Signale und Systeme – Modulation

Gerhard Schmidt

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Technische Fakultät
Elektrotechnik und Informationstechnik
Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie

Gesamtübersicht – Teil 1

- Signale und Systeme – Einführung
  - Einführung und Begriffsklärung
  - Signale
  - Systeme
- Signale
  - Elementarsignale
  - Reaktion linearer Systeme auf Elementarsignale
  - Signalzerlegung in Elementarsignale
- Spektraldarstellungen determinierter Signale
  - Fourier-Reihe, Diskrete Fourier-Transformation
  - Fourier-Transformation
  - Laplace- und z-Transformation

Gesamtübersicht – Teil 2

- Lineare Systeme
  - Reaktionen auf Elementarsignale
  - Reaktionen auf beliebige Signale
  - Zusammenhänge zwischen Systemkenngrößen
  - Stabilität linearer Systeme
  - Gebrochen-rationale Übertragungsfunktionen
- Modulation
  - Grundlagen
  - Lineare Modulation- und Demodulationsverfahren
  - Abtasttheorem

Übersicht des nächsten Abschnitts

- Signale und Systeme – Einführung
- Signale
- Spektraldarstellungen determinierter Signale
- Lineare Systeme
- ***Modulation***
  - Grundlagen
  - Lineare Modulation
    - Zweiseitenband-Modulation
    - Einseitenband-Modulation
    - Amplituden-Modulation
    - Zweiseitenband-Demodulation
    - Einseitenband-Demodulation
    - Amplituden-Demodulation
    - Puls-Amplituden-Modulation und -Demodulation
    - Abtasttheorem

Komplexe Modulation – Teil 1

Modulation (Wiederholung):

Aus dem Vorlesungsteil über die Fourier-Transformation sind die Modulationssätze bekannt.
Folgende Korrespondenzen wurden für …

- … kontinuierliche Signale gefunden:

$$v(t) \quad \circ\!\!-\!\!\bullet \quad V(j\omega),$$
$$y_{\mathrm{c}}(t) = v(t)\, e^{j\omega_{\mathrm{T}} t} \quad \circ\!\!-\!\!\bullet \quad V\big(j(\omega - \omega_{\mathrm{T}})\big).$$

- … diskrete Signale gefunden:

$$v(n) \quad \circ\!\!-\!\!\bullet \quad V(e^{j\Omega}),$$
$$y_{\mathrm{c}}(n) = v(n)\, e^{j\Omega_{\mathrm{T}} n} \quad \circ\!\!-\!\!\bullet \quad V\big(e^{j(\Omega - \Omega_{\mathrm{T}})}\big).$$

Eine Multiplikation mit einer harmonischen Exponentiellen bewirkt eine spektrale Verschiebung um die Trägerfrequenz ω_{T} bzw. Ω_{T}. Dies wird als ***Modulation*** bezeichnet.

… Der Zweck dieser Operation ist die Anpassung des Signalspektrums an den Frequenzbereich des zu nutzenden Übertragungs-, Speicher- oder Verarbeitungsmediums!

Komplexe Modulation – Teil 2

Demodulation:

Will man das Signal $v(...)$ bzw. das Spektrum $V(...)$ aus dem modulierten Signal $y_\mathrm{c}(...)$ bzw. Spektrum $Y_\mathrm{c}(...)$ wiedergewinnen, so ist eine erneute Multiplikation mit einer harmonischen Exponentiellen notwendig. Da dieser zweite Modulationsterm mit dem ersten „synchron“ sein muss, wird diese Maßnahme auch als ***Synchron-Demodulation*** bezeichnet.
Für kontinuierliche Signale gilt:

$$\begin{array}{ccccc} y_\mathrm{c}(t)\, e^{-j\omega_\mathrm{T} t} & = & v(t)\, e^{j(\omega_\mathrm{T}-\omega_\mathrm{T})t} & = & v(t), \\ \circ\!\!-\!\!\bullet & & \circ\!\!-\!\!\bullet & & \circ\!\!-\!\!\bullet \\ Y_\mathrm{c}\big(j(\omega+\omega_\mathrm{T})\big) & = & V\big(j(\omega-\omega_\mathrm{T}+\omega_\mathrm{T})\big) & = & V(j\omega). \end{array}$$

Für diskrete Signale gilt:

$$\begin{array}{ccccc} y_\mathrm{c}(n)\, e^{-j\Omega_\mathrm{T} n} & = & v(n)\, e^{j(\Omega_\mathrm{T}-\Omega_\mathrm{T})n} & = & v(n), \\ \circ\!\!-\!\!\bullet & & \circ\!\!-\!\!\bullet & & \circ\!\!-\!\!\bullet \\ Y_\mathrm{c}(e^{j(\Omega+\Omega_\mathrm{T})}) & = & V(e^{j(\Omega-\Omega_\mathrm{T}+\Omega_\mathrm{T})}) & = & V(e^{j\Omega}). \end{array}$$

Andere Modulationsverfahren / Lineare Modulation

Andere Modulationsverfahren:

Neben den bisher beschriebenen Modulationsverfahren existieren auch andere Varianten. Hier wird dann eine Anpassung des Signals ***nicht*** nur bezüglich der Frequenz vorgenommen. Hierbei steht vor allem eine ***Verringerung der Fehleranfälligkeit*** im Vordergrund.

Lineare Modulation:

Die bisher beschriebene Modulation (siehe die beider vorigen Folien) ist ***linear*** im Sinne der Definition dieser Vorlesung.

… Aber sie (wie auch alle im Folgenden beschriebenen Modulationsverfahren) ist ***nicht verschiebungsinvariant***!

Zweiseitenband-Modulation (ZSB-Modulation) – Teil 1

Verwendung von reellen Trägersignalen:

Verwendet man anstelle von einer harmonischen Exponentiellen einen Cosinus-Modulationsterm, so entstehen folgende Signale:

- ***Kontinuierliche*** Zweiseitenband-Modulation:

$$y_{\mathrm{z}}(t) \;=\; v(t)\,\cos(\omega_{\mathrm{T}} t) \;=\; v(t)\,\frac{1}{2}\left[e^{j\omega_{\mathrm{T}} t} + e^{-j\omega_{\mathrm{T}} t}\right],$$

$$\circ\!\!-\!\!\bullet$$

$$Y_{\mathrm{z}}(j\omega) \;=\; \frac{1}{2}\left[V\big(j(\omega-\omega_{\mathrm{T}})\big) + V\big(j(\omega+\omega_{\mathrm{T}})\big)\right].$$

- ***Diskrete*** Zweiseitenband-Modulation:

