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: 31 (1953)

Heft: 12

Artikel: Vergleich zwischen Frequenz- und Phasenmodulation bei Sprache

Autor: Fontanellaz, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-876370

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: 10.12.2025

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

avec les câbles de construction, il est ainsi possible de ponter la section défectueuse entre deux épissures et de rétablir provisoirement le trafic.

L'installation Berne-Besançon qui vient d'être mise en service, donne entière satisfaction. Les valeurs prescrites dans les cahiers des charges sont largement tenues. C'est un résultat encourageant pour le développement futur du réseau coaxial suisse.

Vergleich zwischen Frequenz- und Phasenmodulation bei Sprache

Von *G. Fontanellaz*, Bern

621.396.619.13:621.396.619.14

Zusammenfassung. *Es wird gezeigt, dass die Phasenmodulation gegenüber der Frequenzmodulation bei Übermittlung der Sprache (300...3400 Hz) ein um 8,2 dB besseres Nutzrauschverhältnis aufweist. Vorausgesetzt wird dabei für beide Modulationsarten ein gleiches Nutzrauschverhältnis auf der Hochfrequenzseite und ein gleich grosser mittlerer Frequenzhub. Ferner werden die Zusammenhänge zwischen Verständlichkeit und Geräuschabstand untersucht und miteinander verglichen.*

Résumé. *L'auteur montre que, pour la transmission de la voix (300...3400 Hz), la modulation de phase présente sur la modulation de fréquence un rapport signal utile-bruit amélioré de 8,2 dB, à condition qu'on ait pour les deux genres de modulations un même rapport signal utile-bruit côté haute fréquence et une même déviation de fréquence moyenne. Il examine ensuite et compare entre eux les rapports existant entre la netteté et l'écart signal-bruit.*

Durch den Aufschwung der drahtlosen Nachrichtenübermittlung ist man gezwungen, die zur Verfügung stehenden Hochfrequenzbänder immer besser auszunutzen. Besonders bei den drahtlosen Telephonanlagen, die sich in letzter Zeit stark verbreitet haben, versucht man mit Hilfe zweckmässiger Übertragungssysteme eine dem öffentlichen Telephonnetz entsprechende Qualität zu erreichen. Im UKW-Gebiet werden sich aus naheliegenden Gründen die Frequenzmodulation (FM) und die Phasenmodulation (PhM) durchsetzen. Gegenüber der Amplitudenmodulation besitzen die beiden beachtliche Vorteile:

— Bei den üblichen Hochfrequenzempfangsleistungen ist das Verhältnis Signal zu Rauschen viel günstiger.
— Die Leistungsstufen der Sender sind einfacher und betriebssicherer.
— Mit Hilfe der Begrenzerstufe ist das demodulierte Nutzsignal weitgehend unabhängig von der Grösse eines schwankenden Hochfrequenzsignals.

In dieser Arbeit sollen deshalb einmal die beiden Modulationsarten (FM und PhM) bei Sprachübertragung genauer miteinander verglichen werden. Um einen Gewinn des einen oder andern Systems bestimmen zu können, berechnen wir bei einem gegebenen Nutz-Störsignalverhältnis des Hochfrequenzsignals und einem bestimmten mittleren Frequenzhub den Geräuschabstand am Ausgang der Empfänger. Da die Qualität einer Übermittlung nicht nur vom Geräuschabstand, sondern bei Sprache auch durch die Verständlichkeit gegeben ist, wollen wir auch diese berechnen.

Geräuschabstand

Bekanntlich unterscheiden sich Frequenz- und Phasenmodulation lediglich im funktionellen Zusammenhang zwischen Modulationsfrequenz und Frequenzhub: Bei FM ist der Frequenzhub unabhängig von der Modulationsfrequenz, bei PhM dagegen erhalten wir einen mit der Modulationsfrequenz linear ansteigenden Frequenzhub. Um gleichzeitig die beiden Modulationsarten erfassen zu können, setzen wir die Ausgangsspannung am Ausgang des Diskriminators proportional dem Frequenzhub und einem Frequenzkorrekturfaktor β (f).

