

Störungen und Ausbreitungsverzerrungen frequenzmodulierter Signale

Autor(en): **Debrunner, Walter E.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **67 (1989)**

Heft 6

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874939>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Störungen und Ausbreitungsverzerrungen frequenzmodulierter Signale

Walter E. DEBRUNNER, Bern

Zusammenfassung. Auf anschauliche Art wird gezeigt, wie bei FM-Systemen mit wachsendem Hub die Auswirkungen der Fremdstörungen abnehmen und jene der Ausbreitungsverzerrungen grösser werden. Der optimale Kompromiss lässt sich nur unter Berücksichtigung quantitativer Ergebnisse finden. Allgemeingültige, einfache und zugleich exakte Aussagen sind diesbezüglich nicht zu erwarten. Die heute verfügbaren Personal Computer (PC) erlauben jedoch die Anwendung eines kurz beschriebenen Rechenverfahrens zur Bestimmung von Stör- und Verzerrungsspektren. Unter Benützung der Rechenleistung von Computern können deshalb auf konkrete Fragen auch gesondert rasch genaue Antworten gegeben werden.

Perturbations et distorsions de propagation affectant des signaux à modulation de fréquence

Résumé. L'auteur montre clairement comment l'augmentation de l'excursion dans les systèmes FM fait diminuer les perturbations extrinsèques, mais s'accroître les distorsions de propagation. Seule la prise en compte de résultats quantitatifs permet de trouver le compromis optimal. Il ne faut pas s'attendre à ce sujet à des énoncés de valeur générale à la fois simples et exacts. Au moyen des ordinateurs personnels (PC) actuellement disponibles, on peut cependant appliquer une méthode de calcul brièvement décrite pour déterminer les spectres des perturbations et des distorsions. L'utilisation de la puissance de calcul des ordinateurs permet de répondre de manière spécifique, rapide et précise à des questions concrètes.

Disturbi e distorsioni nella propagazione di segnali modulati in frequenza

Riassunto. L'autore mostra in modo chiaro come nei sistemi FM con deviazione di frequenza crescente diminuiscono gli effetti dei disturbi esterni e aumentino quelli delle distorsioni della propagazione. La soluzione ottimale può essere trovata solo prendendo in considerazione risultati quantitativi. Non ci si deve però attendere conclusioni generiche, semplici e nello stesso tempo esatte. I personal computer (PC) utilizzati attualmente permettono tuttavia di applicare un metodo di calcolo – brevemente descritto nell'articolo – per la determinazione dello spettro dei disturbi e di quello delle distorsioni. Utilizzando la capacità di calcolo dei computer si possono dare, anche separatamente, risposte rapide e precise a domande concrete.

1 Einleitung

Die heutige Nachrichtenübertragung ist einerseits durch die geschickte Ausnützung physikalischer Gesetze und andererseits infolge einer verfeinerten Technik möglich geworden. Meldungen über neue Entwicklungen und Erfindungen vermögen deshalb leicht den Glauben zu wecken, die Grenze des Machbaren könne beliebig verschoben werden. Naturgesetze weisen hingegen nicht nur auf Möglichkeiten, sondern ebenfalls auf die Grenzen des Realisierbaren hin. Damit kann die «ideale» technische Lösung nur einen optimalen Kompromiss darstellen. Die Wahl des Hubes frequenzmodulierter Übertragungssysteme stellt ein diesbezügliches Beispiel dar. Während zur Reduktion der Auswirkung von Fremdstörungen die belegte Bandbreite, also der Hub, gross zu wählen ist, muss zur Begrenzung von Ausbreitungsverzerrungen der Frequenzhub beschränkt werden. Da die zu treffenden Massnahmen einander offensichtlich zuwiderlaufen, ist der Einfluss des Hubes auf die Auswirkung von Fremdstörungen und auf Ausbreitungsverzerrungen zahlenmässig zu erfassen.

Das zu suchende Optimum hängt von den Störungsmöglichkeiten und den Ausbreitungsverhältnissen im betreffenden Gebiet ab, weshalb die Angabe allgemeingültiger Werte nur schwer möglich ist. Deshalb kann einerseits nur das Ziel verfolgt werden, auf die elementaren Mechanismen hinzuweisen, und müssen andererseits anwendbare Rechenmethoden präsentiert werden. Nachdem auf anschauliche Weise der Einfluss des Hubes auf die Auswirkung von Fremdstörungen und Ausbreitungsverzerrungen aufgezeigt worden ist, wird ein Berechnungsverfahren in den Grundzügen dargestellt. Dank den heute zur Verfügung stehenden PC sind rechnerische Arbeiten leicht möglich und erlauben oft flexiblere Untersuchungen. Nach der Diskussion verständli-

cher und unverständlicher Störungen bzw. linearer und nichtlinearer Verzerrungen werden quantitative Abhängigkeiten der Störungen vom Frequenzhub als Illustration angegeben.