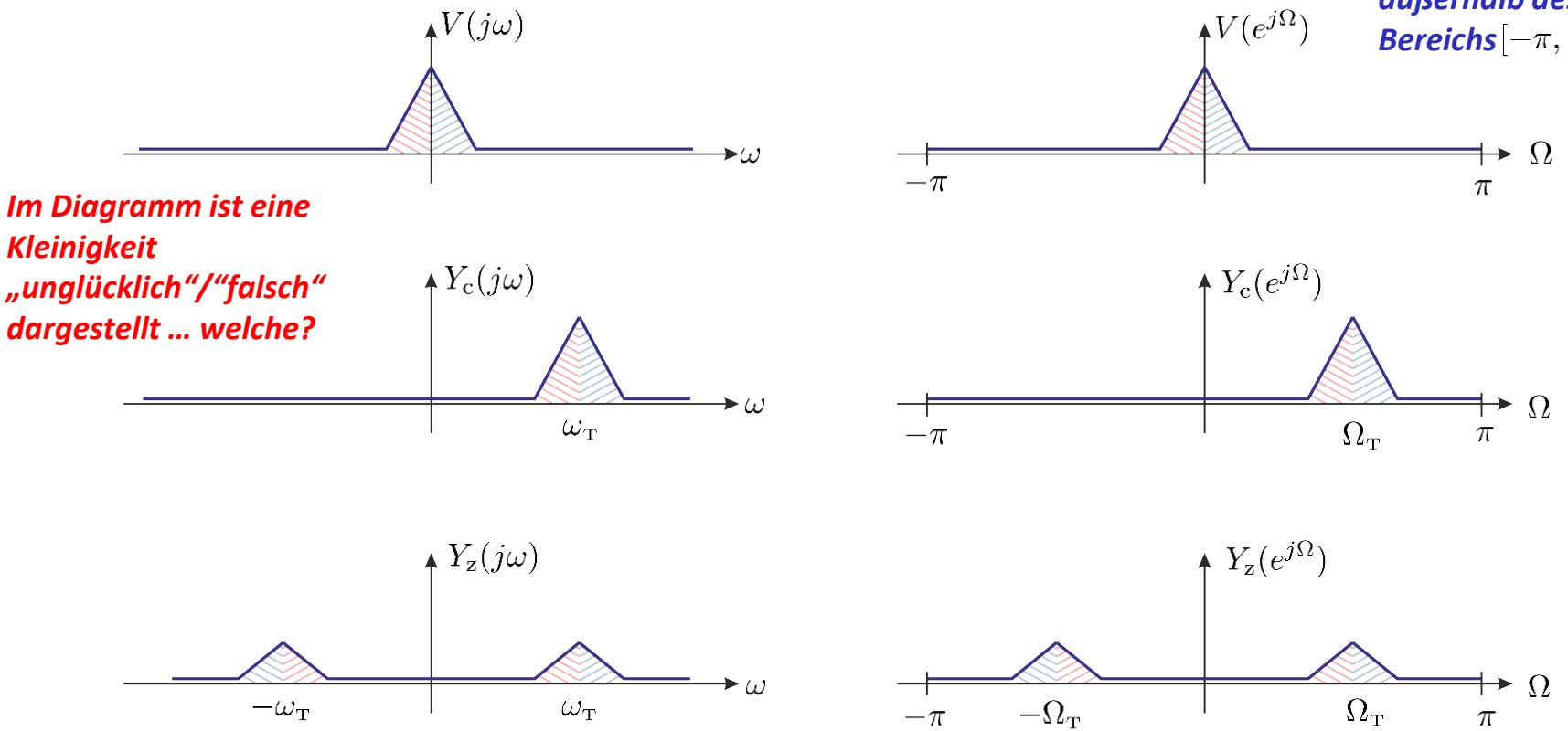
$$y_{\mathrm{z}}(n) \;=\; v(n)\,\cos(\Omega_{\mathrm{T}} n) \;=\; v(n)\,\frac{1}{2}\left[e^{j\Omega_{\mathrm{T}} n} + e^{-j\Omega_{\mathrm{T}} n}\right],$$

$$Y_{\mathrm{z}}(e^{j\Omega}) \;=\; \frac{1}{2}\left[V\big(e^{j(\Omega-\Omega_{\mathrm{T}})}\big) + V\big(e^{j(\Omega+\Omega_{\mathrm{T}})}\big)\right].$$

Zweiseitenband-Modulation (ZSB-Modulation) – Teil 2

Graphische Veranschaulichung:

Periodische Fortsetzung außerhalb des Bereichs $[-\pi, \pi]$ ***!***



Im Diagramm ist eine Kleinigkeit „unglücklich“/“falsch“ dargestellt … welche?

Offenbar ist die vollständige Information über $v(\ldots)$ ***bzw.*** $V(\ldots)$ ***in den beiden äußeren Hälften des Spektrums (= obere Seitenbänder) und in den beiden inneren Hälften (= untere Seitenbänder) enthalten.***

Zweiseitenband-Modulation (ZSB-Modulation) – Teil 3

Nachteile der Zweiseitenband-Modulation:

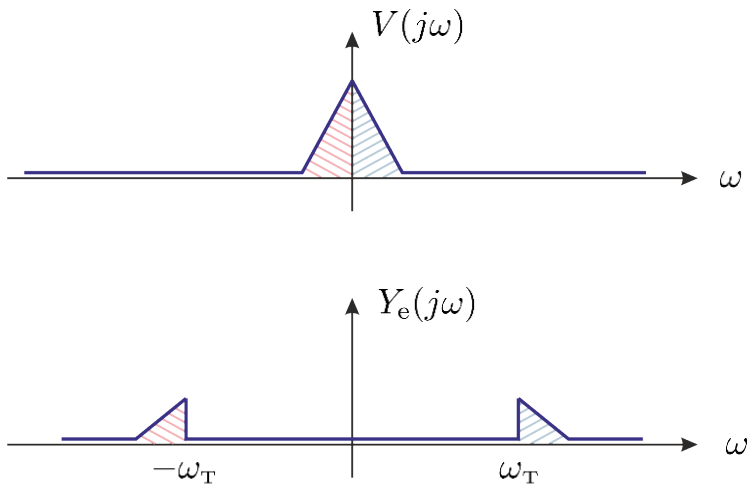
Die Übertragung oder auch die Speicherung beider Seitenbänder würde ***Redundanz*** bedeuten. Dies ist nachteilig, insbesondere bei Frequenz-Multiplex-Übertragungen, da man hier möglichst viele Nutzer (z.B. Rundfunksender oder Telefon-Benutzer) über einen begrenzten Frequenzbereich übertragen will.

Will man die sog. ***Frequenzeffizienz*** erhöhen, so kann man z.B. eine Einseitenband-Modulation (dargestellt auf den nächsten Folien) verwenden.

Einseitenband-Modulation (ESB-Modulation) – Teil 1

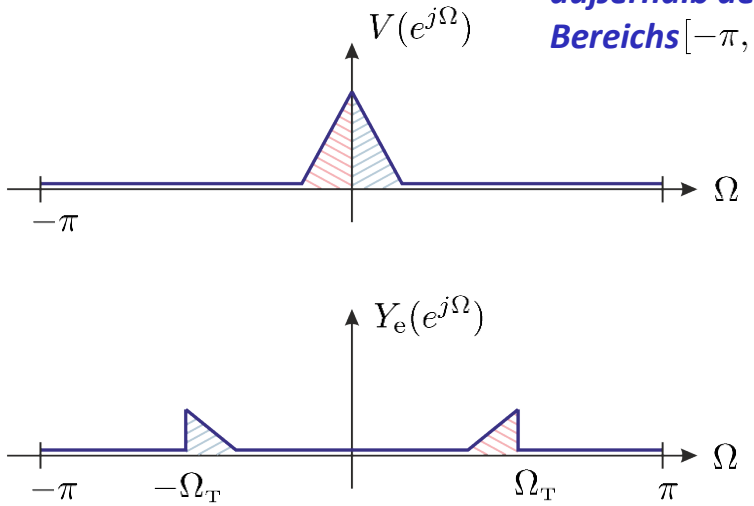
Graphische Veranschaulichung:

Bei der Einseitenband-Modulation vermeidet man die Redundanz der Zweiseitenband-Modulation, in dem man nur die oberen oder die unteren Seitenbänder moduliert. Dabei bleiben die Symmetrien von reellwertigen Signalen erhalten.



Einseitenband-Modulation unter Verwendung der oberen Seitenbänder für kontinuierliche Signale!

Periodische Fortsetzung außerhalb des Bereichs $[-\pi, \pi]$ *!*

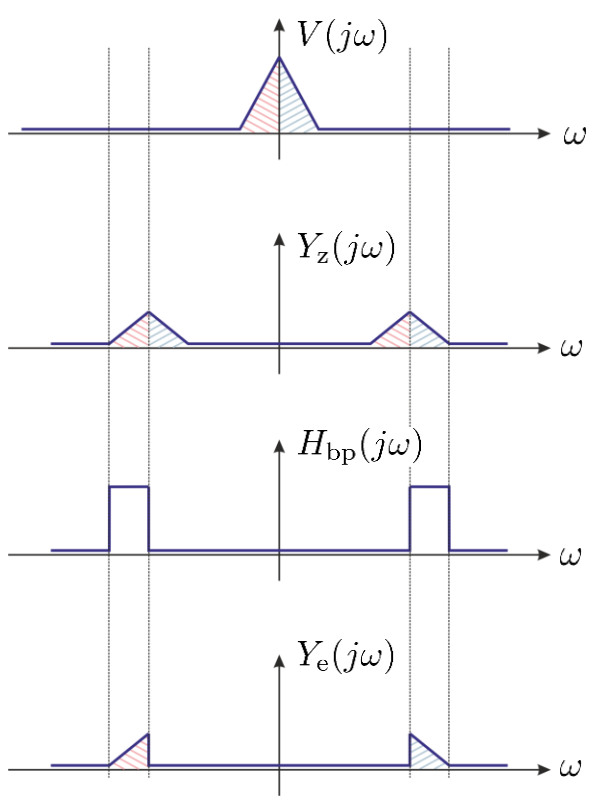


Einseitenband-Modulation unter Verwendung der unteren Seitenbänder für diskrete Signale!

