6 Weitere Rauschkenngrößen

Bislang hatten wir Widerstände (Zweipole) sowie Verstärker und Empfänger (Vierpole) unter dem Gesichtspunkt des Rauschens betrachtet. Über das „System“ Generator/Vierpol sind wir nicht hinausgekommen. Nun wollen wir noch einen Schritt weitergehen und uns ganze Empfangsanlagen, parallel betriebene elektronisch rauschende Vierpole und mehrere in Reihe liegende Stufen (Signalverarbeitungskette) vornehmen. Zum Schluss betrachten wir das „Phänomen“ FM-Schwelle.

6.1 Der Antennengewinn

Jede praktische Antenne hat eine Richtwirkung. Eine Antenne, die in alle Richtungen gleichstark strahlen würde, ist nur theoretisch vorstellbar (isotroper Strahler, d.h. Kugelstrahler oder auch Punktstrahler). Durch Feldstärkemessungen kann man das Richtverhalten einer Antenne ermitteln. Störungen ergeben sich dabei durch Reflexionen an Objekten, auf welche die Antenne strahlt. Dazu gehört bei Kurzwellenantennen insbesondere der Erdboden. Treten solche Störungen nicht auf oder wird ihr Einfluss „herausgerechnet“, so erhält man die Richtwirkung im Freiraum und somit eine feste Basis für faire Vergleiche.

Das Richtverhalten lässt sich nicht ganz vollständig, aber dafür leicht in einem vertikalen und einem horizontalen Strahlungsdiagramm dokumentieren. Mit Verbesserung der Rechentechnik entstanden Simulationsprogramme, die eine 3D-Darstellung und damit eine vollständige Dokumentation liefern.

Aus den Leistungshalbwerts-Öffnungswinkeln der Hauptstrahlung in vertikaler und horizontaler Ebene lässt sich mit Bezug auf eine Referenzantenne, wie den isotropen Strahler, ein Verhältnis herleiten, das optimal die Richtschärfe beschreibt. Je besser die Antenne bündelt, umso besser beschreibt das Verhältnis das Richtverhalten.

Herangezogen werden in der Regel Näherungsmethoden nach Kraus oder Dombrowski/Orr. Das Verhältnis der Richtschärfen nennt man Gewinn. Man drückt es in Dezibel aus. Berücksichtigt ist bei solchen Gewinnangaben immer schon der Verlust der realen Antenne. Man muss nur auf eventuelle Randbedingungen (Umgebung) und die Bezugsantenne achten.

Beispiel 1: Öffnungswinkel: 34° und 37 ° im Freiraum, Verlust vernachlässigbar, Bezugsantenne: Halbwellendipol, Gewinn 13 dBd (d für Dipol)

Beispiel 2: wie oben, aber Bezugsantenne: Kugelstrahler, Gewinn 15,15 dBi (i für isotrop)

Der Unterschied folgt daraus, dass der Halbwellendipol bezüglich des Kugelstrahlers 2,15 dB Gewinn aufweist. Erfolgen Gewinnangaben ohne Information zur Bezugsantenne, sollte man vom Kugelstrahler ausgehen, da dieser den höchsten („besten“) Wert ergibt.

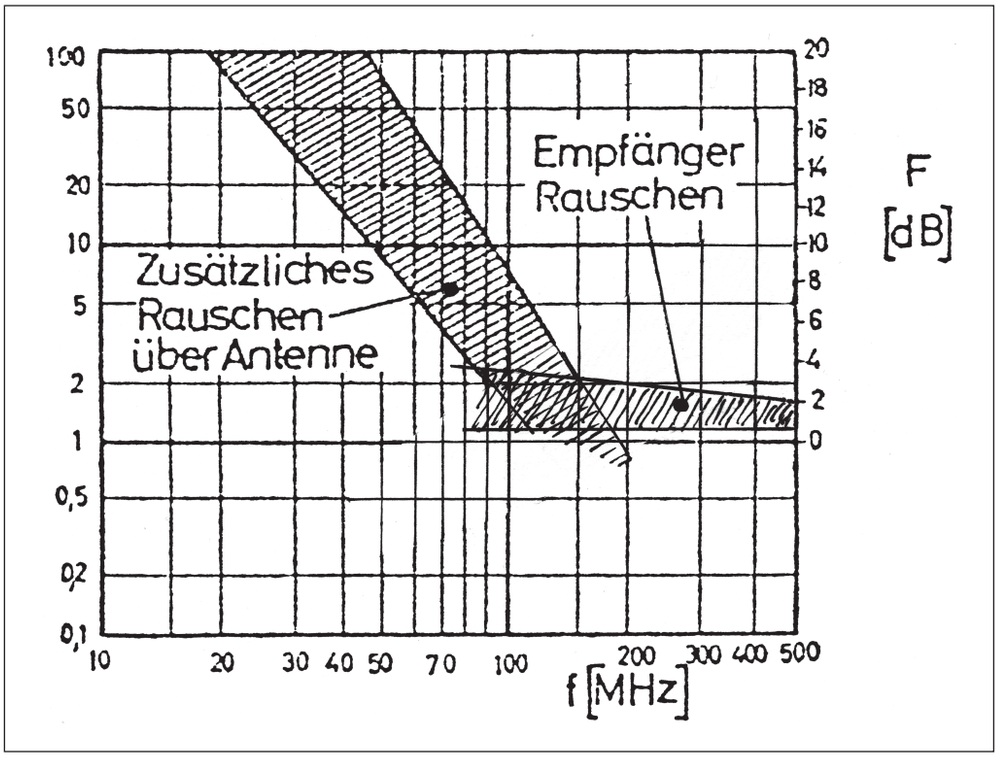

Bild 33: Streubereiche von Antennen- und aktuell realisierbarem Empfänger-Rauschmaß im Bereich 10 MHz bis 1 GHz. Mit einem Halbwellendipol aus zwei Teleskopstäben 5 m über der Erde wurden folgende bestätigenden Antennenrauschfaktoren ermittelt: bei 55 (70, 100, 150, 200) MHz 11 (9, 4, 2, 1,3), Ausrichtung unerheblich!

Rauschbuch.indb 45 26.05.2015 13:55:00

6.2 Das Gütemaß

Beispielsweise in den Katalogen von Satellitenantennen-Herstellern können wir auf die Begriffe Systemgüte oder Gütemaß (Figure of Merit, M) treffen. Hierbei handelt es sich um das *logarithmische* Verhältnis zwischen Antennengewinn bezüglich des Kugelstrahlers und *logarithmierter* Zusatzrauschtemperatur des Elektronikteils, also LNBs oder Verstärkers. Eine dBi-Angabe wird also zu einer logarithmierten Kelvin-Angabe in Bezug gebracht.

Dies ist möglicherweise auf Anhieb nicht nachvollziehbar, macht aber Sinn. Denn die Leistungsfähigkeit (Güte) einer solchen Empfangsanlage kann sowohl über den Antennengewinn als auch über das Eigenrauschen beeinflusst werden. Bei den Mikrowellen ist es ja ganz anders als bei den Kurzwellen: Das Antennerauschen liegt unter dem Rauschen zeitgemäßer Verstärker. Lt. Bild 33 sind diese Rauschanteile zwischen 100 und 150 MHz in etwa gleich. Senkt man folglich bei höheren Frequenzen das Verstärkerrauschen, kann man wirklich besser empfangen. Über Jahrzehnte wurden hier durch Weiterentwicklung der Halbleiter bis zum Jahr 2015 Fortschritte dergestalt erzielt, dass bei erschwinglichen Verstärkern/Konvertern mit Rauschmaßen im Bereich 0,1 bis 0,3 dB kaum mehr Handlungsbedarf besteht.

Für Systemgüte oder Gütemaß gilt die Berechnungsformel

M = Antennengewinn in dBi - 10 lg (Zusatzrauschtemperatur in K)

Man erhält die „Einheit“ dB/K.

