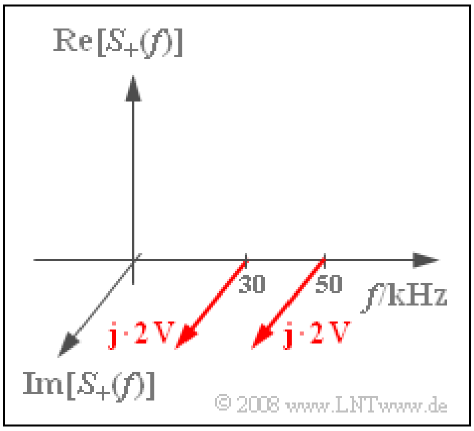
A2.1: ZSB-AM mit Cosinus? Oder Sinus?



Wir betrachten die Amplitudenmodulation des Quellensignals $q(t)$ mit dem Trägersignal $z(t)$. Diese Signale sind wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned} q(t) &= A_{\rm N} \cdot \cos(2\pi f_{\rm N} t + \phi_{\rm N}), \\ z(t) &= 1 \cdot \cos(2\pi f_{\rm T} t + \phi_{\rm T}). \end{aligned}$$

Bekannt ist die Trägerfrequenz mit $f_{\rm T}$ = 40 kHz. Die weiteren Systemparameter $A_{\rm N}$, $f_{\rm N}$, $\phi_{\rm N}$ und $\phi_{\rm T}$ sollen in dieser Aufgabe ermittelt werden.

Gegeben ist weiter das Spektrum $S_+(f)$ des analytischen Signals $s_+(t)$ am Ausgang des Modulators. Dieses lautet (siehe Grafik):

$$S_+(f) = {\rm j} \cdot 2\,{\rm V} \cdot \delta(f - f_{30}) + {\rm j} \cdot 2\,{\rm V} \cdot \delta(f - f_{50}).$$

Hierbei sind die Abkürzungen f_{30} = 30 kHz und f_{50} = 50 kHz verwendet. Zur Erinnerung: Das Spektrum $S_+(f)$ erhält man aus $S(f)$, indem man die Anteile bei negativen Frequenzen abschneidet und bei positiven Frequenzen verdoppelt.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 2.1.** Gegeben sind folgende trigonometrischen Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) &= \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)], \\ \cos(90^\circ - \alpha) &= \sin(\alpha), \\ \cos(90^\circ + \alpha) &= -\sin(\alpha). \end{aligned}$$

Fragebogen zu "A2.1: ZSB-AM mit Cosinus? Oder Sinus?"

a) Ermitteln Sie das Spektrum $S(f)$. Welche der folgenden Aussagen sind richtig?

- ☐ $S(f)$ besteht aus vier Diracfunktionen.
- ☐ Alle Diracgewichte haben den gleichen Betrag 2 V.
- ☐ Alle Diracgewichte sind imaginär.

b) Wie lautet das modulierte Signal $s(t)$? Welche Aussage trifft zu?

- ○ Es handelt sich um ZSB–AM ohne Träger.
- ○ Es handelt sich um ZSB–AM mit Träger.

c) Geben Sie die Nachrichtenfrequenz f_N an.

f_N = kHz

d) Bestimmen Sie die Phasen von Quellen– und Trägersignal.

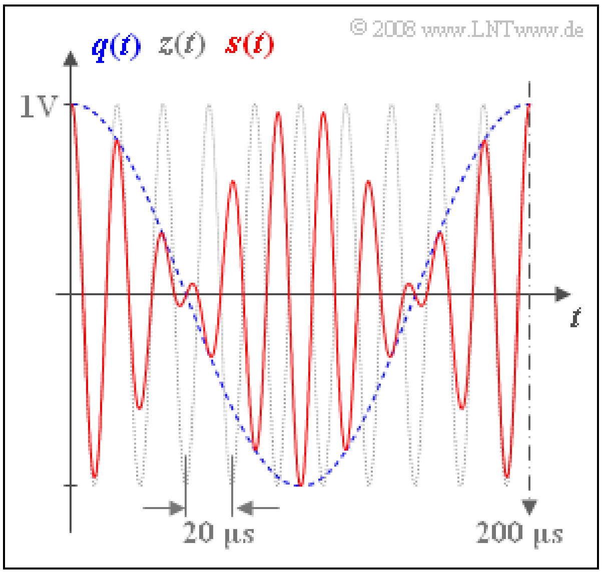
ϕ_N = Grad

ϕ_T = Grad

e) Wie groß ist die Amplitude des Nachrichtensignals?

A_N = V

Z2.1: ZSB-AM ohne/mit Träger



Die Grafik zeigt mit dem roten Kurvenverlauf einen Ausschnitt des Sendesignals $s(t) = q(t) \cdot z(t)$ bei der Zweiseitenband–Amplitudenmodulation (abgekürzt mit ZSB-AM) ohne Träger. Die Dauer des Zeitausschnitts beträgt 200 µs.

Zusätzlich sind das Quellensignal (als blau–gestrichelte Kurve)

$$q(t) = 1\,\text{V} \cdot \cos(2\pi f_\text{N} t + \phi_\text{N})$$

und das Trägersignal (grau–gepunkteter Verlauf)

$$z(t) = 1 \cdot \cos(2\pi f_\text{T} t + \phi_\text{T})$$

in der nebenstehenden Grafik eingetragen.

Ab der Teilaufgabe d) wird die „ZSB–AM mit Träger" betrachtet. Dann gilt mit A_T = 2 V:

$$s(t) = (q(t) + A_\text{T}) \cdot z(t)\,.$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.1.**

Fragebogen zu "Z2.1: ZSB-AM ohne/mit Träger"

a) Ermitteln Sie die Phasenwerte von Quellen– und Trägersignal aus der Grafik.

ϕ_N = Grad

ϕ_T = Grad

b) Wie lauten die Frequenzen von $q(t)$ und $z(t)$?

f_N = kHz

f_T = kHz

c) Analysieren Sie die Nulldurchgänge von $s(t)$. Welche Aussagen treffen zu?

- [ ] Alle Nulldurchgänge von $z(t)$ bleiben in $s(t)$ erhalten.
- [ ] Es gibt weitere Nullstellen, verursacht durch $q(t)$.
- [ ] Es gilt $s(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_T \cdot t)$ mit $a(t) = |q(t)|$.

d) Bestimmen Sie die Spektralfunktion $S(f)$ über die Faltung. Welche (positiven) Frequenzen f_1 und $f_2 > f_1$ sind im Signal enthalten?

f_1 = kHz

f_2 = kHz

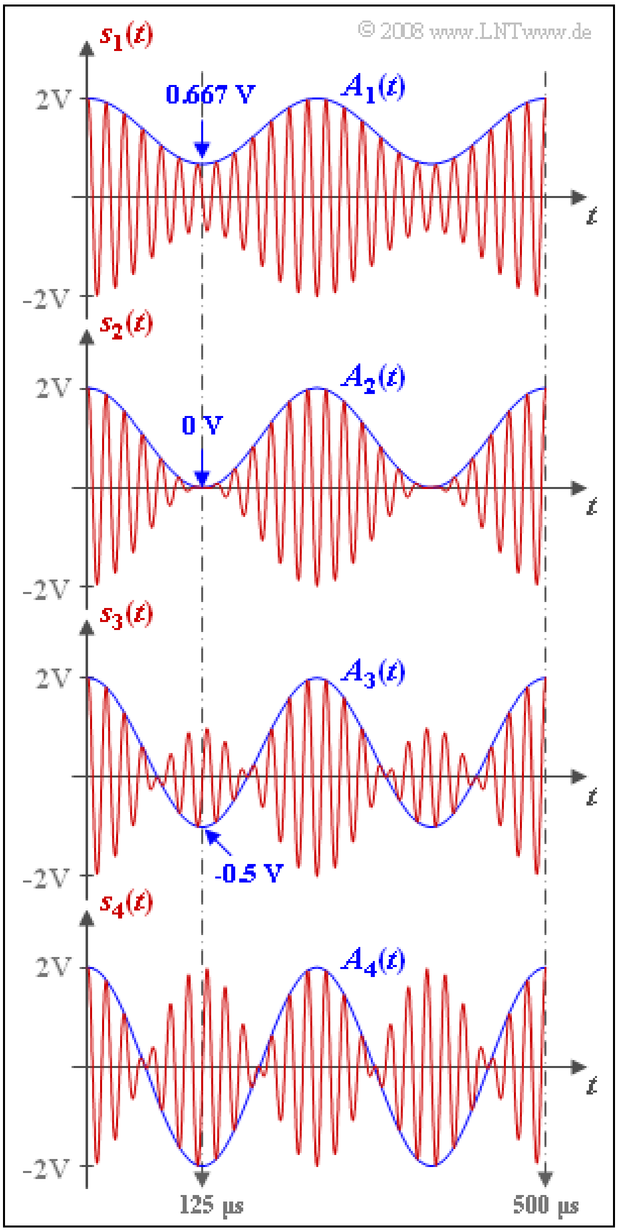
e) Es gelte nun $A_T = 2$ V. Wie groß ist der Modulationsgrad?

m =

f) Welche der Aussagen treffen bei der „ZSB–AM mit Träger" und $A_T = 2$ V zu?

- [ ] $S(f)$ beinhaltet nun auch Diracfunktionen bei $\pm f_T$.
- [ ] Die Gewichte dieser Diraclinien sind jeweils 2 V.
- [ ] $q(t)$ ist in der Hüllkurve von $s(t)$ zu erkennen.
- [ ] Durch den zusätzlichen Trägeranteil bleibt die Leistung unverändert.

A2.2: Modulationsgrad



Die Grafik zeigt ZSB–amplitudenmodulierte Signale $s_1(t)$ bis $s_4(t)$ mit unterschiedlichem Modulationsgrad.

Das Nachrichtensignal $q(t)$ und das Trägersignal $z(t)$ seien jeweils cosinusförmig:

$$q(t) = A_\mathrm{N} \cdot \cos(2\pi f_\mathrm{N} t), \quad f_\mathrm{N} = 4\,\mathrm{kHz},$$
$$z(t) = \ \ 1 \ \ \cdot \cos(2\pi f_\mathrm{T} t), \quad f_\mathrm{T} = 50\,\mathrm{kHz}.$$

Das modulierte Signal (Sendesignal) lautet somit mit dem im Modulator zugesetzten Gleichanteil A_T:

$$s(t) = A(t) \cdot z(t), \quad A(t) = q(t) + A_\mathrm{T}.$$

Bei den Grafiken wurde zur Normierung gewählt:

$$A_\mathrm{T} + A_\mathrm{N} = 2\,\mathrm{V}.$$

Ist der Modulationsgrad $m \le 1$, so ist $A(t)$ gleich der Hüllkurve $a(t)$. Dagegen gilt für $m > 1$:

$$a(t) = |A(t)|.$$

Der cosinusförmige Verlauf $A(t)$ schwankt zwischen A_max und A_min, wobei wegen der obigen Normierung stets A_max = 2V ist. Die Minimalwerte von $A(t)$ treten zum Beispiel bei der halben Periodendauer des Quellensignals (also für t = 125 µs) auf:

$$A_\mathrm{min} = q(T_0/2) + A_\mathrm{T} = A_\mathrm{T} - A_\mathrm{N}.$$

Die Zahlenwerte sind in der Grafik angegeben.

Hinweis. Die Aufgabe bezieht sich auf den Theoriteil von **Kapitel 2.1.**

Fragebogen zu "A2.2: Modulationsgrad"

a) Bestimmen Sie für die Signale $s_1(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$ jeweils den Modulationsgrad.

$\boldsymbol{m_1}$ =

$\boldsymbol{m_2}$ =

$\boldsymbol{m_3}$ =

b) Welche Aussagen treffen für das Signal $s_4(t)$ zu?

- ☐ Es handelt sich um „ZSB–AM ohne Träger”.
- ☐ Der Modulationsgrad ist $m = 0$.
- ☐ Der Modulationsgrad ist unendlich groß.

c) Es gelte nun $A_T = A_N = 1$ V, also $m = 1$. Wie lautet das Spektrum $S_+(f)$ des analytischen Signals? Welche Diracgewichte treten bei f_T sowie bei $f_T \pm f_N$ auf?

$\boldsymbol{S_+(f_T)}$ = V

$\boldsymbol{S_+(f_T \pm f_N)}$ = V

d) Welcher Anteil P_T/P_S der gesamten Sendeleistung P_S geht allein auf den Träger zurück, der nicht zur Demodulation genutzt werden kann?