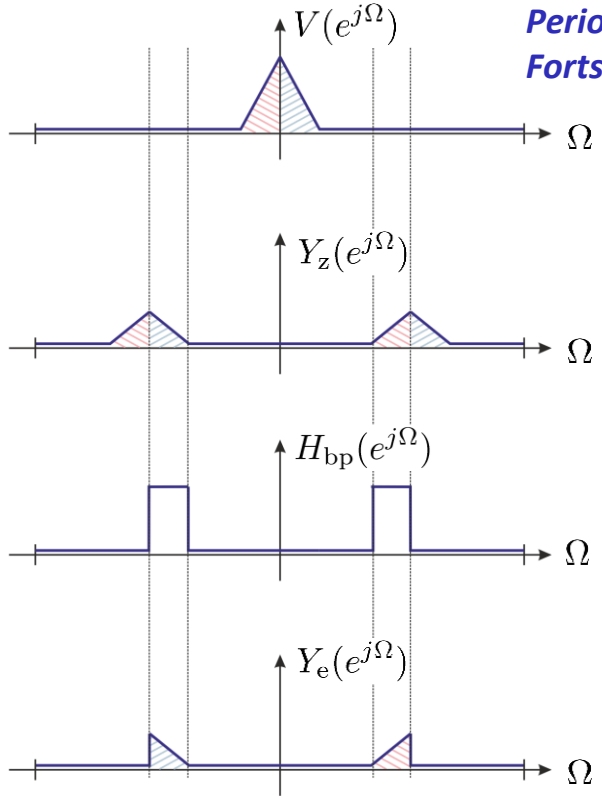
Einseitenband-Modulation (ESB-Modulation) – Teil 2

Prinzipielle Realisierung:

Die Einseitenband-Modulation kann durch eine ***Zweiseitenband-Modulation*** mit einer anschließenden ***idealen Bandpassfilterung*** realisiert werden.



Einseitenband-Modulation unter Verwendung der oberen Seitenbänder für kontinuierliche Signale!



Periodische Fortsetzung …

Einseitenband-Modulation unter Verwendung der unteren Seitenbänder für diskrete Signale!

Amplituden-Modulation (AM) – Teil 1

„Zweiseiten-Modulation mit Träger“:

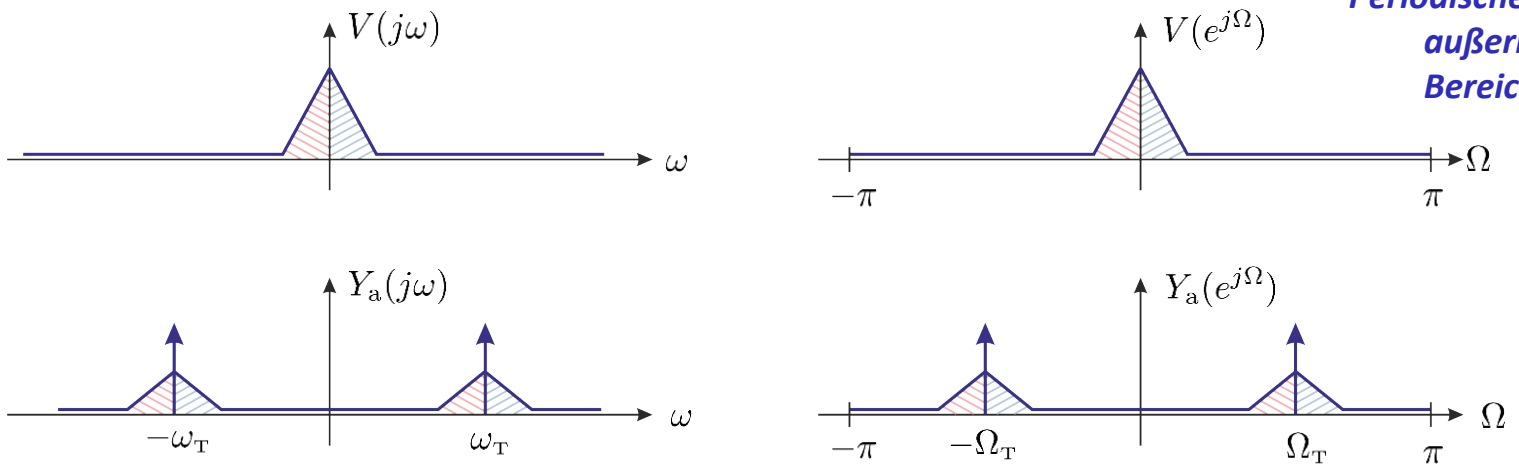
Eine Amplituden-Modulation kann als Zweiseiten-Modulation mit einer Trägerschwingung interpretiert werden.
Sie wird für ***kontinuierliche*** Signale gemäß

$$y_\mathrm{a}(t) \;=\; \big[1 + m\,v(t)\big]\,\cos(\omega_\mathrm{T} t) \;=\; \cos(\omega_\mathrm{T} t) + m\,\underbrace{v(t)\,\cos(\omega_\mathrm{T} t)}_{=\,y_\mathrm{z}(t)} \;=\; \cos(\omega_\mathrm{T} t) + m\,y_\mathrm{z}(t)$$

berechnet. Entsprechend gilt für ***diskrete*** Signale

$$y_\mathrm{a}(n) \;=\; \big[1 + m\,v(n)\big]\,\cos(\Omega_\mathrm{T} n) \;=\; \cos(\Omega_\mathrm{T} n) + m\,\underbrace{v(n)\,\cos(\Omega_\mathrm{T} n)}_{=\,y_\mathrm{z}(n)} \;=\; \cos(\Omega_\mathrm{T} n) + m\,y_\mathrm{z}(n).$$

Graphische Darstellung:



Periodische Fortsetzung außerhalb des Bereichs $[-\pi,\,\pi]$ ***!***

Amplituden-Modulation (AM) – Teil 2

Anmerkungen:

- Es ist zu beachten, dass bei dieser Modulationsart die ***Trägerschwingung zusätzlich*** auftritt, d.h. sie ist auch zu übertragen bzw. zu verarbeiten.
- Eine Amplituden-Modulation weist die ***gleiche (schlechte) Bandbreiteneffizienz*** wie eine Zweiseitenband-Modulation auf. Zusätzlich hat sie außerdem noch eine ***schlechtere Energie-Effizienz***.
- Dennoch ist die Amplituden-Modulation ein ***klassisches, weit verbreitetes Übertragungsverfahren*** im Rundfunk (insbesondere im KW-, MW- und LW-Bereich).
- Der Grund dafür liegt in der ***einfachen Demodulation*** (es lassen sich billige Empfänger in großer Stückzahl herstellen). Dazu später mehr.

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 1

Ansatz – Teil 1:

Für die Demodulation eines ZSB-modulierten Signals wird wieder mit einem Trägersignal multipliziert. Die Frequenz ist dabei die gleiche, die auch für den Träger verwendet wurde. Man spricht dann von einer ***Synchron-Demodulation***:

- ***Kontinuierliche*** Zweiseitenband-Demodulation:

$$
\begin{aligned}
y_{\mathrm{z}}(t)\,\cos(\omega_{\mathrm{T}} t) &= v(t)\,\cos^2(\omega_{\mathrm{T}} t) \\
&\quad \textit{... cos-Theorem und Aufteilung in Exponentialterme einsetzen ...} \\
&= v(t)\,\frac{1}{2}\left[1+\cos(2\omega_{\mathrm{T}} t)\right] \;=\; v(t)\left[\frac{1}{2}+\frac{1}{4}\,e^{j2\omega_{\mathrm{T}} t}+\frac{1}{4}\,e^{-j2\omega_{\mathrm{T}} t}\right], \\
&\quad \circ\!\!-\!\!\bullet \\
&\quad \frac{1}{2}V(j\omega)+\frac{1}{4}\,V\big(j(\omega-2\omega_{\mathrm{T}})\big)+\frac{1}{4}\,V\big(j(\omega+2\omega_{\mathrm{T}})\big).
\end{aligned}
$$

Anschließend ist eine ***Tiefpassfilterung*** notwendig, welche die Signalkomponenten bei $\omega - 2\omega_{\mathrm{T}}$ bzw. $\omega + 2\omega_{\mathrm{T}}$ unterdrückt.

