

Labor Nachrichtentechnik

Versuch 5:

Amplitudenmodulation

Modul/Unit-Nr. N3002.2

Kurs-Nr. TEL....GR....

Name der/s Studierenden:

-
- ☐ Laborausarbeitung in Ordnung.
 - ☐ Laborausarbeitung ungenügend.

Betreuer:

Ort/Datum:

Unterschrift:

I. Einführende Fragen

1. In welchem Zusammenhang stehen Effektivwert und Spitzenwert bei sinusförmigen Signalen?
2. Wie lauten die trigonometrischen Umformungen für
 - $\cos(\omega_1 t + \omega_2 t)$ und
 - $\cos \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t$?
3. Für ein Signal $x(t)$ sei das Fourierspektrum $X(\omega)$ bekannt:

$$x(t) \longleftrightarrow X(\omega)$$

Wie lautet das Fourierspektrum $X_M(\omega)$ für das Signal

$$x_M(t) = x(t) \cdot \cos \omega_0 t?$$

(Hinweis: $\cos \omega_0 t = (e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t})/2$.

Vgl. auch Verschiebungssatz der Fourier-Transformation.)

Wo liegt nach der Multiplikation mit $\cos \omega_0 t$ die Signalinformation von $x(t)$ auf der Frequenzachse?

II. Erläuterungen

1. Amplitudenmodulation

Bei der Amplitudenmodulation beeinflusst das modulierende Signal, das sogenannte Quellensignal $s(t)$ in linearer Weise die Amplitude A_c eines sinusförmig verlaufenden Trägersignals

$$c(t) = A_c \cos \omega_c t$$

und zwar in der Form, daß für das modulierte Signal $m(t)$ gilt:

$$m(t) = A_c [1 + \mu_M s_n(t)] \cos \omega_c t .$$

Hierbei ist $s_n(t)$ das normierte, auf seinen Maximalwert

$$s_{\max} = \max |s(t)|$$

bezogene Quellensignal und μ_M der Modulationsgrad:

$$\mu_M = \frac{\text{Maximalwert von } s(t)}{\text{Amplitude des unmodulierten Trägers}} = \frac{s_{\max}}{A_c} .$$

Um aus dem modulierten Signal $m(t)$ durch Demodulation das Quellensignal $s(t)$ eindeutig zurückgewinnen zu können, muß für den Modulationsgrad gelten:

$$0 \leq \mu_M < 1 .$$

Für den einfachsten Sonderfall des sinusförmig verlaufenden Quellensignals

$$s(t) = A_s \cos \omega_s t$$

gilt

$$\begin{aligned} m(t) &= A_c [1 + \mu_M \cos \omega_s t] \cos \omega_c t ; \mu_M = \frac{A_s}{A_c} < 1 \\ &= A_c \cos \omega_c t + \frac{1}{2} \mu_M A_c \cos(\omega_c + \omega_s)t + \frac{1}{2} \mu_M A_c \cos(\omega_c - \omega_s)t \end{aligned}$$

Das modulierte Signal setzt sich also aus drei Teilschwingungen zusammen:

- Trägerschwingung $A_c \cos \omega_c t$
- untere Seitenbandschwingung $\frac{1}{2} \mu_M A_c \cos(\omega_c - \omega_s)t$
- obere Seitenbandschwingung $\frac{1}{2} \mu_M A_c \cos(\omega_c + \omega_s)t$

Der Zeitverlauf von $m(t)$ ist in Bild 1a dargestellt.

Im Zeigerdiagramm kann man die Trägerschwingung $A_c \cos \omega_c t$ durch die Projektion eines gleichförmig mit der Winkelgeschwindigkeit ω_c rotierenden Zeigers der Länge A_c auf die reelle Achse beschreiben (Bild 1b). Die zur Amplitudenmodulation erforderliche periodische Längenänderung dieses Zeigers läßt sich durch zwei weitere, an seiner Spitze angesetzte Zeiger der Länge $\frac{1}{2} \mu_M A_c$ beschreiben. Sie müssen bezüglich des A_c -Zeigers mit der Winkelgeschwindigkeit ω_s und mit solcher Phase gegenläufig zueinander rotieren, daß ihre Resultierende in jedem Augenblick die Richtung des A_c -Zeigers hat. Aus dieser Beschreibungsweise geht also unmittelbar hervor, daß die sinusförmig amplitudenmodulierte Schwingung in drei Teilschwingungen, die Trägerschwingung und zwei Seitenschwingungen, zerlegbar ist.

Das Spektrum des amplitudenmodulierten Signals $m(t)$ ist in Bild 1c angegeben. Ist das Quellensignal nicht sinusförmig, so treten im Spektrum anstelle der einen oberen und der einen unteren Seitenfrequenz Seitenbänder mit der dem Quellensignal entsprechenden spektralen Zusammensetzung auf.