Wir wollen wieder mal rechnen:

Aufgabe 48

Eine Satellitenantenne habe lediglich 28 dBi Gewinn, dafür aber einen perfekt installierten LNB mit einer sehr niedrigen Rauschtemperatur von 30 K. Wie hoch ist das Gütemaß?

Lösung: M in dB/K = 28 - 10 lg 30 = 28 - 10 x 1,48 = 28 - 14,8 = 13,2

Aufgabe 49

Eine Satellitenantenne habe einen relativ hohen Gewinn von 32 dBi und einen perfekt installierten LNB mit einer recht hohen Rauschtemperatur von 55 K. Wie hoch ist das Gütemaß?

Lösung: M in dB/K = 32 - 10 lg 55 = 32 - 10 x 17,4 = 32 - 17,4 = 14,6

Aufgabe 50

Eine Satellitenantenne habe einen mittelmäßigen Gewinn von 30 dBi und einen perfekt installierten LNB mit einer mittelmäßigen Rauschtemperatur von 45 K. Wie hoch ist das Gütemaß?

Lösung: M in dB/K = 30 - 10 lg 45 = 30 - 10 x 16,5 = 30 - 16,5 = 13,5

Wir sehen: Die Gütemaße unterscheiden sich kaum. Das ist bei den gemachten Vorgaben auch logisch. Das Rauschen von Sat-LNBs wird in Dezibel angegeben. Spitzenprodukte erreichen 0,1 dB. Nehmen wir uns nun noch eine moderne Satellitenanlage mit einer 1-m-Schüssel vor:

Aufgabe 51

Eine Satellitenantenne habe einen Gewinn von 40 dBi und einen perfekt installierten LNB mit 0,1 dB Rauschmaß. Wie hoch ist das Gütemaß?

Lösung: $F_{LNB} = 10^{0,01} = 1,023$, $T_{rausch} = (F - 1) \times 290$ K = 0,023 x 290 K = 6,7 K, M in dB/K = 40 - 10 lg 6,7 = 40 - 10 x 0,83 = 40 - 8,3 = 41,7

Diese Spitzenanlage besitzt gegenüber den drei mittelmäßigen Anlagen eine rund dreifach höhere Systemgüte.

6.3 Rauschreduzierung durch Parallelschaltung

Wir wissen bereits, dass man den Rauschabstand durch Addieren (Überlagern) von nacheinander gesendeten identischen Informationen senken kann. Mit jeder Überlagerung verdoppelt sich die Gesamtspannung der Information (korreliert, kein Phasenversatz) , während die gesamte Rauschspannung (unkorreliert, 90° mittlerer Phasenversatz) nur mit Faktor 1,414 zunimmt. Nach zwei Überlagerungen hat sich die Spannung der Information also verdreifacht, die Rauschspannung aber nur verdoppelt.

Ähnlich kann man vorgehen, um das Eigenrauschen des Empfängers im Verhältnis zum Signal zu senken. Das gelingt dann „in Echtzeit“. Dazu teilt man die Information nur auf mehrere parallel geschaltete Empfänger auf, deren Ausgangssignale addiert werden. Nimmt man z.B. drei Empfänger, so ist die Gesamtrauschspannung gegenüber dem Einzelrauschen nur zweimal größer, während das gesamte Signal sich verdreifacht hat.

Eine typische Anwendung sind parallel geschaltete Transistoren. Beispielsweise in Moving-Coil-Verstärkern findet man bis zu zehn Transistoren im Parallelbetrieb. Und ein Trick, der sich in der HiFi-Technik bewährt, sollte auch im HF-Bereich funktionieren. Etwas konkreter für zwei

Rauschbuch.indb 46 26.05.2015 13:55:00

Transistoren wurde es in der „Funk-Technik“ 5/1983 formuliert: „Unter der Voraussetzung, dass die Verstärkung beider Transistoren gleich und ihr Eingangswiderstand groß gegenüber dem Quellwiderstand ist, ist die Signalstromverstärkung dieser Schaltung doppelt so groß wie mit nur einem Transistor. Nun sind aber die Rauschanteile der Kollektorströme beider Transistoren nicht korreliert. Damit ergibt sich ein Gesamtrauschstrom durch den Arbeitswiderstand, der nur um den Faktor 1,414 erhöht ist.“ Somit wurde der Rauschabstand um 3 dB verbessert. Weitere parallelgeschaltete Transistoren würden in noch weiter senken. Wie gut man den rechnerischen Vorteil in der Praxis erlangen kann, hängt in erster Linie noch vom Betriebsstrom ab (s. W. M. Leach).

Aufgabe 52

Wir denken ins Extreme und fragen: Welches Rauschmaß wäre mit einer unendlichen Anzahl parallelgeschalteter identischer Verstärker möglich?

Antwort: 0 dB, denn alles elektronische Rauschen wäre kompensiert

Aufgabe 53

Wir bleiben im Extremen und wollen wissen: Welcher Rauschabstand wäre mit einer unendlichen Anzahl parallelgeschalteter identischer Verstärker möglich?

Antwort: >0 dB, denn das Widerstandsrauschen des gemeinsamen Ausgangswiderstands könnte man nicht senken

6.4 Gesamtrauschen bei Kettenschaltung

Die allereinfachste „Kettenschaltung“ besteht lediglich aus einem realen Generator (z.B. HF-Messgenerator oder Antenne) und einem realen Vierpol, wie einem Verstärker. Jeweils ist thermisches Rauschen vorhanden. Bei einem HF-Generator kann elektronisches Rauschen hinzutreten, bei einer Antenne kommt ganz sicher externes Rauschen (Noise) hinzu. Beides ist äquivalentes Rauschen. Ist der Vierpol ein Verstärker, so produziert er unweigerlich auch elektronisches Rauschen. Dies ist zusätzliches Rauschen.

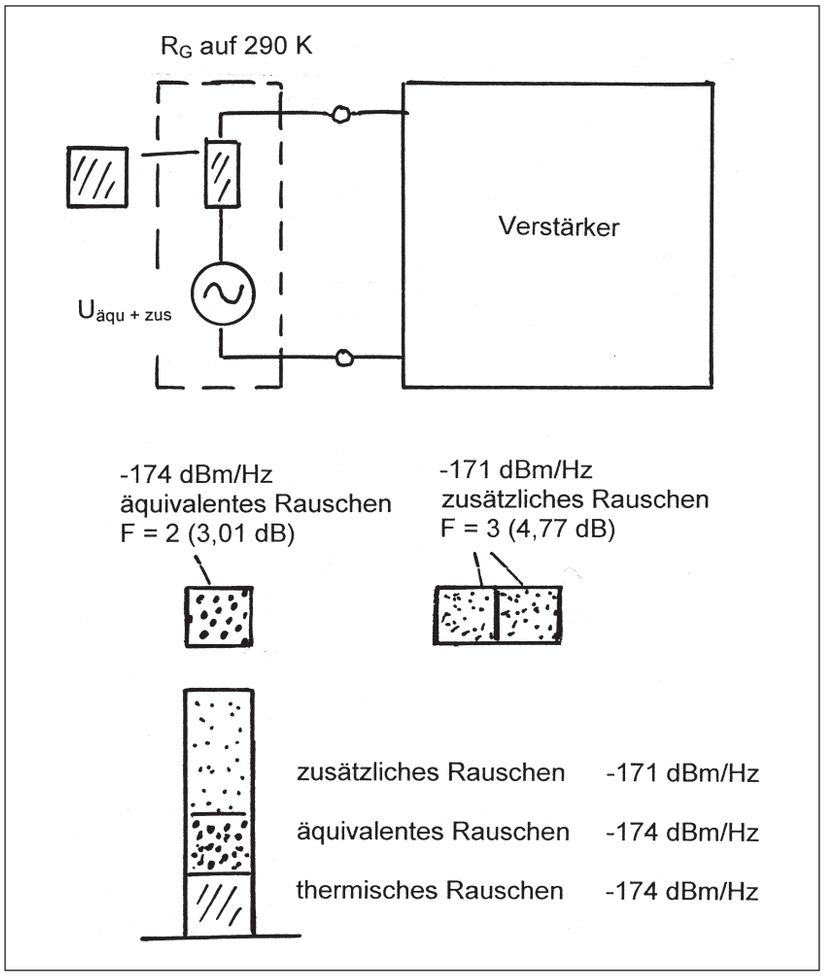

Bild 34: Beispiel einer „Kettenschaltung“ aus Generator und Verstärker

Rauschbuch.indb 47 26.05.2015 13:55:00

Weitere Rauschkenngrößen

Es macht didaktisch aus einem bestimmten Grunde Sinn, zuerst aus den Rauschmaßen der Glieder dieser simplen „Kette“ das gesamte Rauschmaß herzuleiten und erst dann eine einfache Kette aus Generator, Vierpol 1 und Vierpol 2 zu betrachten.

