Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 44 (1966)

Heft: 12

Artikel: Geräusch und Geräschmessungen auf Nachrichtenübertragungsanlagen : ein Überblick

Autor: Pfyffer, Hans Karl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874595

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Hans Karl PFYFFER, Bern

621.391.822:621.395

Geräusch und Geräuschmessungen auf Nachrichtenübertragungsanlagen

Ein Überblick

Zusammenfassung. *Geräusche auf Nachrichten-Übertragungsanlagen erschweren oder verunmöglichen die Auswertung der empfangenen Signale. Einige der möglichen Geräuscharten werden aufgeführt, ihre Ursache kurz erklärt und auf Messmethoden hingewiesen. Schliesslich wird erläutert, wie die heute allgemein verwendeten Geräuschnormen aufgestellt wurden.*

Résumé. *Les bruits qui apparaissent sur les installations de télécommunication compliquent ou empêchent l'utilisation des signaux reçus. On mentionne ici quelques-uns des genres de bruits possibles, on en explique les causes en exposant les méthodes employées pour les mesurer. On montre enfin comment sont établies les normes de bruit actuellement en usage.*

Riassunto. *I rumori sugl'impianti di telecomunicazione complicano o rendono impossibile l'utilizzazione dei segnali ricevuti. Vengono menzionati alcuni generi di rumori possibili, la loro causa viene succintamente spiegata e i metodi di misura vengono indicati. Si espone infine come sono state stabilite le norme di rumore attualmente in uso.*

1. Einleitung

Unter den Begriff Geräusch bei der Nachrichtenübertragung fallen eine Reihe von Störungen, die die Auswertung der empfangenen Signale erschweren oder gar unmöglich machen.

Die Geräusche können von kontinuierlichem, intermittierendem, sich im Sprachrhythmus änderndem oder impulsivem Charakter sein. Als Geräuschquellen seien erwähnt:

1. Thermische Bewegung der Elektronen (thermisches Rauschen).
2. Schrot-Rauschen ist durch die korpuskulare Natur der elektrischen Ladungsträger bedingt.
3. Intermodulationsgeräusch entsteht durch Zusammenwirken der durch Nichtlinearitäten verursachten Kombinationstöne.
4. Nebensprechgeräusch kann durch ungenügende Unterdrückung unerwünschter Modulationsseitenbänder entstehen (variiert im Sprachrhythmus).
5. Impulsive Geräusche (z. B. Knackgeräusche) können durch Einkopplung von Schaltvorgängen auf benachbarten Leitungen entstehen.
6. Quantisierungsgeräusch, dadurch verursacht, dass bei PCM-Anlagen nur eine beschränkte Zahl Amplitudenstufen übertragen wird.

Die verschiedenen Arten von Geräuschen sollen nun etwas näher betrachtet werden.

2. Thermisches Rauschen [1, 2, 3]

Dieses wird hervorgerufen durch die thermische Bewegung der Elektronen in den Leitern und Halbleitern. Die thermische Bewegung gehorcht statistischen Gesetzen. Durch die Bewegung der Elektronen wird eine Spannung erzeugt. Die Wahrscheinlichkeit dP, dass die momentane Rauschspannung zwischen den Werten e und $e+de$ liegt, ist durch folgende Gleichung gegeben

$$dP = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, e_0} \exp\left(-\frac{e^2}{2e_0^2}\right) \qquad (1)$$

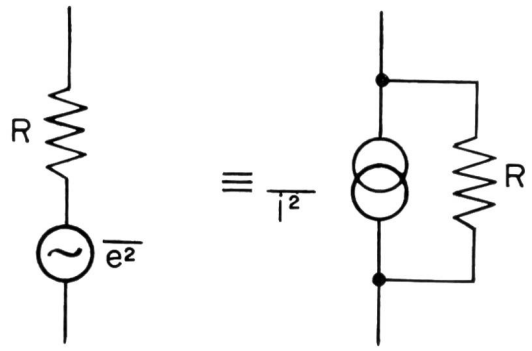
(Gausssche Kurve, Normalverteilung).

e_0 ist der Effektivwert der Spannung. Die Wahrscheinlichkeit P, dass der Betrag $|e|$ der Rauschspannung einen Wert e_1 überschreitet, ist durch die Beziehung

$$P = 2\int_{e_1}^{\infty} dP \qquad (2)$$

gegeben.

Ein Widerstand, der naturgemäss mit Rauschen behaftet ist, kann durch das Ersatzschema in *Figur 1*



$\overline{e^2} = 4\,kTR\,df \qquad \overline{i^2} = \frac{4\,kT}{R}\,df$

$k = 1{,}374 \cdot 10^{-23}$ Joule/°K
T in °K
df in Hertz

Fig. 1
Thermisches Rauschen eines Widerstandes

dargestellt werden. Darin ist der Widerstand rauschfrei und die Rauschspannung durch eine Spannungsquelle dargestellt. Nach *Thévénin* kann die Spannungsquelle durch eine Stromquelle ersetzt werden.

Die Energie im Spektrum des Rauschens ist gleichmässig über das ganze Frequenzband verteilt, vorausgesetzt, dass der Widerstand mit keinen Reaktanzen behaftet ist. Eine weitere Voraussetzung für die Gültigkeit der Angaben ist das thermische Gleichgewicht.