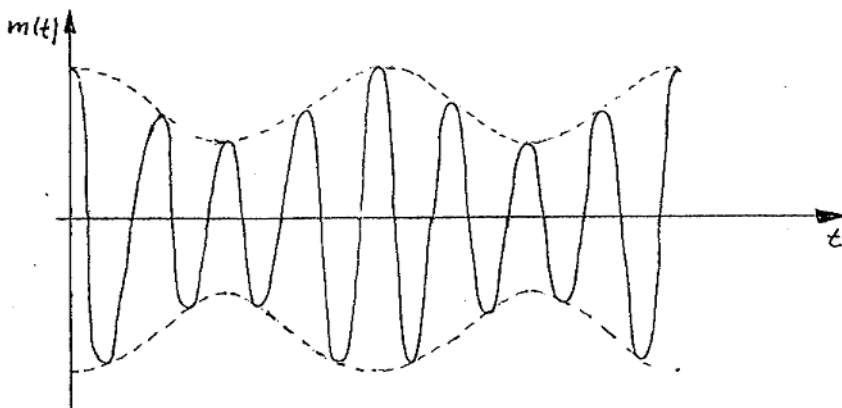


Bild 1a

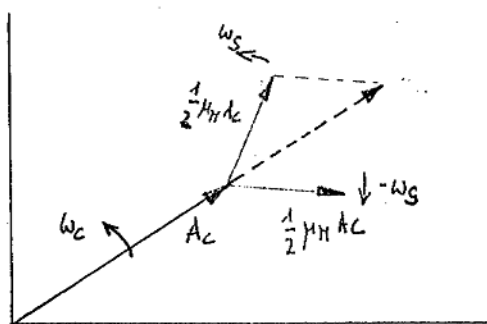


Bild 1b

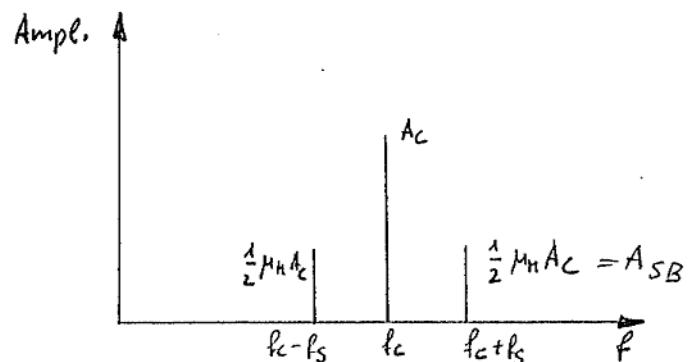


Bild 1c

Die im Prinzip einfachste Verwirklichung von $m(t)$ nach Bild 1a erhält man mit der Schaltung aus Bild 1d. Sie ist gleichzeitig aber die

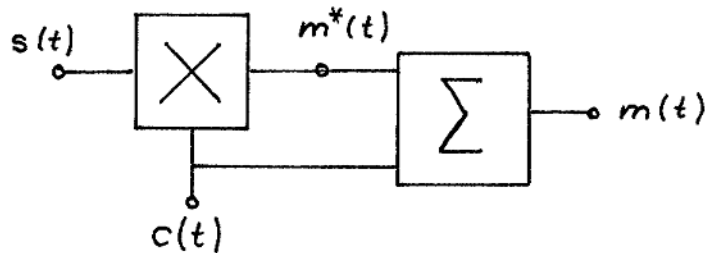


Bild 1d

schaltungstechnisch aufwendigste, weil sie eine Multiplizierschaltung enthält. Sie erzeugt das Signal $m^*(t)$, das aus den beiden Seitenbandsignalen besteht und bei der Zweiseitenbandmodulation verwendet wird. Zu ihm wird das Trägersignal addiert, so daß $m(t)$ nach Definition entsteht.

Multiplikation ist ein nichtlinearer Prozeß. Will man die Modulatorschaltung vereinfachen, benötigt man daher mindestens ein nichtlineares Schaltelement. Die Kennlinie $u_A = f(u_E)$ eines

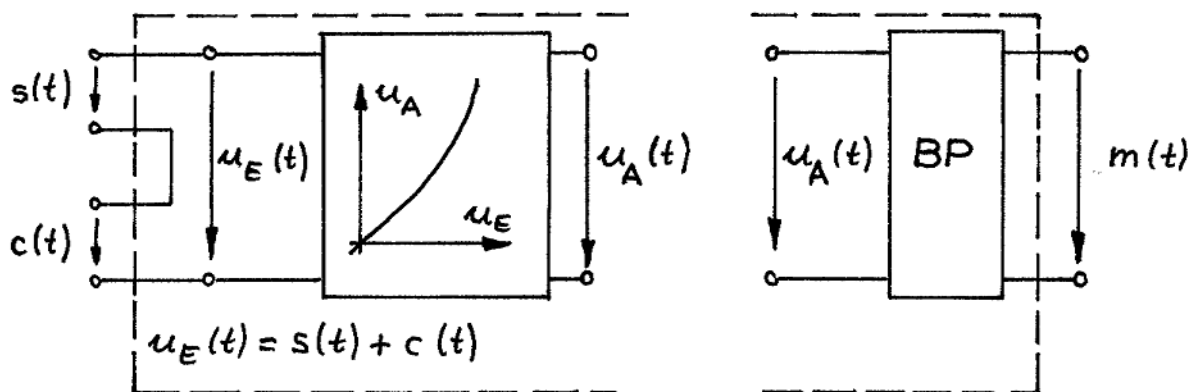


Bild 2a

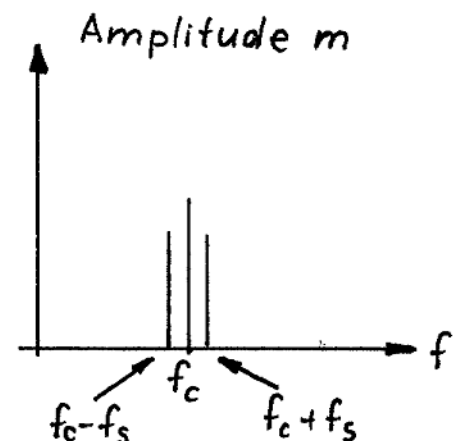
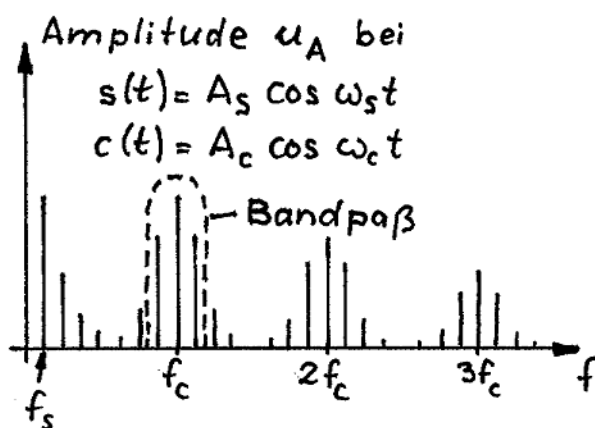


Bild 2b

solchen Elements läßt sich durch eine Potenzreihe annähern:

$$u_A = c_1 u_E + c_2 u_E^2 + c_3 u_E^3 + \dots + c_n u_E^n + \dots (*)$$

Eine Untersuchung des Spektrums von $u_A(t)$ bei sinusförmigem Quellen- und Trägersignal zeigt, daß im allgemeinen Fall ein Gemisch mit sämtlichen Teilschwingungen von $s(t)$ und $c(t)$ und allen Kombinationsfrequenzen entsteht:

	f_s	$2f_s$	$3f_s$	
f_c	$f_c + f_s$	$f_c + 2f_s$	$f_c + 3f_s$	
$2f_c$	$2f_c + f_s$	$2f_c + 2f_s$	$2f_c + 3f_s$	
$3f_c$	$3f_c + f_s$	$3f_c + 2f_s$	$3f_c + 3f_s$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	

Daher liefert erst ein nachgeschalteter Bandpaß das gewünschte Signal $m(t)$.

