

**Physikalisches  
Fortgeschrittenenpraktikum  
Versuch 59: Modulation und  
Demodulation elektrischer Schwingungen**

Sebastian Rollke

103095

webmaster@rollke.com

und

Daniel Brenner

105292

daniel.brenner@uni-dortmund.de

durchgeführt am 12. Juni 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>4</b>
2.1	Amplitudenmodulation . . . . .	4
2.2	Frequenzmodulation . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Experimentelles Vorgehen</b>	<b>7</b>
3.1	Modulationsschaltungen . . . . .	7
3.2	Demodulationsschaltungen . . . . .	9
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	10
3.3.1	Aufgabe 1 - Amplitudenmodulation . . . . .	10
3.3.2	Aufgabe 2 - Amplitudenmodulation . . . . .	10
3.3.3	Aufgabe 3 - Amplitudenmodulation . . . . .	10
3.3.4	Aufgabe 4 - Frequenzmodulation . . . . .	11
3.3.5	Aufgabe 5 - Amplitudendemodulation . . . . .	12
3.3.6	Aufgabe 6 - Amplitudendemodulation . . . . .	12
3.3.7	Aufgabe 7 - Amplitudendemodulation . . . . .	12
3.3.8	Aufgabe 8 - Frequenzdemodulation . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>14</b>
4.1	Aufgabe 1 und 2 - Amplitudenmodulation . . . . .	14
4.2	Aufgabe 3 - Amplitudenmodulation . . . . .	16
4.3	Aufgabe 4 - Frequenzmodulation . . . . .	19
4.4	Aufgabe 5 - Amplitudendemodulation . . . . .	21
4.5	Aufgabe 6 - Amplitudendemodulation . . . . .	24
4.6	Aufgabe 7 - Amplitudendemodulation . . . . .	24
4.7	Aufgabe 8 - Frequenzdemodulation . . . . .	25

# 1 Einleitung

Möchte man Informationen mittels elektromagnetischer Wellen über große Distanzen austauschen, so bedarf es hochfrequenter Trägerwellen für diese Signale. Die Veränderung des Trägersignals durch das Signal der Information nennt man hierbei Modulation, um die Information wieder aus einem Signal zu gewinnen nutzt man die Demodulation. In der Hochfrequenztechnik gibt es eine Reihe von Verfahren zur Modulation mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Störsicherheit, Wirkungsgrad, Verzerrfreiheit, und anderem, welche sich aber recht einfach in zwei übergeordnete Klassen einteilen lässt: Die Amplitudenmodulation, bei der sich lediglich die Amplitude ändert, und die Frequenzmodulation, bei der sich die Amplitude nicht ändert, jedoch der Phasenwinkel variiert. In diesem Versuch sollen beide Verfahren zur Modulation und Demodulation von Signalen genutzt werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Amplitudenmodulation

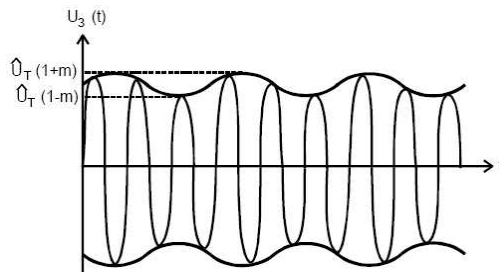
Die einfachere Form der Amplitudenmodulation wird durch eine hochfrequente Trägerwelle  $U_T(t)$  dargestellt, deren Amplitude durch den Rythmus eines niederfrequenten Modulationssignales  $U_M(t)$  verändert wird. Mit den entsprechenden Kreisfrequenzen  $\omega_T$  und  $\omega_M$  sowie den Amplituden  $\hat{U}_T$  und  $\hat{U}_M$  ergeben sich die beiden Schwingungen

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

und daraus die amplitudenmodulierte Schwingung

$$U_3(t) = \hat{U}_T (1 + m \cos \omega_M t) \cos \omega_T t \quad (2.1)$$

Die Größe  $m$  in der Formel 2.1 ist hierbei der Modulationsgrad  $m = \gamma \hat{U}_M$  und kann Werte zwischen 1 und 0 einnehmen. Eine solche modulierte Schwingung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.



**Abbildung 2.1:** Zeitabhängigkeit der Momentanspannung  $U_3$  bei einer gemäß Formel 2.1 amplitudenmodulierten Schwingung

Mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen lässt sich die Gleichung 2.1 umformen zu

$$U_3(t) = \hat{U}_T \left\{ \cos \omega_T t + \frac{1}{2} m \cos(\omega_T + \omega_M)t + \frac{1}{2} m \cos(\omega_T - \omega_M)t \right\} \quad (2.2)$$

Sofort kann man hier erkennen das sich das Frequenzspektrum in drei Linien aufteilt mit den Kreisfrequenzen  $\omega_T + \omega_M$ ,  $\omega_T$  und  $\omega_T - \omega_M$ . Außerdem kann man sehen, das

die mittlere Linie des Frequenzspektrums von  $U_M$  unabhängig ist und keine Informationen tragen kann. In der Praxis soll daher diese überflüssige Trägerabstrahlung möglichst unterdrückt werden um einen unnötigen Energieverbrauch zu verhindern. Benutzt man als Modulationssignal nicht nur eine Frequenz, sondern wie etwa bei der Übertragung von Informationen ein Spektrum von Frequenzen, so verbreitern sich die beiden äußeren Linien zu einem Frequenzband. Da die Information schon in einem der beiden Seitenbänder übertragen werden kann, kann man eines der Bänder mit einem passenden Bandfilter unterdrücken und erhält so eine Einseitenbandmodulation. Die Amplitudenmodulation ist allerdings sehr störanfällig und verzerrt leicht.

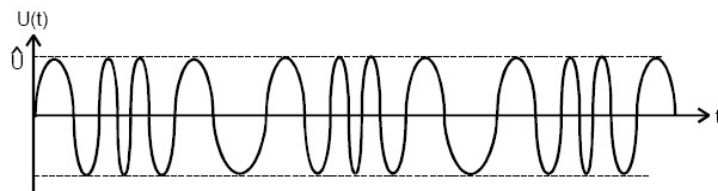
## 2.2 Frequenzmodulation

Bei der Frequenzmodulation wird die Schwingungsfrequenz im Rythmus des Modulationssignals verändert während die Amplitude konstant bleibt wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Eine solches Signal bekommt die Form

$$U(t) = \hat{U} \sin \left( \omega_T t + m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos(\omega_M t) \right) \quad (2.3)$$

aus der sich die Momentanfrequenz  $f$  ergibt

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



**Abbildung 2.2:** Zeitlicher Verlauf einer sinusförmigen frequenzmodulierten Schwingung

Mit dem Frequenzhub bezeichnet man das Maß für die Variationsbreite der Schwingungsfrequenz, welche hier nur für den Fall der Schmalband-Frequenzmodulation, also für niedere Frequenzhube betrachtet werden soll. Mit dieser Einschränkung formt sich Gleichung 2.3 um in

$$U(t) = \hat{U} \left\{ \sin(\omega_T t) \cos \left( m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) + \cos(\omega_T t) \sin \left( m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos \omega_M t \right) \right\} \quad (2.4)$$

nähert man nun erhält man nach einigen Umformungen eine recht ähnliche Gleichung wie in 2.2

$$U(t) = \hat{U} \left\{ \sin(\omega_T t) + \frac{1}{2} m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos((\omega_T + \omega_M)t) + \frac{1}{2} m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos((\omega_T - \omega_M)t) \right\} \quad (2.5)$$

bei der auch wieder drei Frequenz-Linien auftreten, bei der allerdings die beiden äußeren jeweils um  $\pi/2$  in der Phase gegen die Trägerfrequenz verschoben sind.