Beginnen wir also mit Bild 34! Die Rauschanteile sind zur Verständniserleichterung als „Leistungspäckchen“ vom Format des Widerstandrauschens -174 dBm/Hz dargestellt. Die unerwünschten Rauschanteile lassen sich leicht im Generatorwiderstand vereint denken. Dann ergeben sich z.B. folgende Zusammenhänge:

$P_{rausch\ äqu} + P_{rausch\ zus}$	$P_{rausch\ therm}$	F
0	1	1 (0 dB)
1	1	2 (3,02 dB)
2	1	3 (4,77 dB)
3	1	4 (6,02 dB)
4	1	5 (6,99 dB)
5	1	6 (7,78 dB)
6	1	7 (8,45 dB)

Auch das äquivalente Rauschen mag so einem Päckchen entsprechen, während das zusätzliche Rauschen zwei Päckchen und somit -171 dBm/Hz entsprechen mag. Dann wird schnell klar, dass dieses „System“ insgesamt mit F = 4 (6,02 dB) rauschen muss. Weiter ist einsichtig:

- Die Ermittlung direkt in Dezibel gelingt nicht, man muss mit Rauschfaktoren arbeiten.
- Der Gesamtrauschfaktor entspricht dem Verhältnis von (äquivalentem + zusätzlichem Rauschen) zu thermischem Rauschen + 1 (Tabelle).
- Die Verstärkung bleibt ohne Einfluss. Dies ist leicht nachvollziehbar, wenn man bedenkt, dass Rauschen wie Signal gleich verstärkt werden.

Nun wollen wir noch einen Verstärker anfügen, s. Bild 35. Hier stellt sich die Frage, wie dessen „Rauschleistungspäckchen“, die sich ja auf seinen eigenen Eingang beziehen, in den Generatorwiderstand zu transformieren sind. Diese Frage ist leicht zu beantworten: Da zwischen Generator und Verstärker 2 der Verstärker 1 liegt, muss man sie be-

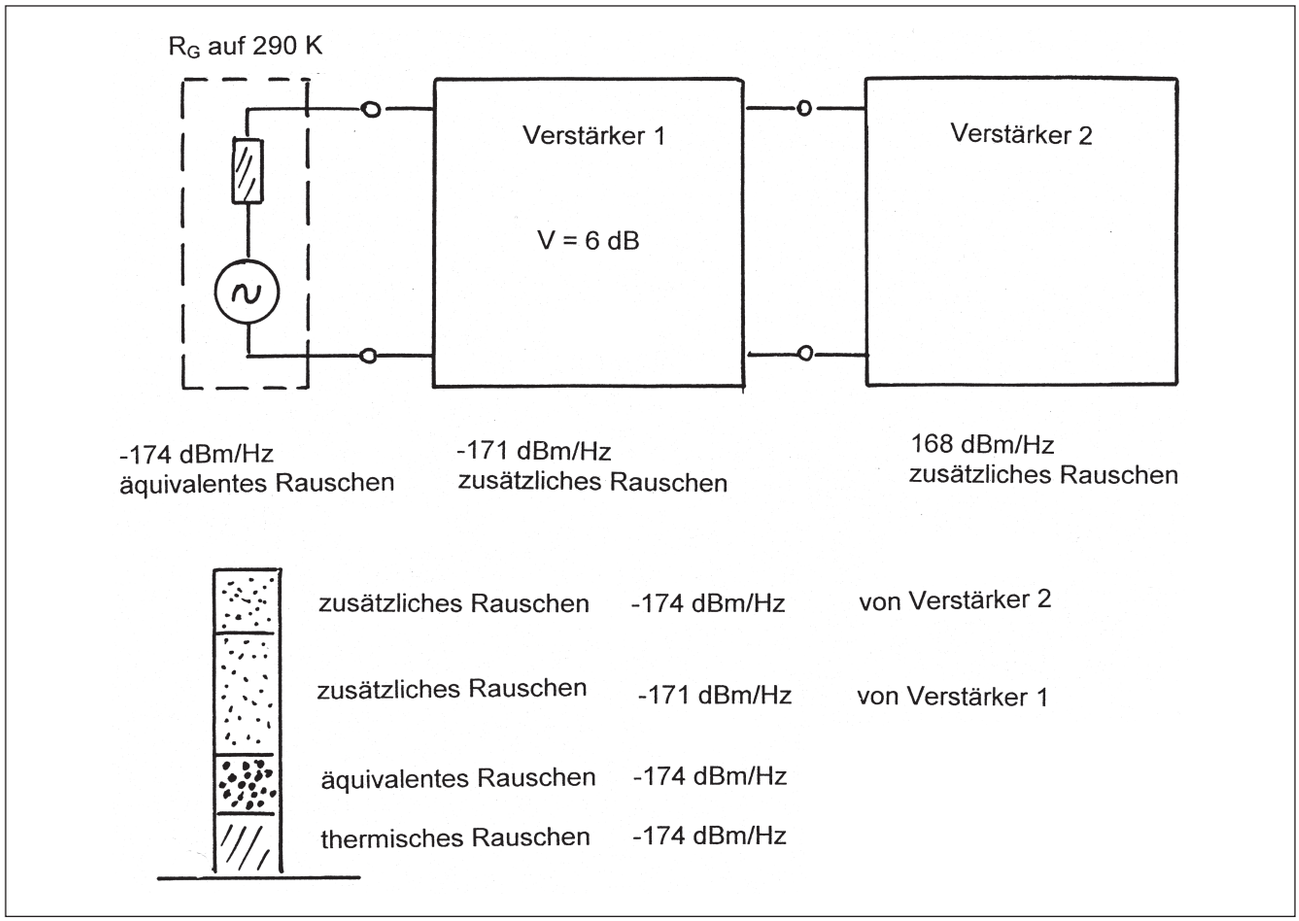

Bild 35: Beispiel einer Kettenschaltung aus Generator und zwei Verstärkern

Rauschbuch.indb 48 26.05.2015 13:55:01

züglich dessen Eingangs bzw. des Generatorwiderstands um die Verstärkung von Verstärker 1 (6 dB) vermindert ansetzen: Für -168 dBm/Hz am Eingangs von Verstärker 2 sind gedanklich nur -168 dBm/Hz - 6 dB = -174 dBm/Hz am Eingang von Verstärker 1 erforderlich.

Wieder ist die Verstärkung des letzten Vierpols nicht erforderlich. Es sollte ersichtlich werden, dass dies für beliebige Ketten gilt. Weiterhin ist leicht erkennbar, dass alle anderen Verstärkungen gebraucht werden. Verständlich ist nun sicher auch der o.g. „bestimmte Grund“ dafür, mit dem einfachsten „System“ zu beginnen: Man versteht so am besten, warum alle Verstärkungen benötigt werden, die letzte aber nicht.

Wir können in die Tabelle oben gehen und enthalten entsprechend der vier „Leistungspäckchen“ für $P_{rauschäqu} + P_{rausch\ zus}$ ein Rauschmaß von 6,99 dB.