$$u_n(f) = k_1 \triangle f(f) \cdot \beta(f) \qquad (1)$$

Im Hinblick auf die kontinuierliche Energieverteilung der Sprache sei die obige Gleichung nur auf das kleine Frequenzintervall df bezogen. Es ist:

u_n (f) : Effektive Nutzspannung im Intervall df;
$\triangle f(f)$: Effektiver Frequenzhub für das Intervall df;
k_1 : Der Proportionalitätsfaktor. Er folgt aus der Demodulationscharakteristik des Diskriminators;
β (f) : Frequenzkorrekturfaktor.

$$\left(FM : \beta(f) = 1 ; \; PhM : \beta(f) = \frac{f_{PhM}}{f} \right)$$

Die gesamte Nutzleistung ist proportional der Summe der Quadrate aller Teilspannungen.

$$U_n^2 = \int_{f_1}^{f_2} u_n^2(f) \cdot df = k_1^2 \int_{f_1}^{f_2} \left[\triangle f(f) \cdot \beta(f) \right]^2 df \qquad (2)$$

Da wir zum Vergleich beider Modulationsarten einen gleichen mittleren Frequenzhub $\triangle F$ voraussetzen, gilt folgende Gleichung:

$$\triangle F^2 = \int_{f_1}^{f_2} \left[\triangle f(f) \right]^2 \cdot df = \text{konstant} \qquad (3)$$

In der Praxis werden die Anlagen meistens mit Sinusspannungen eingestellt. Wir wollen deshalb für Phasenmodulation diejenige Modulationsfrequenz f_{PhM} bestimmen, bei der wir den gleichen effektiven Frequenzhub erhalten wie bei der Aussteuerung mit Sprache. Mit n(f) bezeichnen wir die Amplitudenverteilung der Sprache (s. Fig. 1). Die spezifische Energie der menschlichen Sprache ist nach den statistischen Untersuchungen im Frequenzband etwa bei 400 Hz maximal und nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Bei der Phasenmodulation steigt nun der Frequenzhub linear mit der Modulationsfrequenz an. Damit errechnet sich die gesuchte Vergleichsfrequenz aus der folgenden Beziehung:

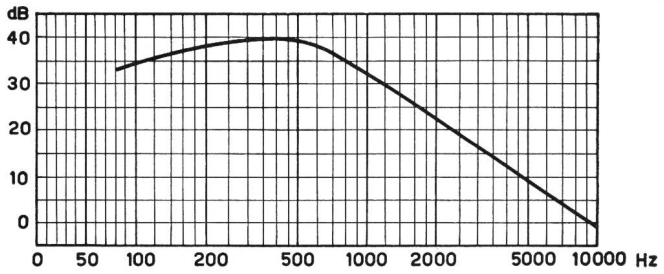

Fig. 1. Mittlere Energieverteilung der Sprache (nach *H. Fletcher* und *R. H. Galt)*

$$f_{PhM}^2 = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \left[f \cdot n(f)\right]^2 \cdot df}{\int_{f_1}^{f_2} \left[n \cdot (f)\right]^2 \cdot df} \qquad (4)$$

Mit Hilfe einer graphischen Integration erhält man für f_{PhM}:

Integrationsbereich	f_{PhM}
0... 12 kHz	833 Hz
300...3400 Hz	804 Hz

Für die Bestimmung der gesamten Rauschleistung untersuchen wir zunächst den Einfluss eines diskreten Störsignals. Wenn wir einen Hochfrequenzträger vom Betrage A und der Frequenz f_H haben und ihm ein kleines Störsignal der folgenden Form überlagern,

$$u_s = a \cos 2\pi (f_H + f_s) \cdot t, \qquad (5)$$

so erhalten wir ein Vektordiagramm nach Fig. 2.

a sei im Hinblick auf eine gleichmässige Störverteilung im Hochfrequenzband auf ein kleines Frequenzband df bezogen. Bei einer effektiven Rauschspannung U_R und einer Hochfrequenzbandbreite f_{HF} wird

$$U_R^2 = \frac{a^2}{2} f_{HF} \text{ oder } a^2 = 2 \frac{U_R^2}{f_{HF}} \qquad (6)$$

In U_R^2 sei der Einfluss des Rauschfaktors des Empfängers miteinbezogen.

