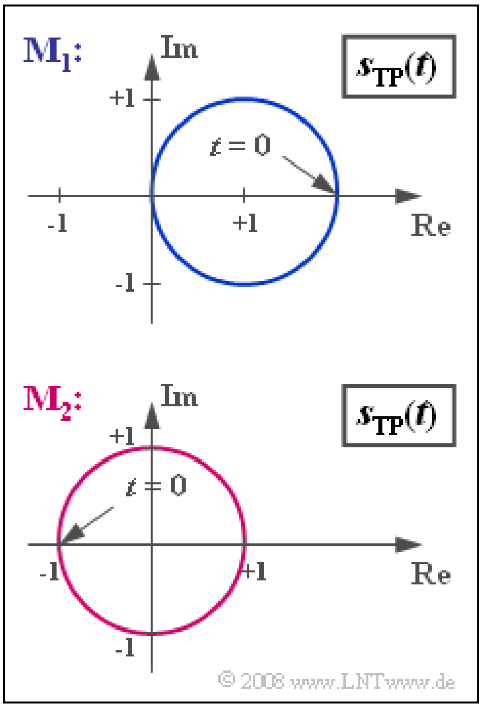
A3.1: Ortskurve bei Phasenmodulation



Die Grafik zeigt Ortskurven am Ausgang zweier Modulatoren M_1 und M_2. Real- und Imaginärteil sind in dieser Grafik jeweils auf 1 V normiert.

Unter der Ortskurve versteht man allgemein die Darstellung des äquivalenten Tiefpass–Signals $s_{\rm TP}(t)$ in der komplexen Ebene. Das Quellensignal sei bei beiden Modulatoren gleich:

$$q(t) = A_{\rm N} \cdot \cos(2\pi f_{\rm N} \cdot t),$$
$$A_{\rm N} = 2\,{\rm V}, \quad f_{\rm N} = 5\,{\rm kHz}.$$

Einer der beiden Modulatoren realisiert eine Phasenmodulation, die durch folgende Gleichungen gekennzeichnet ist:

$$\begin{aligned} s(t) &= A_{\rm T} \cdot \cos\left(\omega_{\rm T} \cdot t + \phi(t)\right), \\ s_{\rm TP}(t) &= A_{\rm T} \cdot {\rm e}^{{\rm j}\cdot \phi(t)}, \\ \phi(t) &= K_{\rm PM} \cdot q(t). \end{aligned}$$

Den Maximalwert von $\phi(t)$ nennt man Modulationsindex η – teilweise wird diese Größe in der Literatur auch als Phasenhub bezeichnet.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1.**

Fragebogen zu "A3.1: Ortskurve bei Phasenmodulation"

a) Welches Modulationsverfahren verwendet der Modulator M_1?

- Zweiseitenband–Amplitudenmodulation.
- Einseitenband–Amplitudenmodulation.
- Phasenmodulation.

b) Welches Modulationsverfahren verwendet der Modulator M_2?

- Zweiseitenband–Amplitudenmodulation.
- Einseitenband–Amplitudenmodulation.
- Phasenmodulation.

c) Wie groß ist die Trägeramplitude $A_{\rm T}$ beim Phasenmodulator? Beachten Sie die Normierung auf 1 V.

$\boldsymbol{A_{\rm T}}$ = V

d) Welche Werte besitzen der Modulationsindex und die Modulatorkonstante?

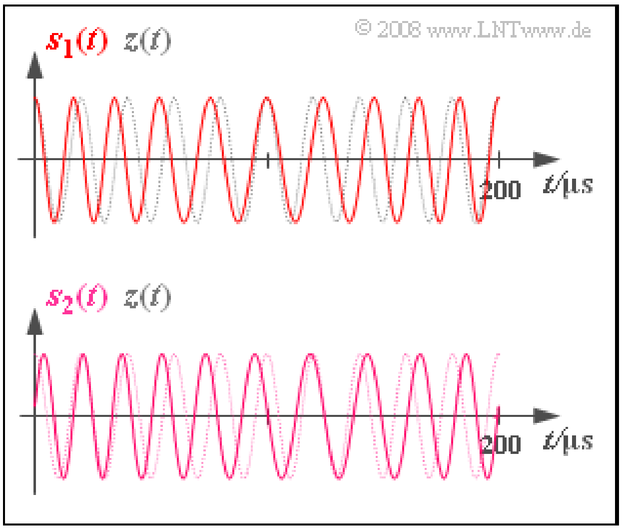
$\boldsymbol{\eta}$ =

$\boldsymbol{K_{\rm PM}}$ = 1/V

e) Beschreiben Sie die Bewegung auf der Ortskurve. Zu welcher Zeit t_1 wird zum ersten Mal wieder der Ausgangspunkt $s_{\rm TP}(t = 0) = –1 {\rm V}$ erreicht?

$\boldsymbol{t_1}$ = µs

Z3.1: Einfluss der Phase bei PM



Wir betrachten die Phasenmodulation verschiedener Schwingungen

$$q(t) = \cos(\omega_{\rm N} \cdot t + \phi_{\rm N}) .$$

Das Quellensignal ist hierbei normiert (Amplitude 1) dargestellt, so dass das phasenmodulierte Signal mit dem Modulationsindex (bzw. Phasenhub) η wie folgt beschrieben werden kann:

$$s(t) = A_{\rm T} \cdot \cos\left(\omega_{\rm T} \cdot t + \eta \cdot q(t)\right) .$$

Das in der oberen Grafik dargestellte Signal $s_1(t)$ ist durch die Parameterwerte $\phi_{\rm N}$ = –90° und η_1 = 2 charakterisiert. Die Frequenz $f_{\rm N}$ dieses sinusförmigen Quellensignals soll ebenso wie die Trägerfrequenz $f_{\rm T}$ aus dem dargestellten Signalausschnitt der Dauer 200 µs ermittelt werden.

Das Signal $s_2(t)$ unterscheidet sich von $s_1(t)$ möglicherweise durch eine andere Nachrichtenphase $\phi_{\rm N}$ und einen anderen Modulationsindex η. Alle anderen Systemparameter sind gegenüber $s_1(t)$ unverändert.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1.**

Fragebogen zu "Z3.1: Einfluss der Phase bei PM"

a) Ermitteln Sie die Frequenz des Nachrichtensignals.

f_N = kHz

b) Wie groß ist die Trägerfrequenz?

f_T = kHz

c) Wie groß ist die maximale Phasenabweichung zwischen $z(t)$ und $s(t)$?

ϕ_{max} = rad

d) Zu welcher Zeitverschiebung der Nulldurchgänge führt diese Phase?

Δt_{max} = µs

e) Bestimmen Sie den Modulationsindex η_2 für das Signal $s_2(t)$.

η_2 =

f) Welche Phasenlage hat das für $s_2(t)$ zugrunde liegende Quellensignal?

ϕ_{N2} = Grad

A3.2: Spektrum bei Winkelmodulation

Es wird hier von folgenden Gleichungen ausgegangen:

- Quellensignal:

$$q(t) = 2\,\mathrm{V} \cdot \sin(2\pi \cdot 3\,\mathrm{kHz} \cdot t)\,,$$

- Sendesignal:

$$s(t) = 1\,\mathrm{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 100\,\mathrm{kHz} \cdot t + K \cdot q(t))\,,$$

- idealer Kanal, d.h. das Empfangssignal:

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) = \\ &= 1\,\mathrm{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 100\,\mathrm{kHz} \cdot t + \phi(t))\,, \end{aligned}$$

- idealer Demodulator;

$$v(t) = \frac{1}{K} \cdot \phi(t)\,.$$

	$\eta = 1$	$\eta = 2$	$\eta = 3$
$J_0(\eta)$	0.765	0.224	-0.260
$J_1(\eta)$	0.440	0.577	0.339
$J_2(\eta)$	0.115	0.353	0.486
$J_3(\eta)$	0.020	0.129	0.309
$J_4(\eta)$	0.002	0.034	0.132
$J_5(\eta)$	≈ 0	0.007	0.043
$J_6(\eta)$	≈ 0	≈ 0	0.012
$J_7(\eta)$	≈ 0	≈ 0	0.004
$J_8(\eta)$	≈ 0	≈ 0	≈ 0

Die Grafik zeigt die Besselfunktionen erster Art und *n*-ter Ordnung in tabellarischer Form.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 3.1.**

Fragebogen zu "A3.2: Spektrum bei Winkelmodulation"

a) Welches Modulationsverfahren liegt hier vor?