Da man in der Praxis Rauschmaße vorliegen hat, geht man hier anders vor. Wie gezeigt, führen Rauschmaße direkt nicht zum Ziel, man muss in Rauschfaktoren zurückwandeln. Mithilfe des Rauschfaktors formuliert, beträgt die gedankliche Rauschreduzierung des Verstärkers 1 für das Zusatzrauschen des Verstärkers 2 $(F_2 - 1) / V_1$. Das führt auf die Formel

$$F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1$$

für eine „Kette“ mit zwei Gliedern.

Aufgabe 54

Berechne den Gesamtrauschfaktor für die Schaltung in Bild 34!

Lösung: $V_1 = 1$, da der Generator nicht verstärkt, $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 2 + (3 - 1) / 1 = 4$

Das stimmt mit unserer Lösung über die „Leistungspäckchen“ überein.

Die Grundlage der Formel kann man verallgemeinern: Der Rauschbeitrag der Stufe X ist $F_X - 1$, vermindert um die gesamte Leistungsverstärkung aller vorgeschalteten Stufen. Damit ergeben sich z.B. folgende Formeln für Kettenschaltungen mit drei und vier Gliedern:

$$F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 + (F_3 - 1) / (V_1 \times V_2)$$

$$F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 + (F_3 - 1) / (V_1 \times V_2) + (F_4 - 1) / (V_1 \times V_2 \times V_3)$$

F ... Rauschfaktoren der einzelnen Glieder
V ... Leistungsverstärkungen der einzelnen Glieder (als Faktoren)

Das erste Glied kann sowohl ein elektronisch rauschender Generator als auch ein beliebiger Vierpol sein (Dämpfungsglied, Puffer, Verstärker). Man betrachtet den Generator wie einen Verstärker mit V = 1. Bei einem Dämpfungsglied ist F = 1, da kein zusätzliches Rauschen erzeugt wird, und V ist gleich dem Kehrwert des Dämpfungsfaktors (z.B. 6-dB-Dämpfungsglied: V = 0,25). Einzige Voraussetzung ist durchgehende Leistungsanpassung.

Aufgabe 55

Zwei Verstärker sind hintereinandergeschaltet: $F_1 = 0{,}7$ dB, $V_1 = 10$ dB, $F_2 = 1{,}8$ dB, $V_2 = 20$ dB. Wie groß ist der Rauschfaktor der gesamten Kette?

Lösung: F_1 als Faktor = $10^{0,07} = 1{,}175$, V_1 als Faktor für die Leistung = $10^1 = 10$, F_2 als Faktor = $10^{0,18} = 1{,}514$, $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 1{,}175 + (1{,}514 - 1) / 10 = 1{,}175 + 0{,}051 = 1{,}226$

Obwohl Verstärker 2 mehr rauscht als Verstärker 1, kann er das Gesamtrauschen nicht wesentlich beeinflussen. Es ist allgemein bekannt und leicht zu begründen, dass das Gesamtrauschen einer Kette im Wesentlichen vom ersten Glied bestimmt wird.

Aufgabe 56

Die obigen Verstärker werden vertauscht: $F_1 = 1{,}8$ dB, $V_1 = 20$ dB, $F_2 = 0{,}7$ dB, $V_2 = 10$ dB. Wie groß ist der Rauschfaktor der gesamten Kette?

Lösung: F_1 als Faktor = $10^{0,18} = 1{,}514$, V_1 als Faktor für die Leistung = $10^2 = 100$, F_2 als Faktor = $10^{007} = 1{,}175$, $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 1{,}514 + (1{,}175 - 1) / 100 = 1{,}514 + 0{,}005 = 1{,}519$

Der Rauschfaktor der gesamten Kette ist praktisch gleich dem Rauschfaktor der ersten Stufe. Das war bereits aufgrund deren recht hoher Verstärkung (= „Einflussreduzierung“ für nachfolgend entstehendes Rauschen) zu erwarten.

Aufgabe 57

In den obigen Zusammenschaltungen wird die Verstärkung der jeweils letzten Stufe halbiert. Wie ändert sich gemäß Theorie der Rauschfaktor der gesamten Kette?

Antwort: Er ändert sich nicht, da die Verstärkung der letzten Stufe ohne Einfluss bleibt. Denn es gibt für diese kein „nachfolgendes Rauschen“, dessen Einfluss sie mitbestimmen würde.

Praktisch könnte das etwas anders aussehen, da mit der

Rauschbuch.indb 49 26.05.2015 13:55:01

Halbierung der Verstärkung leicht auch eine Beeinflussung des Eigenrauschens einhergehen könnte.

Aufgabe 58

Ein elektronisch rauschender Generator (F = 1,5) ist direkt mit einem Verstärker verbunden (F = 1,2, V = 44 dB). Wie groß ist der Rauschfaktor der gesamten Kette?

Lösung: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 1{,}5 + (1{,}2 - 1) / 1 = 1{,}7$ (2,3 dB)

Merke: Durch Vorschalten einer Stufe kann das Rauschmaß nach unten oder oben beeinflusst werden, durch Nachschalten nur nach unten.

6.5 Dämpfungen – Vorsicht, Falle!

Passive Dämpfungsglieder (Kabel, Steckverbinder, Attenuators, Filter mit ihrer Durchgangsdämpfung) erzeugen weder zusätzliches Widerstandsrauschen noch elektronisches Rauschen. Wenn man sie als Stufe definiert, ist der Rauschfaktor also immer 1 (0 dB) und die Verstärkung kleiner als 1 (negativer Dezibel-Wert).

Aufgabe 59

Beurteile die den beiden Leitungen in Bild 36 zugeordneten Daten!

Antwort: Die Verstärkungen sind richtig definiert als negative Dezibel-Angaben, aber das Rauschmaß ist jeweils falsch angegeben und beträgt je 0 dB.

Passive Dämpfungsglieder berücksichtigt man praktischerweise nicht als eigene Stufe, sondern so, dass man die Verstärkung der vorgeschalteten Stufe einfach um die Dämpfung senkt. Somit erhält man eine hohe Übersichtlichkeit.

Aufgabe 60

Der obige Generator (F = 1,5) ist über ein Kabel, das mit 1,1 dB dämpft, mit dem obigen Verstärker verbunden (F = 1,2, V = 44 dB). Wie groß ist der Rauschfaktor der gesamten Kette?

Lösung: 1,1 dB als Leistungsverhältnis $10^{0,11} = 1{,}288$, V also 1/1,288 = 0,776, somit Generator allein $V_1 = 1$ und jetzt mit Kabel $V_1 = 0{,}776$, $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 1{,}5 + (1{,}2 - 1) / 0{,}776 = 1{,}5 + 0{,}2/0{,}776 = 1{,}758$ (2,45 dB)

Aufgabe 61

Würde man das Kabel als eine Stufe mit $F_2 = 1$ und $V_2 = 0{,}776$ auffassen und somit die Rechnung für drei Stufen ausführen, erhielte man das gleiche Ergebnis. Beweise dies!

Lösung: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 + (F_3 - 1) / (V_1 \times V_2) = 1{,}5 + (1 - 1) / 1 + (1{,}2 - 1) / (1 \times 0{,}776) = 1{,}5 + 0 + 0{,}2/0{,}776 = 1{,}758$ (2,45 dB)

Verwunderlich erscheint möglicherweise, dass die Leitung mit ihren 1,1 dB Dämpfung zu einem Anstieg des Gesamtrauschens um nur 0,15 dB geführt hat (von 2,3 dB auf 2,45 dB). Dies muss jedoch im Zusammenhang mit dem S/R (Rauschabstand) gesehen werden. Das Kabel hat nämlich auch die gesamte Leistungsverstärkung und somit Ausgangsleistung um 1,1 dB reduziert. Somit hat sich der Rauschabstand am Ausgang um 1,1 dB - 0,15 dB = 0,95 dB verschlechtert. Dass es nicht 1,1 dB sind, ist dem Eigenrauschen des Verstärkers zu „verdanken“.

Nicht selten sind mehrere dämpfende Leitungen oder Verbindungsstellen (Steckverbinder) zu berücksichtigen. Man zieht dann zweckmäßigerweise alle zusammengehörenden Dämpfungen (meist 1 x Kabel, 2 x Steckverbinder) in Dezibel von der Verstärkung der vorangehenden Stufe ab.

