

# AM/FM-Modulation



Alfons Reichert

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1 Schwingkreis.....	4
2.2 Modulation.....	6
<b>3. Sender .....</b>	<b>14</b>
3.1 Schaltplan .....	14
3.2 Funktion.....	14
3.3 Betriebsdaten .....	15
3.4 Aufbau .....	15
3.5 Bauteile.....	16
3.6 Anmerkungen .....	17
<b>4. Empfänger .....</b>	<b>18</b>
4.1 Weltempfänger .....	18
4.2 AM .....	18
4.3 FM.....	20
4.4 Audion .....	25
4.5 Pendelaudion.....	28
4.6 Superhet .....	30
<b>5.Zahnbürstenradio .....</b>	<b>33</b>
<b>6. Antenne.....</b>	<b>40</b>
6.1 Schallwellen.....	40
6.2 EM-Wellen.....	41

# 1. Einleitung

Modulation ist ein wichtiges technisches Verfahren, um Informationen mit Hilfe einer elektromagnetischen Trägerwelle, die durch einen Oszillator erzeugt wird, zu übertragen. Es wird z.B. genutzt beim Radio, Fernsehen, Handy und WLAN. Diese Geräte sind zugleich Unterrichtsthemen, bei denen selbst der letzte Physikmuffel unter den Schülern aus seinem notorischen Dämmerenschlaf erwacht. Alleine der Anblick eines solchen Gerätes im Unterricht erweckt bei so manchem Schüler neue Lerngeister. Erschlägt der Lehrer ihn dann nicht sofort mit vielen elektronischen, technischen Raffinessen moderner Kommunikationsmittel, so verfällt er auch nicht so rasch wieder in jene eigentümliche Nullbocktrance, die die Schüler so häufig befällt und auch dem engagiertesten Lehrer den letzten Nerv raubt. Daher will ich in diesem kleinen Script einen Weg zu den physikalischen Grundlagen der Modulationstechnik weisen, der nicht allzu sehr mit Elektronik überfrachtet ist und dennoch die wesentlichen Aspekte verdeutlicht. Das man dabei nicht ganz auf Elektronik verzichten kann, liegt in der Natur der Sache.

Zunächst stelle ich kurz die theoretischen Grundlagen der Oszillatoren und des Modulationsprinzips vor. Mehrere Modulationsarten und Oszillatortypen werden in der Kommunikationstechnik eingesetzt. So wird beim Fernsehen das Bild durch Amplitudenmodulation AM, der Ton durch Frequenzmodulation FM übertragen. Beim Radio hängt die verwendete Modulationsart vom Frequenzbereich ab. LW und MW sind amplitudenmoduliert, KW und UKW frequenzmoduliert. Beim WLAN und Handy nutzt man FM. Sender mit AM sind störanfälliger, beanspruchen aber einen kleineren Frequenzbereich für die übertragenen Signale. Hinzu kommt noch die Pulsweitenmodulation PWM, die nicht Gegenstand dieses Skriptes ist.

Im zweiten Teil werden die grundlegenden Vorgänge untersucht, die sich beim Empfang der Signale in einem Radio abspielen. Als Sender dient ein einfacher KW-Oszillator vor, der aufgrund seines Aufbaues frequenz- und amplitudenmoduliert werden kann. Es wird gezeigt, dass der selbstgebaute Sender in einem Radio empfangen werden kann. Außerdem wird anhand mehrerer Versuche erklärt, wie im Empfangskreis bei AM bzw. FM das NF-Signal zurückgewonnen, also demoduliert wird.

Auch wenn unsere Kommunikation in den letzten Jahren zunehmend digital geworden ist, so hat sich an den physikalisch technischen Grundlagen wenig geändert. Auch digitale Signale werden durch Frequenz- oder Amplitudenmodulation mit einer Trägerfrequenz über Antenne oder Kabel übertragen. Die Nullen und Einsen werden als Rechtecksignale mit großer bzw. kleiner Amplitude/Frequenz kodiert. Wegen der geringeren Bandbreite pro Sender können bei digitaler Übertragung deutlich mehr Kanäle auf ein Frequenzband gepackt werden. Außerdem ermöglicht die digitale Nachrichtenübermittlung einen störungsfreieren Empfang und eine verbesserte Wiedergabequalität. Die Daten können auch durch IR-Licht zum Empfänger gelangen, wobei die Abstimmung zwischen Sender und Empfänger in diesem Fall nicht über eine gemeinsame Trägerfrequenz, sondern über das Internetprotokoll via IP-Adresse erfolgt.

Im letzten Kapitel kommen ein paar Aspekte zum Thema Antenne zur Sprache. Sie stellt das wichtige Bindeglied zwischen Sender und Empfänger dar.

Ich wünsche allen Kolleginnen und Kollegen viel Erfolg bei ihrem oft schwierigen Unterfangen, die Schüler für das als schwer geltende Fach Physik zu motivieren.

Stolberg, im Dezember 2005 und im September 2020

## 2. Grundlagen

### 2.1 Schwingkreis

Ein Schwingkreis besteht im einfachsten Fall aus einem Kondensator und einer Spule (s. Abb.1).

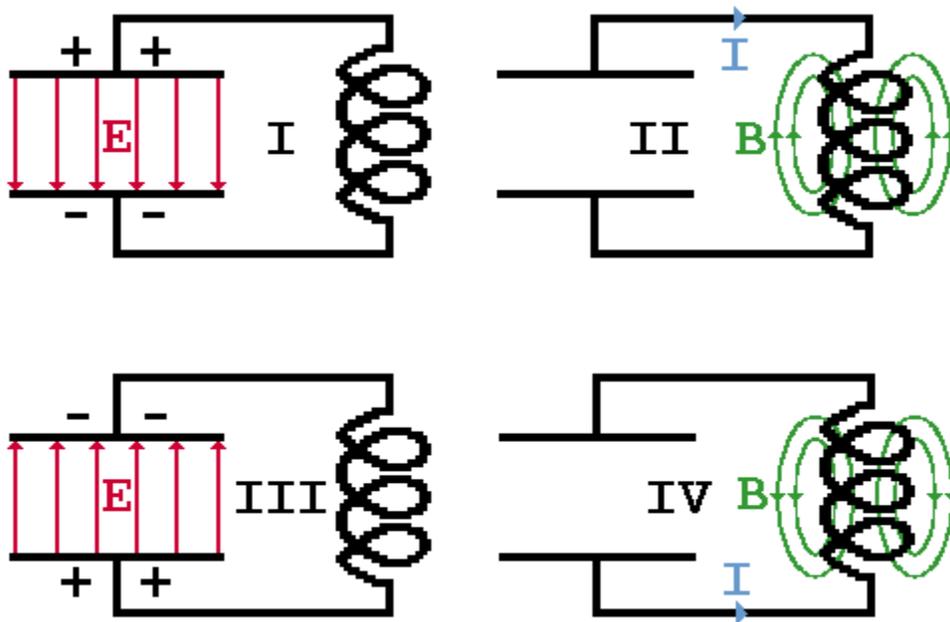


Abb.1: Vorgänge in einem Schwingkreis

Ist der Kondensator geladen, so herrscht zwischen seinen Platten ein elektrisches Feld  $E$  (Phase I). Die Ladungen versuchen sich auszugleichen und fließen durch die Spule. In ihr baut sich ein magnetisches Feld  $B$  auf, während das elektrische immer mehr abnimmt (Phase II). Ist der Kondensator entladen, so bricht das Magnetfeld in der Spule zusammen, da die antreibende Spannung fehlt. Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes induziert eine Spannung an den Enden der Spule, die die Ladungen weiter antreibt. Die Kondensatorplatten werden erneut aufgeladen und zwar mit einer der ursprünglichen Spannung entgegen gesetzten gerichteten Polarität (Phase III). Sind die Platten vollgeladen, beginnt das ganze Spiel in umgekehrter Richtung von vorn. Die Ladungen fließen durch die Spule und erzeugen ein Magnetfeld in entgegen gesetzter Richtung (Phase IV). Dieses bricht, wenn der Kondensator ganz entladen ist, zusammen und induziert wieder eine Spannung in der ursprünglichen Richtung (Phase I) und so weiter. Die Frequenz  $f$ , mit der sich diese Vorgänge wiederholen, hängt von der Kapazität  $C$  des Kondensators und der Induktivität  $L$  der Spule ab. Beide besitzen einen Wechselstromwiderstand  $R_C$  bzw.  $R_L$ . Für  $R_C$  gilt:

$$R_C = \frac{1}{2\pi f * C}$$

und für  $R_L$ :

$$R_L = 2\pi f * L.$$

Sind beide Widerstände in einem Schwingkreis gleich groß, so schwingt er mit der Frequenz  $f$ , für die gilt:

$$R_C = R_L.$$
$$\frac{1}{2\pi f * C} = 2\pi f * L$$

Stellt man diese Gleichung nach  $f$  um, so folgt

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}}$$

oder für die Periodendauer  $T$  der Schwingung

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{L * C}.$$

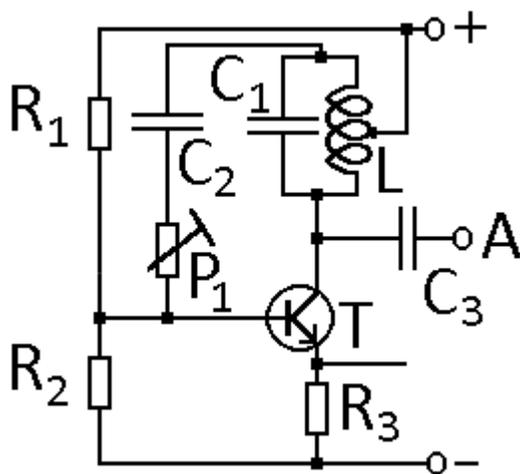
Sie spielt in der modernen Kommunikations- und Energietechnik eine große Rolle und wird Thomsonsche Schwingungsformel genannt.

Lädt man in einem Schwingkreis zu Beginn den Kondensator auf und überlässt anschließend den Schwingkreis sich selbst, so nimmt die Amplitude der Schwingung rasch ab, da die Energie nach und nach im Ohmschen Widerstand der Spule in Wärme umgewandelt und außerdem als elektromagnetische Welle in den umgebenden Raum abgestrahlt wird. Die Schwingung ist gedämpft. Um sie zu entdämpfen, muss man von außen ständig Energie zuführen. Geschieht dies mit einer Frequenz, die der Eigenfrequenz  $f$  des Schwingkreises entspricht, so schaukelt sich die Schwingung zu großen Amplituden auf. Sie schwingt mit dem Erreger in Resonanz. Die benötigte Energie kann man induktiv über eine zweite Spule in die Schwingkreisspule oder kapazitativ über eine Kondensatorrückkopplungsschaltung in den Schwingkreis einspeisen. Im Laufe der Geschichte der Nachrichtentechnik wurden zahlreiche Rückkopplungsschaltungen entwickelt, auch Oszillatoren genannt. Die erste war die Meißnersche Rückkopplungsschaltung, weitere sind der Hartley-Oszillator, der Colpitts-Oszillator und der heute weit verbreitete Quarzoszillator.

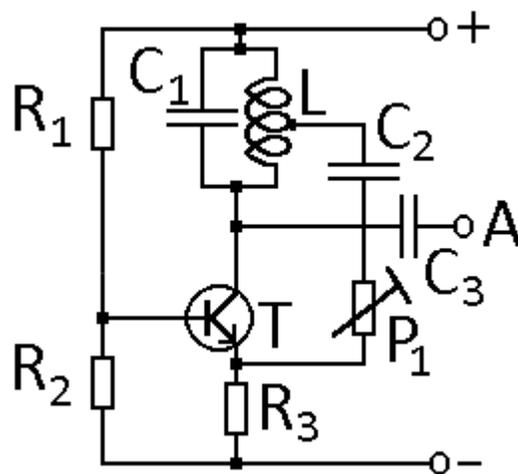
In den Versuchen in Kapitel 3 wird ein Hartley-Oszillator (s. Abb.2 und 3) als Sender eingesetzt. Bei ihm besitzt die Schwingkreisspule einen Mittenabgriff. Er stellt die zur Rückkopplung benötigte Wechselspannung bereit. Sie wird über einen Kopplungskondensator, der die Gleichspannung sperrt, auf die Basis oder den Emitter des Transistors geführt. Der Hartley-Oszillator wird wegen der drei Abgriffe an der Spule als Dreipunktschaltung bezeichnet. Das Einschwingverhalten ist gut. Es kann bei Bedarf durch einen zusätzlichen Kondensator parallel zum Emitterwiderstand  $R_3$  verbessert werden. Die Schaltung ist bei Temperaturschwankungen nicht sehr frequenzstabil. Verwendet wird sie nach wie vor in Funkempfängern wie Radios mit einstellbarer Empfangsfrequenz, wobei die Induktivität der Spule über einen verstellbaren Eisenkern variiert wird.

Sollen über ein Medium wie Kabel oder Luft die Informationen zahlreicher Sender gleichzeitig übertragen werden, so muss jeder Sender einen Oszillator mit eigener Trägerfrequenz benutzen.

zen. Ansonsten kommt es zu einem wüsten Mischmasch der Bild bzw. Toninformationen aller Sender, die im Empfänger nicht mehr getrennt werden können. Jeder Empfänger muss außerdem einen Oszillator enthalten, dessen Frequenz variabel ist, damit er auf die Trägerfrequenzen verschiedener Sender abgestimmt werden kann. Das lässt sich technisch realisieren mit einem Drehkondensator, einer Spule mit verstellbarem Eisenkern oder einer Kapazitätsdiode, deren Kapazität sich mit der angelegten Sperrspannung ändert. Stimmen Sende- und Empfangsfrequenz überein, so gerät der Empfangsoszillator in besonders große Resonanzschwingungen. Damit es nicht zu Überlagerungen zweier benachbarter Sender kommt, sollten sie einen gewissen Mindestabstand in den Frequenzen einhalten, zumal jeder Sender aufgrund der Modulation nicht nur genau eine Frequenz, sondern einen gewissen Frequenzbereich belegt, auch Bandbreite oder Kanal genannt.



**Abb. 2: Hartley-Oszillator  
Basisrückkopplung**



**Abb. 3: Hartley-Oszillator  
Emitterrückkopplung**

## 2.2 Modulation

Überlagern sich mindestens zwei Wellen unterschiedlicher Frequenz oder Amplitude, so spricht man von Interferenz. Besitzt die eine der beiden Wellen eine niedrige Frequenz, die zweite eine hohe Frequenz, so bezeichnet man die Überlagerung als Modulation. Sie wird ausgenutzt, um niederfrequente Informationen mit einer hochfrequenten Trägerschwingung zu übertragen. Man verwendet vor allem Amplituden- und Frequenzmodulation. Bei Amplitudenmodulation AM variiert man mit dem niederfrequenten Informationssignal die Amplitude der hochfrequenten Trägerwelle. Sie wird eingesetzt, um die Bildinformation beim Fernsehen analog oder digital zu übertragen. Bei der Frequenzmodulation FM moduliert man die Frequenz des Trägersignals mit dem niederfrequenten Informationssignal. Mit ihr wird beim Radio und Fernsehen das Audiosignal analog oder digital übertragen. Erzeugt wird die Amplitudenmodulation z.B. mit Hilfe eines Schwingkreises der Trägerfrequenz  $f$ , dessen Amplitude mit einer Tonfrequenz  $f_T$  variiert wird. Die so entstandene Schwingung wird als Welle in den Raum abgestrahlt. Bei sinusförmigem Verlauf beider Signale lässt sich die Gesamtschwingung mathematisch wie folgt beschreiben

$$A(t) = (A_0 + A_T * \sin(2\pi f_T t)) * \sin(2\pi f t)$$

$$= A_0 * \sin(2\pi f t) + \frac{1}{2} A_T * \cos(2\pi(f - f_T)t) - \frac{1}{2} A_T * \cos(2\pi(f + f_T)t).$$

Darin bedeuten:

A(t): momentane Elongation des Gesamtsignals

A<sub>0</sub>: Amplitude des Trägersignals

f: Frequenz des Trägersignals

A<sub>T</sub>: Amplitude des Informationssignals

f<sub>T</sub>: Frequenz des Informationssignals

t: Zeit.