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 2

Ansatz – Teil 2:

- ***Diskrete*** Zweiseitenband-Demodulation:

$$y_{\mathrm{z}}(n)\,\cos(\Omega_{\mathrm{T}} n) = v(n)\,\cos^2(\Omega_{\mathrm{T}} n)$$

… cos-Theorem und Aufteilung in Exponentialterme einsetzen …

$$= v(n)\,\frac{1}{2}\left[1+\cos(2\Omega_{\mathrm{T}} n)\right] = v(n)\left[\frac{1}{2}+\frac{1}{4}\,e^{j2\Omega_{\mathrm{T}} n}+\frac{1}{4}\,e^{-j2\Omega_{\mathrm{T}} n}\right],$$

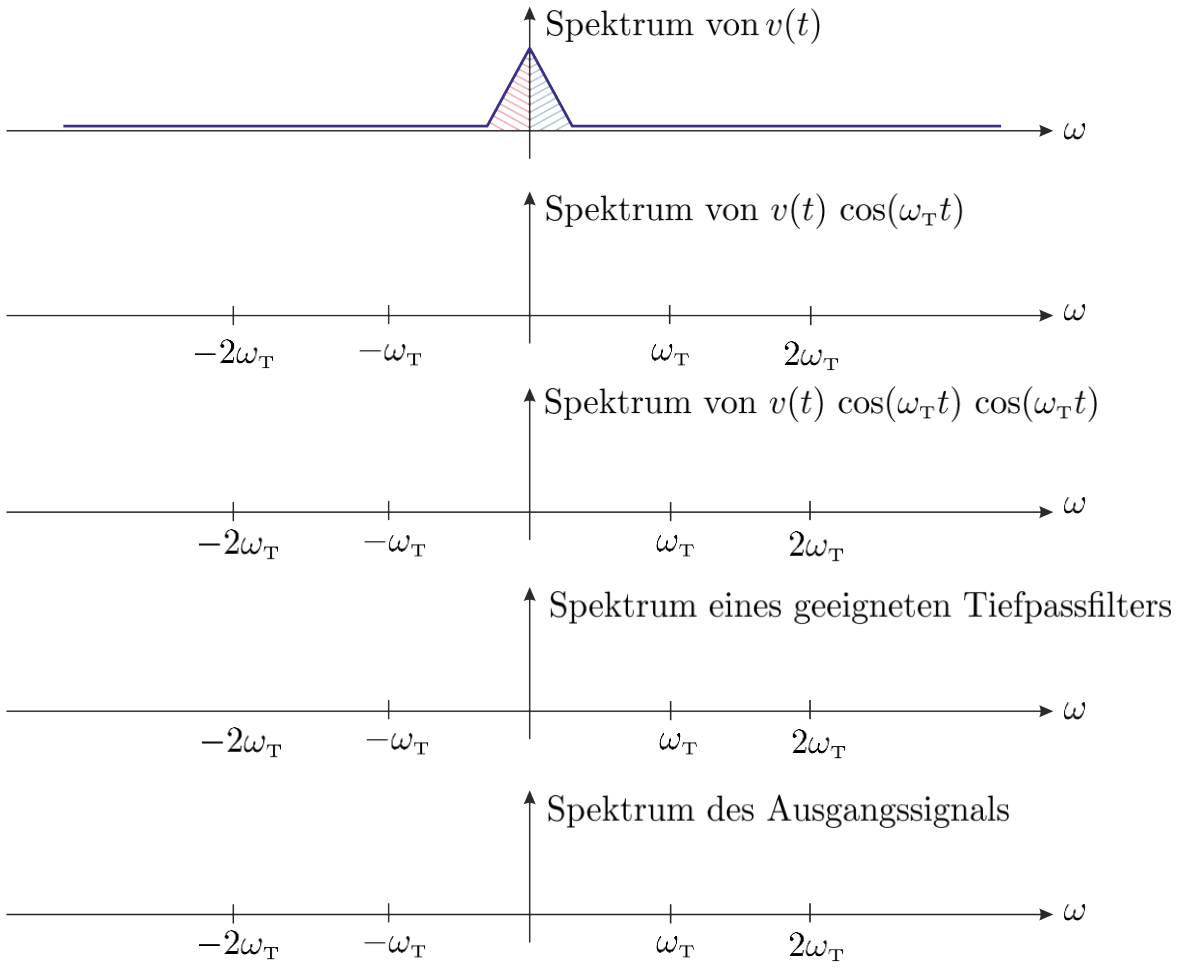
$$\frac{1}{2}V(e^{j\Omega})+\frac{1}{4}\,V\left(e^{j(\Omega-2\Omega_{\mathrm{T}})}\right)+\frac{1}{4}\,V\left(e^{j(\Omega+2\Omega_{\mathrm{T}})}\right).$$

Anschließend ist eine ***Tiefpassfilterung*** notwendig, welche die Signalkomponenten bei $\Omega - 2\Omega_{\mathrm{T}}$ bzw. $\Omega + 2\Omega_{\mathrm{T}}$ unterdrückt.

Am Ausgang des Tiefpassfilters liegt dann (vorausgesetzt die (einseitige) Bandbreites des Signals $v(...)$ ist kleiner als die Trägerfrequenz) das gewichtetet Eingangssignal $1/2\,v(...)$ vor!

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 3

Ansatz – Teil 3:



Vervollständigen Sie die nebenstehenden Spektraldarstellungen!

Eigener Versuch, dann gemeinsame Lösung an der Tafel!

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 4

Schwierigkeiten bei der Demodulation – Teil 1:

Die Modulationen auf der Sende- und auf der Empfangsseite arbeiten (im Allgemeinen) mit Trägersignalen, die nicht gleichzeitig / am selben Ort erzeugt wurden. Nimmt man auf der Empfangsseite ***Trägerfrequenzfehler*** bzw. ***Trägerphasenfehler*** an, dann verwendet man für die kontinuierliche Demodulation das Modulationssignal

Trägerfrequenzfehler

$$\cos\left((\omega_\mathrm{T} + \Delta\omega)t + \varphi\right)$$

Trägerphasenfehler

bzw. für diskrete Signale

Trägerfrequenzfehler

$$\cos\left((\Omega_\mathrm{T} + \Delta\Omega)n + \varphi\right).$$

Trägerphasenfehler

Auf eine entsprechende Herleitung im Diskreten wird im Folgenden verzichtet, da diese völlig analog zu den kontinuierlichen Überlegungen verläuft.

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 5

Schwierigkeiten bei der Demodulation – Teil 2:

Im Kontinuierlichen ergibt sich für eine Demodulation mit einem fehlerbehafteten Trägersignal:

$$\begin{aligned} y_z(t)\,\cos\big((\omega_T+\Delta\omega)t+\varphi\big) &= v(t)\,\cos(\omega_T t)\,\cos\big((\omega_T+\Delta\omega)t+\varphi\big) \\ &= v(t)\,\frac{1}{2}\Big[\cos\big((2\,\omega_T+\Delta\omega)t+\varphi\big)+\cos\big(\Delta\omega t+\varphi\big)\Big]. \end{aligned}$$

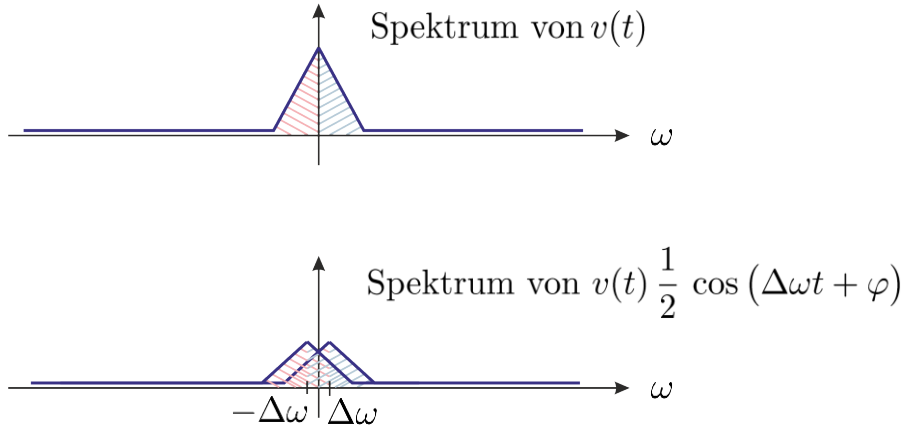
Durch eine geeignete Tiefpassfilterung kann der Signalanteil rund um $2\,\omega_T+\Delta\omega$ entfernt werden.
Damit erhält man für das demodulierte, tiefpassgefilterte Signal:

$$v(t)\,\frac{1}{2}\,\cos\big(\Delta\omega t+\varphi\big).$$

Im Spektrum entspricht dies zwei verschobenen Teilspektren, die sich ***nicht*** zu $\frac{1}{2}\,V(j\omega)$ überlagern!
Dies führt zu starken ***Verzerrungen***.