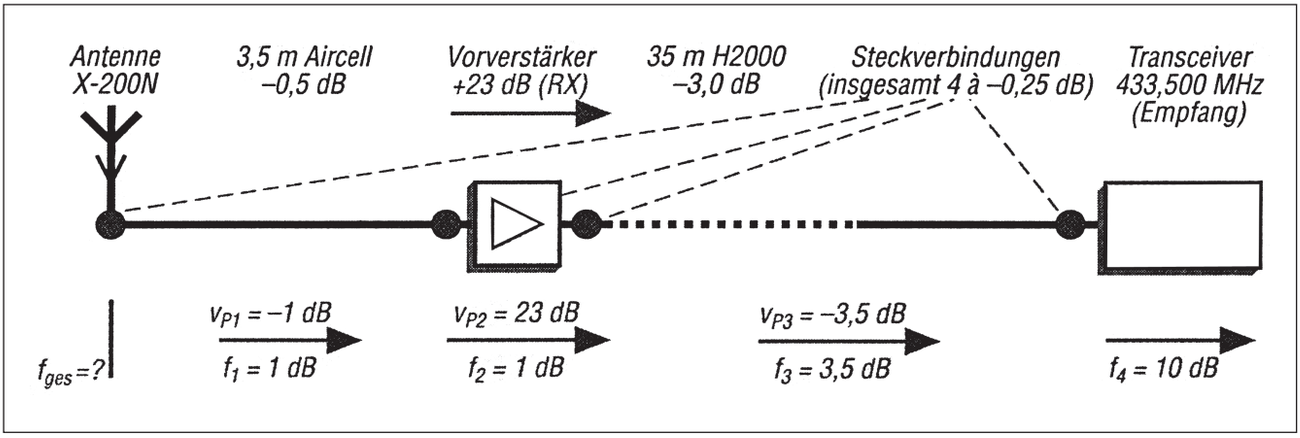

Bild 36: Schema einer 70-cm-Empfangsanlage (Quelle: Hegewald)

Rauschbuch.indb 50 26.05.2015 13:55:01

Aufgabe 62

Bei der Berechnung der Kette in Bild 36 durch W. Hegewald wurden die vier Steckverbinder mit je 0,25 dB Dämpfung als ein 1-dB-Dämpfungsglied zwischen Antenne und Vorverstärker angenommen. Kommentiere dies!

Antwort: Es dürfen nur zusammengehörende Dämpfungen addiert werden. Hier wurde somit unzulässigerweise eine nach dem Vorverstärker auftretende Dämpfung von 0,5 dB vor diesen gelegt.

Aufgabe 63

Stelle eine sinnvolle und korrekte „Datenbasis" zur Berechnung der Kette in Bild 36 zusammen!

Lösung: Es ergeben sich drei Stufen und fünf Faktoren (3 x Rauschfaktor, 2 x Leistungsverstärkung):

- Stufe 1 (Antennenkabel nebst Steckverbindern) $F_1 = 1$, V_1 entsprechend -1 dB + 2 x -0,25 dB = $10^{-0,15}$ = 0,708
- Stufe 2 (Vorverstärker und nachfolgendes Kabel inkl. Steckverbindern) F_2 entsprechend 1 dB = 1,259, V_2 entsprechend 23 dB ±3,5 dB + 2 x -0,25 dB (= 19 dB) 79,43
- Stufe 3 (Transceiver) F_3 entsprechend 10 dB = 10

Zur Berechnung des Gesamtrauschens genügt also die Formel für drei Stufen.

Aufgabe 64

Berechne das Gesamtrauschen mit den Daten aus obiger Aufgabe!

Lösung: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 + (F_3 - 1) / (V_1 \times V_2) = 1 + (1,259 - 1) / 0,708 + (10 - 1) / (0,708 \times 79,43) = 1 + 0,366 + 9/56,24 = 1,526$ (1,84 dB)

In der Regel werden Dezibel-Angaben gemacht. Das lästige Umrechnen in Faktoren kann man vermeiden, wenn man ein Berechnungsprogramm einsetzt. Als Beispiel sei AppCAD von Agilent genannt.

Aufgabe 65

Stelle eine sinnvolle und korrekte „Datenbasis" zur Berechnung der Kette in Bild 36 mit AppCADzusammen!

Lösung: Es ergeben sich drei Stufen und fünf Dezibel-Werte (3 x Rauschmaß, 2 x Verstärkung):

- Stufe 1 (Antennenkabel nebst Steckverbindern) F_1 = 0 dB, V_1 = -1 dB + 2 x -0,25 dB = -1,5 dB
- Stufe 2 (Vorverstärker und nachfolgendes Kabel inkl. Steckverbindern) F_2 = 1 dB, V_2 = 23 dB ±3,5 dB + 2 x -0,25 dB = 19 dB
- Stufe 3 (Transceiver) F_3 = 10 dB

Gibt man diese Werte in AppCAD ein, so erhält man 1,83 dB. Der minimale Unterschied zur Rechnung resultiert aus Rundungen. Der Fehler gegenüber dem unkorrekten Vorgehen beträgt 0,52 dB.

Es dürfte klargeworden sein: Wird in eine Kette ein Dämpfungsglied eingefügt, so ist dessen Auswirkung auf den Rauschfaktor bzw. den Rauschabstand nicht nur vom Dämpfungswert, sondern auch von der Einsatzstelle abhängig. Es ist wichtig, zu erkennen, dass ein solches Glied zwar Signal und zusätzliches Rauschen (Antennenrauschen, elektronisches Rauschen) gleichermaßen reduziert, jedoch nicht das unvermeidliche Widerstandsrauschen.

Betrachten wir dazu einen Extremfall: Eine sehr gut bündelnde UHF-Antenne habe ein Rauschmaß von 0,8 dB. Das bedeutet: Das externe Rauschen ist nur etwa 20% stärker als das Widerstandsrauschen der Antenne ($10^{0,08}$ = 1,2). Diese Antenne empfange ein CW-Nutzsignal, das nur wenig stärker als das Widerstandsrauschen der Antenne sei und daher mit einem Low-Noise-Empfänger gerade noch so gelesen werden kann (S/N z.B. 1 dB). Wird nun z.B. ein 3-dB-Dämpfungsglied zwischen Antenne und Empfänger geschaltet, sacken Außenrauschen und Signalleistung um die Hälfte ab, während das Widerstandsrauschen aber gleich bleibt. Das Signal ist nun nicht mehr lesbar. Würde man das Dämpfungsglied jedoch an den Ausgang des Empfängers legen, wäre die Signalqualität kaum beeinträchtigt, da das verstärkte Rauschen viel, viel höher als das dortige Widerstandrauschen von -174 dBm/Hz wäre. Praktisch hätte man lediglich alles Rauschen wie auch das Signal auf die halbe Leistung gebracht. Immer noch wäre das S/N gerade ausreichend.

6.6 Antennen- und Empfängerrauschen

Kein Empfang ohne Antenne! Wie ist also ein Rauschmaß von 1,83 dB der 433,5-MHz-Empfangsanlage an der einfachen Antenne X-200N zu beurteilen? Dazu muss man das Rauschen der Antenne zum Vergleich heranziehen. Es handelt sich um eine Rundstrahlantenne, also eine schwach bündelnde Antenne.

Aufgabe 66

Veranschlage ein Rauschmaß für die Antenne X-200N mithilfe von Bild 31!

Lösung: Eine schwach bündelnde Antenne hat in Mitteleuropa bei 433,5 MHz gemäß Bild 31 eine Antennenrauschtemperatur von ungefähr 450 K entsprechend einem Rauschfaktor (Rauschmaß) F = 1 + 450 K / 290 K = 2,55 (4,1 dB)

Rauschbuch.indb 51 26.05.2015 13:55:01

Aufgabe 67

Wie ist das Rauschmaß von 1,83 dB der Empfangsanlage im Vergleich zum Antennen-Rauschmaß von 4,1 dB qualitativ zu beurteilen?

