

# **Modulation und Demodulation**

Paul Becker                      Alina Nasr-Esfahani  
(paul.becker@udo.edu)      (alina.esfahani@udo.edu)

Durchführung: 22.01.2018, Abgabe: xx.yy.2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
1.1	Amplitudenmodulation . . . . .	2
1.2	Frequenzmodulation . . . . .	3
1.3	Modulationsschaltungen . . . . .	5
1.3.1	Der Ringmodulator . . . . .	5
1.3.2	Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub . . . . .	7
1.4	Demodulationsschaltungen . . . . .	8
1.4.1	Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen . . . . .	8
1.4.2	Demodulation frequenzmodulierter Schwingungen . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>11</b>
3.1	Amplitudenmodulation mit Ringmodulator . . . . .	11
3.2	Amplitudenmodulation mit Trägerabstrahlung . . . . .	13
3.3	Frequenzmodulation . . . . .	13
3.4	Proportionalität zwischen Gleichspannung und Phase der Wechselspannung am Ringmodulator . . . . .	14
3.5	Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung mit Ringmodulator . . . . .	15
3.6	Demodulation mit Gleichrichterdiode . . . . .	17
3.7	Demodulation einer frequenzmodulierten Schwingung . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>18</b>

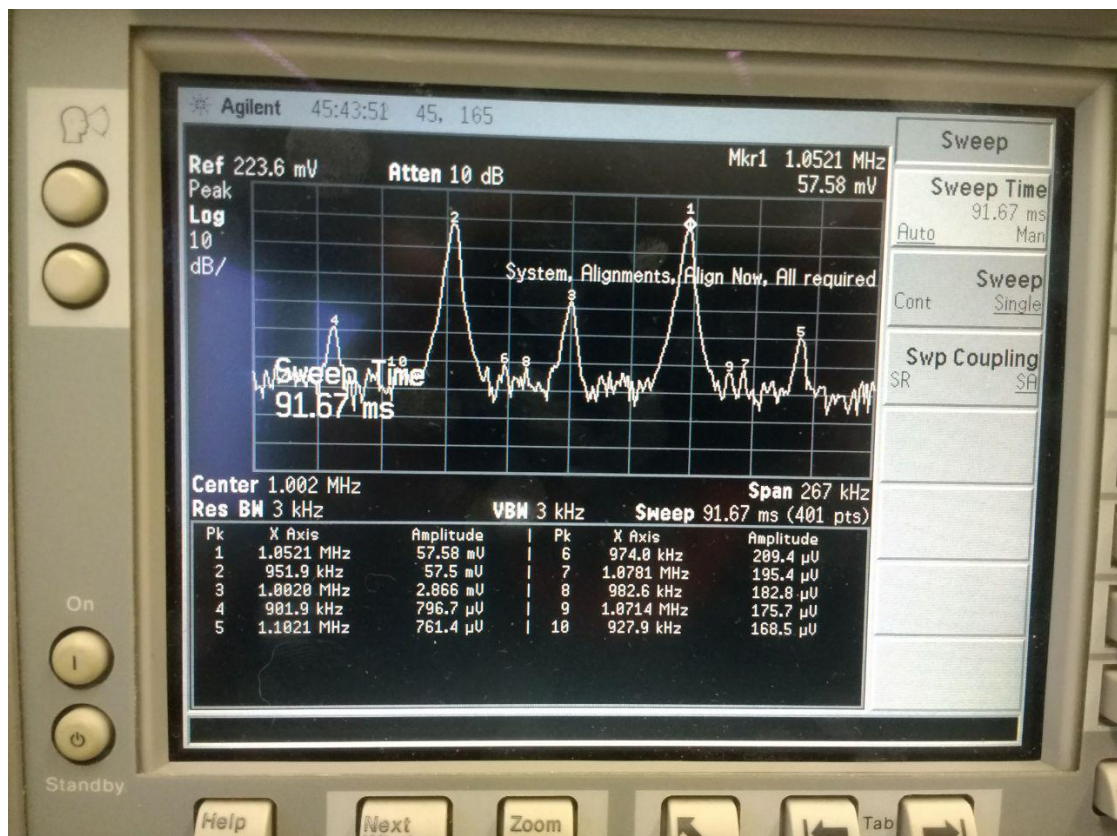


Abbildung 1: Zeitabhängigkeit der Signalspannung eines Amplitudenmodulierten Signals

## 1 Theorie

Um Informationen mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen übertragen zu können werden Verfahren benötigt um diesen Wellen Informationen aufprägen zu können. Solche Verfahren werden Modulationsverfahren genannt, dass Rückgewinnen der Informationen aus der modulierten Welle nennt man Demodulation.

Die Hochfrequenztechnik kennt eine Reihe von Modulationsverfahren, welche unter Ausnutzung einer periodischen Änderung von Amplitude, Frequenz oder Phase einer Trägerwelle dieser Informationen aufprägen.

### 1.1 Amplitudenmodulation

Die einfachste Form der Amplitudenmodulation lässt die Amplitude einer hochfrequenten Trägerwelle  $U_T(t)$  im Rythmus einer niederfrequenten Modulationswelle  $U_M(t)$  variieren. Die Trägerwelle besitzt die Frequenz  $\omega_T$  und die Modulationswelle die Frequenz  $\omega_M$ .

Die amplitudenmodulierte Schwingung soll dann eine mit  $\omega_M$  varrierende Amplitude

$$U_3(t) = U_T(1 + m \cos(\omega_M t)) \cos(\omega_T t) \quad (1.1.1)$$

besitzen. Wobei  $m = \gamma U_M$  den Modulationsgrad der Schwinung beschreibt.

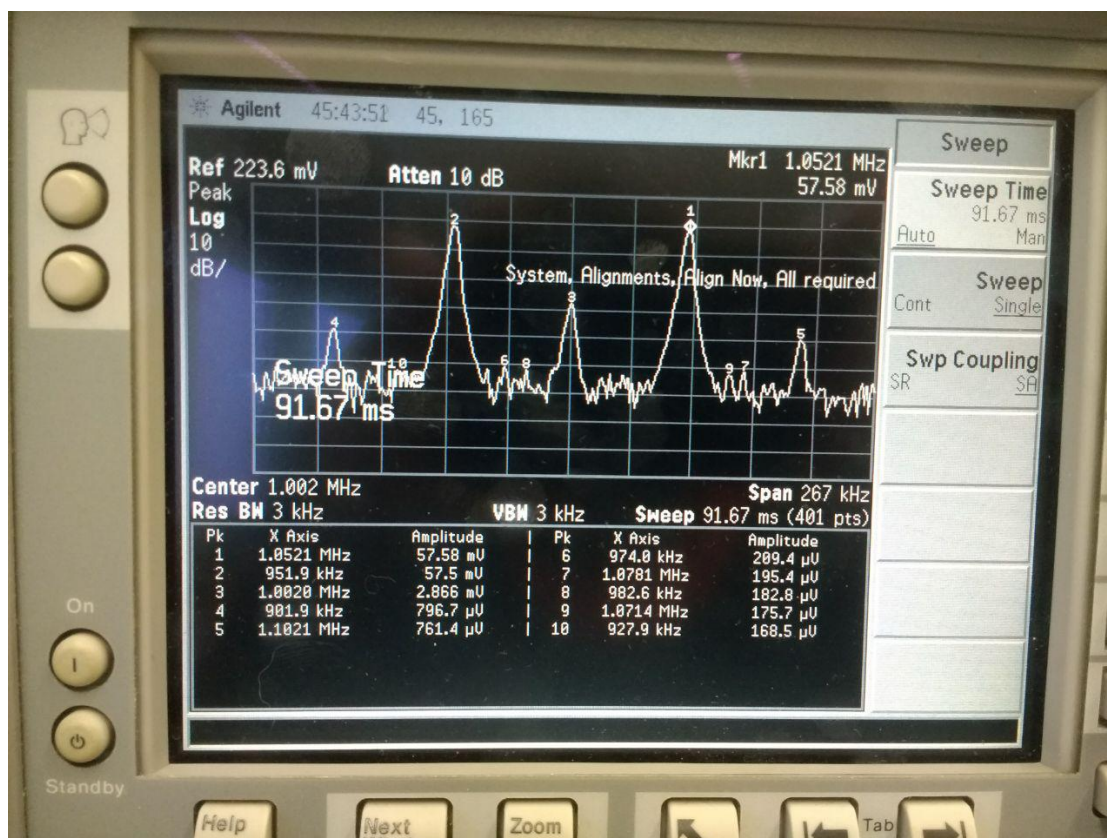


Abbildung 2: Frequenzspektrum einer Amplitudenmodulierten Schwingung

Wird durch geeignete Umformung oder Fouriertransformation das Frequenzspektrum der Schwinung analysiert

$$U_3(t) = U_T(\cos(\omega_T t) + \frac{1}{2}m \cos(\omega_T + \omega_M)t + \frac{1}{2}m \cos(\omega_T - \omega_M)t) \quad (1.1.2)$$

fällt auf, dass in diesem einfachen Fall bereits drei Frequenzen beteiligt sind.

Die Frequenz bei  $\omega_T$  nennt man Trägerfrequenz, diese Trägt keine Information und stellt einen dissipativen Anteil dar, welcher in der Praxis unerwünscht ist. Auch beschreiben die beiden Seitenbänder bei  $\omega_T - \omega_M$  und  $\omega_T + \omega_M$  die gleichen Informationen. Somit ist es üblich eines der Beiden Seitenbänder durch geeignete Filter zu unterdrücken. Wird die Trägerfrequenz und ein Seitenband unterdrückt wird auch von Einseitenbandmodulation mit Trägerunterdrückung gesprochen. Die großen Nachteile der Amplitudenmodulation besteht in ihrer geringen Störsicherheit und geringen Verzerrungsfreiheit.