$\boldsymbol{m = 1: P_T/P_S}$ =

e) Verallgemeinern Sie das Ergebnis aus d) für einen beliebigen Modulationsgrad. Welche Leistungsverhältnisse ergeben sich für $m = 0.5$, $m = 3$ und $m \to \infty$?

$\boldsymbol{m = 0.5 : P_T/P_S}$ =

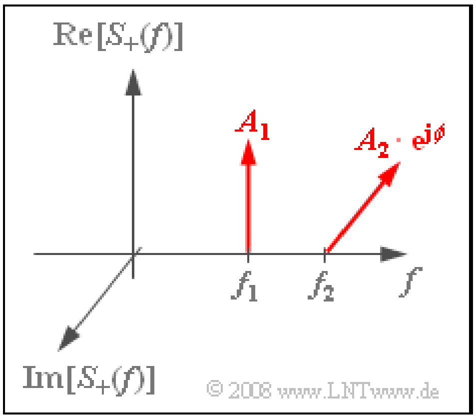
$\boldsymbol{m = 3.0 : P_T/P_S}$ =

$\boldsymbol{m \to \infty : P_T/P_S}$ =

f) Welche der nachfolgenden Bewertungen erscheinen Ihnen nach den bisherigen Berechnungen als sinnvoll?

- ☐ $m \approx 1$ ist aus energetischen Gründen günstiger als ein kleines m.
- ☐ Nur bei Hüllkurvendemodulation ist der Träger sinnvoll.

Z2.2: Leistungsbetrachtung



Wir betrachten zwei harmonische Schwingungen

$$s_1(t) = A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t),$$
$$s_2(t) = A_2 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t + \phi),$$

wobei für die Frequenzen $f_2 \ge f_1$ gelten soll. Die Grafik zeigt das Spektrum des analytischen Signals $s_+(t)$, das sich additiv aus den beiden Anteilen $s_{1+}(t)$ und $s_{2+}(t)$ zusammensetzt.

Unter der Sendeleistung P_S soll hier der quadratische Mittelwert des Signals $s(t)$ verstanden werden, gemittelt über eine möglichst große Messdauer:

$$P_{\rm S} = \lim_{T_{\rm M} \to \infty} \frac{1}{T_{\rm M}} \cdot \int_0^{T_{\rm M}} s^2(t)\, {\rm d}t\,.$$

Beschreibt $s(t)$ einen Spannungsverlauf, so besitzt P_S nach dieser Definition die Einheit „V^2" und bezieht sich auf den Widerstand $R = 1\ \Omega$. Die Division durch R liefert die physikalische Leistung in „W".

Verwenden Sie die Zahlenwerte $A_1 = 2$ V, $A_2 = 1$ V und $R = 50\ \Omega$.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 1.2** und das **Kapitel 2.1.**

Fragebogen zu "Z2.2: Leistungsbetrachtung"

a) Berechnen Sie die Leistung des Cosinussignals $s_1(t)$.

P_1 = V^2

b) Wie groß ist die physikalische Leistung des Signals in „mW"? Es gelte $R = 50\ \Omega$.

P_1 = mW

c) Wie groß ist die Leistung des phasenverschobenen Signals $s_2(t)$?

P_2 = V^2

d) Wie groß ist die Leistung des Summensignals $s(t)$ unter der Bedingung $f_2 \neq f_1$?

$f_2 \neq f_1$: P_S = V^2

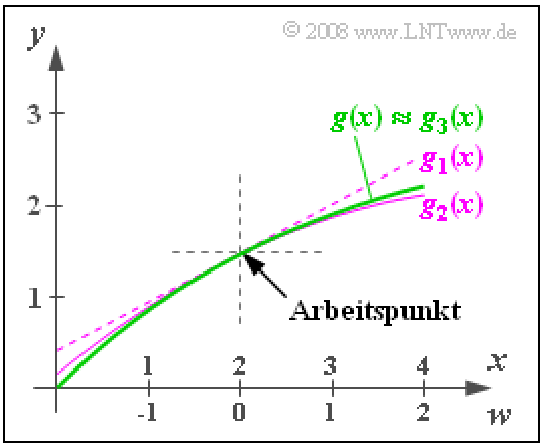
e) Welche Leistung erhält man für $f_2 = f_1$ mit $\phi = 0$, $\phi = 90°$ und $\phi = 180°$?

$f_2 = f_1$, $\phi = 0$: P_S = V^2

$f_2 = f_1$, $\phi = 90°$: P_S = V^2

$f_2 = f_1$, $\phi = 180°$: P_S = V^2

A2.3: ZSB–AM–Realisierung



Zur Realisierung der so genannten „ZSB–AM mit Träger" soll ein Verstärker mit der Kennlinie

$$y = g(x) = U \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-x/U}\right)$$

verwendet werden. Hierbei sind $x = x(t)$ und $y = y(t)$ als zeitabhängige Spannungen am Eingang bzw. Ausgang des Verstärkers zu verstehen. Der Parameter U = 3 V gibt die Sättigungsspannung des Verstärkers an.

Diese Kennlinie wird im Arbeitspunkt A_0 = 2 V betrieben. Dies erreicht man beispielsweise durch das Eingangssignal

$$x(t) = A_0 + z(t) + q(t)\,.$$

Setzen Sie für das Trägersignal und das Quellensignal jeweils Cosinusschwingungen voraus:

$$\begin{aligned} z(t) &= A_{\rm T} \cdot \cos(2\pi f_{\rm T} t), \quad A_{\rm T} = 1\,{\rm V}, \quad f_{\rm T} = 30\,{\rm kHz}, \\ q(t) &= A_{\rm N} \cdot \cos(2\pi f_{\rm N} t), \quad A_{\rm N} = 1\,{\rm V}, \quad f_{\rm N} = 3\,{\rm kHz}\,. \end{aligned}$$

Verwenden Sie bei der Lösung dieser Aufgabe die Hilfsgröße

$$w(t) = x(t) - A_0 = z(t) + q(t)\,.$$

Die nichtlineare Kennlinie kann entsprechend einer *Taylorreihe* um den Arbeitspunkt entwickelt werden:

$$\begin{aligned} y(x) &= y(A_0) + \frac{1}{1!} \cdot y\,'(A_0) \cdot (x - A_0) + \frac{1}{2!} \cdot y\,''(A_0) \cdot (x - A_0)^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \cdot y\,'''(A_0) \cdot (x - A_0)^3 + \ldots \end{aligned}$$

In Abhängigkeit der Hilfsgröße $w(t)$ kann das Ausgangssignal dann auch wie folgt dargestellt werden:

$$y(t) = c_0 + c_1 \cdot w(t) + c_2 \cdot w^2(t) + c_3 \cdot w^3(t) + \ldots$$

Das ZSB–AM–Signal $s(t)$ erhält man durch die Bandbegrenzung von $y(t)$ auf den Frequenzbereich von 23 kHz bis 37 kHz. Das heißt: Alle anderen Frequenzen als $f_{\rm T}$, $f_{\rm T} \pm f_{\rm N}$ sowie $f_{\rm T} \pm 2f_{\rm N}$ werden durch den Bandpass entfernt.

Die obige Grafik zeigt die Kennlinie $g(x)$ sowie die Näherungen $g_1(x)$, $g_2(x)$ und $g_3(x)$, wenn man die Taylorreihe nach dem ersten, zweiten oder dritten Term abbricht. Man erkennt, dass die Näherung $g_3(x)$ im dargestellten Bereich innerhalb der Zeichengenauigkeit von $g(x)$ nicht mehr zu unterscheiden ist.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.1.**

Fragebogen zu "A2.3: ZSB–AM–Realisierung"

a) In welchem Wertebereich kann das Eingangssignal $x(t)$ variieren? Geben Sie den Minimal– und Maximalwert der Hilfsgröße $w(t) = x(t) – A_0$ ein.

w_{min} = V

w_{max} = V

b) Berechnen Sie die Koeffizienten c_0 und c_1 der Taylorreihe.

c_0 = V

c_1 =

c) Wie lauten die Koeffizienten c_2 und c_3 der nichtlinearen Kennlinie?

c_2 = $\text{V}^{–1}$

c_3 = $\text{V}^{–2}$

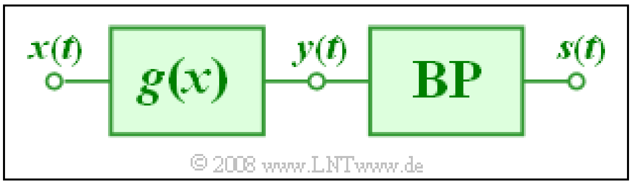
d) Zeigen Sie, dass sich eine „ZSB–AM mit Träger"–Konstellation ergibt, wenn man c_3 als vernachlässigbar klein betrachtet. Wie groß ist der Modulationsgrad?

m =

e) Welche der Aussagen treffen unter der Voraussetzung zu, dass man c_3 nicht als vernachlässigbar klein betrachtet?

- [ ] Das Gewicht der Spektrallinie bei f_T wird nicht verändert.
- [ ] $s(t)$ beinhaltet nun auch Diraclinien bei $f_T ± 2f_N$.
- [ ] Der kubische Term führt zu nichtlinearen Verzerrungen.
- [ ] Der kubische Term führt zu linearen Verzerrungen.

Z2.3: ZSB durch Nichtlinearität



In dieser Aufgabe betrachten wir die Realisierung einer Zweiseitenband–Amplitudenmodulation mittels der nichtlinearen Kennlinie

$$y = g(x) = c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3$$
$$\Rightarrow \quad c_1 = 2, \quad c_2 = 0.25/\text{V}, \quad c_3 = 0 \text{ bzw. } c_3 = 0.01/\text{V}^2 .$$

Am Eingang dieser Kennlinie liegt die Summe aus Trägersignal und Quellensignal an:

$$x(t) = z(t) + q(t) = A_\text{T} \cdot \cos(\omega_\text{T} t) + q(t), \quad A_\text{T} = 4\,\text{V} .$$

Über das Quellensignal $q(t)$ ist bekannt, dass es Spektralanteile zwischen 1 kHz und 9kHz (einschließlich dieser Grenzen) beinhaltet. Ab der Teilaufgabe e) soll folgendes Quellensignal vorausgesetzt werden:

$$q(t) = A_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + A_9 \cdot \cos(\omega_9 t) .$$

Die Kreisfrequenzen seien $\omega_1 = 2\,\pi \cdot 1$ kHz und $\omega_9 = 2\,\pi \cdot 9$ kHz. Die dazugehörigen Amplituden sind wie folgt gegeben: $A_1 = 1$ V und $A_9 = 2$ V.

In den Fragen zu dieser Aufgabe werden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\begin{aligned} y(t) &= y_1(t) + y_2(t) + y_3(t), \\ y_1(t) &= c_1 \cdot (z(t) + q(t)), \\ y_2(t) &= c_2 \cdot (z(t) + q(t))^2, \\ y_3(t) &= c_3 \cdot (z(t) + q(t))^3 . \end{aligned}$$

Die Sendesignale $s(t)$ bzw. $s_1(t)$, $s_2(t)$ und $s_3(t)$ ergeben sich daraus jeweils durch eine Bandbegrenzung auf den Bereich von 90 kHz bis 110 kHz.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 2.1** Gegeben sind folgende trigonometrischen Umformungen:

$$\begin{aligned} \cos^2(\alpha) &= 1/2 \cdot [1 + \cos(2\alpha)] \ , \\ \cos^3(\alpha) &= 1/4 \cdot [3 \cdot \cos(\alpha) + \cos(3\alpha)] \ . \end{aligned}$$

Fragebogen zu "Z2.3: ZSB durch Nichtlinearität"

a) Wie sollte die Trägerfrequenz sinnvollerweise gewählt werden?

f_T = kHz

b) Welche Signalanteile beinhaltet $s_1(t)$?

- [ ] $c_1 \cdot z(t)$.
- [ ] $c_1 \cdot q(t)$.

c) Welche Signalanteile beinhaltet $s_2(t)$?

- [ ] $c_2 \cdot z^2(t)$.
- [ ] $c_2 \cdot q^2(t)$.
- [ ] $2c_2 \cdot z(t) \cdot q(t)$.

d) Welche Signalanteile beinhaltet $s_3(t)$ zumindest teilweise?

- [ ] $c_3 \cdot z^3(t)$.
- [ ] $3 \cdot c_3 \cdot z^2(t) \cdot q(t)$.
- [ ] $3 \cdot c_3 \cdot z(t) \cdot q^2(t)$.
- [ ] $c_3 \cdot q^3(t)$.