In der Annahme, dass $a \leqslant A$ ist, können wir die Phase des resultierenden Vektors mit folgender Beziehung angeben:

$$\varphi = 2\pi f_H t + \frac{a}{A} \sin (2\pi f_s \cdot t) \qquad (7)$$

Durch Differenzieren nach der Zeit erhalten wir die Frequenz:

$$f = f_H + \frac{a}{A} f_s \cos (2\pi f_s \cdot t) \qquad (8)$$

Nach dem Begrenzer ist die Amplitude konstant. Am Ausgang des Frequenzdiskriminators erscheint entsprechend der Frequenzänderung ein Störsignal

$$u_s^*(f_s) = k_1 \frac{a}{A} f_s \cos (2\pi f_s) t \qquad (9)$$

k_1 ist der gleiche Proportionalitätsfaktor wie er bei der Nutzspannung bereits eingeführt wurde. Mit dem Frequenzkorrekturfaktor β (f) erhalten wir für die effektive Teilstörspannung

$$u_s(f_s) = k_1 f_s \frac{a}{\sqrt{2} A} \cdot \beta(f_s) \qquad (10)$$

Definieren wir noch ein Nutz-Störsignalverhältnis γ_H auf der Hochfrequenzseite, so kann der Ausdruck etwas vereinfacht werden.

Es ist

$$\gamma_H = \frac{A}{\sqrt{2} U_R} = \frac{A}{a \cdot \sqrt{f_{HF}}} \qquad (11)$$

Damit wird

$$u_s(f_s) = \cdot \frac{k_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\beta(f_s) \cdot f_s}{\sqrt{f_{HF}}} \cdot \frac{1}{\gamma_H} \qquad (12)$$

Die gesamte Störleistung ist entsprechend der Gleichung (2) wieder proportional der Summe der Quadrate aller Teilspannungen:

$$U_s^2 = \frac{k_1^2}{f_{HF} \cdot \gamma_H^2} \cdot \int_{f_1}^{f_2} \left[f_s \cdot \beta(f_s)\right]^2 \cdot df_s \qquad (13)$$

Entsprechend dem angenommenen Störsignal (vgl. Gleichung 5) müssen die Teilspannungen sowohl mit positivem wie mit negativem f_s berücksichtigt werden. Damit hebt sich das ½ auf.

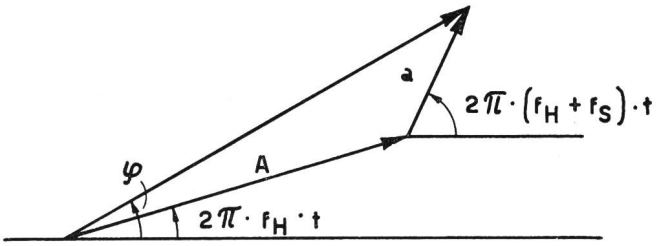

Fig. 2. Vektordiagramm

Bezeichnen wir das Nutz-Störsignalverhältnis auf der Niederfrequenzseite mit γ_N, so erhalten wir mit den Gleichungen (2) und (13) die Gleichung

$$\gamma_N^2 = \frac{U_n^2}{U_s^2} = \frac{f_{HF} \cdot \int_{f_1}^{f_2} \left[\Delta f(f) \cdot \beta(f)\right]^2 \cdot df}{\int_{f_1}^{f_2} \left[f \cdot \beta(f)\right]^2 \cdot df} \gamma_H^2 \qquad (14)$$

Für den Rauschabstand bei Frequenzmodulation bekommen wir beim Einsetzen der entsprechenden Grössen:

$$\triangle f(f) = n(f) \qquad \beta(f) = 1$$

$$\gamma^2_{NFM} = \frac{3 f_{HF} \cdot \triangle F^2}{f_2^3 - f_1^3} \gamma^2_H \tag{15}$$