## 1.2 Frequenzmodulation

Anders als bei der Amplitudenmodulation wird bei der Frequenzmodulation die momentane Schwingungsfrequenz im Rythmus des Modulationssignales variiert.

$$U(t) = U \sin(\omega_T t + m \frac{\omega_T}{\omega_M} \cos(\omega_M t)) \quad (1.2.1)$$

Durch Differentiation des Arguments des Sinues ergibt sich die Momentanfrequenz

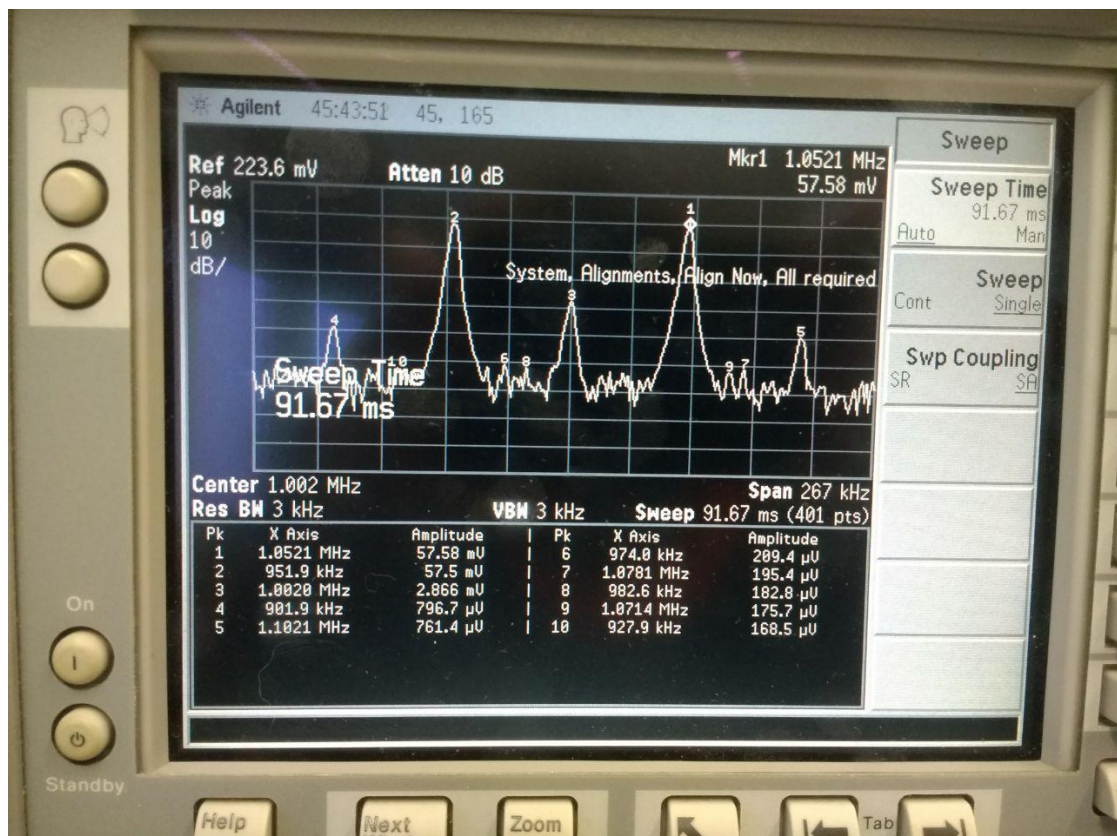


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf einer frequenzmodulierten Schwingung

$$f(t) = \frac{\omega_T}{2\pi} (1 - m \sin(\omega_M t)) \quad (1.2.2)$$

der Schwingung. Wobei  $m$  wieder den Modulationsgrad und  $\frac{m\omega_T}{2\pi}$  den Frequenzhub beschreibt. Der Frequenzhub ist es Maß dafür, wie Stark die Schwingungsfrequenz variiert. Im folgenden ist eine Schmalband-Frequenzmodulation zu sehen, welche sich durch

$$m \frac{\omega_T}{\omega_M} \ll 1 \quad (1.2.3)$$

auszeichnet.

Durch geeignete Umformung oder Fouriertransformation ist ersichtlich, dass auch das Frequenzspektrum der Frequenzmodulation sich aus drei Frequenzen zusammensetzt.

$$U(t) = U(\sin(\omega_T t) + \frac{m\omega_T}{2\omega_M} \cos(\omega_T + \omega_M)t - \frac{m\omega_T}{2\omega_M} \cos(\omega_T - \omega_M)t) \quad (1.2.4)$$

Es fällt auf, dass die beiden Seitenbänder im Fall der Frequenzmodulation um  $\frac{\pi}{2}$  gegenüber der Trägerschwingung verschoben sind. Es ist anzumerken, dass das o.g. Frequenzspektrum nur im Fall der schwach frequenzmodulierten Schwingung

$$\frac{m\omega_T}{\omega_M} \ll 1 \quad (1.2.5)$$



gültigkeit besitzt. Im Fall der starken Frequenzmodulation

$$m\omega_T \approx \omega_M \quad (1.2.6)$$

besitzt das Frequenzspektrum eine komplexere Darstellung der Form

$$U(t) = U \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(\frac{m\omega_T}{\omega_M}\right) \sin(\omega_T + n\omega_M)t \quad (1.2.7)$$

wobei  $J_n$  die Besselsche Funktion n-ter Ordnung ist. Es zeigt sich, dass für hohe Modulationsgrade das Frequenzspektrum im prinzip bis zu beliebig hohen Frequenzen reicht. Es reicht jedoch in der Praxis nur Frequenzen in der Nähe der Trägerfrequenz zu berücksichtigen, da

$$J_{\pm n}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \left(\frac{ex}{2n}\right)^n \quad (1.2.8)$$

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

### 1.3 Modulationsschaltungen

Um die Amplitude einer Trägerschwingung zu modulieren 1.1.1 wird ein Bauteil benötigt, welches das Produkt aus zwei Eingangsspannungen bilden kann. Grundsätzlich ist das mit jedem Bauteil möglich, welches eine nichtlineare Kennlinie besitzt. Eine solche Schaltung kann z.B. mit Hilfe einer Diode gemäß 4 realisiert werden.

Wird die Summe von Träger- und Modulatorspannung für die Spannung in die Potenzenentwicklung der Diodenkennlinie eingesetzt

$$I(U_T + U_M) = a_0 + a_1(U_T + U_M) + a_2(U_T^2 + U_M^2) + 2a_2U_TU_M + \dots \quad (1.3.1)$$

liefert das vierte Reihenglied das geforderte Produkt. Es fällt auf das zusätzliche Störterme auftreten, dessen Frequenzen  $\omega_M, 2\omega_M$  und  $2\omega_T$  allerdings weit außerhalb des zu übertragenden Frequenzbandes  $\omega_T - \omega_M$  bis  $\omega_T + \omega_M$  liegen, sodass diese mit einem geeigneten Bandfilter unterdrückt werden können. Durch das Erzeugen der vielen nicht genutzten Frequenzen ist so eine Schaltung sehr unökonomisch. Es ist wünschenswert das die Störenden Frequenzanteile erst garnicht erzeugt werden.

#### 1.3.1 Der Ringmodulator

Der Ringmodulator besteht, wie der Name bereits andeutet, aus einem Ring von vier zusammengeschaltet Dioden.

Diese Schaltung ist in der Lage das Produkt von Träger und Modulationssignal zu bilden ohne störende parasitäre Frequenzanteile zu erzeugen. Die abgenommene Spannung ist direkt proportional zum Produkt der Eingangsspannungen.