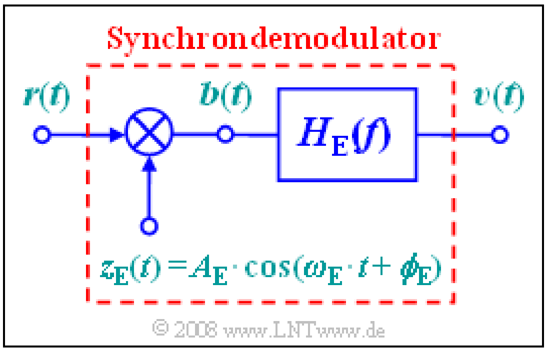
e) Berechnen Sie $s(t)$, wenn $c_3 = 0$ gilt und sich das Quellensignal $q(t)$ aus zwei Cosinusschwingungen zusammensetzt. Wie groß ist der Modulationsgrad?

m =

f) Berechnen Sie nun das Sendesignal $s(t)$ unter der Voraussetzung $c_3 = 0.01/\text{V}^2$. Welche der nachfolgenden Aussagen treffen zu?

- [ ] Durch $c_3 \neq 0$ wird die Spektrallinie bei f_T verändert.
- [ ] Durch $c_3 \neq 0$ entstehen lineare, kompensierbare Verzerrungen.
- [ ] Durch $c_3 \neq 0$ entstehen nichtlineare, irreversible Verzerrungen.

A2.4: Frequenz– und Phasenversatz



Betrachtet wird das Quellensignal

$$q(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t)$$

mit den Signalparametern

$$\begin{aligned} A_1 &= 2\,\text{V}, \; f_1 = 2\,\text{kHz}, \\ A_2 &= 1\,\text{V}, \; f_2 = 5\,\text{kHz}. \end{aligned}$$

Dieses Signal wird ZSB–amplitudenmoduliert.

Das modulierte Signal $s(t)$ besitzt somit Spektralanteile bei ±45 kHz, ±48 kHz, ±52 kHz und ±55 kHz. Bekannt ist weiter, dass das sendeseitige Trägersignal einen sinusförmigen Verlauf hat (ϕ_T = –90°).

Die Demodulation soll mit nebenstehend skizzierter Schaltung erfolgen, die durch folgende Parameter bestimmt ist:

- Amplitude A_E (ohne Einheit),
- Frequenz f_E,
- Phase ϕ_E.

Der Block $H_E(f)$ beschreibt einen idealen, rechteckförmigen Tiefpass, der geeignet dimensioniert ist.

Hinweis: Diese Aufgabe gehört zum Themengebiet von **Kapitel 2.2.** Berücksichtigen Sie die folgenden trigonometrischen Umformungen:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) &= 1/2 \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]\,, \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) &= 1/2 \cdot [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]\,, \\ \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) &= 1/2 \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]\,. \end{aligned}$$

Fragebogen zu "A2.4: Frequenz– und Phasenversatz"

a) Welche der nachfolgenden Aussagen sind zutreffend?

- [ ] Der Demodulator würde bei ZSB–AM mit Träger besser arbeiten.
- [ ] Der Träger würde die Sendeleistung unnötigerweise vergrößern.
- [ ] Die richtige Dimensionierung des Tiefpasses $H_E(f)$ ist essentiell.
- [ ] Man könnte auch einen Hüllkurvendemodulator verwenden.
- [ ] Hüllkurvendemodulation ist nur für $m < 1$ anwendbar.

b) Wie sind die Signalparameter von $z_E(t)$ zu wählen, damit $v(t) = q(t)$ gilt?

$\boldsymbol{A_E}$ =

$\boldsymbol{f_E}$ = kHz

$\boldsymbol{\phi_E}$ = Grad

c) Es gelte $f_E = f_T$. Welches Sinkensignal $v(t)$ ergibt sich mit ϕ_E = – 120°? Geben Sie dessen Signalwert bei t = 0 ein.

$\boldsymbol{\phi_E = -120°}$: $\boldsymbol{v(t = 0)}$ = V

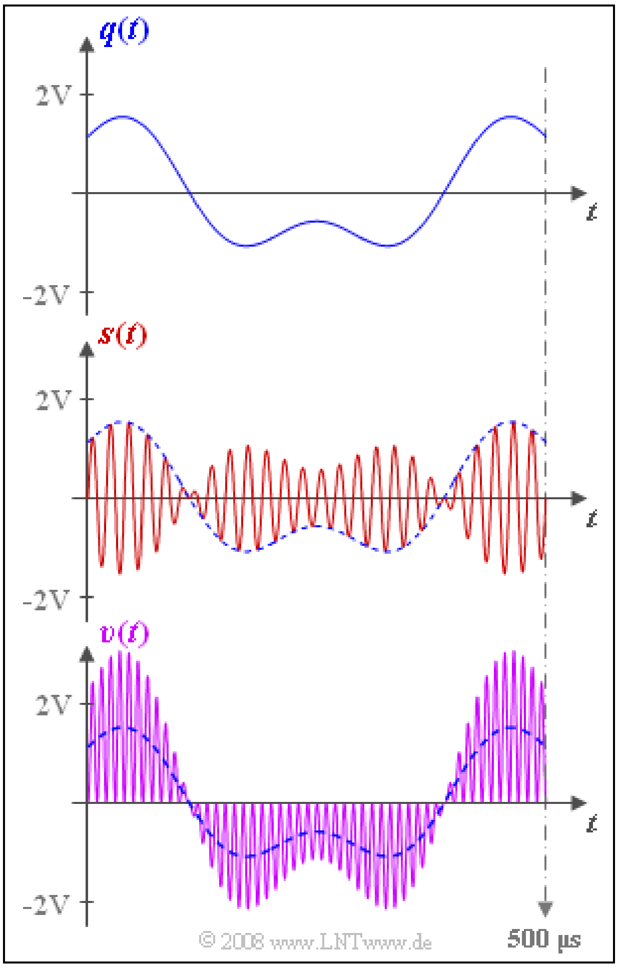
d) Es gelte $f_E = f_T$. Welches Sinkensignal $v(t)$ ergibt sich mit ϕ_E = 0? Geben Sie den Signalwert bei t = 0 ein.

$\boldsymbol{\phi_E = 0}$: $\boldsymbol{v(t = 0)}$ = V

e) Es gelte $\phi_E = \phi_T$. Welches Sinkensignal erhält man mit $\Delta f_T = f_E - f_T$ = 1 kHz? Welche der nachfolgenden Aussagen sind richtig?

- [ ] Es gilt $v(t) = q(t) \cdot \cos(2\pi \cdot \Delta f_T \cdot t)$.
- [ ] $v(t)$ beinhaltet einen Spektralanteil bei 2 kHz.
- [ ] $v(t)$ beinhaltet einen Spektralanteil bei 4 kHz.
- [ ] $v(t)$ beinhaltet einen Spektralanteil bei 6 kHz.

Z2.4: Tiefpass-Einfluss bei SD



Wir betrachten das gleiche Übertragungssystem wie in **Aufgabe A2.4.** Es wird nun allerdings stets eine perfekte Frequenz– und Phasensynchronisation des Synchrondemodulators (SD) vorausgesetzt.

Das Quellensignal $q(t)$, das Sendesignal $s(t)$ sowie das Signal $b(t)$ vor dem Tiefpassfilter innerhalb des Synchrondemodulators sind wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned} q(t) &= q_1(t) + q_2(t) \ \text{ mit} \\ q_1(t) &= 2\,\text{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 2\,\text{kHz} \cdot t)\,, \\ q_2(t) &= 1\,\text{V} \cdot \sin(2\pi \cdot 5\,\text{kHz} \cdot t)\,, \\ s(t) &= q(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 50\,\text{kHz} \cdot t)\,, \\ b(t) &= s(t) \cdot 2 \cdot \sin(2\pi \cdot 50\,\text{kHz} \cdot t)\,. \end{aligned}$$

Die Grafik zeigt zunächst die Signale $q(t)$ und $s(t)$. In der letzten Skizze ist das Sinkensignal $v(t)$ dargestellt (violetter Kurvenverlauf). Dieses stimmt offensichtlich nicht mit dem Quellensignal (blau-gestrichelte Kurve) überein. Der Grund für das unerwünschte Ergebnis $v(t) \neq q(t)$ könnte zum Beispiel ein fehlender oder falsch dimensionierter Tiefpass sein.

In den Teilaufgaben c) und d) wird der sogenannte **Trapeztiefpass** verwendet, dessen Frequenzgang wie folgt lautet:

$$H(f) = \begin{cases} 1 & \text{für} \quad |f| < f_1, \\ \frac{f_2 - |f|}{f_2 - f_1} & \text{für} \quad f_1 \le |f| \le f_2, \\ 0 & \text{für} \quad |f| > f_2. \end{cases}$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.2.** Im Gegensatz zur Aufgabe A2.4 beschreiben hier f_1 und f_2 nicht die Signalfrequenzen, sondern beziehen sich auf das Tiefpassfilter.

Fragebogen zu "Z2.4: Tiefpass-Einfluss bei SD"

a) Welche Aussagen sind über das Filter $H_E(f)$ möglich, das zur Gewinnung des auf der Angabenseite dargestellten Sinkensignals benutzt wurde?

- ☐ Die obere Grenzfrequenz ist zu hoch.
- ☐ Die obere Grenzfrequenz ist zu niedrig.
- ☐ Die untere Grenzfrequenz ist ungleich 0.

b) Mit welchen der nachfolgend aufgeführten Tiefpassfunktionen ist eine ideale Demodulation – das heißt $v(t) = q(t)$ – prinzipiell möglich?

- ☐ Rechtecktiefpass.
- ☐ Gaußtiefpass.
- ☐ Trapeztiefpass.
- ☐ Spalttiefpass.

c) Wie ist die untere Eckfrequenz f_1 eines Trapeztiefpasses mindestens zu wählen, damit keine Verzerrungen entstehen?

$f_{1,\,\min}$ = kHz

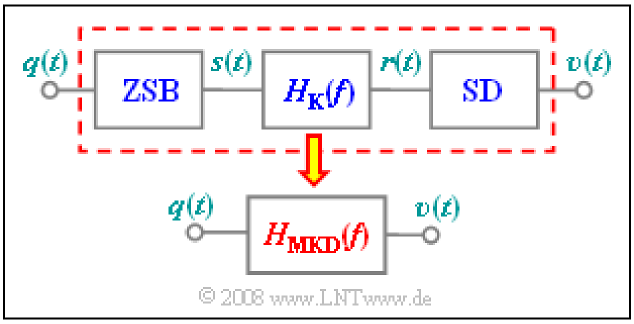
d) Wie groß darf die obere Eckfrequenz f_2 des Trapeztiefpasses höchstens sein, damit keine Verzerrungen entstehen?

$f_{2,\,\max}$ = kHz

e) Welche Grenzfrequenz f_G eines idealen, rechteckförmigen Tiefpasses würden Sie bevorzugen, wenn Rauschstörungen nicht zu vernachlässigen sind?

- ○ $f_G = 4$ kHz,
- ○ $f_G = 6$ kHz,
- ○ $f_G = 10$ kHz.

A2.5: ZSB–AM/Gaußkanal



Das hier betrachtete Übertragungssystem setzt sich aus folgenden Blöcken zusammen:

- ZSB–AM ohne Träger mit f_T = 50 kHz bzw. f_T = 55 kHz:

$$s(t) = q(t) \cdot \cos(2\pi f_T t).$$

- Gaußförmiger Bandpass–Kanalfrequenzgang:

$$H_K(f) = e^{-\pi \cdot \left(\frac{|f| - f_M}{\Delta f_K}\right)^2}, \quad f_M = 50\,\text{kHz}, \quad \Delta f_K = 10\,\text{kHz}\,.$$

  Der Betrag $|f|$ im Exponenten berücksichtigt, dass $H_K(-f) = H_K(f)$ gilt.

- Synchrondemodulator mit optimalen Kenngrößen, so dass das Sinkensignal $υ(t)$ vollständig mit dem Quellensignal $q(t)$ übereinstimmt, wenn $H_K(f) = 1$ ist.

Auf der Seite **Einfluss linearer Kanalverzerrungen** wurde gezeigt, dass das gesamte System durch den resultierenden Frequenzgang

$$H_{MKD}(f) = \frac{1}{2} \cdot [H_K(f + f_T) + H_K(f - f_T)]$$

ausreichend genau charakterisiert ist. Der Index steht hierbei für „Modulator–Kanal–Demodulator”.

