

Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen

1. Einführung

Um mit einer sich im Raum ausbreitenden elektromagnetischen Welle Informationen von einem Ort zu einem anderen übertragen zu können, bedarf es der **Modulation** dieser Welle. Darunter versteht man eine Veränderung der Amplitude, der Frequenz oder auch der Phase der Welle im Rhythmus des Nachrichtensignals. Am Empfangsort muss die Information durch sogenannte **Demodulationsverfahren** aus der modulierten Welle wieder zurückgewonnen werden.

Man hat nun in der Hochfrequenztechnik eine Reihe von Modulationsverfahren entwickelt, die den Anforderungen, die man bei der technischen Anwendung an diese stellt, wie Störsicherheit, Wirkungsgrad, Verzerrungsfreiheit und Breite des Frequenzspektrums, in unterschiedlichem Maße gerecht werden. Die Vielfalt der Modulationsverfahren kann man grob in 2 Klassen einteilen: Amplitudenmodulation und (Phasen)-winkelmodulation. Zu beiden sollen im folgenden Beispiele behandelt werden.

2. Amplitudenmodulation

Bei der einfachsten Form der Amplitudenmodulation führt die Amplitude einer hochfrequenten Trägerschwingung $U_T(t)$ Schwankungen im Rhythmus eines niederfrequenten Modulationssignals $U_M(t)$ aus. Es seien ω_T die Kreisfrequenz und \hat{U}_T die Amplitude der Trägerschwingung, sowie ω_m und \hat{U}_M die Kreisfrequenz und Amplitude der Modulationsschwingung; dann lassen sich $U_T(t)$ und $U_M(t)$ darstellen als

$$U_T(t) = \hat{U}_T \cos \omega_T t \quad \text{ sowie } \quad U_M(t) = \hat{U}_M \cos \omega_M t .$$

Die amplitudenmodulierte Schwingung soll dann die Zeitabhängigkeit

$$(1) \quad U_3(t) = \hat{U}_T (1 + m \cos \omega_M t) \cos \omega_T t$$

besitzen. Die Größe m in (1) ist durch die Amplitude der Modulationsschwingung festgelegt:

$$m = \gamma \hat{U}_M .$$

Man nennt sie den **Modulationsgrad**. Ihr Wert kann zwischen 0 und 1 liegen. Die Amplitude der modulierten Schwingung schwankt daher zwischen den Extremwerten

$$\hat{U}_T(1 - m) \quad \text{ und } \quad \hat{U}_T(1 + m) .$$

Abb.1 möge den Zusammenhang zwischen U_3 und t veranschaulichen.

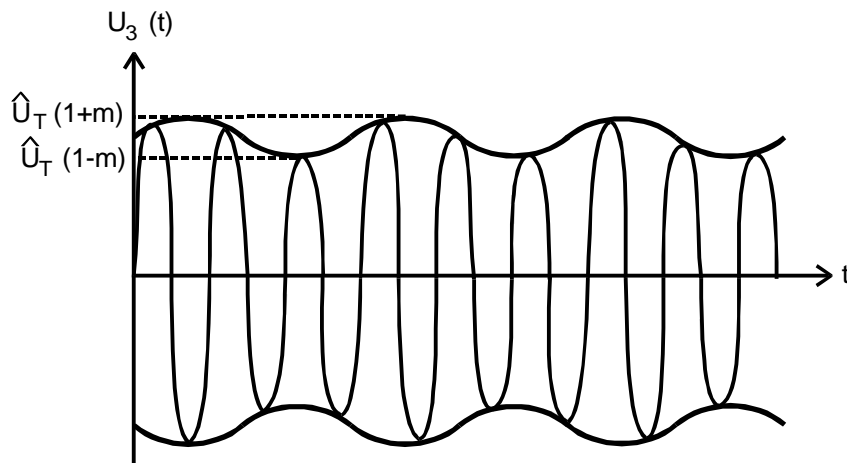


Abb.1: Zeitabhängigkeit der Momentanspannung U_3 bei einer gemäß (1) amplitudenmodulierten Schwingung

Gleichung (1) lässt sich mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen umformen in

$$(2) \quad U_3(t) = \hat{U}_T \left\{ \cos \omega_T t + \frac{1}{2} m \cos(\omega_T + \omega_M) t + \frac{1}{2} m \cos(\omega_T - \omega_M) t \right\} .$$

Man erkennt an (2), dass das Frequenzspektrum einer gemäß (1) amplitudenmodulierten Schwingung aus 3 Linien mit den Kreisfrequenzen $\omega_T + \omega_M$, ω_T und $\omega_T - \omega_M$ besteht. Ein Beispiel hierfür ist in Abb.2 wiedergegeben.

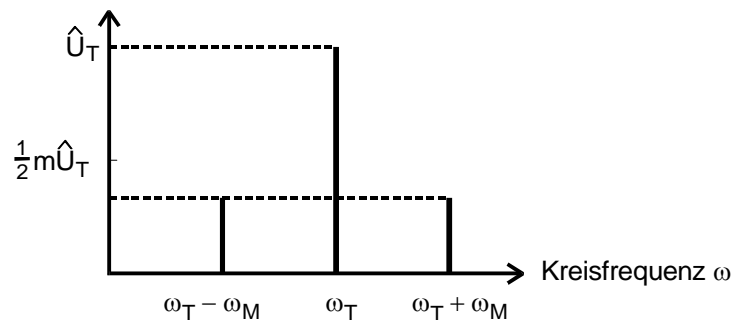


Abb.2 Frequenzspektrum einer gemäß (1) amplitudenmodulierten Schwingung

Enthält die Modulationsspannung U_M eine Reihe verschiedener Frequenzen, wie es zum Beispiel bei der Übertragung von Musik oder Sprache der Fall ist, dann verbreitern sich die beiden äußeren Linien in Abb. 2 zu „Frequenzbändern“. Man entnimmt weiterhin der Gleichung (2), dass die mittlere Linie des Frequenzspektrums keinerlei Information überträgt, da sie nicht von U_M abhängt. Man hat sich daher in der Praxis bemüht, bei der Amplitudenmodulation die „Trägerabstrahlung“ zu unterdrücken, da diese mit einem unnötigen Energieverbrauch verbunden ist. Das gelingt mit speziellen Modulationsverfahren. Ein Beispiel dazu wird in Kap. 4 vorgestellt.