$$U_R(t) = \gamma U_M(t) \cdot U_T(t) \quad (1.3.2)$$

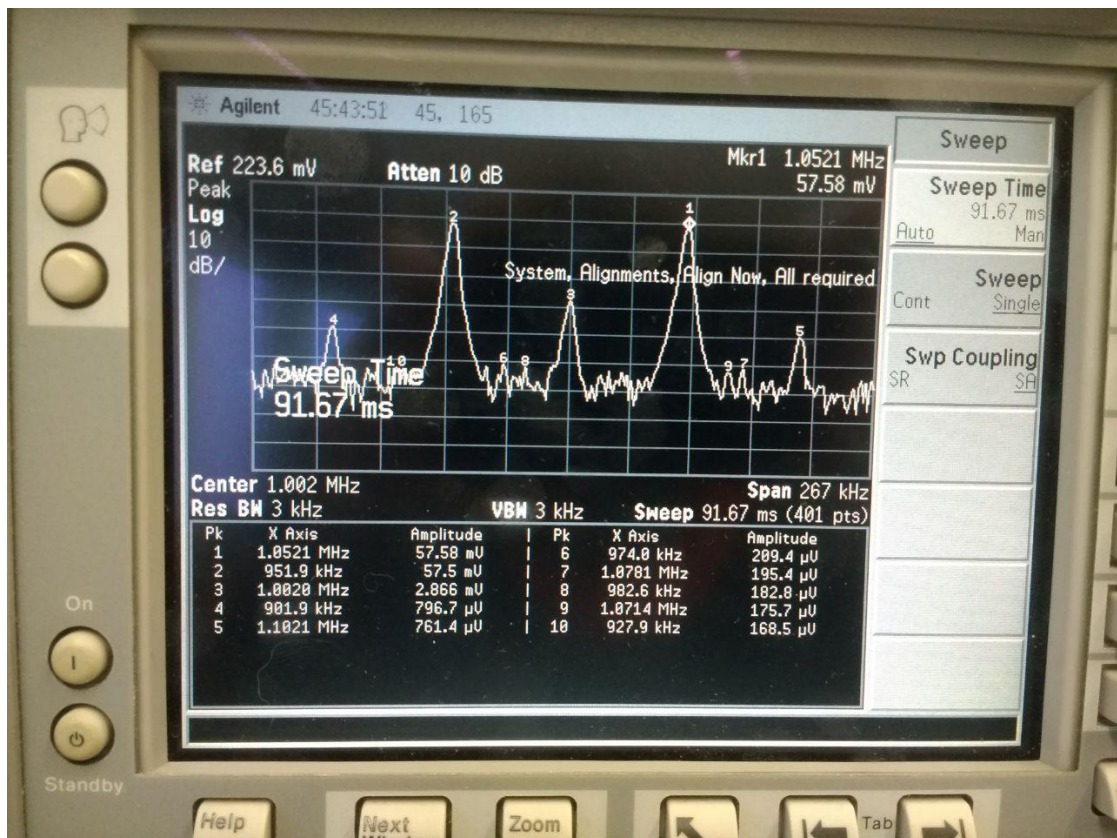


Abbildung 4: Primitive Modulatorschaltung

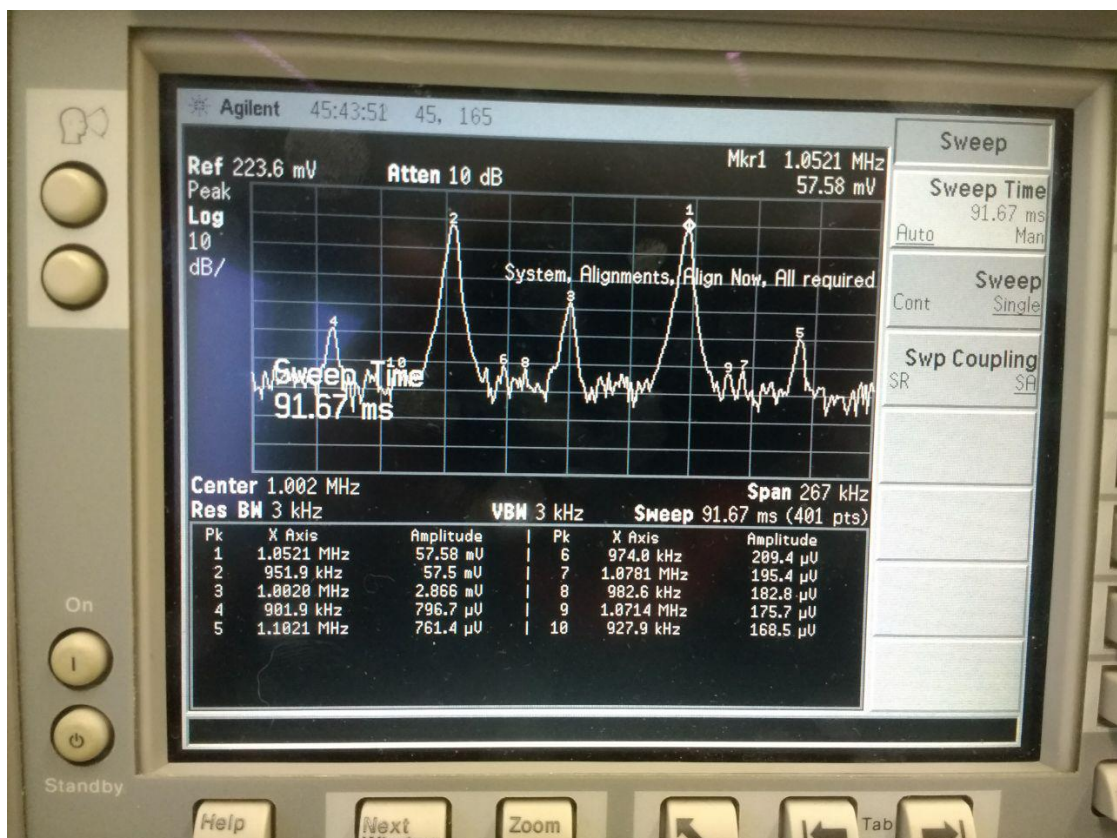


Abbildung 5: Primitive Modulatorschaltung

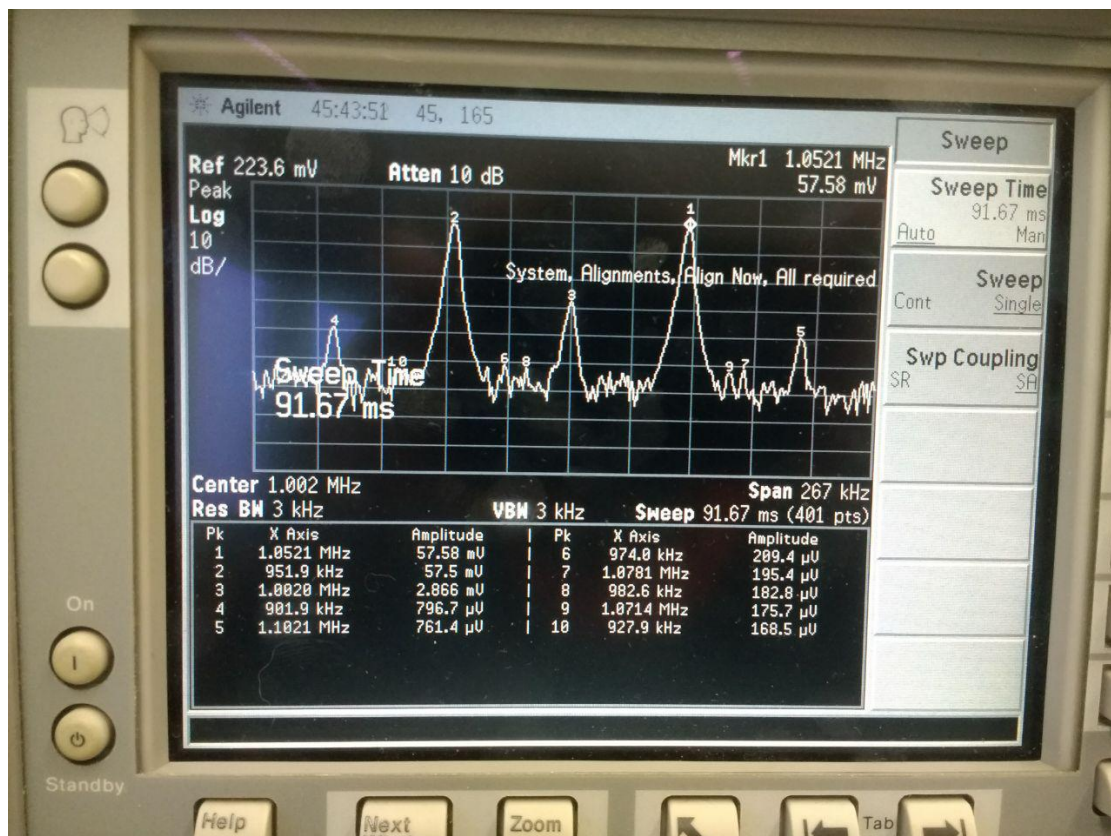


Abbildung 6: Primitive Modulatorschaltung

Es ist anzumerken, dass  $\gamma$  die Einheit  $\frac{1}{V}$  besitzt. Es ist direkt ersichtlich, dass der Ringmodulator die Trägerabstrahlung unterdrückt. Werden zwei Cosinus-Signale für  $U_T$  und  $U_M$  mit den Frequenzen  $\omega_T$  und  $\omega_M$  in 1.3.2 eingesetzt folgt

$$U_R(t) = \gamma U_T U_M \frac{1}{2} \cos((\omega_T + \omega_M)t + \phi) + \gamma U_T U_M \frac{1}{2} \cos((\omega_T - \omega_M)t - \phi) \quad (1.3.3)$$

Wie bereits angesprochen fehlt in diesem Frequenzspektrum der Trägeranteil  $\omega_T$ .

### 1.3.2 Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub

Um einen Frequenzmodulator mit geringem Frequenzhub zu realisieren wird ein Ringmodulator genutzt, jedoch wird wie aus 1.2.4 ersichtlich ist ein  $\frac{\pi}{2}$  Phasenschieber notwendig. Dieser wird mit Hilfe eines Iso-T Leistungsteiler parallel neben dem Ringmodulator angeordnet.

Der Phasenschieber wird mit Hilfe eines Laufzeitkabels realisiert.