Das Quellensignal $q(t)$ setzt sich aus zwei Cosinus-Schwingungen zusammen:

$$q(t) = 2\,\text{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 1\,\text{kHz} \cdot t) + 3\,\text{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 5\,\text{kHz} \cdot t)\,.$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Lehrstoff von **Kapitel 2.2.**

Fragebogen zu "A2.5: ZSB–AM/Gaußkanal"

a) Berechnen Sie den resultierenden Frequenzgang $H_{\rm MKD}(f)$ für $f_{\rm T}$ = 50 kHz. Welche Werte ergeben sich für f = 1 kHz und f = 5 kHz?

$f_{\rm T}$ = 50 kHz: $|H_{\rm MKD}\ (f = 1\ \text{kHz})|$ =

$f_{\rm T}$ = 50 kHz: $|H_{\rm MKD}\ (f = 5\ \text{kHz})|$ =

b) Berechnen Sie das Sinkensignal $v(t)$. Geben Sie die Amplituden A_1 und A_5 des 1 kHz– bzw. 5 kHz–Anteils an.

$f_{\rm T}$ = 50 kHz: A_1 = V

$f_{\rm T}$ = 50 kHz: A_5 = V

c) Berechnen Sie den resultierenden Frequenzgang $H_{\rm MKD}(f)$ für $f_{\rm T}$ = 55 kHz. Welche Werte ergeben sich nun für f = 1 kHz und f = 5 kHz?

$f_{\rm T}$ = 55 kHz: $|H_{\rm MKD}\ (f = 1\ \text{kHz})|$ =

$f_{\rm T}$ = 55 kHz: $|H_{\rm MKD}\ (f = 5\ \text{kHz})|$ =

d) Berechnen Sie das Sinkensignal $v(t)$. Geben Sie hierfür die Amplituden A_1 und A_5 des 1 kHz– bzw. 5 kHz–Anteils an.

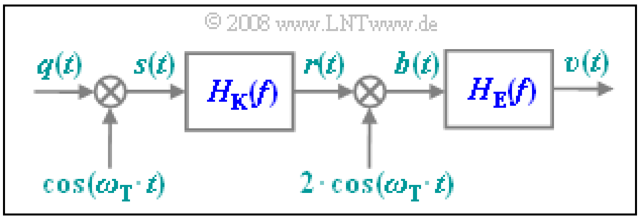
$f_{\rm T}$ = 55 kHz: A_1 = V

$f_{\rm T}$ = 55 kHz: A_5 = V

e) Gibt es eine Trägerfrequenz $f_{\rm T}$, die bei dem gegebenen Quellensignal und dem gegebenen Kanal zu keinen Verzerrungen führt? Begründen Sie Ihre Antwort.

- ja
- nein

Z2.5: Wieder Verzerrungen



Auch in dieser Zusatzaufgabe wird wie in A2.5 die Kombination ZSB–AM/Synchrondemodulator bei Berücksichtigung eines linear verzerrenden Kanals untersucht.

Das Quellensignal $q(t)$ sei ein Cosinussignal mit Amplitude $A_{\rm N}$ und Frequenz $f_{\rm N}$, so dass das Spektrum des modulierten Signals wie folgt lautet:

$$S(f) = \frac{A_{\rm N}}{4} \cdot [\delta(f + f_{\rm O}) + \delta(f + f_{\rm U}) + \delta(f - f_{\rm U}) + \delta(f - f_{\rm O})] \, .$$

Die Abkürzungen stehen für $f_{\rm O} = f_{\rm T} + f_{\rm N}$ (oberes Seitenband) und $f_{\rm U} = f_{\rm T} - f_{\rm N}$ (unteres Seitenband). Der Kanalfrequenzgang ist nur für diese beiden Frequenzen gegeben und lautet:

$$H_{\rm K}(f_{\rm O}) = R_{\rm O} + {\rm j} \cdot I_{\rm O}, \;\; H_{\rm K}(f_{\rm U}) = R_{\rm U} + {\rm j} \cdot I_{\rm U} \, .$$

Für negative Frequenzen gilt stets $H_{\rm K}(-f) = H_{\rm K}^*(f)$.

Verwenden Sie bei numerischen Berechnungen folgende Zahlenwerte:

$$A_{\rm N} = 2\,{\rm V}, \;\; f_{\rm N} = 3\,{\rm kHz}, \;\; f_{\rm T} = 30\,{\rm kHz},$$
$$R_{\rm U} = 0.8, \;\; I_{\rm U} = -0.2, \;\; R_{\rm O} = 0.4, \;\; I_{\rm O} = -0.2 \, .$$

In der Teilaufgabe c) soll die Lösung über den resultierenden Frequenzgang von Modulator, Kanal und Demodulator erfolgen:

$$H_{\rm MKD}(f) = 1/2 \cdot [H_{\rm K}(f + f_{\rm T}) + H_{\rm K}(f - f_{\rm T})] \, .$$

Abschließend wird in der Teilaufgabe d) der folgende Kanalfrequenzgang betrachtet (die Darstellung gilt nur für positive Frequenzen):

$$H_{\rm K}(f) = \frac{1}{1 + 3{\rm j} \cdot (f/f_{\rm T} - 1)} \, .$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.2.**

Fragebogen zu "Z2.5: Wieder Verzerrungen"

a) Berechnen und skizzieren Sie das Spektrum $R(f)$ am Kanalausgang (R_U = 0.8, I_U = –0.2, R_O = 0.4, I_O = –0.2). Wie lautet die Spektrallinie bei $–f_O$?

Re[$R(–f_O)$] = V

Im[$R(–f_O)$] = V

b) Wie lautet das Sinkensignal $v(t)$? Berücksichtigen Sie bei der Berechnung auch den Tiefpass des Synchrondemodulators. Wie groß ist der Signalwert bei t = 0?

$v(t = 0)$ = V

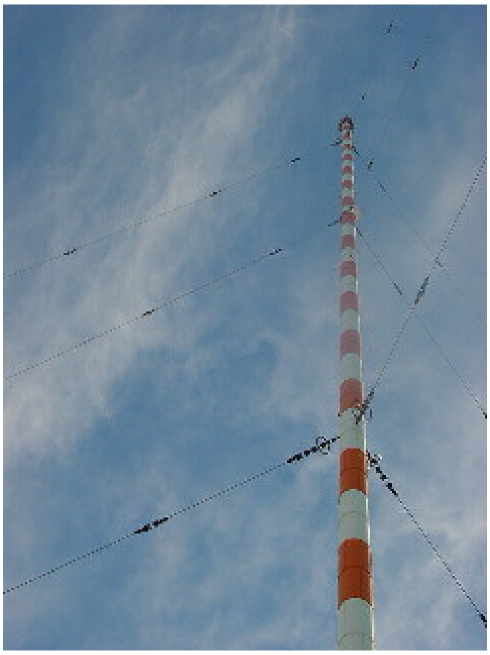
c) Berechnen Sie nun das Sinkensignal $v(t)$ über den resultierenden Frequenzgang $H_{MKD}(f)$ und bewerten Sie den Rechengang.

- Die Berechnung gemäß Teilaufgabe b) führt schneller zum Erfolg.
- Die Berechnung gemäß Teilaufgabe c) führt schneller zum Erfolg.

d) Berechnen Sie $v(t)$ für den Kanalfrequenzgang $H_K(f) = (1 + 3j \cdot (f/f_T–1))^{-1}$. Wie groß ist der Signalwert bei t = 0?

$v(t = 0)$ = V

A2.6: Freiraumdämpfung



Ein gemäß dem Modulationsverfahren „ZSB–AM mit Träger" betriebener Kurzwellensender arbeitet mit der Trägerfrequenz $f_{\rm T}$ = 20 MHz und der Sendeleistung $P_{\rm S}$ = 100 kW. Er ist für eine Bandbreite von $B_{\rm NF}$ = 8 kHz ausgelegt.

Zum Testbetrieb wird ein mobiler Empfänger eingesetzt, der mit einem Synchrondemodulator arbeitet. Befindet sich dieser in der Distanz d zum Sender, so kann die Dämpfungsfunktion des Übertragungskanals wie folgt angenähert werden:

$$\frac{a_{\rm K}(d, f)}{\rm dB} = 34 + 20 \cdot {\rm lg}\ \frac{d}{\rm km} + 20 \cdot {\rm lg}\ \frac{f}{\rm MHz}\,.$$

Die Gleichung beschreibt die so genannte Freiraumdämpfung, die auch von der (Träger-)Frequenz abhängt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass das gesamte ZSB–AM–Spektrum wie die Trägerfrequenz gedämpft wird. Das bedeutet, dass die etwas größere Dämpfung des OSB bzw. die geringfügig kleinere Dämpfung des USB durch eine entsprechende Vorverzerrung beim Sender ausgeglichen wird.

Die am Empfänger wirksame Rauschleistungsdichte sei $N_0 = 10^{-14}$ W/Hz.

Für die Teilaufgaben a) und b) wird vorausgesetzt, dass der Sender nur den Träger überträgt, das heißt, dass der Modulationsgrad m = 0 ist.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf die letzten Theorieseiten von **Kapitel 2.2.**

Fragebogen zu "A2.6: Freiraumdämpfung"

a) Welche Leistung wird im Abstand d = 10 km vom Sender empfangen, wenn nur der Träger abgestrahlt wird (m = 0)?

$\boldsymbol{P_\mathrm{E}}$ = W

b) In welcher Entfernung d vom Sender befindet sich der Empfänger, wenn die empfangene Leistung P_E = 100 µW beträgt?

$\boldsymbol{d}$ = km

c) Welches Sinken–SNR ergibt sich bei der unter b) berechneten Distanz, wenn der Modulationsgrad m = 0.5 beträgt?

$\mathbf{10 \cdot lg}\ \boldsymbol{\rho_v}$ = dB

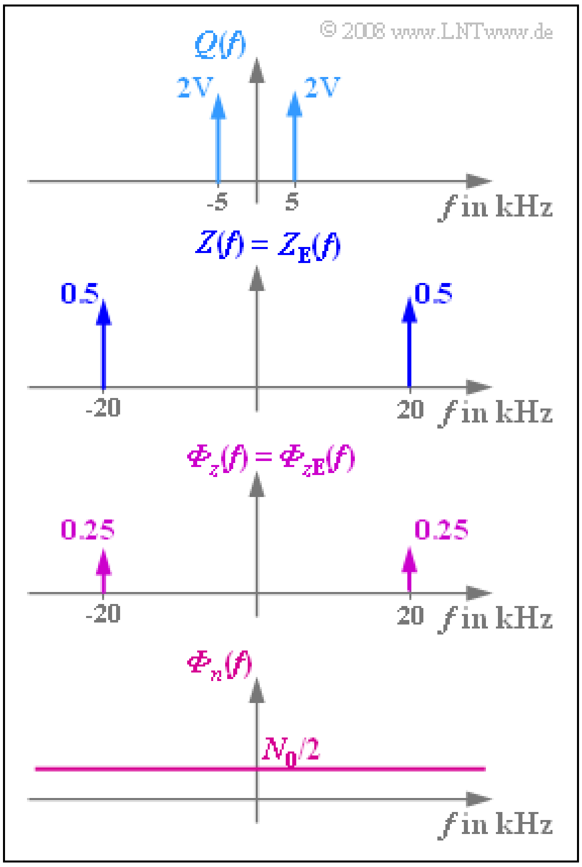
d) Wie groß muss der Modulationsgrad mindestens gewählt werden, damit sich ein Sinken–Störabstand von 60 dB ergibt?

$\boldsymbol{m_\mathrm{min}}$ =

e) Welche der nachfolgenden Aussagen sind zutreffend?

- ☐ ZSB–AM mit Träger macht aus energetischen Gründen keinen Sinn, wenn ein Synchrondemodulator verwendet wird.
- ☐ ZSB–AM ohne Träger macht aus energetischen Gründen keinen Sinn, wenn ein Synchrondemodulator verwendet wird.
- ☐ Ein kleiner Trägeranteil kann für die erforderliche Frequenz– und Phasensynchronisation hilfreich sein.

Z2.6: Signal-to-Noise-Ratio (SNR)



Wir gehen von folgenden Voraussetzungen aus:

- cosinusförmiges Quellensignal:
$$q(t) = 4\,\text{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 5\,\text{kHz} \cdot t),$$
- ZSB–AM durch Multiplikation mit
$$z(t) = 1 \cdot \cos(2\pi \cdot 20\,\text{kHz} \cdot t),$$
- frequenzunabhängige Dämpfung auf dem Kanal entsprechend $\alpha_\text{K} = 10^{-4}$,
- additives weißes Rauschen am Empfängereingang mit Rauschleistungsdichte $N_0 = 4 \cdot 10^{-19}$ W/Hz,
- phasen– und frequenzsynchrone Demodulation durch Multiplikation mit gleichem $z(t)$ wie oben,
- rechteckförmiger Tiefpass mit der Grenzfrequenz $f_\text{E} = 5$ kHz innerhalb des Synchrondemodulators.