Um den Frequenzbereich, den man für die Übertragung von Information benötigt, einzuschränken, kann man (mit Hilfe eines passenden Bandfilters) eines der beiden „Seitenbänder“ (Abb. 2) unterdrücken, denn die komplette Information ($U_M(t)$) steckt bereits in einem Seitenband. Die Realisierung dieser Modulationstechnik bezeichnet man als **Einseitenbandmodulation**.

Nachteile der Amplitudenmodulation sind insbesondere ihre geringe Störsicherheit und ihre geringe Verzerrungsfreiheit. Zu den Modulationsarten, die diese Nachteile weitge-

hend vermeiden, gehört insbesondere die **Frequenzmodulation**. Sie wird im nächsten Kapitel näher beschrieben.

3. Frequenzmodulation

Eine frequenzmodulierte Schwingung ist durch Variation ihrer momentanen Schwingungsfrequenz im Rhythmus des Modulationssignales gekennzeichnet, während ihre Amplitude konstant bleibt. Man kann sie darstellen durch die Gleichung

$$(3) \quad U(t) = \hat{U} \sin \left(\omega_T t + m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) .$$

Hieraus ergibt sich ihre Momentanfrequenz f durch Differentiation des Arguments der Sinusfunktion zu

$$f(t) = \frac{\omega_T}{2\pi} (1 - m \sin \omega_M t) .$$

m ist wiederum der Modulationsgrad; er ist gegeben durch die Amplitude der Modulationsspannung. Die Größe $m\omega_T/2\pi$ nennt man den **Frequenzhub**. Er gibt die Variationsbreite der Schwingungsfrequenz an. Ein Beispiel für eine frequenzmodulierte Schwingung ist in Abb. 3 dargestellt. Im folgenden soll nur der Fall des niedrigen Frequenzhubes, die sogenannte **Schmalband-Frequenzmodulation**, näher betrachtet werden, das heißt, es sei

$$m \frac{\omega_T}{\omega_M} \ll 1 .$$

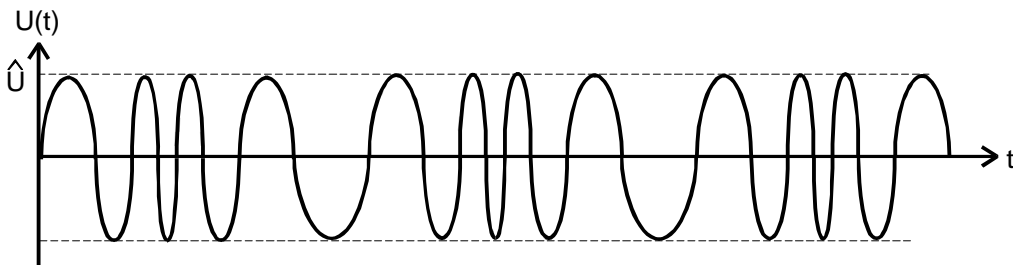


Abb.3: Zeitlicher Verlauf einer sinusförmig frequenzmodulierten Schwingung

Man kann zeigen, dass das Frequenzspektrum bei dieser Modulationsart ebenfalls recht einfach ist. Zu diesem Zweck formt man (3) gemäß

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$$

um in

$$(4) \quad U(t) = \hat{U} \left\{ \sin \omega_T t \cos \left(m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) + \cos \omega_T t \sin \left(m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) \right\} .$$

Hier wird für die Glieder, die den Ausdruck $m\omega_T/\omega_M \ll 1$ enthalten, folgende Näherung angesetzt, die sich aus der Reihenentwicklung der Winkelfunktionen ergibt:

$$(5) \quad \cos \left(m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) = 1 - \dots$$

4

und

$$(6) \quad \sin\left(m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t\right) = m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t - \dots$$

Dann wird aus (4):

$$U(t) = \hat{U} \left(\sin \omega_T t + m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_T t \cos \omega_M t + \dots \right)$$

oder

$$(7) \quad U(t) = \hat{U} \left\{ \sin \omega_T t + \frac{1}{2} m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos(\omega_T + \omega_M)t + \frac{1}{2} m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos(\omega_T - \omega_M)t \right\}.$$

Man erkennt durch Vergleich mit (2), dass die **schwach** frequenzmodulierte Schwingung ebenso wie die amplitudenmodulierte aus drei Teilschwingungen mit den Kreisfrequenzen ω_T , $\omega_T + \omega_M$ und $\omega_T - \omega_M$ besteht; jedoch sind die beiden Seitenlinien in (7) um $\pi/2$ in der Phase gegen die Trägerschwingung verschoben.

Das Frequenzspektrum bei starker Frequenzmodulation, also

$$m\omega_T \approx \omega_M,$$

kann man berechnen, wenn man in den Reihenentwicklungen (5) und (6) Glieder höherer Ordnung berücksichtigt. Es zeigt sich, wie hier nicht näher ausgeführt werden soll, dass man (3) darstellen kann als

$$(8) \quad U(t) = \hat{U} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(m \frac{\omega_T}{\omega_M}\right) \sin(\omega_T + n \omega_M)t.$$

Hierin bedeutet $J_n(x)$ die Besselsche Funktion n-ter Ordnung. Aus (8) geht hervor, dass das Frequenzspektrum im Falle eines hohen Modulationsgrades prinzipiell bis zu beliebig hohen und niedrigen Werten reicht. In der Praxis braucht man jedoch nur die in der Nähe von ω_T liegenden Linien zu berücksichtigen, da $J_{\pm n}(x)$ gemäß

$$J_{\pm n}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \left(\frac{ex}{2n}\right)^n$$

mit wachsender Ordnungszahl und $x \leq 1$ schnell gegen null geht.