Antwort: Die Antenne rauscht etwa 2,3 dB stärker als der Empfänger. Der Empfänger verschlechtert das Gesamtrauschen daher nicht wesentlich.

Aufgabe 68

Begründe die qualitative Aussage rechnerisch!

Lösung: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 2{,}55 + (1{,}526 - 1) = 3{,}076$ (4,88 dB, 4,91 dB mit AppCAD)

Gegenüber der Antenne allein ist das Rauschmaß mit Empfänger nur etwa 0,8 dB schlechter.

Es lässt sich leicht zeigen, dass dies stimmig ist.

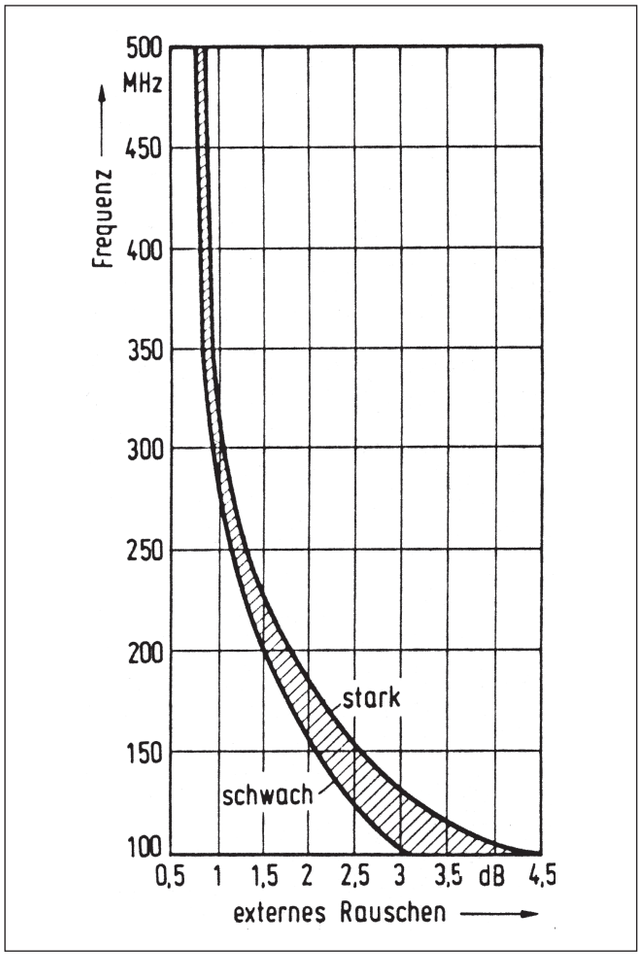

Bild 37: Verlauf des mit einer stark bündelnden, parallel zur Erdoberfläche ausgerichteten Antenne aufgenommenen externen Rauschens (Quelle: E. T. Red)

Bild 37 betrifft das Rauschmaß stark bündelnder, parallel zur Erdoberfläche (0° Elevationswinkel) ausgerichteter Antennen. Bei 433,5 MHz beträgt es demnach etwa 0,8 dB

Aufgabe 69

Prüfe, ob diese Information mit Bild 32 harmoniert!

Lösung: Bild 32 liefert mit seiner oberen Kurve bei 433,5 MHz eine äquivalente Rauschtemperatur von schätzungsweise 60 K. Daraus folgt: $F = 1 + 60\ K / 290\ K = 1{,}21$, $10 \log 1{,}21 = 0{,}83$ (dB)

Die Übereinstimmung ist sehr gut.

Bei einer guten Empfangsanlage ist das Rauschmaß immer deutlich, aber nicht gravierend geringer als das Antennen-Rauschmaß. Mit der 0,8-dB-Antenne entspricht die Empfangsanlage dieser Maxime nicht. Doch wie groß ist das gesamte Rauschmaß nun?

Aufgabe 70

Ermittle das gesamte Rauschmaß mit 0,8 dB Antennen- und 1,84 dB Empfänger-Rauschmaß!

Lösung: F_1 als Faktor = $10^{0{,}08} = 1{,}202$, F_2 als Faktor bekannt mit 1,526, $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 1{,}202 + (1{,}526 - 1) / 1 = 1{,}728$ (2,38 dB, 2,37 dB mit AppCAD)

Das Gesamtrauschen ist rund 1,6 dB höher als das Antennenrauschen. Der Unterschied sollte 1 dB nicht überschreiten. Antenne und Empfangszug harmonieren nicht.

Aufgabe 71

Ist eine Verbesserung der Anlage ohne neue Komponenten zumindest denkbar oder theoretisch möglich?

Antwort: Ja, durch Heranrücken des Vorverstärkers an die Antenne und damit Herabsetzung der dortigen Dämpfung.

Aufgabe 72

Definiere die Dezibel-Werte der gedanklich verbesserten Anlage mit nur 0,25 dB (ein Steckverbinder) zwischen Antenne und Vorverstärker und 5 dB zwischen Vorverstärker und Transceiver!

Lösung: Es ergeben sich wieder drei Stufen und fünf Dezibel-Werte (3 x Rauschmaß, 2 x Verstärkung).

- Stufe 1 (ein Steckverbindern) $F_1 = 0$ dB, $V_1 = -0{,}25$ dB
- Stufe 2 (Vorverstärker und nachfolgendes Kabel inkl. Steckverbindern) $F_2 = 1$ dB, $V_2 = 23$ dB ±5 = 18 dB
- Stufe 3 (Transceiver) $F_3 = 10$ dB

Rauschbuch.indb 52 26.05.2015 13:55:01

Gibt man diese Werte in AppCAD ein, erhält man 1,54 dB. Die Verbesserung beträgt nur 1,83 dB - 1,54 dB = 0,29 dB. Für das gesamte Rauschen (Antenne plus Empfänger) liefert AppCAD 2,12 dB. Auch dies ist gegenüber 2,37 dB ohne Optimierung kaum der Rede wert. Dies lehrt, dass eine nennenswerte Verbesserung hier nur durch minimierte Dämpfung beim Antennenanschluss *und* einen sehr rauscharmen Vorverstärker (z.B. 0,35 dB) zu erzielen ist. In der Praxis dürfte die Lage ein wenig entspannter aussehen, da die Antenne etwas gewöhnlicher gestaltet sein und daher etwas mehr rauschen wird.

6.7 Rauschen und Verstärkung

Rauschfaktor bzw. Rauschmaß haben einen hohen Bekanntheitsgrad. Die Beurteilung von Bauelementen oder Baugruppen, wie Verstärkern und Mischern, bezüglich ihrer Rausch-Performance erfolgt oft lediglich anhand von F. Doch dies greift zu kurz! Denn auch die Verstärkung spielt durchaus eine Rolle bei der objektiven Einschätzung des Rauschens eines Vierpols. Gründe dafür lassen sich leicht finden:

1. Zwei Verstärker mit gleichem F, aber verschiedener Verstärkung können bezüglich des Rauschens nicht als gleichwertig angesehen werden, da sich bei der Angleichung der Verstärkung auch das Eigenrauschen ändern würde. Mit dem Herausnehmen einer Stufe würde man auch Quellen elektronischen Rauschens entfernen bzw. mit dem Hinzufügen einer Stufe einbringen. Die Theorie berücksichtigst dies nicht.

2. Zwei Verstärker mit gleichem F, aber verschiedener Verstärkung können bezüglich des Rauschens nicht als gleichwertig angesehen werden, da verschiedene Verstärkungen das Rauschen aus nachfolgenden Stufen bei der gedanklichen Transformation in den Generatorwiderstand in verschiedenem Maße befördern. Eine hohe Verstärkung reduziert dabei nachfolgendes Rauschen mehr als eine niedrige Verstärkung.

