

# Außer Rauschen nichts zu lauschen?

Dr.-Ing. WERNER HEGEWALD – DL2RD

Da sitzt nun der DX-hungrige UKW-Amateur vor dem Transceiver und hört das SSB-Band ab – und was tönt aus dem Lautsprecher? Rauschen! Obgleich theoretische Betrachtungen die Bandbelegung auch nicht fördern, wollen wir uns in dieser Folge etwas näher mit Grundlagen, Berechnungen und praktischen Konsequenzen des Rauschens befassen.

Hauptanliegen der folgenden Zeilen ist es, grundlegende Zusammenhänge um das Rauschen wieder ins Gedächtnis zurückzurufen, nicht zuletzt im Hinblick auf DJ9YWs Beitrag auf den Seiten 63 bis 65 dieser Ausgabe. Für wirkliche Einsteiger werden am ehesten die weiter unten abgeleiteten praktischen Konsequenzen von Bedeutung sein.

## ■ Begriffswelt

Leider ist in einer Vielzahl von Veröffentlichungen über die Jahrzehnte hinweg eine sehr inhomogene Terminologie entstanden. Wir schließen uns hier den Definitionen an, die sich unter den Technologiespezialisten des DARC um Prof. Dr. H.-H. Cuno, DL2CH, als richtig herauskristallisiert haben [1]. Die wichtigsten Begriffe sind in nebenstehendem Kasten zusammengefaßt. Der irreführende und verschiednen interpretierte Terminus **Rauschzahl** ist zu vermeiden.

## ■ Alles rauscht

Jeder ohmsche (also *Wirk-*)Widerstand (Blindwiderstände rauschen nämlich nicht) erzeugt eine Rauschleistung; die Ursachen dafür lassen wir hier mal außer acht. Sie beläuft sich im in aller Regel vorliegenden Anpassungsfall auf

$$P_r = k \cdot T \cdot B \quad (1)$$

Darin ist T die in K (Kelvin) angegebene absolute Temperatur des Widerstandes, B die Bandbreite des Meßsystems oder Empfängers in Hz sowie  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W/s/K}$  die Boltzmannkonstante. Bei mit 290 K, also 17 °C angesetzter (Zimmer-)Temperatur und für theoretische Betrachtungen gern zu 1 Hz angenommener Bezugsbandbreite er-

geben sich **-174 dBm** alias  $4 \cdot 10^{-21} \text{ W}$ . Diese Leistung ist so gering, daß selbst beim kleinsten üblichen Maßeinheitenvorsatz *Atto* ( $10^{-18}$ ) noch Nullen nach dem Komma vonnöten sind: 0,004 aW.

Bei SSB-Bandbreite 2,5 kHz sind es 34 dB mehr, nämlich  $10 \log(2500 \text{ Hz} / 1 \text{ Hz})$ , also **-140 dBm** oder  $10^{-17} \text{ W}$ ,  $10^{-14} \text{ mW}$ , 10 aW. Machen wir noch ein zweites praktisches Beispiel. Ein geübtes Ohr sowie schmale Quarz- und mechanische Filter können die wirksame Bandbreite auf 200 Hz einengen,

## Rauschen – die Begriffe

Der Quotient aus Signal/Rauschverhältnis am Ausgang eines Vierpols (Baugruppe, Komponente, Empfänger, Gesamtsystem) und an dessen Eingang wird **Rauschfaktor F** genannt (englisch: noise factor). Er ist stets größer als 1 und dimensionslos, eine Maßeinheit  $kT_0$  anzuhängen wäre falsch [2]. Anders gesagt, verschlechtert ein (realer) Vierpol das Signal/Rausch-Verhältnis eines ihm zugeführten Signals um den Faktor F.

$$F = \frac{S_2 / N_2}{S_1 / N_1} \quad (2)$$

Es ist hilfreich, Verhältnisse in dB anzugeben; so gelangt man über

$$f = 10 \log F \quad (3)$$

zum **Rauschmaß f** (englisch: noise figure NF); das ist sozusagen der in dB angegebene Rauschfaktor.

Die Temperatur T, die ein ohmscher Widerstand annehmen müßte, um genauso zu rauschen wie ein betrachteter Vierpol, ist als **Rauschtemperatur** definiert. Sie ist aus dem Rauschfaktor gemäß

$$T = (F - 1) \cdot T_0 \text{ mit } T_0 = 290 \text{ K} \quad (4)$$

zu berechnen.

gerade richtig für Grasnarsignale in Telegrafie. Wenn Sie auch 23 dB mehr als bei 1 Hz oder 11 dB weniger als bei SSB, also **-151 dBm** bzw. 0,8 aW ermitteln, ist das in Ordnung.