3. Schrot-Rauschen

Diese Art von Rauschen rührt davon her, dass ein Strom nicht kontinuierlich, sondern korpuskulär ist,

das heisst er besteht aus sich vorzugsweise in einer Richtung fortbewegenden Elektronen. Die Zahl der Elektronen und damit der fliessende augenblickliche Strom ist in zwei sich aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten nicht gleich. Zeitlich gesehen fluktuiert der Strom um einen Mittelwert. Die Variation gehorcht den Gesetzen einer Normalverteilung. Der quadratische Mittelwert $\overline{i_0^2}$ des dem Gleichstrom überlagerten Rauschstromes ist gegeben durch

$$\overline{i_0^2} = 2\,qI\mathrm{d}f \tag{3}$$

wobei q = $1{,}59 \cdot 10^{-19}$ Coulomb (Ladung des Elektrons)
I = Gleichstrom
$\mathrm{d}f$ = Bandbreite

Das Schrot-Rauschen wird zum Beispiel bei einer Diode im Sättigungsgebiet angetroffen. Alle von der Kathode emittierten Elektronen fliessen zur Anode. Der Gleichstrom ist durch die Kathodentemperatur bestimmt. Bei einer Pentode oder einem Transistor tritt ebenfalls Schrot-Rauschen auf.

4. Flicker-Rauschen [4, 5]

Messungen des Rauschverhaltens von Transistoren und Röhren zeigen, dass das Rauschen bei tiefen Frequenzen viel stärker ist als bei hohen. Es ist oft proportional dem Quadrat des fliessenden Gleichstromes und umgekehrt proportional der Frequenz oder dem Quadrat der Frequenz.

Bei Röhren wird angenommen, dass Vorgänge auf der Kathodenoberfläche für das Flicker-Rauschen verantwortlich sind. Bei Transistoren sind es zum Teil die Verhältnisse auf der Kristalloberfläche, die diese Art von Rauschen bestimmen, wie Restströme und Oberflächenrekombination. Planartransistoren sind infolge ihrer durch eine Oxydschicht geschützten Oberfläche vorteilhafter in bezug auf das Flicker-Rauschen.

5. Verteilungsrauschen

Bei Transistoren teilt sich bekanntlich der Emitterstrom auf in den Basisstrom und den Kollektorstrom. Das Aufteilungsverhältnis hat infolge der korpuskulären Natur des Emitterstromes eine variable Komponente, die als veränderlichen Anteil des Kollektorstromes in die Rechnung einbezogen werden kann. Die Komponente des Verteilungsrauschens kann dargestellt werden durch den Ausdruck

$$\overline{i^2_{\text{vert.}}} = 2\,q\,\alpha\,I_e \left(1 - \frac{|\alpha|^2}{\alpha}\right) \mathrm{d}f \tag{4}$$

Dabei sind α der Stromverstärkungsfaktor des Transistors (Verhältnis von Kollektor- zu Emitterstrom)
I_e Emittergleichstrom

6. Der Rauschfaktor

6.1 Definition

Jeder Verstärker besteht ausser den aktiven Elementen (Röhren und Transistoren) aus einer Reihe von passiven Elementen (Widerstände, Kondensatoren, Transformatoren und Spulen). Die passiven Bauteile haben unter Umständen einen entscheidenden Einfluss auf das Rauschverhalten eines Verstärkers und müssen neben den aktiven Elementen mitberücksichtigt werden. In Verstärkern, wie sie für die Übertragungstechnik verwendet werden, wird das Verstärkerrauschen oft massgebend beeinflusst durch die Netzwerke, die die Eingangsimpedanz, die Gegenkopplung sowie die Arbeitspunkteinstellung der Eingangsstufe bestimmen.

Der Rauschfaktor F gilt als Qualitätsangabe eines Verstärkers und ist folgendermassen definiert

$$F = \frac{\text{Gesamte am Ausgang vorhandene Rauschleistung}}{\text{Thermisches Rauschen der Quellenimpedanz am Ausgang}}$$

Die folgenden Betrachtungen seien anhand von *Figur 2* durchgeführt. Es wird angenommen, dass

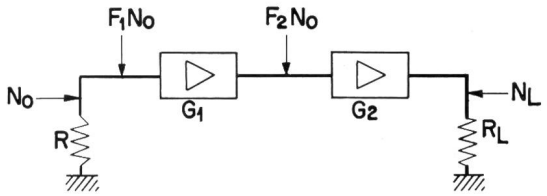


Fig. 2
Zur Definition des Rauschfaktors

die Verstärker G_1 und G_2 an sich rauschfrei sind. Das von ihnen in Wirklichkeit erzeugte Rauschen wird auf den Eingang jedes Verstärkers bezogen und dort eingespeist.

Die Rauschleistung, die von einem Widerstand R, der mit einer Rauschquelle $\overline{e^2}$ behaftet ist, an einen zweiten, rauschfrei gedachten Widerstand der gleichen Grösse abgegeben wird, ist durch folgende Gleichung gegeben

$$N_0 = \frac{\overline{e^2}}{4\,R} = k\,T\,\mathrm{d}f \tag{5}$$

(unter Zuhilfenahme der in Fig. 1 angegebenen Beziehungen).