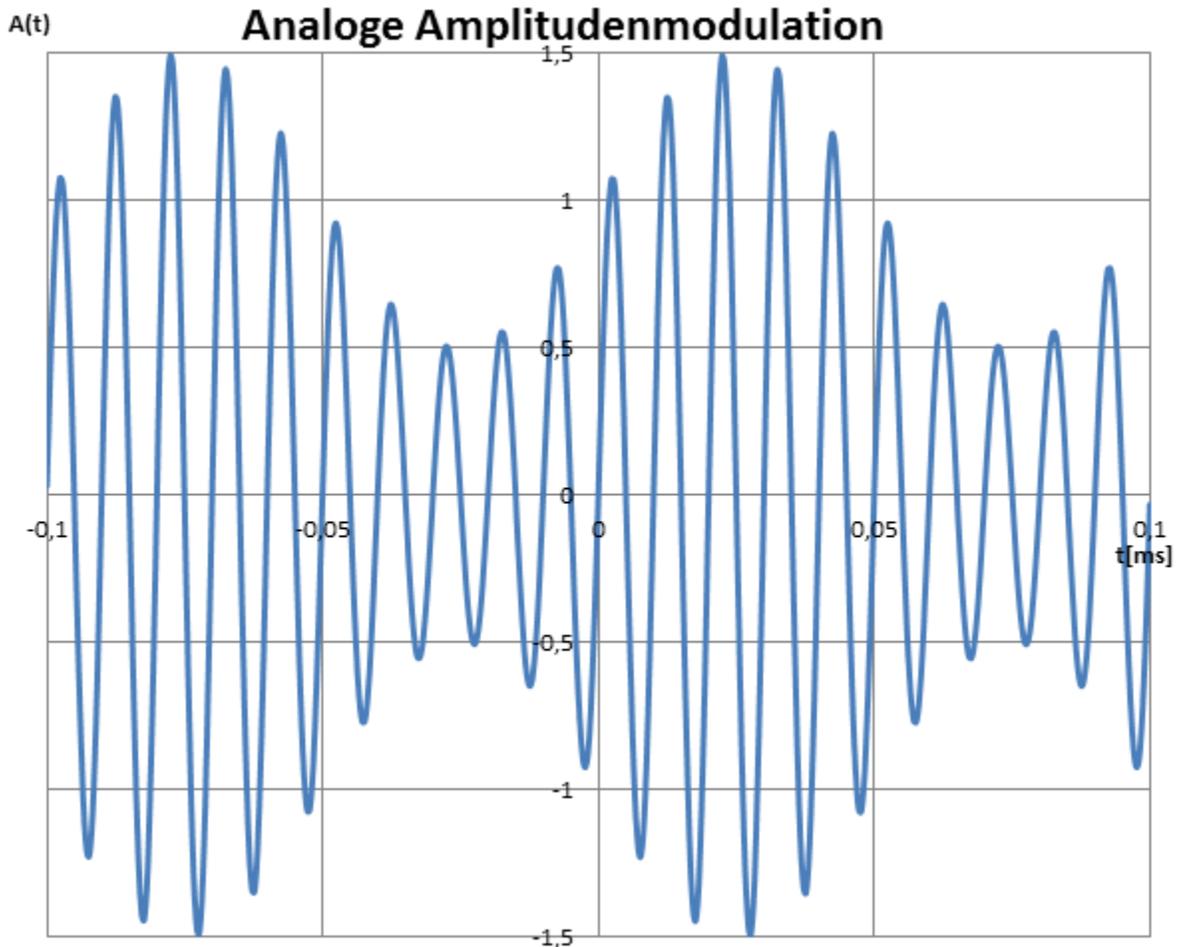
Außerdem wurde die Formel

$$\sin\alpha * \sin\beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

verwendet. Wertet man diese Funktion mit Excel z.B. für folgende Werte

$$f = 100\text{kHz}, f_T = 10\text{kHz}, A_0 = 1, A_T = 0,5$$

graphisch aus, so erhält man die Kurve in Abb.1a.



**Abb.1a: Analoge Amplitudenmodulation**

An der Formel erkennt man, dass eine amplitudenmodulierte Schwingung drei Frequenzen abstrahlt, die im Bereich zwischen  $f+f_T$  und  $f-f_T$  liegen. Eine amplitudenmodulierte Trägerwelle für den Mittelwellenbereich mit  $f = 1000\text{kHz}$  und einer Modulationsfrequenz von  $f_T = 10\text{kHz}$  belegt damit den Frequenzbereich von 990 kHz bis 1010 kHz. Damit passen in das Frequenzband eines Sendebereiches nicht beliebig viele Sender. Außerdem muss zwischen den einzelnen Sendern ein Sicherheitsabstand der Frequenzen eingehalten werden, damit sich die Sender nicht gegenseitig stören.

Sollen digitale Signale übertragen werden, so moduliert man die Amplitude des Trägersignals so, dass seine Amplitude zwischen zwei Werten schwankt. Die Amplitude 1 entspricht z.B. dem Bit-Wert 1, die Amplitude 0,5 dem Bit-Wert 0. Für die Bitfolge 10110 erhält man so Abb.1b.

Da beim digitalen Fernsehen oder bei Audio-Stereoübertragungen eine riesige Datenmenge anfällt, haben die Elektrotechniker die Amplitudenmodulation zur Quadraturamplitudenmodulation QAM erweitert. Es werden zwei Trägersignale gleicher Frequenz abgestrahlt, die gegeneinander um  $90^\circ$  phasenverschoben sind. Beide Trägerschwingungen werden mit einem Teil der Datenmenge moduliert. Anschließend werden sie zu einem Signal gemischt, gesendet und im Empfänger durch einen speziellen Demodulator wieder getrennt, um die beiden niederfrequen-

ten Informationssignale zurück zu gewinnen. Mathematisch kann man die QAM im analogen Fall wie folgt beschreiben:

$$A(t) = (A_0 + A_{T1} * \sin(2\pi f_{T1}t) * \cos(2\pi ft) - (A_0 + A_{T2} * \sin(2\pi f_{T2}t) * \sin(2\pi ft).$$

Darin bedeuten:

- $A_0$ : Amplitude der Trägerschwingung
- $f$ : Frequenz der Trägerschwingung
- $t$ : Zeit
- $f_{T1}$ : 1. Informationsfrequenz
- $f_{T2}$ : 2. Informationsfrequenz
- $A_{T1}$ : Amplitude der 1. Informationsfrequenz
- $A_{T2}$ : Amplitude der 2. Informationsfrequenz.

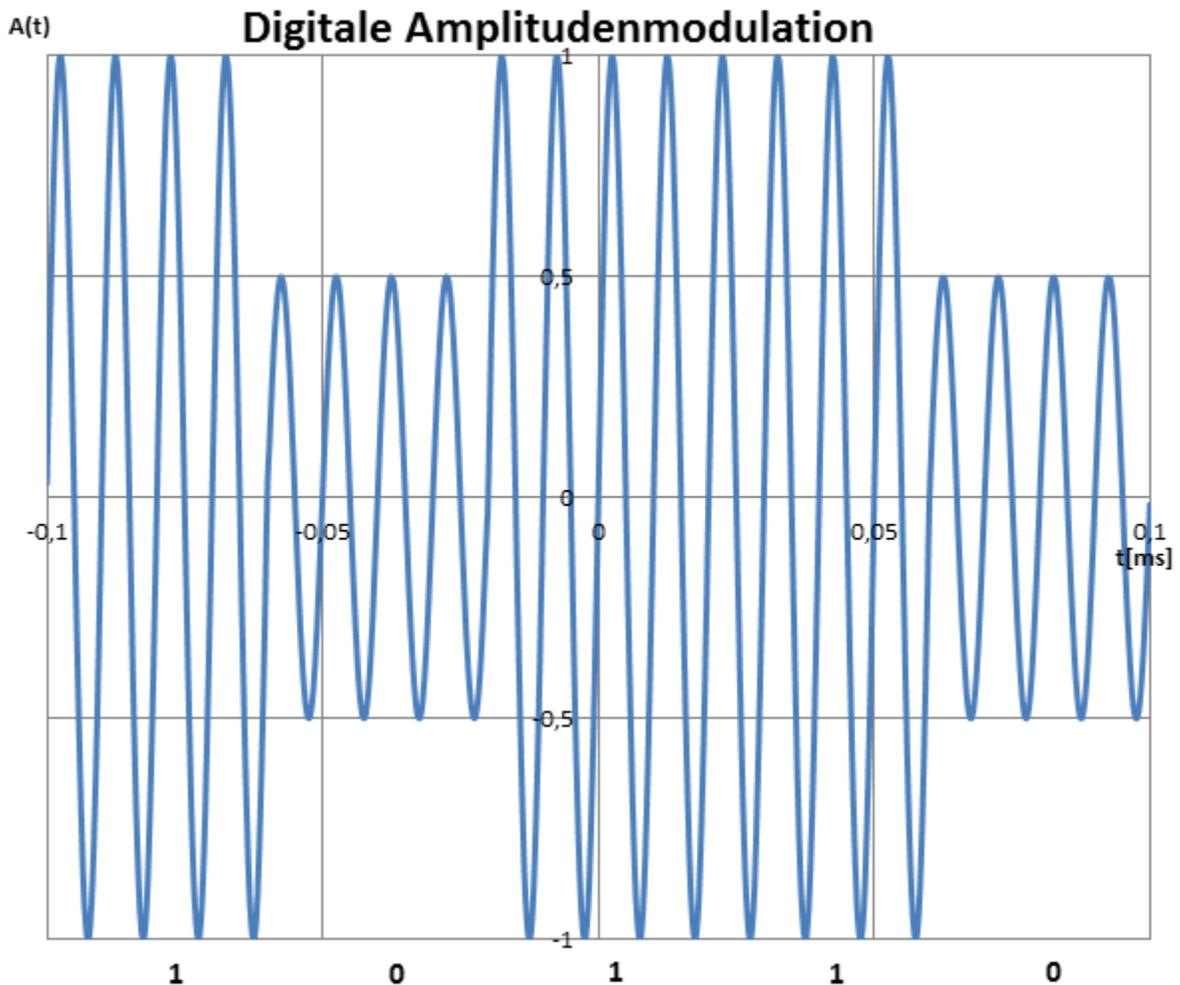
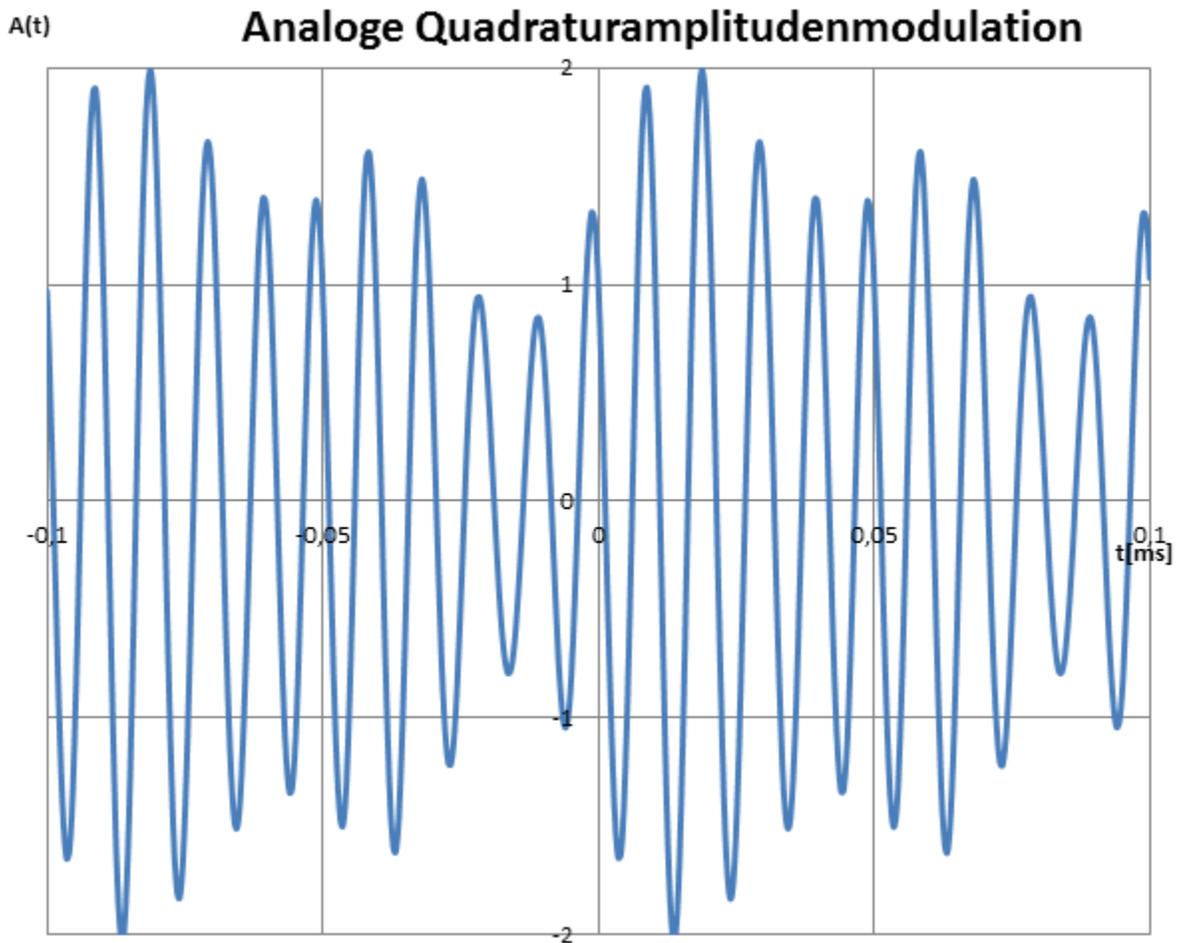


Abb.1b: Digitale Amplitudenmodulation

Wertet man diese Funktion mit Excel z.B. für folgende Werte

$$f = 100\text{kHz}, A_0 = 1, f_{T1} = 10\text{kHz}, f_{T2} = 20\text{kHz}, A_{T1} = A_{T2} = 0,5$$

graphisch aus, so erhält man die Kurve in Abb.2a.



**Abb. 2a: Analoge Quadraturamplitudenmodulation**

Überträgt man per Quadraturamplitudenmodulation ein digitales Signal, z.B. auf dem 1. Trägerkanal die Bitfolge 10110 und auf dem 2. Kanal die Bitfolge 11010, so erhält man mit Excel die Kurve in Abb.3b. Dabei wurde dem Bit-Wert 1 der Amplitudenwert 1 und der Bit-Wert 0 der Amplitudenwert 0,5 zugeordnet. Interessant ist der Phasensprung bei  $t = -0,02\text{ms}$ . Er markiert den Wechsel in den beiden Bitfolgen von 01 auf 10, wobei die Gesamtamplitude erhalten bleibt. Er macht deutlich, dass der Demodulator die genaue Phasenlage des Signals analysieren muss. Modulatoren für quadraturamplitudenmodulierte Signale weisen zwei Zweige auf, die sich in ihrer Phasenlage um  $90^\circ$  unterscheiden. Sie sind vom elektronischen Aufbau erheblich aufwendiger als Demodulatoren für einfache amplitudenmodulierte Signale<sup>3)</sup>. Häufig werden die einzelnen Bits einer Binärzahl jeweils durch ein eigenes Amplitudenmuster codiert. Oft werden sie auch in Bitfolgen zusammengefasst, wobei sich die einzelnen Folgen nur in einem Bit vonei-

inander unterscheiden. Jeder Bitfolge wird dann ein Amplitudenmuster zugeordnet. Je nach Anzahl der verwendeten Muster unterscheidet man QAM-64 oder QAM-256 usw.

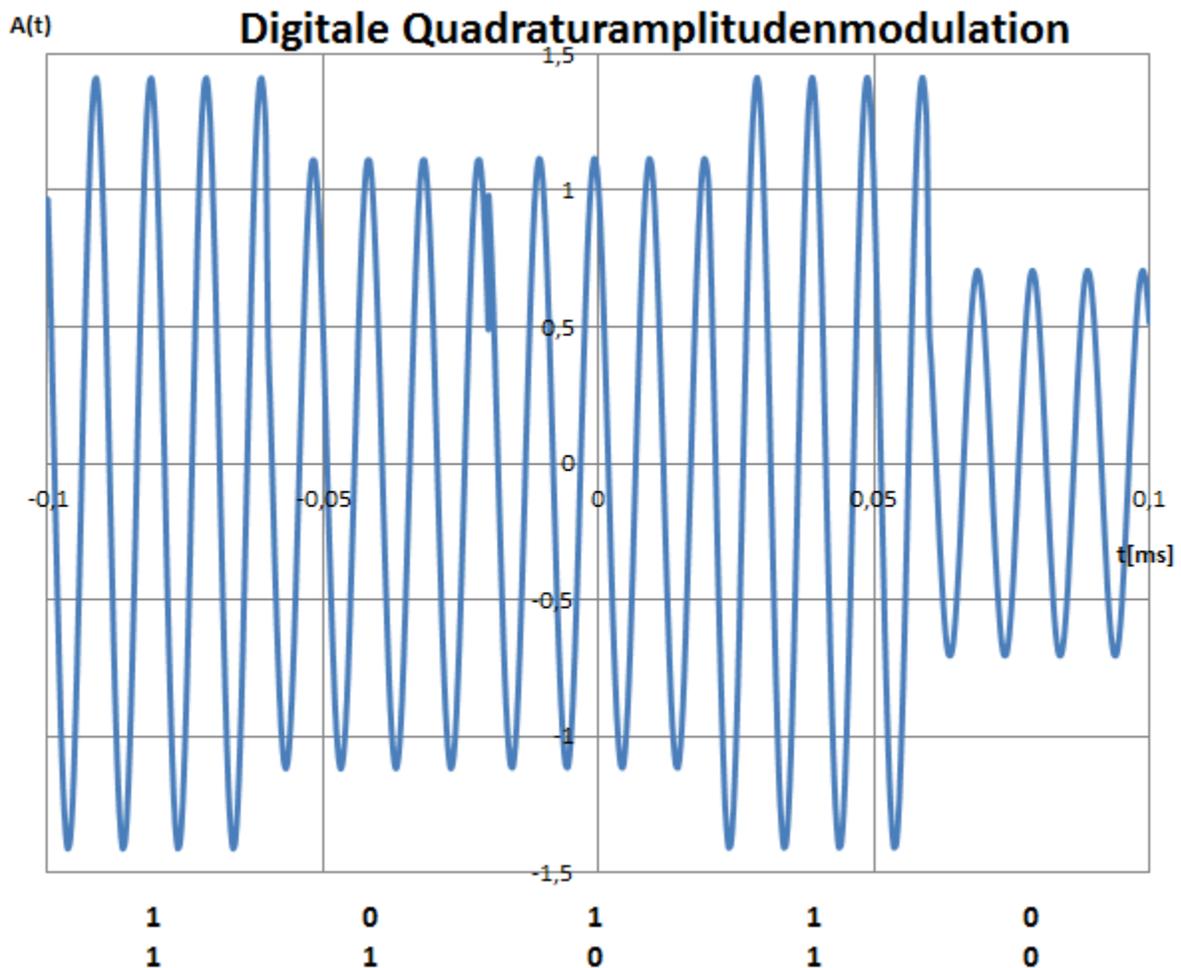


Abb.2b: Digitale Quadraturamplitudenmodulation

Die analoge Frequenzmodulation lässt sich bei sinus- bzw. cosinusförmigem Verlauf der Signale mathematisch mit folgender Formel beschreiben:

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi f_M t)$$

mit

$$f_M = f + A_T \cos(2\pi f_T t).$$

Darin bedeuten:

$A_0$ : Amplitude der Trägerschwingung

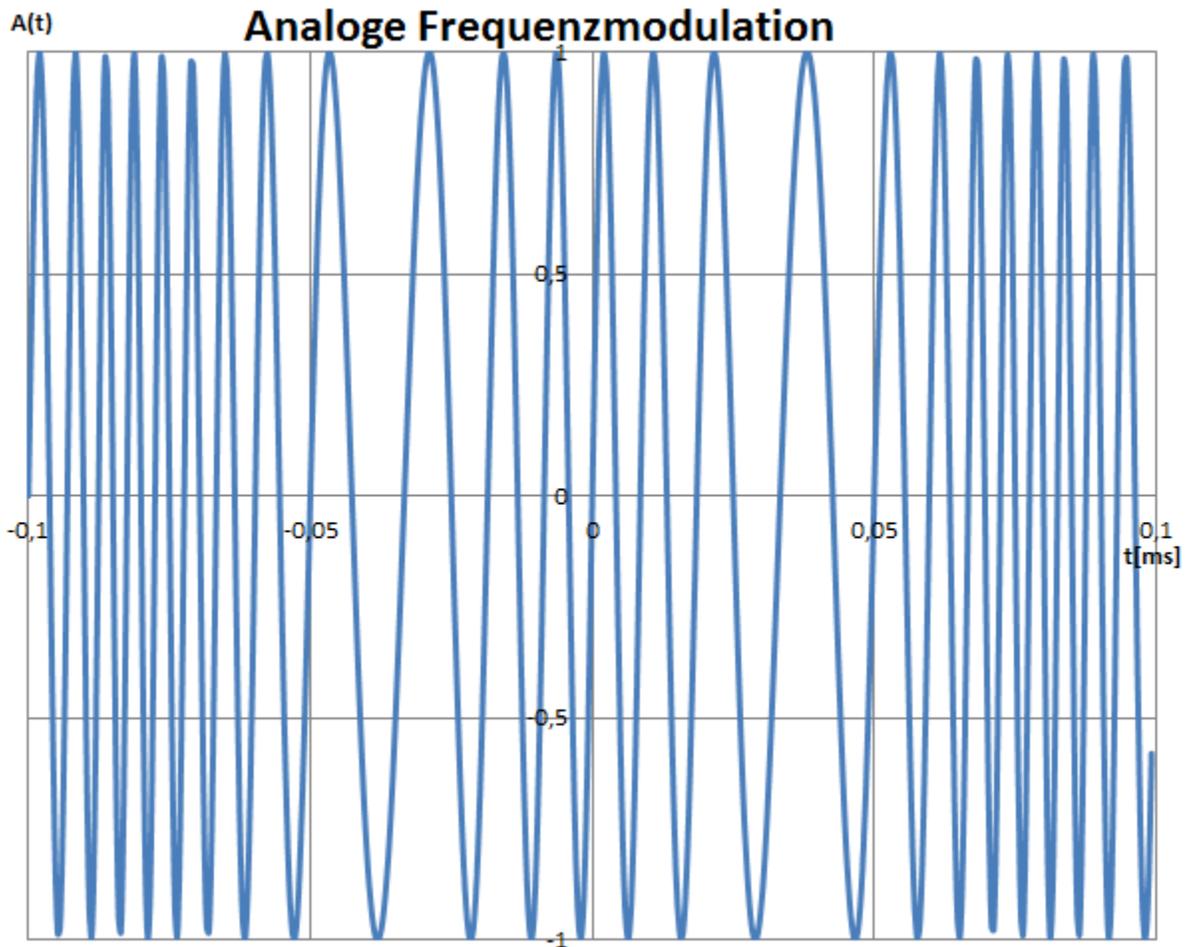
$f$ : Frequenz der Trägerschwingung

$f_M$ : Modulationsfrequenz

t: Zeit

$A_T$ : Amplitude der Informationsfrequenz in Hz

$f_T$ : Informationsfrequenz.



**Abb. 3a: Analoge Frequenzmodulation**

Wertet man die Funktion mit Excel z.B. für folgende Werte

$$f = 100\text{kHz}, f_T = 10\text{kHz}, A_0 = 1, A_T = 20\text{kHz}$$

graphisch aus, so erhält man die Kurve in Abb. 3a. Die Frequenz der modulierten Schwingung schwankt zwischen  $f + A_T$  und  $f - A_T$ . Sie belegt damit wie bei der amplitudenmodulierten Schwingung nicht eine einzelne Frequenz, sondern ein Frequenzband, weshalb auch hier in einen Frequenzbereich wie etwa UKW von 88 - 108 MHz nicht beliebig viele Sender passen. Da die Frequenz bei Radiosendern jedoch nur im Bereich von etwa  $\pm 10\text{kHz}$  schwankt, können zahlreiche Sender in den Bereich gelegt werden, ohne dass sie sich überschneiden. Durch Frequenzmodulation kann man auch digitale Informationen übertragen. Dann springt die Frequenz des Trägersignals zwischen zwei Werten hin und her. Für die Bitfolge 10110 ergibt sich Abb. 4b.

Auch bei Frequenzmodulation kann man zwei Signale gleichzeitig über zwei parallele Kanäle gleicher Grundfrequenz, die um  $90^\circ$  phasenverschoben sind, übertragen. Man spricht dann von Quadraturfrequenzmodulation QFM.

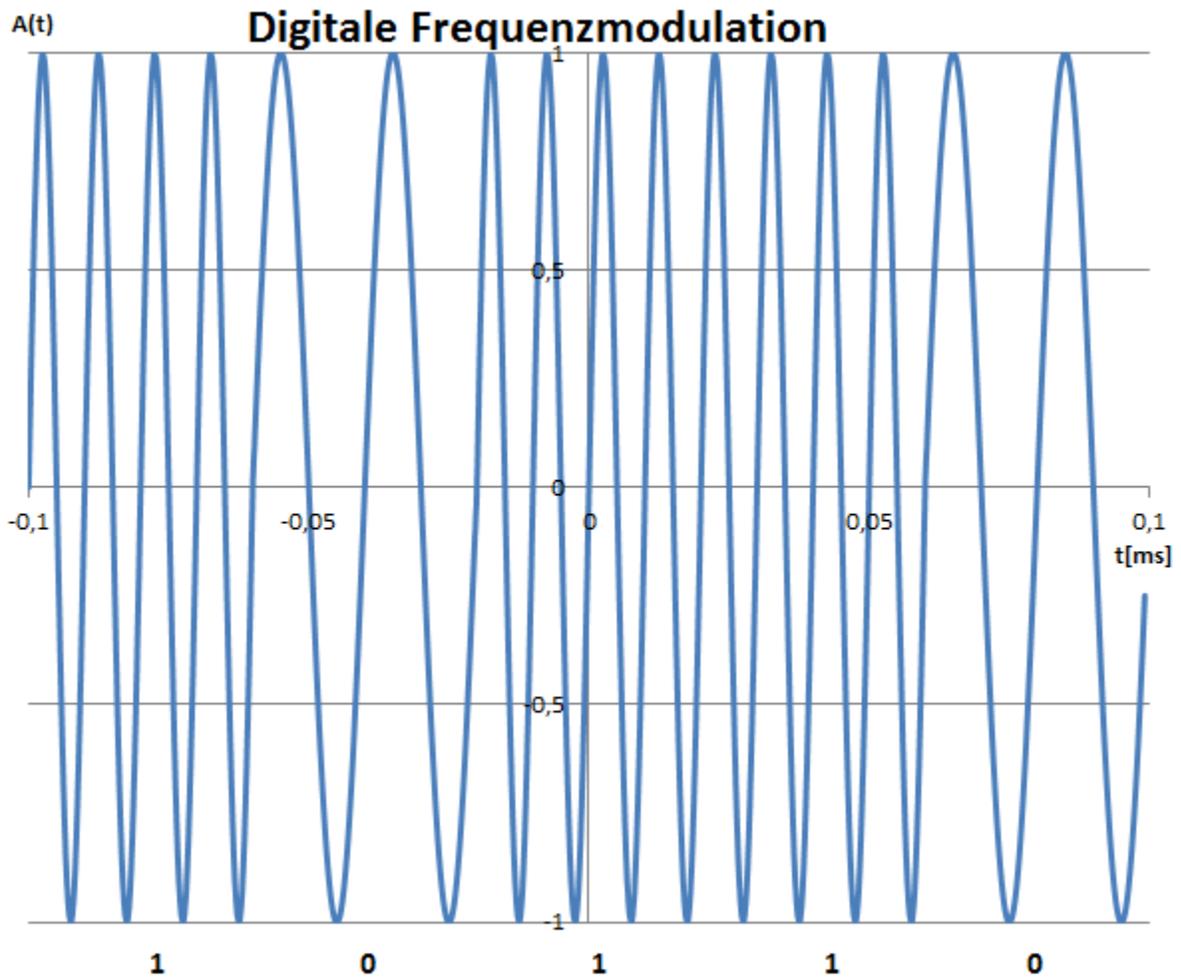


Abb. 3b: Digitale Frequenzmodulation

### 3. Sender

#### 3.1 Schaltplan

Die in Abb. 1 dargestellte Schaltung stellt einen ungedämpften Oszillator dar, der als Radiosender im KW-Bereich eingesetzt werden kann. Er lässt sich frequenz- und amplitudenmodulieren. Beide Vorgänge lassen sich außerdem auf einem Oszillographen sichtbar machen. Dadurch werden sie für die Schüler wesentlich einsichtiger. Da die Schaltung außerdem recht übersichtlich aufgebaut ist, können die Schüler auch seine Funktionsweise nachvollziehen. Verwendet man zusätzlich noch einen einfachen Empfangskreis, so lassen sich mit dem Oszillator auch eine ganze Reihe interessanter Untersuchungen über Radioempfänger anstellen (s. Kapitel 3).

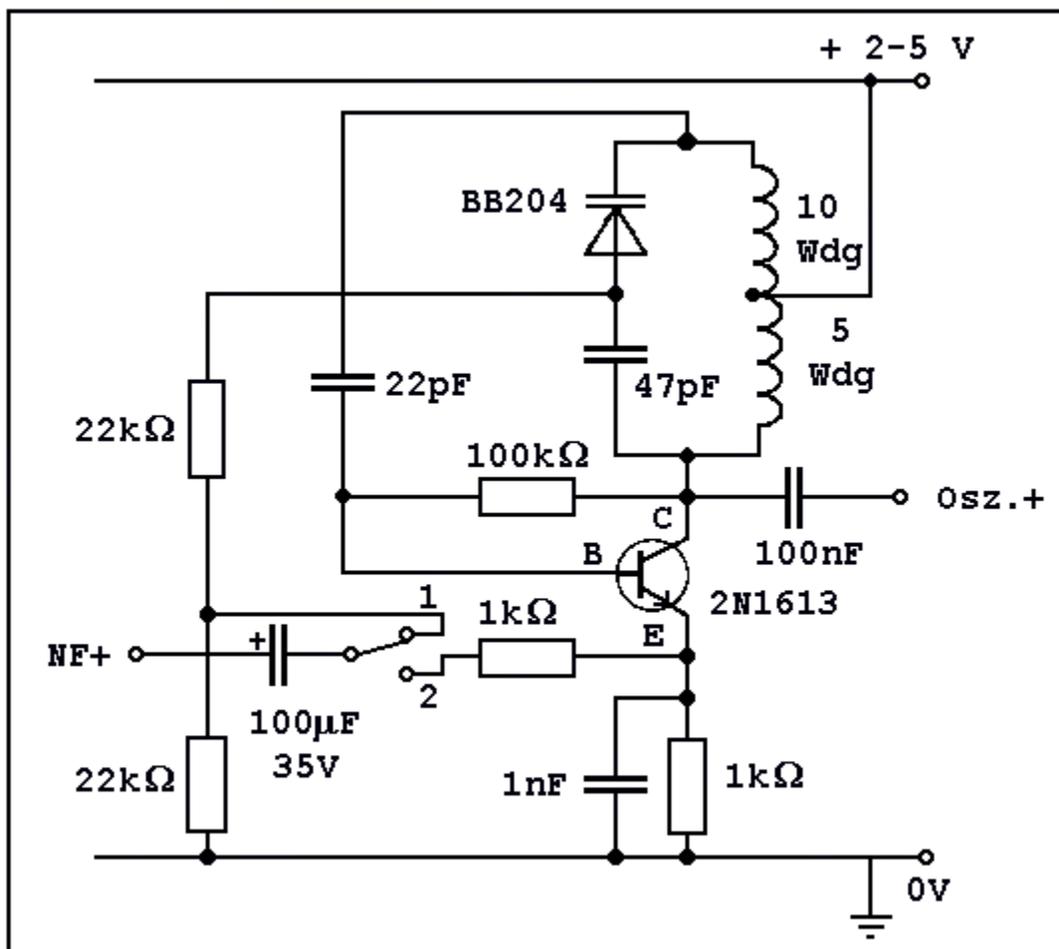


Abb.1: Schaltplan

#### 3.2 Funktion

Das Herzstück der Schaltung ist der bekannte Dreipunktoszillator mit induktiver Rückkopplung (vgl. Dorn-Bader: Physik, Oberstufe). Zur Frequenzmodulation besteht die Kapazität des Schwingkreises aus einem Kondensator (47 pF) und einer Kapazitätsdiode (BB 204), die in Reihe geschaltet sind. Die an der Kapazitätsdiode anliegende Spannung wird über die beiden Widerstände (22 k $\Omega$ ) variiert. Sie ändert dabei ihre Kapazität, so dass die Frequenz des Schwingkreises

zu- bzw. abnimmt. Die Niederfrequenz NF wird über einen Kondensator in die Mitte zwischen beide Widerstände eingespeist. Dadurch ist eine symmetrische Modulation möglich. Der Oszillator wird frequenzmoduliert, wenn der Umschalter in Stellung 1 steht. Dann sieht man auf dem Oszillographen eine Sinuslinie, die im Takt der NF gestaucht bzw. gedehnt wird. Die Amplitude der NF bestimmt die Weite der Stauchung bzw. Dehnung. In Stellung 2 wird der Schwingkreis amplitudenmoduliert, indem durch die NF das Potential des Emitters angehoben bzw. gesenkt wird. Der Oszillograph zeigt in dieser Stellung des Schalters eine Sinuslinie, deren Amplitude im Takt der NF ansteigt und abfällt. Die Größe der Amplitudenschwankungen hängt ab von der Amplitude der NF. Dehnt man die Zeitachse bis in den Periodendauerbereich der NF, so erkennt man auf dem Oszillographen das typische Bild einer amplitudenmodulierten Trägerschwingung. Bei genauer Betrachtung der Oszillographenbilder stellt man fest, dass die frequenzmodulierte Schwingung auch geringfügig amplitudenmoduliert wird und umgekehrt. Das stört jedoch nicht.

### 3.3 Betriebsdaten

Die Betriebsspannung der Schaltung kann zwischen 2 und 5 V liegen, optimal sind 3 V. Sie muss stabilisiert sein. Die Niederfrequenzquelle kann ein Tonfrequenzgenerator oder ein Dreiecksgenerator sein. Sie müssen jedoch Frequenzen im Bereich von 1-20 Hz mit einer Spannung bis 10 V erzeugen können. Nur dann lassen sich die Vorgänge bei beiden Modulationsarten deutlich sichtbar machen. Der Oszillator schwingt bei den angegebenen Werten mit ca. 12 MHz. Daher wählt man am Oszillographen für die Zeitachse  $0,5 \mu\text{s/cm} \times 3$  oder falls möglich  $0,1 \mu\text{s/cm}$  und für die Spannungsachse je nach Betriebsspannung  $2 \text{ V/cm}$  oder  $5 \text{ V/cm}$ .