Aufgabe 1

Die nichtlineare Kennlinie $u_A = f(u_E)$ lasse sich beschreiben durch

$$u_A = c_1 u_E + c_2 u_E^2$$

a) Wie lautet das Ausgangssignal $u_A(t)$ für

$$u_E(t) = s(t) + A \cos \omega_c t ?$$

b) Gibt es unerwünschte Signalanteile, die mit einem Bandpaß entfernt werden müssen? Wenn ja, welche?

c) Wie lautet $m(t)$ in Abhängigkeit von c_1 und c_2 ? Wie groß ist die Trägeramplitude A_c , wie groß der Modulationsgrad μ_M für $|s|_{\max} = S$?

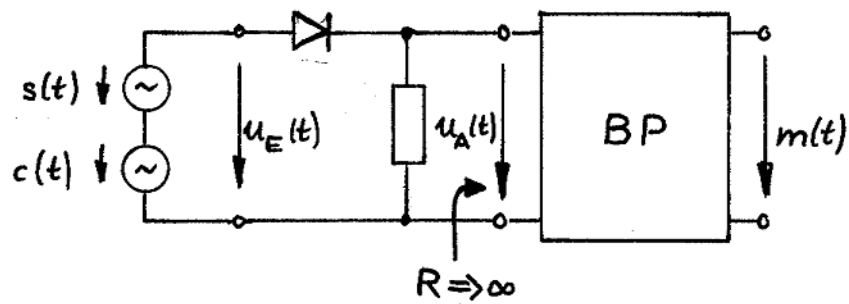


Bild 3a

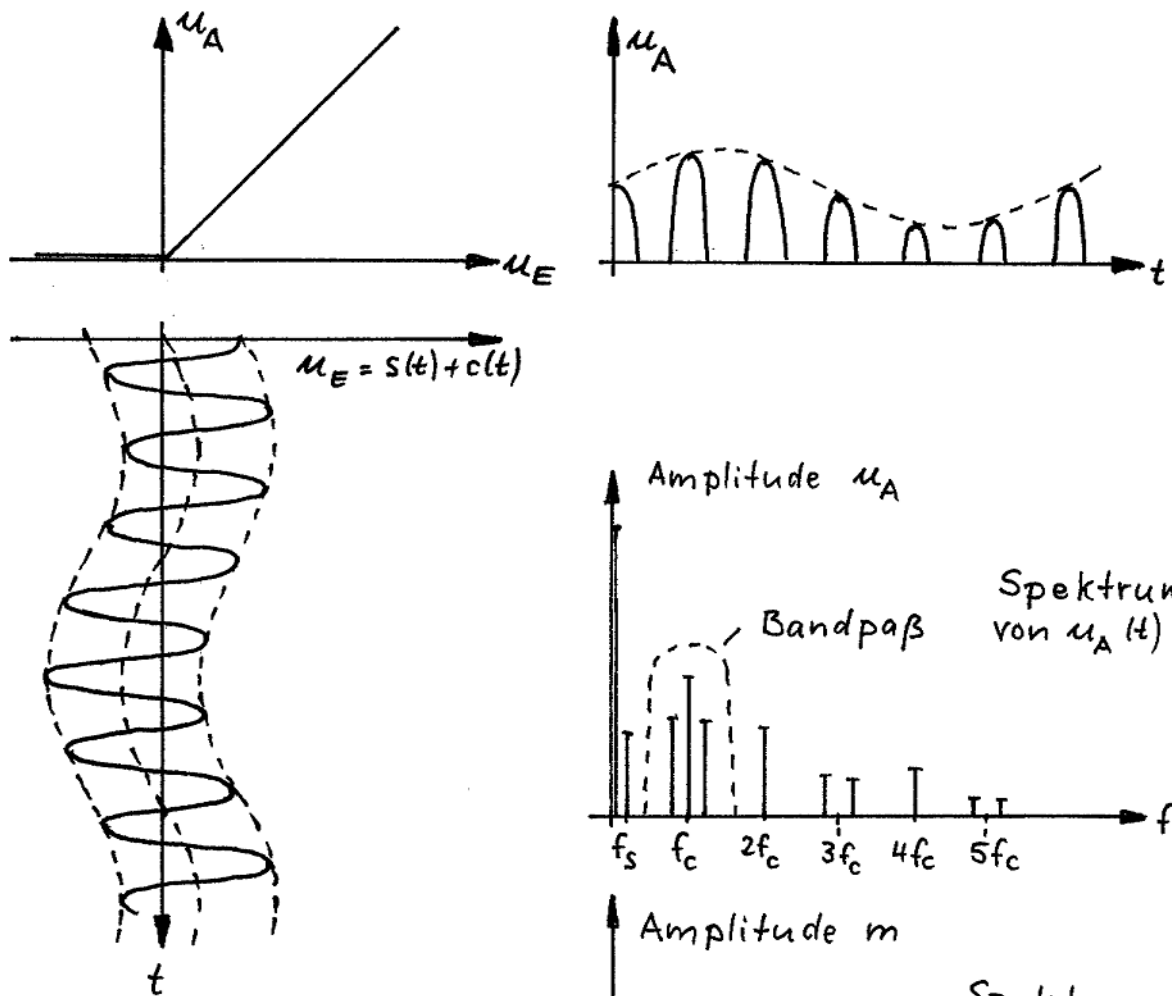
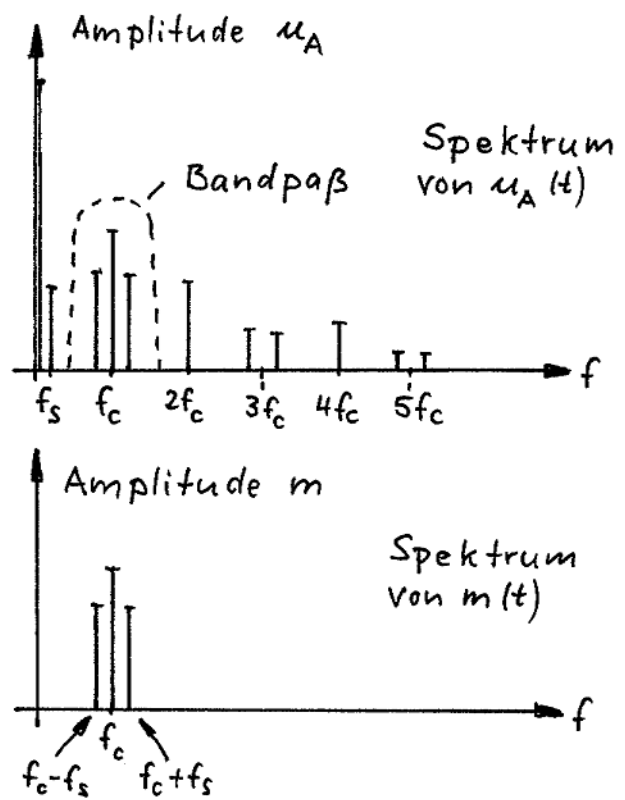