In der Grafik sind diese Vorgaben im Spektralbereich dargestellt. Ausdrücklich soll erwähnt werden, dass das Leistungsdichtespektrum $\Phi_z(f)$ der Cosinusschwingung $z(t)$ ebenso wie das Amplitudenspektrum $Z(f)$ sich aus zwei Diraclinien bei $\pm f_\text{T}$ zusammensetzt, aber mit dem Gewicht $A^2/4$ anstelle von $A/2$. Die Amplitude A ist bei dieser Aufgabe gleich 1 zu setzen.

Das Sinkensignal $v(t)$ setzt sich aus dem Nutzanteil $\alpha \cdot q(t)$ und dem Rauschanteil $\varepsilon(t)$ zusammen. Somit gilt allgemein für das zu bestimmende Signal–zu–Rausch–Leistungsverhältnis:

$$\rho_v = \frac{\alpha^2 \cdot P_q}{P_\varepsilon}\,.$$

Dieses wichtige Qualitätskriterium wird häufig mit SNR (englisch: *Signal–to–Noise–Ratio*) abgekürzt.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.2.** Beachten Sie bitte auch, dass

- die Größen α und α_K nicht unbedingt gleich sein müssen,
- sich alle Leistungen auf den Widerstand 50 Ω beziehen sollen,
- P_q bei „ZSB–AM ohne Träger" gleichzeitig die Sendeleistung P_S angibt.

Fragebogen zu "Z2.6: Signal-to-Noise-Ratio (SNR)"

a) Berechnen Sie die Sendeleistung, bezogen auf den Einheitswiderstand 1 Ω.

$\boldsymbol{P_q}$ = V^2

b) Wie groß ist die Leistung P_q in „W" für den Widerstand R = 50 Ω?

$\boldsymbol{P_q}$ = W

c) Welcher Dämpfungsfaktor ergibt sich für das Gesamtsystem?

$\boldsymbol{\alpha}$ =

d) Berechnen Sie die Leistungsdichte der Rauschkomponente $\varepsilon(t)$ am Ausgang. Wie groß ist der Wert bei f = 0? Es gelte $H_E(f = 0) = 1$.

$\boldsymbol{\Phi_\varepsilon(f = 0)}$ = W/Hz

e) Wie groß ist die Rauschleistung im Sinkensignal?

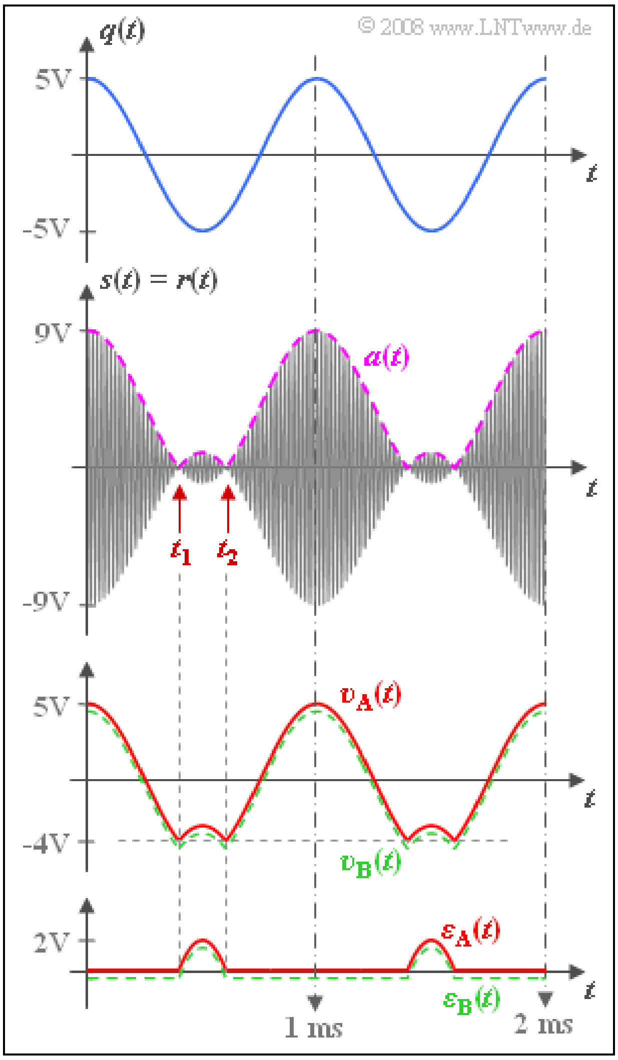
$\boldsymbol{P_\varepsilon}$ = W

f) Wie groß ist das Signal–zu–Rausch–Leistungsverhältnis (SNR) an der Sinke? Welcher db–Wert ergibt sich daraus?

$\boldsymbol{\rho_v}$ =

$\boldsymbol{10 \cdot \lg \rho_v}$ = dB

A2.7: Verzerrungen wegen *m* > 1



Das cosinusförmige Quellensignal $q(t)$ mit Amplitude A_N = 5 V und Frequenz f_N = 1 kHz wird (ZSB–) amplitudenmoduliert. Für das Empfangssignal gilt bei idealem Kanal:

$$r(t) = \left(q(t) + A_T\right) \cdot \cos(2\pi \cdot f_T \cdot t)\,.$$

Es handelt sich also um die „ZSB–AM mit Träger".

In der Grafik sind neben dem Quellensignal $q(t)$ und dem Empfangssignal $r(t)$ inklusive dessen Hüllkurve $a(t)$ auch das Sinkensignal $v(t)$ und das Fehlersignal

$$\varepsilon(t) = v(t) - q(t)$$

dargestellt. Das rot gezeichnete Sinkensignal

$$v_A(t) = a(t) - A_T$$

gehört zu einem Hüllkurvendemodulator, bei dem von der Hüllkurve $a(t)$ genau der beim Sender zugeführte Träger (A_T) subtrahiert wird. Dieses Signal $v_A(t)$ besitzt ebenso wie das zugehörige Fehlersignal $\varepsilon_A(t)$ einen Gleichanteil. Aufgrund der Periodizität kann es durch die folgende Fourierreihe approximiert werden:

$$v_A(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{6} A_i \cdot \cos(n \cdot \omega_N \cdot t),$$

$$\begin{aligned} \text{mit}\ \ A_0 &= 0.272\,\text{V}, \quad A_1 = 4.480\,\text{V}, \quad A_2 = 0.458\,\text{V}, \quad A_3 = -0.367\,\text{V}, \\ A_4 &= 0.260\,\text{V}, \quad A_5 = -0.155\,\text{V}, \quad A_6 = 0.066\,\text{V}\,. \end{aligned}$$

Wird dagegen der Gleichanteil von $a(t)$ durch einen idealen Hochpass eliminiert, so ergeben sich die gleichsignalfreien Signale

$$v_B(t) = \sum_{n=1}^{6} A_i \cdot \cos(n \cdot \omega_N \cdot t), \qquad \varepsilon_B(t) = v_B(t) - q(t) = a(t) - A_T - A_0\,.$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 1.2** und das **Kapitel 2.3** dieses Buches sowie auf das **Kapitel 2.2** im Buch „Lineare zeitinvariante Systeme".

Zur Lösung dieser Aufgabe sind folgende unbestimmte Integrale gegeben:

$$\int \cos(ax)\,\mathrm{d}x = \frac{1}{a} \cdot \sin(ax), \qquad \int \cos^2(ax)\,\mathrm{d}x = \frac{x}{2} + \frac{1}{4a} \cdot \sin(2ax)\,.$$

Die Klirrfaktoren berechnen sich entsprechend

$$K_2 = A_2/A_1\,, \quad K_3 = A_3/A_1\,, \ \ldots \quad \Rightarrow \quad K = \sqrt{K_2^2 + K_3^2 + \ldots}\,.$$

Fragebogen zu "A2.7: Verzerrungen wegen m > 1"

a) Wie groß ist der Modulationsgrad der ZSB–AM?

m =

b) Zu welchen Zeiten t_1 und t_2 (siehe Grafik) ist die Hüllkurve $a(t)$ erstmalig Null?

t_1 = ms

t_2 = ms

c) Berechnen Sie die Klirrfaktoren K_2, ..., K_6 sowie den Gesamtklirrfaktor K.

K = %

d) Berechnen Sie die Leistung $P_{\varepsilon A} = \text{E}[\varepsilon_A{}^2(t)]$ für das rote Fehlersignal $\varepsilon_A(t)$.

$P_{\varepsilon A}$ = V^2

e) Berechnen Sie die Leistung $P_{\varepsilon B} = \text{E}[\varepsilon_B{}^2(t)]$ für das grüne Fehlersignal $\varepsilon_B(t)$.

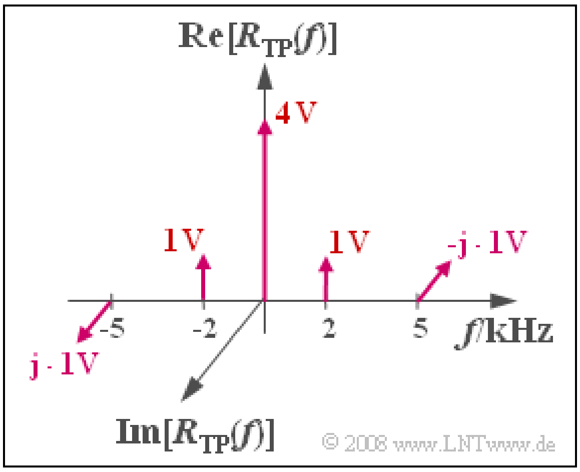
$P_{\varepsilon B}$ = V^2

f) Berechnen Sie für beide Demodulatoren das jeweilige Sinken–SNR $\rho_v = P_q/P_\varepsilon$.

ρ_{vA} =

ρ_{vB} =

Z2.7: ZSB-AM & HK-Demodulator



Ausgegangen wird vom Quellensignal

$$\begin{aligned} q(t) &= 2\,\text{V} \cdot \cos(2\pi \cdot 2\,\text{kHz} \cdot t) + \\ &+ 2\,\text{V} \cdot \sin(2\pi \cdot 5\,\text{kHz} \cdot t)\,. \end{aligned}$$

Dieses wird entsprechend dem Modulationsverfahren „ZSB–AM mit Träger" moduliert und über einen idealen Kanal übertragen. Der Einfluss von Rauschen kann außer Acht gelassen werden.

Die nebenstehende Grafik zeigt das Spektrum $R_{TP}(f)$ des Empfangssignals im äquivalenten Tiefpassbereich, das sich aus Diraclinien bei $f = 0$ (herrührend vom Träger), bei ±2 kHz (herrührend vom Cosinusanteil) und bei ±5 kHz (herrührend vom Sinusanteil) zusammensetzt.

Als Ortskurve bezeichnet man die Darstellung des äquivalenten Tiefpass–Signals $r_{TP}(t)$ in der komplexen Ebene, wobei $r_{TP}(t)$ die Fourierrücktransformierte von $R_{TP}(f)$ angibt.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 2.3.**

Fragebogen zu "Z2.7: ZSB-AM & HK-Demodulator"

a) Schätzen Sie den maximalen Betrag des Quellensignals ab.

$q_{max} = \max |q(t)|$ = V

b) Wie groß ist die Amplitude A_T des beim Sender zugesetzten Trägersignals? Welcher Modulationsgrad m ergibt sich hieraus?

A_T = V

m =

c) Was spricht hier für oder gegen die Verwendung eines Hüllkurvendemodulators (HKD)? Die Alternative wäre ein Synchrondemodulator (SD).

- [ ] Mit dem HKD ist keine verzerrungsfreie Demodulation möglich.
- [ ] Man kann auf die Frequenz–/Phasensynchronisation verzichten.
- [ ] Mit einem SD würde eine kleinere Sendeleistung genügen.

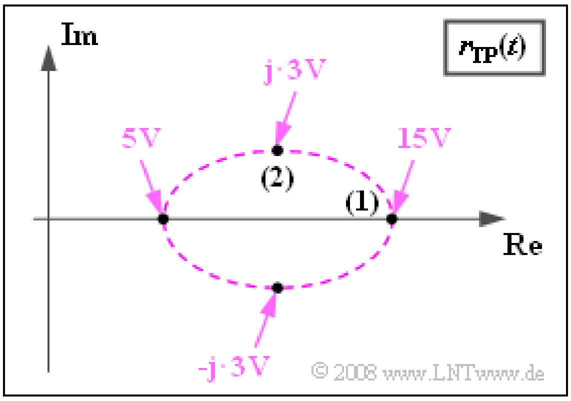
d) Berechnen Sie durch Fourierrücktransformation von $R_{TP}(f)$ das äquivalente TP–Signal $r_{TP}(t)$ ⇒ „Ortskurve". Welche Aussagen treffen zu?

