen, daß man durch eine Kombination von Widerständen die Rauschleistung beliebig steigern und so Energie "aus dem Nichts" erzeugen könnte (Perpetuum mobile).

Bei bekanntem Widerstandswert R kann aus der Rauschleistung P_r die Rauschspannung U_r und der Rauschstrom I_r berechnet werden.

$$U_r = \sqrt{P_r \cdot R} =$$

$$= \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (\text{V})$$

$$I_r = \sqrt{\frac{P_r}{R}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R}} \quad (\text{A})$$

Die Rauschspannung wird am offenen, der Rauschstrom am kurzgeschlossenen Widerstand gemessen.

Bei weißem Rauschen rechnet man nicht mit den Werten von P_r , U_r und I_r , sondern mit deren spektralen Dichten P_r' , U_r' und I_r' . Man erhält die Rauschleistungsdichte P_r'

$$P_r' = 4 \cdot k \cdot T \quad (\text{W / Hz})$$

die Rauschspannungsdichte U_r'

$$U_r' = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \quad (\text{V} / \sqrt{\text{Hz}})$$

und die Rauschstromdichte I_r'

$$I_r' = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{R}} \quad (\text{A} / \sqrt{\text{Hz}})$$

Während die Leistung proportional zur Bandbreite ist, sind Spannung und Strom proportional zur Wurzel aus der Bandbreite. Die Wurzel aus der Frequenz rührt nur von der Umrechnung der Leistung in Spannung bzw. Strom her. 1/4 der Leistung entspricht der halben Spannung.

Die Spannungsdichte in $\text{V} / \sqrt{\text{Hz}}$ besagt, daß dieser Wert multipliziert mit der Wurzel aus der Bandbreite B die Rauschspannung ergibt:

$$U_r = U_r' \cdot \sqrt{B}$$

Bei $U_r' = 8 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ und $B = 10 \text{ kHz}$ erhält man:

$$U_r = 8 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{10^4 \text{ Hz}} =$$

$$= 8 \cdot 10^{-9} \cdot 10^2 =$$

$$= 8 \cdot 10^{-7} \text{ V} = 0.8 \text{ } \mu\text{V}$$

Diese Formeln und die folgenden Beziehungen gelten für einen einzelnen Widerstand.

Bei der im Hochfrequenzbereich erforderlichen Anpassung ist der Eingangswiderstand des Verstärkers gleich dem Quellwiderstand. Dessen Rauschstrom fließt nun durch die Parallelschaltung beider Widerstände, durch jeden also die Hälfte. Dem entspricht nur 1/4 der Leistung im Eingangswiderstand des Verstärkers. Bei HF-mäßiger Anpassung gibt deshalb ein rauschender Widerstand an den Verstärker die Rauschleistung $P_r = k \cdot T \cdot B$ ab, also ohne den Faktor 4.

Das durch die Elektronenbewegung verursachte Schrotrauschen hat die spektrale Rauschdichte I_r' :

$$I_r' = \sqrt{2 \cdot e \cdot I} \quad (\text{A} / \sqrt{\text{Hz}})$$

Hier ist I der fließende Strom und e die Elektronenladung ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb).

VI.5 Die Rauschzahl

In Empfängern für Frequenzen oberhalb 30 MHz ist das Rauschen der begrenzende Faktor beim Empfang schwacher Sender. Hier sind Verstärker mit guten Rauschdaten obligatorisch. Die Rauschspannung am Ausgang eines Verstärkers hängt neben dem Rauschen der Eingangsstufe von der Bandbreite und der Verstärkung ab. Daher ist es sinnlos, die Rauschqualität anhand der Rauschspannung am Ausgang zu vergleichen. Die wirkliche Rauschqualität eines Verstärkers wird durch die Rauschzahl F beschrieben.

Um dieses Maß zu verstehen, betrachten wir einen idealen, völlig rauschfreien HF-Verstärker, der an einen Widerstand R angeschlossen wird. Der ideale Verstärker verstärkt

U_r , die Rauschspannung des Widerstands rauschfrei um den Faktor V auf die Ausgangsspannung U_{ideal} .

$$U_{\text{ideal}} = V \cdot U_r \quad (V)$$

Ein realer, rauschender Verstärker gibt eine Ausgangsspannung U_{real} ab, die größer ist als U_{ideal} . Diese beiden Spannungen, genauer: Leistungen, bestimmen die Rauschzahl F : Rauschzahl F in "kT₀":

$$F = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{ideal}}} = \left(\frac{U_{\text{real}}}{U_{\text{ideal}}} \right)^2 kT_0$$

Rauschzahl F in "dB":

$$\begin{aligned} F &= 10 \cdot \log(F) = \\ &= 20 \cdot \log\left(\frac{U_{\text{real}}}{U_{\text{ideal}}}\right) \quad \text{dB} \end{aligned}$$

Sowohl der Zähler als auch der Nenner des Bruchs enthält Verstärkung und Bandbreite als multiplikativen Faktor, der bei der Division herausfällt. Damit gibt die Rauschzahl wirklich die Rauschqualität des Verstärkers wieder.