Diese Leistung ist von R unabhängig. (Bei 300° K und einer Bandbreite von 4 kHz beträgt die Leistung $1{,}65 \cdot 10^{-14}$ Watt oder –138 dBm.)

Unter Anwendung der Definition von F wird die Rauschleistung der ersten Verstärkerstufe am Ausgang zu $F_1 \cdot N_0 \cdot G_1 \cdot G_2$ errechnet und die Rauschleistung der zweiten Stufe zu $F_2 \cdot N_0 \cdot G_2$.

Die Rauschzahl F des Verstärkers ist somit

$$F = 1 + F_1 + \frac{1 + F_2}{G_1} \tag{6}$$

Die Gleichung zeigt, dass die zweite Stufe in bezug auf ihren Beitrag zum Verstärkerrauschen nicht vernachlässigt werden darf, wenn die Verstärkung der ersten Stufe klein ist.

6.2 Messung des Rauschfaktors

Der Rauschfaktor F kann auf zwei Arten gemessen werden:

1. *Direktmessung.* Der Rauschpegel kann am Ausgang des Verstärkers mit einem Effektivwert-Voltmeter gemessen werden. Die Leistung ist gegeben durch die Gleichung

$$N_L = F \cdot N_0 \cdot G_1 \cdot G_2 = F \cdot kT \cdot df \cdot G_1 \cdot G_2 \qquad (7)$$

   Bei bekannter Temperatur T und bekannter Verstärkung $G_1 \cdot G_2$ und Messbandbreite df kann F bestimmt werden.

2. *Indirekte Messung.* Man verwendet die Schrot-Rauscheigenschaft einer gesättigten Diode. Im Sättigungsgebiet stellt die Diode eine hohe Impedanz dar (die durch die Elektrodenkapazität begrenzt ist). Die Diode kann somit als Stromquelle für Rauschen verwendet werden.
   An den Ausgang des Verstärkers wird ein Effektivwert-Voltmeter [23] angeschlossen und die Anzeige abgelesen. Daraufhin wird von der gesättigten Diode ein Strom an den Verstärkereingang gegeben, der so eingestellt wird, dass die gesamte am Verstärkerausgang vorhandene Rauschleistung verdoppelt wird (3 dB höhere Anzeige am Voltmeter). Das bedeutet, dass die zusätzliche, aus der Diode herrührende Rauschleistung gleich gross ist wie die Rauschleistung des Verstärkers. Durch Messung des Diodengleichstromes kann die Diodenrauschleistung ermittelt werden.
   Unter Zuhilfenahme von (3) und (7) ergibt sich der Rauschfaktor

$$F = \frac{q}{2kT} RI \qquad (8)$$

   Bei 290° K ist $F = 20\, IR$, wobei I in Ampère und R in Ohm einzusetzen ist.

Voraussetzung für die Richtigkeit der Formel ist, dass der Verstärker an die Quelle angepasst ist.

6.3 Das Rauschen einer Transistorverstärkerstufe

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Arten von Rauschen kann ein Ersatzschema einer Transistorverstärkerstufe gezeichnet werden; ein solches ist in *Figur 3* dargestellt.

Wird die Stufe von einem Quellenwiderstand R_s gespeist, dann lässt sich der Rauschfaktor errechnen [4, 5, 6].

$$F = 1 + \frac{\overline{e^2_{br}}}{\overline{e^2_{sr}}} + \frac{\overline{i^2_{er}}\,|Z_{ee}|^2}{\overline{e^2_{sr}}} + \frac{\overline{i^2_{cr}}}{\overline{e^2_{sr}}} \cdot \frac{|Z_{ee} + r_{bb}' + R_s|^2}{|\alpha|^2} \qquad (9)$$

Der Kollektorrauschstrom i_{cr} ist vielfach für eine erste Abschätzung der Rauschzahl F vernachlässigbar. F wird dann angenähert

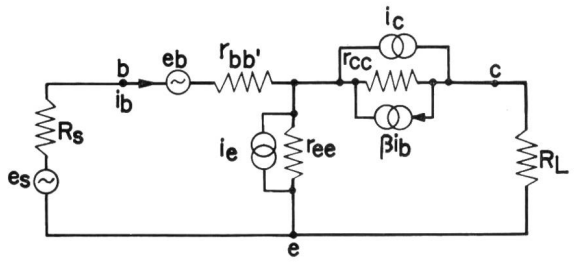
$$F \simeq 1 + \frac{r_{bb}'}{R_s} + \frac{kT}{2\,q\,R_s\,I_e} \qquad (10)$$

(unter Berücksichtigung, dass bei tiefen Frequenzen $Z_{ee} = r_{ee} = \frac{kT}{q\,I_e}$).

Für eine genauere Untersuchung müssen alle Komponenten von F in Gleichung (9) berücksichtigt werden. F ist abhängig vom Quellenwiderstand, dem fliessenden Gleichstrom und der Frequenz.