- [ ] Die Ortskurve $r_{TP}(t)$ setzt sich aus fünf Zeigern zusammen.
- [ ] Der Träger rotiert mit der Drehgeschwindigkeit ω_T.
- [ ] Die Drehzeiger der negativen Frequenzen drehen im Uhrzeigersinn.
- [ ] Der Zeiger für 2 kHz dreht doppelt so schnell als der für 5 kHz.

e) Welche Aussagen sind anhand der Ortskurve möglich? Beantworten Sie hierzu folgende Fragen hinsichtlich der Anwendung von Hüllkurvendemodulation.

- [ ] Eine verzerrungsfreie Demodulation ist nur möglich, wenn $r_{TP}(t)$ für alle Zeiten reell ist.
- [ ] Eine verzerrungsfreie Demodulation ist nur möglich, wenn $r_{TP}(t)$ zu keinem Zeitpunkt negativ wird.
- [ ] Sind die beiden erstgenannten Bedingungen nicht erfüllt, so komt es zu linearen Verzerrungen.

A2.8: Unsymmetrischer Kanal



Ein cosinusförmiges Quellensignal $q(t)$ mit der Amplitude A_N und der Frequenz f_N wird ZSB–amplitudenmoduliert, so dass für das modulierte Signal gilt:

$$s(t) = (q(t) + A_T) \cdot \cos(2\pi \cdot f_T \cdot t).$$

Der Übertragungskanal weist lineare Verzerrungen auf. Während sowohl das untere Seitenband als auch der Träger unverfälscht übertragen werden, wird das obere Seitenband (bei der OSB-Frequenz $f_T + f_N$) mit dem Dämpfungsfaktor $\alpha_O = 0.25$ gewichtet.

Die Grafik zeigt die Ortskurve, also die Darstellung des äquivalenten Tiefpass–Signals $r_{TP}(t)$ in der komplexen Ebene. Wertet man das Signal $r(t)$ mit einem idealen Hüllkurvendemodulator aus, so erhält man ein Sinkensignal $v(t)$, das wie folgt angenähert werden kann:

$$v(t) = 2.424\,\text{V} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - 0.148\,\text{V} \cdot \cos(2\omega_N \cdot t) + 0.056\,\text{V} \cdot \cos(3\omega_N \cdot t) - \ldots$$

Für diese Messung wurde die Nachrichtenfrequenz f_N = 2 kHz benutzt.

In der Teilaufgabe g) soll das Signal–zu–Stör–Leistungsverhältnis (SNR) wie folgt berechnet werden:

$$\rho_v = \frac{P_{v1}}{P_\varepsilon}.$$

Hierbei bezeichnen $P_{v1} = \alpha^2 \cdot P_q$ und P_ε die „Leistungen” der beiden Signale:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= 2.424\,\text{V} \cdot \cos(\omega_N \cdot t), \\ \varepsilon(t) &= v(t) - v_1(t) \approx -0.148\,\text{V} \cdot \cos(2\omega_N \cdot t) + 0.056\,\text{V} \cdot \cos(3\omega_N \cdot t). \end{aligned}$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 2.3.**

Fragebogen zu "A2.8: Unsymmetrischer Kanal"

a) Geben Sie $r_{\rm TP}(t)$ in analytischer Form an. Welcher Wert ergibt sich für $t = 0$?

$\boldsymbol{r_{\rm TP}(t = 0)}$ = V

b) Geben Sie die Amplituden $A_{\rm T}$ und $A_{\rm N}$ an.

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

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

c) Es gelte $f_{\rm N}$ = 2 kHz. Zu welcher Zeit t_1 wird der Startpunkt (1) zum ersten Mal nach $t = 0$ wieder erreicht?

$\boldsymbol{t_1}$ = ms

d) Zu welchem Zeitpunkt t_2 wird der Ellipsenpunkt (2) mit dem Wert j · 3 V zum ersten Mal erreicht?

$\boldsymbol{t_2}$ = ms

e) Berechnen Sie die Betrags– und die Phasenfunktion für den Zeitpunkt t_2.

$\boldsymbol{a(t = t_2)}$ = V

$\boldsymbol{\phi(t = t_2)}$ = Grad

f) Berechnen Sie den Klirrfaktor für $f_{\rm N}$ = 2 kHz.

$\boldsymbol{f_{\rm N}}$ **= 2 kHz:** $\boldsymbol{K}$ = %

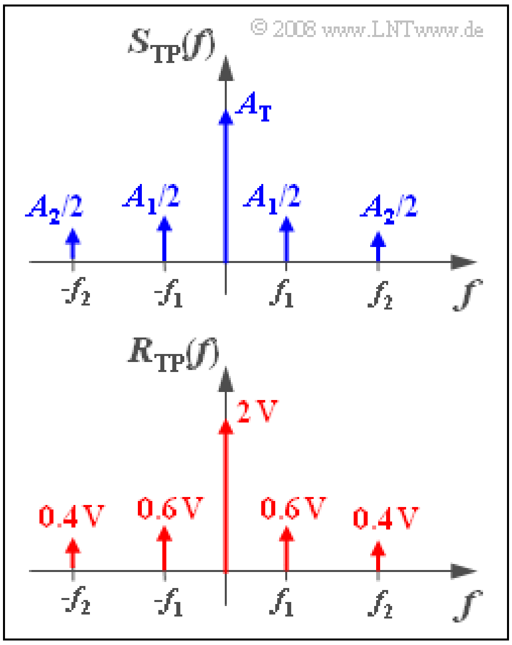
g) Berechnen Sie für $f_{\rm N}$ = 2 kHz das SNR gemäß der angegebenen Definition.

$\boldsymbol{f_{\rm N}}$ **= 2 kHz:** $\boldsymbol{\rho_v}$ =

h) Welcher Klirrfaktor K ergibt sich bei ansonsten gleichen Bedingungen mit der Nachrichtenfrequenz $f_{\rm N}$ = 4 kHz?

$\boldsymbol{f_{\rm N}}$ **= 4 kHz:** $\boldsymbol{K}$ = %

Z2.8: Symmetrische Verzerrungen



Das aus zwei Anteilen zusammengesetzte Quellensignal

$$q(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t)$$

wird amplitudenmoduliert und über einen linear verzerrenden Übertragungskanal übertragen. Die Trägerfrequenz ist f_T und der zugesetzte Gleichanteil A_T. Es liegt also eine ZSB–AM mit Träger vor.

Die obere Grafik zeigt das Spektrum $S_{TP}(f)$ des äquivalenten TP–Signals in schematischer Form. Das bedeutet, dass die Längen der gezeichneten Diraclinien nicht den tatsächlichen Werten von A_T, $A_1/2$ und $A_2/2$ entsprechen.

Messtechnisch erfasst wurde die Spektralfunktion $R(f)$ des Empfangssignals. In der unteren Grafik sehen Sie das daraus berechnete äquivalente Tiefpass–Spektrum $R_{TP}(f)$.

Der Kanalfrequenzgang ist durch einige Stützwerte ausreichend genau beschrieben:

$$H_K(f = f_T) = 0.5, \quad H_K(f = f_T \pm f_1) = 0.4, \quad H_K(f = f_T \pm f_2) = 0.2 .$$

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.3.**

Fragebogen zu "Z2.8: Symmetrische Verzerrungen"

a) Ermitteln Sie die Amplituden von Träger– und Quellensignal.

$A_{\rm T}$ = V

A_1 = V

A_2 = V

b) Zu welcher Art von Verzerrung hätte der Einsatz eines Hüllkurvendemodulators bei idealem Kanal $H_{\rm K}(f) = 1$ geführt?

- Keine Verzerrungen.
- Lineare Verzerrungen.
- Nichtlineare Verzerrungen.

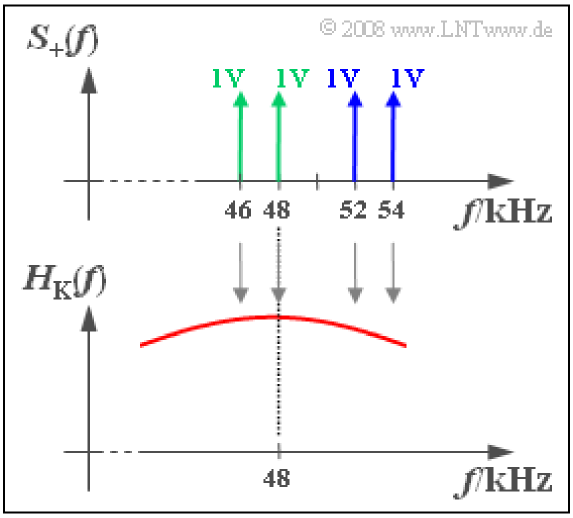
c) Berechnen Sie das äquivalente Tiefpass–Signal und beantworten Sie folgende Fragen. Ist es zutreffend, dass

- [ ] $r_{\rm TP}(t)$ stets reell ist,
- [ ] $r_{\rm TP}(t)$ stets größer oder gleich 0 ist,
- [ ] die Phasenfunktion $\phi(t)$ die Werte 0° und 180° annehmen kann.

d) Zu welchen Verzerrungen führt der Hüllkurvendemodulator beim betrachteten Übertragungskanal?

- Keine Verzerrungen.
- Lineare Verzerrungen.
- Nichtlineare Verzerrungen.

A2.9: ESB mit Kanalverzerrungen



Wir betrachten die Übertragung des Quellensignals

$$q(t) = 2\,\text{V} \cdot \cos(2\pi f_2 t) + 2\,\text{V} \cdot \cos(2\pi f_4 t)$$

über einen Gauß–Bandpasskanal mit der Mittenfrequenz f_M = 48 kHz. Diese unterscheidet sich von der bei der Modulation verwendeten Trägerfrequenz f_T = 50 kHz. Die Frequenzen f_2 und f_4 stehen als Abkürzungen für 2 kHz bzw. 4 kHz.

Untersucht werden sollen folgende Modulationsverfahren mit dem jeweiligen Spektrum $S_+(f)$ – des analytischen Signals – entsprechend der oberen Grafik:

- ZSB–AM (alle vier Spektrallinien bei 46 kHz, 48 kHz, 52 kHz und 54 kHz),
- OSB–AM (blaue Spektrallinien bei 52 kHz und 54 kHz),
- USB–AM (grüne Spektrallinien bei 46 kHz und 48 kHz).

Verwendet wird jeweils ein Synchrondemodulator, der zunächst das empfängerseitige Trägersignal

$$z_E(t) = \left\{ \begin{array}{lll} 2 \cdot z(t) & \text{bei} & \text{ZSB}, \\ 4 \cdot z(t) & \text{bei} & \text{OSB, USB} \end{array} \right.$$

multiplikativ zusetzt und anschließend die Anteile um die doppelte Trägerfrequenz vollständig unterdrückt. Bei idealem Kanal $H_K(f) = 1$ würde somit in allen Fällen $v(t) = q(t)$ gelten.

Der hier betrachtete Gaußkanal ist durch folgende Stützwerte gegeben:

$$H_K(f = 46\,\text{kHz}) = 0.968, \quad H_K(f = 48\,\text{kHz}) = 1.000,$$
$$H_K(f = 52\,\text{kHz}) = 0.882, \quad H_K(f = 54\,\text{kHz}) = 0.754\,.$$

Schreiben Sie das Sinkensignal jeweils in der Form

$$v(t) = A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 \cdot (t - \tau_2)) + A_4 \cdot \cos(2\pi f_4 \cdot (t - \tau_4))\,.$$

Alle Berechnungen sind sowohl für eine perfekte Phasensynchronisation ($\Delta\phi_T$ = 0) als auch für einen Phasenversatz von $\Delta\phi_T$ = 30° durchzuführen. Dieser liegt zum Beispiel dann vor, wenn das sendeseitige Trägersignal cosinusförmig verläuft und für das empfangsseitige Trägersignal gilt:

$$z_E(t) = A_E \cdot \cos(\omega_T \cdot t - 30^\circ\,).$$

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf die theoretischen Grundlagen von **Kapitel 2.2** und **Kapitel 2.4.**

Fragebogen zu "A2.9: ESB mit Kanalverzerrungen"

a) Berechnen Sie die Amplituden bei ZSB–AM und perfekter Synchronisation.

ZSB, $\Delta\phi_T = 0$: A_2 = V

ZSB, $\Delta\phi_T = 0$: A_4 = V

b) Wie lauten die Größen A_2 und τ_2 bei ZSB–AM und $\Delta\phi_T$ = 30° Phasenversatz?