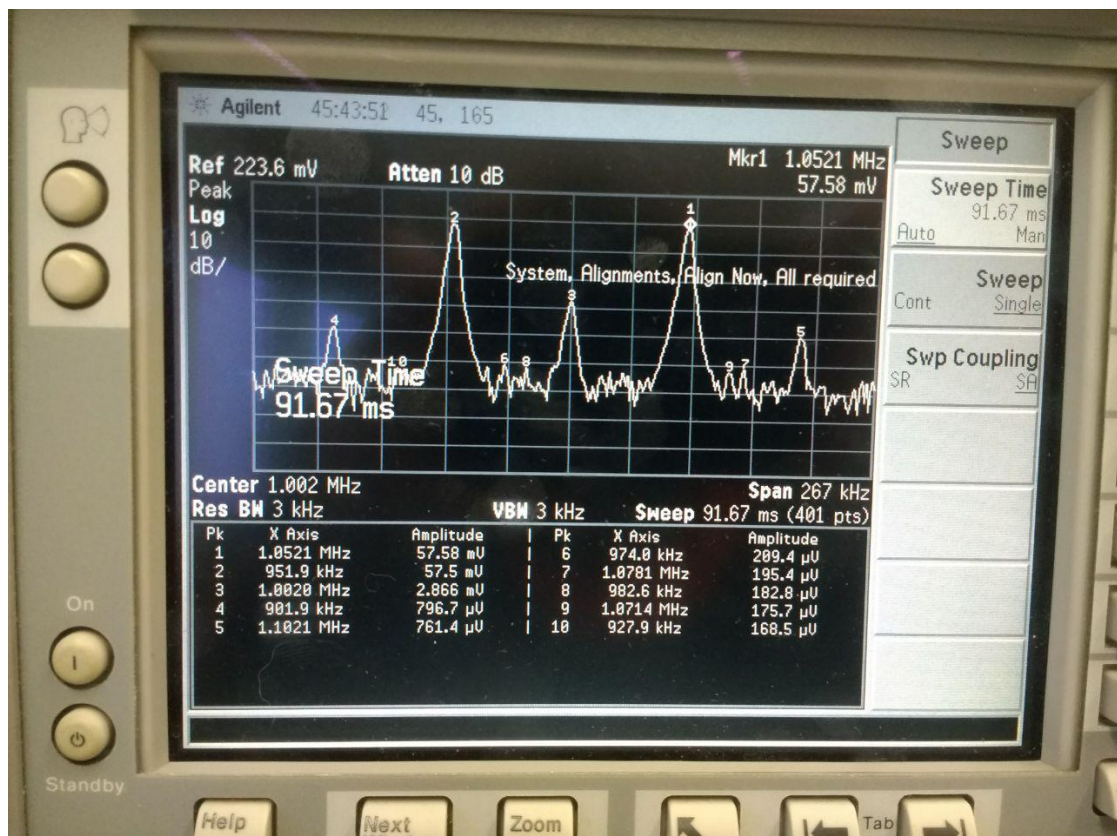


Abbildung 7: Primitive Modulatorschaltung

## 1.4 Demodulationsschaltungen

### 1.4.1 Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen

Mit Demodulatorschaltungen ist es möglich aus einem modulierten Signal die Modulationsfrequenz  $\omega_M$  zurück zu gewinnen. Wird am einen Eingang eines Ringmodulators ein Signal mit den Frequenzen  $\omega_T - \omega_M$  und  $\omega_T + \omega_M$  angelegt und am anderen Eingang das Trägersignal mit  $\omega_T$ , so liefert der Ausgang der Schaltung ein Signal mit  $\omega_M$ ,  $2\omega_T - \omega_M$  und  $2\omega_T + \omega_M$ . Alle von der Modulationsfrequenz abweichenden Signalanteile lassen sich mit Hilfe eines geeigneten Bandpasses gut unterdrücken, so dass am Ausgang nun noch ein Signal mit der Modulationsfrequenz  $\omega_M$  anliegt. Ein Problem welches sich bei der Demodulation stellt ist, dass ein Trägersignal benötigt wird, welches Phasenstarr mit dem Trägersignal des Senders gekoppelt sein muss. Um eine solche Kopplung zu gewährleisten wird i.A. ein Phasenregelkreis oder PLL-Schaltung verwendet.

Es ist möglich die Problematik der festen Phasenbeziehung zwischen der Signal und Referenzspannung mit Hilfe einer Gleichrichter-Diode zu vermeiden.

Die Gleichrichter-Diode schneidet sämtliche negative Halbwellen ab, sodass nach der Diode eine Gleichgerichtete modulierte Hochfrequenz-Spannung abgegriffen werden kann. Die enthaltenen hochfrequenten Anteile mit den Frequenzen  $\omega_T$ ,  $2\omega_T$ ,  $4\omega_T$  u.v.m. lassen sich mit einem Tiefpass unterdrücken, so dass am Ausgang die Modulationsspannung abgegriffen werden kann.

Problematisch ist jedoch, dass die Diode eine exponentielle Kennlinie besitzt. Die Abweichung vom gewünschten linearen Verhalten begründet Verzerrungen in der Rückge-