Bis jetzt wurde stillschweigend angenommen, dass die Impedanz im Basiskreis des Transistors aus einem einzigen Widerstand besteht. Dies ist in vielen Fällen nicht zutreffend. Einen möglichen Fall zeigt *Figur 4*. Der Rauschfaktor kann ermittelt werden (unter Berücksichtigung, dass die Signale der einzelnen Quellen in der Last leistungsmässig addiert werden müssen) und ist in Gleichung (11) dargestellt.

$$F \simeq \left[2\left(\frac{R_D + 2\,R_s}{R_D}\right)\right]\left[1 + \frac{r_{bb}'}{R_s'} + \frac{q\,r_{ee}^2\,I_e}{2\,kT\,R_s'}\right] \qquad (11)$$



$\overline{e^2_b} = 4\,kTR_{bb}\,df$ (thermisches Rauschen des Basiswiderstandes)

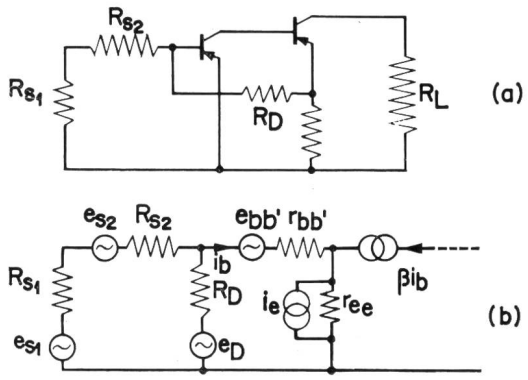
$\overline{i^2_e} = 2\,qI_{co}\,df + 2\,q\,\alpha_o\left(1 - \frac{|\alpha|^2}{\alpha}\right) \cdot I_e\,df + \frac{k_2}{f}\,df$

(Kollektorstrom – Schrot-Rauschen + Verteilungsrauschen + Flicker-Rauschen)

$\overline{e^2_s} = 4\,kTR_s\,df$ (thermisches Rauschen des Quellenwiderstandes)

Fig. 3

Ersatzschaltbild eines Transistors mit Rauschquellen



a) Beispiel eines typischen Verstärkers
b) Ersatzschaltbild des Verstärkereinganges für Betrachtung des Rauschverhaltens

Fig. 4

Ersatzschaltbild eines Verstärkers zur Ermittlung des Rauschfaktors

In der ersten eckigen Klammer ist der Anteil des Eingangsnetzwerkes, in der zweiten jener der Transistorstufe enthalten. Dabei gilt

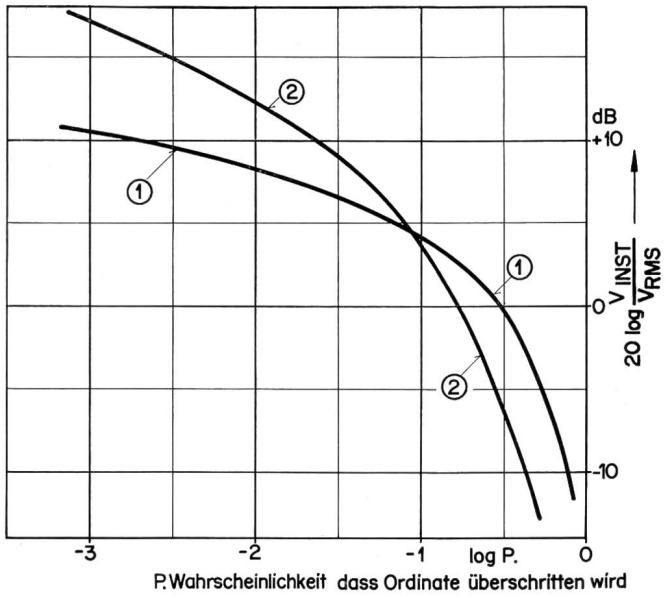
$$R_s' = \frac{2\,R_D\,R_s}{R_D + 2\,R_s} \qquad (12)$$

R_D und R_{s_2} können zur Einstellung des Arbeitspunktes, zur Bestimmung der Gegenkopplung oder der Eingangsimpedanz verwendet werden. In analoger Weise kann F für beliebige Netzwerke gerechnet werden.

7. Die Sprachsignale

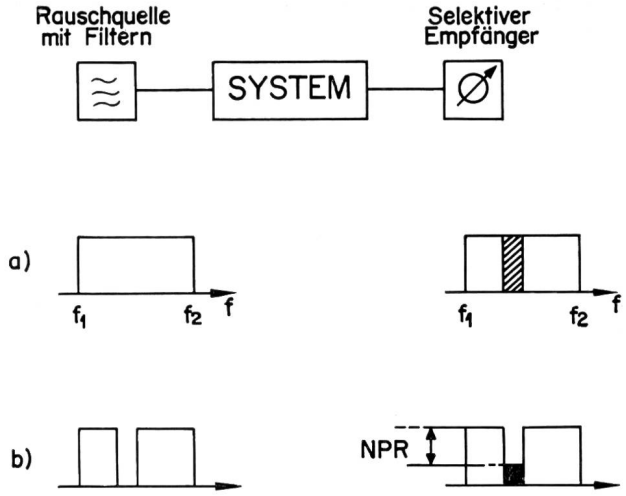
Um den Einfluss der von der Sprache herrührenden Signale auf das Übertragungssystem untersuchen zu können, müssen einige Eigenschaften bekannt sein. Anhand vieler Messungen sind Kurven ermittelt worden, die einerseits über die mittlere Leistung, anderseits über die Amplituden-Wahrscheinlichkeitsverteilung des einzelnen Gesprächs Aufschluss geben. So ist zum Beispiel bei einem durchschnittlichen Gespräch die Amplitude, die während 0,1% der Zeit überschritten wird, etwa 18,5 dB höher als der Effektivwert (langzeitlicher quadratischer Mittelwert). Bei weissem Rauschen liegt der Amplitudenwert, der während 0,1% der Zeit überschritten ist, jedoch nur 10,4 dB über dem Effektivwert [7, 9, 10] (siehe *Fig. 5*).