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 6

Schwierigkeiten bei der Demodulation – Teil 3:



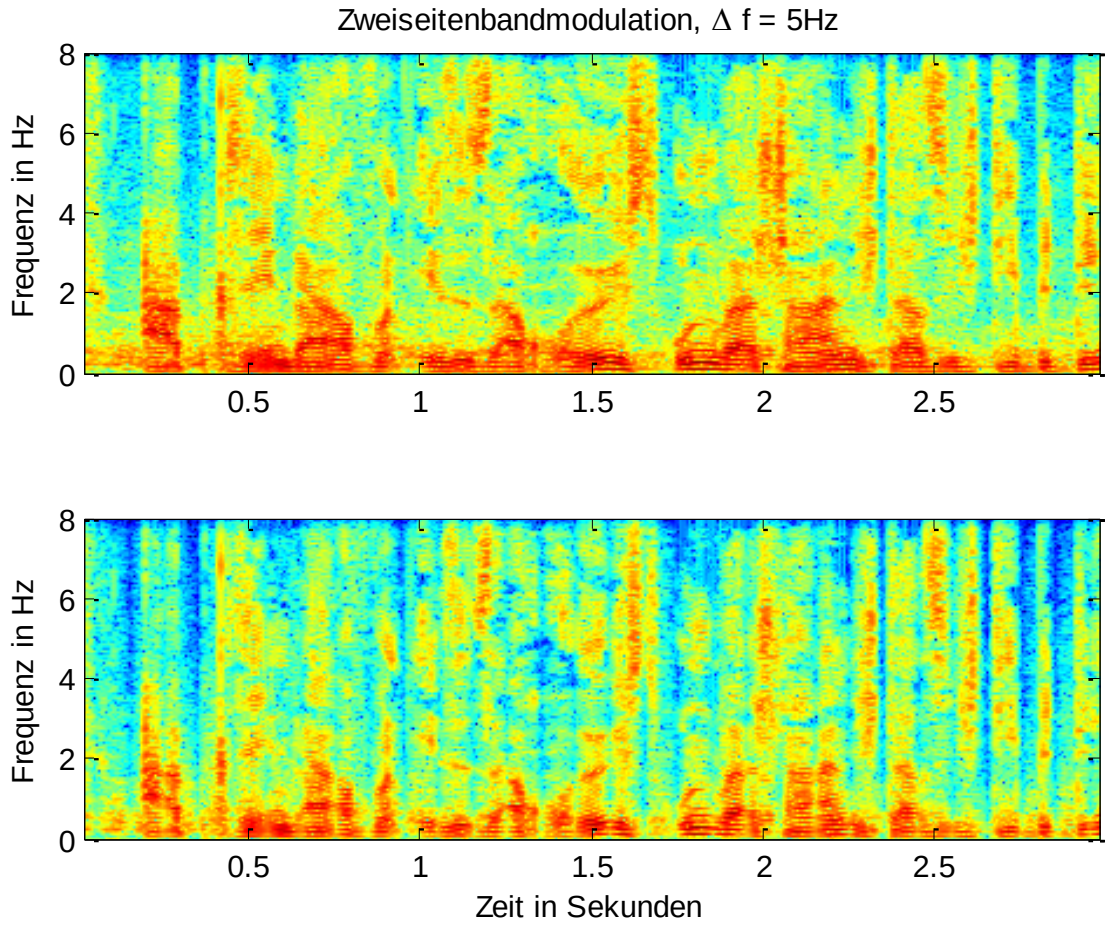
Nimmt man an, dass es keine Trägerfrequenzfehler gäbe (dies ist mit einigem Aufwand verbunden), d.h. $\Delta\omega = 0$, so bleiben noch Phasenfehler übrig:

$$v(t)\,\frac{1}{2}\,\cos(\varphi).$$

Diese sind aber unkritisch, solange $\varphi \ll \pi/2$ bleibt. In diesem Fall gilt $\cos(\varphi) \approx 1$. Es ist daher keine perfekte, aber eine gute Phasensynchronisation notwendig.

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 7

ZSB-Demodulation mit Trägerfrequenzfehler – Teil 1:

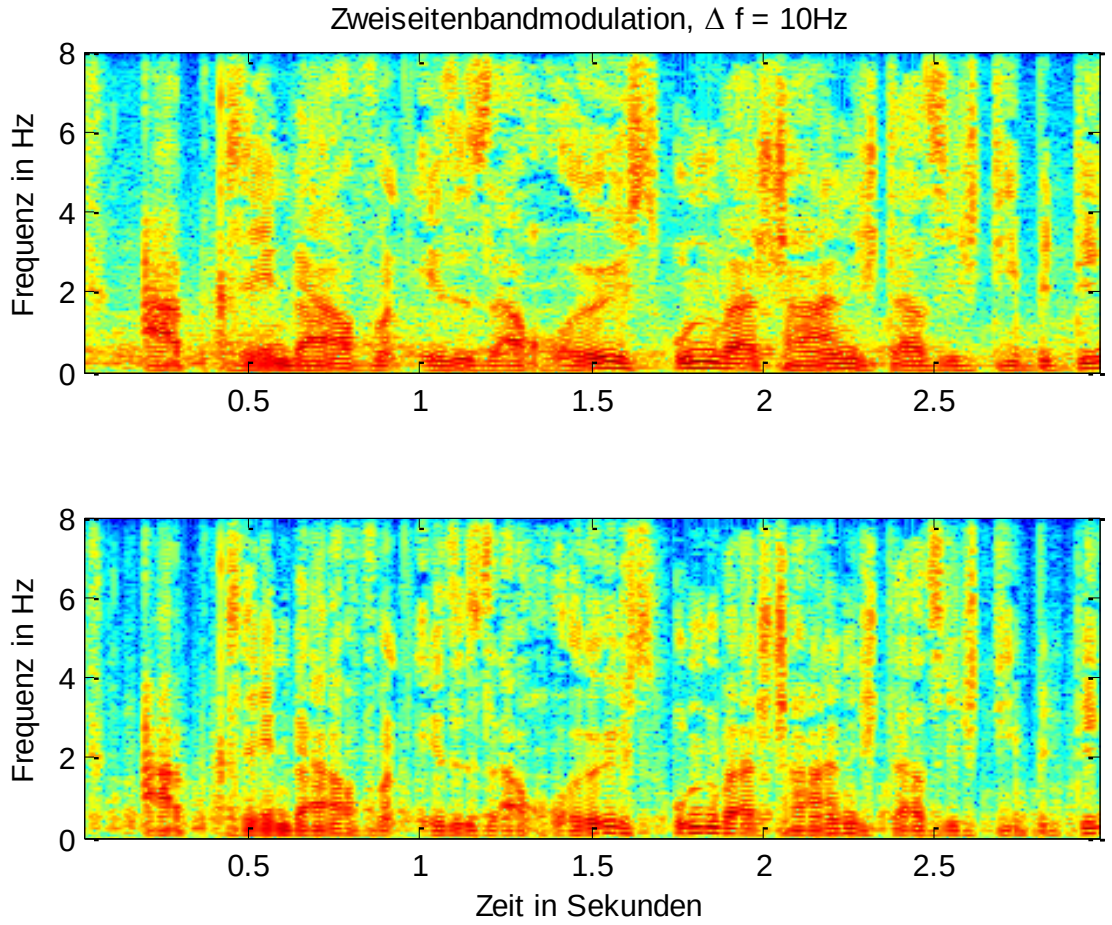


Originalsignal

Demodulation mit 5 Hz Frequenzversatz

Zweiseitenband-Demodulation (ZSB-Demodulation) – Teil 8

ZSB-Demodulation mit Trägerfrequenzfehler – Teil 2:



Originalsignal

Demodulation mit 10 Hz Frequenzversatz

Einseitenband-Demodulation (ESB-Demodulation) – Teil 1

Ansatz – Teil 1:

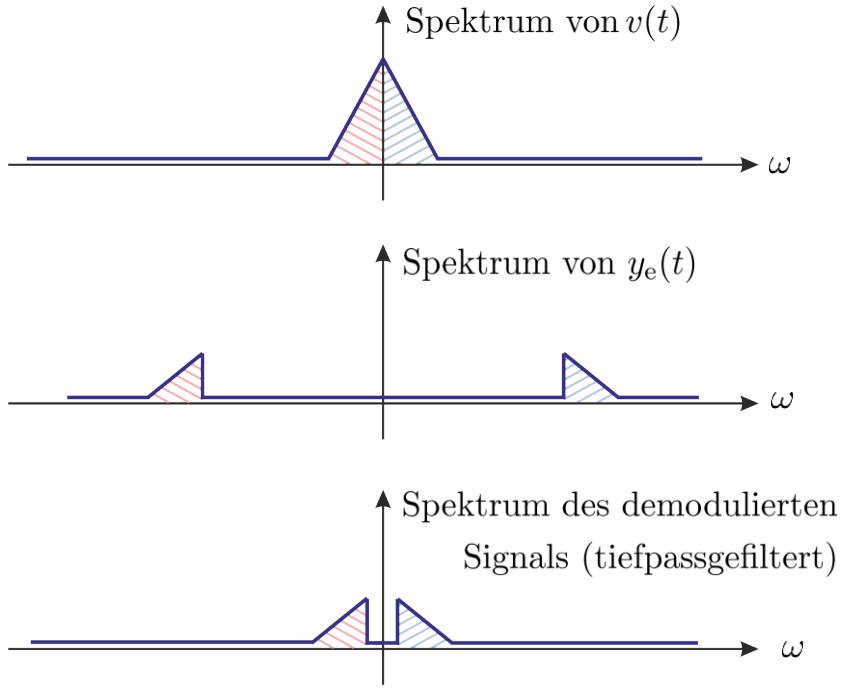
Die Demodulation eines einseitenband-modulierten Signals geschieht analog zur Demodulation eines zweiseitenband-modulierten Signals, d.h. mittels Multiplikation mit einem cosinus-Träger entsprechender Frequenz und anschließender Tiefpassfilterung:

$$y_\mathrm{e}(t)\ \cos\left((\omega_\mathrm{T}+\Delta\omega)t+\varphi\right).$$

Es werden Frequenz- und Phasenfehler angenommen!

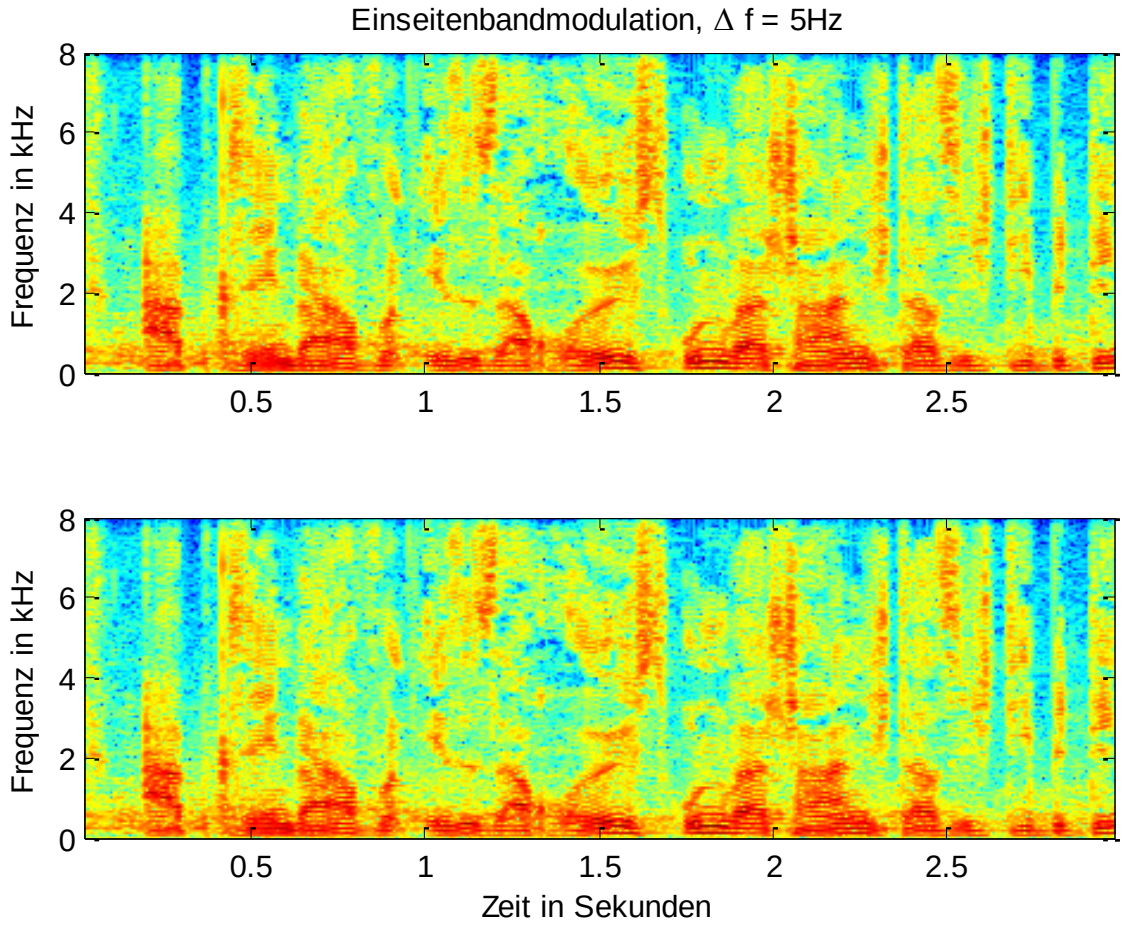
Ist der Frequenzversatz klein und positiv, so sind ***Frequenzfehler*** bei der Einseitenband-Demodulation ***unkritischer*** als bei der Zweiseitenband-Demodulation.

Phasenfehler bewirken lediglich einen zusätzlichen Phasenterm im Ausgangsspektrum und sind i.A. vollkommen ***unkritisch***.



Einseitenband-Demodulation (ESB-Demodulation) – Teil 2

ESB-Demodulation mit Trägerfrequenzfehler:

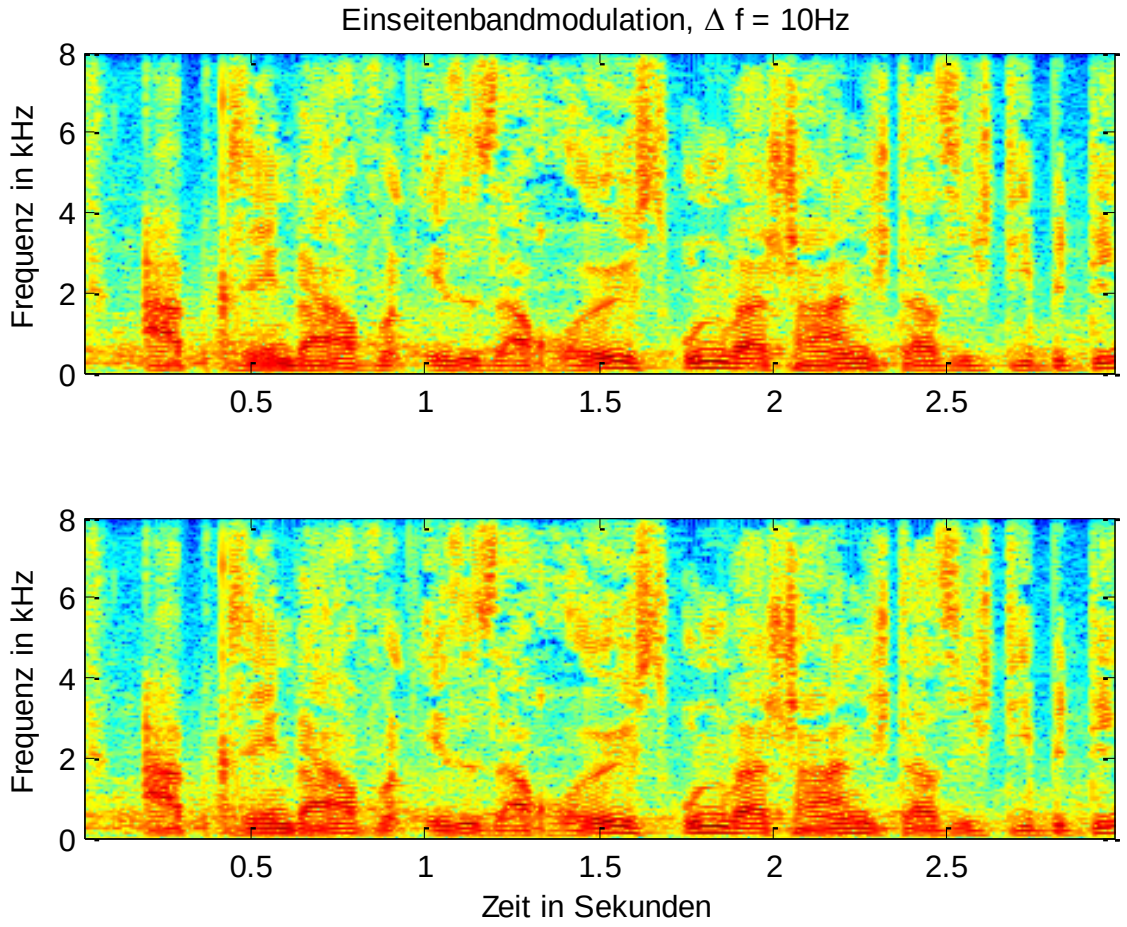


Originalsignal

Demodulation mit 5 Hz Frequenzversatz

Einseitenband-Demodulation (ESB-Demodulation) – Teil 3

ESB-Demodulation mit Trägerfrequenzfehler:

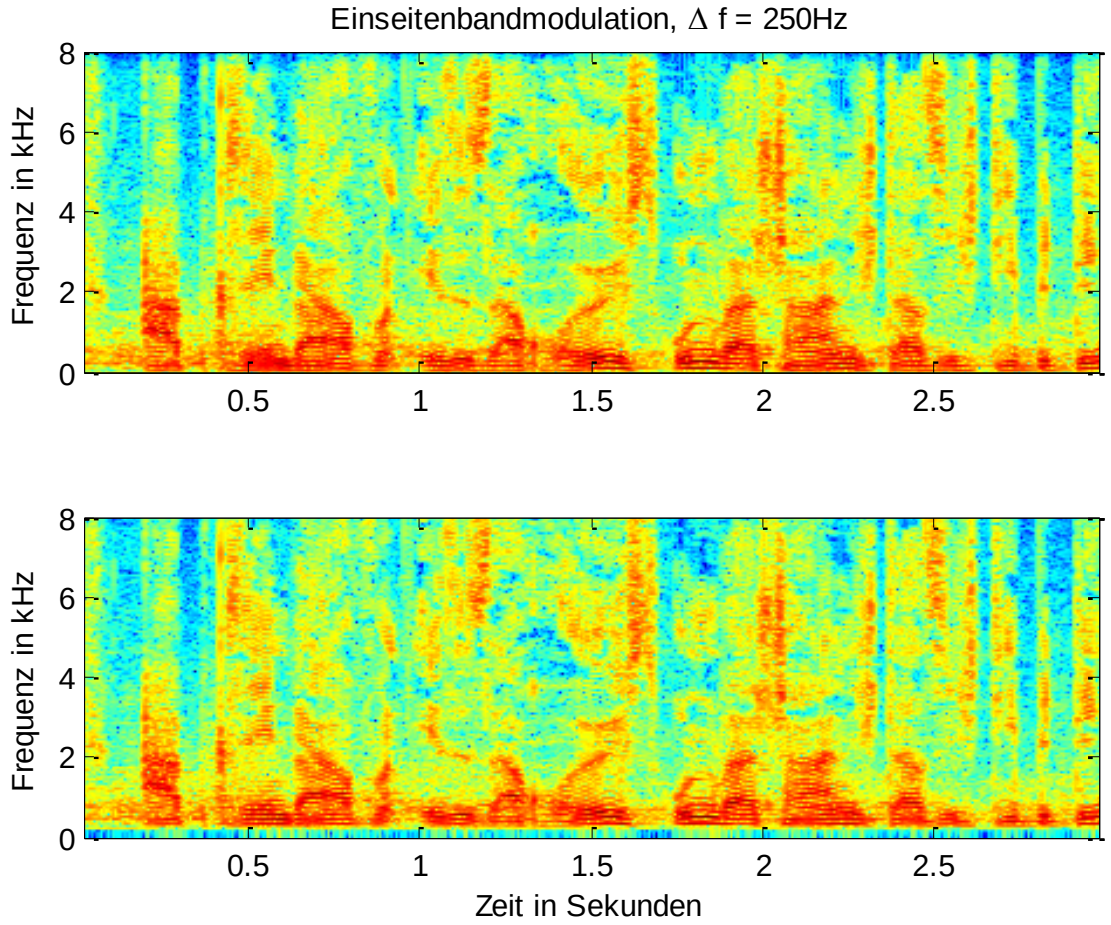


Originalsignal

Demodulation mit 10 Hz Frequenzversatz

Einseitenband-Demodulation (ESB-Demodulation) – Teil 4

ESB-Demodulation mit Trägerfrequenzfehler:



Originalsignal

Demodulation mit 250 Hz Frequenzversatz

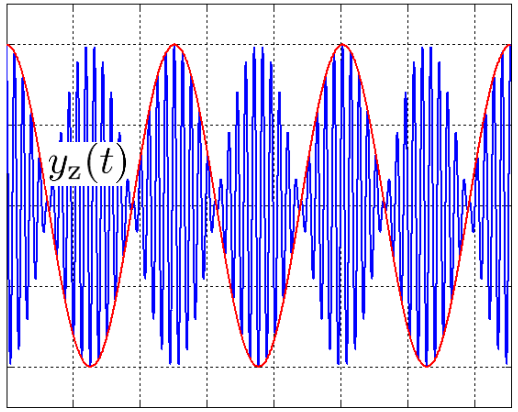
AM-Demodulation

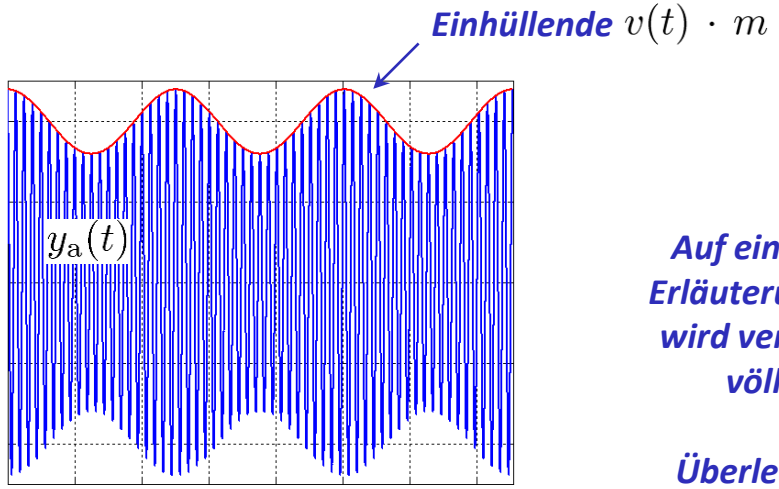
Ansatz :

Grundsätzlich ist eine Amplituden-Modulation eine Zweiseitenband-Modulation mit Träger, d.h. man benötigt eine Synchron-Demodulation wie bei der Zweiseitenband-Demodulation. Allerdings kann hier ein viel einfacherer Ansatz angewendet werden:

- Man kann ein amplituden-moduliertes Signal zunächst ***gleichrichten*** $x(t) = |y_\mathrm{a}(t)|$ und dann ***tiefpassfiltern*** (mit einem sehr einfachen Tiefpassfilter, zur Unterdrückung des Trägers [im einfachsten Fall: Diode und einfaches RC-Glied]).