## ■ Grenzempfindlichkeit

So paradox es klingen mag, die Widerstands-Rauschleistung ist unabhängig vom Widerstandswert. Dieser ist erst gefragt, wenn es um die Umrechnung in Spannungen geht. Für funkübliche 50-Ω-Systeme ergeben sich nach

$$U_{r \text{ Grenz}} = \sqrt{P_r \cdot R} \quad (5)$$



Bild 1: Modernster 70-cm-Vorverstärker mit 0,35 dB Rauschmaß Fotos: DG0ZB

unschwer 0,45 nV, 22 nV bzw. 6 nV. Zur Beurteilung der Empfindlichkeit eines Empfangssystems sind nun Rauschfaktor bzw. Rauschmaß heranzuziehen. Als Grenz- oder rauschbegrenzte Empfindlichkeit ist diejenige Spannung definiert, die genau so groß ist wie die vom Empfangssystem erzeugte Eigenrauschspannung:

$$U_{r \text{ Grenz}} = \sqrt{F \cdot R \cdot k \cdot T_0 \cdot B} \quad (6)$$

Eine 2-m-Anlage mit einem BF-981-Vorverstärker erreicht bei einigermaßen vernünftiger Verkabelung ein Rauschmaß von 3 dB, also  $F = 2$ . Somit wären die o.g. Spannungswerte mit  $\sqrt{2} = 1,41$  zu multiplizieren, d.h., ein SSB-Signal muß beispielsweise mit wenigstens 31 nV an der Antennenbuchse anliegen, um dem Eigenrauschen ebenbürtig zu sein. Ob es sich dann schon lesen läßt, sei dahingestellt.

Außen vor bleiben müssen in diesem Beitrag des weiteren digitale Modulationsverfahren wie PSK31 und Pactor, die ein Lesen schon nicht mehr hörbarer Signale zulassen, und was die Spezialisten beim EME-Funk bzw. oberhalb 70 cm erleben, beschreibt DJ9YW in dieser Ausgabe.

Hingewiesen sei jedoch abermals auf die Nützlichkeit der dB-Rechnung, was hier Wurzel und Taschenrechner erspart:

$$P_{r \text{ Grenz}} = P_r + f \quad (7)$$

Erwähntes SSB-Signal erreicht folglich mit **-140 dB + 3 dB = -137 dBm** die Empfindlichkeitsgrenze.

## ■ Signal/Rausch-Verhältnis

In Spezifikationen von Amateurfunkgeräten sind Rauschmaß bzw. -faktor selten anzutreffen, dagegen liest man von Empfindlichkeit bei gegebenem Rauschabstand, wobei speziell für SSB meist von 10 dB die Rede ist. Das heißt, das Empfangssignal ist dann von der Leistung her bereits zehnmal stärker als das Eigenrauschen. Die dort angegebene Spannung läßt Rückschlüsse auf das Rauschmaß zu.

Aufzupassen gilt es andererseits bei den Angaben für FM. Übliche Empfindlichkeitswerte liegen um 0,16 bis 0,18 µV bei 12 dB **SINAD**. Letzterer ist der niederfrequenzseitige, also am Lautsprecherausgang gemessene Rauschabstand unter zusätzlicher Berücksichtigung auftretender Verzerrun-

## Verboten

...ist das Multiplizieren und Dividieren von in **dB** angegebenen Maßen untereinander sowie das Potenzieren derselben.

**Also:** Wenn es sich nicht um ausdrücklich auf dB zugeschnittene Größengleichungen handelt, sind jegliche in **dB** angegebenen Verhältnisse bzw. in dBm, dBµ u.a. angegebenen physikalischen Größen **immer** zunächst in **Absolutwerte umzurechnen** (über Tabellen oder Delogarithmieren mit Taschenrechner, EXCEL u.ä.), bevor man sie in irgendwelche Formeln einsetzt.

gen. Während bei SSB ein zumindest theoretisch linearer Zusammenhang zwischen HF- und NF-seitigem Rauschabstand besteht, verhält sich das bei FM gänzlich anders, so daß ein Ermitteln des Rauschmaßes aus der im Datenblatt genannten Spannung nicht ohne weiteres möglich ist.