3. Dämpfungsglieder haben unabhängig von ihrer Dämpfung immer den Rauschfaktor 1. Gemäß diesem Kriterium allein sind sie also alle gleichwertig. Es ist aber leicht einsichtig, dass eine große Dämpfung in der Nähe des Widerstandsrauschens das S/R wesentlich mehr beeinträchtigt als eine kleine Dämpfung. Grundsätzlich gilt: geringe Dämpfung – geringe S/R-Beeinträchtigung, hohe Dämpfung – hohe S/R-Beeinträchtigung.

In der Theorie beschäftigt man sich mit der Frage, in welcher Reihenfolge man verschiedene Vierpole hintereinanderschalten muss, damit F_{gesamt} minimal wird. Die Antwort gibt folgende Formel:

$$M = (F - 1) / (1 - 1/V)$$

F ... Rauschfaktor des Verstärkers
V ... Leistungsverstärkung als Faktor

Zur Erzielung des minimalen Gesamtrauschens müssen die Stufen entsprechend M in aufsteigender Reihenfolge hintereinandergeschaltet werden.

Den Buchstaben M kennen wir bereits vom Gütemaß (Figure of Merit) her, die hier dahinterstehende Größe wird m.E. recht unglücklich ebenfalls als Rauschmaß bezeichnet. Dies wohl deshalb, weil Werte unter 1 möglich sind. Dennoch ist eine solche Doppelbenennung und zudem hier das Fehlen des Verhältnismaßes Dezibel irritierend.

Ein weiteres Manko ist, dass bei geringen Rauschfaktoren recht kleine Werte (0,0...) zustande kommen. Das wiegt in der heutigen Zeit mit ihren teils sehr rauscharmen Komponenten besonders stark. Hinzu kommt: In der Praxis bestimmt nicht das Rauschmaß M die Staffelung, sondern diese liegt aufgrund anderer, wichtigerer Kriterien, wie Verstärkung, Ausgangsleistung und Aussteuerbarkeit, sowieso schon fest.

Fassen wir noch einmal die Schwachpunkte dieser etablierten Herangehensweise zusammen:

- Bezeichnungen „M“ und „Rauschmaß“ bereits vergeben
- Bezeichnung „...maß“ irritierend, da hier Zahlenwert
- „unhandliche“ Ergebnisse möglich
- übliche Anwendung (Kettenschaltung) rein akademisch

Ich unterbreite daher im Folgenden einen Verbesserungsvorschlag.

6.8 Rauschgüte und effektives Rauschmaß

Man darf bei der obigen Formel nicht vergessen oder sollte überhaupt erst sehen, dass sie mit der Anordnungsreihenfolge für eine rauschoptimale Kette auch treffsicher darüber informiert, wie ein Vierpol über sein Eigenrauschen hinaus, nämlich unter Einbeziehung von Verstärkung oder Dämpfung, rauschmäßig zu beurteilen ist. Dies ist für die Praxis von Bedeutung, im Gegensatz zur Reihenfolge einer Kette. Für eine solche umfangreichere Beurteilung ist der Begriff „Güte“ zuständig. Wir haben bei der Systemgüte bereits erfahren, dass hier mehrere Faktoren verknüpft werden. Im Gegensatz zu Rauschfaktor/Rauschmaß sind bei der Güte höhere Werte die besseren. Das alles veranlasst dazu, einfach den Kehrwert der obigen Formel beispielsweise als Rauschgüte Q_{rausch} einzuführen:

$$Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1)$$

Rauschbuch.indb 53 26.05.2015 13:55:01

V ... Leistungsverstärkung als Faktor
F … Rauschfaktor des Verstärkers

Den Ausdruck bezeichnet man übrigens als Zusatzrauschfaktor. Er gibt den Anteil des zusätzlichen Rauschens an. Das ist die tragfähige Basis zur Gütedefinition. Die 1 kann man also nicht weglassen.

Die Rauschgüte bringt den puren Rauschfaktor mit der Verstärkung in Beziehung, ebenso wie der effektive Interceptpunkt dritter Ordnung den isolierten IP3 mit dem Rauschmaß in eine Beziehung setzt. In beiden Fällen wird dadurch zumindest die praktische Bedeutung erhöht, denn die Aussagekraft der neugebildeten Größen ist für die Anwendungspraxis wertvoller als die der alleinstehenden.

Ein Vergleich anhand von Q_{rausch} ist nur fair bei gleicher Frequenz, da F (und meist auch V) frequenzabhängig ist.

Wir betrachten beispielsweise zwei reale 2-m-Vorverstärker mit besonders geringem Eigenrauschen:

- LNA 200 (z.B. bei SSB Electronic, Bild 38): Rauschmaß 0,25 dB, Verstärkung 24 dB
- LNA 145 (z.B. bei UKW-Berichte, Bild 39): Rauschmaß 0,2 dB, Verstärkung 23 dB

Bild 38: Der moderne Vorverstärker LNA 200

Die Formel verlangt die Umwandlung von Dezibel in Leistungsfaktoren.

Aufgabe 73
Wandle die vier Dezibel-Angaben in Leistungsfaktoren um!
Lösung: LNA 200: $10^{0,025} = 1,059$, $10^{2,4} = 251$, LNA 145: $10^{0,02} = 1,047$, $10^{2,3} = 200$

Aufgabe 74
Errechne die Rauschgüte für den LNA 200!
Lösung: $Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/251) / (1,059 - 1) = 0,996/0,059 = 16,88$

Aufgabe 75
Errechne die Rauschgüte für den LNA 145!
Lösung: $Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/200) / (1,047 - 1) = 0,005/0,047 = 21,17$

Obwohl das 0,5 dB geringere Rauschmaß des LNA 145 mit einer 1 dB geringeren Verstärkung gekoppelt ist, hat er doch die Nase vorn.

Hier wird keine messbare Größe ermittelt, sondern eine Hilfsgröße für objektive Vergleiche. Es hat daher auch keinen Sinn, in Dezibel umzuwandeln.

Aufgabe 76
Berechne die Rauschgüte eines Verstärkers mit F = 2 und V (Leistung) = 9!
Lösung: $Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/9) / (2 - 1) = 0,889$

Bild 39: Der moderne Vorverstärker LNA 144 A

Rauschbuch.indb 54 26.05.2015 13:55:01

Aufgabe 76

Berechne die Rauschgüte eines Verstärkers mit F = 2 und V (Leistung) = 9!

Lösung: Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/9) / (2 - 1) = 0,889

Aufgabe 77

Berechne die Rauschgüte eines Verstärkers mit F = 2,0125 und V (Leistung) = 10!

Lösung: Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/10) / (2,0125 - 1) = 0,889

Rauschfaktor 2 entspricht Rauschmaß 3 dB, Leistungsverstärkung 10 entspricht nur 10 dB, und diese doppelte „Underperformance“ gegenüber den obigen Spitzenverstärkern äußert sich in einer signifikant geringeren Rauschgüte.

Aufgabe 78

Die Verstärker haben trotz verschiedener Rauschfaktoren und Verstärkungen die gleiche Rauschgüte. Was bedeutet das?

Antwort: Die Verstärker sind bezüglich Rausch-Performance gleichwertig. Der eine leistet in einem System bezüglich S/R genau das Gleiche wie der andere. In Kaskade ergibt sich unabhängig von der Reihenfolge der gleiche Rauschfaktor.

Aufgabe 79

Beweise die letzte Aussage!

Beweis: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 = 2 + (2,0125 - 1) / 9 = 2,0125 + (2 - 1) / 10 = 2,1125$

Da die Rauschgüte auf stimmiger Theorie beruht, waren Unklarheiten nicht zu erwarten.

Man kann sich eine Empfangsanlage zusammengesetzt aus folgenden Komponenten denken:

- Antenne mit externem Rauschen (= äquivalentes Rauschen)
- Antennenzuleitung mit ihrer Dämpfung
- Empfänger mit elektronischem Rauschen (= zusätzliches Rauschen)

Addiert man die entsprechenden Dezibel-Werte, erhält man das sogenannte effektive Rauschmaß. Es ist ebenfalls eine Hilfsgröße und soll das Rauschen der gesamten Anlage auf den Punkt bringen.