Bespiel: $v(t) = \cos(\omega_v t)$ mit $\omega_v \ll \omega_\mathrm{T}$.





Auf eine entsprechende Erläuterung im Diskreten wird verzichtet, da diese völlig analog zu den kontinuierlichen Überlegungen verläuft.

Puls-Amplituden-Modulation – Teil 1

Ansatz – Teil 1:

Bei einer Amplituden-Modulation steckt die (Nutz-Signal-) Information in der momentanen Amplitude des Trägers.
Bei einer Puls-Amplituden-Modulation steckt die ***Information*** in den ***Momentangewichten der Trägerimpulse***.
Als „Trägersignal“ wird hier eine Impulsfolge

$$p(t) \quad = \quad T_\mathrm{A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_0(t - nT_\mathrm{A})$$

verwendet. Wie aus dem Transformationsteil der Vorlesung bekannt ist, gilt für das zugehörige Spektrum:

$$P(j\omega) \quad = \quad 2\pi \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \delta_0 \left(\omega - \mu \frac{2\pi}{T_\mathrm{A}} \right).$$

Zur Modulation wird das Nutzsignal $v_0(t)$ mit der Trägerimpulsfolge multipliziert:

$$y_\mathrm{p}(t) \quad = \quad v_0(t)\, p(t) \quad = \quad T_\mathrm{A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_0(t)\, \delta_0(t - nT_\mathrm{A})$$

… Ausblendeigenschaft der Impulsfunktion …

$$= \quad T_\mathrm{A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_0(nT_\mathrm{A})\, \delta_0(t - nT_\mathrm{A}).$$

Puls-Amplituden-Modulation – Teil 2

Ansatz – Teil 2:

Bezeichnet man das abgetastete Signal $v_0(nT_\mathrm{A})$ als $v(n)$, d.h. es gilt

$$\begin{aligned} y_\mathrm{p}(t) &= T_\mathrm{A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_0(nT_\mathrm{A})\, \delta_0(t - nT_\mathrm{A}) \\ &= T_\mathrm{A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} v(n)\, \delta_0(t - nT_\mathrm{A}), \end{aligned}$$

so ergibt sich der ***erste Schritt einer Analog-Digital-Wandlung*** (AD-Wandlung). $v(n)$ ist dabei als Folge von Abtastwerten, d.h. eine Zahlenfolge / diskretes Signal, zu verstehen.

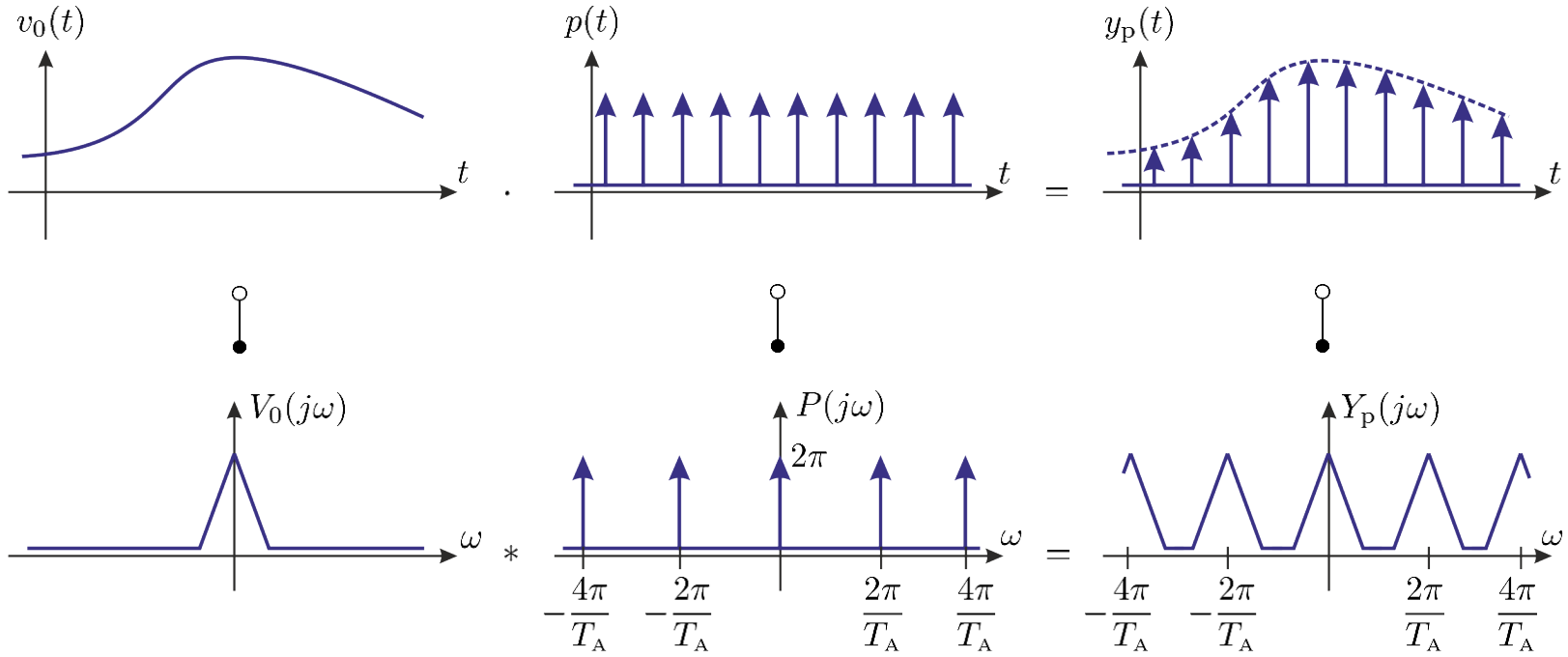
Die Multiplikation mit der Trägerimpulsfolge $p(t)$ entspricht einer Faltung im Spektralbereich mit $P(j\omega)$, welche wiederum eine Impulsfolge ist, d.h. es gilt für das ***Spektrum des puls-amplituden-modulierten Signals***:

$$Y_\mathrm{p}(j\omega) = T_\mathrm{A} \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} V_0\left(j(\omega - \mu\frac{2\pi}{T_\mathrm{A}})\right).$$

Puls-Amplituden-Modulation – Teil 3

Ansatz – Teil 3:

Graphische Veranschaulichung:



Puls-Amplituden-Modulation – Teil 4

Ansatz – Teil 4:

Offenbar bewirkt die Abtastung (mit der idealen Dirac-Impulsfolge) eine ***periodische Wiederholung des Spektrums*** mit der Periode

$$\omega_p \;=\; \frac{2\pi}{T_\mathrm{A}} \;=\; 2\pi\, f_\mathrm{A} \;=\; \omega_\mathrm{A},$$

also mit der Abtastfrequenz f_A .

Aufgrund der Periodizität kann auch ein ***Zusammenhang mit der Fourier-Transformation der Folge*** $v(n) \circ\!\!-\!\!\bullet\, V(e^{j\Omega})$ hergestellt werden. Hierbei gilt

$$V(e^{j\Omega}) \;=\; Y_\mathrm{p}(j\omega) \qquad \text{mit} \quad \Omega \;=\; \omega\, T_\mathrm{A} \;=\; \frac{\omega}{f_\mathrm{A}} \;=\; \frac{2\pi\, f}{f_\mathrm{A}}.$$

Abschließende Zusammenfassung

- Signale und Systeme – Einführung
- Signale
- Spektraldarstellungen determinierter Signale
- Lineare Systeme
- ***Modulation***
  - Grundlagen
  - Lineare Modulation
    - Zweiseitenband-Modulation
    - Einseitenband-Modulation
    - Amplituden-Modulation
    - Zweiseitenband-Demodulation
    - Einseitenband-Demodulation
    - Amplituden-Demodulation
    - Puls-Amplituden-Modulation und -Demodulation
    - Abtasttheorem