- Amplitudenmodulation.
- Phasenmodulation.
- Frequenzmodulation.

b) Welches Modulationsverfahren würden Sie wählen, wenn die Kanalbandbreite B_K = 10 kHz betragen würde?

- Amplitudenmodulation.
- Phasenmodulation.
- Frequenzmodulation.

c) Wie ist die Modulatorkonstante zu wählen, damit der Phasenhub η = 1 beträgt?

$\boldsymbol{K}$ = 1/V

d) Berechnen Sie das Spektrum $S_{TP}(f)$ des äquivalenten Tiefpass–Signals. Wie groß sind die Gewichte der Spektrallinien bei f = 0 und f = –3 kHz?

$\boldsymbol{S_{TP}(f = 0)}$ = V

$\boldsymbol{S_{TP}(f = -3\ \text{kHz})}$ = V

e) Berechnen Sie die Spektren des analytischen Signals sowie des physikalischen Signals. Wie groß sind die Gewichte der Spektrallinien bei 97 kHz?

$\boldsymbol{S_+(f = 97\ \text{kHz})}$ = V

$\boldsymbol{S(f = 97\ \text{kHz})}$ = V

f) Wie groß ist die erforderliche Kanalbandbreite B_K, wenn man (betragsmäßige) Impulsgewichte kleiner als 0.01 vernachlässigt?

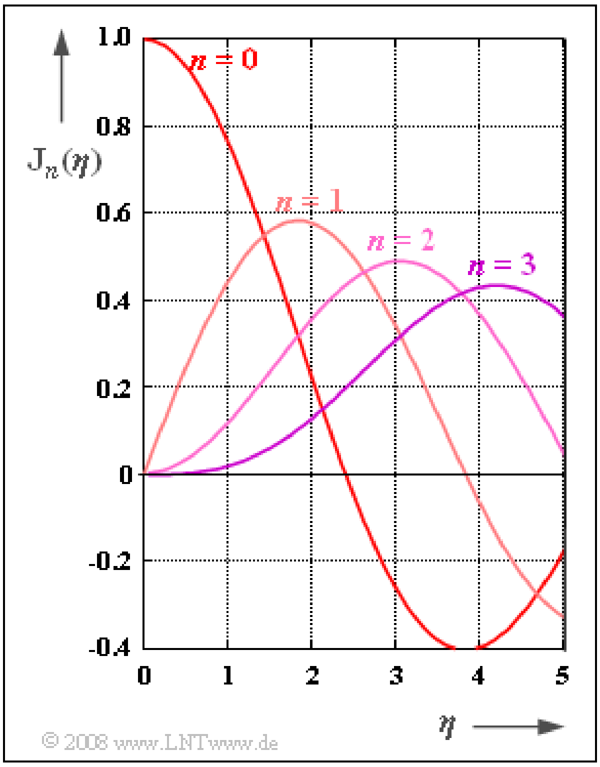
$\boldsymbol{\eta = 1 : B_K}$ = kHz

g) Welche Kanalbandbreiten würden sich für η = 2 und η = 3 ergeben?

$\boldsymbol{\eta = 2 : B_K}$ = kHz

$\boldsymbol{\eta = 3 : B_K}$ = kHz

Z3.2: Besselspektrum



Wir betrachten das komplexe Signal

$$x(t) = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\cdot\eta\cdot\sin(\omega_0\cdot t)}.$$

Beispielsweise kann man das äquivalente TP–Signal am Ausgang eines Winkelmodulators (PM, FM) in dieser Form darstellen, wenn man geeignete Normierungen vornimmt.

Die Fourierreihendarstellung lautet mit $T_0 = 2\pi/\omega_0$:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} D_n \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\cdot n\cdot\omega_0\cdot t},$$

$$D_n = \frac{1}{T_0}\cdot\int_{-T_0/2}^{+T_0/2} x(t)\cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\cdot n\cdot\omega_0\cdot t}\,\mathrm{d}t.$$

Diese komplexen Fourierkoeffizienten können mit Hilfe der Besselfunktionen erster Art und n–ter Ordnung ausgedrückt werden:

$$\mathrm{J}_n(\eta) = \frac{1}{2\pi}\cdot\int_{-\pi}^{+\pi} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\cdot(\eta\cdot\sin(\alpha)-n\cdot\alpha)}\,\mathrm{d}\alpha.$$

Diese sind in der Grafik im Bereich $0 \le \eta \le 5$ dargestellt. Für negative Werte von n erhält man:

$$\mathrm{J}_{-n}(\eta) = (-1)^n\cdot\mathrm{J}_n(\eta).$$

Die Reihendarstellung der Besselfunktionen lautet:

$$\mathrm{J}_n(\eta) = \sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k\cdot(\eta/2)^{n+2\cdot k}}{k!\cdot(n+k)!}.$$

Sind die Funktionswerte für $n = 0$ und $n = 1$ bekannt, so können die Besselfunktionen für $n \ge 2$ iterativ ermittelt werden:

$$\mathrm{J}_n(\eta) = \frac{2\cdot(n-1)}{\eta}\cdot\mathrm{J}_{n-1}(\eta) - \mathrm{J}_{n-2}(\eta).$$

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die Seite **Besselfunktionen erster Art und *n*–ter Ordnung.**
Sie können auch folgendes Interaktionsmodul nutzen:
Werte der Besselfunktion erster Art und *n*–ter Ordnung (Dateigröße: 26 kB)

Fragebogen zu "Z3.2: Besselspektrum"

a) Welche Eigenschaften besitzt das Signal $x(t)$?

- ☐ $x(t)$ ist für alle Zeiten t imaginär.
- ☐ $x(t)$ ist periodisch.
- ☐ Die Spektralfunktion $X(f)$ erhält man über das Fourierintegral.

b) Schreiben Sie die Fourierkoeffizienten D_n mit den Besselfunktionen erster Art. Welche Zusammenhänge sind zu erkennen?

- ☐ Alle D_n sind gleich $\mathrm{J}_\eta(0)$.
- ☐ Es gilt $D_n = \mathrm{J}_n(\eta)$.
- ☐ Es gilt $D_n = -\mathrm{J}_\eta(n)$.

c) Welche Eigenschaften besitzen die Fourierkoeffizienten?

- ☐ Alle D_n sind rein reell.
- ☐ Alle D_n sind rein imaginär.

d) Für $\eta = 2$ lauten die Koeffizienten $D_0 = 0.224$ und $D_1 = 0.577$. Berechnen Sie hieraus die Koeffizienten D_2 und D_3.

$\boldsymbol{D_2}$ =

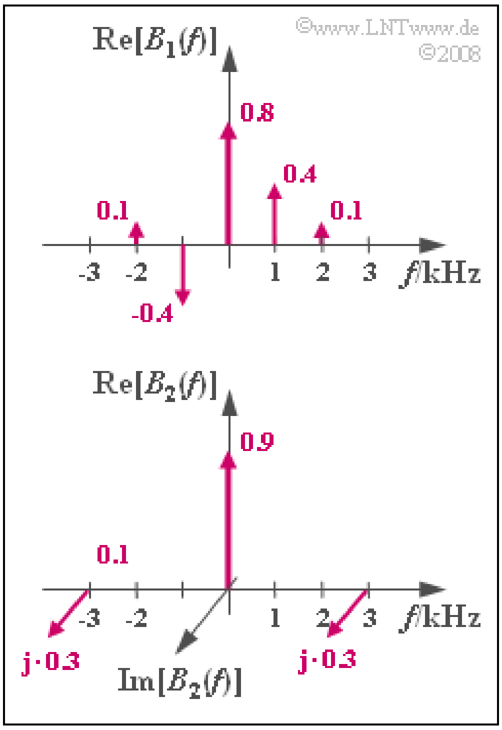
$\boldsymbol{D_3}$ =

e) Wie lauten die Fourierkoeffizienten D_{-2} und D_{-3} ?

$\boldsymbol{D_{-2}}$ =

$\boldsymbol{D_{-3}}$ =

A3.3: Summe zweier Schwingungen



Das äquivalente TP–Signal bei Phasenmodulation lautet

$$s_{\rm TP}(t) = {\rm e}^{{\rm j}\hspace{0.05cm}\cdot \hspace{0.05cm}K_{\rm PM}\hspace{0.05cm}\cdot \hspace{0.05cm}q(t)}\hspace{0.05cm},$$

wenn eine Normierung auf die Trägeramplitude vorgenommen wird ($A_{\rm T}$ = 1). Die Modulatorkonstante wird in der gesamten Aufgabe zu $K_{\rm PM}$ = 1/V angenommen.