### 3.4 Aufbau

Die Schaltung kann man sich aus Einzelbauteilen eines Elektronikkastens zusammenstecken. Als Spule eignet sich dann die wohl in jeder Sammlung vorhandene KW-Spule von Phywe mit 10 Windungen, die man zusätzlich an der 3. Windung abgreift. Für den Einsatz im Unterricht besser geeignet ist auf jeden Fall eine verlötete Version, da sie sich im fertigen Zustand mit ein paar Handgriffen in Betrieb nehmen lässt. Man muss sich dann nur einmal die Mühe machen, die Schaltung zusammenzubauen. Da nicht jeder die Möglichkeit hat, eine passende Platine herzustellen, benutzt man am einfachsten eine fertige Lochrasterplatine mit Lötstreifen der Größe  $5 \times 9 \text{ cm}$ . Die Abbildung 2 zeigt die Verdrahtung auf einer solchen Platine.

Dann muss man sich jedoch die benötigte Spule selbst wickeln. Dazu klebt man sich zunächst ein Papierröllchen von 3 cm Durchmesser und 5 cm Länge. Eine leere Filmdose leistet dabei hervorragende Dienste. Um das Papierröllchen legt man auf einer Länge von 4 cm 15 Windungen aus 0,5 mm dickem, lackiertem Kupferdraht mit einer Abzweigung an der 5. Windung. Die Lage der Windungen lässt sich mit etwas Klebstoff und Klebeband stabilisieren. Als billiges Gehäuse für die fertige Schaltung bietet sich eine leere "Ferrero Rocher"-Dose an, da sie aus recht stabilem Plastik besteht und außerdem durchsichtig ist, wodurch die Schüler die innen liegende Schaltung sehen können. Ferner kann man in ihren Deckel mit einer Bohrmaschine mit Holzbohrer Löcher für die Anschlussbuchsen und den Umschalter bohren, ohne dass der Kunststoff reißt. Es werden vier Buchsen und ein Umschalter benötigt: eine rote Buchse für den Pluspol der Betriebsspannung, eine grüne für den Pluspol des Oszillographen, eine gelbe für den Pluspol der NF und eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol der Betriebsspannung, der NF-Quelle und

des Oszillographen. Die fertige Platine befestigt man mit vier Holzschraubchen auf zwei Holzleisten mit einem Querschnitt von 2 x 2 cm und einer Länge von 7 cm. Die beiden Holzleisten klebt man mit etwas Patex auf den Boden des Gehäuses. Dann verbindet man die entsprechenden Bahnen der Platine über etwas Schaltlitze mit den Buchsen bzw. mit den Anschlüssen des Umschalters. Den Deckel der Dose kann man zum Schluss mit etwas Klebeband verschließen.

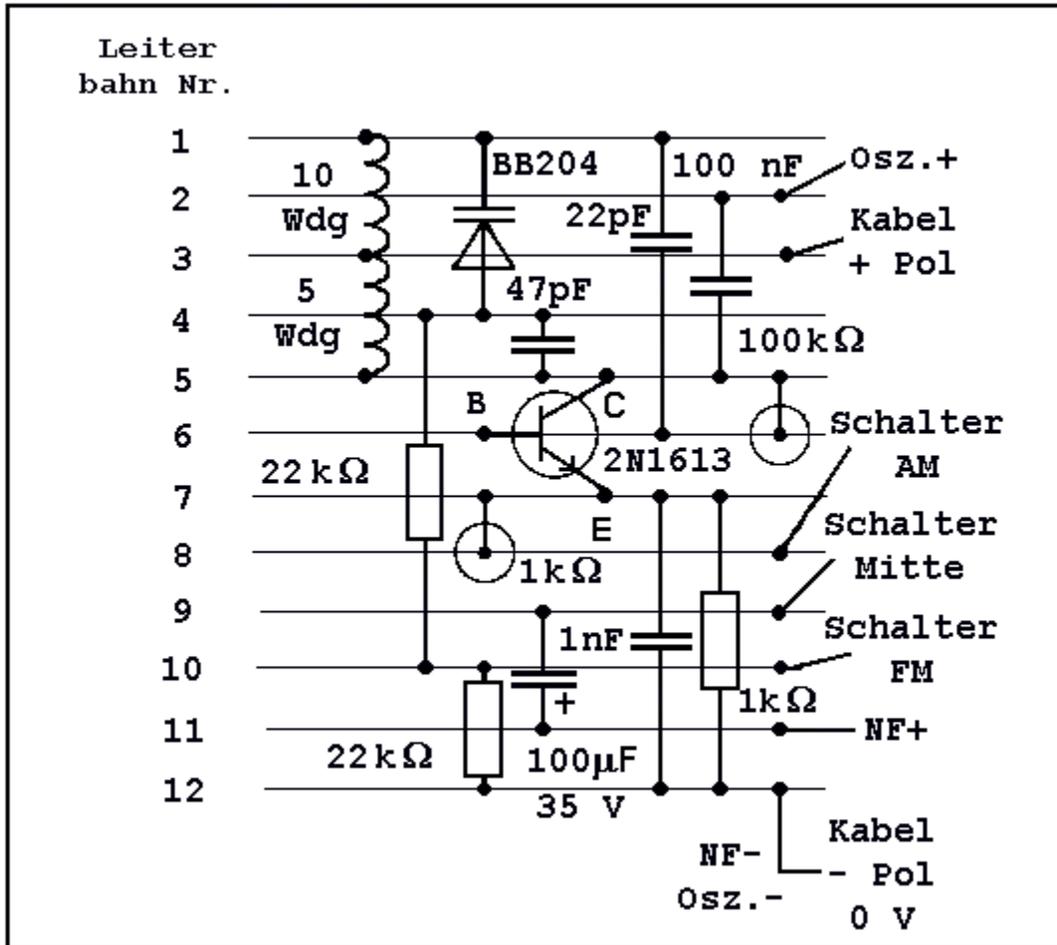


Abb.2: Platinenlayout

### 3.5 Bauteile

- 1 Lochrasterplatine 5 X 9 cm, mit Lötstreifen, RM 2,54 mm
- 2 Holzleisten 2 x 2 cm. Länge je 7 cm
- 1 "Ferrero Rocher"-Dose
- 1 gelbe Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 grüne Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 rote Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 schwarze Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 Miniatur-Kippschalter 1 x UM
- 1 Kapazitätsdiode BB 204 grün/blau oder BB 203 grün/blau
- 1 Kondensator 47 pF

- 1 Kondensator 22 pF
- 1 Kondensator 1 nF
- 1 Kondensator 100 nF
- 1 Kondensator 100  $\mu$ F/35 V
- 2 Widerstände 1 k $\Omega$ , 0,25 W
- 2 Widerstände 22 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Widerstand 100 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Transistor 2N1613
- 4 Holzschrauben,  $\varnothing$  2 mm, Länge: 11 mm
- 2,5 m Kupferlackdraht,  $\varnothing$  0,5 mm
- etwas Schalllitze
- etwas Patex, Klebeband und festes Papier

### 3.6 Anmerkungen

1) Bei der Kapazitätsdiode BB 204 handelt es sich um eine Doppeldiode in einem TO-92 Gehäuse, wobei der mittlere Anschluss die gemeinsame Kathode bildet. Für die Schaltung benötigt man nur eine der beiden Dioden. Die zweite Anode kann man daher mit einem Seitenschneider abkneifen.

2) Kapazitätsdioden werden normalerweise nicht mit 3V, sondern mit mehr als 6V betrieben. So ist gewährleistet, dass sie im linearen Bereich ihrer Kennlinie arbeiten. Außerdem ist im Normalfall die verwendete Modulationsspannung wesentlich geringer. Dann erzielt man jedoch nur einen geringen Frequenzhub. Meine Absicht aber war es, einen möglichst großen Frequenzhub zu erzeugen, damit die Sinuslinie der Schwingung auf dem Oszillographen deutlich sichtbar gedehnt bzw. gestaucht wird. Dazu muss die Diode im nichtlinearen Bereich ihrer Kennlinie betrieben werden. Die größte Krümmung weist die Kennlinie im Bereich von 3V auf. Daher ist in diesem Falle 3V die optimale Betriebsspannung der Schaltung. Außerdem muss aus demselben Grunde die NF-Spannung recht hohe Werte annehmen, da die Frequenz bekanntlich in einer reziproken Wurzelfunktion von der Kapazität abhängt. Wenn man die Schwingungen der Schaltung im KW-Bereich eines Radios abhören möchte, so kann man die Betriebsspannung auf ca. 6V erhöhen. Ferner muss dann die NF erheblich reduziert werden, um eine verzerrungsfreie Wiedergabe zu erreichen.

3) Bei Oszillographen mit einer Eingangskapazität unter 40 pF kann es zu Verzerrungen des HF-Signals kommen. Schalten Sie in diesem Fall eine Kapazität zum Oszillographenausgang des Senders parallel, so dass die Kapazität am Eingang des Oszillographen insgesamt etwa 40 pF beträgt. Bei einer Eingangskapazität des Oszillographen von 15 pF benötigen Sie also einen Kondensator von 25 pF. Käuflich erwerben kann man Kondensatoren mit 22 pF bzw. 27 pF. Beide sind geeignet. Am besten löten sie die Kapazität zwischen die grüne und die schwarze Buchse oder zwischen die Bahnen 2 und 12 in Abb. 2 auf Seite 6.

4) Zum Schluss noch eine Bemerkung zum Aufbau der Schaltung. Der Oszillator schwingt nur, wenn er, wie bei HF-Schaltungen eigentlich selbstverständlich, sauber verlötet wurde. Quasi mal eben so zusammenlöten funktioniert im HF-Bereich in 99% der Fälle nicht. Eine einzige fehlerhafte Lötstelle kann die ganze Mühe scheitern lassen. Außerdem müssen die Zuleitungen möglichst kurz sein. Alles andere schafft nur Ärger und Enttäuschung.

## 4. Empfänger

### 4.1 Weltempfänger

#### Versuch

Stellt man ca. 5m vom KW-Sender entfernt einen Weltempfänger auf, so kann man im KW-Bereich den eigenen Sender empfangen. Als NF-Quelle kann man dazu am NF-Eingang des Senders den Ohrhörerausgang eines Kassettenrekorders oder Walkmans, ein Mikrofon mit Verstärker oder aber den Sinusausgang eines Tonfrequenzgenerators anschließen. Dabei muss man die Spannung der NF-Quelle auf ca. 1V begrenzen, da sonst erhebliche Verzerrungen auftreten. Der Sender kann sowohl mit Amplituden- als auch mit Frequenzmodulation betrieben werden. Bei Frequenzmodulation muss man den Empfänger nur etwas gegen den Sender verstimmen (s. Kapitel 3.3). Der Empfang lässt sich noch etwas verbessern, wenn man in den Oszillographenausgang des Senders ein ca. 9m langes Kabel als Antenne steckt (vgl. Kapitel 4.2).

### 4.2 AM

#### Versuch 1:

Zur genauen Untersuchung der Vorgänge bei Frequenz- und Amplitudenmodulation benutzt man den Empfangskreis aus Abb.3.

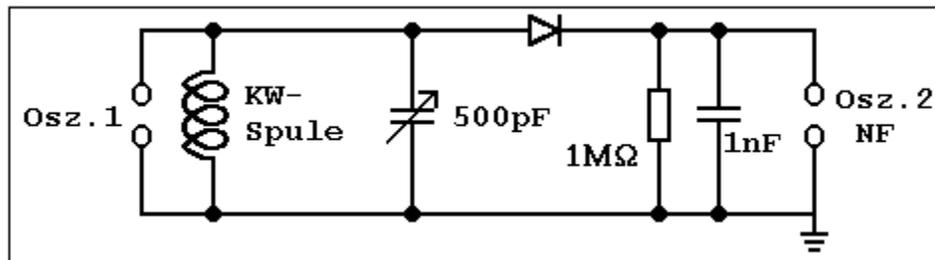


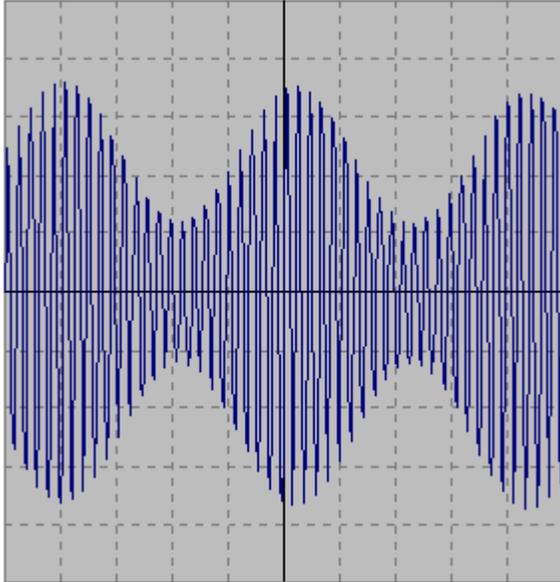
Abb.3: Empfangskreis

Er lässt sich am einfachsten aus Bauteilen eines Elektronikkastens zusammenstecken. Als Induktivität dient dabei die KW-Spule der Fa. Phywe (Windungszahl  $n = 3$ ; Länge  $l = 4$  cm; Durchmesser  $d = 10$  cm). Der Drehkondensator ist auch bei der Fa. Phywe erhältlich. Er ist auf einer besonderen Halteplatte befestigt. Aber auch im Elektronikhandel kann man solche Drehkondensatoren, wenn auch im Kleinformat, käuflich erwerben.

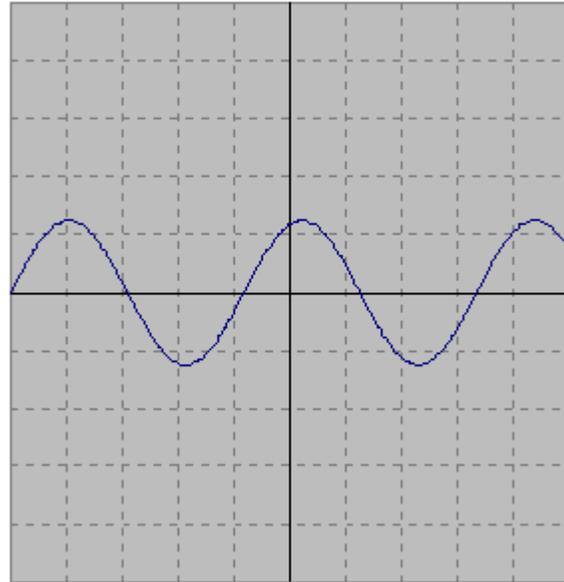
Diesen Empfangskreis stellt man in einer Entfernung von 20-30 cm neben dem Sender auf. Der Sender steht dabei auf Amplitudenmodulation und der Empfangskreis auf optimalem Empfang. Der Zweikanaloszillograph zeigt dann Bilder wie in Abb. 4 und 5, wenn man in den Sender einen Sinuston einspeist. An Kanal 1 liegt offensichtlich das gesendete amplitudenmodulierte Signal an, aus dem mit Hilfe der restlichen Bauteile das NF-Signal an Kanal 2 zurückgewonnen wird. Wie das vor sich geht, zeigt der nächste Versuch.

#### Versuch 2:

Man entfernt aus dem Empfangskreis nach Abb.3 den Kondensator  $C = 1$  nF. Dann erhält man am 2. Kanal des Oszillographen die folgende Abb.6. Diese Kurve lässt sich wie folgt erklären.



**Abb.4: HF-Signal**



**Abb.5: NF-Signal**

Die Diode schneidet den unteren Teil der HF ab. Das ist notwendig, damit die positiven und negativen Anteile der HF sich nicht gegenseitig aufheben und somit die empfangene mittlere Leistung Null ist. Da der Kondensator fehlt, kann der Rest der HF nicht mehr zur Erde abgeleitet werden. Um diese Aussage zu verdeutlichen, kann man eine kleine Rechnung anstellen. Für eine Frequenz  $f = 12 \text{ MHz}$  hat das RC-Glied einen Widerstand von

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{R_C^2}}} = 13,3 \Omega.$$

Für  $f = 1 \text{ kHz}$  findet man:

$$Z = 157,3 \text{ k}\Omega.$$

Die Hochfrequenz wird durch das RC-Glied praktisch kurzgeschlossen, während sich die Niederfrequenz als Spannung am RC-Glied aufbaut. Sie kann direkt einem NF-Verstärker zugeführt werden.

### **Versuch 3:**

Man entfernt in Abb. 3 den Oszillographen und schließt am RC-Glied einen NF-Verstärker an, der mit einem Lautsprecher verbunden ist. Im Lautsprecher hört man bei genauer Abstimmung des Empfangskreises den im Sender eingespeisten Sinuston. Alternativ kann man an den NF-Eingang des Senders auch einen Walkman oder einen Kassettenrekorder anschließen. Dann ertönt im Lautsprecher Musik. Schiebt man zwischen Sender und Empfänger eine Metallplatte, so verstummt der Lautsprecher.