Der Rauschabstand bei Phasenmodulation wird

$$\triangle f(f) = \frac{f}{f_{PhM}} \cdot n(f) \qquad \beta(f) = \frac{f_{PhM}}{f}$$

$$\gamma^2_{NPhM} = \frac{f_{HF} \cdot \triangle F^2}{f^2_{PhM}(f_2 - f_1)} \cdot \gamma^2_H \tag{16}$$

Der Quotient aus den beiden Rauschabständen ergibt die Verbesserung der Phasenmodulation

$$x^2 = \frac{\gamma^2_{NPhM}}{\gamma^2_{NFM}} = \frac{f_2^3 - f_1^3}{3 f^2_{PhM}(f_2 - f_1)} \tag{17}$$

f_1 ist dabei die untere, f_2 die obere Grenzfrequenz des übertragenen Frequenzbandes, f_{PhM} ist die Vergleichsfrequenz für FM/PhM (s. Gleichung 4).

Für ein Band von 300...3400 Hz erhalten wir für PhM folgende beachtliche Verbesserung:

$$x = 2{,}56 \quad \text{oder} \quad \underline{8{,}2\,\text{dB}}$$

Dieser Wert wird bei der Erweiterung des Frequenzbandes noch grösser.

Die voranstehende Ableitung wurde unter der Annahme durchgeführt, dass für die Aussteuerung des Frequenzhubes nur ein über eine längere Zeit gemessener mittlerer Effektivwert des Signals massgebend sei. Der gefundene Unterschied der beiden Modulationsarten gilt deshalb nur, wenn ausser dem mittleren effektiven Pegel auch die Dynamik der beiden Frequenzhübe gleich gross ist. Zur Abklärung dieser Frage wurde eine statistische Untersuchung durchgeführt, bei der man das ganze Sprechsignal in einzelne Frequenzbänder (Bandbreite etwa ⅓ Oktave) aufteilte.

Im Frequenzbereich von 200...5000 Hz zeigte sich, dass die statistische Verteilung der relativen Signalspitzen in allen Bändern annähernd konstant blieb und derjenigen des gesamten Signals entsprach. In diesem Frequenzbereich ist die Dynamik somit weitgehend unabhängig von einem Frequenzgang. Da die häufigst vorkommenden Laute und Silben eine ähnliche spektrale Energieverteilung aufweisen, war dieses Resultat zu erwarten. Eine kleine Ausnahme bilden dabei die nicht ins Gewicht fallenden Energieteile der scharfen Zischlaute oberhalb 5000 Hz.

Verständlichkeit

Es hat sich bei der Berechnung der Verständlichkeit als zweckmässig erwiesen, eine Bandverständlichkeit einzuführen. Diese gründet sich auf die Vorstellung, dass jedes Frequenzband eines Sprechlautes einen Beitrag zur Verständlichkeit gibt, der von den andern Bändern unabhängig ist. Die Summe der Einzelbeiträge ist dann massgebend für die gesamte Verständlichkeit. *L. C. Pocock* [1] beschreibt eine Methode, die gestattet, aus den physikalischen Grössen eines Übertragungssystems die Verständlichkeit zu berechnen. Wie aus der Arbeit hervorgeht, sind die einzelnen Beiträge an die Verständlichkeit für jedes Band vom Pegel oberhalb der Hörschwelle abhängig.

Bei Anwesenheit eines Geräusches werden zusätzliche Bestandteile der Sprache verdeckt. Dieser Verdeckungseffekt kann aus der spektralen Verteilung des Geräusches und der kritischen Bandbreite für das menschliche Ohr berechnet werden [2]. Der Einfluss wirkt sich in einer Erhöhung der ursprünglichen Hörschwelle aus. Da uns zum Vergleich in erster Linie die schlechten Verbindungen interessieren, wollen wir annehmen, dass der Störpegel für die zu untersuchenden Übertragungen immer so gross ist, dass er für die Hörschwelle allein massgebend sei. Damit wird die Berechnung der Verständlichkeit vom absoluten Hörpegel unabhängig. Als Basis für die Berechnung genügt dann lediglich noch die Kenntnis des Nutz-Störsignalverhältnisses. Gleichung (14) erlaubt uns, dieses für die verschiedenen Bänder zu bestimmen. Da wir die einzelnen Frequenzbänder genügend schmal wählen (200 Hz), dürfen wir die einzelnen Grössen für diesen Bereich als konstant annehmen. Damit wird das Nutz-Störsignalverhältnis für ein Band

$$\gamma^2_N(f) = f_{HF} \left[\frac{\triangle f(f)}{f} \right]^2 \gamma^2_H \tag{18}$$

Beim Vergleich der Modulationsarten muss wieder Gleichung (3) erfüllt sein.