Die obere Grafik zeigt die dazugehörige Spektralfunktion $B_1(f)$, wenn das Quellensignal

$$q_1(t) = 0.9\,{\rm V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\,{\rm kHz} \cdot t)$$

anliegt. Die Gewichte der Bessel-Diraclinien ergeben sich mit η_1 = 0.9 wie folgt:

$$\begin{aligned} {\rm J}_0(0.9) &= 0.808 \approx 0.8, \\ {\rm J}_1(0.9) &= 0.406 \approx 0.4, \\ {\rm J}_2(0.9) &= 0.095 \approx 0.1, \\ {\rm J}_3(0.9) &\approx {\rm J}_4(0.9) \approx \ldots \approx 0\,. \end{aligned}$$

Verwenden Sie zur Vereinfachung der Berechnungen die in der Skizze angegebenen Näherungswerte.

Die Besselfunktion $B_2(f)$ ergibt sich für das Quellensignal

$$q_2(t) = 0.65\,{\rm V} \cdot \cos(2\pi \cdot 3\,{\rm kHz} \cdot t)$$

Die Zahlenwerte der Diraclinien erhält man aus

$${\rm J}_0(0.65) = 0.897 \approx 0.9, \quad {\rm J}_1(0.65) = 0.308 \approx 0.3, \quad {\rm J}_2(0.65) = 0.051 \approx 0\,.$$

Aus der obigen Grafik ist zu erkennen, dass aufgrund des cosinusförmigen Quellensignals $q_2(t)$ und des cosinusförmigen Trägersignals $z(t)$ die Spektrallinien bei ±3 kHz jeweils positiv–imaginär sind.

Im Rahmen dieser Aufgabe soll nun der Fall untersucht werden, dass das Quellensignal

$$q(t) = q_1(t) + q_2(t)$$

am Eingang des Phasenmodulators anliegt. Zu erwähnen ist, dass $|q(t)| < q_{\rm max}$ = 1.45 V gilt. Dieser Maximalwert ist etwas kleiner als die Summe $A_1 + A_2$ der Einzelamplituden, wenn eine Sinus– und eine Cosinusfunktion mit den gegebenen Amplituden aufaddiert werden.

Im Fragebogen bezeichnen $S_{\rm TP}(f)$ und $S_+(f)$ die Spektralfunktionen von äquivalentem TP–Signal und analytischem Signal unter der Annahme, dass $q(t)$ anliegt und die Trägerfrequenz $f_{\rm T}$ = 100 kHz beträgt.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 3.1.**

Fragebogen zu "A3.3: Summe zweier Schwingungen"

a) Welche geometrische Figur beschreibt die Ortskurve $s_{TP}(t)$?

- ☐ Die Ortskurve ist eine Ellipse.
- ☐ Die Ortskurve ist ein Kreis.
- ☐ Die Ortskurve ist näherungsweise ein Halbkreis.
- ☐ Die Ortskurve ist ein Kreisbogen, etwa mit Öffnungswinkel 90°.

b) Berechnen Sie die Spektralfunktion $S_{TP}(f)$. Zwischen welchen Frequenzen f_{min} und f_{max} liegen Spektrallinien?

f_{min} = ____ kHz

f_{max} = ____ kHz

c) Berechnen Sie das Gewicht der Diracfunktion bei $f = 0$.

$\mathrm{Re}[S_{TP}(f = 0)]$ = ____

$\mathrm{Im}[S_{TP}(f = 0)]$ = ____

d) Berechnen Sie das Gewicht der Diracfunktion bei $f = 1$ kHz.

$\mathrm{Re}[S_{TP}(f = 1\text{ kHz})]$ = ____

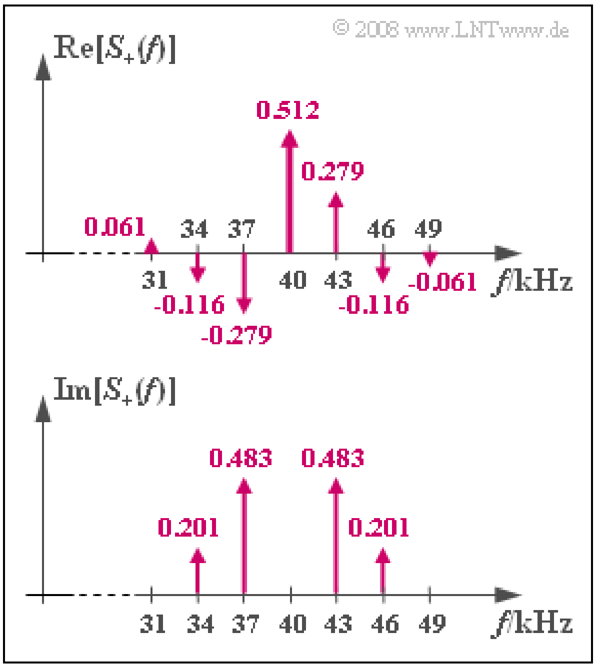
$\mathrm{Im}[S_{TP}(f = 1\text{ kHz})]$ = ____

e) Berechnen Sie das Gewicht der $S_+(f)$–Diracfunktion bei $f = 98$ kHz.

$\mathrm{Re}[S_+(f = 98\text{ kHz})]$ = ____

$\mathrm{Im}[S_+(f = 98\text{ kHz})]$ = ____

Z3.3: Kenngrößenbestimmung



Wir betrachten die Phasenmodulation der harmonischen Schwingung

$$q(t) = A_{\rm N} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{\rm N} \cdot t + \phi_{\rm N}),$$

die bei Voraussetzung einer normierten Trägeramplitude ($A_{\rm T}$ = 1) zu folgendem Sendesignal führt:

$$s(t) = \cos\left(\omega_{\rm T} \cdot t + K_{\rm PM} \cdot q(t)\right) .$$

Das Spektrum des dazugehörigen analytischen Signals $s_{\rm TP}(t)$ lautet allgemein:

$$S_{\rm TP}(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} {\rm J}_n(\eta) \cdot {\rm e}^{{\rm j} \cdot n \cdot (\phi_{\rm N} + 90^\circ)} \cdot \delta(f - n \cdot f_{\rm N}) .$$

Hierbei bezeichnet man $\eta = K_{\rm PM} \cdot A_{\rm N}$ als den Modulationsindex.

In der Grafik ist das Spektrum $S_+(f)$ des analytischen Signals $s_+(t)$ getrennt nach Real- und Imaginärteil dargestellt. Aus diesem sollen die Kenngrößen $f_{\rm T}$, $f_{\rm N}$, $\phi_{\rm N}$ und η ermittelt werden.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1.** Zur Berechnung des Modulationsindex können Sie folgende Eigenschaft der Besselfunktion ausnutzen:

$${\rm J}_n(\eta) = \frac{2 \cdot (n-1)}{\eta} \cdot {\rm J}_{n-1}(\eta) - {\rm J}_{n-2}(\eta) \quad \Rightarrow \quad {\rm J}_2(\eta) = \frac{2}{\eta} \cdot {\rm J}_1(\eta) - {\rm J}_0(\eta) .$$

Fragebogen zu "Z3.3: Kenngrößenbestimmung"

a) Wie groß sind die Frequenzen $f_{\rm T}$ und $f_{\rm N}$?

$f_{\rm T}$ = kHz

$f_{\rm N}$ = kHz

b) Berechnen Sie den Betrag und die Phase von $S_{\rm TP}(f = 3 \text{ kHz})$.

$|S_{\rm TP}(f = 3 \text{ kHz})|$ =

$\text{arc } S_{\rm TP}(f = 3 \text{ kHz})$ = Grad

c) Berechnen Sie den Betrag und die Phase von $S_{\rm TP}(f = 6 \text{ kHz})$.