4. Modulationsschaltungen

a) Zur Amplitudenmodulation einer Trägerschwingung benötigt man, wie aus Gleichung (1) hervorgeht, ein Gerät, dass das Produkt zweier Spannungen bildet. Grundsätzlich ist dazu jedes Bauelement geeignet, das eine nicht-lineare Kennlinie besitzt, wie zum Beispiel die Diode. Die einfachste Modulatorschaltung könnte also die in Abb. 4 wiedergegebene Gestalt haben.

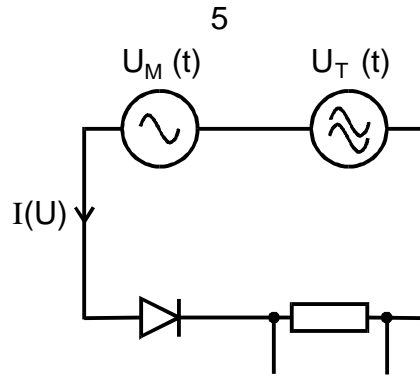


Abb.4: Primitive Modulatorschaltung

Der Strom $I(U)$ in Abb.4 ist amplitudenmoduliert; das erkennt man, wenn man in der Potenzreihenentwicklung für die Diodenkennlinie

$$(9) \quad I = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + \dots$$

die Summe aus Träger- und Modulationsspannung einsetzt:

$$(9a) \quad I(U_T + U_M) = a_0 + a_1(U_T + U_M) + a_2(U_T^2 + U_M^2) + 2a_2 U_T U_M + \dots$$

Wie man sieht, taucht in der Reihenentwicklung zwar das gewünschte Glied $U_T U_M$ auf, doch sind noch weitere (störende) Terme wie z.B. U_M , U_M^2 und U_T^2 vorhanden, deren Frequenzen ω_M , $2\omega_M$ und $2\omega_T$ normalerweise jedoch weit außerhalb des zu übertragenden Frequenzbandes $\{\omega_T - \omega_m \text{ bis } \omega_T + \omega_m\}$ liegen, sodass man diese durch ein geeignetes Bandfilter unterdrücken kann. Das trifft natürlich erst recht für die höheren Glieder in der Potenzreihenentwicklung (9) zu, die hier nicht berücksichtigt wurden. Dieses Modulationsverfahren ist aus dem genannten Grund ziemlich unökonomisch. Besser ist es, wenn die unerwünschten Komponenten erst gar nicht erzeugt werden. Das gelingt einmal dadurch, dass man Bauelemente verwendet, deren Kennlinie durch eine Potenzreihe niedriger Ordnung angenähert werden kann, und zum anderen durch eine geschickte Anordnung der nicht-linearen Bauelemente. Als Beispiel für eine derartige Schaltung soll hier der sogenannte **Ringmodulator** beschrieben werden, der aus 4 zu einem Ring zusammengeschalteten Dioden besteht, wie es in Abb.5 dargestellt ist. Die beiden Diodenzweige A und B sowie C und D in Abb.5 stellen je einen Spannungsteiler für die Trägerspannung U_T dar, die man auf den Eingang L gibt. Die geteilten Spannungen werden an den Punkten α und β abgegriffen und gelangen über einen Hochfrequenz-Transformator an den Ausgang R.

Wenn die 4 Dioden übereinstimmende elektrische Eigenschaften haben, werden sie zwar je nach der Phasenlage von U_T abwechselnd hoch- oder niederohmig, die Teilungsverhältnisse ändern sich jedoch nicht, sodass zwischen den Punkten α und β zu keinem Zeitpunkt eine Spannung auftritt. Das ändert sich jedoch, sobald man an den Eingang X eine Modulationsspannung U_M anlegt. Jetzt variieren die Teilungsverhältnisse in den Zweigen A, B und C, D im Rhythmus von $U_M(t)$. Beispielsweise werden die Dioden A und D niederohmig sowie C und B hochohmig, sobald U_M an den Punkten γ und δ positiv sowie bei α und β negativ ist. Die Spannung am Ausgang R schwankt also