Beispiel:

- Antenne F = 1,5 bzw. 1,76 dB
- Zuleitung D = 1,3 bzw. 1,14 dB
- Empfänger F = 1,1 bzw. 0,41 dB

Aufgabe 80

Wie groß ist das effektive Rauschmaß im Beispiel?

Lösung: 1,76 dB + 1,14 dB + 0,41 dB = 3,31 dB

Aufgabe 81

Berechne den gesamten Rauschfaktor für das Beispiel!

Lösung: $F_{ges} = F_1 + (F_2 - 1) / V_1 + (F_3 - 1) / (V_1 \times V_2)$ wird zu $F_{ges} = F_{Ant} + (1 - 1) / 1/D + (F_{RX} - 1) / (1 \times 1/D)$ = 1,5 + 0 + (1,1 - 1) / 1/1,3 = 1,5 + 0,1/0,769 = 1,5 + 0,13 = 1,63 (2,12 dB, AppCAD bestätigt)

Der Unterschied zwischen effektivem Rauschmaß (Hilfsgröße) und wirklichem gesamten Rauschmaß (messbar) beträgt über 1 dB. Das effektive Rauschmaß erscheint daher lediglich als schnell ermittelbare Hilfsgröße und kann keinesfalls das z.B. mit AppCAD bequem und zuverlässig ermittelbare Gesamtrauschmaß ersetzen. Das effektive Rauschmaß kann es natürlich auch nicht mit der Rauschgüte aufnehmen, da – wie sich leicht beweisen ließe – die simple Dezibel-Addition von Rauschmaßen und einer Dämpfung auf keinen wirklich sinnvollen Ansatz zurückzuführen ist. Mathematik zu betreiben, ist zwar oft möglich, aber immer nur dann zielführend, wenn der Ansatz Sinn macht.

Merke: Rauschgüte und effektives Rauschmaß sind zwei verschieden Paar Schuh´. Der effektive Rauschfaktor ist eine wertvollere Hilfsgröße als das effektive Rauschmaß.

Besonders gut lässt sich dies bei der Betrachtung von Dämpfungsgliedern zeigen:

Aufgabe 82

Wie groß ist das effektive Rauschmaß eines Attenuators mit 20 dB?

Antwort: 20 dB

Das tatsächliche Rauschmaß ist aber 0 dB, da kein Rauschen über das Widerstandsrauschen hinaus erzeugt wird.

Rauschbuch.indb 55 26.05.2015 13:55:01

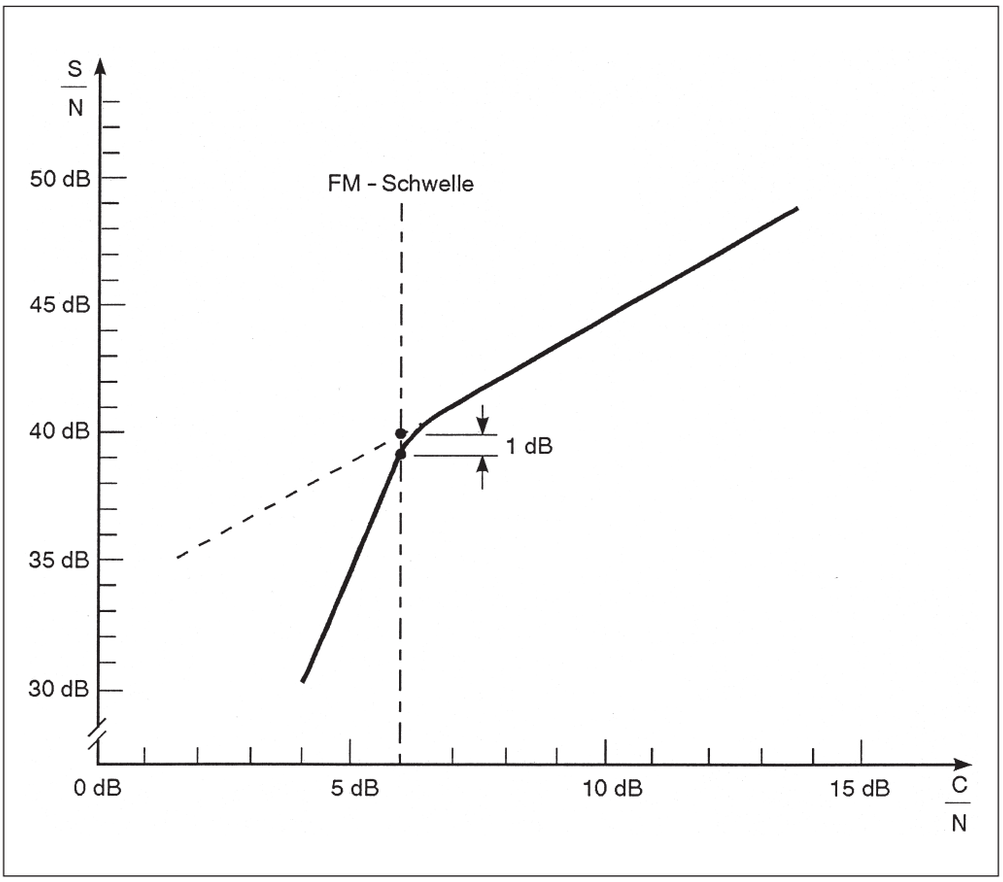

Bild 40: Unter der FM-Schwelle steigt das S/N mit C/N-Erhöhung zwar steiler als darüber, jedoch ist es stets deutlich größer als das C/N (Quelle: Freyer).

Aufgabe 83

Wie groß ist die Rauschgüte eines Attenuators mit 20 dB?

Lösung: 20 dB entspricht einer Leistungsverstärkung von 0,01, Q_{rausch} = (1 - 1/V) / (F - 1) = (1 - 1/0,01) / 1 - 1) = -99/0, das ist mathematisch nicht definiert

Das effektive Rauschmaß führt bei einem Dämpfungsglied völlig in die Irre, während die Rauschgüte eines Dämpfungsglieds nicht ermittelbar ist, was weder theoretisch noch praktisch stören dürfte.

6.9 Hürde für das Rauschen: die FM-Schwelle

Die besonders auf Kurzwelle anzutreffenden Betriebsarten SSB (J3E) und CW (A1A) kann man als lineare Modulationsverfahren bezeichnen. Das heißt: Wird die AGC außer Betrieb gesetzt, steigt das Empfänger-Ausgangssignal proportional mit dem Eingangssignal. Auch das Signal/Rausch-Verhältnis nimmt dann kontinuierlich zu. Die Empfindlichkeit bei solchen Betriebsarten lässt sich sehr gut mit dem Rauschmaß kennzeichnen.

Anders ist dies bei FM. Diese Modulationsart darf man schon deshalb nicht als linear bezeichnen, weil hier eine sogenannte FM-Schwelle vorhanden ist: Der Signal/Rausch-Abstand am Demodulatorausgang folgt bei Erhöhung des Trägers am Demodulatoreingang nicht direkt dem dortigen Träger/Rausch-Abstand (Carrier-to-Noise Ratio CNR oder C/R), sondern die Kurve hat einen Knick (Bild 40). Erst wenn der Träger diese Schwelle quasi überschritten hat, erreicht das Ausgangssignal eine akzeptable Qualität, die mit weiterer Erhöhung nicht mehr wesentlich ansteigt. Die FM-Schwelle ist per Definition ein theoretischer Wert, der 1 dB über dem S/N liegt, bei dem die Nichtlinearität einsetzt.

Nicht übersehen sollte man: Das Signal/Rausch-Verhältnis ist nach der Demodulation deutlich größer als zuvor, egal, ob unter oder über der Schwelle! Man spricht vom Modulationsgewinn.

Machen wir den Effekt anhand dreier C/N-Werte aus Bild 40 transparent:

C/N	S/N	Modulationsgewinn
5 dB	35 dB	30 dB
10 dB	43 dB	33 dB
15 dB	54 dB	39 dB

Rauschbuch.indb 56 26.05.2015 13:55:02