$|S_{\rm TP}(f = 6 \text{ kHz})|$ =

$\text{arc } S_{\rm TP}(f = 6 \text{ kHz})$ = Grad

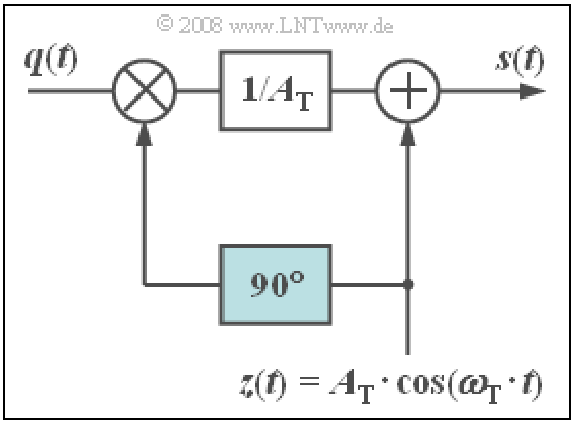
d) Wie groß ist die Phase des Quellensignals?

$\phi_{\rm N}$ = Grad

e) Wie groß ist der Modulationsindex?

η =

A3.4: Einfacher Phasenmodulator



Die nebenstehende Schaltung erlaubt die näherungsweise Realisierung eines phasenmodulierten Signals. Der 90°–Phasenschieber formt aus dem cosinusförmigen Träger $z(t)$ ein Sinussignal gleicher Frequenz, so dass für das modulierte Signal geschrieben werden kann:

$$s(t) = z(t) + q(t) \cdot \frac{z(t - T_0/4)}{A_\mathrm{T}} = $$
$$= A_\mathrm{T} \cdot \cos(\omega_\mathrm{T} \cdot t) + q(t) \cdot \sin(\omega_\mathrm{T} \cdot t) \, .$$

Der zweite Term beschreibt eine ZSB–AM ohne Träger. Zusätzlich wird der um 90° phasenverschobene Träger addiert. Bei cosinusförmigem Quellensignal

$$q(t) = A_\mathrm{N} \cdot \cos(\omega_\mathrm{N} \cdot t)$$

ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} s(t) &= A_\mathrm{T} \cdot \cos(\omega_\mathrm{T} \cdot t) + A_\mathrm{N} \cdot \cos(\omega_\mathrm{N} \cdot t) \cdot \sin(\omega_\mathrm{T} \cdot t) \, , \\ &= A_\mathrm{T} \cdot [\cos(\omega_\mathrm{T} \cdot t) + \eta \cdot \cos(\omega_\mathrm{N} \cdot t) \cdot \sin(\omega_\mathrm{T} \cdot t)] \, . \end{aligned}$$

Hierbei bezeichnen wir das Verhältnis $\eta = A_\mathrm{N}/A_\mathrm{T}$ als den Modulationsindex; die Trägeramplitude wird im Folgenden zur Vereinfachung $A_\mathrm{T} = 1$ gesetzt.

Im Gegensatz zur idealen PM unterscheidet sich bei dieser näherungsweisen Phasenmodulation η vom Phasenhub ϕ_max. Außerdem werden Sie erkennen, dass die Hüllkurve $a(t) \neq 1$ ist. Das bedeutet, dass hier der Phasenmodulation eine unerwünschte Amplitudenmodulation überlagert ist.

Berechnet werden sollen in dieser Aufgabe aus der Darstellung des äquivalenten TP–Signals $s_\mathrm{TP}(t)$ in der komplexen Ebene (Ortskurve) die Hüllkurve $a(t)$ und die Phasenfunktion $\phi(t)$. Außerdem sollen die Verfälschungen analysiert werden, die sich ergeben, wenn bei diesem nichtidealen Modulator ein idealer Phasendemodulator zugrundegelegt wird, der das Sinkensignal $v(t)$ proportional zur Phase $\phi(t)$ setzt.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 3.1.** Zur näherungsweisen Berechnung des Klirrfaktors können Sie folgende Gleichungen benutzen:

$$\arctan(\gamma) \approx \gamma - \frac{\gamma^3}{3} \, , \quad \cos^3(\gamma) = \frac{3}{4} \cdot \cos(\gamma) + \frac{1}{4} \cdot \cos(3 \cdot \gamma) \, .$$

Fragebogen zu "A3.4: Einfacher Phasenmodulator"

a) Berechnen Sie das äquivalente TP–Signal. Welche Aussage trifft zu?

- [ ] Die Ortskurve $s_{\rm TP}(t)$ ist ein Kreisbogen.
- [ ] Die Ortskurve $s_{\rm TP}(t)$ ist eine horizontale Gerade.
- [ ] Die Ortskurve $s_{\rm TP}(t)$ ist eine vertikale Gerade.

b) Berechnen Sie die (normierte) Hüllkurve $a(t)$ für $A_{\rm T}$ = 1. Wie groß sind deren Minimal– und Maximalwert mit η = 1?

$\boldsymbol{\eta = 1: a_{\rm min}}$ =

$\boldsymbol{\eta = 1: a_{\rm max}}$ =

c) Berechnen Sie den Maximalwert der Phase $\phi(t)$ für η = 1 und η = 0.5.

$\boldsymbol{\eta = 1: \phi_{\rm max}}$ = Grad

$\boldsymbol{\eta = 0.5: \phi_{\rm max}}$ = Grad

d) Welche Verzerrungen ergeben sich nach idealer Phasendemodulation von $s(t)$?

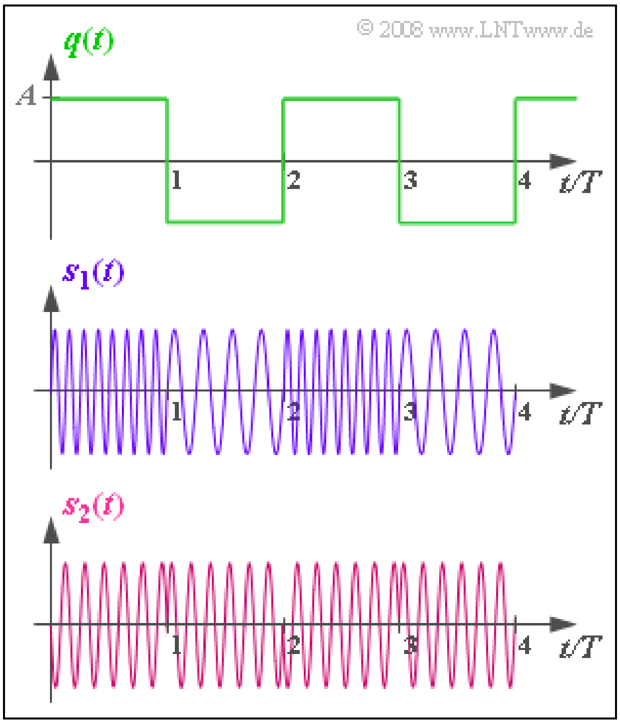
- [ ] Es treten keine Verzerrungen auf.
- [ ] Es treten lineare Verzerrungen auf.
- [ ] Es treten nichtlineare Verzerrungen auf.

e) Berechnen Sie den Klirrfaktor unter Berücksichtigung der auf der Angabenseite genannten trigonometrischen Beziehungen.

$\boldsymbol{\eta = 1: K}$ = %

$\boldsymbol{\eta = 0.5: K}$ = %

A3.5: PM und FM bei Rechtecken



Wir gehen von einem bipolaren und rechteckförmigen Quellensignal $q(t)$ aus, welches im oberen Diagramm dargestellt ist.

Dieses kann nur die beiden Signalwerte $\pm A = \pm 2$ V annehmen und die Dauer der positiven und negativen Rechtecke ist jeweils $T = 1$ ms. Die Periodendauer von $q(t)$ ist demzufolge $T_0 = 2$ ms.

Die Signale $s_1(t)$ und $s_2(t)$ zeigen zwei Sendesignale bei Winkelmodulation (WM), die jeweils in der Form

$$s(t) = A_{\rm T} \cdot \cos(\psi(t))$$

darstellbar sind. Hierbei unterscheidet man zwischen der Phasenmodulation (PM) mit der Winkelfunktion

$$\begin{aligned}\psi(t) &= \omega_{\rm T} \cdot t + \phi(t) \\ &= \omega_{\rm T} \cdot t + K_{\rm PM} \cdot q(t)\end{aligned}$$

und der Frequenzmodulation (FM), bei der die Augenblicksfrequenz linear mit $q(t)$ zusammenhängt:

$$f_{\rm A}(t) = \frac{\omega_{\rm A}(t)}{2\pi}, \quad \omega_{\rm A}(t) = \frac{{\rm d}\psi(t)}{{\rm d}t} = \omega_{\rm T} + K_{\rm FM} \cdot q(t)\,.$$

$K_{\rm PM}$ und $K_{\rm FM}$ bezeichnen dimensionsbehaftete, durch die Realisierung des PM– bzw. FM–Modulators vorgegebene Konstante. Der Frequenzhub $\Delta f_{\rm A}$ gibt die maximale Abweichung der Augenblicksfrequenz von der Trägerfrequenz an.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.** Im Vorgriff auf das Kapitel 4 sei erwähnt, dass man die Phasenmodulation bei digitalem Eingangssignal auch als PSK (*Phase Shift Keying*) und entsprechend die Frequenzmodulation als FSK (*Frequency Shift Keying*) bezeichnet.