## 3 Experimentelles Vorgehen

### 3.1 Modulationsschaltungen

Wie aus den Gleichungen bereits hervorging, benötigt man zur Amplitudenmodulation von Schwingungen ein Gerät das das Produkt aus zwei Spannungen bildet. Hierfür eignet sich jedes Bauelement mit einer nicht-linearen Kennlinie wie etwa die Diode. In Abbildung 3.1 ist hierfür eine einfachste Schaltung zur Modulation zu sehen.

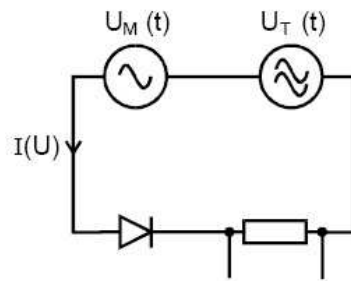


Abbildung 3.1: Primitive Modulatorschaltung

Entwickelt man die Potenzreihe der Diodenkennlinie, so erhält man zwar die gewünschte Summe  $U_T U_M$  jedoch auch noch weitere störende Terme deren Frequenzen umständlich mit einem Bandfilter eliminiert werden müssten. Um dies zu umgehen benötigt man eine Anordnung, deren Kennlinie sich durch eine Potenzreihe niedriger Ordnung nähern lässt wie dies etwa in der in Abbildung 3.2 dargestellten Ringmodulation der Fall ist.

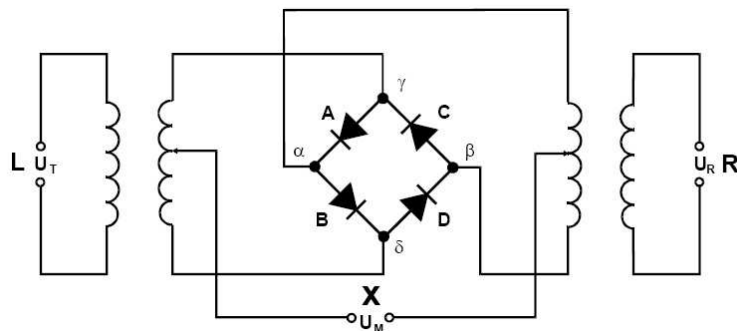
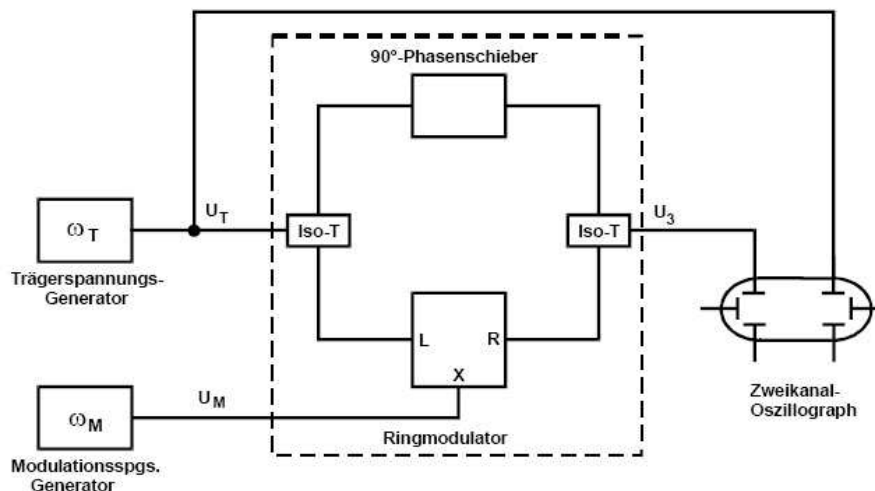


Abbildung 3.2: Schaltbild eines Ringmodulators

Hierbei bilden die 4 ringförmig angeordneten Dioden einen Spannungsteiler, dessen geteilte Spannungen an den Punkten  $\alpha$  und  $\beta$  abgegriffen werden und über einen Hochfrequenz-Transformator schließlich an den Ausgang R gelangen. Da die Dioden übereinstimmende elektrische Eigenschaften besitzen, ändern diese vorerst das Teilungsverhältnis nicht, so dass zwischen den Punkten  $\alpha$  und  $\beta$  keine Spannung auftritt. Wird nun aber eine Modulationsspannung an  $U_M$  angelegt, so beginnen die Teilungsverhältnisse im Rhythmus der Spannung sich zu ändern, was damit schlussendlich auch zu einer proportional variierenden Ausgangsspannung führt, mit der Proportionalitätskonstante  $\gamma$ , welche die Maßeinheit  $1/V$  hat.

$$U_R(t) = \gamma U_M(t) U_T(t) \quad (3.1)$$

Auch erkennt man, dass keine Trägerabstrahlung erfolgt, also unter diesen Voraussetzungen nur die beiden Seitenlinien auftreten.



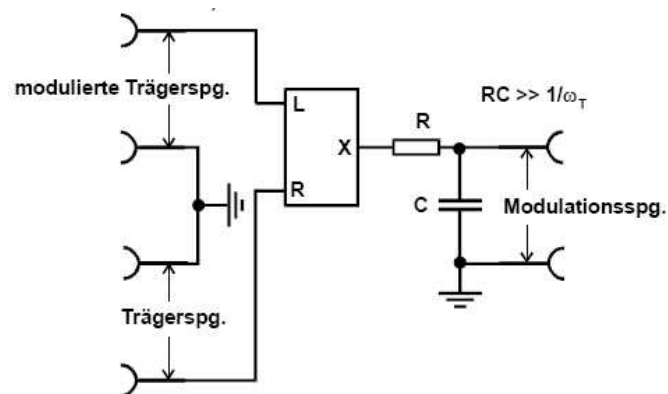
**Abbildung 3.3:** Schaltbild für einen Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub (mit angeschlossenem Nachweisgerät)

Zur Schaltung einer Frequenzmodulation mit geringem Frequenzhub benötigt man ebenso einen Ringmodulator, um die beiden Seitenlinien des Frequenzspektrums zu bilden. Zusätzlich bedarf es allerdings noch einer um  $90^\circ$  in der Phase verschobenen Trägerschwingung. Somit bedient man sich des vorherigen Aufbaus und ergänzt ihn wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Hierbei wird die notwendige Phasenverschiebung durch die Benutzung eines Laufzeitkabels realisiert, die Aufteilung der Leistung der Trägerspannung erfolgt hierbei durch sogenannte Leistungsteiler.



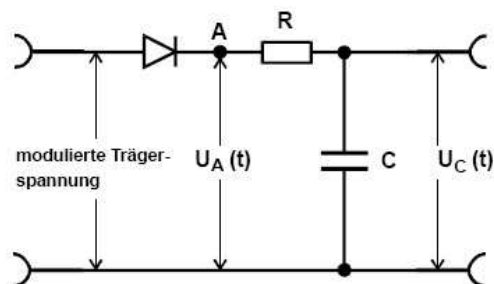
### 3.2 Demodulationsschaltungen

Zur Demodulation lässt sich leicht ebenfalls ein Ringmodulator nutzen. Hierfür wird das modulierte Trägersignal auf den Eingang L gegeben wie in Abbildung 3.4 dargestellt, die bekanntlich die Frequenzen  $\omega_T - \omega_M$ ,  $\omega_T + \omega_M$  und eventuell  $\omega_T$  besitzen, und auf den Eingang R die Trägerspannung, so erhält man am Ausgang Spannungen mit den Frequenzen  $\omega_M$ ,  $2\omega_T - \omega_M$  und  $2\omega_T + \omega_M$ . Da  $\omega_T$  meist sehr viel größer als  $\omega_M$  ist, lassen sich die unerwünschten Spannungen leicht mit einem Tiefpass herausfiltern, so dass lediglich die Gewünschte Modulationsfrequenz übrig bleibt.