Bild 3b



Eine spezielle Form der Nichtlinearität ist der gesteuerte Schalter; seine einfachste Ausführung ist die stark angesteuerte Diode (Bild 3a). Die Wirkungsweise ist aus Bild 3b ersichtlich; Kernstück ist die Knickkennlinie $u_A = f(u_E)$.

Das Spektrum läßt sich ohne große Schwierigkeit auf ähnliche Weise berechnen, wie sie später in Aufgabe 2d für den Ringmodulator beschrieben ist. Die Ergebnisskizze in Bild 3b zeigt, daß wiederum unerwünschte Spektralanteile auftreten, die durch einen Bandpaß entfernt werden müssen.

Die Unterdrückung unerwünschter Signalanteile stellt hohe Forderungen an die Selektivität des Bandpasses. Daher werden Schaltungen bevorzugt, welche die Vielfalt der Spektrallinien klein halten: Ringmodulator (Bild 4) und aktiver Modulator (Beispiel: Bild 5).

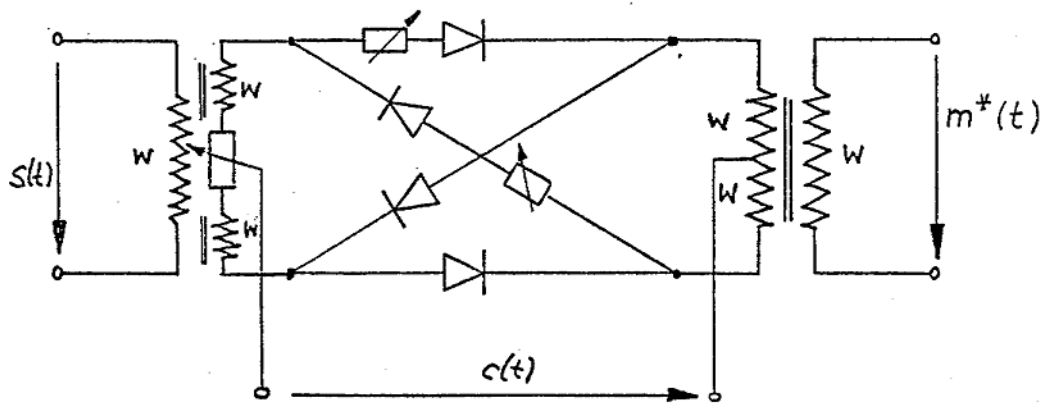


Bild 4

Bei Ringmodulatoren treten in der Ausgangsspannung nur die Seitenbandschwingungen auf, nicht aber Träger- und Quellsignal. Voraussetzungen sind allerdings eine genaue Symmetrie der Übertrager und eine Übereinstimmung der Diodenkennlinien. Um dies in der Praxis zu erreichen, werden Abgleichwiderstände verwendet.

Aufgabe 2

Beim Ringmodulator nach Bild 4 seien

$$s(t) = A_s \cos \omega_s t$$

$$c(t) = A_c \cos \omega_c t \quad ; \quad \text{mit} \quad A_c \gg A_s$$

a) Welche Funktion haben die Dioden?

Erläutern Sie kurz die Funktionsweise der Schaltung.

b) Wie sieht, unter Voraussetzung idealer Dioden, ein Ersatzschaltbild des Ringmodulators aus, das Schalter statt Dioden enthält?

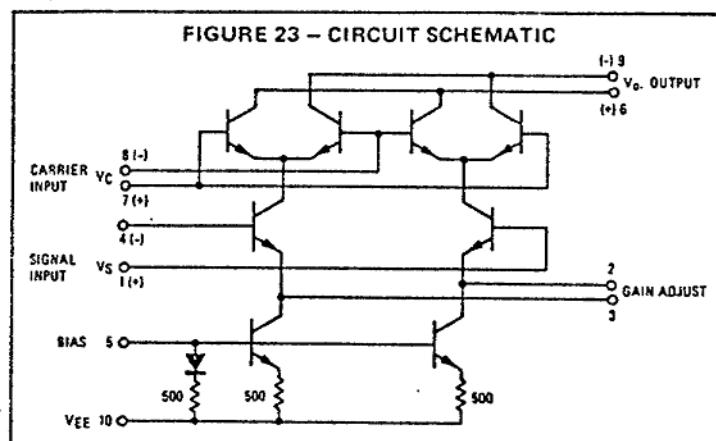
c) Skizzieren Sie $m^*(t)$, wie es bei der Ersatzschaltung in b) entsteht.

d) $m^*(t)$ aus c) läßt sich beschreiben durch ein Rechtecksignal $r(t)$ multipliziert mit $s(t)$. Welches Fourierspektrum gehört zu $m^*(t)$? Zur Berechnung verwende man die Fourierreihe zu $r(t)$.

$$\text{(Beachte: } \cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos (\alpha - \beta) + \cos (\alpha + \beta)] \text{)}$$

e) Was fällt gegenüber den bisher bekannten Spektren auf? Wie entsteht aus $m^*(t)$ in d) das $m(t)$ auf Seite 2? Geben Sie dazu eine (sehr einfache) Schaltung an.