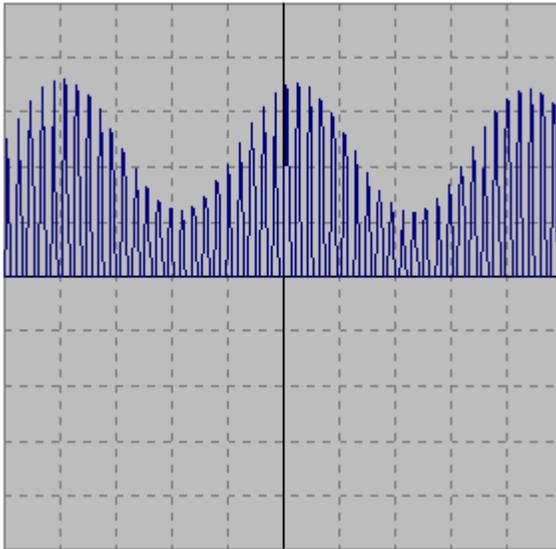


Abb.6: gleichgerichtetes HF-Signal

### 4.3 FM

#### Versuch 1:

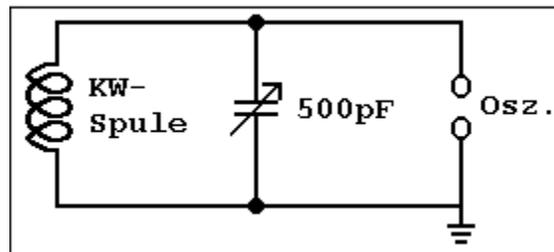


Abb.7: einfacher Empfangskreis

Man schließt den NF-Eingang des Senders an den Tonfrequenzgenerator mit sinusförmiger Wechselspannung an. Den Empfangskreis vereinfacht man gemäß Abb. 7 und stellt ihn auf optimalen Empfang ein. Dann schaltet man den Sender auf Frequenzmodulation FM um. Auf dem Oszillographen erscheint nach kurzer Zeit das Bild in Abb.8.

Auf den ersten Blick scheint es so, als hätte sich die Frequenz der NF gegenüber Abb. 4 verdoppelt. Aber der wirkliche Grund geht aus Abb. 9 hervor. Da der Empfänger auf optimalen Empfang eingestellt ist, stimmen die Grundfrequenz  $f_0$  des Senders und des Empfängers vollkommen überein. Daher schwankt die Hochfrequenz im Takte der Niederfrequenz um die Resonanzfrequenz  $f_0$  des Empfangsschwingkreises. Ist die Spannung der Niederfrequenz negativ, so liegt die Frequenz  $f_1$  der gesendeten Hochfrequenz etwas unterhalb von  $f_0$ . Im Empfangskreis ist daher die empfangene Spannung  $U_1$  etwas tiefer als die Spannung  $U_0$  im Resonanzmaximum.

Ähnliches gilt, wenn die Spannung der Niederfrequenz positiv ist. Dann ist zwar die Frequenz  $f_2$  der Hochfrequenz etwas höher als die Resonanzfrequenz  $f_0$ . Da aber die empfangene Frequenz  $f_2$  auf dem absteigenden Ast der Resonanzkurve liegt, ist die empfangene Spannung  $U_2$  tiefer als im Resonanzmaximum. Das frequenzmodulierte Signal des Senders wird im Empfänger in ein amplitudenmoduliertes Signal umgewandelt, wobei allerdings die Form verzerrt wird. Speist

man in den Sender ein Rechtecksignal ein, so scheint die Niederfrequenz gemäß Abb. 10 sogar völlig verschwunden zu sein. Denn nun entsteht für beide Hälften des Rechtecksignals im Empfangskreis für alle Zeiten die gleiche Spannung  $U_1$  bzw.  $U_2$ . Die Form des gesendeten Signals geht dabei völlig unter. Wie kann man dann aber bei Frequenzmodulation das exakte NF-Signal im Empfangskreis wiedergewinnen? Das zeigt der folgende Versuch.

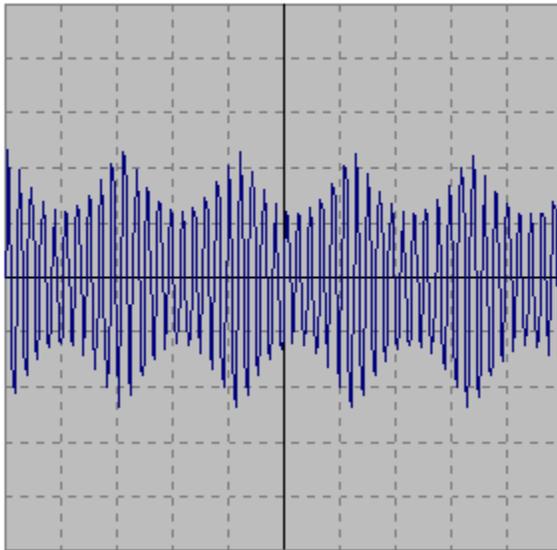


Abb.8: verzerrtes FM-Sinussignal

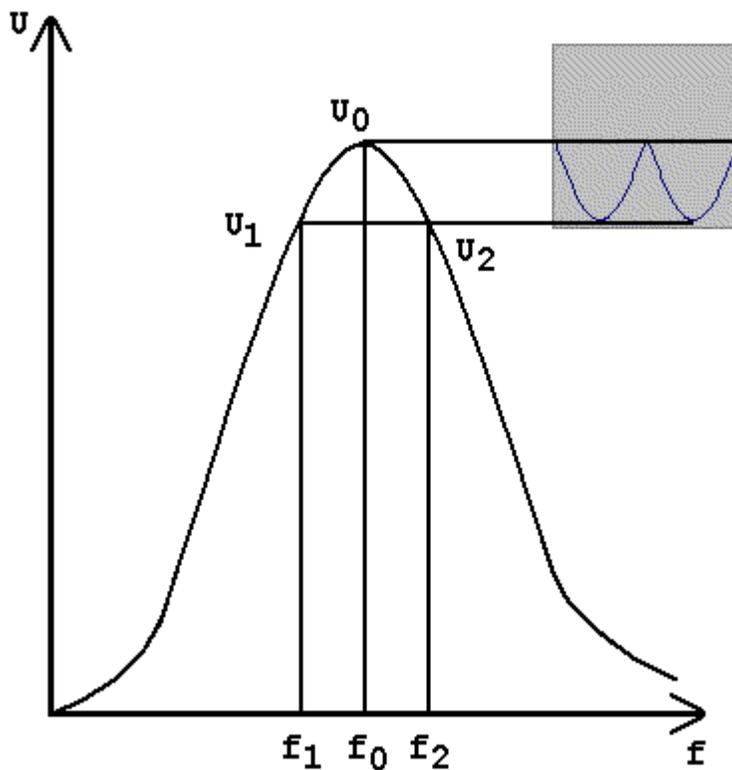


Abb.9: Erklärung zur Abb.8

## Versuch 2:

Man verstimmt den Empfangskreis aus dem vorigen Versuch etwas, indem man am Drehkondensator einen leicht veränderten Wert einstellt. Für ein NF-Sinussignal ergibt sich dann das Bild einer amplitudenmodulierten sinusförmigen HF gemäß Abb.4. Wurde der Sender mit einer Rechteckspannung frequenzmoduliert, so findet man die Kurve in Abb.11. Hier baut sich im Empfangskreis ein amplitudenmoduliertes rechteckförmiges HF-Signal auf.

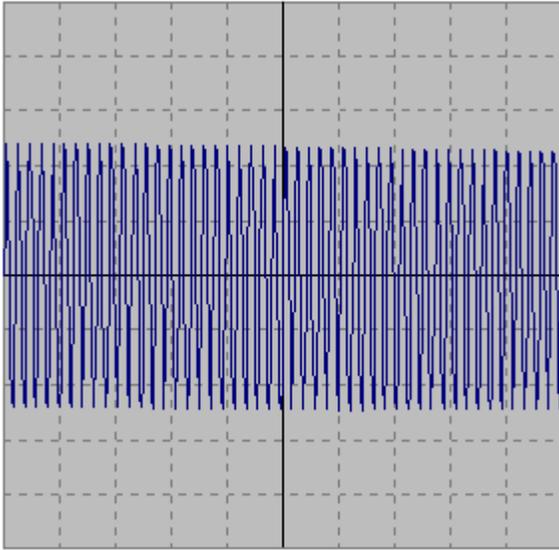


Abb.10: verzerrtes FM-Rechtecksignal

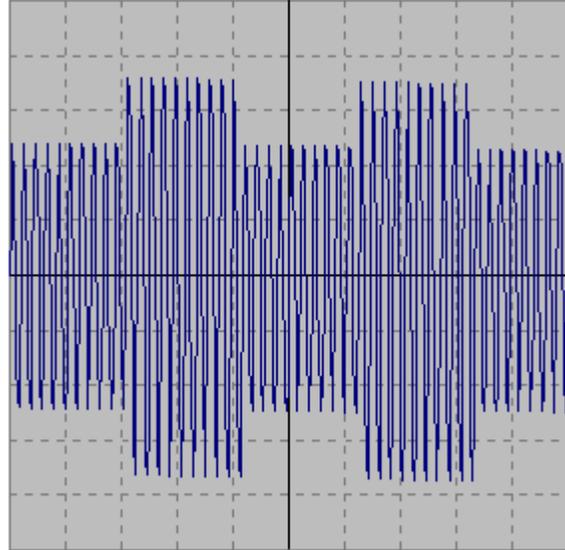


Abb.11: korrektes FM-Rechtecksignal

Erklärung:(s. Abb. 12)

Da die Sendefrequenz  $f_0$  und die Resonanzfrequenz des Empfangskreises nicht mehr übereinstimmen, liefert die Trägerfrequenz  $f_0$  am Empfangskreis eine Spannung  $U_0$ , die kleiner als die Resonanzspannung ist. Je nach Verstimmung des Empfangskreises liegt sie auf dem ab- oder aufsteigenden Ast der Resonanzkurve. Frequenzen  $f_2$ , die höher als  $f_0$  sind und daher einer positiven NF-Spannung entsprechen, liefern im Empfangskreis somit auch eine höhere Spannung  $U_2$  als die Frequenz  $f_0$ . Frequenzen  $f_1$ , die kleiner als  $f_0$  sind und daher von einer negativen NF-Spannung herrühren, ergeben nun in der Tat kleinere Spannungen  $U_1$  im Empfangskreis als die Trägerfrequenz  $f_0$ . Die Form der NF-Spannung wird also im Schwingkreis des Empfängers korrekt in einem amplitudenmodulierten Trägersignal wiedergewonnen. Es muss anschließend nur noch wie bei der Amplitudenmodulation demoduliert und verstärkt werden. Von der Methode, frequenzmodulierte Signale durch Verstimmung des Empfangskreises zu demodulieren, wird in modernen Radios nicht mehr Gebrauch gemacht, da sie sehr störanfällig ist. Sie kann beim Empfang zu Verzerrungen führen, wenn die Resonanzkurve keine Flanken mit einem genügend großen linearen Anteil aufweist. Außerdem wirken sich eventuell vorhandene Amplitudenmodulation verursachende Störquellen negativ aus wie bei allen amplitudenmodulierten Sendern. Vielmehr enthalten sie im Empfangskreis ebenfalls eine Kapazitätsdiode, die das frequenzmodulierte Signal direkt in ein amplitudenmoduliertes umwandelt. Somit kehren sich im Empfänger die Vorgänge im frequenzmodulierten Sender einfach um. Die Kapazitätsdiode ermöglicht ferner eine elegante Senderabstimmung mit Hilfe einer regelbaren Steuerspannung. Diese Spannung kann über ein Potentiometer oder über Sensortasten eingestellt werden.

Daneben wird in vielen Radios die Ratiodektorschaltung nach Abb. 13 eingesetzt. Sie behebt die Probleme, die bei FM-Empfang mit der einfachen Empfangsschaltung nach Abb.3 auftreten können.

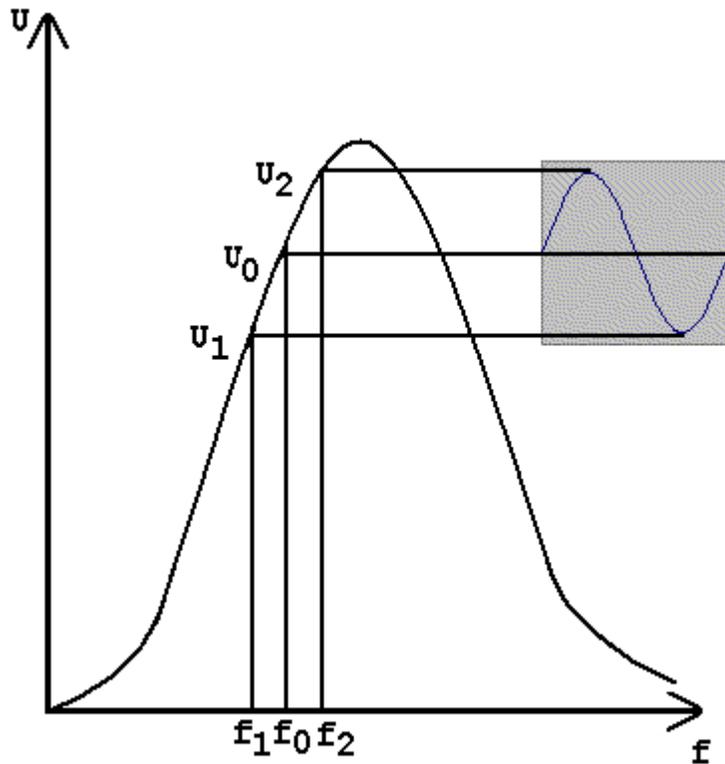


Abb.12:  
Erklärung des Empfangs bei FM

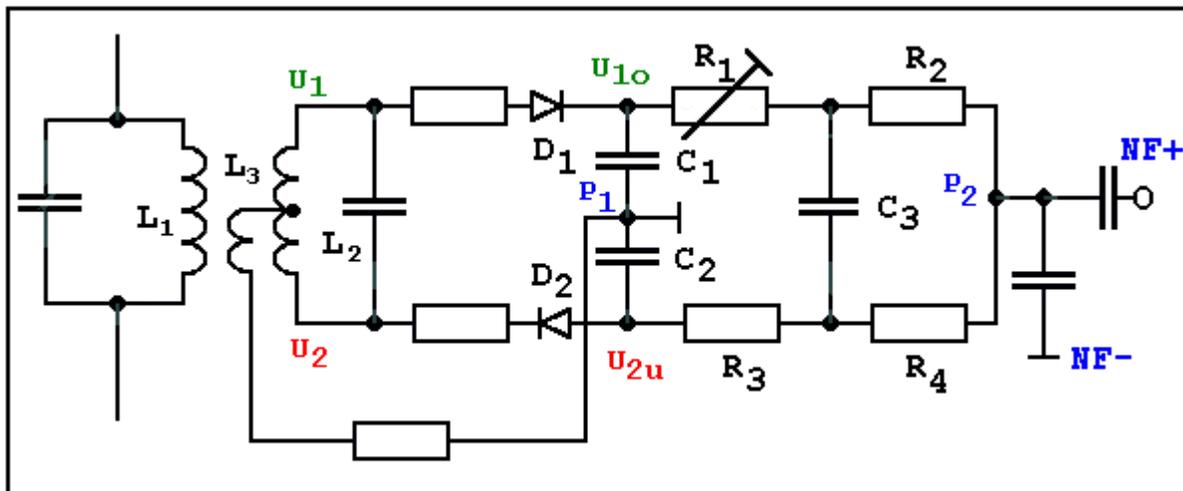


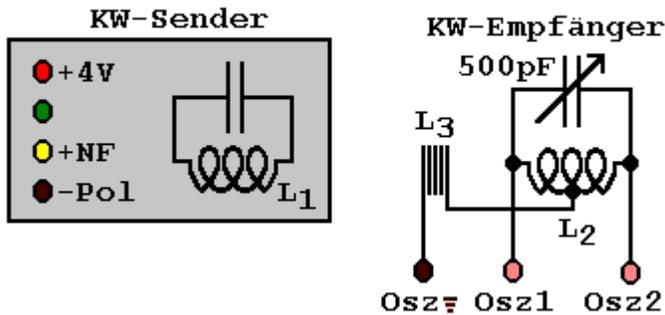
Abb. 13: Ratiodektor

Um die Vorgänge im Ratiodektor besser verstehen zu können, führt man den folgenden Versuch mit dem KW-Sender und dem einfachen Empfänger durch.

**Versuch 3:**

Aufbau:

Den benötigten Aufbau zeigt Abb.14.



**Abb.14:**  
Versuchsaufbau zum Ratiode-  
tektor

Man stellt den KW-Sender in etwa 15 cm Entfernung vom einfachen Empfangskreis aus Abb.7 auf. Der Sender wird dabei mit  $U = 4V$  betrieben und mit einer Rechteckspannung von ca. 500 Hz frequenzmoduliert. Die benötigte Primärspule  $L_3$  wickelt man sich aus dünnem, lackiertem Kupferdraht. Sie besitzt 4-5 Windungen. Die Enden des Drahtes werden als Schlaufe einmal um die Drahtwindungen geführt, damit die Windungen zusammen bleiben.

Durchführung:

Zunächst befindet sich die Spule  $L_3$  außerhalb des Einflussbereiches von Sender und Empfänger. Man stellt mit dem Drehkondensator den Empfänger auf Resonanz mit dem Sender ein. Das erkennt man daran, dass die beiden Signale an Osz1 und Osz2 etwa gleich groß sind und nicht oder nur wenig amplitudenmoduliert sind. Dann hält man die Spule  $L_3$  zwischen Sender und Empfänger.