**Abbildung 3.4:** Demodulator-Schaltung mit einem Ringmodulator

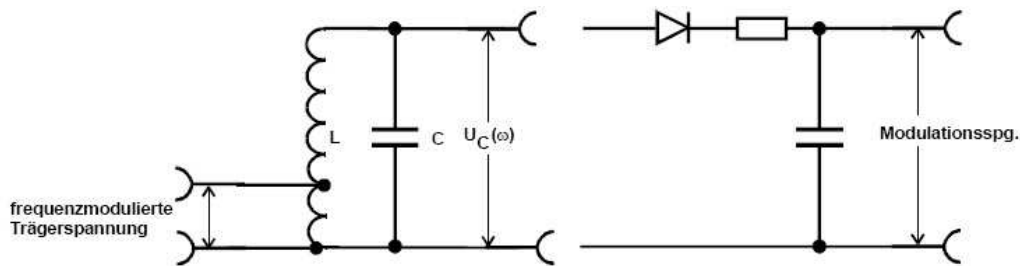
Da es schwierig sein kann in der Praxis, eine phasenstarr an die Trägerfrequenz des Senders gekoppelte Trägerfrequenz zu verwenden verwendet man hier eine Schaltung nach Abbildung 3.5. Hierbei wird durch die Diode die negative Halbwellen abgeschnitten, wodurch allerdings noch vielfache der Trägerfrequenz enthalten sind, welche wiederum durch einen Tiefpass herausgefiltert werden können. Eine Verbesserung dieser Unterdrückung erhält man durch eine Gegentaktschaltung von beiden Halbwellen.



**Abbildung 3.5:** Demodulator-Schaltung mit einer Gleichrichter-Diode

Zur Demodulation frequenzmodulierter Schwingungen nutzt man den sogenannten

Flankenmodulator wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen einfachen Schwingkreis, bei dem die Resonanzfrequenz so gewählt wird, dass die Trägerfrequenz mitten in der steilen Flanke der Resonanzkurve des LC-Schwingkreises liegt. Ändert sich nun die Frequenz der modulierten Schwingung, so entsteht am Ausgang des Schwingkreises eine hochfrequente Spannung  $U_C(\omega)$ , deren Amplitude im Rhythmus der Modulation schwankt. Hiermit hat man das Problem in eines überführt was sich mit einem der vorhergegangenen Aufbauten lösen lässt.



**Abbildung 3.6:** Beispiel einer Demodulatorschaltung für frequenzmodulierte Schwingungen (sog. Eintakt-Flankendemodulator)

### 3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

In dem Versuche sollen hochfrequente Schwingungen moduliert und auch demoduliert werden, wobei hier sowohl Amplitudenmodulation als auch Frequenzmodulation genutzt werden.

#### 3.3.1 Aufgabe 1 - Amplitudenmodulation

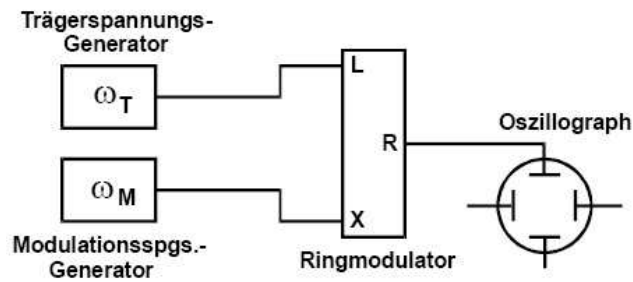
Unter Verwendung von der in Grafik 3.7 dargestellten Schaltung wird durch den Ringmodulator eine amplitudenmodulierte Schwingung erzeugt. Die Schwebung wird durch ein Speicheroszillograph festgehalten.

#### 3.3.2 Aufgabe 2 - Amplitudenmodulation

Der Aufbau aus der ersten Aufgabe wird dahingehend variiert, dass man das Oszilloskop durch einen Frequenzanalysator ersetzt und durch dessen Speicherfunktionen das Frequenzspektrum aufnimmt.

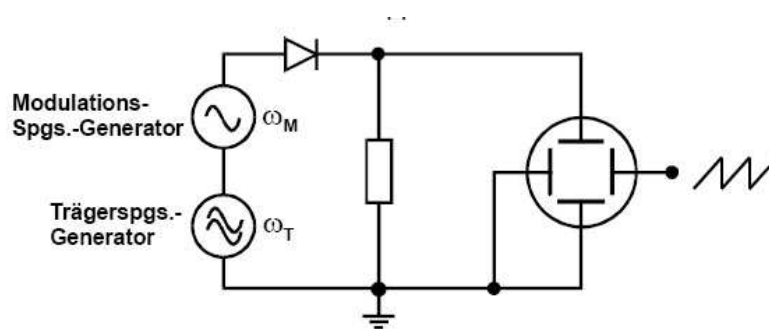
#### 3.3.3 Aufgabe 3 - Amplitudenmodulation

Für eine allgemeinere Form der Amplitudenmodulation wird eine Schaltung wie in Abbildung 3.8 genutzt. Hierbei wird eine Halbleiterdiode verwendet wie in 3.1 beschrie-



**Abbildung 3.7:** Schaltung zur Untersuchung einer amplitudenmodulierten Schwingung mit Trägerunterdrückung

ben. Ebenso wie in den ersten beiden Aufgaben wird auch hier die Schwebung und das Frequenzspektrum mit Hilfe der Speicherfunktionen der Geräte untersucht. Hierbei soll ein besonderes Augenmerk auf Oberwellen der Trägerwelle geachtet werden und der Modulationsgrad bestimmt werden.



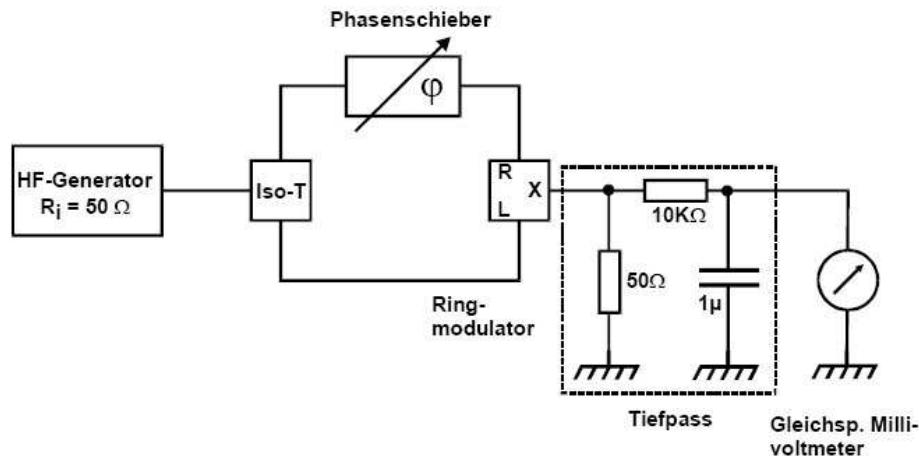
**Abbildung 3.8:** Schaltung zur Untersuchung einer Amplitudenmodulation mit Trägerabstrahlung. Als Modulator wird eine Halbleiterdiode verwendet.