Manchmal findet man auch die Angabe der Rauschtemperatur. Auf diese Temperatur muß man beim idealen Verstärker den Widerstand R aufheizen, damit er gleiche Ausgangsspannung abgibt wie der reale Verstärker mit nicht geheiztem Widerstand.

$$\begin{aligned} \text{Rauschtemperatur} &= \\ &= F \cdot \text{Umgebungstemperatur} \quad (\text{K}) \end{aligned}$$

Ein Empfänger mit einer Rauschzahl von 2 kT₀ bzw. 3 dB bzw. einer Rauschtemperatur von 421 K gibt also die 1,4-fache Rauschspannung ab wie ein idealer Empfänger. Das ist schon eine recht gute Rauschzahl, 1 dB ist ein hervorragender Wert.

VI.6 Rauschberechnung eines Verstärkers

Das Rauschverhalten hochwertiger rauscharmer Operationsverstärker wird durch 3 Zahlenwerte beschrieben, die sich immer auf die Eingänge des Verstärkers beziehen.

- U_r' die Rauschspannungsdichte (Input noise voltage density).

- I_r' die Rauschstromdichte (Input noise current density).

- U_r die Rauschspannung (Input noise voltage) im Frequenzbereich von 0,1 - 10 Hz. Hier trägt das Funkelrauschen deutlich zum Gesamtrauschen bei.

Im Bereich des weißen Rauschens werden Rauschspannungs- und Rauschstromdichte bei einer oder auch mehreren Frequenzen angegeben. Mit diesen Angaben kann man eine Rauschberechnung vollständig durchführen. Als Beispiel wird hier ein der Vorverstärker durchgerechnet, dessen Schaltung in Abb. 6-3 dargestellt ist.

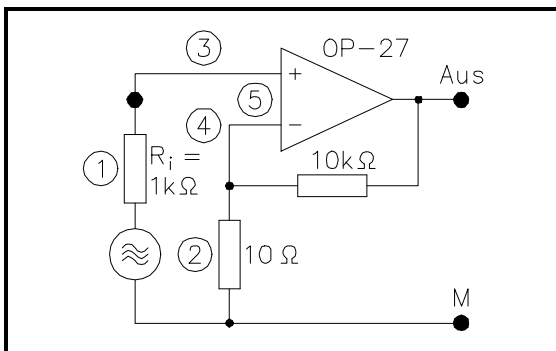


Abb. 6-3: Rauschquellen einer Schaltung

Der Vorverstärker für kleine Spannungen enthält den OP-27 als nichtinvertierenden Verstärker mit $V = 1000$. Die Signalquelle hat einen Innenwiderstand von 1 kOhm, der Span-

nungsteiler für die Gegenkopplung einen von 10 Ohm. Die Rauschquellen (1) und (2) sind das Spannungsrauschen der Innenwiderstände an den beiden Eingängen. Ihre Rauschspannungsdichten betragen:

Die Signalquelle hat einen Quellwiderstand von 1 kΩ:

$$\begin{aligned} 1 \text{ k}\Omega: \\ U_r' &= \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \\ &= \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 10^3} = \\ &= \sqrt{1,64 \cdot 10^{-17}} = \\ &= 4,06 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

Der Innenwiderstand des Spannungsteilers beträgt 10 Ω:

$$\begin{aligned} 10 \Omega: \\ U_r' &= \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 10} = \\ &\dots = 0,41 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

Die Rauschquellen (3) und (4) sind der Spannungabfall des Stromrauschens I_r' der Eingänge an den Innenwiderständen:

Datenbuchangabe:

$$I_r' = 0,4 \quad \text{pA} / \sqrt{\text{Hz}}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ k}\Omega: \quad U_r' &= I_r' \cdot R = \\ &= 0,4 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 \\ &= 0,4 \quad \text{nV} / \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 10 \Omega: \quad U_r' &= I_r' \cdot R = \\ &= 0,4 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \\ &= 0,004 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

Die letzte Rauschquelle (5) ist das Spannungsrauschen der Verstärkereingänge selbst.