2 Allgemeines

Die Frequenz- oder Phasenmodulation darf als die erste Breitbandmodulation betrachtet werden. Gemäss der Carsonschen Regel ist die Bandbreite gleich der doppelten Summe von Frequenzhub und Modulationsfrequenz und damit kontinuierlich variierbar. Es wird im folgenden primär die Wirkung des Hubes, also der Bandbreite, besprochen. Selbstverständlich sind ebenso die Art des Basisband-Signals und die Vorbetonung von Bedeutung. Auch physiologische Sachverhalte sollten nicht übersehen werden. Bei genügender Vorsicht sind die Ergebnisse teilweise auf digitale Systeme übertragbar.

In *Figur 1* sind FM-Spektren für einen kleinen und einen grossen Modulationsindex m dargestellt. Unter dem Modulationsindex versteht man das Verhältnis zwischen dem Frequenzhub und der Modulationsfrequenz. Während bei gewöhnlicher Amplitudenmodulation durch ein Sinus-Signal genau nur ein oberes und ein unteres Seitenband existieren, treten bei der Frequenz- oder Phasenmodulation grundsätzlich sehr viele Seitenbänder auf, deren Amplitude mit zunehmender Ordnungszahl allerdings gegen Null strebt.

Die Probleme der Nachrichtentechnik bestehen einerseits in der Beschaffung der Übertragungsmittel und der Überwindung der Distanzen; andererseits sind Störungen durch natürliche Emissionen, industrielle Anlagen oder andere Sender sowie Ausbreitungsverzerrungen infolge

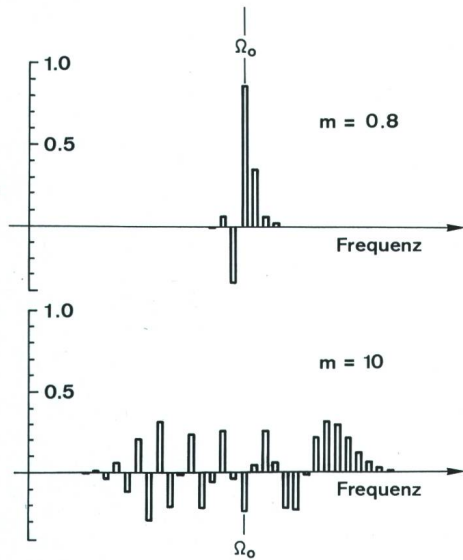


Fig. 1
FM-Spektren für kleinen und grossen Modulationsindex m

von Mehrwege-Empfang zu beachten. Während diese Mechanismen bei der Amplitudenmodulation noch als lineare Phänomene betrachtet werden dürfen, tritt im Falle der Frequenzmodulation der nichtlineare Charakter jedoch deutlich zutage. Dementsprechend sind allgemeine Aussagen nur in geringem Masse möglich, und die Ergebnisse sind für die einzelnen Konfigurationen separat zu ermitteln.

3 Auswirkungen von Fremdstörungen bei kleinem und bei grossem Hub

Breitbandssysteme weisen generell eine bessere Störfestigkeit auf als Schmalbandssysteme. Man spricht deshalb von Systemgewinn (Improvement Factor). Nur bei

minimaler Übertragungsbandbreite ist das Verhältnis S/N (Signal zu Rauschen) nach dem Demodulator gleich dem Verhältnis C/N (Träger zu Rauschen) am Empfängerereingang. Bei der Frequenz- oder Phasenmodulation ergeben sich somit im allgemeinen vorteilhaftere Resultate.

Um eine anschauliche Darstellung der vor und nach dem Demodulator auftretenden Nutz- und Störsignale zu geben, werde der Einfachheit halber der Träger durch ein Sinus-Signal moduliert. Der diskrete Störer sei um 15 dB geringer als das Nutzsignal. Die sich dann bei einem Modulationsindex $m = 1$ bzw. $m = 8$ ergebenden Verhältnisse sind in den Figuren 2a bzw. 2b dargestellt.

Auf dem oberen Bild der beiden Figuren ist je der Träger mit den Seitenbändern und dem diskreten Störer im Dezibelmassstab dargestellt. Das untere Bild zeigt die nach der Demodulation im Basisband auftretenden Nutz- und Störsignale. Der Vergleich zwischen den Figuren 2a und 2b lehrt, wie bei höherem Modulationsindex m die «Störleistung» über einen breiteren Frequenzbereich «verschmiert» wird und sich deshalb die Amplituden des Störleistungsspektrums verringern. Damit ist hinsichtlich der Frequenzmodulation der oben erwähnte Systemgewinn erklärt.