Bild 5 zeigt einen "Doppel-Gegentakt-Modulator" als integrierte Schaltung. Sie muß nur durch wenige passive Bauelemente ergänzt werden, damit ein aktiver Zweiseitenbandmodulator, vergleichbar dem Ringmodulator, entsteht.



Motorola MC 1496

Bild 5

Charakteristische Größen eines Amplitudenmodulators sind die statische und die dynamische Modulationskennlinie.

Gemäß der grundlegenden Beziehung

$$m(t) = A_c [1 + \mu_M s_n(t)] \cos \omega_c t.$$

hängt die (veränderliche) Amplitude von $m(t)$ linear vom Quellsignal $s(t)$ ab:

$$A_m = A_c [1 + \mu_M s_n(t)] \sim s(t).$$

Durch die Forderung $\mu_M < 1$ ist sichergestellt, daß die Amplitude stets positiv ist. Durch reale Modulatorschaltungen kann man nun erreichen, daß für einen gewissen Wertebereich von $|s(t)| \leq s_0$ die Amplitude linear von $s(t)$ abhängt, für größere Werte $|s(t)| > s_0$ dagegen nicht mehr. Den Verlauf der Amplitude von $m(t)$ als Funktion des Quellsignals $s(t)$ bezeichnet man als statische Modulationskennlinie (Bild 6a).

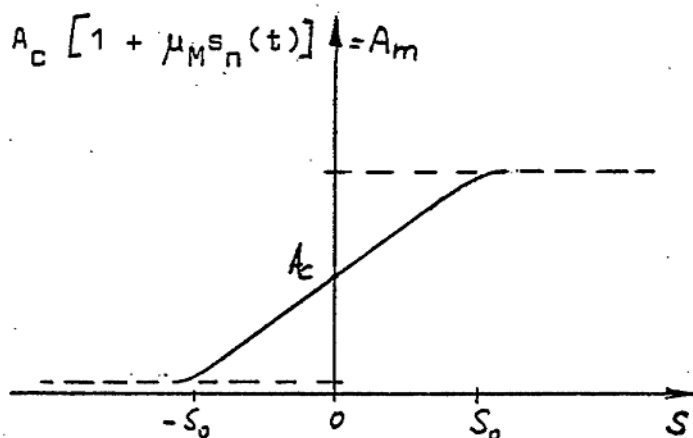


Bild 6a

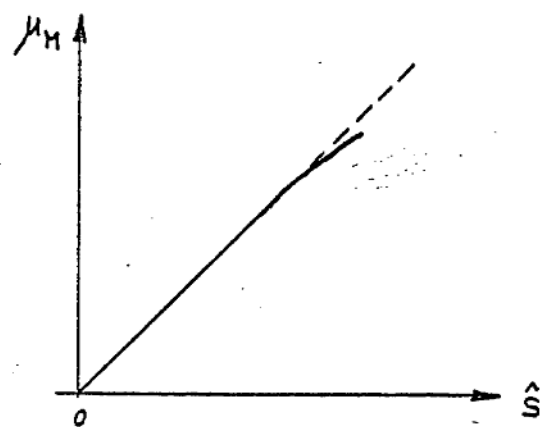


Bild 6b

Aus Aufgabe 1 und Bild 3 läßt sich ableiten (Angabe ohne Beweis): Ein Modulator hat dann eine lineare Modulationskennlinie, wenn die erzeugende Kennlinie des nichtlinearen Gliedes, die sogenannte Modulierkennlinie, eine quadratische Potenzkennlinie oder eine geradlinig-geknickte Kennlinie ist.

Den Zusammenhang zwischen der Amplitude $\hat{s}$ des Quellsignals und dem erreichten Modulationsgrad μ_M bezeichnet man als dynamische Modulationskennlinie (Bild 6b). Der Modulationsgrad steigt line-

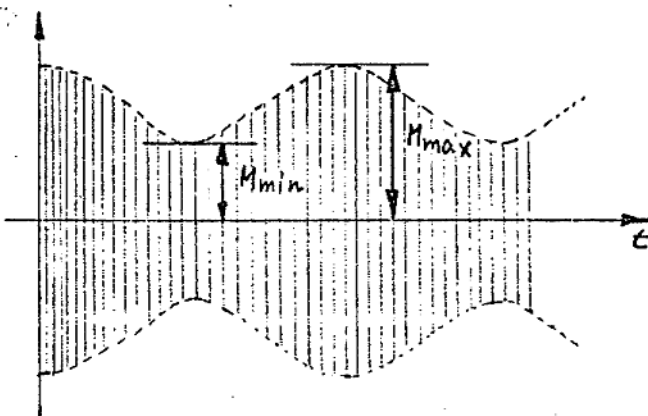
ar mit zunehmender Amplitude $\hat{s}$ an, weicht dann allerdings bei größeren Werten $\hat{s}$ immer mehr von diesem gewünschten linearen Verlauf ab.

2. Meßverfahren

2.1 Messung des Modulationsgrades

Da der maximale Modulationsgrad die zulässige Aussteuerung und damit die Spitzenbelastung eines amplitudenmodulierten Senders bestimmt, ist seine Messung von besonderer Wichtigkeit. Es gibt eine ganze Reihe von Meßverfahren, von denen drei kurz beschrieben werden sollen.