### 3.3.4 Aufgabe 4 - Frequenzmodulation

Mit Hilfe einer in Abbildung 3.3 beschriebenen Schaltung wird eine frequenzmodulierte Schwingung erzeugt. Wählt man einen großen Frequenzhub und eine hinreichend große Modulationsfrequenz, lässt sich die Zeitabhängigkeit der modulierten Schwingung auf einem Oszillographen darstellen. Aus der periodischen Phasenvariation der modulierten Spannung lässt sich nun eine Aussage über den Frequenzhub und den Modulationsgrad treffen. Mit dem Speicheroszillographen wird ein Bild genommen, bei dem die Trägerspannung zur Triggerung dient. Ebenfalls wird wie in den vorherigen Aufgaben auch das Frequenzspektrum analysiert.

### 3.3.5 Aufgabe 5 - Amplitudendemodulation

Mit einer Schaltung wie in Grafik 3.9 dargestellt soll zunächst mit Hilfe der bekannten Trägerspannung am Ringmodulator ein amplitudenmoduliertes Signal demoduliert werden. Hierzu soll zunächst gezeigt werden, dass die am Ausgang X anliegende Gleichspannung proportional zum Kosinus der Phase  $\varphi$  zwischen den beiden Wechselspannungen an den Eingängen des Ringmodulators ist.



**Abbildung 3.9:** Ringmodulator als phasenempfindlicher Gleichrichter

### 3.3.6 Aufgabe 6 - Amplitudendemodulation

Mit Zuhilfenahme einer Schaltung nach Abbildung 3.4 lässt sich eine amplitudenmodulierte Schwingung mit einem Ringmodulator demodulieren. Hierzu bedarf es natürlich einer vorgeschalteten Modulationsschaltung um eine solche Schwingung zu erhalten. Legt man die unveränderte Modulationsspannung und die demodulierte Spannung hinterher auf zwei verschiedene Kanäle des Speicheroszillographen, so kann man diese miteinander vergleichen.

### 3.3.7 Aufgabe 7 - Amplitudendemodulation

Mit einer Schaltung wie in Abbildung 3.5 aufgezeigt wird nun eine vorher amplitudenmodulierte Schwingung durch eine Gleichrichterdiode demoduliert. Hierbei soll die Zeitabhängigkeit der Schwingung vor und hinter dem Tiefpass untersucht werden.

### **3.3.8 Aufgabe 8 - Frequenzdemodulation**

Als letzter Versuchsteil wird erneut eine Schwingung nach Abbildung 3.3 frequenzmoduliert und dann mit einer Schaltung nach Abbildung 3.6 wieder demoduliert. Hierbei steht zu beachten, dass der Schwingkreis geeignet eingestellt werden muss und hinter dem Schwingkreis eine amplitudenmodulierte Schwingung vorliegt. Mit einer weiteren Amplitudendemodulation lässt sich nun die demodulierte Spannung ausgeben und mit der Spannung des Modulationsspannungs-Generator vergleichen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Aufgabe 1 und 2 - Amplitudenmodulation

Die mit Hilfe des Ringmodulators erstellte Modulationsspannung, besitzt eine wie in Abbildung 4.1 gezeigte Gestalt. Hierbei wurde eine Trägerspannung von  $\hat{U}_T = 0,956\text{V}$  mit einer Frequenz von  $\nu_T = 5\text{MHz}$ , sowie einer Modulationsspannung von  $\hat{U}_M = 1,025\text{V}$  mit einer Frequenz von  $\nu_M = 98,8\text{kHz}$  genutzt. Die Zeitabhängigkeit der Schwebung ist deutlich zu erkennen, ebenso wie die Trägerfreiheit der Ringmodulation an den vorhandenen Nullstellen der Einhüllenden des Trägersignals an denen die Amplitude des Modulierten Signals gänzlich verschwindet.

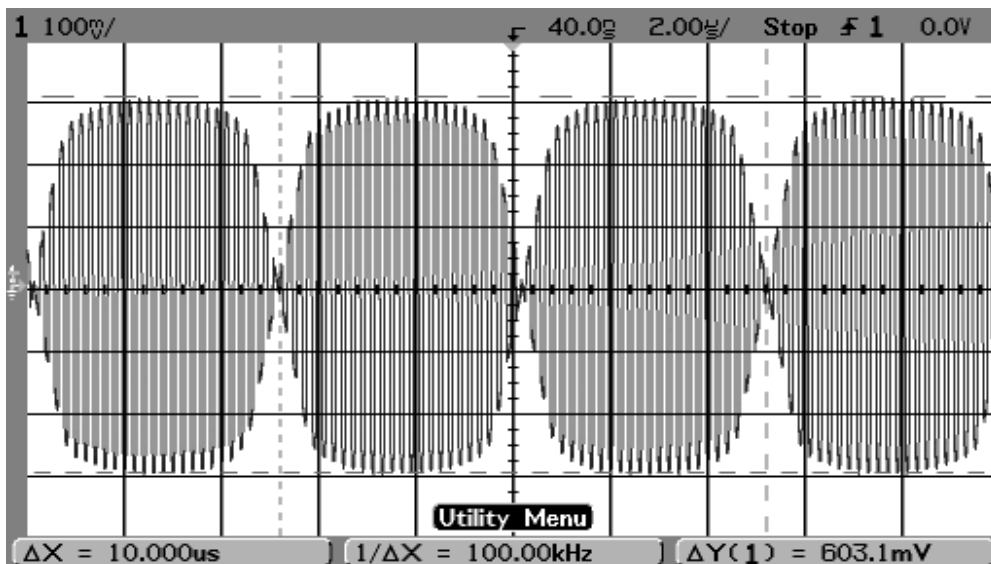
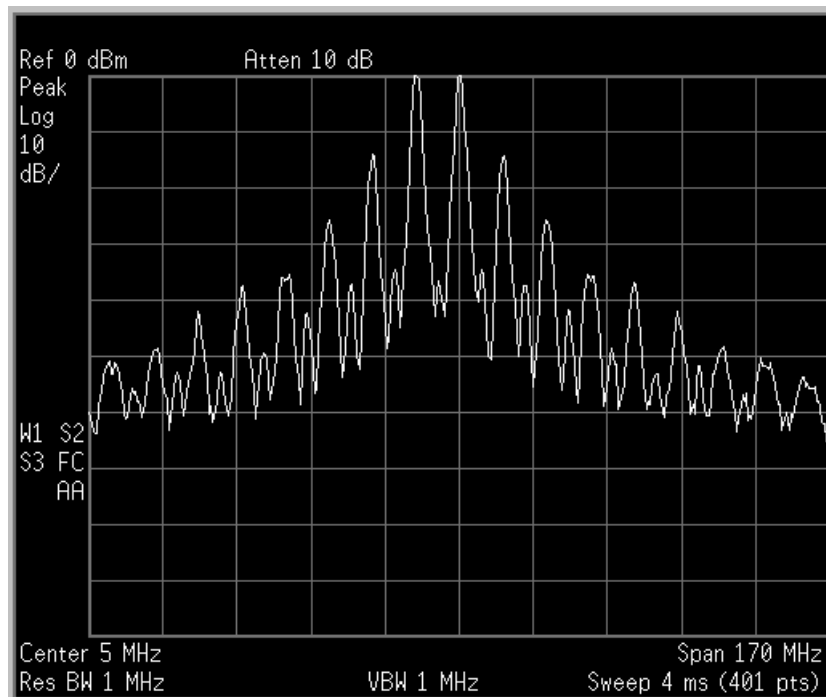


Abbildung 4.1: Amplitudenmodulierte Schwingung zur Aufgabe 1

Die Auswertung des Frequenzspektrums in Abbildung 4.2 zeigt ebenso deutlich das zu erwartende Bild, da bei der Ringmodulation die Trägerfrequenz unterdrückt wird. Hierdurch existieren nur noch zwei deutliche Peaks in der Bildmitte, die aufgrund der logarithmischen Skala um ein Vielfaches die übrigen überragen. Die übrigen äußeren Peaks sind Oberwellen der Modulationsfrequenz.