Zusätzlich sind noch folgende Erscheinungen zu beachten: Durch die mit dem Hub des Nutzsignals zunehmende Verschmierung der Störungen gehen diese in ein unverständliches Rauschen über und sind damit von geringerer Bedeutung. Infolge der Verschmierung über ein breiteres Frequenzintervall fallen zudem gewisse Störkomponenten ausserhalb des Durchlassbereichs der Basisband-Filter. Man beachte aber, dass in einem dicht besetzten RF-Band durch zu grossen Hub des Nutzsignals auch Störungen unerwünschter Sender «hereingeht» werden können.

4 Ausbreitungsverzerrungen bei kleinem und bei grossem Hub

Das Sendesignal kann den Empfänger nicht nur auf dem ordentlichen, «direkten Weg», sondern auch über Refle-

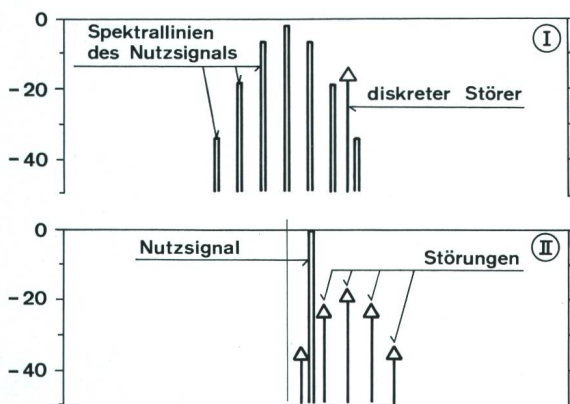


Fig. 2a
Störung eines FM-Signals mit $m = 1$ durch einen diskreten Störer
Horizontal: Frequenz in linearem Massstab
Vertikal: Amplituden in Dezibel
I Spektrum vor dem Demodulator
II Sepktrum nach dem Demodulator

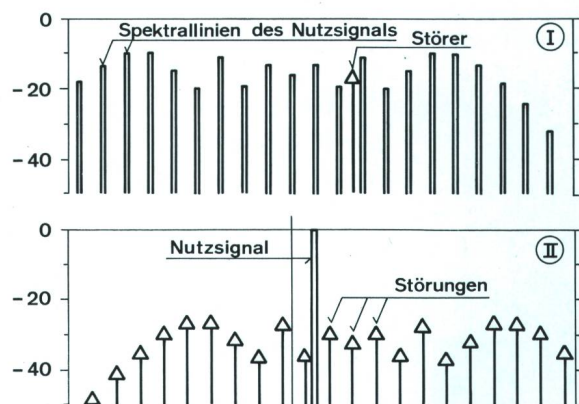


Fig. 2b
Störung eines FM-Signals mit $m = 8$ durch einen diskreten Störer
Horizontal: Frequenz in linearem Massstab
Vertikal: Amplituden in Dezibel
I Spektrum vor dem Demodulator
II Spektrum nach dem Demodulator

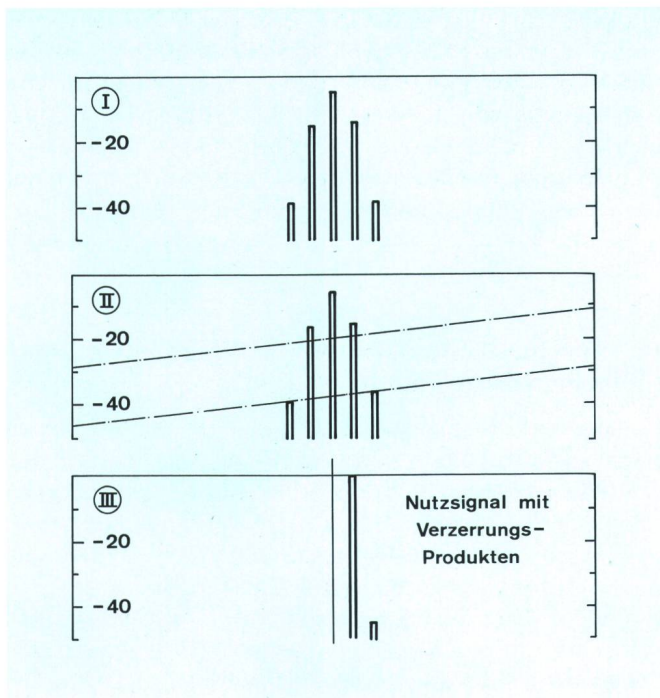


Fig. 3a
Ausbreitungsverzerrungen eines FM-Signals mit $m = 1$
 Horizontal: Frequenz in linearem Massstab
 Vertikal: Amplituden in Dezibel
 I Gesendetes Signal
 II Empfangenes Signal
 III Signal nach dem Demodulator: Nutzsignal und Verzerrungsprodukte