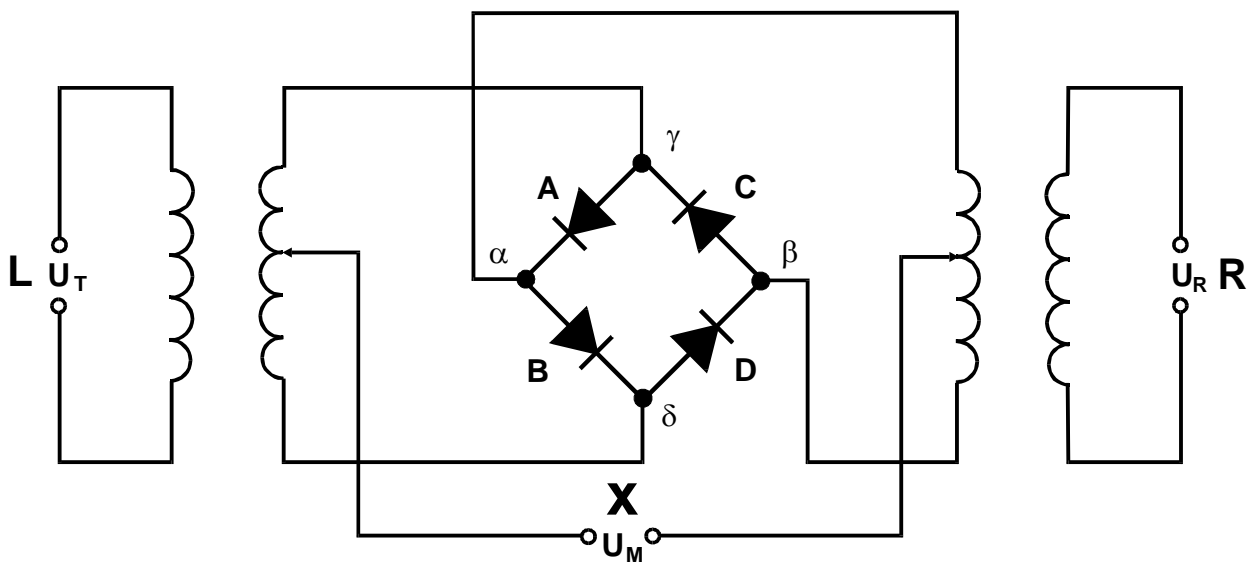


Abb.5: Schaltbild eines Ringmodulators

im Rhythmus der Modulationsspannung. Falls ideale Verhältnisse vorliegen, ist U_R sogar proportional zum Produkt der beiden Eingangsspannungen U_T und U_M :

$$(10) \quad U_R(t) = \gamma U_M(t) U_T(t) \quad ;$$

darin ist γ eine Proportionalitätskonstante mit der Maßeinheit $1/V$. Man erkennt an (10), dass beim Ringmodulator die Modulation ohne Trägerabstrahlung erfolgt; denn setzt man für

$$U_T(t) = \hat{U}_T \cos \omega_T t$$

und für

$$U_M(t) = \hat{U}_M \cos(\omega_M t + \varphi)$$

an, so erhält man aus (10) für

$$(11) \quad U_R(t) = \gamma \hat{U}_T \hat{U}_M \frac{1}{2} \cos((\omega_T + \omega_M)t + \varphi) + \gamma \hat{U}_T \hat{U}_M \frac{1}{2} \cos((\omega_T - \omega_M)t - \varphi) \quad .$$

Unter den genannten Voraussetzungen treten also nur die beiden Seitenlinien auf.

b) In diesem Abschnitt wird ein Schaltungsbeispiel für einen **Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub** vorgestellt. Die Gleichung (7) (aus Kapitel 3) soll daher gültig sein. Man entnimmt ihr, dass zur Frequenzmodulation 2 amplitudenmodulierte Seitenlinien mit den Kreisfrequenzen $\omega_T - \omega_M$ und $\omega_T + \omega_M$ sowie eine 90° in der Phase verschobene Trägerschwingung notwendig sind.

Es wurde im vorherigen Kapitel (4a) gezeigt, dass man mit Hilfe eines Ringmodulators eine Amplitudenmodulation, bei der nur die beiden Seitenbänder auftreten, erzeugen kann. Für die erwünschte Frequenzmodulation kann man daher von einer Ringmodulatorschaltung nach Abb.5 ausgehen und zum Ausgang R eine um 90° in der Phase verschobene, unmodulierte Trägerspannung U_T addieren. Eine geeignete Schaltung dazu ist in Abb. 6 wiedergegeben.

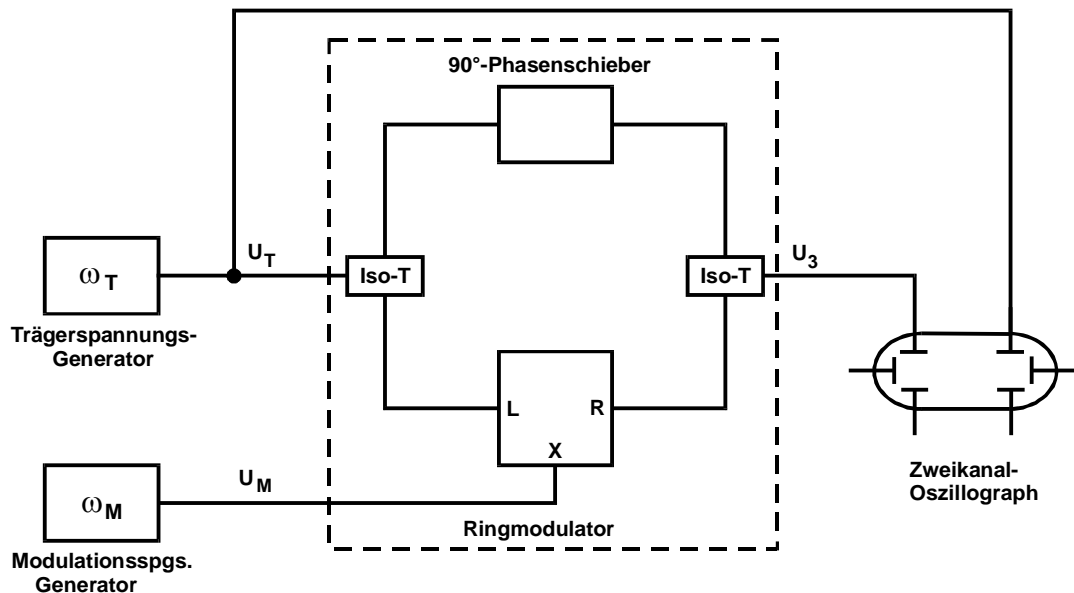


Abb.6: Schaltbild für einen Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub (mit angeschlossenem Nachweisgerät)

Die notwendige Phasenverschiebung der Trägerspannung erzeugt man in einfacher Weise mit einem Laufzeitkabel. Die Aufteilung der Leistung des Trägerspannungsgenerators in 2 Kanäle sowie die phasengerechte und reflexionsfreie Addition zweier hochfrequenter Spannungen geschieht mit sogenannten Leistungsteilern oder Iso-T's.