ZSB, $\Delta\phi_T = 30°$: A_2 = V

ZSB, $\Delta\phi_T = 30°$: τ_2 = µs

c) Berechnen Sie die Amplituden A_2 und A_4 bei OSB–AM und $\Delta\phi_T = 0$.

OSB, $\Delta\phi_T = 0$: A_2 = V

OSB, $\Delta\phi_T = 0$: A_4 = V

d) Geben Sie die Signalsamplituden für USB–AM und $\Delta\phi_T = 0$ an.

USB, $\Delta\phi_T = 0$: A_2 = V

USB, $\Delta\phi_T = 0$: A_4 = V

e) Wie lauten dagegen die Signalparameter bei USB–AM und $\Delta\phi_T$ = 30°?

USB, $\Delta\phi_T = 30°$: A_2 = V

USB, $\Delta\phi_T = 30°$: τ_2 = µs

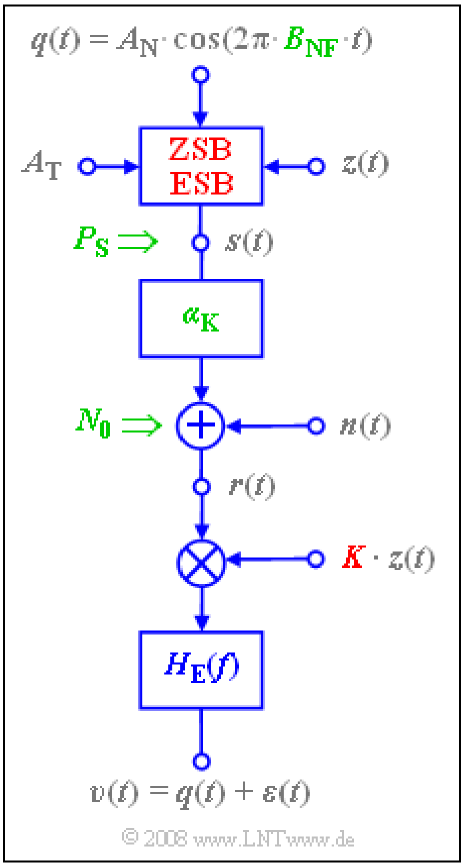
USB, $\Delta\phi_T = 30°$: A_4 = V

USB, $\Delta\phi_T = 30°$: τ_4 = µs

f) Welche dieser Aussagen sind nach Ihren Ergebnissen zutreffend? Hierbei sollen unter „Kanalverzerrungen" stets Dämpfungsverzerrungen verstanden werden.

- [ ] Kanalverzerrung führt bei ZSB-AM zu Dämpfungsverzerrungen.
- [ ] Kanalverzerrung führt bei ESB–AM zu Phasenverzerrungen.
- [ ] Ein Phasenversatz führt bei ZSB–AM zu Dämpfungsverzerrungen.
- [ ] Ein Phasenversatz führt bei ESB–AM zu Phasenverzerrungen.

Z2.9: Rauschen bei ZSB und ESB



Nun soll der Einfluss von Rauschen auf den Sinken–Störabstand $10 \cdot \lg \rho_v$ bei ZSB– bzw. ESB–AM–Übertragung vergleichend gegenübergestellt werden. Die Grafik zeigt das zugrundeliegende Blockschaltbild.

Rot hervorgehoben sind in diesem Bild die Unterschiede zwischen den beiden Systemvarianten, nämlich der Modulator (ZSB bzw. ESB) sowie die dimensionslose Konstante

$$K = \begin{cases} 2/\alpha_K & \text{bei ZSB}, \\ 4/\alpha_K & \text{bei ESB} \end{cases}$$

des empfängerseitigen Trägersignals $z_E(t) = K \cdot \cos(\omega_T \cdot t)$, das als frequenz- und phasensynchron mit dem Trägersignal $z(t)$ beim Sender angenommen werden soll.

In grüner Farbe beschriftet sind diejenigen Systemkenngrößen, die in der gemeinsamen Leistungskenngröße

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

zusammengefasst sind. Weiter ist zu beachten:

- Das Cosinussignal $q(t)$ mit der Frequenz B_{NF} steht stellvertretend für ein aus mehreren Frequenzen zusammengesetztes Quellensignal der Bandbreite B_{NF}.
- Die ZSB–AM mit Träger wird durch den Modulationsgrad $m = A_N/A_T$ parametrisiert, während die ESB–AM durch das Seitenband–zu–Träger–Verhältnis $\mu = A_N/(2 \cdot A_T)$ bestimmt ist.
- Die frequenzunabhängige Kanaldämpfung α_K wird durch die Konstante K ausgeglichen, so dass im rauschfreien Fall ($N_0 = 0$) das Sinkensignal $v(t)$ mit dem Quellensignal $q(t)$ übereinstimmt.
- Das Sinken–SNR kann somit wie folgt angegeben werden (T_0 gibt hierbei die Periodendauer des Quellensignals an):

$$\rho_v = \frac{P_q}{P_\varepsilon} \quad \text{mit} \quad P_q = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} q^2(t)\,\mathrm{d}t, \quad P_\varepsilon = \int_{-B_{NF}}^{+B_{NF}} \Phi_\varepsilon(f)\,\mathrm{d}f\,.$$

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 2.4.** Die Ergebnisse für die ZSB–AM finden Sie auf der Seite **Einfluss von Rauschstörungen** im Kapitel 2.2.

Fragebogen zu "Z2.9: Rauschen bei ZSB und ESB"

a) Welche Demodulation wird hier betrachtet?

- Synchrondemodulation.
- Hüllkurvendemodulation.

b) Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Größen ρ_v und ξ bei ZSB–AM ohne Träger ($m \to \infty$)?

- Es gilt $\rho_v = 2 \cdot \xi$.
- Es gilt $\rho_v = \xi$.
- Es gilt $\rho_v = \xi/2$.

c) Welcher Zusammenhang besteht zwischen ρ_v und ξ bei ESB–AM ohne Träger ($\mu \to \infty$)?

- Es gilt $\rho_v = 2 \cdot \xi$.
- Es gilt $\rho_v = \xi$.
- Es gilt $\rho_v = \xi/2$.

d) Es gelte $\xi = 10^4$. Berechnen Sie den Sinken–Störabstand der ZSB–AM für den Modulationsgrad $m = 0.5$ bzw. $m = 1$.

ZSB–AM, m = 0.5: $10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

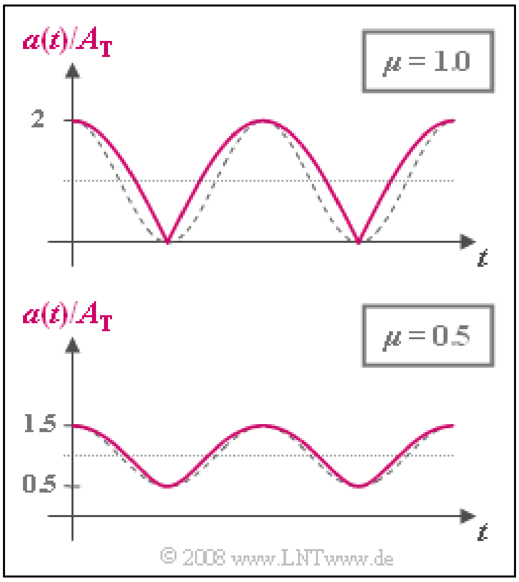
ZSB–AM, m = 1.0: $10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

e) Es gelte weiter $\xi = 10^4$. Berechnen Sie den Sinken–Störabstand der ESB–AM für den Parameter $\mu = 0.354$ bzw. $\mu = 0.707$.

ESB–AM, μ = 0.354: $10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

ESB–AM, μ = 0.707: $10 \cdot \lg \rho_v$ = dB

A2.10: Verzerrungen durch ESB/HKD



Wir betrachten die Übertragung des Cosinussignals

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

gemäß dem Modulationsverfahren „OSB–AM mit Träger". Beim Empfänger wird das hochfrequente Signal mittels eines Hüllkurvendemodulators in den NF-Bereich zurückgesetzt.

Der Kanal wird als ideal vorausgesetzt, so dass $r(t) = s(t)$ gilt. Mit dem Seitenband–zu–Träger–Verhältnis

$$\mu = \frac{A_{\rm N}}{2 \cdot A_{\rm T}}$$

kann für das äquivalente TP–Signal auch geschrieben werden:

$$r_{\rm TP}(t) = A_{\rm T} \cdot \left(1 + \mu \cdot {\rm e}^{{\rm j} \cdot \omega_{\rm N} \cdot t}\right) .$$

Die Hüllkurve – also der Betrag dieses komplexen Signals – kann durch geometrische Überlegungen ermittelt werden. Man erhält abhängig vom Parameter μ:

$$a(t) = A_{\rm T} \cdot \sqrt{1 + \mu^2 + 2\mu \cdot \cos(\omega_{\rm N} \cdot t)}.$$

In der Grafik ist die zeitabhängige Hüllkurve $a(t)$ für $\mu = 1$ und $\mu = 0.5$ dargestellt. Als gestrichelte Vergleichskurven sind jeweils die in der Amplitude angepassten Cosinusschwingungen eingezeichnet, die für eine verzerrungsfreie Demodulation Voraussetzung wären.

Das periodische Signal $a(t)$ kann durch eine Fourierreihe angenähert werden:

$$a(t) = A_0 + A_1 \cdot \cos(\omega_{\rm N} \cdot t) + A_2 \cdot \cos(2\omega_{\rm N} \cdot t) + A_3 \cdot \cos(3\omega_{\rm N} \cdot t) + \ldots$$

Die Fourierkoeffizienten wurden mit Hilfe eines Simulationsprogrammes ermittelt. Für $\mu = 1$ ergaben sich folgende Werte:

$$A_0 = 1.273\,{\rm V}, \quad A_1 = 0.849\,{\rm V}, \quad A_2 = -0.170\,{\rm V}, \quad A_3 = 0.073\,{\rm V}, \quad A_4 = 0.040\,{\rm V}\,.$$

Entsprechend ergab die Simulation mit $\mu = 0.5$:

$$A_0 = 1.064\,{\rm V}, \quad A_1 = 0.484\,{\rm V}, \quad A_2 = 0.058\,{\rm V}\,.$$

Die hier nicht angegebenen Werte können bei der Berechnung des Klirrfaktors vernachlässigt werden. Das Sinkensignal $v(t)$ ergibt sich aus $a(t)$ wie folgt:

$$v(t) = 2 \cdot \left[a(t) - A_0\right].$$

Der Faktor 2 korrigiert dabei die Amplitudenminderung durch die ESB–AM, während die Subtraktion des Gleichsignalkoeffizienten A_0 den Einfluss des Hochpasses innerhalb des Hüllkurvendemodulators berücksichtigt.

Für die Teilaufgaben a) bis c) wird $A_{\rm N}$ = 2 V, $A_{\rm T}$ = 1 V und somit $\mu = 1$ vorausgesetzt, während ab Frage d) der Parameter $\mu = 0.5$ ($A_{\rm N} = A_{\rm T}$ = 1 V) festgelegt ist.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.4.** Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse auch mit der Faustformel, die besagt, dass bei der Hüllkurvendemodulation eines ESB–AM–Signals mit dem Seitenband–zu–Träger–Verhältnis μ der Klirrfaktor $K \approx \mu/4$ beträgt.

Fragebogen zu "A2.10: Verzerrungen durch ESB/HKD"

a) Geben Sie den Maximal– und Minimalwert des Sinkensignals für μ = 1 an.

$\mu = 1$: v_{max} = V

$\mu = 1$: v_{min} = V

b) Berechnen Sie den Klirrfaktor für μ = 1.

$\mu = 1$: K = %

c) Woran erkennt man die nichtlinearen Verzerrungen im vorliegenden Signal $v(t)$?

- ☐ Die untere Cosinushalbwelle ist spitzförmiger als die obere.
- ☐ Der Gleichsignalanteil $E[v(t)] = 0$.

d) Geben Sie den Maximal– und Minimalwert des Sinkensignals für μ = 0.5 an.

$\mu = 0.5$: v_{max} = V

$\mu = 0.5$: v_{min} = V

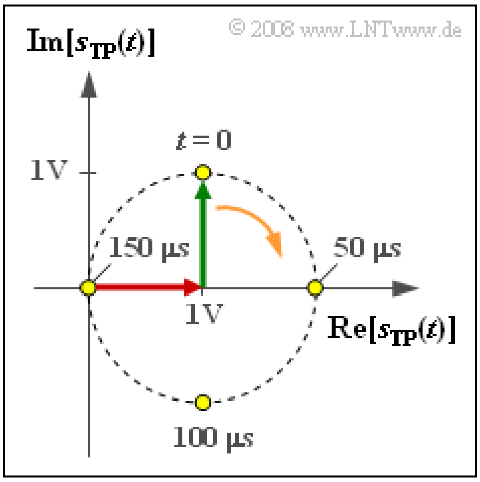
e) Berechnen Sie den Klirrfaktor für μ = 0.5.