Weitere Kurven geben Aufschluss über die zu erwartenden Effektivwerte, die je nach der Lautstärke des Telephonsignals verschieden sind. Am Bezugspunkt 0 dBr [24], das heisst am Eingang in die Fernübertragungssysteme, ist die mittlere zu erwartende Leistung eines Gesprächs etwa 9 dB unterhalb eines Milliwatts (−9 dBmo). Unter Berücksichtigung der Gesprächspausen und weiterer Tatsachen empfiehlt das CCITT, mit einer mittleren Leistung von −15 dBmo je Kanal zu rechnen [22] (gilt auf Trägerfrequenzsystemen).



① weisses Rauschen ② Sprache

Fig. 5
Statistische Amplitudenverteilung



Gesamtbelastung: $-15 + 10 \log N$ ($N \geq 240$)
Geräusch je Kanal: $p = -(NPR + 18{,}6)$ dBmop

Fig. 6
Rauschklirrmessung

Weitere Untersuchungen, bei denen theoretisch und experimentell die Wirkungen von mehreren Gesprächen ermittelt wurden, haben ergeben, dass bei zunehmender Kanalzahl die statischen Eigenschaften der kombinierten Signale mehr und mehr mit den Charakteristiken des weissen Rauschens übereinstimmen. Bei 60 gleichzeitigen Sprachsignalen ist die Übereinstimmung für praktische Zwecke genügend.

Diese Tatsache hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass Vielkanal-Telephonsysteme (Typ Frequenzmultiplex) mit weissem Rauschen belastet werden, um damit den Fall der wirklichen Belastung zu simulieren. Diese Messmethode wird oft mit Rauschklirrmessung bezeichnet [12] *(Fig. 6)*.

8. Intermodulationsgeräusche

Nachrichtenübertragungssysteme sind normalerweise mit Nichtlinearitäten behaftet. Diese wirken sich nebst einer Begrenzung bei hohen Pegeln so aus, dass am Ausgang ausser den erwünschten Signalen noch Störsignale erscheinen, deren Frequenzen Kombinationen der Nutzsignalfrequenzen sind.

Für Berechnungen an einem Vielkanalsystem kann man näherungsweise annehmen, dass jedes Gespräch durch ein einzelnes Sinussignal mit einer Leistung von −15 dBmo angenähert ersetzt wird. *Brockbank und Wass* [8] haben von dieser Annahme ausgehend das Intermodulationsverhalten von Breitbandsystemen untersucht. Dabei wurde weiter vorausgesetzt, dass sich die Nichtlinearitäten durch eine Potenz-

reihe darstellen lassen, und dass die Koeffizienten der Potenzreihe frequenzunabhängig sind. Weiter wird in [8, 13] anhand von Kurven gezeigt, wie die störenden Kombinationssignale über das Übertragungsfrequenzband verteilt sind. Ferner wurde hergeleitet, dass die gesamte Intermodulationsstörleistung zweiter und dritter Ordnung annähernd gegeben ist durch

$$\left.\begin{aligned} T_2 &\cong 4\,t_2\,P^2 \\ T_3 &\cong 24\,t_3\,P^3 \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

worin T_2 und T_3 die Störleistungen in mW, t_2 und t_3 die Klirrfaktoren zweiter beziehungsweise dritter Ordnung, gemessen bei einer Ausgangsleistung von 1 mW, und P die totale Systembelastung (Summe der Leistungen aller Signale) sind.

Somit lässt sich bei Bekanntsein des Klirrverhaltens die zu erwartende Störleistung in einem beliebigen Kanal errechnen.

Bei der messtechnischen Ermittlung der Intermodulationsgeräusche wird das zu untersuchende System mit weissem Rauschen belastet. Das Rauschband wird frequenzmässig mit Filtern begrenzt. Die gesamte Leistung des Rauschens beträgt nominell

$$-15+10 \log N \text{ dBmo.} \qquad (14)$$

N stellt die Zahl der Kanäle dar. (Diese Formel gilt für Systeme mit 240 und mehr Kanälen.)

Am Empfangsort wird ein selektiver Empfänger verwendet, der in einem Kanal das durch das Rauschen dargestellte Signal misst.