xionsstellen an Bergen, Hügeln und Bauten sowie infolge troposphärischer Brechungserscheinungen über den sogenannten ausserordentlichen Pfad erreichen. Treffen am Empfangsort Signale von vergleichbarer Amplitude, aber mit deutlich unterschiedlicher Zeitverzögerung ein, spricht man von Mehrwege-Empfang, und es treten merkbare Ausbreitungsverzerrungen auf. Diese linearen Verzerrungen werden durch den Demodulator teilweise in nichtlineare Verzerrungsprodukte umgewandelt. Direkte und reflektierte Signale überlagern sich je nach Ort und Frequenz mit unterschiedlichen Phasenlagen. Deshalb variiert u. a. auch die Amplitude der Summe dieser Signale.

Es darf hier der Einfachheit halber angenommen werden, die Gruppenlaufzeit zwischen Sender und Empfänger sei konstant und der in Dezibel gemessene Empfangspegel ändere sich am Empfangsort linear mit der Frequenz. Diese Frequenzabhängigkeit ist auf den mittleren Bildern der *Figuren 3a* und *3b* durch die Neigung der strichpunktiierten Linien angegeben. Bei diesen gleichen Empfangsbedingungen werden die Ausbreitungsverzerrungen (nach dem Demodulator) für unterschiedliche Modulationsindizes miteinander verglichen. Unter der Annahme der Frequenzmodulation durch ein Sinus-Signal sind in den *Figuren 3a* bzw. *3b* für die Modulationsindizes $m = 1$ bzw. $m = 8$ je in den obersten Bildern die Spektren der ausgestrahlten Signale skizziert. Die mittleren Bilder zeigen die empfangenen RF-Spektren. Schliesslich sind in den unteren Bildern die Spektren nach dem Demodulator, d.h. im Basisband, aufgetragen.

Bei geringem Hub (Fig. 3a) sind die RF-Spektren relativ schmal, und das empfangene RF-Spektrum (Fig. 3a

Mitte) unterscheidet sich nur leicht vom Sendespektrum. Demzufolge treten nach dem Demodulator auch nur geringe Oberwellen auf (Fig. 3a unten). Anders sind die Verhältnisse, wenn der Modulationsindex $m = 8$ beträgt (Fig. 3b). Das deutlich breitere Sendespektrum (Fig. 3b oben) erfährt auf seinem «Weg» zum Empfangsort (mittleres Bild) bei denselben Ausbreitungsbedingungen eine leicht erkennbare Veränderung. Deshalb treten nach dem Demodulator auch deutlich stärkere Oberwellen, d. h. Verzerrungsprodukte auf (Fig. 3b unten). Spektren von nichtlinearen Verzerrungen bei kontinuierlichen Modulationspektren sind in [4] zu finden.

5 Die Berechnung von Störungen und Verzerrungen

Die Verfahren zur Ermittlung des Leistungsspektrums eines FM-Senders, zur Bestimmung der im Basisband auftretenden Störungen oder zur Abschätzung der Ausbreitungsverzerrung sind alle grundsätzlich gleich. Anleitungen zur Berechnung sowie Computerprogramme findet man in [4, 5]. Eine Frequenzmodulation darf stets auch als Phasenmodulation interpretiert werden, bei der sich wesentlich einfachere Berechnungsformeln ergeben. Das Ziel besteht nun darin, aufgrund des gegebenen Leistungsspektrums $S_{\Psi}\{f\}$ der Modulationsphase Ψ das Leistungsspektrum $S_{\Phi}\{f\}$ der Störphase Φ zu bestimmen.

Es erscheint vorerst als schwierig, eine Beziehung zwischen den Leistungsspektren $S_{\Psi}\{f\}$ und $S_{\Phi}\{f\}$ zu finden. Bekanntlich ist aber der direkte Weg nicht stets der bequemste und rascheste. Das Problem wird wesentlich vereinfacht, wenn mittels Fourier-Transformation diese