Fragebogen zu "A3.5: PM und FM bei Rechtecken"

a) Welches der Signale ist durch eine PM, welches durch eine FM entstanden?

- $s_1(t)$ beschreibt eine Phasenmodulation.
- $s_1(t)$ beschreibt eine Frequenzmodulation.

b) Wie groß ist die Trägerphase ϕ_T, die man mit $q(t) = 0$ messen könnte?

$\boldsymbol{\phi}_{\mathbf{T}}$ = Grad

c) Welche Trägerfrequenz (bezogen auf $1/T$) wurde bei den Grafiken verwendet?

$\boldsymbol{f}_{\mathbf{T}} \cdot \boldsymbol{T}$ =

d) Das Phase des PM–Signals ist ±90°. Wie groß ist die Modulatorkonstante?

$\boldsymbol{K}_{\mathbf{PM}}$ = V^{-1}

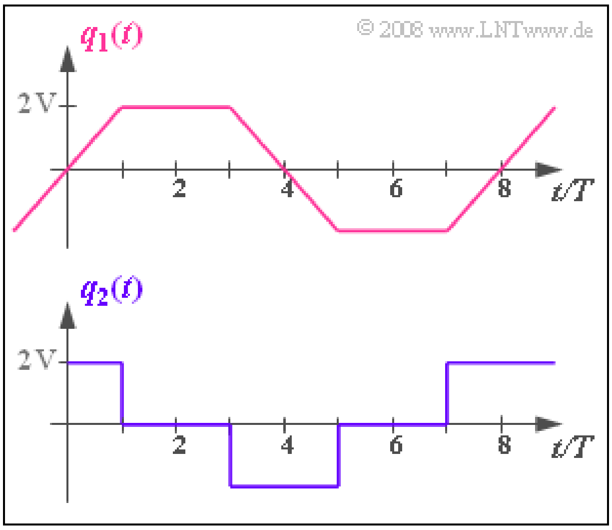
e) Wie groß ist der Frequenzhub Δf_A des FM–Signals, bezogen auf $1/T$?

$\boldsymbol{\Delta f}_{\mathbf{A}} \cdot \boldsymbol{T}$ =

f) Wie groß ist die FM–Modulatorkonstante?

$\boldsymbol{K}_{\mathbf{FM}}$ = $\mathrm{V}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$

Z3.5: PM eines Trapezsignals



Ein Phasenmodulator mit dem Eingangssignal $q_1(t)$ und dem modulierten Signal $s(t)$ am Ausgang wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\begin{aligned} s(t) &= A_{\rm T} \cdot \cos(\psi(t)) = \\ &= A_{\rm T} \cdot \cos(\omega_{\rm T} \cdot t + K_{\rm PM} \cdot q_1(t)) \, . \end{aligned}$$

Die Trägerkreisfrequenz beträgt $\omega_T = 2\pi \cdot 10^5$ 1/s. Berücksichtigen Sie bei der Lösung dieser Aufgabe, dass die Augenblickskreisfrequenz $\omega_A(t)$ stets gleich der Ableitung der Winkelfunktion $\psi(t)$ nach der Zeit ist. Die Augenblicksfrequenz ist $f_A(t) = \omega_A(t)/2\pi$.

Als Testsignal wird das trapezförmige Signal $q_1(t)$ gemäß der oberen Skizze angelegt, wobei die Zeitdauer $T = 10$ µs beträgt.

Zum gleichen modulierten Signal $s(t)$ würde ein Frequenzmodulator mit der Winkelfunktion

$$\psi(t) = \omega_{\rm T} \cdot t + K_{\rm FM} \cdot \int q_2(t) \;{\rm d}t$$

führen, wenn das rechteckförmige Quellensignal $q_2(t)$ entsprechend der unteren Skizze angelegt wird.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.**

Fragebogen zu "Z3.5: PM eines Trapezsignals"

a) Wie ist die Modulatorkonstante $K_{\rm PM}$ zu wählen, damit $\phi_{\rm max} = 3$ rad beträgt?

$K_{\rm PM}$ = $\rm V^{-1}$

b) Welche Werte nimmt die Augenblicksfrequenz $f_{\rm A}(t)$ im Bereich $0 < t < T$ an?

0 ... T: $f_{\rm A,\ min}$ = kHz

0 ... T: $f_{\rm A,\ max}$ = kHz

c) Welche Werte nimmt die Augenblicksfrequenz $f_{\rm A}(t)$ im Bereich $T < t < 3T$ an?

T ... $3T$: $f_{\rm A,\ min}$ = kHz

T ... $3T$: $f_{\rm A,\ max}$ = kHz

d) Welche Werte besitzt die Augenblicksfrequenz $f_{\rm A}(t)$ im Bereich $3T < t < 5T$?

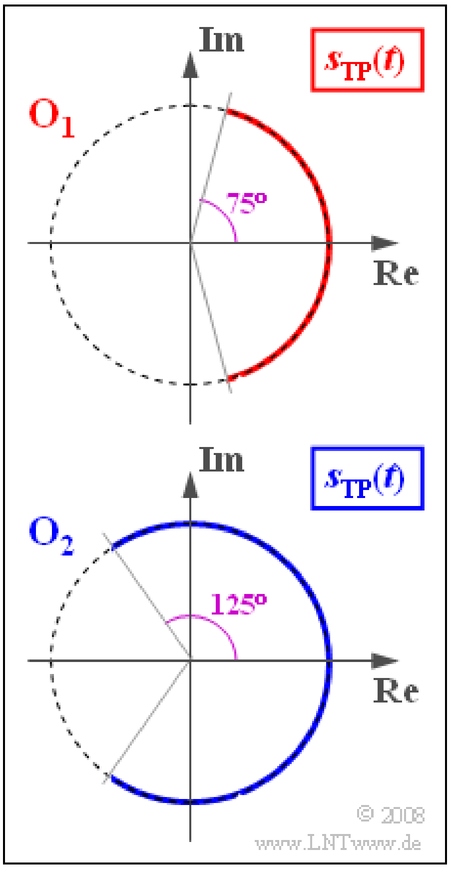
$3T$ ... $5T$: $f_{\rm A,\ min}$ = kHz

$3T$ ... $5T$: $f_{\rm A,\ max}$ = kHz

e) Wie muss die Modulatorkonstante $K_{\rm FM}$ gewählt werden, damit das Signal $q_2(t)$ nach Frequenzmodulation zum gleichen HF–Signal $s(t)$ führt?

$K_{\rm FM}$ = $\rm V^{-1}s^{-1}$

A3.6: PM oder FM? Oder AM?



Zur Analyse eines Modulators wird an seinen Eingang das Signal

$$q(t) = A_N \cdot \cos(2\pi \cdot f_N \cdot t + \phi_N)$$

angelegt, wobei die Signalamplitude stets A_N = 2 V beträgt. Mit der Signalfrequenz $f_N = f_1$ = 5 kHz wird die Ortskurve O_1 ermittelt. Verwendet man die Nachrichtenfrequenz $f_N = f_2$, so stellt sich die Ortskurve O_2 ein.

Beachten Sie bei Ihrer Lösung, dass bei Winkelmodulation – dies ist der Sammelbegriff für Phasen– und Frequenzmodulation – der folgende Zusammenhang zwischen dem Modulationsindex η und der Modulatorkonstanten K_{WM} besteht:

$$\eta = \begin{cases} K_{WM} \cdot A_N & \text{bei PM}, \\ \frac{K_{WM} \cdot A_N}{2\pi \cdot f_N} & \text{bei FM}. \end{cases}$$

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich wieder auf die Theorieteile von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.**

Fragebogen zu "A3.6: PM oder FM? Oder AM?"

a) Um welchen Modulator handelt es sich?

- AM–Modulator.
- PM–Modulator.
- FM–Modulator.

b) Wie groß ist der Modulationsindex mit der Nachrichtenfrequenz $f_N = f_1$?