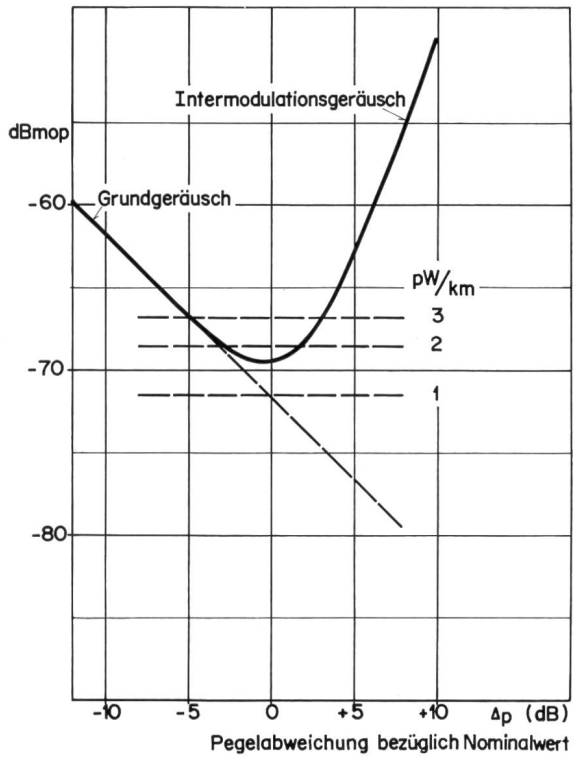


Fig. 7
Geräuschverhalten eines Übertragungssystems (Koaxialkabelanlage)

Anschliessend wird am Sender ein Bandsperrfilter eingeschaltet, so dass im Messkanal (im Idealfall) kein Rauschsignal mehr auf das System gegeben wird.

Die durch die Systemnichtlinearitäten bedingte Intermodulation erzeugt im Messkanal ein Störsignal, das am Empfangsort gemessen werden kann (einschliesslich Grundgeräusch).

Der Unterschied der beiden Messwerte am Empfänger wird Geräuschdichteverhältnis (Noise Power Ratio $=NPR$) genannt. Daraus lässt sich nach Anbringen einer Korrektur das Störgeräusch p, je Kanal, psophometrisch bewertet, errechnen. Die Formel für $N \geq 240$ ist

$$p = -(NPR+18{,}6) \text{ dBmop} \qquad (15)$$

Die Genauigkeit dieser Methode ist beschränkt durch die Güte des Sperrfilters am Sender, die Eigenintermodulation im Empfänger sowie durch die das Rauschband begrenzenden Filter.

Lässt man den Rauschpegel vom nominellen Wert abweichen und trägt das Geräusch im Kanal als Funktion der Pegelvariation auf (s. *Fig. 7*), dann erhält man anhand der Kurve rasch Aufschluss über den Zustand des Systems in bezug auf den zulässigen Einstellbereich.

9. Nebensprechgeräusche

Weitere Geräusche haben ihre Ursache in der ungenügenden Unterdrückung von unerwünschten Seitenbändern, die bei der Modulation zwangsläufig entstehen.

Die *Figur 8* illustriert die Verhältnisse, wie sie bei der Einseitenband-Amplitudenmodulation vorhanden sind. Das Seitenband *1+* muss durch ein Filter unterdrückt werden, da es frequenzmässig mit dem Nutzseitenband *2−* zusammenfällt. Ist die Unterdrückung von *1+* ungenügend, dann entsteht im Kanal *2−* ein sich im Sprachrhythmus des Sprechers 1 verändernd es Geräusch, das allerdings unverständlich, jedoch störend ist. Die Unterdrückung muss mehr als 60 dB sein, damit die Störung erträglich ist.

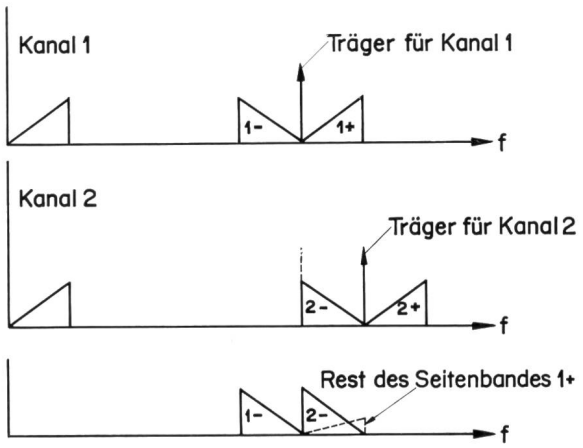


Fig. 8
Störwirkung des Restseitenbandes

Auf das lineare verständliche Nebensprechen wird in diesem Überblick nicht eingegangen.

10. Impulsive Geräusche

Impulsive Geräusche werden im Telephonhörer meist als Knacken wahrgenommen. Sie bestehen in der Regel als einzelne oder Folgen von kurzen Impulsen. Diese können zum Beispiel im selben Kabel durch lineares Nebensprechen von einem Aderpaar auf ein anderes entstehen, wenn auf der störenden Ader Wahlimpulse übertragen werden.

Die Störwirkung dieser Impulse hängt von der Art der übertragenen Informationen ab. Bei Telephongesprächen ist die subjektive Wirkung auf den Abonnenten massgebend. Die messtechnische Erfassung der subjektiven Störwirkung ist ausserordentlich schwierig, da nicht nur die Amplitude, sondern auch die Folgefrequenz und das Spektrum massgebend sind. In [14] ist das Ergebnis einer Reihe von Versuchen zusammengestellt. Vorläufig gibt es kein Instrument, mit dem die Störwirkung von Impulsen auf einer Skala abgelesen werden kann.