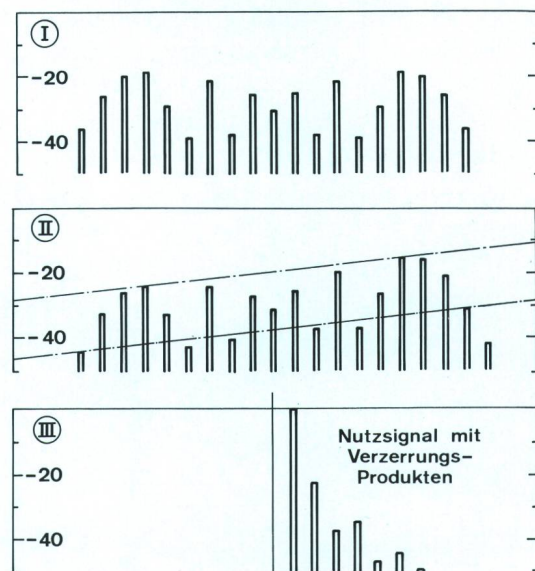


Fig. 3b
Ausbreitungsverzerrungen eines FM-Signals mit $m = 8$
 Horizontal: Frequenz in linearem Massstab
 Vertikal: Amplituden in Dezibel
 I Gesendetes Signal
 II Empfangenes Signal
 III Signal nach dem Demodulator: Nutzsignal und Verzerrungsprodukte

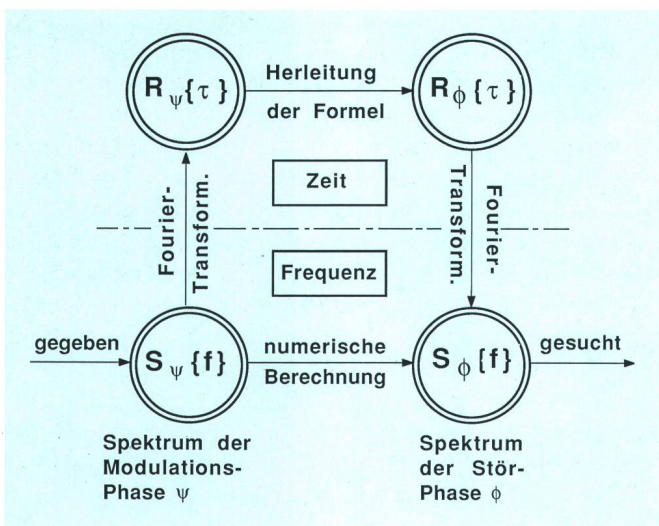


Fig. 4 Herleitung der Formeln im «Zeitbereich» und Durchführung der Berechnung im Frequenzbereich»

Leistungsspektren des Frequenzraumes in den Zeitraum als die Autokorrelationsfunktionen $R_{\Psi}\{\tau\}$ und $R_{\Phi}\{\tau\}$ abgebildet werden. Mit einfachen Umformungen unter Benützung von Identitäten lässt sich sodann $R_{\Phi}\{\tau\}$ aus $R_{\Psi}\{\tau\}$ berechnen. Eine weitere Fourier-Transformation erlaubt die Abbildung von $R_{\Phi}\{\tau\}$ in den Frequenzraum als das gesuchte Leistungsspektrum $S_{\Phi}\{f\}$ der Stör- bzw. der Verzerrungsphase Φ . Die eben erwähnten Zusammenhänge sind in *Figur 4* dargestellt.

Das beschriebene Vorgehen ist zur Herleitung der Formeln notwendig. Die Bestimmung der numerischen Werte kann jedoch auf direktem Wege erfolgen. Ist nämlich der Zusammenhang zwischen den Autokorrelationsfunktionen $R_{\Psi}\{\tau\}$ und $R_{\Phi}\{\tau\}$ im Zeitraum bekannt, so ergeben sich daraus auch die Beziehungen zwischen den Leistungsspektren $S_{\Psi}\{f\}$ und $S_{\Phi}\{f\}$ im Frequenzraum. Der zweimalige Wechsel in den andern Raum mittels der Fourier-Transformation ist somit nicht mehr erforderlich.

Wie die theoretischen Arbeiten gezeigt haben, genügt zur Bestimmung von $S_{\Omega}\{f\}$ das Leistungsspektrum $S_{\Phi}\{f\}$ der Nutzphasen Ψ alleine nicht. Zusätzlich muss auch

die Wahrscheinlichkeitsdichte $p\{\Psi\}$ von Ψ bekannt sein. Ferner wird stillschweigend angenommen, $p\{\Psi\}$ sei für den Nutz- und Störsender sowie für alle Frequenzen des Basisbandes von derselben Art. Die Berechnung lässt sich leider nicht für alle $p\{\Psi\}$ durchführen. Handelt es sich aber um eine Normalverteilung, so ergeben sich der möglichen Separierbarkeit wegen sogar einfache Formeln [4, 5].