η_1 =

c) Welchen Wert besitzt die Modulatorkonstante? *Hinweis:* Je nachdem, ob es sich um PM oder FM handelt, ist die Einheit „V^{-1}" bzw. „$V^{-1}s^{-1}$".

K_{WM} = V^{-1} oder $V^{-1}s^{-1}$

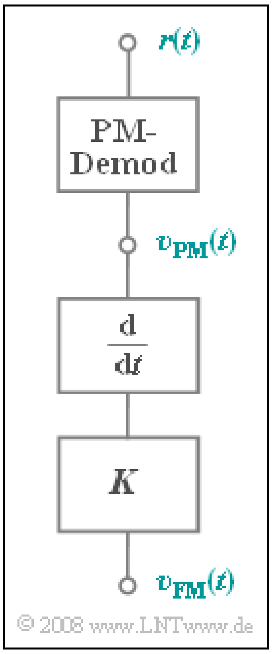
d) Welchen Winkel ϕ_0 weist die Ortskurve mit $\phi_N = 30°$ zum Zeitpunkt $t = 0$ auf?

$\phi_N = 30°$: ϕ_0 = Grad

e) Mit welcher Nachrichtenfrequenz $f_N = f_2$ wurde die Ortskurve O_2 ermittelt?

f_2 = kHz

Z3.6: WM einer harmonischen Schwingung



Das an einem Empfänger ankommende Signal lautet:

$$r(t) = 3\,\mathrm{V} \cdot \cos\left[2\pi \cdot 1\,\mathrm{MHz} \cdot t + 3 \cdot \cos(2\pi \cdot 10\,\mathrm{kHz} \cdot t)\right] .$$

Bei $r(t)$ handelt es sich um ein winkelmoduliertes Signal, das bei der Übertragung weder verzerrt noch durch Rauschen beaufschlagt wurde. Die Signale $v_{\rm PM}(t)$ und $v_{\rm FM}(t)$ ergeben sich nach idealer Demodulation mittels

- Phasendemodulator, gegeben durch die Gleichung

$$v_{\rm PM}(t) = \frac{1}{K_{\rm PM}} \cdot \phi_r(t)\,, \quad K_{\rm PM} = 2\,\mathrm{V}^{-1}\,,$$

- Frequenzdemodulator, bestehend aus PM–Demodulator, Differenzierer und einer Konstanten K. Damit alle Signale gleiche Einheiten besitzen, ist diese Konstante dimensionsbehaftet.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.**

Fragebogen zu "Z3.6: WM einer harmonischen Schwingung"

a) Welche Aussagen treffen mit Sicherheit zu?

- [ ] Es könnte eine PM–Modulation vorliegen.
- [ ] Es könnte eine FM–Modulation vorliegen.
- [ ] Die Nachrichtenphase ist sicher $\phi_N = 0$.
- [ ] Die Nachrichtenfrequenz ist sicher $f_N = 10$ kHz.

b) Berechnen Sie das Signal $v_{PM}(t)$ nach dem Phasendemodulator. Wie groß ist der Signalwert zum Zeitpunkt $t = 0$?

$\boldsymbol{v_{PM}(t = 0)}$ = ____ V

c) Berechnen Sie das Signal $v_{FM}(t)$. Wie groß ist die Nachrichtenphase ϕ_N?

$\boldsymbol{\phi_N}$ = ____ Grad

d) Wie groß ist K zu wählen, damit die Amplitude von $v_{FM}(t)$ gleich 1.5 V ist?

$\boldsymbol{K}$ = ____ 1/s

e) Welche der folgenden Aussagen treffen für das FM–modulierte Signal zu?

- [ ] Der Phasenhub beträgt $\phi_{max} = 3$.
- [ ] Der Frequenzhub beträgt $\Delta f_A = 30$ kHz.
- [ ] Es treten Augenblicksfrequenzen zwischen 0.97 und 1.03 MHz auf.
- [ ] Mit $f_N = 5$ kHz würde sich am Phasenhub nichts ändern.
- [ ] Mit $f_N = 5$ kHz würde sich am Frequenzhub nichts ändern.

A3.7: Modulationsindex und Bandbreite

η	$J_0(\eta)$	$J_1(\eta)$	$J_2(\eta)$
0.0	1.000	0.000	0.000
0.4	0.960	0.196	0.020
0.8	0.846	0.369	0.076
1.2	0.671	0.498	0.159
1.6	0.455	0.570	0.257
2.0	0.224	0.577	0.353
2.4	0.003	0.520	0.431
2.8	-0.185	0.410	0.478
3.2	-0.320	0.261	0.484

Eine harmonische Schwingung der Form

$$q(t) = A_{\rm N} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{\rm N} \cdot t + \phi_{\rm N})$$

wird winkelmoduliert und dann das einseitige Betragsspektrum $|S_+(f)|$ ermittelt. Mit der Nachrichtenfrequenz $f_{\rm N}$ = 2 kHz sind folgende Spektrallinien mit folgenden Gewichten zu erkennen:

$$\begin{aligned} |S_+(98\,{\rm kHz})| &= |S_+(102\,{\rm kHz})| = 1.560\,{\rm V}\,, \\ |S_+(96\,{\rm kHz})| &= |S_+(104\,{\rm kHz})| = 1.293\,{\rm V}\,, \\ |S_+(94\,{\rm kHz})| &= |S_+(106\,{\rm kHz})| = 0.594\,{\rm V}\,. \end{aligned}$$

Weitere Spektrallinien folgen mit jeweiligem Frequenzabstand $f_{\rm N}$ = 2 kHz, sind hier jedoch nicht angegeben und können vernachlässigt werden.

Erhöht man die Nachrichtenfrequenz auf $f_{\rm N}$ = 4 kHz, so ergeben sich die dominanten Linien

$$\begin{aligned} |S_+(100\,{\rm kHz})| &= 2.013\,{\rm V}\,, \\ |S_+(96\,{\rm kHz})| &= |S_+(104\,{\rm kHz})| = 1.494\,{\rm V}\,, \\ |S_+(92\,{\rm kHz})| &= |S_+(108\,{\rm kHz})| = 0.477\,{\rm V}\,, \end{aligned}$$

sowie weitere, vernachlässigbare Diraclinien im Abstand 4 kHz.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.**

Fragebogen zu "A3.7: Modulationsindex und Bandbreite"

a) Welches Modulationsverfahren liegt hier vor?

- Phasenmodulation.
- Frequenzmodulation.

b) Wie groß ist der Modulationsindex η_2 bei der Nachrichtenfrequenz f_N = 2 kHz?

η_2 =

c) Wie groß ist die Trägeramplitude?

A_T = V

d) Geben Sie die Bandbreite an, wenn ein Klirrfaktor K < 1% gefordert wird.

B_2 = kHz

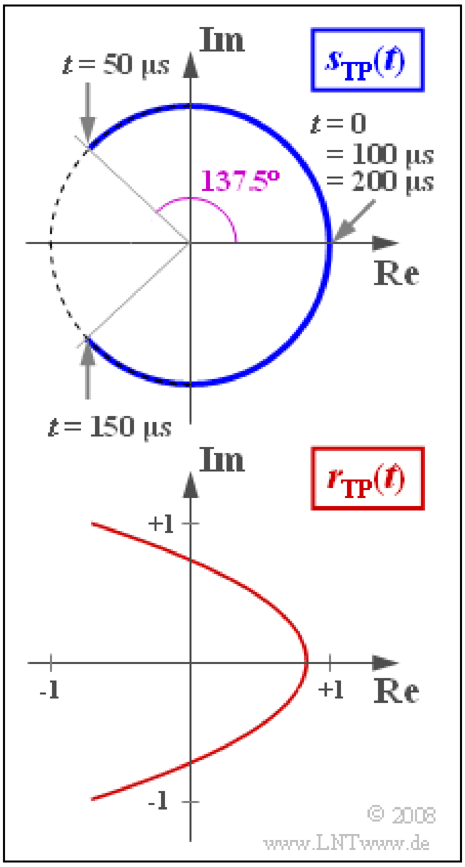
e) Welcher Modulationsindex η_4 tritt bei der Nachrichtenfrequenz f_N = 4 kHz auf?

η_4 =

f) Welche Kanalbandbreite ist nun erforderlich, um K < 1% zu gewährleisten?