5. Demodulator-Schaltungen

a) Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen

Der Ringmodulator lässt sich in einfacher Weise auch zur Demodulation von Schwingungen benutzen, da er gemäß (10) das Produkt zweier Eingangsspannungen bilden kann. Es treten also, wie aus (11) hervorgeht, am Ausgang zwei Spannungen auf, deren Frequenzen gleich der Summe und der Differenz der Frequenzen der Eingangsspannungen sind. Gibt man somit auf den Eingang R eines Ringmodulators die modulierte Spannung, welche bekanntlich die Frequenzen $\omega_T - \omega_M$ sowie $\omega_T + \omega_M$ und eventuell ω_T besitzt, und auf L eine Spannung mit der Frequenz ω_T , so erhält man am Ausgang X Spannungen mit den Frequenzen ω_M , $2\omega_T - \omega_M$ und $2\omega_T + \omega_M$ ^{*)}. Da ω_T zumeist sehr viel größer als ω_M ist, lassen sich die Spannungen mit den Frequenzen $2\omega_T - \omega_M$ und $2\omega_T + \omega_M$ mit Hilfe eines Tiefpasses gut unterdrücken, sodass am Ausgang nur noch die gewünschte Spannung mit der Modulationsfrequenz ω_M auftritt. Eine Demodulatorschaltung mit einem Ringmodulator hat daher prinzipiell die in Abb. 7 wiedergegebene Gestalt.

Bei der praktischen Realisierung einer solchen Schaltung kann es ein Problem sein, eine Spannung mit der Trägerfrequenz ω_T für die Demodulation zu bekommen, die phasenstarr mit der Trägerfrequenz des Senders gekoppelt ist. Hierzu verwendet man

^{*)} Wird auch der Träger abgestrahlt, so tritt, wie man aus (11) entnehmen kann, am Ausgang X eine Gleichspannung auf, die proportional zu $\cos \varphi$ ist. Hierin bedeuten φ die Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannung mit der Frequenz ω_T .

bei Bedarf sogenannte Phasenregelkreise, (die als „phase-locked loop“ oder „PLL-Schaltungen“ bezeichnet werden).

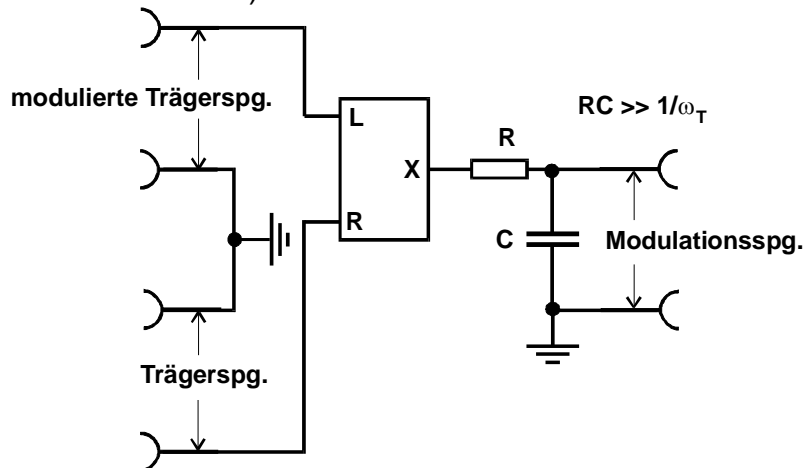


Abb.7: Demodulator-Schaltung mit einem Ringmodulator

Das Problem der festen Phasenbeziehung zwischen der Signal- und einer Referenzspannung vermeidet die Demodulator-Schaltung nach Abb.8.

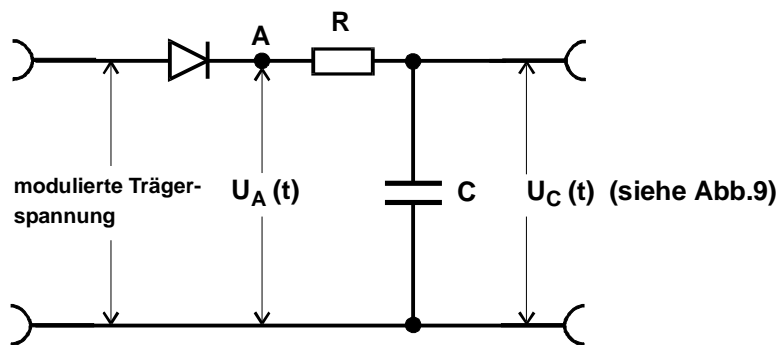


Abb.8: Demodulator-Schaltung mit einer Gleichrichter-Diode

Hier schneidet die Diode sämtliche negative Halbwellen ab, sodass am Punkte A eine Spannung der Gestalt gemäß Abb. 9a auftritt.

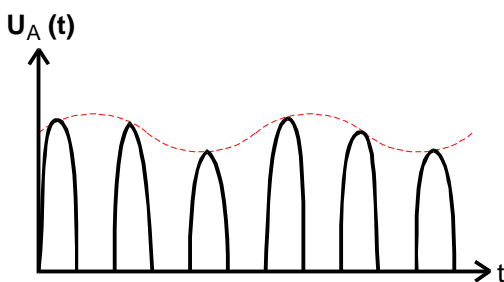


Abb.9a: Gleichgerichtete modulierte Hochfrequenz-Spannung

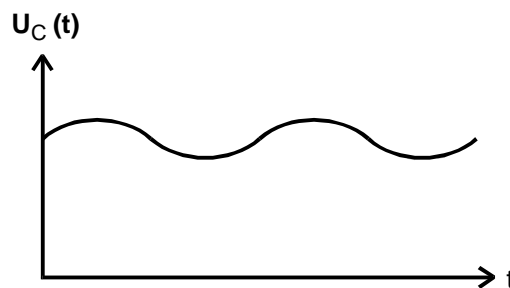


Abb.9b: Ausgangsspannung der Demodulator-Schaltung nach Abb.8 hinter dem Tiefpass mit $RC \gg 1/\omega_T$