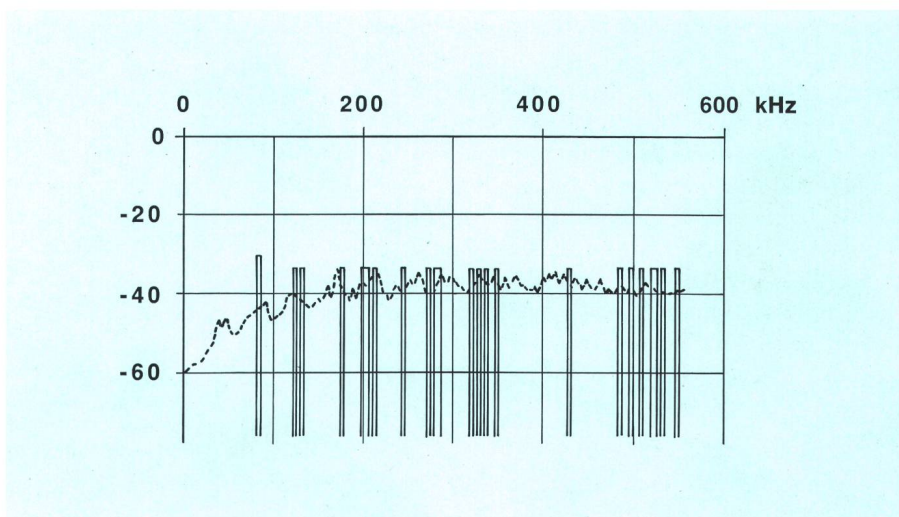
6 Verständliche und unverständliche Störungen oder Verzerrungen

Bei analoger Nachrichtenübertragung ist im allgemeinen auch die Physiologie unserer Sinne von Bedeutung. Deshalb ist zwischen verständlichen und unverständlichen Störungen bzw. linearen und nichtlinearen Verzerrungen zu unterscheiden; denn die beiden Typen sind unterschiedlich zu bewerten. Während sich bei experimentellen Untersuchungen dabei gewisse Schwierigkeiten ergeben mögen, sind die beiden Arten bei rechnerischen Arbeiten leicht zu unterscheiden. Das Leistungsspektrum $S_{\Phi}\{f\}$ der Stör- bzw. der Verzerrungsphase Φ ist proportional der Summe einer Reihe von Faltungsprodukten des Leistungsspektrums $S_{\Psi}\{f\}$ der Modulationsphasen Ψ [4, 5]:

$$S_{\Phi}\{f\} \sim \left[S_{\Psi} + \frac{S_{\Psi} * S_{\Psi}}{2!} + \frac{S_{\Psi} * S_{\Psi} * S_{\Psi}}{3!} + \dots \right] \quad (1)$$

Dabei stellt der erste Term in den eckigen Klammern, also $S_{\Psi}\{f\}$, die verständlichen Störungen bzw. die linearen Verzerrungen dar. Beispielsweise sind im Falle der Mehrkanaltelefonie darin nicht bloss die verständlichen Störungen durch Kanäle der *anderen* Verbindung, sondern ebenfalls das *vermeintliche* Übersprechen von Kanälen der *eigenen* Verbindung enthalten [5]. Die Erhellung solcher Zusammenhänge stellt einen Vorteil der rechnerischen Bearbeitung des Problems dar. Die übrigen Terme von (1) sind die (mehrfachen) Faltungsprodukte des Leistungsspektrums der Modulationsphasen Ψ und enthalten somit Oberwellen- und Kreuzmodulationsprodukte der Modulationsphasen. Diese Faltungsprodukte stellen auch breitere Spektren dar (Verschmie-

Fig. 5 Leistungsspektren der verständlichen und der unverständlichen Störungen zwischen zwei 120-Kanal-TF-FM-Systemen bei Belegung von je 10 % der Kanäle
Horizontal Basisbandfrequenz (kHz)
Vertikal Störabstand (dB)
— verständliche Störungen
- - - unverständliche Störungen
Relative Störampplitude $r = 0,2$
Frequenzversatz $\Delta f = 0$



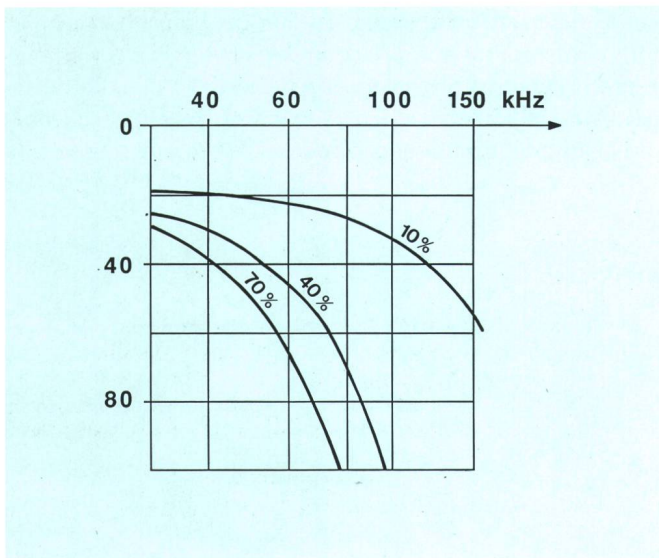


Fig. 6a
Verständliche Störungen zwischen zwei 120-Kanal-TF-FM-Systemen
 Horizontal Testtonhub (kHz)
 Vertikal Störabstand (dB)
 Parameter Belegung der Kanäle
 Relativer Störabstand $r = 0,2$
 Frequenzversatz $\Delta f = 0$

zung). Die zu berücksichtigenden Amplituden nehmen ab, und die Reihe (1) ist konvergent.