Beobachtungen:

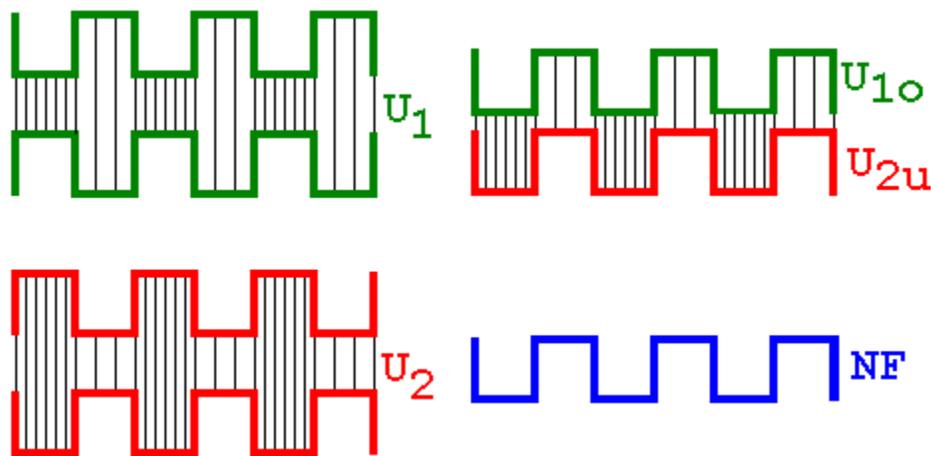
Befindet sich die Spule  $L_3$  nicht zwischen Sender und Empfänger, so zeigt der Oszillograph bei hoher Zeitauflösung (ns/cm-Bereich) zwei um  $180^\circ$  Phasen verschobene Sinusschwingungen an. Hält man sie zwischen Sender und Empfänger, so beobachtet man auf dem Oszillographen bei niedriger Zeitauflösung (ms/cm-Bereich) die beiden linken Kurven aus Abb.15.

Erklärung:

Im Ratiodektor wird das HF-Signal des Senders an  $L_1$  auf zweifache Weise auf die Spule  $L_2$  des Empfängers übertragen, einerseits als HF-Primärspannung über die Kopplungsspule  $L_3$  in die Mitte von  $L_2$  und andererseits als Sekundärspannung induktiv, wie beim einfachen Empfangskreis aus Abb.7. Dadurch wird die Sekundärspannung an  $L_2$  in zwei um  $180^\circ$  Phasen verschobene Teilspannungen gespalten, die sich mit der HF-Primärspannung überlagern. Sind beide Schwingkreise in Resonanz, so weisen die beiden Summenspannungen den gleichen Wert und gleich bleibende Amplitude auf, da die Phasendifferenz zwischen der HF-Primärspannung und der einen Hälfte der HF-Sekundärspannung  $90^\circ$  und der anderen Hälfte der Sekundärspannung  $-90^\circ$  beträgt.

Ist einer der Schwingkreise aufgrund der vorliegenden Frequenzmodulation gegen den anderen etwas verstimmt, so unterscheiden sich beide Summenspannungen, da die Phasendifferenz zwischen Primär- und Sekundärspannung von  $90^\circ$  abweicht, für die eine Hälfte der Sekundärspannung steigt sie somit über  $90^\circ$  (z.B. auf  $110^\circ$ ), für die andere über  $-90^\circ$  (z.B. auf  $-70^\circ$ ). Mit steigender Frequenz nimmt daher die Amplitude der einen Summenspannung  $U_1$  am oberen Ende der Spule  $L_2$  ab, die der Spannung  $U_2$  am unteren Ende zu (s. Abb. 15). Mit sinkender Frequenz ist es umgekehrt, da dann die Phasendifferenz für beide Teilspannungen gegenüber der Primärspannung abnimmt, für die obere etwa auf  $70^\circ$ , für die untere auf  $-110^\circ$ . Die Striche in Abb.15

deuten das Hochfrequenzsignal an. Die beiden Summenspannungen werden anschließend über die Dioden  $D_1$  bzw.  $D_2$  jede für sich gleichgerichtet (s. Abb.13). Da die Dioden entgegen gesetzt gepolt sind, bleibt von  $U_1$  die obere Hüllkurve  $U_{1o}$ , von  $U_2$  die untere  $U_{2u}$  erhalten (s. Abb.15). Beide werden in einer Brückenschaltung, bestehend aus den Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  sowie den Widerständen  $R_1 - R_4$ , miteinander verglichen (s. Abb.13). In der Diagonalen der Brückenschaltung tritt zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  das der HF-Primärspannung aufmodulierte Niederfrequenzsignal als Spannung NF (s. Abb.15) auf und kann in der gewohnten Weise weiterverstärkt werden. Aufgrund der Brückenschaltung wird das gewonnene NF-Signal durch den nach geschalteten NF-Verstärker nur wenig belastet und so ein Absinken der NF-Spannung verhindert. Der Kondensator  $C_3$ , der als eigenständiger Brückenweig geschaltet ist, gleicht Schwankungen der HF-Spannung aus und bewirkt so, dass Störungen unterdrückt werden. In einem Radio wird nicht die empfangene HF im Ratiidetektor demoduliert, sondern die Zwischenfrequenz ZF (s. Kapitel 3.6).



**Abb.15: auftretende Spannungen in der Ratiidetektorschaltung**

#### 4.4 Audion

Verwendet man die Empfängerschaltung nach Abb. 3, so müssen für guten Empfang Radiosender und Radioempfänger nahe beieinander aufgestellt werden, da der Empfänger sehr unempfindlich ist. Besseren Empfang gewährleistet die Schaltung in Abb. 16, auch Audion genannt. Die im Schwingkreis durch die Antenne hervorgerufene HF-Spannung wird durch den Transistor verstärkt und außerdem gleichgerichtet. Ist der Arbeitspunkt des Transistors korrekt eingestellt, so schaltet er nämlich in der einen Halbwelle der HF durch, in der anderen sperrt er. Die Reste der HF werden durch die Siebkette herausgefiltert. Die entstehende NF kann in der gewohnten Weise weiter verstärkt und über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden. Für den Aufbau der Schaltung benötigt man folgende Bauteile:

- 1 Lochrasterplatine 5 X 9 cm, mit Lötstreifen, RM 2,54 mm
- 2 Holzleisten 2 x 2 cm, Länge je 7 cm
- 1 "Ferrero Rocher"-Dose
- 1 gelbe Buchse, vollisoliert, 4 mm

- 1 grüne Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 rote Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 schwarze Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 blaue Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 Transistor BF 494
- 1 Kondensator 470 pF
- 1 Kondensator 47 nF
- 1 Kondensator 10 nF
- 1 Kondensator 10  $\mu$ F
- 2 Widerstände 100 k $\Omega$
- 1 Widerstand 470 k $\Omega$
- 1 Drehkondensator 500 pF von Phywe
- 1 MW- oder KW-Spule von Phywe
- 4 Holzschrauben, Durchmesser: 2 mm, Länge: 11 mm
- etwas Schalllitze
- etwas Patex, etwas Klebeband

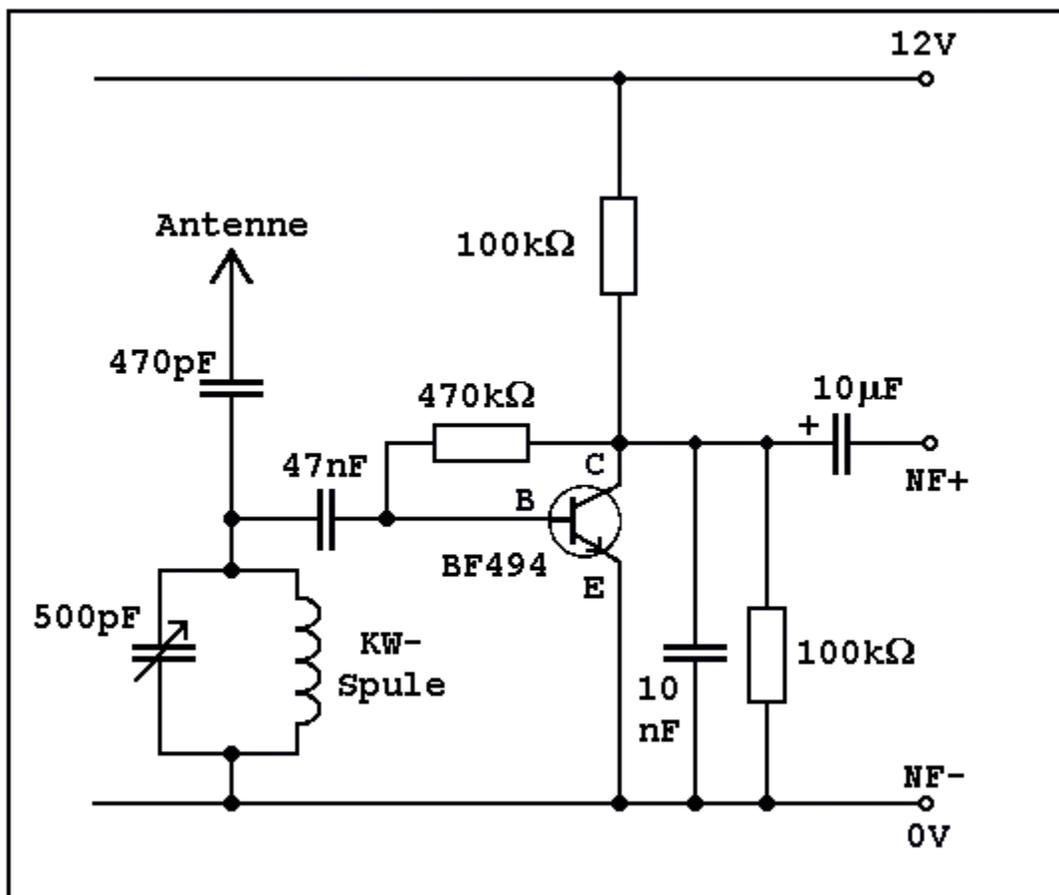


Abb. 16: Audion-Empfänger

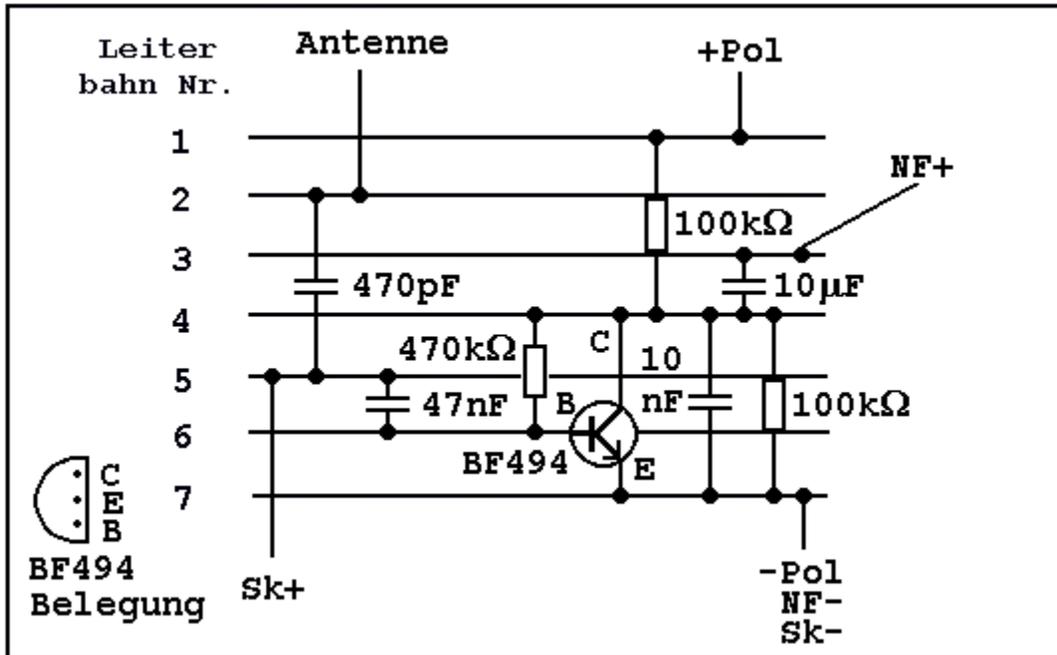


Abb. 17: Platine Audion

Die Bauteile verlötet man nach dem Schaltplan aus Abb.17 auf der Lochrasterplatine. Als billiges Gehäuse für die fertige Schaltung bietet sich eine leere "Ferrero Rocher"-Dose an, da sie aus recht stabilem Plastik besteht und außerdem durchsichtig ist, wodurch die Schüler die innen liegende Schaltung sehen können. Ferner kann man in ihren Deckel mit einer Bohrmaschine mit Holzbohrer Löcher für die Anschlussbuchsen bohren, ohne dass der Kunststoff reißt. Es werden fünf Buchsen benötigt: eine rote Buchse für den Pluspol der Betriebsspannung, eine grüne für die Antenne, eine gelbe für den Pluspol der NF, eine blaue für den Pluspol des Schwingkreises und eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol der Betriebsspannung, der NF-Quelle und des Schwingkreises. Die fertige Platine befestigt man mit vier Holzschraubchen auf zwei Holzleisten mit einem Querschnitt von 2 x 2 cm und einer Länge von 7 cm. Die beiden Holzleisten klebt man mit etwas Patex auf den Boden des Gehäuses. Dann verbindet man die entsprechenden Bahnen der Platine über etwas Schalltitze mit den Buchsen. Den Deckel der Dose kann man zum Schluss mit etwas Klebeband verschließen.

Die Eingangsempfindlichkeit lässt sich erheblich steigern, wenn man zwischen Schwingkreis und Transistor HF-Verstärkerstufen einbaut. Dieses Konzept wird in einer kleinen integrierten Schaltung umgesetzt, mit der man mit wenigen zusätzlichen externen Bauteilen einen kompletten MW-Empfänger guter Qualität bauen kann. Abb. 18 zeigt den Schaltplan. Herzstück der Schaltung ist das IC ZN414Z. Es ist ein kleines Meisterwerk der Mikroelektronik. Obwohl es nur die Größe eines Kleintransistors hat, enthält es dennoch einen kompletten AM-Empfänger, bestehend aus einer Eingangsstufe als Impedanzwandler, drei über Kondensatoren gekoppelte HF-Verstärkerstufen und einer Transistorstufe als Demodulator. Die am Ausgang erhaltene NF wird wie üblich über eine externe NF-Stufe weiterverstärkt und über einen Lautsprecher wiedergegeben. Dazu enthält die Schaltung nach Abb.16 bereits einen kleinen NF-Vorverstärker mit dem Transistor BC 549C als wichtigstem Bauteil. Mit ihm kann man einen hochohmigen Ohrhörer sogar direkt ansteuern. Dazu müsste man in der obigen Schaltung den Widerstand von 10 kΩ im Kollektorkreis des Transistors nur durch einen Ohrhörer ersetzen. In diesem Falle kann man das

Radio mit einer Knopfzelle von 1,35 V betreiben. Die beiden Dioden 1N4148 und der Widerstand von 1,5 k $\Omega$  können dann entfallen. Sie dienen nur dazu, die Betriebsspannung von 9 V, die man für einen nach geschalteten, leistungsstärkeren NF-Verstärker benötigt, auf die eigentliche Betriebsspannung des IC's von ca. 1,3 V zu begrenzen. Verwendet man als Antenne einen ca. 5 cm langen Ferritstab, auf den man die MW-Spule aus lackiertem Kupferdraht wickelt, so benötigt man keine zusätzliche Kabelantenne mehr. Die Schaltung passt dann fast in eine Streichholzschachtel und das bei gutem Empfang im gesamten MW-Bereich.