Ein leises FM-Signal erzeugt nämlich zunächst kein verwertbares NF-Signal, auch wenn es das Eigenrauschen bereits übersteigt. Vom Demodulator hängt es ab, wann die sogenannte Demodulationsschwelle überschritten wird. Erst ab diesem Pegel hören wir ein NF-Signal, dessen Rauschabstand dann wiederum mit ansteigendem Antennensignal überproportional wächst. Dieser Effekt ist um so stärker ausgeprägt, je höher der Modulationsindex und damit der Hub sind, was man sich z.B. beim UKW-Hörrundfunk zunutze

**Rauschen eines 50-Ω-Widerstands bei verschiedenen Bandbreiten**

| Situation | B [Hz] | P <sub>r</sub> [dBm] | U <sub>r</sub> [nV] |
|-----------|--------|----------------------|---------------------|
| Theorie   | 1      | -174                 | 0,8                 |
| SSB       | 2500   | -140                 | 22                  |
| CW        | 200    | -151                 | 6                   |
| FM        | 12000  | -133                 | 49                  |

macht. Ursächlich dafür ist die im Vergleich zum Nutzsignal (Sprache, Musik) deutlich höhere Bandbreite des Sendesignals, woraus der Demodulator sozusagen einen Gewinn schöpft.

Diese Tatsache ist, nebenbei bemerkt, der Grund für die Beliebtheit von FM in Sprechfunk und Hörrundfunk, kommt doch dadurch eine störungsfreiere Übertragung als bei AM und SSB zustande. Dagegen ist SSB bei sehr schwachen Signalen, wie sie der DXer liebt, klar im Vorteil.

**Rauschen in Kette**

Um sich praktischen Konsequenzen zuwenden zu können, ist noch die Hintereinanderschaltung rauschender Komponenten in einem Empfangssystem zu behandeln. In Bild 2, einer Anleihe aus der vorigen Ausgabe, fallen zunächst zwei Komponenten auf, nämlich Vorverstärker und Empfänger/Transceiver. Genau genommen sind es mehr, bewirken doch Steckverbinder und Kabel zusätzliche Verluste. Es ist nämlich so, daß

der Rauschfaktor eines dämpfenden Vierpols gleich dessen Dämpfung ist. Dämpft ein Koaxialkabel z.B. um 3 dB, so geht es mit einem Rauschmaß von 3 dB bzw. einem Rauschfaktor von F = 2 in die Rechnung ein.

Der Verlust an Sendeleistung in einem langen Koaxialkabel ließe sich unter DO-Zeugnisbedingungen ja noch tolerieren, wenn Antennengewinn und Ausgangsleistung ohnehin 10 W EIRP überschreiten, doch ein zusätzlicher Rauschbeitrag von 3 dB und mehr wäre fatal. Um dies zu quantifizieren, benötigt man die Rauschsummenformel:

$$F_{ges} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{V_{P1}} + \frac{F_3 - 1}{V_{P1} \cdot V_{P2}} + \dots \quad (8)$$

Einzusetzen sind darin Rauschfaktoren F sowie Leistungsverstärkungen V<sub>P</sub> als Absolutwerte, nicht in dB (Kasten vorige Seite!). Bei noch mehr Stufen tauchen weitere Brüche auf, in deren Nenner jeweils das Produkt der Leistungsverstärkungen aller vorgelagerten Stufen steht. Die Leistungsverstärkung der am Ende der Kette befindlichen Stufe (in Bild 2 der Transceiver) geht hingegen nie ein, wohl aber ihr Rauschen. Möchte man nun einzelne Komponenten variieren, vergeht bei dem „Bandwurm“ (8) schnell die Freude, gäbe es da nicht die in Bild 3 gezeigte Freeware AppCad, im Internet unter [www.agilent.com](http://www.agilent.com) downloadbar und als Zugabe auf der 2000er Jahrgang-CD des FUNKAMATEUR. HP offeriert auch eine DOS-Version.