**Abbildung 4.2:** Frequenzanalyse der amplitudenmodulierten Schwingung der Aufgabe 2

## 4.2 Aufgabe 3 - Amplitudenmodulation

Die amplitudenmodulierte Schwingung, die mit Hilfe einer Halbleiterdiode aufgenommen wurde, zeigt in Abbildung 4.3 das erwartete Bild. Zum einen schneidet die Eigenschaft der Diode die Hälfte der Amplitude ab, zum anderen lässt sich deutlich eine hochfrequente Trägerspannung erkennen, die durch die niederfrequente Modulationsspannung in ihrem Amplitudenhub zyklisch die modulierte Spannung beeinflusst. Hierbei wurde wieder eine Trägerspannung von  $\hat{U}_T = 0,956\text{V}$  mit einer Frequenz von  $\nu_T = 5\text{MHz}$ , sowie einer Modulationsspannung von  $\hat{U}_M = 1,025\text{V}$  mit einer Frequenz von  $\nu_M = 98,8\text{kHz}$  genutzt.

Aus der Grafik 4.3 kann man die maximale und minimale Amplitude der Einhüllenden ablesen. Nimmt man an das es einen Ablesefehler von 1mm zu berücksichtigen gibt, lassen sich die beiden Werte  $U_{max} = (628 \pm 9)\text{mV}$  und  $U_{min} = (127 \pm 9)\text{mV}$  ablesen.

mit  $U_T(t) = \hat{U}_T \cos(\omega_T t)$  sowie  $U_M(t) = \hat{U}_M \cos(\omega_M t)$  gilt für die modulierte Amplitude  $U = \hat{U}_T \cos(\omega_T t) + \hat{U}_M \cos(\omega_M t) \cdot \cos(\omega_T t)$

durch das Additionstheorem wird dies zu  $U = \hat{U}_T \cos(\omega_T t) + \hat{U}_M \frac{1}{2} (\cos((\omega_T - \omega_M)t) + \cos((\omega_T + \omega_M)t))$

Hierraus sofort ersichtlich sind die beiden Extremfälle  $U_{max} = \hat{U}_T + \hat{U}_M$  und  $U_{min} = \hat{U}_T - \hat{U}_M$

Der Modulationsgrad beschreibt nun das Verhältniss von  $\hat{U}_M$  und  $\hat{U}_T$ , es ergibt sich also

$$m = \frac{\hat{U}_M}{\hat{U}_T} = \frac{2\hat{U}_M}{2\hat{U}_T} = \frac{\hat{U}_T + \hat{U}_M - \hat{U}_T + \hat{U}_M}{\hat{U}_T + \hat{U}_M + \hat{U}_T - \hat{U}_M} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} \quad (4.1)$$

mit dem Fehler

$$s_m = \sqrt{s_{max}^2 \left( -\frac{U_{max} - U_{min}}{(U_{max} + U_{min})^2} + \frac{1}{U_{max} + U_{min}} \right)^2 + s_{min}^2 \left( -\frac{U_{max} - U_{min}}{(U_{max} + U_{min})^2} - \frac{1}{U_{max} + U_{min}} \right)^2}$$

Es ergibt sich hiermit ein Modulationsgrad von  $(0,664 \pm 0,020)$

Aus der Abbildung 4.4 lassen sich die Frequenzen und die zugehörigen Leistungspegel ablesen. Hierbei interessieren zur Bestimmung des Modulationsgrades erstmal lediglich die ersten drei Maxima, das Hauptmaximum stellt hierbei die Trägerfrequenz dar, die beiden Nebenmaxima bilden die Seitenpeaks. Da die Angaben des Frequenzanalysators in dBm, also als Leistungspegel einer Leistung zur Bezugsleistung 1mW, angegeben sind, muss der Wert jeweils noch umgerechnet werden. Dabei gilt

$$n \text{ dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right)$$

Damit gilt für die Leistung

$$10^{n/10} \cdot \text{mW} = P$$



**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**

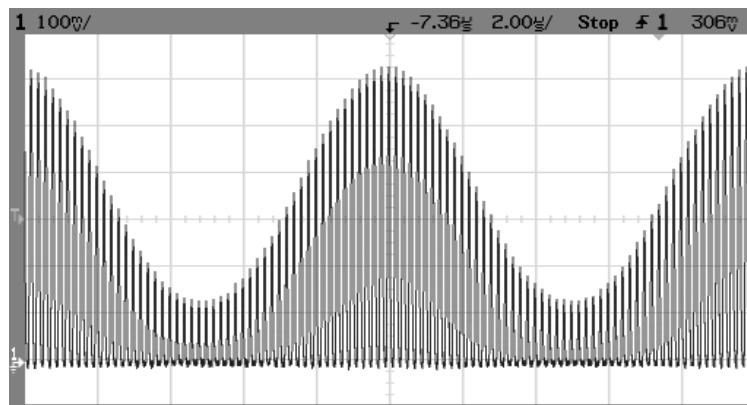
Wir bestimmen die Werte des Leistungspegels dabei auf  $\pm 0,01$  dBm genau (aufgrund von Schwankungen und Ungenauigkeiten der Messung).

Es ergibt sich mit auch ein Fehler für die Bestimmung der Leistung in milli Watt

$$s_P = s_{dBm} \cdot P \cdot \frac{\ln 10}{10}$$

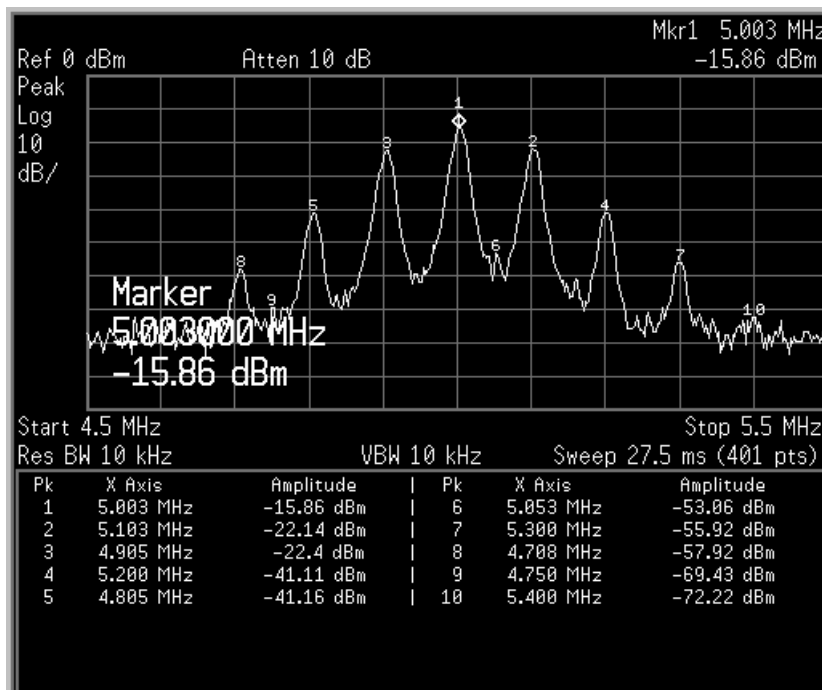
Frequenz [MHz]	(Leistungspegel $\pm 0,01$ ) [dBm]	Leistung [mW]
5,003	-15,86	0,02594 $\pm$ 0,00006
5,103	-22,14	0,00610 $\pm$ 0,00001
4,905	-22,40	0,00575 $\pm$ 0,00001