Aus der Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines amplitudenmodulierten Signals mit Hilfe eines Oszilloskops läßt sich leicht der Modulationsgrad entnehmen.



$$\begin{aligned} s(t) &= A_s \cos \omega_s t \\ c(t) &= A_c \cos \omega_c t \\ m(t) &= \\ &= A_c (1 + \mu_M \cos \omega_s t) \cos \omega_c t \\ \mu_M &= \frac{A_s}{A_c} \end{aligned}$$

Bild 7

Aus Bild 7 entnimmt man:

$$M_{\max} = A_c (1 + \mu_M)$$

$$M_{\min} = A_c (1 - \mu_M)$$

Damit berechnet sich der Modulationsgrad μ_M zu

$$\mu_M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max} + M_{\min}}$$

Bei kleineren Modulationsgraden wird dies Verfahren relativ ungenau. Genauere Ergebnisse erhält man hier aus dem Spektrum eines

amplitudenmodulierten Signals (s. Bild 1c). Ist A_{SB} die Amplitude eines Seitenbandes und A_C die Amplitude des Trägers im Spektrum, so erhält man hieraus den Modulationsgrad zu

$$\mu_M = 2 \frac{A_{SB}}{A_C} .$$

Insbesondere zur Kontrolle eines sich ständig ändernden Modulationsgrades ist das sogenannte "Modulationstrapez" geeignet. Legt man gemäß Bild 8 an die Vertikalablenkung eines Oszilloskops das amplitudenmodulierte Signal $m(t)$ und an die Horizontalablenkung das Quellensignal $s(t)$, so entsteht auf dem Bildschirm, vorausgesetzt, daß keine Phasenverschiebung zwischen der Umhüllenden des modulierten Signals und dem Quellensignal vorliegt, ein Trapez (s. Bild 8) mit den Seiten $a = 2 A_C (1 - \mu_M)$ und $b = 2 A_C (1 + \mu_M)$.

Damit ergibt sich der Modulationsgrad zu:

$$\mu_M = \frac{b - a}{b + a}$$

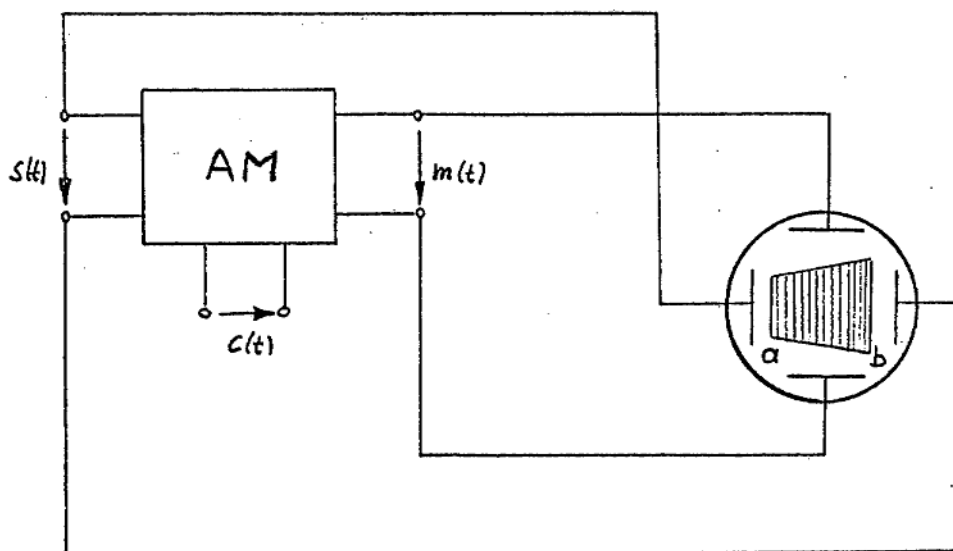


Bild 8

Aufgabe 3

Wie sieht das Modulationstrapez aus, wenn der Modulationsgrad $\mu_M = 1$ beträgt bzw. Übermodulation $\mu_M > 1$ vorliegt?

2.2 Messung der statischen und dynamischen Modulationskennlinie

Die statische Modulationskennlinie wird gemessen, indem man an den Modulator den Träger anlegt und anstelle des Quellensignals eine Gleichspannung. Nun wird die Amplitude des modulierten Signals als Funktion der anliegenden Gleichspannung gemessen und aufgetragen.

Zur Ermittlung der dynamischen Modulationskennlinie, bei der der Modulator mit Träger und Quellensignal betrieben wird, genügt es, mit einem selektiven Voltmeter oder mit einem Spektralanalysator die Amplitude einer Seitenbandschwingung als Funktion der Amplitude des Quellensignals zu messen.

2.3. Messung der Modulationsverzerrungen

Über das bereits beschriebene Modulationstrapez kann auf einfache Weise auch eine Kontrolle der Linearität des Amplitudenmodulators vorgenommen werden. Dazu wird ein Zweistrahloszilloskop benötigt. Es wird, wie beschrieben, das Modulationstrapez auf dem Bildschirm dargestellt. Auf den zweiten Vertikalkanal des Oszilloskops wird das Quellensignal $s(t)$ gegeben, das ja auch bereits an der Horizontalablenkung anliegt. Durch entsprechende Verstärkereinstellung erhält man einen schräg verlaufenden Strich (s. Bild 9a), der sich mit der oberen Begrenzung des Modulationstrapezes decken müßte. Eine Abweichung von der linearen Modulationskennlinie ist deutlich zu erkennen. Eine Linearitätskontrolle kann auch erfolgen, indem das modulierte Signal und das Quellensignal gleichzeitig als Zeitfunktionen mit einem Zweistrahloszilloskop dargestellt werden (s. Bild 9b).