7 Ergebnisse der Berechnungen

Zur Illustration sind in *Figur 5* mögliche Störabstände im Basisband einer Mehrkanaltelefonanlage skizziert. Nutzverbindung und Störsender sind gleicher Art: Die volle Kapazität beträgt je 120 TF-Kanäle, jedoch sind davon bloss $X = 10\%$ voll ausgesteuert, während die restlichen unbenutzt sind. Das Basisband reicht von 60 kHz...552 kHz, und der Effektivwert des Testtonhubes ist 100 kHz. Vor- und Nachbetonung entsprechen den CCIR-Forderungen. Der Frequenzversatz ist Null. Als relative Störampplitude ist $r = 0,2$ gewählt worden. Für $r < 0,5$ sind die Störleistungen proportional zu r^2 . Es wird kein Dispersal-Signal verwendet.

Wie aus *Figur 5* ersichtlich, sind die Leistungsspektren der verständlichen und der *unverständlichen* Störungen unterschiedlicher Art. Während die *unverständlichen* Störungen über das ganze Basisband verteilt sind, treten die verständlichen Störungen nur in einzelnen TF-Kanälen des Empfangssystems auf. Das bedeutet u. a., dass durch die Überwachung der Geräusche in bestimmten TF-Kanälen wohl die *unverständlichen* Störungen beobachtet werden, während keine volle Gewähr für die Erfassung der verständlichen Störungen besteht. An diesem Sachverhalt ändert auch der Einsatz eines Dispersal-Signals nichts.

Wie in Abschnitt 3 gezeigt worden ist, nehmen die Störungen mit wachsendem Hub ab. Im Falle der beschriebenen Mehrkanal-Telefoniesysteme müssen die Störleistungen sich also sowohl mit zunehmendem Testtonhub als auch mit grösser werdender Belegung X verringern. Die *Figuren 6a* und *6b* zeigen die minimalen Störabstände der verständlichen bzw. der *unverständlichen*

Störungen als Funktion des Testtonhubes für die Belegungen $X = 10\%$, 40% , 70% . Die relative Störampplitude ist wiederum $r = 0,2$ und der Frequenzversatz Null.

Dass in der Nachrichtentechnik meist stillschweigend lineare Beziehungen vorausgesetzt werden, zeigt sich u. a. in der Erwartung einfacher Formeln. Aus den *Figuren 6a* und *6b* ist jedoch ein deutlicher Hinweis auf die Nichtlinearität der Störphänomene zu erkennen. Dies bedeutet, dass einfache *und zugleich* exakte Formeln nicht verlangt werden dürfen. In Abschnitt 4 ist in anschaulicher Weise gezeigt worden, wie Ausbreitungsverzerrungen mit wachsendem Hub zunehmen. Eine grössere Reihe von Berechnungen [4] hat für den Verzerrungsabstand VA beim FM-UKW-Rundspruch als Funktion des Hubes H zur folgenden Formel (2) geführt:

$$(VA \text{ in dB}) = \text{konst.} - (1 \dots 1,7 \dots 3) \cdot 20 \cdot \log^{10}\{H\} \quad (2)$$

Dies bedeutet, dass bei einer Zunahme des Hubes um 3 dB der Verzerrungsabstand VA um 3...5,1...9 dB abnimmt. (Die Nutzleistung nimmt um 3 dB, die Verzerrungsleistung jedoch um 6...12 dB zu.) Im Bestreben, eine Antwort von einfacher Form zu geben, hat – unter Berücksichtigung möglicher Fälle – bloss der Wertebereich des Koeffizienten, nämlich 1 bis 3, angegeben werden können.