B_4 = kHz

A3.8: Kreisbogen und Parabel



Wir betrachten hier die Frequenzmodulation eines cosinusförmigen Quellensignals

$$q(t) = A_\mathrm{N} \cdot \cos(2\pi \cdot f_\mathrm{N} \cdot t)$$

mit der Amplitude A_N = 1 V und der Frequenz f_N = 5 kHz. Der Modulationsindex (Phasenhub) beträgt η = 2.4. Das zugehörige TP–Signal lautet bei normierter Trägeramplitude (A_T = 1):

$$s_\mathrm{TP}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \mathrm{J}_n(\eta) \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j} \cdot n \cdot \omega_\mathrm{N} \cdot t}.$$

Dieses beschreibt einen Kreisbogen. Innerhalb der Periodendauer $T_\mathrm{N} = 1/f_\mathrm{N}$ = 200 µs ergeben sich folgende Phasenwinkel:

$$\phi(0) = 0, \;\; \phi(0.25 \cdot T_\mathrm{N}) = \eta, \;\; \phi(0.5 \cdot T_\mathrm{N}) = 0,$$
$$\phi(0.75 \cdot T_\mathrm{N}) = -\eta, \;\; \phi(T_\mathrm{N}) = 0.$$

Die erforderliche Kanalbandbreite zur Übertragung dieses Signals ist theoretisch unendlich groß. Ist die Bandbreite jedoch begrenzt, z. B. auf B_K = 25 kHz, so kann das äquivalente TP–Signal des Empfangssignals wie folgt beschrieben werden:

$$r_\mathrm{TP}(t) = \sum_{n=-2}^{+2} \mathrm{J}_n(\eta) \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j} \cdot n \cdot \omega_\mathrm{N} \cdot t}.$$

In diesem Fall ergibt sich eine parabelförmige Ortskurve

$$y^2 + a \cdot x + b = 0,$$

die in dieser Aufgabe analysiert werden soll.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 3.1** und **Kapitel 3.2.** Gehen Sie bei der Berechnung von folgenden Werten der Besselfunktion aus:

$$\mathrm{J}_0(2.4) \approx 0, \;\; \mathrm{J}_1(2.4) = -\mathrm{J}_{-1}(2.4) \approx 0.52, \;\; \mathrm{J}_2(2.4) = \mathrm{J}_{-2}(2.4) \approx 0.43.$$

Fragebogen zu "A3.8: Kreisbogen und Parabel"

a) Wie groß ist die Modulatorkonstante?

K_{FM} = $V^{-1}s^{-1}$

b) Berechnen Sie den Realteil $x(t)$ = Re[$r_{TP}(t)$] des äquivalenten TP-Signals und geben Sie dessen Maximum und Minimum an.

x_{max} =

x_{min} =

c) Wie groß ist das Maximum und Minimum des Imaginärteils $y(t)$ = Im[$r_{TP}(t)$]?

y_{max} =

y_{min} =

d) Welche Phasenwerte ergeben sich bei allen Vielfachen von $T_N/2$?

$\phi(t = n \cdot T_N/2)$ = Grad

e) Wie groß ist der maximale Phasenwinkel ϕ_{max}? Interpretieren Sie das Ergebnis.

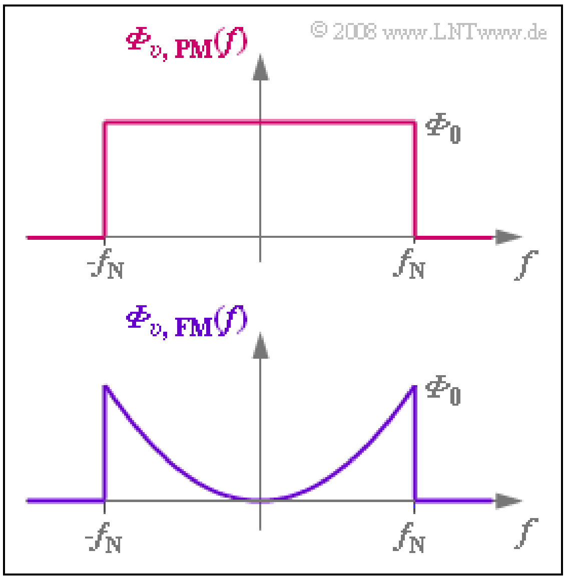
ϕ_{max} = Grad

f) Zeigen Sie, dass man die Ortskurve in der Form $y^2 + a \cdot x + b = 0$ angeben kann. Bestimmen Sie die Parabelparameter a und b.

a =

b =

A3.9: Rauschen bei PM und FM



Betrachtet werden die Phasen– und Frequenzmodulation einer Cosinusschwingung mit der Frequenz f_N. Zunächst gelte für die Nachrichtenfrequenz $f_N = f_5 = 5$ kHz und der Modulationsindex (Phasenhub) sei $\eta = 5$.

Bei Vorhandensein von additivem Gaußschen Rauschen mit der Rauschleistungsdichte N_0 ergibt sich nach dem PM–Demodulator eine konstante Rauschleistungsdichte $\Phi_{v,\,\mathrm{PM}}(f) = \Phi_0$, die auch vom Modulationsindex abhängt:

$$\Phi_0 = \frac{N_0}{\eta^2}\,.$$

Für die Berechnung der Rauschleistung P_R ist lediglich der Frequenzbereich von $\pm f_N$ relevant (siehe Grafik).

Die Rauschleistungsdichte nach der FM–Demodulation lautet mit dem Frequenzhub Δf_A:

$$\Phi_{v,\,\mathrm{FM}}(f) = N_0 \cdot \left(\frac{f}{\Delta f_A}\right)^2\,.$$

Gegeben ist der Rauschabstand $10 \cdot \lg \rho_v = 50$ dB für Phasenmodulation und $f_N = 5$ kHz. Gesucht sind in dieser Aufgabe der Rauschabstand bei FM ($f_N = 5$ kHz) sowie die sich ergebenden Rauschabstände von PM und FM für die Nachrichtenfrequenz $f_N = f_{10} = 10$ kHz.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 3.3.**

Fragebogen zu "A3.9: Rauschen bei PM und FM"

a) Welcher Rauschabstand ergibt sich bei f_N = 10 kHz und PM? Interpretieren Sie das Ergebnis.

PM, f_N = 10 kHz: 10 · lg ρ_v = dB

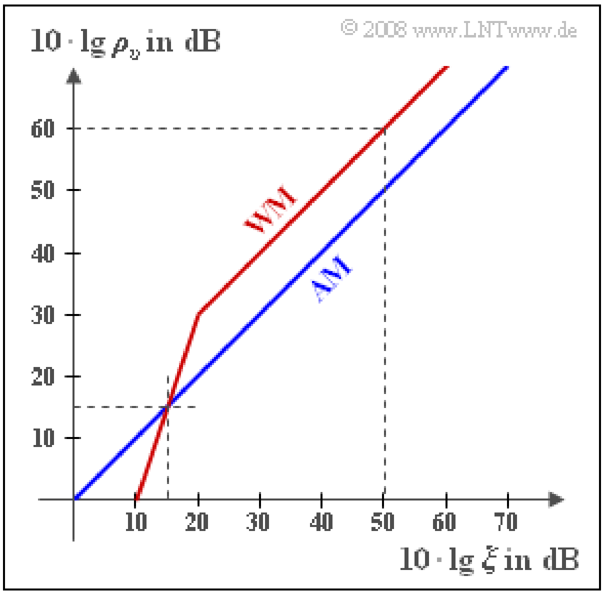
b) Berechnen Sie den Rauschabstand für f_N = 5 kHz und FM. Wie groß ist der Modulationsindex bei dieser Konstellation?

FM, f_N = 5 kHz: 10 · lg ρ_v = dB

c) Berechnen Sie den Rauschabstand für f_N = 10 kHz und FM. Interpretieren Sie das Ergebnis im Vergleich zu den Teilfragen a) und b).

FM, f_N = 10 kHz: 10 · lg ρ_v = kHz

Z3.9: Systemvergleich AM–PM–FM



Betrachtet wird die Übertragung eines Cosinussignals mit Amplitudenmodulation und Winkelmodulation. Es gelten folgende Randbedingungen:

- Nachrichtenfrequenz f_N = 10 kHz,
- Sendeleistung P_S = 100 kW,
- Kanaldämpfungsfaktor 20 · lg α_K = –120 dB,
- Rauschleistungsdichte $N_0 = 10^{-16}$ W/Hz.