Datenbuchangabe: $U_r' = 3 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$

Zur Ermittlung der gesamten Rauschspannungsdichte $U_r'_{\text{ges}}$ an den Eingängen müssen die Rauschleistungen summiert und in Spannung zurückgerechnet werden. Wegen $P = U^2 \cdot R$ addiert man die der Quadrate aller Einzelrauschdichten und zieht daraus die Wurzel. Alle Werte werden hier in $\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ eingesetzt:

$$\begin{aligned} U_r'_{\text{ges}} &= \sqrt{(U_r'1)^2 + \dots + (U_r'5)^2} = \\ &= \sqrt{4,06^2 + 0,41^2 + 0,4^2 + 0,004^2 + 3^2} \\ &= \sqrt{25,81} = 5,08 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

Zu diesem Wert trägt allein das Spannungsrauschen des Quellwiderstands $4,06 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ bei, während der bewußt niederohmig ausgelegte Spannungsteiler vernachlässigt werden kann.

Die Rauschzahl der Schaltung beträgt:

$$\begin{aligned} \text{In } kT_0: F &= (5,08 / 4,06)^2 = \\ &= 1,57 \text{ } kT_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{in dB: } F &= 10 \cdot \log(1,57) = \\ &= 1,96 \text{ dB} \end{aligned}$$

Rauschtemp.:

$$\begin{aligned} T &= 1,57 \cdot 298 \text{ K} = \\ &= 468 \text{ K} \end{aligned}$$

Die Rauschspannung am Ausgang erhält man durch Multiplikation mit der Verstärkung V und der Wurzel aus der Bandbreite B , die mit 10 kHz angenommen wird.

$$\begin{aligned} U_r &= U_r'_{\text{ges}} \cdot V \cdot \sqrt{B} = \\ &= 5,08 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3 \cdot \sqrt{10^4} \\ &= 0,51 \text{ mV} \end{aligned}$$

Die Rauschspannung am Ausgang der Verstärkeranordnung beträgt damit $0,51 \text{ mV}$.