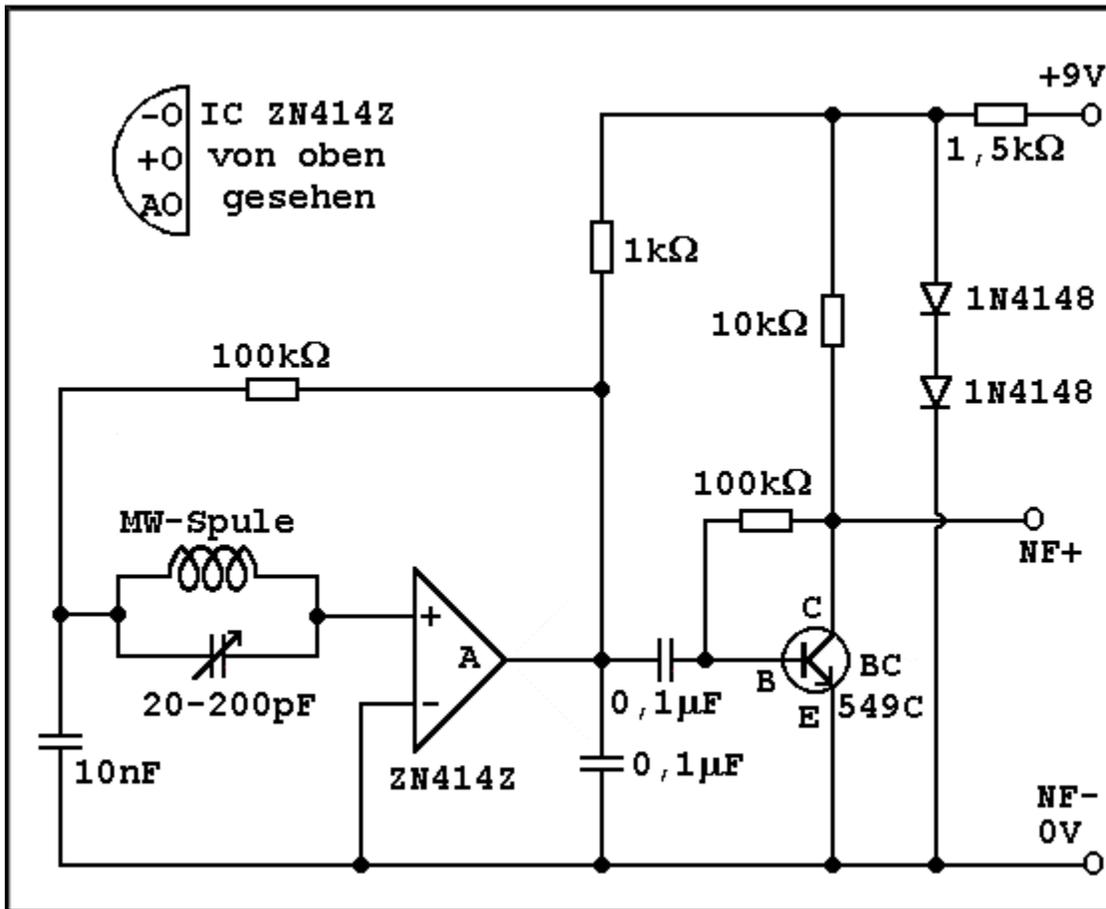


Abb. 18: Schaltplan MW-Empfänger

#### 4.5 Pendelaudio

Mit der Schaltung in Abb. 16 kann man auch normale Radiosender empfangen und zwar bei entsprechender Auslegung des Schwingkreises im MW- und KW-Bereich. Am besten verwendet man dazu die Phywe-Spulen und den dazu gehörenden Drehkondensator. Drei bis vier Sender können so problemlos abgehört werden. Dabei stellt man zwei Probleme fest, mit denen auch die Radiopioniere zu kämpfen hatten. Die Lautstärke eines Senders hängt von seiner abgestrahlten Leistung ab. Ortsnahe, starke Sender dröhnen extrem laut aus dem Lautsprecher, während schwächere Sender auch bei weit aufgedrehtem NF-Verstärker nur leise zu hören sind. Zum zweiten lässt die Trennschärfe sehr zu wünschen übrig. Ein starker Sender überlagert im Frequenzband benachbarte Sender, im Extremfall sogar alle Sender des Frequenzbereiches, so dass schwächere Sender nur in schlechter Qualität oder überhaupt nicht empfangen werden können.

Es hat weitere Schaltungsvorschläge gegeben, diese Probleme zu beheben, z.B. das Pendelaudion, bei Radiotechniker auch Pendler genannt. Die Abbildung 19 zeigt den Schaltplan für ein solches Pendelaudion.

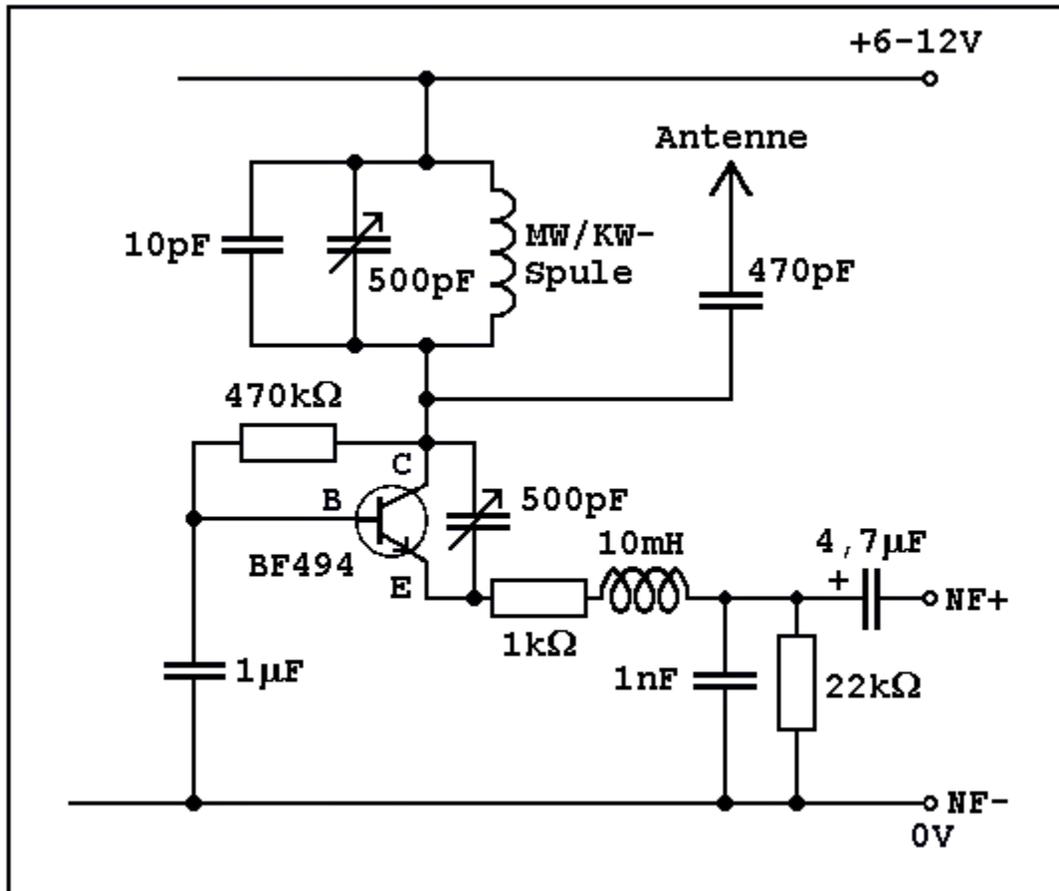


Abb. 19: Pendelaudion

Der Schwingkreis liegt im Kollektorkreis. Die Rückkopplung erfolgt über den Drehkondensator zwischen Kollektor und Emitter des Transistors. Durch die richtige Einstellung des Kopplungskondensators wird dafür gesorgt, dass die einsetzenden Schwingungen rasch wieder abreißen. So ergibt sich ein Pendeln zwischen Aufschaukeln und Abklingen. Dadurch wird die HF auf die Pendelfrequenz übertragen und gleichzeitig demoduliert. Die Pendelfrequenz liegt oberhalb des Hörbereiches. Sie wird bestimmt durch den Emitterwiderstand und den Emitterkondensator. Sie beträgt im vorliegenden Beispiel ca. 25 kHz. Der Kondensator wird durch den Emitterstrom des Transistors geladen. Dadurch steigt das Emitterpotential und der Transistor sperrt. Dann entlädt sich der Kondensator über den parallel geschalteten Widerstand, der Transistor wird wieder leitend und das ganze Spiel beginnt von vorn. Reste der HF und die Pendelfrequenz werden dabei durch die Induktivität herausgefiltert, so dass am nach geschalteten RC-Glied die NF anliegt. Sie wird wie üblich weiterverarbeitet. Der Pendler ermöglicht eine hohe Verstärkung, rauscht aber bei schwachem Empfang stark. Da die Pendelaudionschaltung gleichzeitig als Sender wirkt, müssen im professionellen Einsatz durch eine Vorstufe Antenne und Pendelaudion sauber ge-

trennt werden, um Störungen benachbarter Sender zu vermeiden. Das Pendelaudion wurde aus diesen Gründen nur kurze Zeit in Radios verwendet.

Bei richtiger Einstellung des Kondensators zwischen Kollektor und Emitter kann man einen oder mehrere Sender im KW- bzw. MW-Bereich empfangen. Dabei stellt man fest, dass die Trennschärfe für die einzelnen Sender so hoch ist, dass es manchmal schwierig ist, mit handelsüblichen Drehkondensatoren einen Sender exakt auszuwählen. In käuflichen Radios wurden daher Drehkondensatoren mit Übersetzungen verwendet.

#### 4.6 Superhet

Wirklich überzeugend wird der Radioempfang erst mit den in modernen Radios üblichen Superhet-Empfängern, auch Überlagerungsempfänger genannt. Der schaltungstechnische Aufwand für einen solchen Empfänger ist schon recht groß, wenn man ihn mit diskreten Bauteilen nachbauen will. Daher gibt es fertige IC's zu kaufen, die nur mit wenigen zusätzlichen externen Bauteilen beschaltet werden müssen. Die damit aufgebauten Radios sind qualitativ hochwertig, wie ich aus eigener Erfahrung bestätigen kann.

Wie funktioniert dieser Super, wie die Radioelektroniker ihn nennen? Mit dem über die Antenne und den Schwingkreis empfangenen und in der HF-Vorstufe verstärkten HF-Signal des Senders wird in der Mischstufe eine eigens im Radioempfänger erzeugte zusätzliche HF moduliert. Diese HF übersteigt die HF des eingestellten Senders um einen festen Frequenzwert, auch Zwischenfrequenz ZF genannt. Dabei entsteht eine Schwebung mit der Frequenz ZF. Sie enthält alle Informationen des eingestellten Senders und zwar sowohl bei Amplituden- als bei Frequenzmodulation. Die ZF wird mit einem genau eingestellten Bandfilter sauber von allen anderen Frequenzen getrennt, in der ZF-Stufe auf einen festen Wert verstärkt und anschließend demoduliert.

Für die AM- und FM-Bereiche erhält man diverse IC's für Mono- oder Stereoempfang mit und ohne Sendersuchlauf. Für einige sind komplette Bausätze im Elektronikhandel erhältlich. Abb. 20 zeigt den Schaltplan für ein Mono-UKW-Radio mit sehr gutem Empfang. Das Herzstück der Schaltung bildet der integrierte Schaltkreis TDA 7000, der bis auf einige externe, passive Bauteile sämtliche Funktionen eines FM-Empfängers (HF-Verstärker, Oszillator, Mischstufe, ZF-Verstärker, Demodulator und NF-Vorverstärker) beinhaltet. Zuerst gelangt das Antennensignal zu dem aus C4, C5 und L2 bestehenden externen Bandfilter, das Frequenzen außerhalb des UKW-Bandes unterdrückt. Das intern verstärkte HF-Signal wird in der Mischstufe mit dem intern erzeugten Oszillatorsignal gemischt. Das Abstimmen des Empfängers beschränkt sich dabei ausschließlich auf das Ändern der Oszillatorfrequenz. Dazu wird der Kapazitätsdiode D2 eine Regelspannung über den Widerstand R4 zugeführt. Um diese Spannung unabhängig vom Batteriezustand zu machen, wird sie mit einer Zenerdiode D1 stabilisiert. T1 ist dazu als Konstantstromquelle geschaltet und versorgt D1 mit einem konstanten Strom. Der Regelbereich der Kapazitätsdiode beträgt etwa 5,1 ... 7,5 V. Die von der Mischstufe gelieferte ZF wird zunächst vorverstärkt, in einem aktiven Tiefpass gefiltert, um eine genügende ZF-Trennschärfe zu erzielen, und dann in einem weiteren Verstärker begrenzt. Die externen Kondensatoren C12, C13, C1, C2 und C3 bilden die Filter für diesen ZF-Verstärker/Begrenzer. Die ZF wird von C8 bestimmt und ist mit ca. 70 kHz ungewöhnlich niedrig. Normal sind für FM-Empfänger Zwischenfrequenzen von 10,7 MHz.

Das direkte ZF-Signal und das mit Hilfe von C9 phasenverschobene ZF-Signal werden anschließend im „Vergleicher“ (Korrelator) miteinander verglichen. Der Korrelator steuert den Stumm-schalter („Mute-Switch“), der das Audiosignal bei unzureichender Korrelation unterdrückt. Mit

dem Schalter S1 kann das Aktivieren der Mute-Funktion unterbunden werden. Dazu wird einfach der Widerstand R1 über den Schalter S1 an die positive Spannung gelegt. Das ZF-Signal gelangt vom ZF-Begrenzer auch zum Demodulator. Das dabei gewonnene NF-Signal wird über die interne Mute-Stellerstufe an den NF-Ausgang (Pin2) der integrierten Schaltung geführt. Von dort kann es zu einem NF-Verstärker weitergeleitet werden, der es über einen Lautsprecher hörbar macht.

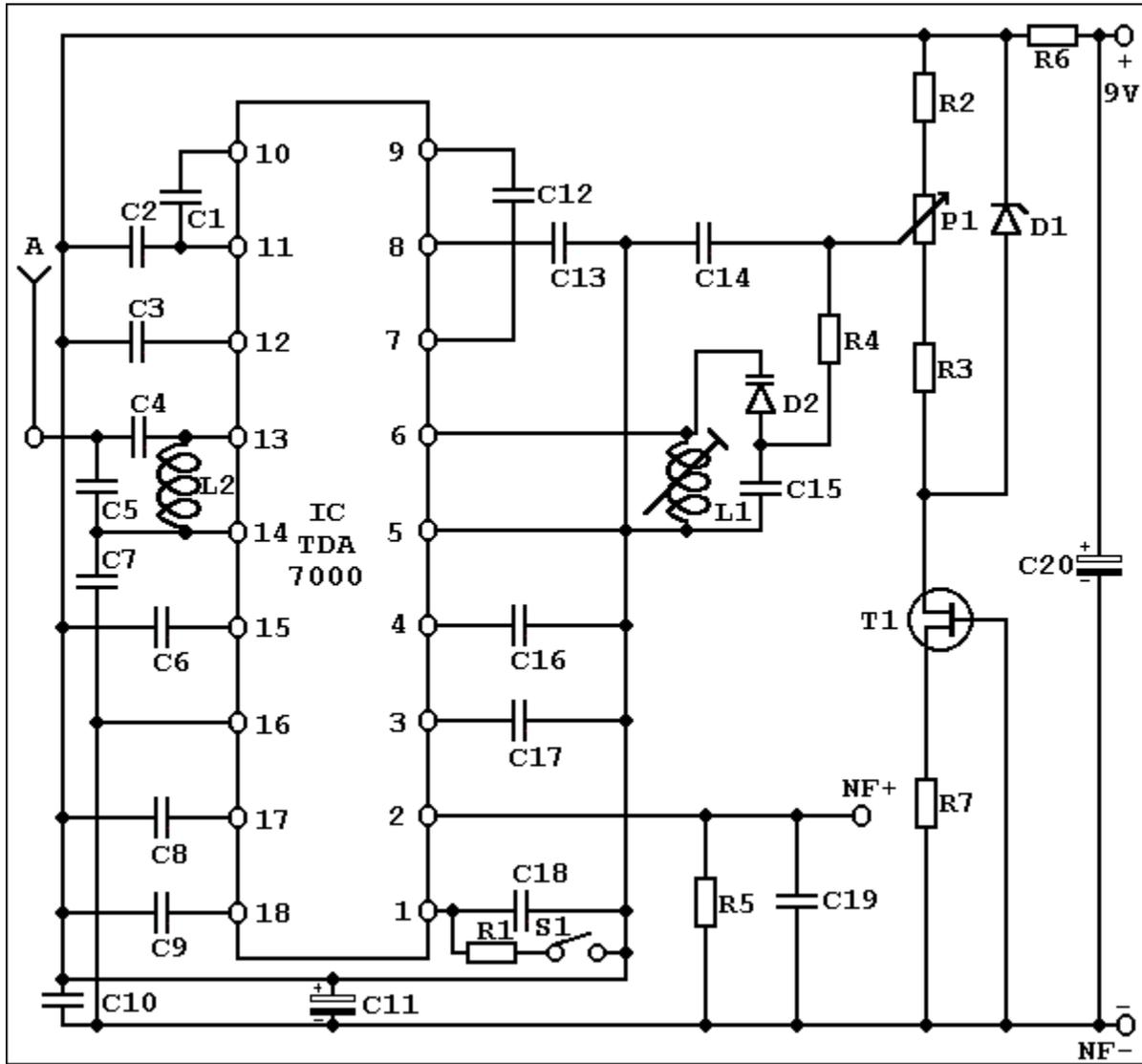


Abb. 20: Mono-UKW-Empfänger

Die benötigten externen Bauteile haben die Werten in Tabelle 1.