Die in dieser Spannung enthaltenen hochfrequenten Anteile mit den Frequenzen ω_T , $2\omega_T$, $4\omega_T$ u.s.w. lassen sich mit Hilfe eines geeigneten Tiefpasses unterdrücken, sodass sich am Ausgang der Schaltung die Modulationsspannung abgreifen ließe, wenn die Diode eine lineare Strom-Spannungs-Kennlinie gemäß Abb.10 besäße (siehe Abb.9b). Normalerweise verlaufen die Kennlinien von Halbleiter-Dioden jedoch angenähert exponentiell, sodass am Ausgang einer realen Schaltung Verzerrungen der Modulations-

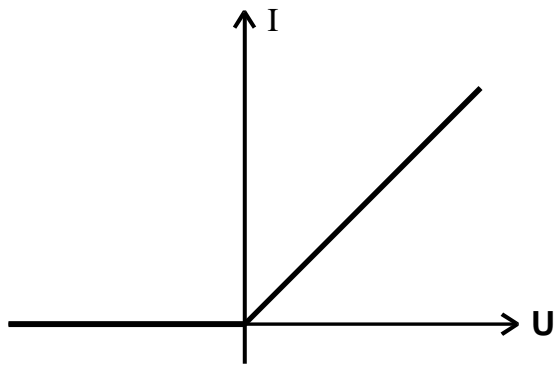


Abb.10: Idealierte Kennlinie einer Diode

spannung zu erwarten sind. Wenn man jedoch nur sehr kleine Aussteuerungen zulässt (geringer Modulationsgrad), kann man die Verzerrungen in Grenzen halten. Eine Verbesserung der Linearität erzielt man durch eine sogenannte Gegentaktschaltung, bei der beide Halbwellen der modulierten Trägerschwingung ausgenutzt werden.

b) Demodulation frequenzmodulierter Schwingungen

Als Beispiel einer Schaltung zur Demodulation frequenzmodulierter Schwingungen soll hier der sogenannte Flankenmodulator beschrieben werden. Er besteht im Prinzip, wie in Abb.11 dargestellt, aus einem einfachen Schwingkreis, bei dem man die Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung im Falle erzwungener Schwingungen^{*)} ausnutzt.

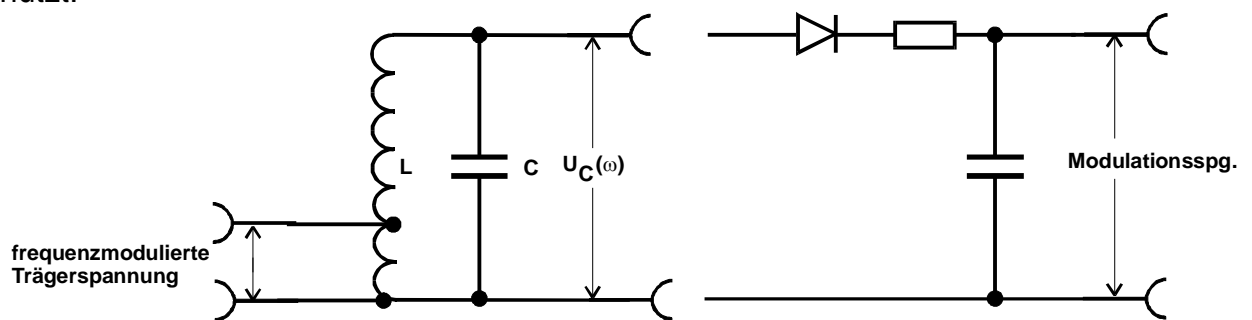


Abb.11: Beispiel einer Demodulatorschaltung für frequenzmodulierte Schwingungen (sog. Eintakt-Flankendemodulator)

Man stellt hierzu die Resonanzfrequenz des Schwingkreises so ein, dass die Trägerfrequenz ω_T mitten in der steilen Flanke der Resonanzkurve des LC-Schwingkreises liegt (siehe hierzu Abb.12).

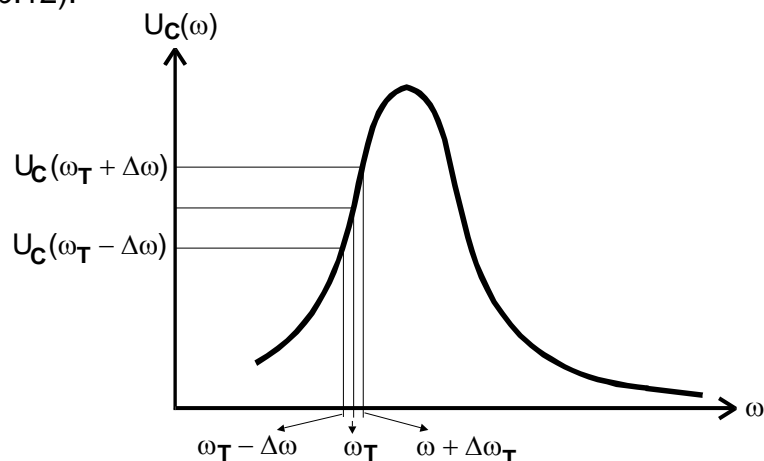


Abb.12: Resonanzkurve des Schwingkreises im Flankendemodulator

^{*)} Näheres hierzu siehe z.B. Anfänger-Praktikum, V 354

Ändert sich nun die Momentanfrequenz der modulierten Schwingung infolge der Frequenzmodulation des Trägers, so entsteht am Ausgang des Schwingkreises eine hochfrequente Spannung $U_C(\omega)$, deren Amplitude im Rhythmus der Modulation schwankt.