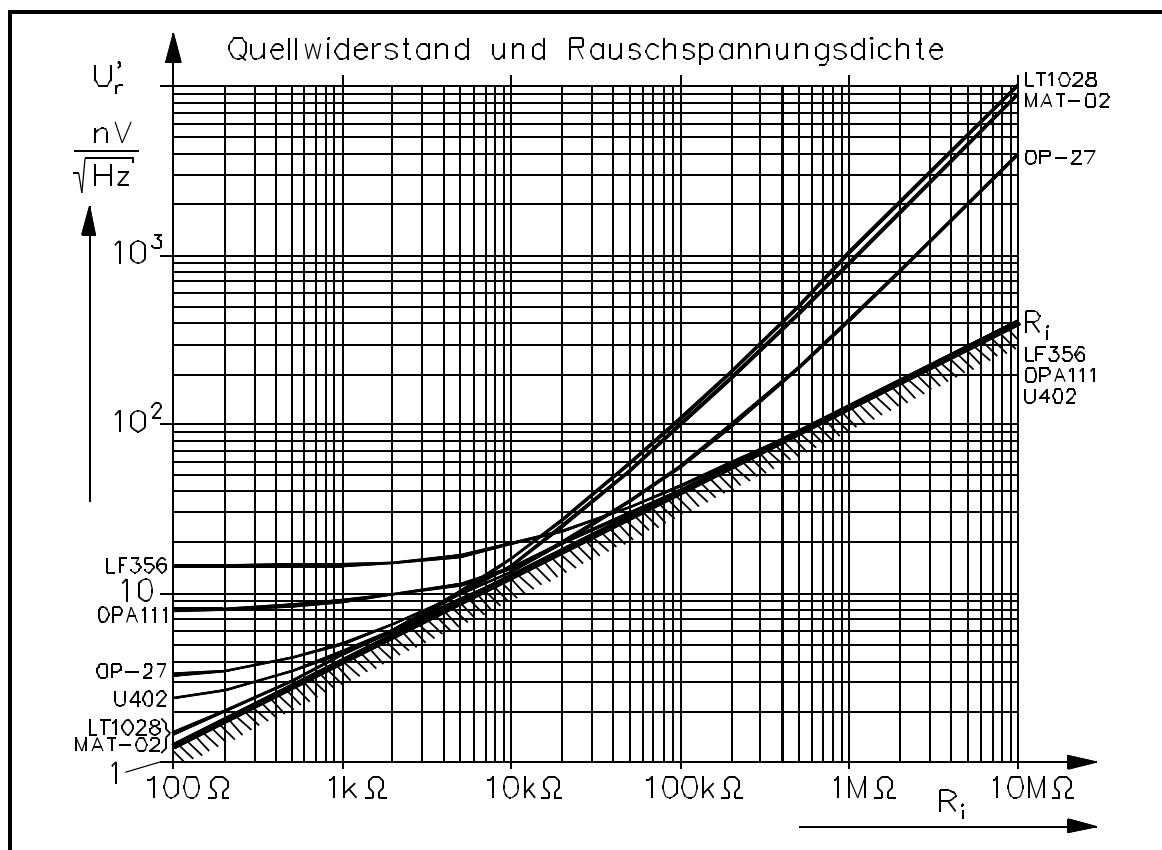


Abb. 6-4: Quellwiderstand und Rauschspannung

Abbildung 6-5 zeigt den Verlauf der Rauschspannungsdichte über dem Quellwiderstand für verschiedene Operationsverstärker und Transistoren. Mit einer Schraffur unterlegt ist die Rauschspannungsdichte des Innenwiderstands R_i allein als absolute Grenze.

Bei kleinen Innenwiderständen ist allein das Spannungsrauschen wichtig und bipolare Verstärker sind optimal. Ihr relativ großes Stromrauschen rührt vom Schrotrauschen des Eingangsstroms her, erzeugt aber an kleinen Innenwiderständen nur wenig Spannungsrauschen.

Mit wachsenden Innenwiderständen wird ein geringes Stromrauschen immer wichtiger, da die erzeugte Rauschspannung proportional zum Widerstand anwächst. Man bevorzugt hier FET-Operationsverstärker mit ih-

ren äußerst kleinen Stromrauschdichten. Es gibt also keinen "rauschärmsten" Operationsverstärker.

VI.7 Konsequenzen aus dem Rauschen

Außer am unerreichbaren absoluten Nullpunkt ist das Rauschen allgegenwärtig und stört überall, wo man es mit sehr schwachen Signalen zu tun hat. Dies soll am Beispiel der Radiokommunikation über große Entfernungen erläutert werden, zusammen mit den Maßnahmen, die trotz des Rauschens eine Verbindung aufrecht erhalten.

Nehmen wir an, daß eine Raumsonde aus sehr großer Entfernung ihre Daten zur Erde sendet. Entscheidend für eine fehlerfreie Übertragung ist das Signal/Rauschverhältnis SNR (Signal to noise ratio), das von den spektralen Dichten abhängt.

Folgende Faktoren bestimmen über das SNR auf der Erde:

- Entfernung der Sonde
- Sendeleistung und Antennengewinn der Sonde
- Antennengewinn und Antennentemperatur auf der Erde
- Rauschen des Empfängers
- Modulationsart und Qualität des Demodulators
- Bandbreite des Signals
- Dämpfung des Übertragungswegs, z. B. der Atmosphäre

Die Entfernung der Sonde ist vorgegeben, ebenso Antennengewinn und Sendeleistung durch die Konstruktion der Sonde. Der Gewinn der Empfangsantenne auf der Erde hängt vor allem von ihrem Durchmesser ab. Daneben muß die Antenne eine möglichst niedrige Rauschtemperatur haben. Dazu darf sie nur den Himmel in Richtung der Sonde "sehen" und nicht durch Nebenzipfel Rauschen vom Erdboden auffangen. Niemals zu vermeiden sind Störungen durch kosmische Rauschquellen.

Der Empfänger soll natürlich so rauscharm sein wie irgend möglich. Mit steilflankigen Filtern wird aus dem empfangenen Frequenzgemisch nur das Sondersignal selbst herausgefiltert und kein frequenzmäßig benachbartes Rauschen. Als letztes Glied in der Kette ist noch der Demodulator des Empfängers zu nennen, der bei einem möglichst ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis noch fehlerfrei demodulieren soll.

Auch die Bandbreite des Sondersignals beeinflusst das SNR, da die spektrale Leistungsdichte mit wachsender Bandbreite absinkt. Hier hat

man spezieller Modulationsverfahren (Pulsmodulation) entwickelt, welche die vorgegebene Bandbreite optimal mit Information ausfüllen und dadurch das theoretische Maximum der Datenrate erreichen.