**Tabelle 4.1:** Umrechnung der Leistungspegel



**Abbildung 4.3:** Amplitudenmodulierte Schwingung einer Schaltung mit einer Halbleiterdiode

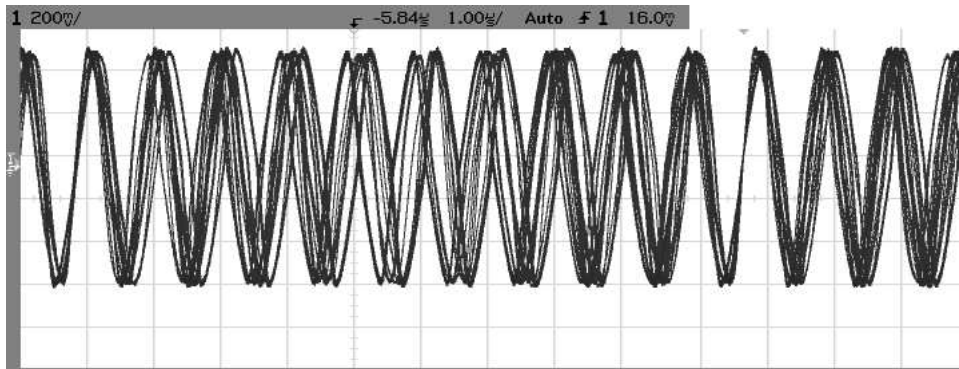
Da nun weiter für die Höhe jedes Seitenpeaks  $P_M$  zum Trägerpeak  $P_T$  gilt  $P_M = 0,5 \cdot m \cdot P_T$  ergeben sich durch Umstellung nach  $m$  sofort die zwei Modulationsgrade  $m_1 = 0,666$  und  $m_2 = 0,628$ , die gemittelt  $m = 0,647 \pm 0,019$  ergeben. Dies weicht lediglich um 2,5% von dem Modulationsgrad ab, der aus Abbildung 4.3 abgelesen wurde.



**Abbildung 4.4:** Frequenzanalyse der amplitudenmodulierten Schwingung der Aufgabe 3

### 4.3 Aufgabe 4 - Frequenzmodulation

Die frequenzmodulierte Spannung nach Aufgabe 4 ist in Abbildung 4.5 erkennbar. Hierbei wurde eine Trägerspannung von  $\hat{U}_T = (0,933 \pm 0,001)$  V mit der Frequenz  $\nu_T = (1,000 \pm 0,001)$  MHz und eine Modulationsspannung von  $\hat{U}_M = (1,457 \pm 0,001)$  V mit der Frequenz  $\nu_M = (99,35 \pm 0,001)$  kHz verwendet. Bei der Darstellung handelt es sich um eine grafische Verschmelzung zweier Aufnahmen der selben, am Oszilloscope festgehaltenen Spannung, da der ausschlaggebende Bereich zu groß für die Darstellung in einem Schirmbild ist. Gut kann man hier allerdings die oszillierende Frequenzvariation erkennen, die zu "Verschmierungen" der Kurve führen. In etwa der Bildmitte lässt sich die größte Variation ausmachen, bevor sie wieder annähernd symmetrisch abschwächt.



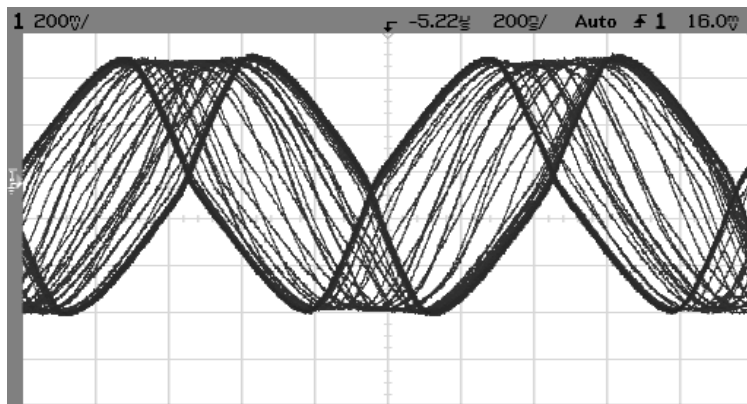
**Abbildung 4.5:** Frequenzmodulierte Spannung, zusammengesetzte Grafik zweier parallel aufgenommener Abschnitte der selben Funktion

Betrachtet man nun die Detailaufnahme des Bereiches, der die größte Frequenzvariation enthält, so lässt sich hier die maximale Breite zu  $(502 \pm 12)$  ns bestimmen. Für fünf Schwingungen ergibt sich damit eine Breite von  $(100,4 \pm 2,4)$  ns.

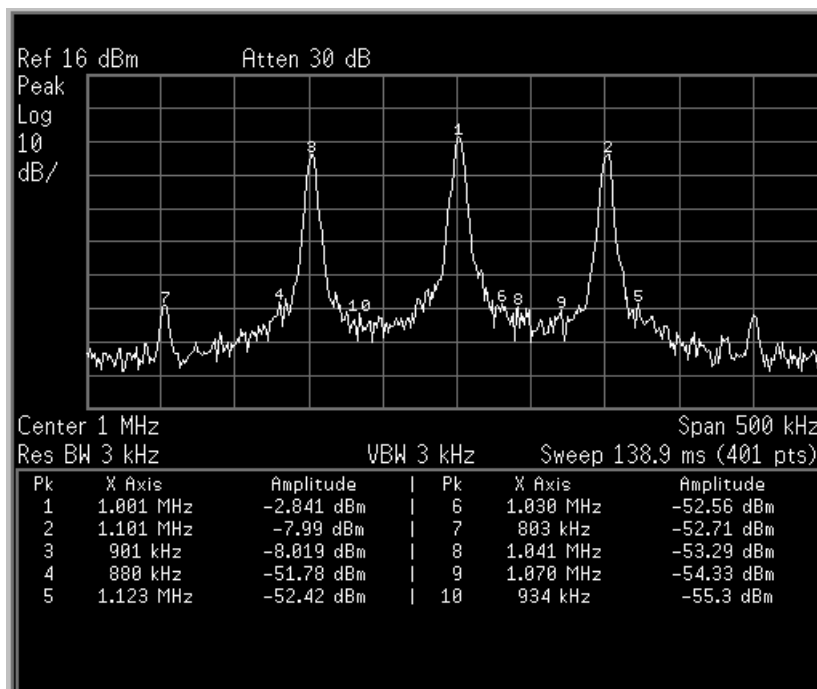
Hierraus folgen direkt aus der Trägerfrequenz und der Verschmierung pro Schwingung, die beiden Periodendauern  $T_{min} = (899,6 \pm 2,6)$  ns und  $T_{max} = (1100,4 \pm 2,6)$  ns. Mit der Modulationsfrequenz ergeben sich hierraus direkt die beiden Periodendauern, die aus Trägerfrequenz  $\nu_T$  und Frequenzhub  $\Delta f$  bestehenden Frequenzen  $\nu_T + \Delta f = (902,9 \pm 2,1)$  kHz und  $\nu_T - \Delta f = (1104,4 \pm 3,2)$  kHz. Die Differenz beider Frequenzen gibt somit  $2\Delta f$ , also den Frequenzhub  $\Delta f = (100,5 \pm 1,9)$  kHz an. Zur Bestimmung des Modulationsgrades teilt man den Frequenzhub durch die eingestellte Trägerfrequenz von 1MHz, wodurch sich ein Wert von  $m = (0,100 \pm 0,002)$  ergibt.

Anschließend wurde die Frequenzanalyse durchgeführt und ergab die in Abbildung 4.7 dargestellte Messung. Hierbei ist sehr gut zu erkennen, dass es wieder einen Hauptpeak an der Trägerfrequenz gibt sowie zwei Peaks an den Positionen der Seitenbänder.