Wir verzichten hier auf Einzelheiten der Berechnung, wollen uns aber anhand der Hördiagramme die vorhandenen Verhältnisse veranschaulichen.

In den Figuren 3 und 4 bedeutet die Kurve A die spektrale Energieverteilung der Nutzenergie am Empfängerausgang. Sie entspricht infolge des gefor-

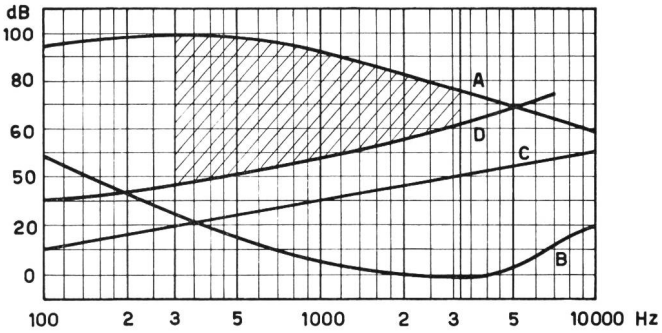

Fig. 3. Hörfläche bei Frequenzmodulation

derten linearen Frequenzganges des Übertragungssystems der Energieverteilung der Sprache. B ist die absolute Hörschwelle. Die Fläche zwischen den beiden Grenzfrequenzen 300 und 3400 Hz der Kurve A und der Hörschwelle ist ein indirektes Mass für die Verständlichkeit. Bei Anwesenheit eines Geräusches wird die absolute Hörschwelle erhöht. C ist die spektrale Energieverteilung pro Hz des Geräusches. Die zusätzliche Erhöhung von C nach D ergibt sich aus der kritischen Bandbreite des Ohres. Bei Anwesenheit

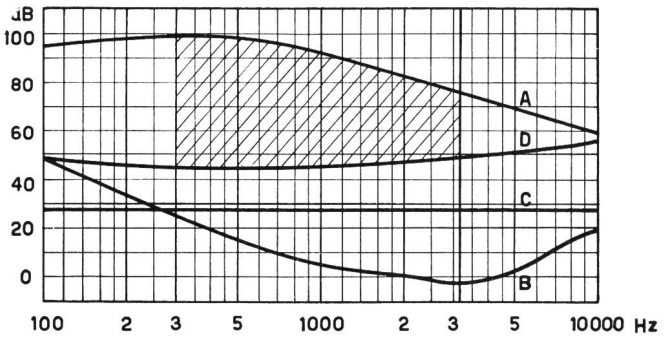

Fig. 4. Hörfläche bei Phasenmodulation

eines Geräusches ist damit die schraffierte Fläche ein Mass der Nutzenergie, welche zur Verständlichkeit einer Übertragung beiträgt. Die Kurven sind relativ zueinander aufgetragen und entsprechen sehr guten Verbindungen. Der Geräuschabstand bei FM ist 55 dB, derjenige bei PhM 63 dB.

Man erkennt sofort, dass das FM-System im besonderen die tiefen Frequenzen bevorzugt. Bei dieser Modulationsart ist die für die Verständlichkeit brauchbare Energieverteilung ungleichmässiger verteilt als bei PhM. Die Verständlichkeit bei grossen Geräuschabständen wird deshalb etwas schlechter sein.

Wird dagegen der Geräuschabstand in beiden Systemen um den gleichen Betrag verkleinert, so erkennt man unschwer, dass das PhM-System früher keine brauchbare Nutzenergie mehr aufweist. Die Verständlichkeit bei kleiner werdendem Geräuschabstand wird deshalb bei FM langsamer und bei PhM schneller abnehmen.

Eine genaue Berechnung der Verhältnisse ergibt die beiden Kurven in Fig. 5. Das übertragene Frequenzband ist 300...3400 Hz.