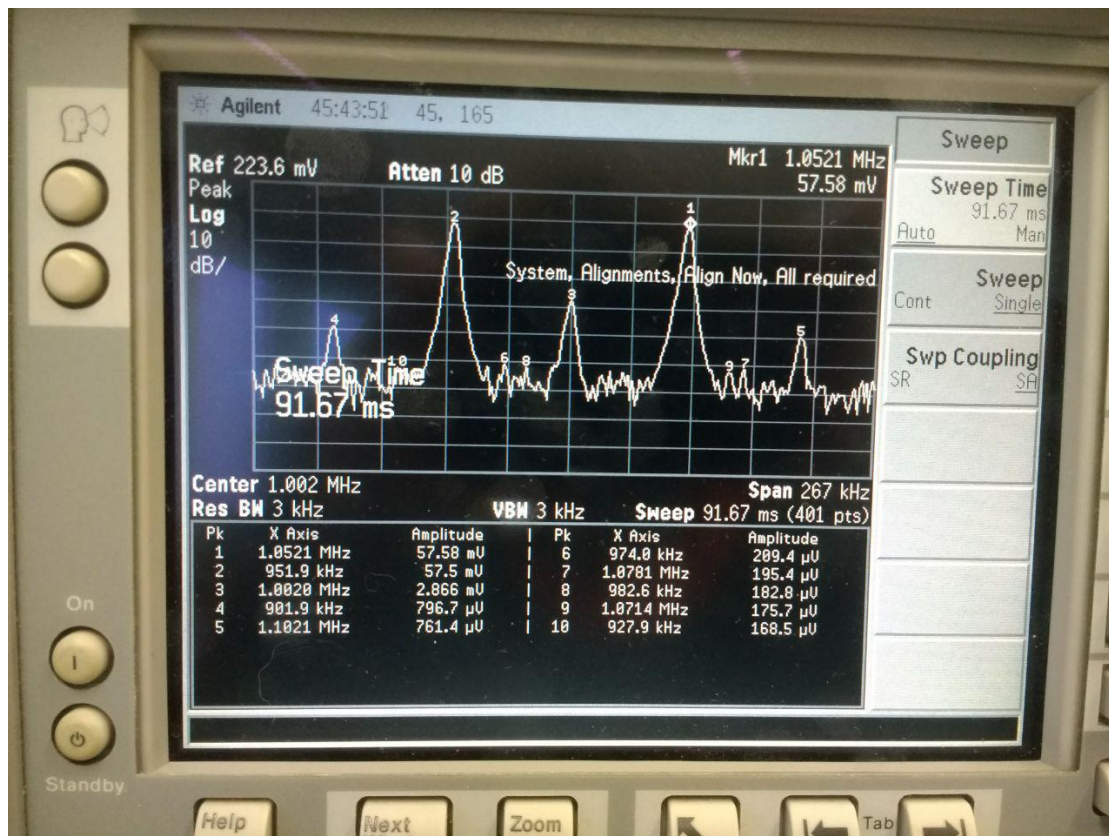


Abbildung 8: Primitive Modulatorschaltung

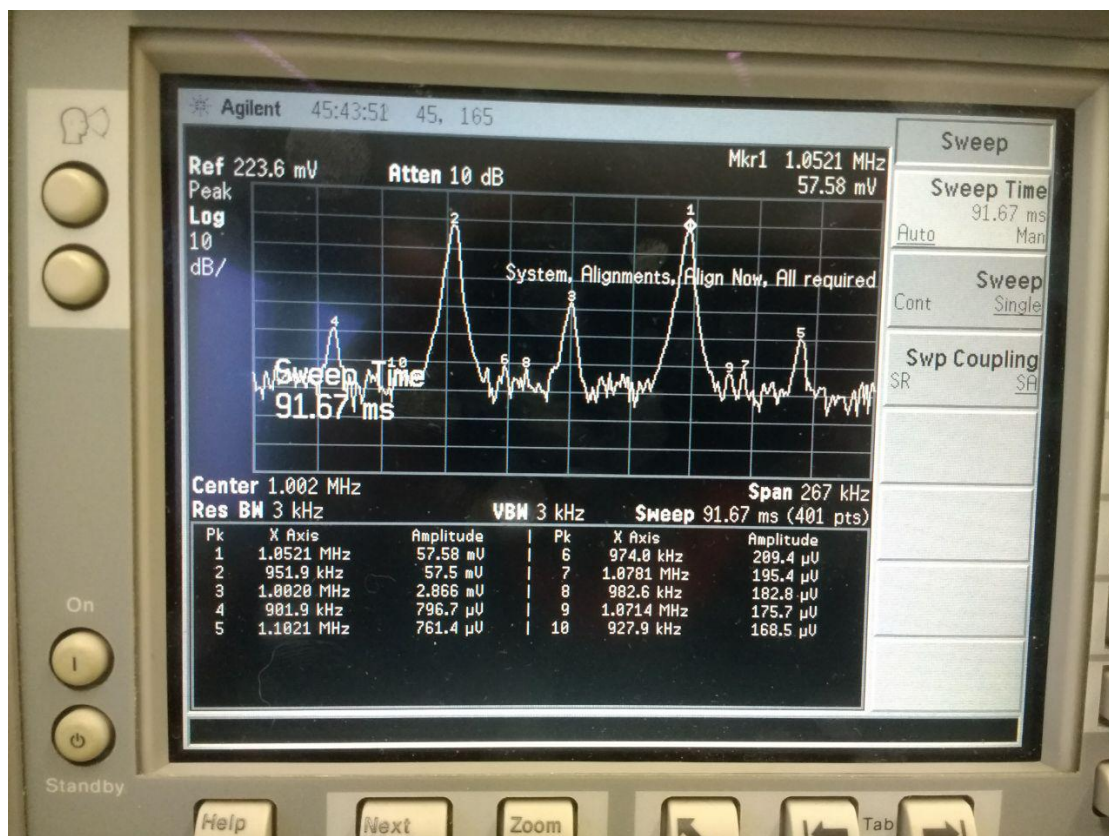


Abbildung 9: Primitive Modulatorschaltung



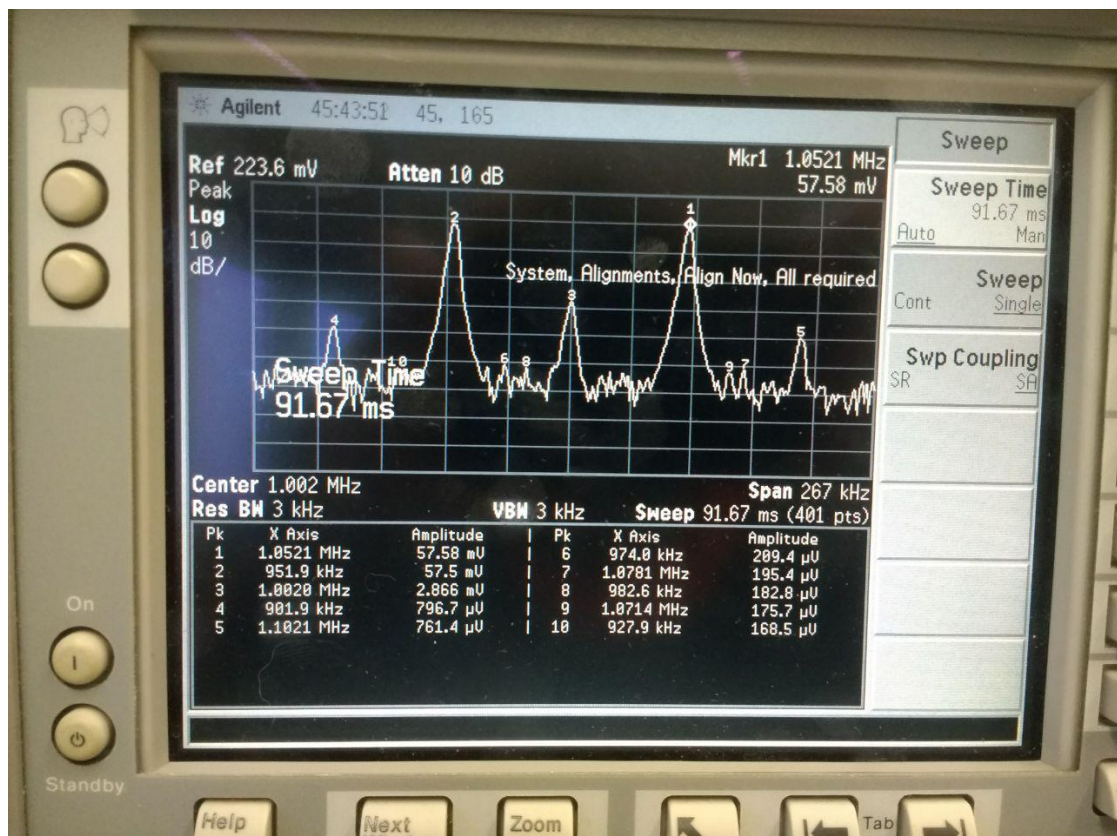


Abbildung 10: Primitive Modulatorschaltung

winnung des Modulationssignales. Dieses Problem lässt sich in den Griff bekommen indem mit geringen Modulationsgraden, also kleinen Auslenkungen gearbeitet wird oder eine Gegentaktschaltung verwendet wird.

#### 1.4.2 Demodulation frequenzmodulierter Schwingungen

Um das Modulationssignal aus einer frequenzmodulierten Schwingung gewinnen zu können bietet sich ein so.g Flankenmodulator an.

Der Flankenmodulator besteht im wesentlichen aus einem Schwingkreis, in welchem die Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung im Falle erzeugener Schwingung ausgenutzt wird. Hierfür wird die Resonanzfrequenz des Schwingkreises so eingestellt, dass die Trägerfrequenz  $\omega_T$  mitten in der steilen Flanke der Resonanzkurve liegt. Ändert sich nun in Folge der Frequenzmodulation die Momentanfrequenz der modulierten Schwingung, so entsteht am Ausgang des Schwingkreises eine hochfrequente Spannung, deren Amplitude im Rhythmus der Modulation schwangt. Somit wurde die Frequenzmodulation in eine Amplitudenmodulation überführt, welche bereits behandelt wurde.

## 2 Durchführung

a) Mithilfe eines Ringmodulators wird ein Amplitudenmoduliertes Signal erzeugt. Die dabei entstehende Schwebung wird anschließend mit einem Oszilloskop visualisiert.

- b)** Es wird mit Hilfe eines Frequenzanalysators das Frequenzspektrum des in a) erzeugten Signals sichtbar gemacht.
- c)** Aufgabenteil a und b wird mit einer Diode zur Modulation wiederholt und die selben Signaleigenschaften untersucht. Außerdem wird gezeigt das zusätzlich Oberwellen von  $\omega_T$  auftreten.
- d)** Um das in amplitudenmodulierte Signal zu demodulieren wird ein Ringmodulator verwendet. Mithilfe einer Schaltung gemäß Abbildung ?? und eines Multimeters wird die Proportionalität am Ausgang X mit dem Cosinus der Phase zwischen R und L gezeigt.
- e)** Das Multimeter aus 2 wird durch ein Oszilloskop ersetzt und das demodulierte Signal sichtbar gemacht.
- f)** Mit Hilfe einer Gleichrichterdiode wird ein amplitudenmoduliertes Signal demoduliert. Außerdem wird die Zeitabhängigkeit vor und hinter dem Tiefpass dargestellt.
- g)** Es wird ein frequenzmoduliertes Signal erzeugt, welches auf einem Oszilloskop dargestellt wird. Anschließend wird der Frequenzhub und der Modulationsgrad ermittelt und das Frequenzspektrum untersucht.
- h)** Abschließend wird ein frequenzmoduliertes Signal demoduliert und das Ergebnis visualisiert.

### 3 Auswertung

Fehler und Ausgleichsrechnungen werden mit dem Python-Paket ScyPy [**scipy**] berechnet.

#### 3.1 Amplitudenmodulation mit Ringmodulator

Mit dem Ringmodulator wird die Amplitude eines Signals moduliert. Das Eingangs- und Ausgangssignal sind in Abbildung 11 zu sehen. Das Trägersignal hatte eine Amplitude von  $U_T = 980 \text{ mV}$  und die Frequenz  $\omega_T = 1 \text{ MHz}$ , das Modulationssignal hatte eine Amplitude von  $U_M = 116 \text{ mV}$  und die Frequenz  $\omega_M = 50 \text{ kHz}$ . Es entsteht eine Schwebung, die Trägerfrequenz ist hier nicht zu erkennen. Die prominentesten Linien in dem Frequenzspektrum in Abbildung 12 sind die der Modulationsfrequenz. Dazwischen ist als kleinerer Peak auch die Trägerfrequenz zu sehen, die mit dem Ringmodulator nicht komplett unterdrückt wird, aber signifikant kleiner als die Seitenbänder ist.



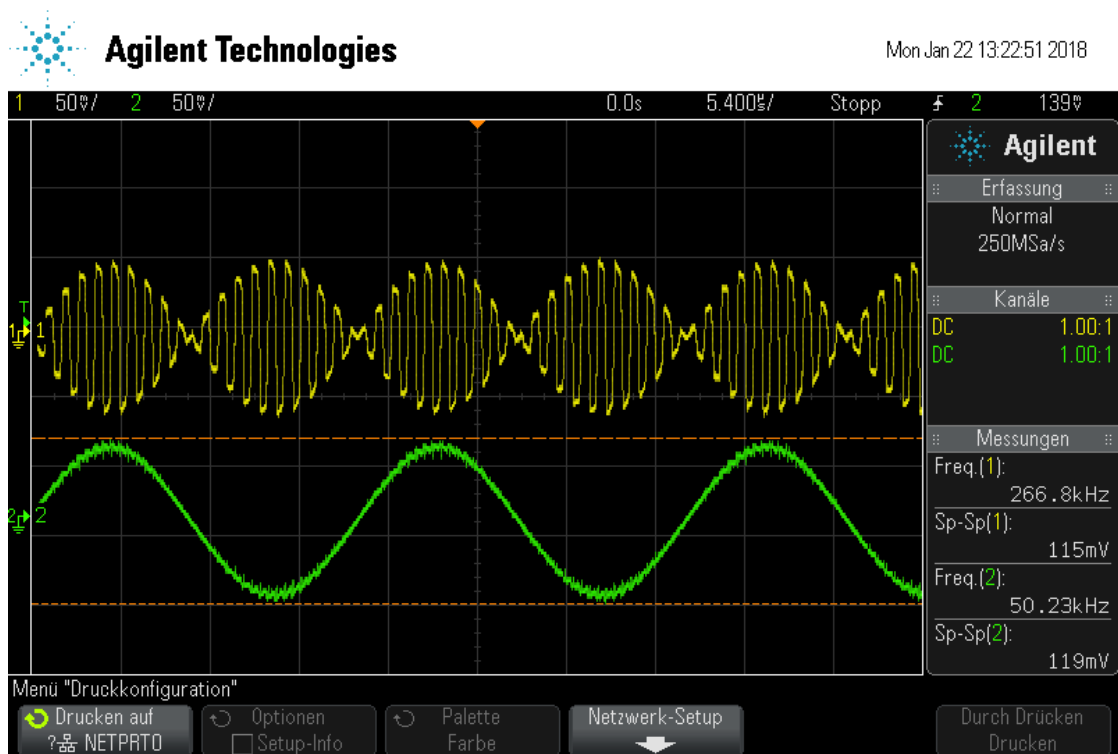


Abbildung 11: Amplitudenmodulation - grün das Eingangssignal, gelb das amplitudenmodulierte Signal