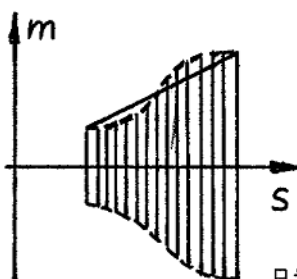


Bild 9a

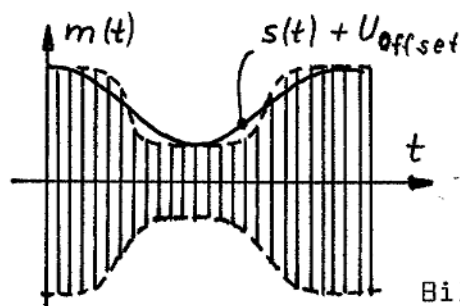


Bild 9b

III. Laborübungen

1. Modulation mit analoger Multipliziererschaltung

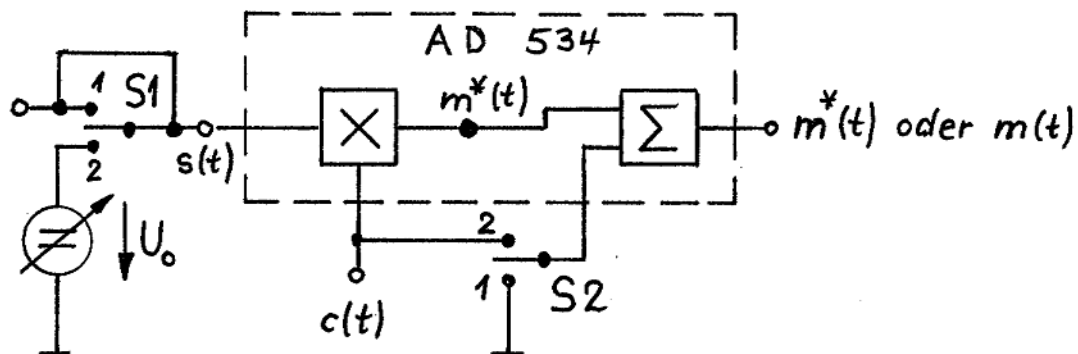


Bild 10

An die Eingänge der Schaltung in Bild 10 lege man die Signale

$$c(t) = A_c \cos \omega_c t \text{ mit } A_c = 500 \text{ mV}, \omega_c = 2\pi \cdot 10 \text{ kHz}$$

$$s(t) = A_s \cos \omega_s t \text{ mit } A_s = 200 \text{ mV}, \omega_s = 2\pi \cdot 1,25 \text{ kHz}$$

(Schalter S1 in Stellung 1)

- Man beobachte die Signale $s(t)$, $c(t)$, $m^*(t)$ (Schalter S2 in Stellung 1) und $m(t)$ (Schalter S2 in Stellung 2) am Oszilloscope und skizziere sie. Wie ändert sich $m(t)$ für $A_s = A_c = 500 \text{ mV}$ und $A_s > A_c = 500 \text{ mV}$?
- Man messe die Amplitudenspektren von $m^*(t)$ und $m(t)$ und skizziere die Ergebnisse. Worin besteht der Unterschied? $m^*(t)$ heißt "Zweiseitenbandsignal". Warum?
- Man messe die statische Modulationskennlinie $A_m = f(s)$ im Bereich $-500 \text{ mV} \leq s \leq 500 \text{ mV}$. Dazu ersetze man die Wechselspannungsquelle für $s(t)$ durch die einstellbare Gleichspannungsquelle U_0 (Schalter S1 in Stellung 2). Bei A_m , der Amplitude von $m(t)$, interessiert (für den Fall von Verzerrungen)

nur die Grundschiwingung mit der Frequenz $f_c = 10 \text{ kHz}$, weshalb ein selektives Voltmeter einzusetzen ist.

- d) Man messe die dynamische Modulationskennlinie $\mu_M = f(\hat{s})$. Dazu verbinde man den Eingang $s(t)$ wieder mit der Wechselspannungsquelle

$$s(t) = A_s \cos \omega_s t \quad \text{mit} \quad \omega_s = 2\pi \cdot 1,25 \text{ kHz}$$

(Schalter S1 in Stellung 1)

Es gilt nun $\hat{s} = A_s$ und $\mu_M = f(A_s)$. Welche Signale geben in ihrer Amplitude den Modulationsgrad wieder? Zur Auswahl stehen Signale mit den Frequenzen

$$f_c = 10 \text{ kHz}$$

$$f_c - f_s = 8,75 \text{ kHz}$$

$$f_c + f_s = 11,25 \text{ kHz}$$

Zur Messung steht wiederum ein selektives Voltmeter zur Verfügung.

- e) Man stelle das Modulationstrapez für die Modulationsgrade

$$\mu_M = 0,5 ; 1 ; 1,5$$

auf dem Bildschirm des Oszillographen dar und skizziere die entstehenden Bilder. Wie sehen die zugehörigen Oszillogramme von $m(t)$ aus?