Bei der Übertragung von Information mit Hilfe von Impulsen (Telegraphie, PCM, Datenübertragung) liegen die Verhältnisse anders. Die Empfänger besitzen in der Regel eine Ansprechgrenze. Wenn ein Impuls spannungsmässig unterhalb dieser Grenze liegt, spricht der Empfänger nicht an, es tritt also keine Störung auf.

Um die Störwirkung von Impulsen zu ermitteln, muss neben der Ansprechgrenze die Minimaldauer, die ein Impuls aufweisen muss, damit der Empfänger anspricht, bekannt sein. Die zulässige Zahl von Störimpulsen hängt dann weiter von der Redundanz der Codierung und von der Tatsache ab, ob Fehlerkorrekturmethoden verwendet werden oder nicht.

Alle diese Faktoren beeinflussen die zulässige Zahl von Störimpulsen.

Es gibt Geräte, mit denen die Störimpulszahl gezählt werden kann [18]. Die Ansprechspannung ist einstellbar; die Minimaldauer, die ein Impuls haben muss, damit er registriert wird, kann etwa 50 μs sein.

11. Das Quantisierungsgeräusch

Dieses Geräusch [17] ist grundsätzlich von den bis jetzt besprochenen Geräuscharten verschieden, weil es nur auftritt, wenn Information (Sprache) übertragen wird, und zudem ist es auf den störenden Kanal beschränkt.

Beim PCM-System wird nur eine endliche Zahl Amplitudenwerte übertragen, im Gegensatz zu den Analogiesystemen, wo jeder beliebige Amplitudenwert vorkommen kann (beschränkt natürlich durch Grundgeräusche und Übersteuerung des Übertragungspfades). Jeder Amplitudenstufe ist ein Codesignal zugeordnet. Fällt das zu übertragende Signal amplitudenmässig zwischen zwei Stufen, so entsteht ein Fehler, der im Maximum gleich der halben Stufenhöhe sein kann. Dieser Fehler wird vom Empfänger als Geräusch empfunden. Der Fehler ist umso kleiner, je grösser die Stufenzahl innerhalb eines bestimmten Amplitudenbereiches ist.

Bei geeigneter Abstufung der Quantisierungsschritte ist es möglich, das Verhältnis Signal zu Quantisierungsgeräusch über weite Bereiche der Dynamik konstant zu halten.

Die Messmethode zur Erfassung des Quantisierungsgeräusches ist noch nicht festgelegt, doch bestehen zum Beispiel folgende Möglichkeiten:

a) Subjektiver Vergleich eines PCM-Kanales mit einem konventionellen Telephoniekanal, in den ein messbarer Rauschpegel eingespeist werden kann. Der Rauschpegel wird variiert, bis die beiden Kanäle als qualitativ gleich empfunden werden.
b) Ein Sinussignal wird auf den PCM-Kanal gegeben. Am Ausgang kann durch ein Filter das Signal unterdrückt werden und das zurückbleibende Geräusch gemessen werden.
c) Ein Signal, bestehend aus weissem Rauschen, das einen Teil des Frequenzbandes des PCM-Kanals belegt, wird auf den zu untersuchenden Kanal gegeben. Das Geräusch, das am Empfangsort in dem beim Senden nicht belegten Teil des Frequenzbandes auftritt, enthält Quantisierungsgeräusch und kann gemessen werden.

12. Empfindlichkeit verschiedener Übertragungsarten auf Geräusche

Je nach der Art der Modulation (Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation, Impulsmodulation usw.) wirkt eine bestimmte Geräuschleistung, bezogen auf die gleiche maximale hochfrequente Sendeleistung, mehr oder weniger störend.

In [15] sind verschiedene Fälle analysiert worden. So wird gezeigt, dass die Einseitenband-Amplitudenmodulation unter gewissen Voraussetzungen (gleiche Spitzenleistung, gleiche Modulationstiefe, nur erwünschte Seitenbänder werden übertragen, gleiche Geräuschleistungsdichte) der eigentlichen Amplitudenmodulation bezüglich Signal-Geräuschverhältnis um den Faktor 8 überlegen ist.

Bei Frequenzmodulation kann bei geeigneter Dimensionierung und gleicher Senderspitzenleistung eine beträchtliche Verbesserung des Geräuschabstandes gegenüber der Amplitudenmodulation erzielt werden.

PCM-Systeme sind weitgehend immun gegen Geräusche, die auf dem Übertragungsweg den Nutzsignalen überlagert werden. Im Gegensatz zu den meisten andern konventionellen Systemen kann beim PCM-System der Geräuscheinfluss zum grossen Teil in den Impulsregeneratoren eliminiert werden. Dadurch wird die Übertragungsqualität weitgehend unabhängig von der Übertragungsdistanz.

Bei den Trägersystemen auf (paarsymmetrischen und koaxialen) Leitungen hingegen ist die Verschlech-

terung der Qualität (Geräusch) etwa proportional der Übertragungsdistanz. Das Signal-Geräuschverhältnis ist teilweise durch das Verhältnis von niedrigstem vorhandenem Pegel zum Grundgeräusch gegeben und wird teilweise durch das Klirrverhalten der Verstärker und anderer nichtlinearer Elemente bestimmt. Geeignete Massnahmen, wie die Verwendung der Vorbetonung (Pre-Emphasis), kann das auftretende Geräusch reduzieren.