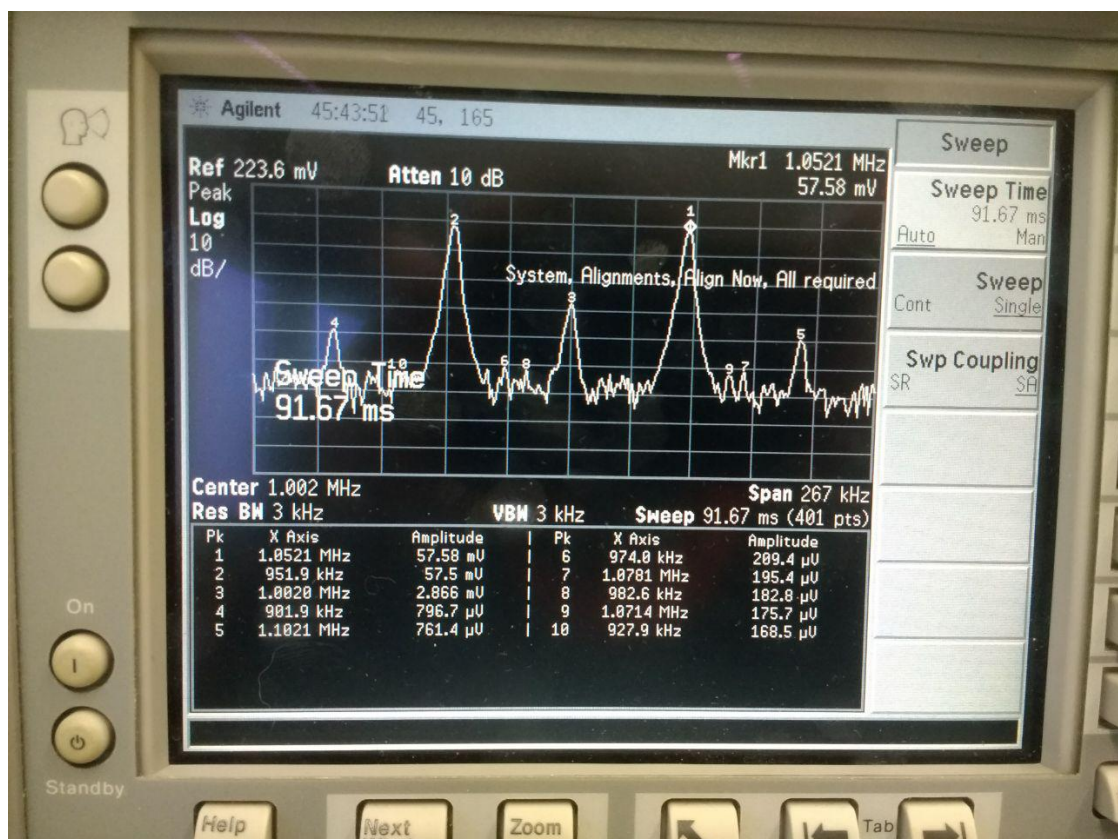


Abbildung 12: Amplitudenmodulation - Peak 3 mit der Trägerfrequenz, Peak 1 und 2 die Seitenbänder

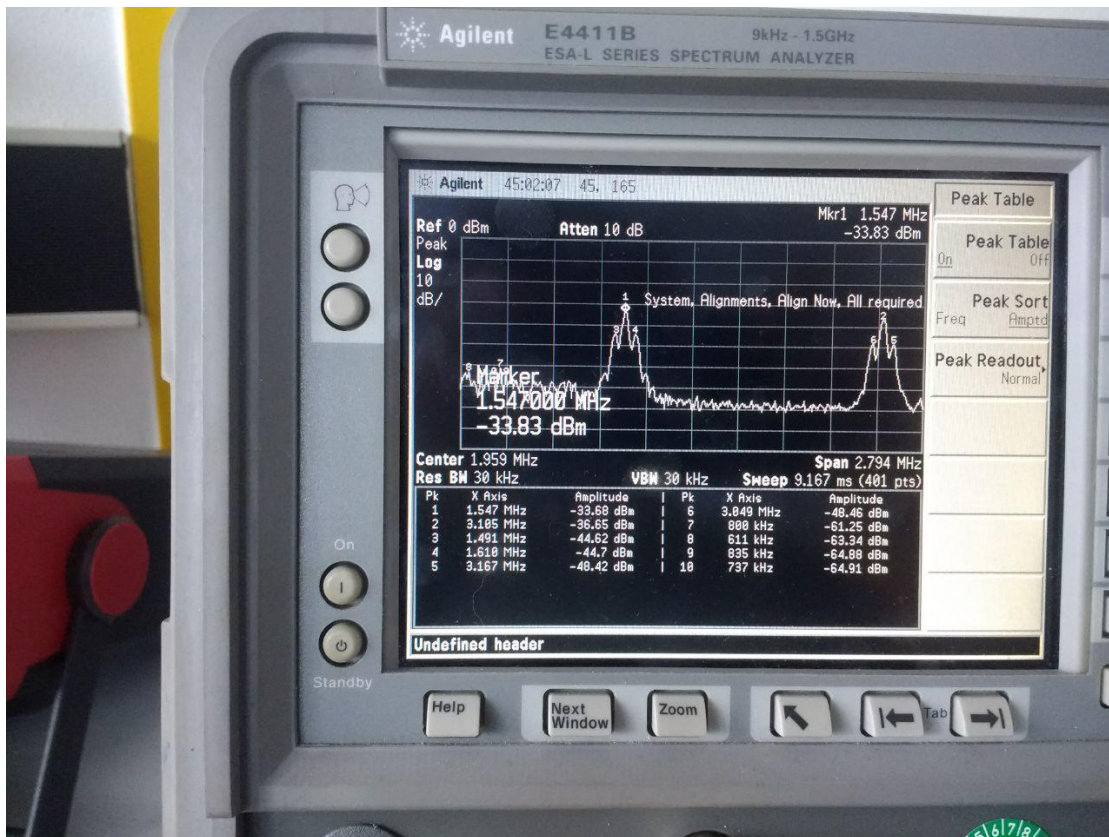


Abbildung 13: Amplitudenmodulation mit Oberwellen, Trägerabstrahlung und Seitenbändern

### 3.2 Amplitudenmodulation mit Trägerabstrahlung

In Abbildung 13 ist das Frequenzspektrum einer amplitudenmodulierten Schwingung mit Trägerabstrahlung zu sehen. Das Trägersignal hatte eine Amplitude von  $U_T = 1.17 \text{ V}$  und die Frequenz  $\omega_T = 1.55 \text{ MHz}$ , das Modulationssignal hatte eine Amplitude von  $U_M = 159 \text{ mV}$  und die Frequenz  $\omega_M = 63 \text{ kHz}$ . Abbildung 14 zeigt von dem gleichen Signal eine Oszilloskop-Aufnahme. In Abbildung 14 lässt sich der Modulationsgrad aus dem Verhältnis der Amplitude der Maxima und der Minima bestimmen. Da die Amplitude zwischen  $U_{\min} = U_T(1 - m)$  und  $U_{\max} = U_T(1 + m)$  schwankt, ist der Modulationsgrad

$$m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} = \frac{52 \text{ mV} - 26 \text{ mV}}{52 \text{ mV} + 26 \text{ mV}} = 0.33.$$

Eine andere Methode, den Modulationsgrad zu bestimmen, ist mit der Pulshöhe der Träger- und Modulationsfrequenz im Frequenzanalysator. Dazu wird die Pulshöhe, die in der Einheit eines Leistungspegels angegeben wird, mit  $P = 10^{L_P/10} \cdot 1 \text{ W}$  in eine Leistung umgerechnet. Dann ist der Modulationsgrad  $m = 4 \cdot \frac{P_M}{P_T}$

$$m_1 = 4 \cdot \frac{10^{-44.62/10}}{10^{-33.68/10}} = 0.322, \quad m_2 = 4 \cdot \frac{10^{-44.7/10}}{10^{-33.68/10}} = 0.316$$

### 3.3 Frequenzmodulation

Das Trägersignal hatte eine Amplitude von  $U_T = 1.17 \text{ V}$  und die Frequenz  $\omega_T = 1.55 \text{ MHz}$ , das Modulationssignal hatte eine Amplitude von  $U_M = 159 \text{ mV}$  und die Frequenz  $\omega_M =$