2. Modulation mit nichtlinearer Kennlinie (Diode)

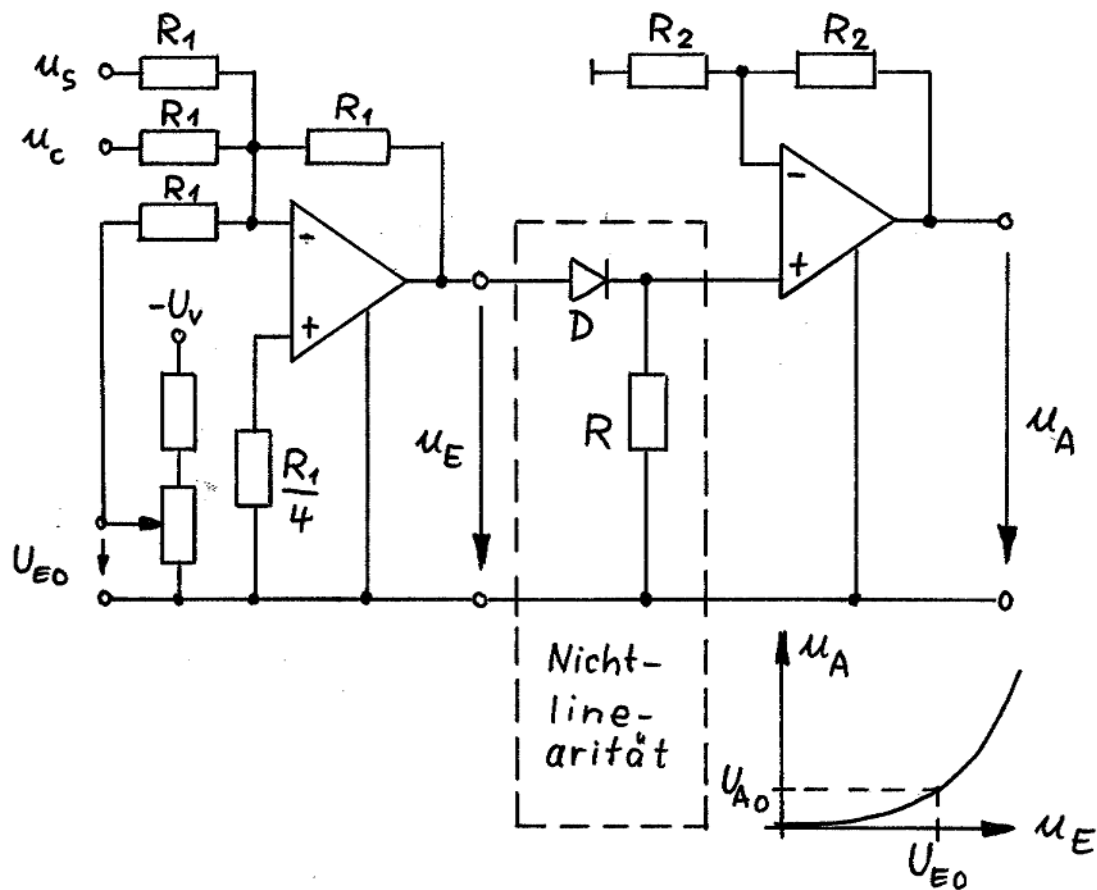


Bild 11

An die Eingänge der Schaltung in Bild 11 lege man die Signale

$$c(t) = A_c \cos \omega_c t \quad \text{mit} \quad A_c = 150 \text{ mV}, \quad \omega_c = 2\pi \cdot 10 \text{ kHz}$$

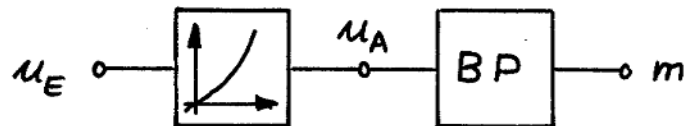
$$s(t) = A_s \cos \omega_s t \quad \text{mit} \quad A_s = 50 \text{ mV}, \quad \omega_s = 2\pi \cdot 1,25 \text{ kHz}$$

- Wie setzt sich $u_E(t)$ aus u_s , u_c und U_{E0} zusammen?
- Am Oszillographenschirm bilde man in x/y-Darstellung die nicht-lineare Kennlinie $u_A = f(u_E)$ ab.
Welchem Zweck dient in Bild 11 die Gleichspannung U_{E0} ?
- Man betrachte die Signale $u_E(t)$ und $u_A(t)$ und skizziere sie.
Worin besteht der Unterschied?

- d) Man messe die Amplitudenspektren von $u_E(t)$ und $u_A(t)$ und skizziere die Ergebnisse.

Bei welchem Signal ist die Information, die z.B. in der Amplitude A_S von $s(t)$ liegen könnte, in der Frequenzachse verschoben?

- e) Mit Hilfe eines Bandpasses läßt sich das amplitudenmodulierte Signal $m(t)$ gewinnen.



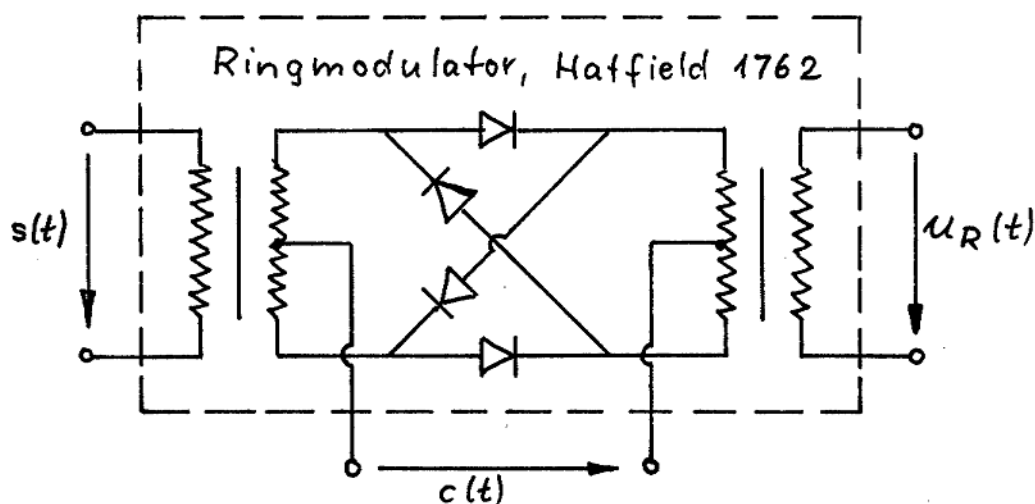
Man überzeuge sich davon durch die Wahl geeigneter Grenzfrequenzen des Bandpasses und Kontrolle des Ergebnisses am Oszilloskop und am Spektrumanalysator.

- f) Man wähle für die Signale $s(t)$ und $c(t)$ die neuen Amplituden

$$A_c = 3V ; A_s = 1V$$

und beobachte die Kennlinie $u_A = f(u_E)$ (Knickkennlinie), $u_A(t)$ und das Amplitudenspektrum mit und ohne Bandpaß. (Vgl. dazu Bild 3b)

3. Modulation mit dem Ringmodulator



An die Eingänge des Ringmodulators lege man die Signale

$$c(t) = A_c \cos \omega_c t \quad \text{mit} \quad A_c = 150 \text{ mV}, \quad \omega_c = 2\pi \cdot 10 \text{ kHz}$$

$$s(t) = A_s \cos \omega_s t \quad \text{mit} \quad A_s = 50 \text{ mV}, \quad \omega_s = 2\pi \cdot 1,25 \text{ kHz}$$

- a) Man beobachte die Signale $s(t)$, $c(t)$ und das Ausgangssignal $u_R(t)$. Welchem der bisher bekannten Signale gleicht $u_R(t)$? Welches Spektrum ist für $u_R(t)$ zu erwarten? Man überprüfe die Antwort am Spektrumanalysator.
- b) $u_R(t)$ ist ein Zweiseitenbandsignal. Wie ist aus $u_R(t)$ ein amplitudenmoduliertes Signal $m(t)$ zu bekommen? Man stelle dieses Signal her und kontrolliere das Ergebnis am Bildschirm des Oszilloskops.