**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**



**Abbildung 4.6:** Detailaufnahme der Frequenzmodulierten Spannung an der Stelle des größten Frequenzvariation



**Abbildung 4.7:** Frequenzanalyse der frequenzmodulierten Schwingung der Aufgabe 4

#### 4.4 Aufgabe 5 - Amplitudendemodulation

Die folgende Tabelle (4.2) zeigt die Abhängigkeit der Amplitude vom Kosinus der Phasenverschiebung. Abbildung 4.8 auf Seite 23 zeigt die zugehörige Regression um zu zeigen, dass es sich (angenähert) um einen linearen Verlauf handelt. Für die Regression wurden die letzten beiden in der Tabelle aufgeführten Messwerte ignoriert, da die Abweichungen dort zu groß waren.

Es ergibt sich die Geradengleichung:

$$U(\phi) = ((211,3 \pm 8,1) \cdot \cos(\phi) - (66,8 \pm 5,8))mV$$

Die in der Tabelle aufgeführten Phasenverschiebungen  $\phi$  ergeben sich durch folgende Betrachtung:

Wir betrachten zwei Schwingungen gleicher Amplitude und Frequenz, die zueinander Phasenverschoben sind

$$\begin{aligned}\hat{U} \cdot \cos(\omega t_1) &= \hat{U} \cdot \cos(\omega t_2 + \varphi) \\ \Rightarrow \omega t_1 &= \omega t_2 + \varphi \\ \Rightarrow \omega(t_1 - t_2) &= \varphi \\ \omega \Delta t &= \varphi\end{aligned}$$

Die Laufzeit bestimmen wir auf 0,5 ns genau. Der Fehler ergibt sich durch weitere Verzögerungen im Versuchsaufbau. Dies ergibt einen Fehler von ca. 0,02 rad für die Phasenverschiebung.

Für die berechneten  $\cos \varphi$  Werte ergibt sich dann ein Fehler nach

$$s_{\cos} = |s_{\varphi} \cdot \sin \varphi|$$

Der Fehler liegt somit immer bei maximal  $\pm 0,02$ . Wir schätzen den Fehler für sämtliche  $\cos$  Werte somit mit 0,02 ab (die genaue Berechnung der Fehler würde auf Grund der lediglich auf 2 Stellen genauen Bestimmung von  $\varphi$  keinen Sinn ergeben).

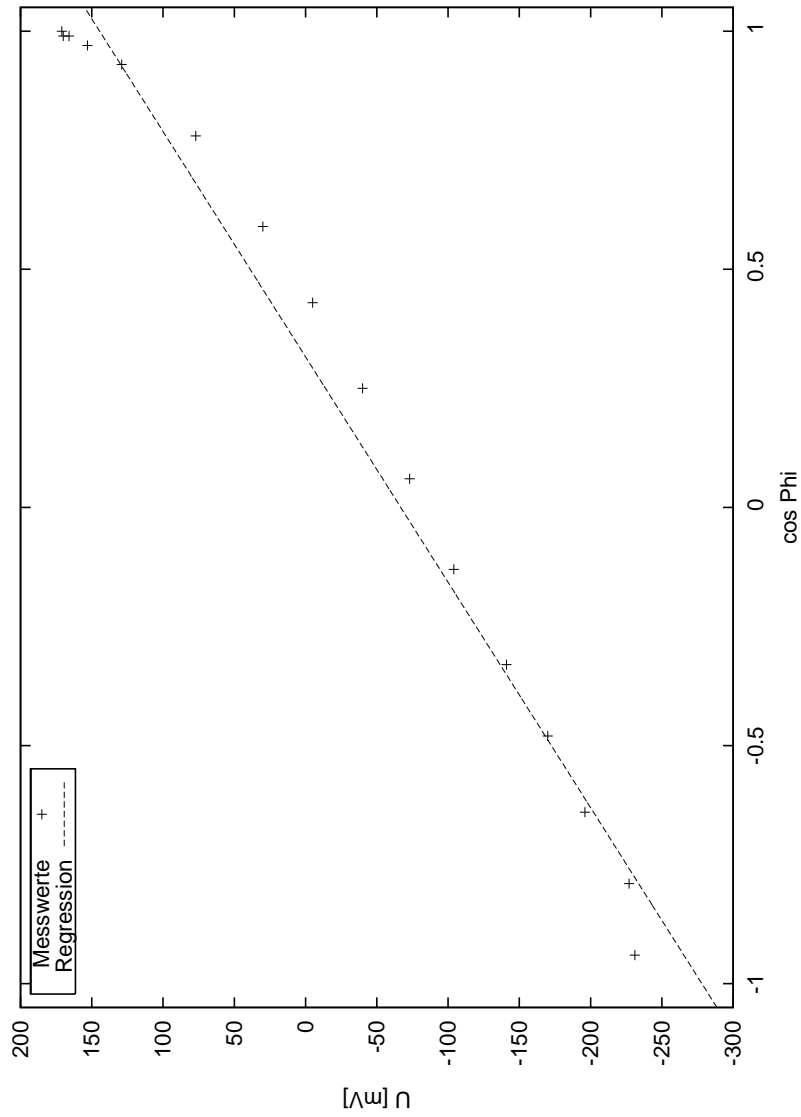
**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**

---

$(\Delta t \pm 0,5)$ [ns]	$\varphi \pm 0,02$ [rad]	$\cos \varphi \pm 0,02$	$(U \pm 1)$ [mV]
2,5	0,09	1,00	171
3,0	0,11	0,99	170
4,0	0,15	0,99	166
6,0	0,23	0,97	153
10,0	0,38	0,93	129
18,0	0,68	0,78	77
25,0	0,94	0,59	30
30,0	1,13	0,43	-5
35,0	1,32	0,25	-40
40,0	1,51	0,06	-73
45,0	1,70	-0,13	-104
50,5	1,90	-0,33	-141
55,0	2,07	-0,48	-170
60,0	2,26	-0,64	-196
66,0	2,49	-0,79	-227
74,0	2,79	-0,94	-231
90,0	3,39	-0,97	-142
106,0	4,00	-0,66	-36
250,0	9,42	-1,00	-234

**Tabelle 4.2:** Abhängigkeit der Amplitude vom Kosinus der Phasenverschiebung

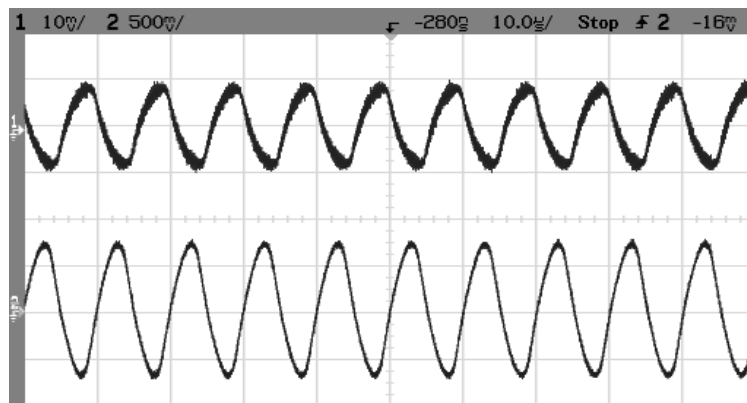
**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**



**Abbildung 4.8:** Ausgleichsrechnung der Ausgangsspannung zum Cosinus der Phasenverschiebung

#### 4.5 Aufgabe 6 - Amplitudendemodulation

Abbildung 4.9 zeigt ein amplitudenmoduliertes Signal nach der Demodulation, und darunter liegend zum Vergleich die originale Modulationsspannung auf dem zweiten Kanal des Speicheroszillographen. Eine starke Ähnlichkeit ist bereits zu erkennen, vor allem in der identischen Periodenlänge. Da im Versuchsaufbau einige BNC-Kabel verwendet wurden, lässt sich hierdurch eine Laufzeitverschiebung der beiden Signale erklären, wodurch die Peaks nicht zeitgleich auftauchen sondern versetzt. Zusätzlich wird durch den im Tiefpass verbauten Kondensator eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  bewirkt. Ebenso ist die Amplitude des demodulierten Signales weniger stark ausgeprägt, da auch hier durch die Verwendung der Kabel und Bauteile ein Widerstand auftaucht. Zusätzlich lassen sich leichte Verzerrungen an den Peaks erkennen. Unter der Bedingung, widerstandslose Kabel ohne Phasenverschiebung zu verwenden, ließe sich somit mit dieser Aperatur die Originalmodulationsspannung wieder exakt abbilden.