Diese Systemparameter werden zweckmäßigerweise zur gemeinsamen Leistungskenngröße

$$\xi = \frac{\alpha_K^2 \cdot P_S}{N_0 \cdot B_{NF}}$$

zusammengefasst. Die Grafik zeigt den sich ergebenden Sinken–Störabstand 10 · lg ρ_v in Abhängigkeit der logarithmierten Leistungskenngröße ξ.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 2.2** , **Kapitel 3.2** und **Kapitel 3.3.** Es gelten folgende Beziehungen:

$$\rho_v = \begin{cases} \xi & \text{bei ZSB/ESB – AM ohne Träger}\,, \\ \eta^2/2 \cdot \xi & \text{bei PM mit Modulationsgrad } \eta\,, \\ 3\eta^2/2 \cdot \xi & \text{bei FM mit Modulationsgrad } \eta\,. \end{cases}$$

Die Bandbreiten bei Winkelmodulation sind so zu wählen, dass ein Klirrfaktor K kleiner als 1% garantiert werden kann (**Carson–Regel**):

$$B_K = 2 \cdot f_N \cdot (\eta + 2)\,.$$

Fragebogen zu "Z3.9: Systemvergleich AM–PM–FM"

a) Berechnen Sie die logarithmierte Leistungskenngröße ξ.

$10 \cdot \lg \xi$ = dB

b) Welcher Sinkenstörabstand ergibt sich beim AM–System?

$10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

c) Welche spezielle Form der AM könnte hier vorliegen?

- ☐ ZSB–AM.
- ☐ ESB–AM.
- ☐ AM ohne Träger.
- ☐ AM mit zugesetztem Träger.

d) Wie groß ist im Fall der ZSB–AM die erforderliche Kanalbandbreite?

B_K = kHz

e) Wie groß ist der Sinkenstörabstand beim WM–System?

$10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

f) Welche Bandbreite ist beim vorgegebenen PM–System mindestens erforderlich, wenn $K < 1\%$ gelten soll?

B_K = kHz

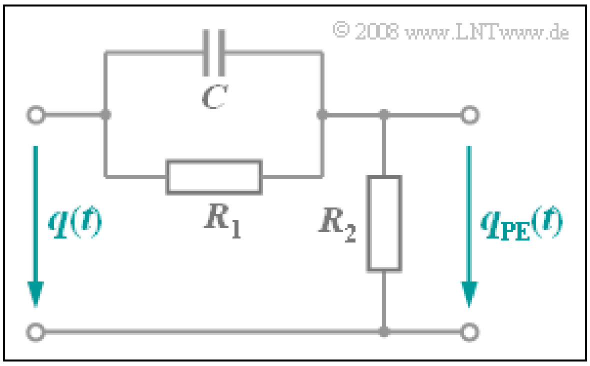
g) Wie groß ist für $K < 1\%$ die erforderliche Bandbreite, wenn das WM–System eine Frequenzmodulation realisiert?

B_K = kHz

h) Wie groß muss bei sonst gleichen Parametern die Sendeleistung mindestens sein, damit das WM–System nicht schlechter als das AM–System ist?

P_S = kW

A3.10: Preemphase–Deemphase



Bei der Sprach– und Tonsignalübertragung wird das Signalfrequenzband vor dem FM–Modulator über ein RC–Hochpassglied gemäß der Skizze vorverzerrt. Man bezeichnet diese Maßnahme als Preemphase.

Der Amplitudengang des Preemphase–Netzwerks lautet mit den beiden Grenzfrequenzen $f_{G1} = (2\pi \cdot R_1 \cdot C)^{-1}$ und $f_{G2} = f_{G1}/\alpha_0$ sowie dem Faktor $\alpha_0 = R_2/(R_1 + R_2)$:

$$|H_{PE}(f)| = \alpha_0 \cdot \sqrt{\frac{1+(f/f_{G1})^2}{1+(f/f_{G2})^2}}\,.$$

Für den praktischen Betrieb kann man davon ausgehen, dass die maximale Nachrichtenfrequenz f_N sehr viel kleiner als f_{G2} ist. Berücksichtigt man weiter, dass der Gleichsignalübertragungsfaktor α_0 durch eine Verstärkung in α verändert werden kann, so ist im Weiteren von folgendem Preemphase–Frequenzgang auszugehen ($f_G = f_{G1} = 3$ kHz):

$$|H_{PE}(f)| \approx \alpha \cdot \sqrt{1+(f/f_G)^2}\,.$$

Mit diesem Netzwerk lautet der Frequenzhub Δf_A in Abhängigkeit der Nachrichtenfrequenz f_N:

$$\Delta f_A(f_N) = \Delta f_{A,\,min} \cdot \sqrt{1+(f_N/f_G)^2}\,.$$

Hierbei ist $\Delta f_{A,\,min}$ der maximale Frequenzhub für sehr kleine Frequenzen ($f_N \to 0$). Dieser Parameter ist so zu wählen, dass der maximale Frequenzhub $\Delta f_{A,\,max}$ nicht größer wird als 45 kHz.

Gehen Sie in der gesamten Aufgabe von einem Nachrichtensignal aus, das Frequenzen bis einschließlich $B_{NF} = 9$ kHz beinhaltet.

Um das Nutzsignal nicht zu verfälschen, muss diese Vorverzerrung durch ein Deemphase–Netzwerk beim Empfänger wieder ausgeglichen werden. Ziel und Zweck von Preemphase/Deemphase ist es allein, die Abhängigkeit des Signal–zu–Rausch–Leistungsverhältnisses von der Signalfrequenz zu vermindern.

In dieser Aufgabe werden folgende Größen verwendet:

- Sinken–SNR bei ZSB–AM:

$$\rho_{AM} = \frac{P_S}{N_0 \cdot f_N} = \xi \quad \Rightarrow \quad 10 \cdot \lg\, \rho_{AM} = 10 \cdot \lg\, \xi\,,$$

- Sinken–SNR und Störabstandsgewinn bei FM ohne Preemphase/Deemphase:

$$\rho_{FM} = \frac{3}{2} \cdot \eta^2 \cdot \rho_{AM} \quad \Rightarrow \quad G_{FM} = 10 \cdot \lg\, \rho_{FM} - 10 \cdot \lg\, \rho_{AM} = 10 \cdot \lg\, \frac{3}{2} \cdot \eta^2\,,$$

- Sinken–SNR und Störabstandsgewinn bei FM durch Preemphase/Deemphase:

$$\rho_{\rm DE} = \frac{(f_{\rm N}/f_{\rm G})^3}{3 \cdot (f_{\rm N}/f_{\rm G} - \arctan(f_{\rm N}/f_{\rm G})} \quad \Rightarrow \quad G_{\rm DE} = 10 \cdot {\rm lg}\ \rho_{\rm DE} - 10 \cdot {\rm lg}\ \rho_{\rm FM}\,.$$

Die Herleitung dieses Ergebnisses findet man auf Seite 152 von **[Mäu88].**

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 3.3.**

Fragebogen zu "A3.10: Preemphase–Deemphase"

a) Geben Sie eine mögliche Realisierung des Deemphase–Netzwerks $H_{DE}(f)$ an. Welche der nachfolgenden Aussagen sind richtig?

- [ ] $H_{DE}(f)$ ist ein Tiefpass erster Ordnung.
- [ ] $H_{DE}(f)$ ist ein Hochpass erster Ordnung.
- [ ] $H_{DE}(f)$ ist ein Bandpass.
- [ ] Zusätzlich muss der Faktor α korrigiert werden.

b) Wie groß ist der Störabstandsgewinn der herkömmlichen FM gegenüber AM, wenn die Nachrichtenfrequenz f_N = 9 kHz, 3 kHz bzw. 1 kHz beträgt?

f_N **= 9 kHz:** G_{FM} = dB

f_N **= 3 kHz:** G_{FM} = dB

f_N **= 1 kHz:** G_{FM} = dB

c) Wie groß ist $\Delta f_{A,\,min}$ mit $\Delta f_{A,\,max}$ = 45 kHz und B_{NF} = 9 kHz zu wählen?

$\Delta f_{A,\,min}$ = kHz

d) Welcher zusätzliche Gewinn ist durch Preemphase/Deemphase zu erzielen?

f_N **= 9 kHz:** G_{DE} = dB

f_N **= 3 kHz:** G_{DE} = dB

f_N **= 1 kHz:** G_{DE} = dB