Schnell kommt damit über die Menüpunkte *Signals-Systems* und *NoiseCalc* das gezeigte Bild aufs Display. Die Steckverbinder, insgesamt pessimistisch mit 1 dB angesetzt, verteilen sich je zur Hälfte auf Eingangs- und Ausgangskabel des Vorverstärkers. Mit sehr schlechten 10 dB Empfängerrauschmaß (das sollte ein Gerät heutzutage wenigstens schaffen ...) sind also 2,35 dB Gesamtrauschmaß auf 70 cm zu erreichen. Ob der Nachsetzer die hohe Verstärkung jedoch verkraftet, ist typ- und standortabhängig. Bündel- und Betriebsfunk dicht neben dem Amateurband lassen grüßen und rufen nach einem selektiven Vorverstärker! Das Rauschen einer Antenne selbst, d.h. ihrer Metallelemente, Anpaßglieder etc., ist mini-

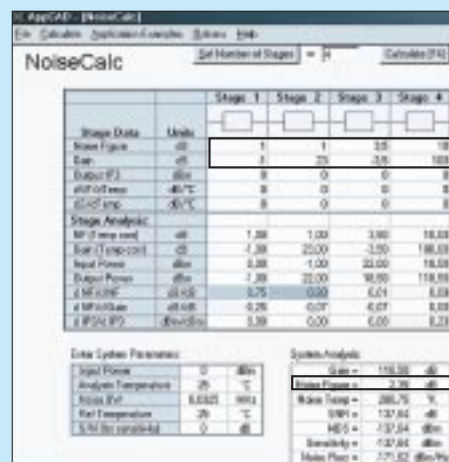


Bild 3: Die Gratisgabe AppCAD der Entwicklungingenieure von HP (jetzt Agilent) läßt sich intuitiv bedienen und erspart lästige manuelle Rechnungen. Screenshot: DL2RD

mal und bedarf in hiesigen Betrachtungen keiner Berücksichtigung. Zum Abschluß noch der Test, was ohne Vorverstärker passiert. Dann sind es dank zweier überflüssiger Steckverbindungen nur noch 4 dB Dämpfung vor dem Empfänger, folglich Rauschfaktor 2,5 und Verstärkung 0,4 (muß unter 1 sein, solche Plausibilitätsbetrachtungen schützen vor Fehlern!):

$$F_{ges} = 2,5 \cdot \frac{10}{0,4} = 27,5 \text{ oder } 14 \text{ dB}$$

Auf diese Weise läßt sich also die Struktur einer Empfangsanlage den Erfordernissen anpassen, beispielsweise würde eine Verkür-



Bild 4: Dieser Mastvorverstärker für Außenmontage besitzt 0,8...1,2 dB Rauschmaß – ausreichend für terrestrischen Funkverkehr.

zung des antennenseitigen Kabels keinen Sinn mehr machen, weil die marginale Verbesserung in der Praxis wegen des von der Antenne aufgenommenen Horizontrauschens (s. Bild 3 auf S. 64) nichts mehr nützt.

**Literatur**

- [1] n.n.: Rauschzahl oder Rauschmaß. CQ DL 70 (1999) H. 4, S. 287
- [2] Lenz, R., DL3WR: Rauschen in Empfangsanlagen. UKW-Berichte 15 (1975) H. 3, S. 164–180
- [3] MacCluer, C.R., W8MQW: Amplifier Noise Temperatures. [www.mth.msu.edu/~maccluer/Lna/noisetemp.html](http://www.mth.msu.edu/~maccluer/Lna/noisetemp.html)
- [4] Hauelsen, R., DF1IAZ: Rauschen von VHF/UHF-Empfängern. In: DARC-Ortsverband Weinheim (Hrsg.): 41. Weinheimer UKW-Tagung, Skriptum der Vorträge. Weinheim 1996, S. 10.1–10.13

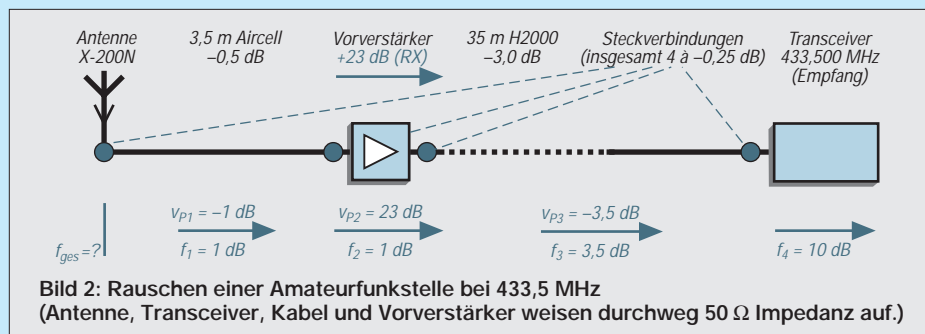


Bild 2: Rauschen einer Amateurfunkstelle bei 433,5 MHz (Antenne, Transceiver, Kabel und Vorverstärker weisen durchweg 50 Ω Impedanz auf.)