Damit hat man die Frequenzmodulation in eine Amplitudenmodulation überführt. Man kann jetzt beispielsweise mit einer Schaltung nach Abb.8 die endgültige Demodulation durchführen. Wählt man den Frequenzhub $\Delta\omega$ so niedrig, dass man mit der Aussteuerung praktisch im linearen Teil der Resonanzkurve bleibt, bekommt man eine weitgehend unverzerrte Demodulation. Auch hier kann man (wie bei der Amplitudenmodulation) durch eine Gegentaktschaltung eine verbesserte Linearität der Demodulationskennlinie erreichen.

6. Aufgaben

Im Rahmen dieses Experimentes sollen hochfrequente Schwingungen sowohl moduliert als auch demoduliert und dabei die Eigenschaften der Amplituden- und Frequenzmodulation untersucht werden. Bei den meisten Schaltungen wird der Ringmodulator verwendet.

- Man erzeuge mit Hilfe eines Ringmodulators eine amplitudenmodulierte Schwingung mit Trägerunterdrückung, stelle die entstehende Schwebung auf dem Schirmbild eines Speicher-Oszilloskopes dar und zeichne es mit Hilfe eines XY-Schreibers oder Thermodruckers auf. Dazu kann man die Schaltung nach Abb.13 verwenden.
- Man zeichne das Frequenzspektrum dieser modulierten Schwingung mit Hilfe eines Frequenzanalysators auf, den man an die Stelle des Oszillographen in der Schaltung nach Abb.13 setze.

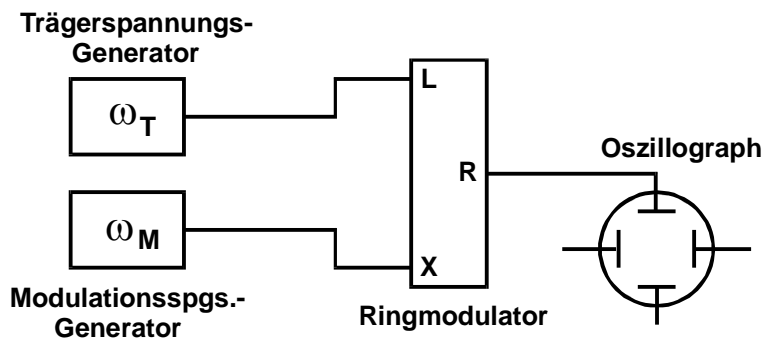


Abb.13: Schaltung zur Untersuchung einer amplitudenmodulierten Schwingung mit Trägerunterdrückung

- Um den allgemeinen Fall der Amplitudenmodulation mit Trägerabstrahlung zu studieren, kann man die Schaltung nach Abb. 14 benutzen. Man stelle auch hier die Zeitabhängigkeit der modulierten Spannung und ihr Frequenzspektrum dar. Man zeige insbesondere, dass auch Oberwellen von ω_T auftreten. Warum sind sie zu erwarten? Aus beiden Diagrammen entnehme man den Modulationsgrad m .

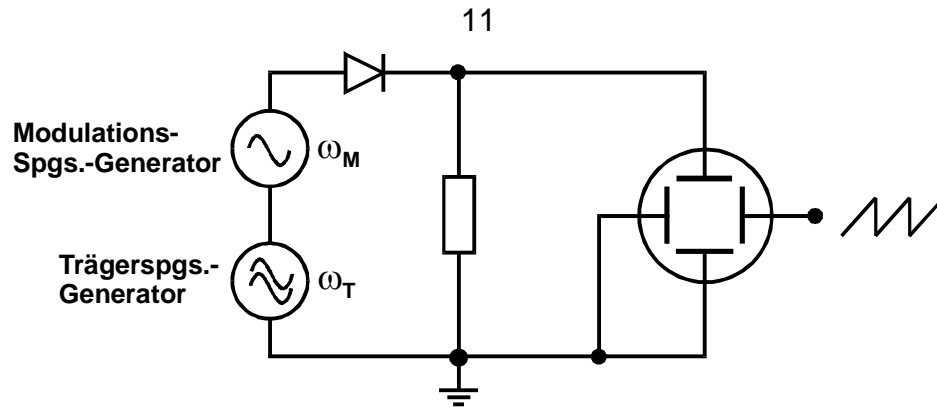


Abb.14: Schaltung zur Untersuchung einer Amplitudenmodulation mit Trägerabstrahlung. Als Modulator wird eine Halbleiterdiode verwendet.

- d) Mit einer Schaltung gemäß Abb.6 erzeuge man eine frequenzmodulierte Schwingung. Bei hinreichend großem Frequenzhub und hinreichend großem ω_M gelingt es vielleicht, die Zeitabhängigkeit der modulierten Schwingung unmittelbar auf dem Schirm des Oszillographen darzustellen. Der Speicherbetrieb muss dabei allerdings **ausgeschaltet** sein.

Man beobachte die periodische Phasenvariation von U_3 relativ zu U_T . Bei einer Modulationsfrequenz von rund 1 kHz oder mehr ist die Sinuskurve für U_3 auf dem Schirm in X-Richtung „verschmiert“. Aus der Größe der Verbreiterung und der Kenntnis von ω_T kann man die maximale Frequenzvariation und damit den Frequenzhub und den Modulationsgrad ermitteln. Man führe eine Messung mit passendem U_M aus und fotografiere das Schirmbild mit einer Polaroid-Kamera. Die Darstellung der Phasenvariation ist möglich, wenn man, wie in Abb.6 dargestellt, die Trägerspannung auf den Kanal II gibt und damit den Oszillographen triggert. Auch hier muss der Speicherbetrieb abgeschaltet sein. Anschließend stelle man das Frequenzspektrum der frequenzmodulierten Schwingung dar.