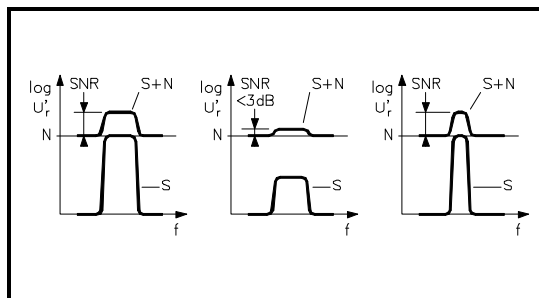


Abb. 6-5: Spektrale Dichten von Signal und Rauschen

Große Empfangsantennen sind sehr teuer im Betrieb und wegen der Vielzahl von Sonden immer stark ausgelastet. Um Zeit zu sparen, soll daher die Datenrate auf dem Übertragungsweg möglichst groß sein. Nach Optimierung des gesamten Systems macht man die Datenrate und damit die Bandbreite so groß, daß ein gerade noch ausreichendes SNR erzielt wird. In Abb. 6-5 ist die Spannungsdichte des Signals S im linken Bild gleich derjenigen des Rauschens N und das SNR beträgt 3 dB. Dies ergibt erfahrungsgemäß eine noch weitgehend fehlerfreie Demodulation.

Entfernt sich die Sonde weiter von der Erde, so nimmt die spektrale Leistungsdichte des Signals ab (Abb. 6-5 Mitte) und damit das SNR. Als einzige Möglichkeit, das erforderliche SNR wieder herzustellen, verbleibt eine Erhöhung der spektralen Dichte durch Zurücknahme der Bandbreite des Signals und damit leider auch der Datenrate (Abb. 6-5 rechts).

Wenn der Übertragungsweg völlig ausgereizt ist, besteht eine letzte Möglichkeit zur Anhebung der Datenrate in einer Datenkompression. Diese lohnt sich ganz besonders bei Bildern mit ihren großen Datenmengen. Man nutzt dabei die Tatsache aus, daß die Helligkeiten nebeneinanderliegender Bildpunkte sich nur an Kanten wesentlich unterscheiden. Sendet man nur noch die Helligkeitsunterschiede aufeinanderfolgender Punkte, so treten überwiegend kleine Zahlen um 0 herum auf.

Damit allein wäre noch nichts gewonnen. Reduziert wird die Anzahl der zu übertragenden Bits erst durch eine Codierung der Zahlen, welche den häufigsten Zahlen kurze Bitfolgen und den seltenen großen Zahlen lange Bitfolgen zuweist. Das klassische Beispiel ist das Morsealphabet mit kurzen Zeichen für häufige und längeren Zeichen für seltene Buchstaben. Zur digitalen Datenübertragung eignet sich die Huffman-Codierung, deren Baumstruktur folgendermaßen aussehen könnte:

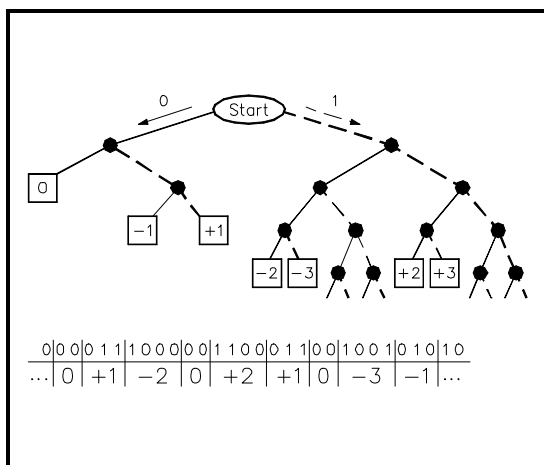


Abb. 6-6: Huffman Codebaum

In der Huffman codierten Datenfolge unten in Abb. 6-6 folgt man dem Pfad im Codebaum, der dem aktuellen Bit

entspricht, bis man bei einer Zahl ankommt. Mit dem nächsten Bit beginnt man wieder beim Start. Die Codierung ist eindeutig, da nie ein längerer Code mit derselben Bitfolge beginnt, wie ein kürzerer. Die Erfahrung zeigt auch, daß man nach Verlust der Synchronität sehr schnell wieder in den richtigen Tritt kommt und nicht dauernd Unsinn decodiert wird.