**Abbildung 4.9:** Demodulierte amplitudenmodulierte Spannung und zum Vergleich die original Modulationsspannung

#### 4.6 Aufgabe 7 - Amplitudendemodulation

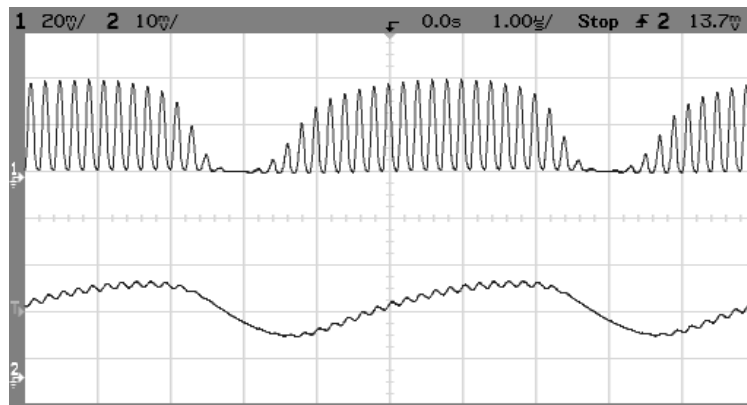
Die Demodulation mit Hilfe der Gleichrichterdiode wird in diesem Versuch zweimal aufgenommen. Beide amplitudendemodulierten Schwingungen sind in Abbildung 4.10 zu sehen, wobei der obere Kanal I die Schwingung vor dem Tiefpass an der in Abbildung 3.5 mit A bezeichneten Stelle aufzeigt und der untere Kanal II die Schwingung nach dem RC-Glied darstellt. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass die Diode die untere Halbwelle komplett abschneidet. Nachdem sie den Tiefpass passiert hat sind die hochfrequenten Anteile der Trägerwelle herausgefiltert, die Verzerrung der demodulierten



**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**

Modulationsspannung ist allerdings bedingt durch die Eigenschaften des Kondensators beim Ladevorgang gegeben. Zum Vergleich dient die originale Modulationsspannung aus Abbildung 4.9 welche mit der Modulationsspannung dieser Aufgabe identisch ist.

Unter Berücksichtigung der um den Faktor 10 unterschiedlichen Zeitskallierungen der Grafiken und der Tatsache, das die Gleichrichterdiode stets eine halbe Amplitude abschneidet, erkennt man deutlich gleiche Nullstellen. Man beobachtet auch eine lediglich halb so große Frequenz, wie bei der ursprünglichen Modulationsspannung, da die Diode die negativen Halbwellen "abschneidet". Durch den Spannungsabfall an der Diode, als auch weitere Verluste (am Tiefpass und in den Kabeln) beobachtet man eine deutlich verringerte Amplitude (ca. um den Faktor 75).

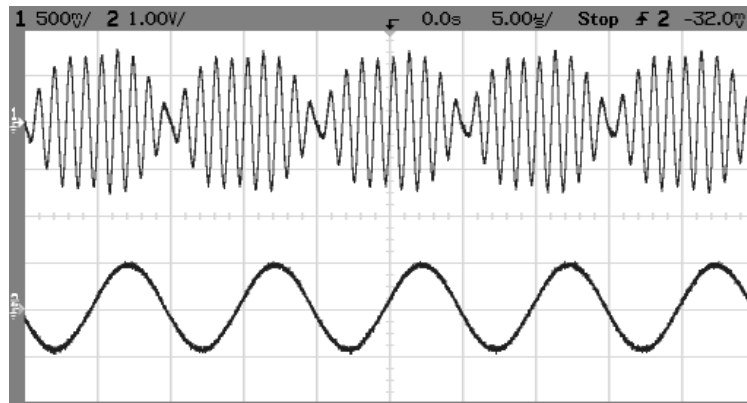


**Abbildung 4.10:** Demodulation einer amplitudenmodulierten Spannung mit Gleichrichterdiode

#### 4.7 Aufgabe 8 - Frequenzdemodulation

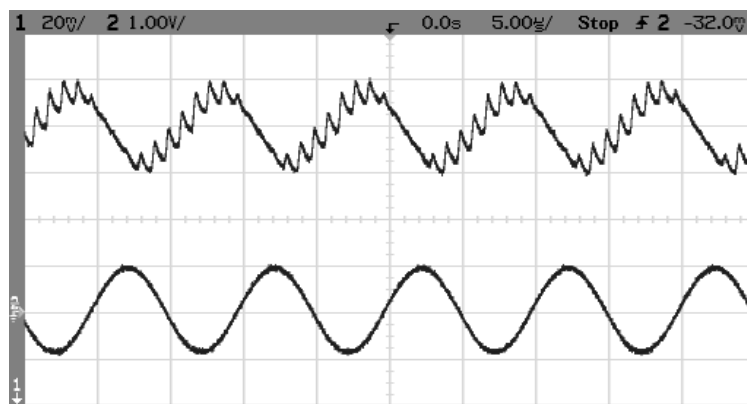
Als letzten Versuch wurde zunächst eine Spannung frequenzmoduliert und anschließend auf einen Schwingkreis gegeben. Nach geeigneter Einstellung lies sich hinter dem Ausgang das Bild 4.11 aufnehmen, welches eine bereits amplitudenmodulierte Spannung zeigt. Zum vergleich dazu ist auf dem zweiten Kanal die ursprüngliche Modulationsspannung gegeben. Klar erkennbar hier schon die gleiche Phasenlänge der Modulationsspannung verglichen mit der Einhüllenden der amplitudenmodulierten Spannung, ebenso wie eine leichte Phasenverschiebung.

Nach dem Anschließen des zusätzlichen Tiefpasses zur Isolierung der niederfrequenten Modulationsspannung, erhält man wie in Abbildung 4.12 gezeigt eine Darstellung ähnlich jener aus Aufgabe 7. Wieder sind Verzerrungen an der ansonsten gut erkenn-

**Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen**

**Abbildung 4.11:** Umgewandeltes Signal der frequenzmodulierten Spannung in eine amplitudenmodulierte hinter dem LRC-Kreis

baren Modulationsspannung zu sehen die auf den Kondensator zurückzuführen sind. Des weiteren ist durch das weitere Verbauen von BNC-Kabeln eine weitere Verschiebung der Phase zu sehen. Dennoch ist recht gut erkennbar, vor allem durch die ähnliche Gestalt der Amplitude, welche die Skalierung beachtend lediglich konstant etwa um den Faktor 50 geringer ist, und die gleiche Phasenlänge, das es sich wieder um die gleiche Spannung wie die Modulationsspannung des Generators handelt.



**Abbildung 4.12:** Demoduliertes Signal hinter dem Tiefpass