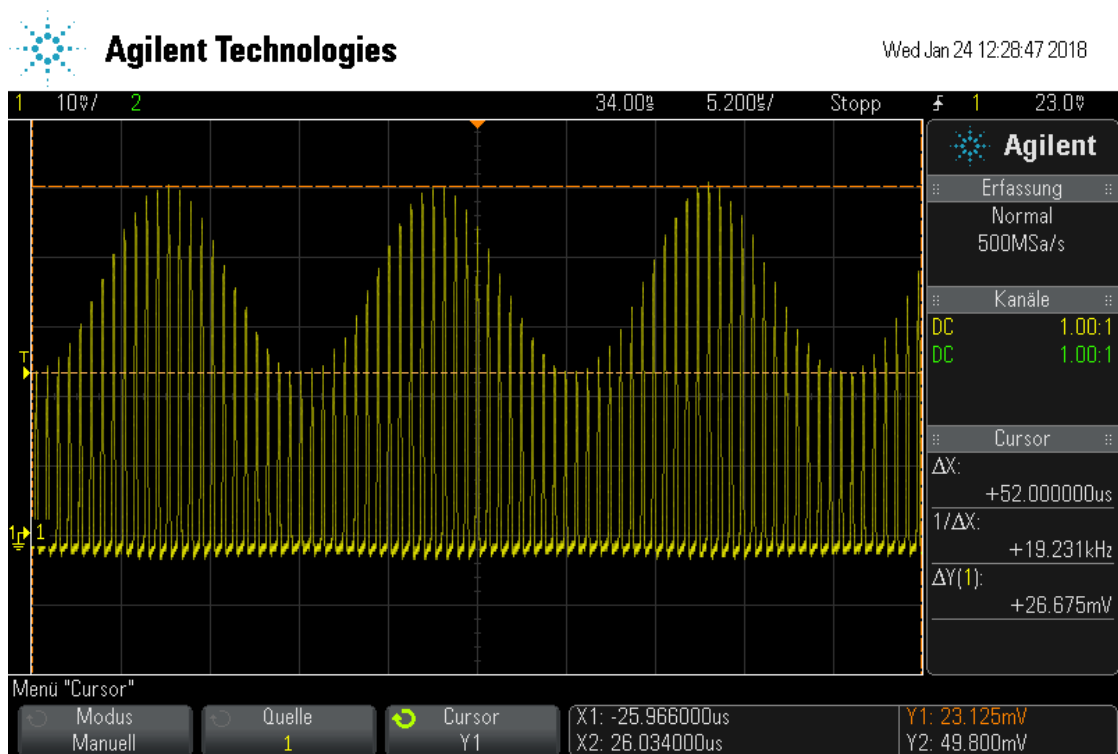
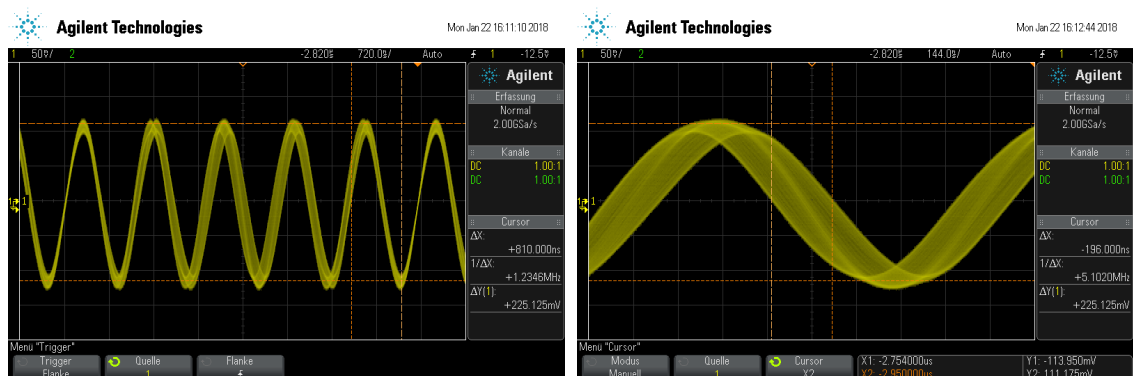


Abbildung 14: Amplitudenmodulation - Bestimmung des Modulationsgrades



Frequenzmodulation

Frequenzmodulation – Detailansicht zur Bestimmung der Breite der Verschmierung

Abbildung 15: Frequenzmodulation eines sinusförmigen Trägersignals.

63 kHz. Die Breite der Verschmierung in Abbildung 15 ist an der maximalen Stelle  $\Delta t = 196 \text{ ns}$ . Aus der Trägerfrequenz und der gemittelten Verschmierung ergibt sich eine Periodendauer von  $T_{\min} = 645.2 \text{ ns} - \frac{196 \text{ ns}}{5} = 606 \text{ ns}$  bzw.  $T_{\max} = 645.2 \text{ ns} + \frac{196 \text{ ns}}{5} = 684.4 \text{ ns}$ .

### 3.4 Proportionalität zwischen Gleichspannung und Phase der Wechselspannung am Ringmodulator

Die Annahme ist, dass eine Proportionalität zwischen Gleichspannung und Phase der Wechselspannung am Ringmodulator besteht. Um diesen Zusammenhang zu überprüfen, wird die Gleichspannung in Abhängigkeit des Arguments des Cosinus gemessen. Es kann



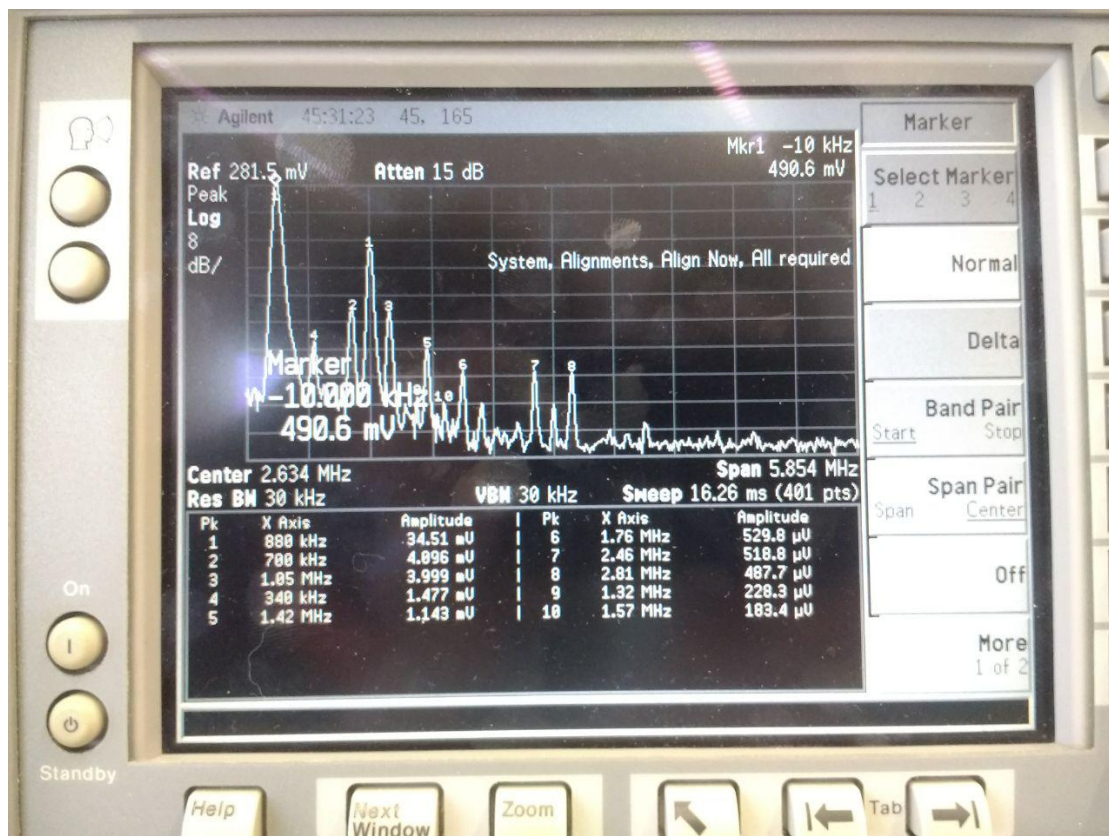


Abbildung 16: Frequenzmodulation – Frequenzspektrum

entweder die Laufzeit oder die Frequenz des Trägersignals variiert werden. In diesem Fall wird die Frequenz verändert, sodass

$$U = U_0 \cos(\omega_T \cdot t + \varphi)$$

$$\arccos \frac{U}{U_0} = \omega_T \cdot t + \varphi \quad (3.4.1)$$

gelten muss.

Eine lineare Ausgleichsrechnung der Form  $U/U_0 = A \cdot \omega_T + B$  an die Messwerte in Table 1 ergibt die Parameter  $A = -0.35 \pm 0.02$  und  $B = 3.37 \pm 0.09$  und ist in Abbildung 17 dargestellt. Die geringen Fehler des linearen Fits von 5.7% für die Steigung bzw. 2.8% für den y-Achsenabschnitt zeigen, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs gerechtfertigt ist.

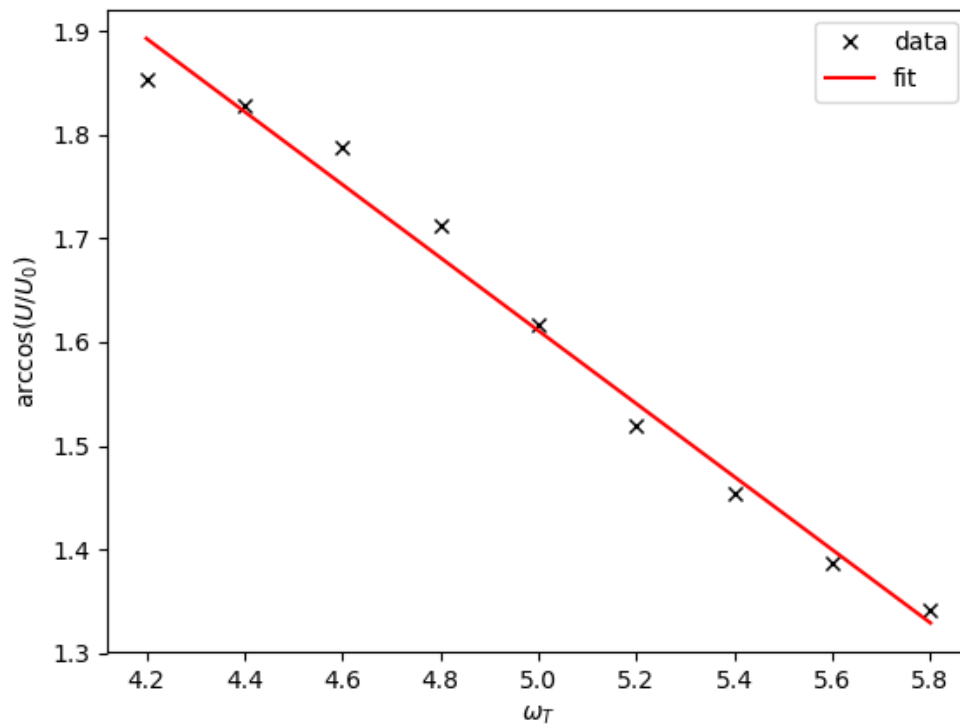
### 3.5 Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung mit Ringmodulator

In Abbildung 18 ist die Oszilloskop-Aufnahme eines Signals zu sehen, dessen Amplitude zunächst moduliert und daraufhin wieder demoduliert wird. In gelb ist das Eingangssignal, die grüne Kurve ist das um einen festen Faktor phasenverschobene und in der Amplitude reduzierte Signal.