$\mu = 0.5$: K = %

f) Geben Sie eine obere Schranke für den Klirrfaktor bei ZSB–AM (m = 0.5) und HKD an, wenn ein Seitenband durch den Kanal gedämpft wird.

$m = 0.5$: K_{max} = %

Z2.10: ESB-AM & HK–Demodulation



Nebenstehende Grafik zeigt die Ortskurve – also die Darstellung des äquivalenten TP–Signals in der komplexen Ebene – für ein ESB–AM–System.

Weiter ist bekannt, dass die Trägerfrequenz f_T = 100 kHz beträgt und dass der Kanal ideal ist:

$$r(t) = s(t) \quad \Rightarrow \quad r_{TP}(t) = s_{TP}(t)\,.$$

Beim Empfänger wird ein idealer Hüllkurvendemodulator (HKD) eingesetzt. Im Verlauf dieser Aufgabe werden folgende Größen benutzt:

- das Seitenband–zu–Träger–Verhältnis

$$\mu = \frac{A_N/2}{A_T}\,,$$

- die Hüllkurve

$$a(t) = |s_{TP}(t)|\,,$$

- die maximale Abweichung τ_{max} der Nulldurchgänge von $s(t)$ und Trägersignal $z(t)$.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf den Theorieteil von **Kapitel 2.4.** Für diese Aufgabe gelten vergleichbare Voraussetzungen wie für die **Aufgabe A2.10.**

Fragebogen zu "Z2.10: ESB-AM & HK–Demodulation"

a) Geben Sie das äquivalente TP–Signal in analytischer Form an und beantworten Sie folgende Fragen.

- [ ] Es handelt sich um eine OSB–AM.
- [ ] Es handelt sich um eine USB–AM.
- [ ] Das Nachrichtensignal $q(t)$ ist cosinusförmig.
- [ ] Das Nachrichtensignal $q(t)$ ist sinusförmig.

b) Geben Sie die Amplitude und Frequenz des Quellensignals an. Berücksichtigen Sie, dass es sich um eine ESB–AM handelt.

A_N = V

f_N = kHz

c) Welcher Wert ergibt sich für das sog. Seitenband–zu–Träger–Verhältnis μ? Verwenden Sie diese Größe zur Beschreibung von $s_\mathrm{TP}(t)$.

μ =

d) Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf der Hüllkurve $a(t)$. Welche Werte treten bei t = 50 µs, t = 100 µs und t = 150 µs auf?

$a(t = 50\ \mu s)$ = V

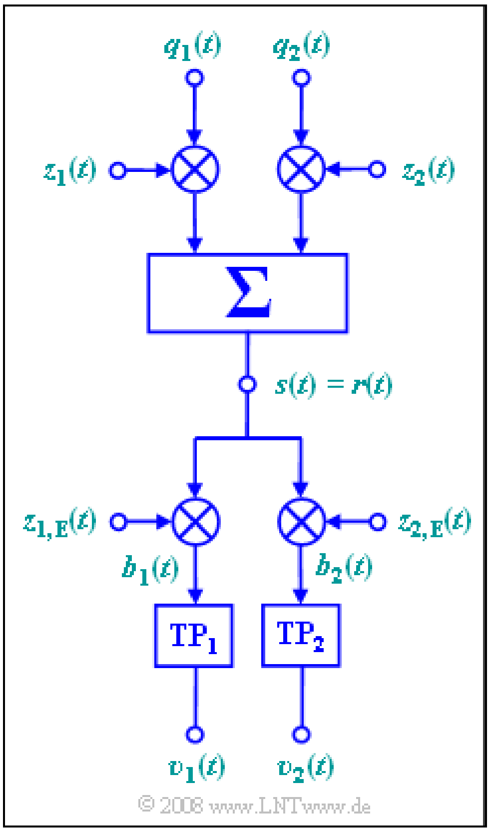
$a(t = 100\ \mu s)$ = V

$a(t = 150\ \mu s)$ = V

e) Um welche Zeitdifferenz τ_max (betragsmäßig) sind die Nulldurchgänge von $s(t)$ gegenüber $z(t)$ maximal verschoben?

τ_max = µs

A2.11: Quadratur–AM



Die durch die Grafik erklärte Quadratur–Amplitudenmodulation erlaubt unter gewissen Randbedingungen, die in dieser Aufgabe angegeben werden sollen, die gleichzeitige Übertragung von zwei Quellensignalen $q_1(t)$ und $q_2(t)$ über den gleichen Kanal.

In dieser Aufgabe gelte mit $A_1 = A_2 = 2$ V:

$$q_1(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t),$$
$$q_2(t) = A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t).$$

Die vier in der Grafik eingezeichneten Trägersignale lauten mit $\omega_T = 2\pi \cdot 25$ kHz:

$$z_1(t) = \cos(\omega_T \cdot t),$$
$$z_2(t) = \sin(\omega_T \cdot t),$$
$$z_{1,E}(t) = 2 \cdot \cos(\omega_T \cdot t + \Delta\phi_T),$$
$$z_{2,E}(t) = 2 \cdot \sin(\omega_T \cdot t + \Delta\phi_T).$$

Die beiden Tiefpässe mit den Eingangssignalen $b_1(t)$ und $b_2(t)$ entfernen jeweils alle Frequenzanteile $|f| > f_T$.

Hinweis: Die Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 2.5** dieses Buches. Anzumerken ist, dass hier die Trägersignale $z_2(t)$ und $z_{2,E}(t)$ mit positivem Vorzeichen angesetzt wurden. Oft – so auch im Theorieteil – werden diese Trägersignale als „Minus–Sinus" angegeben.

Gegeben sind folgende trigonometrischen Umformungen:

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)],$$
$$\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$
$$\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cdot [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)].$$

Fragebogen zu "A2.11: Quadratur–AM"

a) Berechnen Sie das Sendesignal $s(t)$ für den Fall $f_1 \neq f_2$. Welche der folgenden Aussagen treffen zu?

- ○ $s(t)$ besteht aus zwei Cosinus– und zwei Sinusschwingungen.
- ○ $s(t)$ setzt sich aus vier Cosinusschwingungen zusammen.
- ○ $s(t)$ setzt sich aus vier Sinusschwingungen zusammen.

b) Wie lautet $s(t)$ für $f_1 = f_2 = 5$ kHz. Welcher Signalwert tritt bei $t = 50$ µs auf?

$s(t = 50$ µs$)$ = V

c) Berechnen Sie für $f_1 = f_2$ und $\Delta\phi_T = 0$ die Sinkensignale $v_1(t)$ und $v_2(t)$. Welche der folgenden Aussagen treffen zu?

- ☐ Es gilt $v_1(t) = q_1(t)$ und $v_2(t) = q_2(t)$.
- ☐ Es ergeben sich lineare Verzerrungen.
- ☐ Es ergeben sich nichtlineare Verzerrungen.

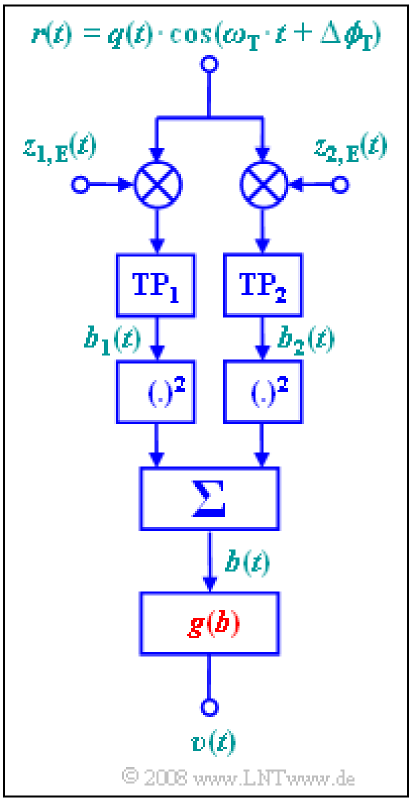
d) Berechnen Sie für $f_1 = f_2$ und $\Delta\phi_T = 30°$ die Sinkensignale $v_1(t)$ und $v_2(t)$. Welche der folgenden Aussagen treffen zu?

- ☐ Es gilt $v_1(t) = q_1(t)$ und $v_2(t) = q_2(t)$.
- ☐ Es ergeben sich lineare Verzerrungen.
- ☐ Es ergeben sich nichtlineare Verzerrungen.

e) Welche der folgenden Aussagen treffen für $f_1 \neq f_2$ und $\Delta\phi_T \neq 0$ zu?

- ☐ Es gilt $v_1(t) = q_1(t)$ und $v_2(t) = q_2(t)$.
- ☐ Es ergeben sich lineare Verzerrungen.
- ☐ Es ergeben sich nichtlineare Verzerrungen.

A2.12: Nichtkohärente Demodulation



Wir betrachten ein AM–moduliertes Signal:

$$s(t) = q(t) \cdot \cos(\omega_T \cdot t)\,.$$

Den Empfänger erreicht aufgrund der Kanallaufzeit das Signal

$$r(t) = q(t) \cdot \cos(\omega_T \cdot t + \Delta\phi_T)\,.$$

Die nebenstehende Anordnung erlaubt eine perfekte Demodulation – das heißt $v(t) = q(t)$ – ohne Kenntnis der Phase $\Delta\phi_T$, allerdings nur dann, wenn das Quellensignal gewisse Voraussetzungen erfüllt.

Die beiden empfängerseitigen Trägersignale lauten:

$$\begin{aligned} z_{1,\,\rm E}(t) &= 2 \cdot \cos(\omega_T \cdot t)\,, \\ z_{2,\,\rm E}(t) &= -2 \cdot \sin(\omega_T \cdot t)\,. \end{aligned}$$

TP$_1$ und TP$_2$ bezeichnen zwei ideale Tiefpässe, deren Grenzfrequenz jeweils gleich der Trägerfrequenz f_T ist. Die nichtlineare Funktion $v = g(b)$ soll im Rahmen dieser Aufgabe ermittelt werden.

Als Quellensignale werden betrachtet:

- das unipolare Rechtecksgnal $q_1(t)$ mit den dimensionslosen Amplitudenwerten 0 und 3,
- das bipolare Rechtecksignal $q_2(t)$ mit den dimensionslosen Amplitudenwerten ±3.

Diese beiden Signale ergeben hinsichtlich $s(t)$ ein ASK– bzw. ein BPSK–Signal.

Hinweis: Diese Aufgabe bezieht sich auf das **Kapitel 2.5.** Gegeben sind folgende trigonometrischen Umformungen:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) &= \frac{1}{2} \cdot \left[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)\right], \\ \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) &= \frac{1}{2} \cdot \left[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)\right], \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) &= \frac{1}{2} \cdot \left[\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)\right]. \end{aligned}$$

Fragebogen zu "A2.12: Nichtkohärente Demodulation"

a) Wie lauten die Signale $b_1(t)$ und $b_2(t)$ in den beiden Zweigen – jeweils nach Multiplizierer und Tiefpass? Welche Aussagen treffen zu?

- [ ] $b_1(t) = q(t) \cdot \cos(\Delta\phi_T)$.
- [ ] $b_2(t) = q(t) \cdot \cos(\Delta\phi_T)$.
- [ ] $b_1(t) = q(t) \cdot \sin(\Delta\phi_T)$.
- [ ] $b_2(t) = q(t) \cdot \sin(\Delta\phi_T)$.
- [ ] $b_1(t) = b_2(t) = q(t)$.

b) Welche Werte b_{min} und b_{max} nimmt das Signal $b(t)$ an, wenn am Eingang das unipolare Quellensignal $q_1(t)$ anliegt?

$q_1(t)$: b_{min} =

$q_1(t)$: b_{max} =

c) Wie muss die Kennlinie $v = g(b)$ gewählt werden, damit $v(t) = q(t)$ gilt?

- [ ] $g(b) = b^2$.
- [ ] $g(b) = b^{0.5}$.
- [ ] $g(b) = \arctan(b)$.

d) Welche Werte b_{min} und b_{max} nimmt das Signal $b(t)$ an, wenn am Eingang das bipolare Quellensignal $q_2(t)$ anliegt?

$q_2(t)$: b_{min} =

$q_2(t)$: b_{max} =