13. Zulässige Geräuschleistungen im Telephonkanal

Die zulässige Geräuschleistung im Telephonkanal ist keine Grösse, die auf Grund von physikalischen Gesetzen hergeleitet werden kann. Vielmehr liegen ihr Versuche und Erfahrungen zugrunde. In den Laboratorien des CCITT sowie bei verschiedenen Telephonverwaltungen wurden Versuche über labormässig aufgebaute Verbindungen durchgeführt [19, 20, 21]. Bei diesen Versuchsverbindungen konnten verschiedene Parameter variiert werden, so zum Beispiel die Dämpfung, das Raumgeräusch, das Leitungsgeräusch. Versuchspersonen führten Gespräche über die Verbindungen und mussten jeweils die Qualität bewerten. Die Auswertung vieler Versuchsergebnisse hat schliesslich dazu geführt, dass für eine Telephonverbindung gewisse Geräuschpegel empfohlen werden können, die nicht überschritten werden sollen, um eine befriedigende Übertragungsqualität zu gewährleisten.

Das CCITT [22] empfiehlt, dass Trägersysteme für Telephonie von bestimmtem Aufbau (Bezugsstromkreis) nicht mehr als 10 000 pW mittlere Geräuschleistung je Kanal aufweisen sollen. Dieser Wert bezieht sich auf den Bezugspunkt 0 dBr und wird mit einem Psophometer gemessen. Der Bezugsstromkreis weist eine Länge von 2500 km auf und ist mit einer gewissen Zahl von Umsetzerausrüstungen versehen.

Ein neues System muss so dimensioniert werden, dass es, falls ein Einsatz auf einer dem Bezugskreis ähnlichen Verbindung erfolgt, dessen Anforderungen erfüllt.

Zur Messung des auf einem Telephonkanal auftretenden Geräusches wird ein Psophometer verwendet. Dieses Instrument ist grundsätzlich ein Röhrenvoltmeter, das den Effektivwert von Spannungen misst. Ein wichtiger Bestandteil ist das Bewertungsfilter, das dem Gerät einen Frequenzgang verleiht, der der Störempfindlichkeit des menschlichen Ohres auf Signale verschiedener Frequenzen Rechnung trägt. Der Frequenzgang der Telephonhörerkapsel ist ebenfalls mitberücksichtigt.

Bibliographie

[1] *Valley, Wallman.* Vacuum Tube Amplifiers (MIT Serie No 18).

[2] *Nyquist.* Phys. Review 32, S. 110 (1932).

[3] *Rice.* Mathematical Analysis of Random Noise BSTJ, Juli 1944 und Jan. 1945.

[4] *van der Ziel.* Noise in Junction Transistors. Proc. IRE, Juni 1958.

[5] *Lo, Endres, Zawels...* Transistor Electronics (Prentice-Hall) S. 122.

[6] *Vines.* Unpubliziertes Memorandum der GEC of England.

[7] *Holbrook/Dixon.* Load Rating Theory BSTJ, October 1939.

[8] *Brockbank/Wass.* Nonlinear Distortion in Transmission Systems. Journal of the IEE, March 1945.

[9] *Jacobson.* The Effect of Nonlinear Distortion in Multichannel Amplifiers. Electrical Communication, July 1940.

[10] *Richards.* Statistical Properties of Speech Signals. Transmission Aspects of Communication Networks. Proc. IEE, May 1964.

[11] *Fontanellaz.* Die nichtlinearen Verzerrungen in Mehrkanalübertragungssystemen. Techn. Mitt. PTT, Juli 1959.

[12] *Oliver.* White Noise Loading of Multichannel Communication Systems. Electronic Engng. Nov. 1965.

[13] *Janson/Stending.* Some Problems Concerning Noise in Wideband Carrier Systems. Ericsson Technics, No 1, 1960.

[14] *Zwicker/Terhardt.* Über die Störung von Impulsfolgen beim Telephonieren. NTZ, Febr. 1965.

[15] *Black.* Modulation Theory (van Nostrand, Bell Lab. Series).

[16] *Fontanellaz.* Vergleich zwischen Frequenz- und Phasenmodulation bei Sprache. Techn. Mitt. PTT, Dez. 1953.

[17] *Bleickardt.* Quantisierungsgeräusch-Verhältnisse bei PCM-Systemen. NTZ, Juni 1965.

[18] *Favin.* The 6 A Impulse Counter. Bell Laboratories Record, March 1963.

[19] *Swaffield/Richards.* Rating of Speech Links. Proc. IEE, Part. B, March 1959.

[20] *Richards/Swaffield.* Assessment of Speech Communication Links. Proc. IEE, Part B, March 1959.

[21] *Markman.* Transmission Performance in Presence of Circuit Noise. Ericsson Technics, No 2, 1960.

[22] *CCITT.* Rotbuch, Band III.

[23] *Bozic.* Mean Square Voltmeter. Journal of Scientific Instruments, May 1962.

[24] *Zaiser.* Pegelangaben in der Übertragungstechnik. NTZ, März und Sept. 1963.