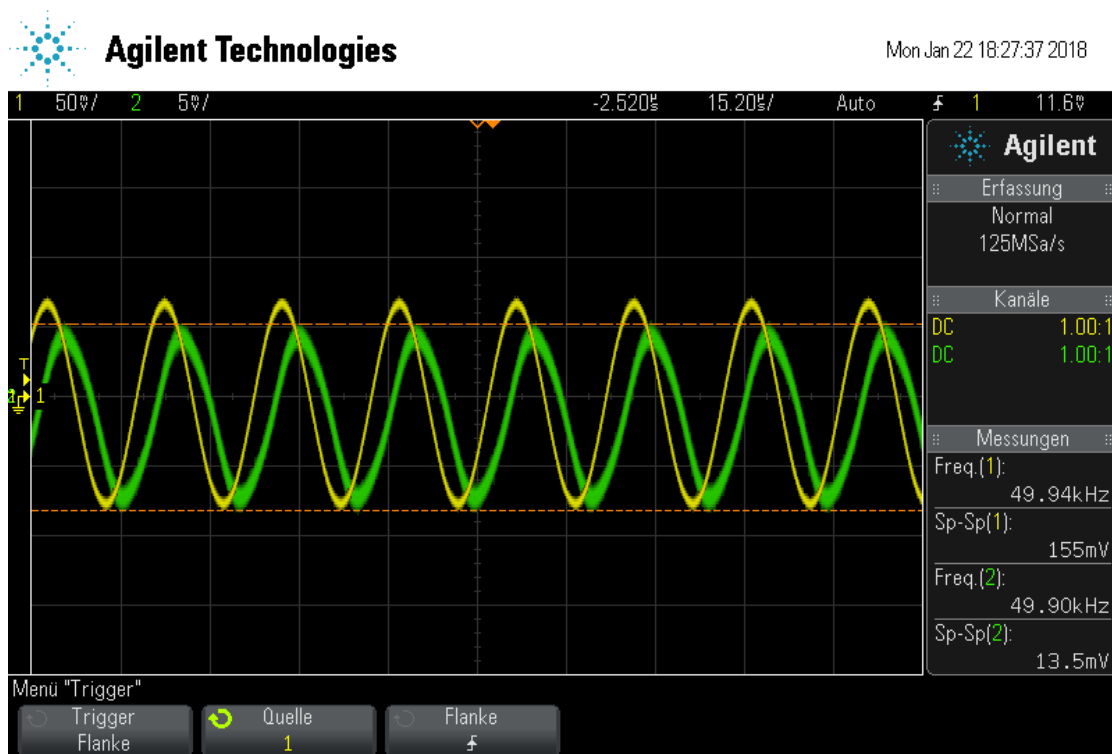


**Tabelle 1:** Messwerte für den linearen Zusammenhang zwischen Gleichspannung und Phase der Wechselspannung.

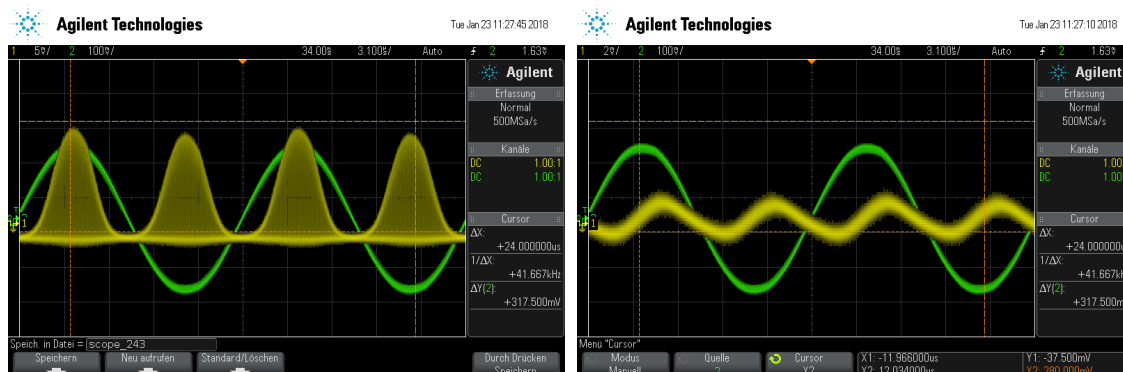
$\omega_T/\text{MHz}$	$U/\text{mV}$	$U_0/\text{mV}$
4.2	-138	496
4.4	-116	456
4.6	-86	400
4.8	-51	362
5.0	-16	348
5.2	20	388
5.4	52	446
5.6	89	488
5.8	116	509



**Abbildung 17:** Lineare Ausgleichsrechnung zur Veranschaulichung des linearen Zusammenhangs zwischen  $\cos \varphi$  und  $U$ .



**Abbildung 18:** Amplituden(de-)modulation - gelb das Eingangssignal, grün das amplitudenmodulierte und daraufhin demodulierte Signal

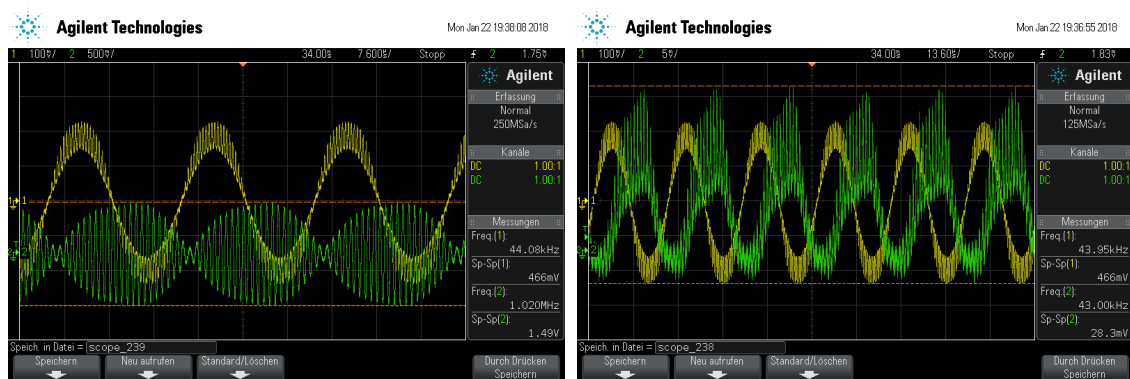


Das Eingangssignal ist in grün abgebildet, in Das Eingangssignal ist wieder in grün, in gelb das Signal nach der Diode in der Schaltung das demodulierte Ausgangssignal nach dem Tiefpass in ??.

**Abbildung 19:** Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals mit einer Gleichrichterdiode.

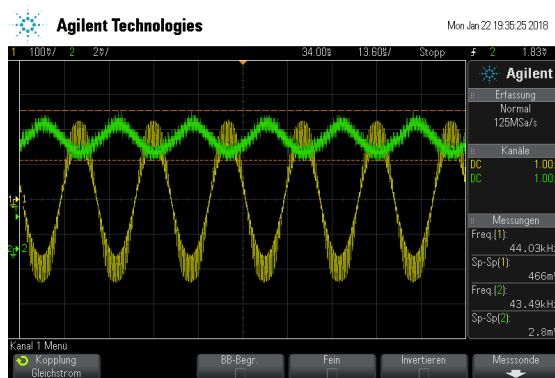
### 3.6 Demodulation mit Gleichrichterdiode

Die Diode in der Schaltung in ?? schneidet die negativen Halbwellen ab, wie in Abbildung 19a zu sehen und das RC-Element filtert als Tiefpass die hohen Frequenzen aus dem Signal, dies ist in Abbildung 19b zu sehen. Wie zu erwarten ist die Amplitude des Ausgangssignal nach dem Tiefpass stark reduziert, die negativen Halbwellen sind nun aufgrund der Gleichrichterdiode positiv und das Ausgangssignal ist gegenüber dem Eingangssignal phasenverschoben.



In gelb ist das Eingangssignal gezeigt, in grün das modulierte Signal – durch den LC-Kreis wird aus der frequenzmodierten Spannung ein amplitudenmoduliertes Signal.

Mit einer Gleichrichterdiode werden die negativen Halbwellen abgeschnitten.



Das in grün dargestellte Signal ist demoduliert und wurde nach dem Tiefpass abgegriffen.

Abbildung 20: Demodulation einer frequenzmodierten Schwingung.

### 3.7 Demodulation einer frequenzmodierten Schwingung

In Abbildung 20a ist mit der Schaltung in ?? aus dem frequenzmodierten Signal eine Amplitudenmodulation gemacht worden. Abbildung 20b und Abbildung 20c zeigen die anschließende Demodulation mit einer Gleichrichterdiode und einem RC-Tiefpass wie bereits in subsection 3.6 durchgeführt.

## 4 Diskussion

Alles tutti.