Bei dieser Codierung geht keine Information verloren. Es gibt aber auch verlustbehaftete Kompressionsverfahren, welche weniger wichtige Informationen weglassen. Musterbeispiel ist die JPEG-Kompression (Joint Photographic Experts Group) von Bildern.

VI.8 Rauschen im Alltag

Es wird auf Unglauben stoßen, wenn hier behauptet wird, daß man auch ohne elektronische Hilfsmittel mit dem Rauschen konfrontiert wird. Beginnen wir mit dem weißen Rauschen: Seine spektrale Dichte ist frequenzunabhängig und es müßte daher auch noch bei der Frequenz von sichtbarem Licht vorhanden sein. Dies ist erfahrungsgemäß nicht der Fall. Grund dafür ist, daß bei Raumtemperatur Quanteneffekte die Bandbreite des weißen Rauschens auf ca. 100 THz ($\lambda = 3 \mu\text{m}$) begrenzen. Die Energie der Wärmebewegung reicht einfach nicht zur Erzeugung von noch höherfrequenten (=energiereicheren) Lichtquanten aus.

Wir können die Atombewegung durch Temperaturerhöhung beschleunigen, so daß bei ca. 800°C (Glühbeginn) das weiße Rauschen bis in den roten Bereich des Spektrums reicht. Weiteres Erhitzen führt über Rot- und Gelbglut zur Weißglut entsprechend

weißem Rauschen im Frequenzbereich des sichtbaren Lichts ($f = 400 \dots 550 \text{ THz}$, $\lambda = 750 \dots 400 \text{ nm}$).

Auch bei niedrigen Temperaturen wird durchaus Strahlung (= Rauschen) erzeugt und abgestrahlt. Man spürt diese z.B., wenn man die Hand ohne zu berühren dicht neben das Gesicht hält. Die abgestrahlte Leistung ist beträchtlich. Sie gehorcht der Formel:

$$P = s \cdot A \cdot T^4 \text{ (W)}$$

Hierin sind:

$$s = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right)$$

A: Fläche in m^2

T: abs. Temperatur in Kelvin

Einige Werte für die Wärmeabstrahlung von schwarzen Flächen:

0 °C	315 W / m^2
20 °C	418 W / m^2
37 °C	524 W / m^2
60 °C	697 W / m^2
100 °C	1098 W / m^2

Bei diesen Leistungen wundert es nicht, daß man sich in einem Zimmer mit kalten Wänden nicht behaglich fühlt und daß einen in einer klaren Winternacht die Kälte förmlich "anspringt". Jeder kennt Autoscheiben, die in klaren Nächten auch bei Lufttemperaturen über 0 °C völlig vereisen. Der klare Himmel hat strahlungsmäßig eine Temperatur von etwa -120°C, so daß die Scheiben durch Wärmeabstrahlung weit unter 0°C abkühlen und sich das Kondenswasser aus der Luft als Eis niederschlägt. Die einem nahen Haus zugewandten Scheiben des Autos bleiben klar, weil die Hauswand ihnen

Wärme zustrahlt. Bei bedecktem Himmel, unter dem einfachen Dach eines Carports oder einer aufgelegten Pappe tritt ebenfalls keine Vereisung auf.

Eine in den Weltraum gerichtete Antenne hat eine Rauschtemperatur deutlich unter der Umgebungstemperatur. Man fragt sich sofort, wie so etwas möglich ist, da die Antenne nicht gekühlt wird. Die Erklärung liegt darin, daß zwar die Rauschleistung eines Widerstands unabhängig vom Wert ist, nicht aber Rauschstrom und -spannung. In den metallisch leitenden Teilen der Antenne ist der Widerstand extrem klein, in den elektrisch isolierenden extrem groß. Dadurch herrscht eine völlige Fehlanpassung an den Fußpunktswiderstand Z. Zum Rauschen können nur Widerstände beisteuern, die in der Größenordnung von Z - meist 50 Ω - liegen.

Das Rauschen der Antenne steigt stark an, wenn sie den "warmen" Erdboden sieht, der widerstandsmäßig halbwegs zu Z paßt. Aus diesem Grund müssen Satellitenantennen ein sauberes Richtdiagramm ohne Nebenzipfel haben, um keine Energie vom Erdboden auffangen.

Literatur:

G. Hoch, "Bestimmung der Empfindlichkeit von Empfangsanlagen mittels Sonnenrauschen", UKW Berichte, 4/1979, S. 194

D. Dobricic, "Bestimmen der Parameter eines Empfangssystems durch Messen kosmischer Radioquellen", UKW Berichte 2/1983, S. 89