Die beiden Skalen der Nutz-Rauschsignalverhältnisse auf der Abszisse sind um 8,2 dB gegeneinander verschoben und so aufgetragen, dass sie sich auf gleiche Nutz-Rauschsignalverhältnisse auf der Hochfrequenzseite beziehen. Auf der Ordinate ist die Lautverständlichkeit angegeben. Eine Lautverständlichkeit von 88 % entspricht einer Silbenverständlichkeit von etwa 71 % und einer Satzverständlichkeit von 98 %. Dieser Wert kann noch als zulässig betrachtet werden. Bei dieser Verständlichkeit ist PhM noch etwa um 5 dB besser als FM. Die dazugehörigen niederfrequenten Rauschabstände wären für FM 15,8 dB und für PhM 19,0 dB.

Aus dem Verlauf der Kurven kann man weiter ablesen, dass bis hinunter zu einer Lautverständlichkeit von rund 55 % die Phasenmodulation gegenüber der Frequenzmodulation im Vorteil ist. Unterhalb dieser Grenze wäre der Frequenzmodulation der Vorteil zu geben. Eine solche Verbindung, deren Lautverständlichkeit aber nur noch 55 % oder weniger beträgt, wird für Telephoniezwecke nicht mehr in Frage kommen.

Es lässt sich zeigen, dass für Anlagen, bei denen weniger auf hohe Qualität, dafür mehr auf weite Verbindungsmöglichkeiten geachtet werden muss (Polizei, Militär), man mit Hilfe ausgewählter Frequenzgänge weitere Verbesserungen erzielen kann. Bei der Festlegung eines solchen Übertragungssystems ist man bestrebt, die für die Verständlichkeit wichtigsten Energieteile auf Kosten anderer zu bevorzugen. Bei schlechter werdendem Geräuschabstand bleiben diese Teile dann länger oberhalb der

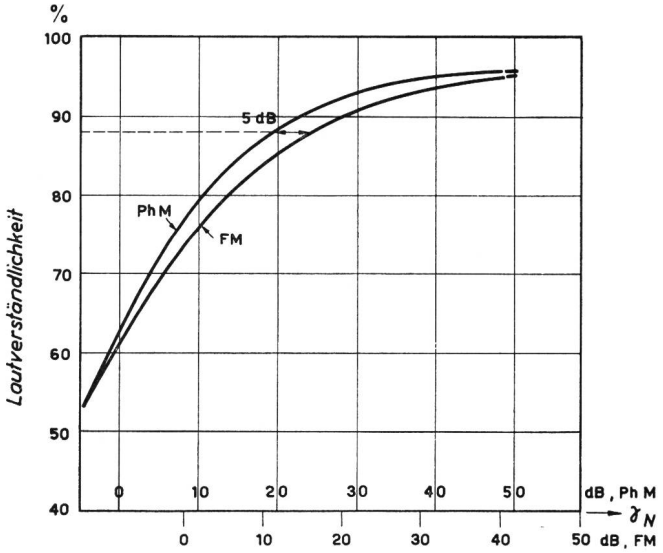

Fig. 5. Vergleich der Verständlichkeit bei Frequenz- und Phasenmodulation

geräuschbestimmten Hörschwelle. Die funktionellen Zusammenhänge zwischen Modulationsfrequenz und Frequenzhub werden zweckmässig auf der Sende- und Empfangsseite verschieden gewählt. Damit können unangenehme Geräusche zusätzlich reduziert werden. Infolge des schlechteren Frequenzganges besitzen solche Systeme bei grossen Geräuschabständen keine optimale Verständlichkeit mehr; dafür nimmt bei ihnen aber bei abnehmendem Hochfrequenzsignal die Verständlichkeit nur allmählich ab.

Bibliographie

[1] *L. C. Pocock.* The Calculation of Articulation for Effective Rating of Telephone Circuits. Electrical Communcation **18** (1939–1940), 120...132.

[2] *H. Fletcher* and *R. Galt.* The Perception of Speech and its Relation to Telephony. J. Acoust. Soc. Am. **22** (1950), 89...151.