- e) Ein Ringmodulator lässt sich auch zur Demodulation von Schwingungen benutzen. Davon wird insbesondere dann Gebrauch gemacht, wenn die Trägerspannung zur Verfügung steht. Das soll zunächst am Beispiel eines phasenempfindlichen Gleichrichters demonstriert werden: Man zeige mit Hilfe der Schaltung nach Abb.15, dass die am Ausgang X des Ringmodulators anliegende Gleichspannung proportional zum Kosinus der Phase φ zwischen den beiden an den Eingängen R und L liegenden Wechselspannungen ist.
- f) Mit einer Schaltung nach Abb.7 kann eine amplitudenmodulierte Schwingung mit einem Ringmodulator demoduliert werden. Man schließe einen Oszillographen an den Ausgang des Demodulators an und zeige auf einem Ausdruck, dass man (unter bestimmten Bedingungen) die Modulationsspannung praktisch unverzerrt zurückerhält. Zum Vergleich kann die Original-Modulationsspannung auf Kanal II des Speicheroszillographen gegeben werden.
- g) Man demoduliere eine amplitudenmodulierte Schwingung mit Hilfe einer Gleichrichterdioden in einer Schaltung gemäß Abb. 8. Man stelle dazu die Zeitabhängigkeit der demodulierten Schwingung an der Stelle A und hinter dem Tiefpass dar.

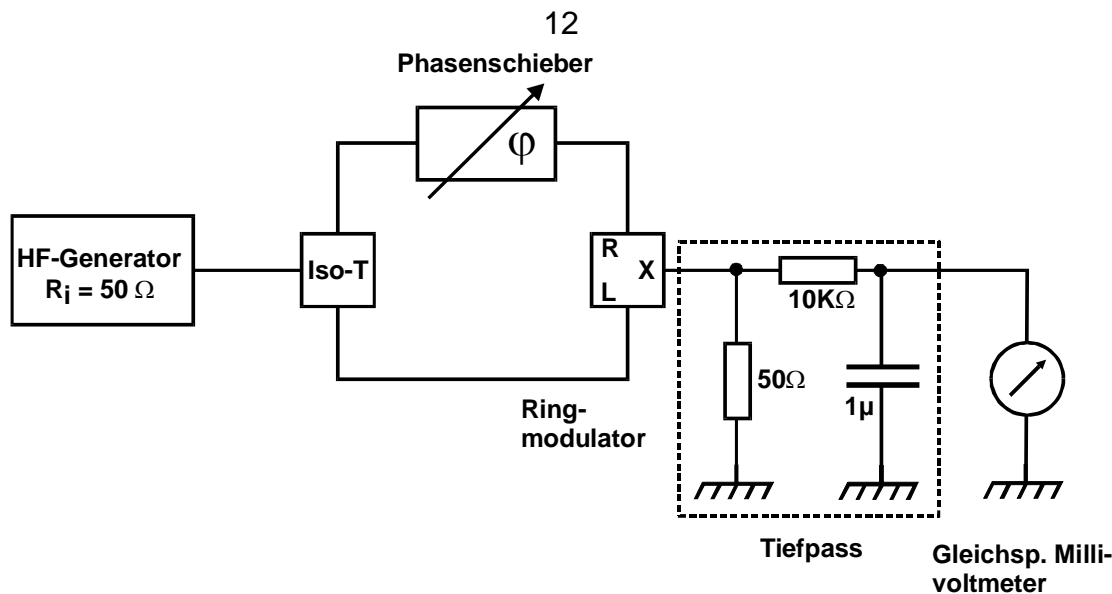


Abb.15: Ringmodulator als phasenempfindlicher Gleichrichter

- h) Zum Abschluss versuche man auch eine frequenzmodulierte Spannung zu demodulieren. Man erzeuge sie zunächst mit einer Schaltung nach Abb. 6 und gebe dann das Signal auf die Anzapfung eines Schwingkreises, wie es in Abb. 11 dargestellt ist. Bei geeigneter Einstellung des Schwingkreises muss die Spannung U_C bereits amplitudenmoduliert sein. Man stelle sie auf einem Ausdruck dar. Hinter dem Tiefpass müsste die unverzerrte Modulationsspannung wieder auftreten. Man vergleiche sie auf einem Ausdruck mit der Modulationsspannung aus dem Generator.

7. Praktische Hinweise

Die Ringmodulatoren vertragen maximal $2 V_{\text{eff}}$ an ihren Eingängen. **Höhere Spannungen zerstören sie!** Meist ist es zweckmäßiger, mit kleineren Spannungen zu arbeiten, um bessere Ergebnisse zu erhalten. Man beachte ferner, dass für die Eingänge R und L eine untere Grenzfrequenz 50 kHz angegeben ist. Die Betriebsfrequenz für die einzelnen Messungen sollte weit (ca. Faktor 10-100) über diesem Wert liegen.

In den Schaltungen, wo definierte Phasenverschiebungen erforderlich sind, verwende man ein Laufzeitkabel. Geeignet ist hierfür das sogenannte BNC-Kabel, das eine genormte Laufzeit von 5 ns/m und einen Wellenwiderstand von 50Ω besitzt.

In der Schaltung nach Abb.14 muss der Modulationsgenerator einen erdfreien Ausgang haben. Es empfiehlt sich, ein batteriebetriebenes Gerät zu nehmen.

Zur Untersuchung der Frequenzspektren modulierter Schwingungen wird ein kommerzieller Frequenzanalysator verwendet. Eine Bedienungsanleitung hierfür liegt neben dem Gerät.

8. Literatur

Meyer, Pottel, Physikalische Grundlagen der Hochfrequenz-Technik

Unger, Schultz, Elektronische Bauelemente und Netzwerke, Bd. 2

Zinke, Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Bd. 2