8 Schlussbemerkungen

Wenn es auch als Binsenwahrheit empfunden wird, dass die Übertragungsqualität von einer grossen Zahl von Parametern abhängt, gibt man sich aus verständlichen Gründen eher wenig Rechenschaft über die Komplexität dieser Beziehungen. So darf es auch nicht sehr verwundern, wenn nach dem Motto «Probieren geht über Stu-

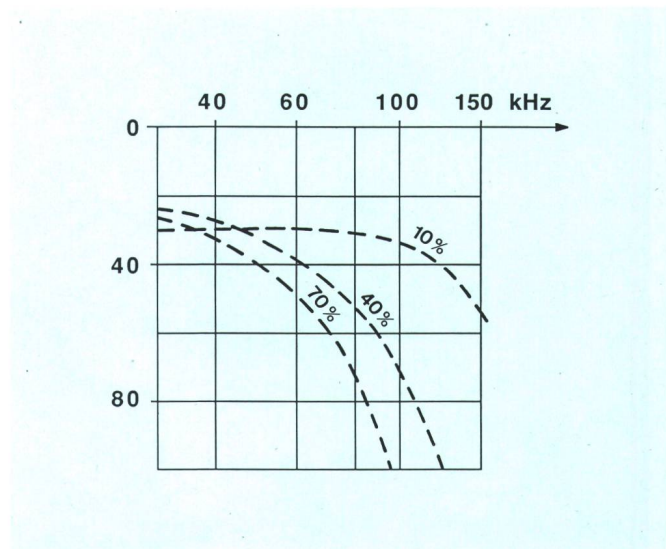


Fig. 6b
Unverständliche Störungen zwischen zwei 120 Kanal TF-FM-Systemen
 Horizontal Testtonhub (kHz)
 Vertikal Störabstand (dB)
 Parameter Belegung der Kanäle
 Relativer Störabstand $r = 0,2$
 Frequenzversatz $\Delta f = 0$

dieren» sogleich mit Experimenten begonnen wird. Natürlich sind dabei Resultate zu erwarten. In Anbetracht der grossen Fortschritte auf dem Gebiet der Messtechnik sind die Erfolgsaussichten bezüglich experimenteller Untersuchungen sehr gewachsen. Zum andern wagt auch niemand zu behaupten, das theoretische Wissen der Fachleute sei heute schlechter denn früher. Von besonderer Bedeutung sind deshalb die durch heutige Rechenhilfen sich eröffnenden Möglichkeiten.

Entwicklungen auf dem Gebiet der Informatik und der Computer führen sowohl zur Rationalisierung administrativer Belange als auch zur Erleichterung fachtechnischer Untersuchungen. Dadurch sind die früher aus praktischen Gründen unmöglichen aufwendigen Rechenverfahren und Simulationen komplexer Systeme machbar geworden [7].

In den Abschnitten 5, 6 und 7 wurde kurz gezeigt, wie Störungen und Ausbreitungsverzerrungen von FM-Systemen rechnerisch erfassbar sind. Die Erstellung von Rechenprogrammen entspricht der Beschaffung von Messinstrumenten. Bei vorhandener Software lassen sich rechnerische Untersuchungen in flexiblerer Weise durchführen als Messreihen. So sind dabei auch rasche Überprüfungen nach verschiedenen Gesichtspunkten möglich.

Die aktuellen Probleme sind heute komplexer und erlauben nicht mehr unbedingt Antworten, die sowohl einfach als auch generell gültig *und zugleich* exakt zu sein

vermögen. Dank der künstlichen Intelligenz von Computern können aber auf die vielen konkreten Fragen im einzelnen genaue Antworten erteilt werden. Um die heutigen Möglichkeiten voll zu nutzen, ist deshalb weiterhin die Methodik den neuen Gegebenheiten anzupassen.

Bibliographie

- [1] *Hancock J. C.* An introduction to the principles of communication theory; McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto, London, 1961.
- [2] *Rodnez F., Coates W.* Modern communication systems (2nd edition); Macmillan Publishers, Houndmills, London, 1983.
- [3] *Lücke H.-D.* Signalübertragung (Einführung in die Theorie der Nachrichtenübertragung); 2. Auflage, Springer, Berlin, 1979.
- [4] *Debrunner W.E.* Ausbreitungsverzerrungen bei Phasen- und Frequenzmodulation; Bericht Nr. VA 001.U vom 7. April 1988 der Hauptabteilung Forschung und Entwicklung der Gen.-Dir. PTT, Bern.
- [5] *Debrunner W. E.* Berechnung von Störungen zwischen frequenzmodulierten Systemen; Bericht Nr. VA 004.U vom 9. September 1988 der Hauptabteilung Forschung und Entwicklung der Gen.-Dir. PTT, Bern.
- [6] *Zogg A. und Debrunner W. E.* Übertragungsfunktionen bei Mehrwegempfang in hügeligem Gelände. Techn. Mitt. PTT, Bern 65 (1987) 3, S. 147–151.
- [7] IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Computer-aided modeling, analysis and design of communication systems II. January 1988, Vol. 6, Nr. 1 (ISSN 0733-8716).