<b>Kondensatoren</b>				
C1	330 pF		C2	3,3 nF
C3	150 pF		C4	39pF
C5	47 pF		C6	0,1 $\mu$ F
C7	2,2 nF		C8	330 pF
C9	220 pF		C10	10 nF
C11	Elko 470 $\mu$ F		C12	3,3 nF
C13	180 pF		C14	10 nF
C15	3,3 nF		C16	10 nF
C17	22 nF		C18	0,15 $\mu$ F
C19	1,8 nF		C20	Elko 100 $\mu$ F
<b>Widerstände</b>				
R1	10 k $\Omega$		R2	2,2 k $\Omega$
R3	5,6 k $\Omega$		R4	10 k $\Omega$
R5	22 k $\Omega$		R6	150 $\Omega$
R7	2,2 k $\Omega$			
<b>Dioden</b>				
D1	ZPD 3V6		D2	BB 205
<b>Potentiometer/Transistor</b>				
P1	100 k $\Omega$ lin		T1	BF 256 A,B oder C
<b>Induktivitäten/Spulen</b>				
L1	56 nH		L2	im IC, fest
<b>andere Teile</b>				
A	UKW-Antenne		S1	Schalter Ein/Aus
<b>Tabelle 1: Externe Bauteile</b>				

## 5. Zahnbürstenradio

Oszillatoren werden auch verwendet, um statt Informationen Energie übertragen, z.B. in den Ladegeräten für elektrische Zahnbürsten, Taschenlampen oder Smartphones. Sie arbeiten mit Frequenzen zwischen 20 – 40 kHz. Daher reicht die zeitliche Auflösung von modernen Messwertfassungssystemen aus, um mit ihnen die Vorgänge bei der Amplitudenmodulation aufzuzeichnen. Da solche MWS-Geräte an vielen Schulen bereits als Schülersatz vorhanden sind, können die Schüler die Versuche selbst durchführen. Dazu bauen Sie das Ladeteil einer elektrischen Zahnbürste (s. Skript Zahnbürste auf dieser Webseite) mit wenigen Bauteilen nach. Sie können damit Musik auf einen einfachen Demodulator übertragen und hörbar machen. Man benötigt die Sendeschaltung bzw. Empfangsschaltung in Abb. 1 und 2. Die Sende- und Empfangsspule kann man sich aus einer alten Zahnbürste ausbauen oder sich vergleichbare Spulen im Elektronikhandel besorgen. Als Tonquelle dient der Kopfhörerausgang eines Audiogerätes, eines Radios, Smartphones, oder Tonfrequenzgenerators. Bevor Sie loslegen, muss ich noch auf einen wichtigen Punkt hinweisen. Aus nicht bekannten Gründen stören die EM-Wellen im Bereich um 30 kHz die Steuerung von cassy mobile. Daher muss man während der Experimente das Gerät erden, in dem mit einer Hand das blanke Ende eines Kabels anfasst, dessen anderes Ende man in den Erdeingang von cassy steckt. Dann lässt sich das Gerät problemlos bedienen.

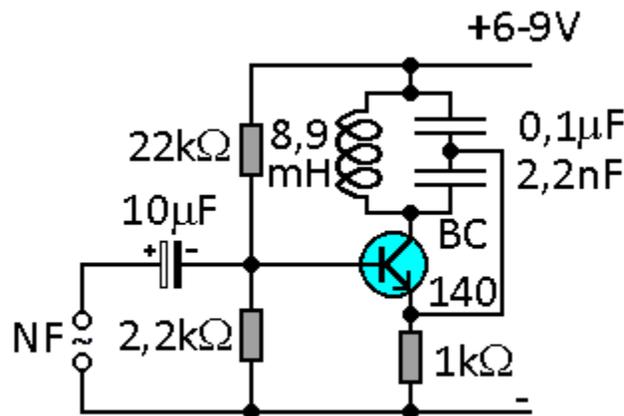


Abb.1: Audiosender

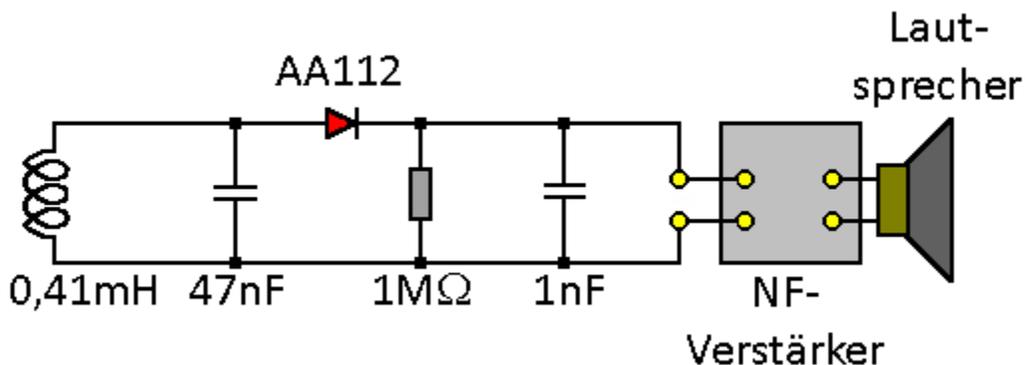


Abb.2: Audioempfänger

### Versuch 2a:

#### Durchführung:

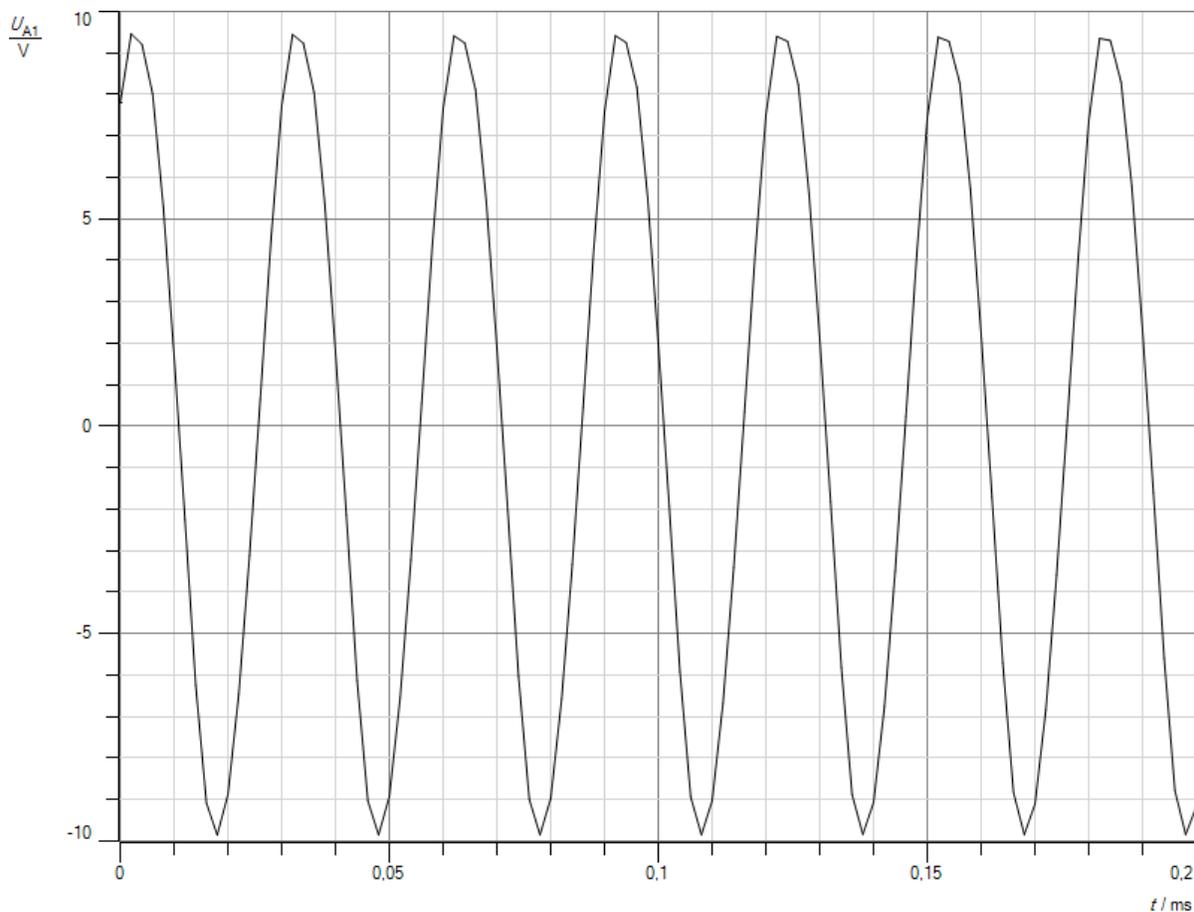
Man baut die Sende- und Empfangsschaltung nach Abb. 1 und 2 auf. Als NF-Quelle benutzt man den Ohrhörerausgang eines Audiogerätes. Dann bringt man die beiden Spulen mit den Stirnflächen bis auf eine Entfernung von 1- 2 cm zusammen. Anschließend schiebt man zwischen sie ein Stück Karton oder Holz, die Hand bzw. eine Metallplatte.

#### Beobachtung:

Man hört aus dem Lautsprecher des Empfangsteils die im Sender eingespeiste Musik. Hält man die Hand oder ein Stück Karton bzw. Holz zwischen die Spulen, so wird die Übertragung nicht gestört. Bei der Metallplatte bricht sie dagegen sofort ab.

#### Erklärung:

Der Sender strahlt elektromagnetische Wellen ab, die den Empfangskreis durch Induktion zu Resonanzschwingungen anregen. Sie werden gleichgerichtet. Das Trägersignal wird herausgefiltert, die Musikfrequenzen werden verstärkt und durch den Lautsprecher hörbar gemacht. Elektromagnetische Wellen können nichtmetallische Gegenstände problemlos durchdringen. Von Metallteilen werden sie dagegen abgeschirmt.



**Abb. 3: Entdämpfte Schwingung des Senders**

## Versuch 2b:

### Durchführung:

Man baut die Sendeschaltung in Abb. 1 auf. Man greift mit einem Messwerterfassungssystem wie cassy mobile die Spannung an der Spule ab. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 200  $\mu$ s, Intervall: 2  $\mu$ s, Trigger:  $U_A$ . 5V,  $\Delta$ ,  $t_0 = 0$ . Im Spannungsmenü  $U_A$  schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -10 V - +10 V um.

### Beobachtung:

Man erhält die Messkurve in Abb. 3.

### Auswertung:

Man bestimmt die Periodendauer aus der Kurve und erhält:

$$T = 0,03 \text{ ms.}$$

Daraus ergibt sich die Frequenz  $f$  zu:

$$f = \frac{1}{T} = 33,3 \text{ kHz.}$$

Um die theoretische Frequenz des Oszillators zu ermitteln, errechnet man zunächst die Gesamtkapazität der beiden in Reihe geschalteten Kondensatoren in Abb. 1. Es gilt:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{100 \text{ nF}} + \frac{1}{2,2 \text{ nF}} = \frac{0,465}{\text{nF}}.$$

Daraus folgt für  $C_{ges}$ :

$$C_{ges} = 2,15 \text{ nF.}$$

Mit der Thomsonschen Schwingungsformal erhält man für die Periodendauer  $T$  bzw. die Frequenz  $f$  des Senders:

$$T = 2\pi * \sqrt{L * C} = 2\pi * \sqrt{8,9 \text{ mH} * 2,15 \text{ nF}} = 0,275 \text{ ms}$$

und für  $f$ :

$$f = \frac{1}{T} = 36,4 \text{ kHz.}$$

Für die theoretische Frequenz des Empfangskreises gilt;

$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{0,41 \text{ mH} * 47 \text{ nF}}} = 36,3 \text{ kHz.}$$

Die theoretischen Frequenzen des Senders und Empfängers sind fast identisch und stimmen unter Berücksichtigung der Toleranzen der verwendeten Bauteile gut mit dem gemessenen Wert überein.

Der Collpits-Oszillator funktioniert wie folgt: Beim Einschalten werden die Kondensatoren  $C_3$  und  $C_4$  durch den Kollektorstrom des Transistors aufgeladen. Sie bilden einen kapazitiven Spannungsteiler. Sie entladen sich in der Sperrphase des Transistors über die Spule. Der Schwingkreis wird angestoßen und beginnt zu schwingen. Um Energieverluste auszugleichen und ein Abschwächen der Schwingung zu verhindern, wird ein Teil der Spannung im Schwingkreis auf den Emitter geführt. Dadurch wird der Transistor im Takte der Hochfrequenz ein- und ausgeschaltet. Im leitenden Zustand versorgt er den Schwingkreis mit neuer Energie, um die Energieverluste an den Empfänger aufgrund der induktiven Kopplung zu kompensieren. Die Schaltung ähnelt der geläufigen Dreipunktschaltung, die im Kapitel 3 benutzt wird. Nur wird dort die Spannung durch einen zusätzlichen Abgriff an der Spule auf die Basis des Transistors rückgekoppelt. Entscheidend für das Durchschalten des Transistors ist die Spannung zwischen der Basis und dem Emitter. Und die kann man ändern, indem man das Potential der Basis oder des Emitters anhebt bzw. absenkt.

Diese Schaltung bietet wegen der geringen Trägerfrequenz weitere interessante Möglichkeiten. Mit ihr lassen sich die Vorgänge bei der Modulation bzw. Demodulation auch mit cassy mobile, also in Schülerexperimenten, genauer untersuchen. Für Testsender im MW-, KW- oder UKW-Bereich benötigt man einen herkömmlichen Oszillographen mit größerer Zeitauflösung (s. Kapitel 3).

### **Versuch 2c:**

#### Durchführung:

Man baut die Sende- und die Empfangsschaltung in Abb. 1 und 2 ohne Verstärker und Lautsprecher auf. Als NF-Quelle dient ein Recht- oder Sinusgenerator mit  $f_{NF} = 400$  Hz. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 20 ms, Intervall: 20  $\mu$ s, Trigger:  $U_A$ , 1- 1,5V,  $\Delta$ ,  $t_0 = 0$ . Im Spannungsmenü  $U_A$  schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -3V +3V um. Man schließt den Spannungseingang von cassy zunächst an die Spule und dann an den NF-Ausgang des Empfangskreises an. Anschließend entfernt man aus der Empfangsschaltung den Kondensator  $C = 1$  nF. Für alle drei Fälle zeichnet man die Spannung auf. Im 4. Teilversuch vertauscht man die Anschlüsse an der Diode und wählt am Trigger eine negative Vorspannung von - 1- 1,5 V. Man wiederholt die Teilversuche 2 und 3. Im letzten Teilversuch schaltet man den Trigger in cassy aus und ersetzt die Diode durch einen Widerstand mit  $R = 100$  k $\Omega$ .

#### Beobachtung:

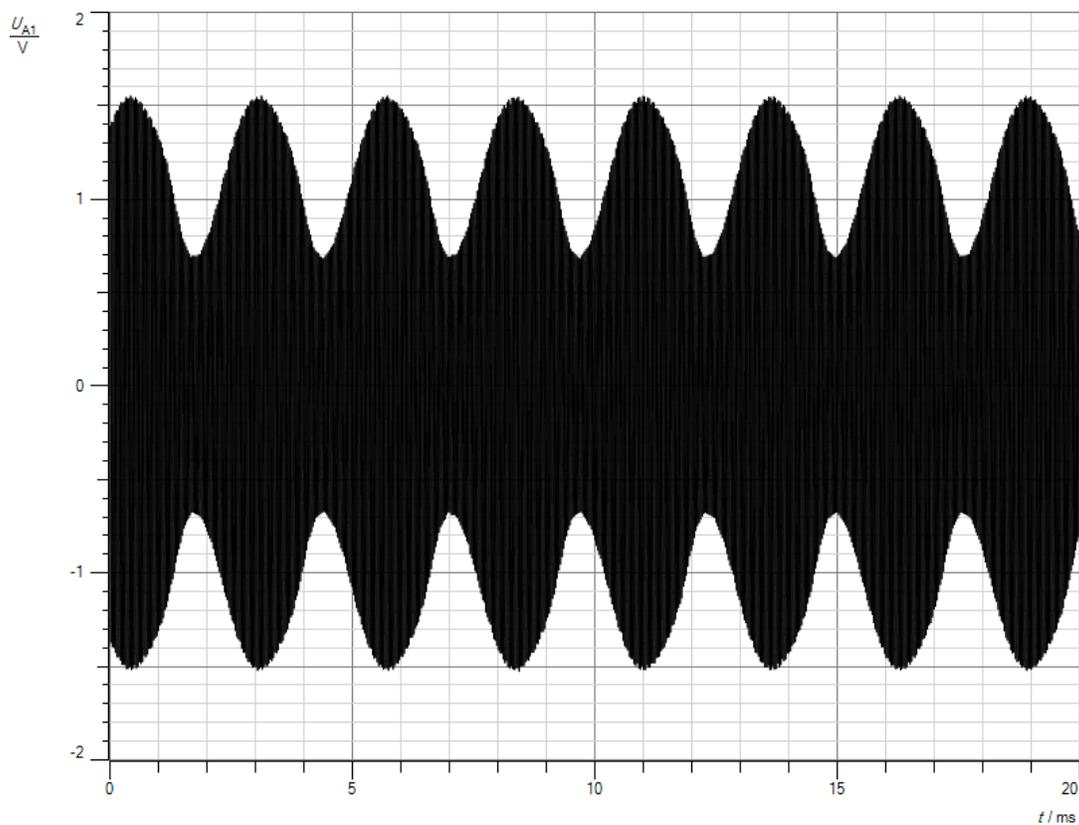
In den ersten drei Teilversuchen erhält man die Kurven in Abb. 5a-c. Vertauscht man die Anschlüsse an der Diode, so wird der obere Teil der Kurve in Abb. 5a abgeschnitten. Die Messkurven 5b und 5c verlaufen im negativen Bereich. Ersetzt man die Diode durch den Widerstand  $R = 100$  k $\Omega$ , so erhält man die Kurve in Abb. 5d.

#### Erklärung:

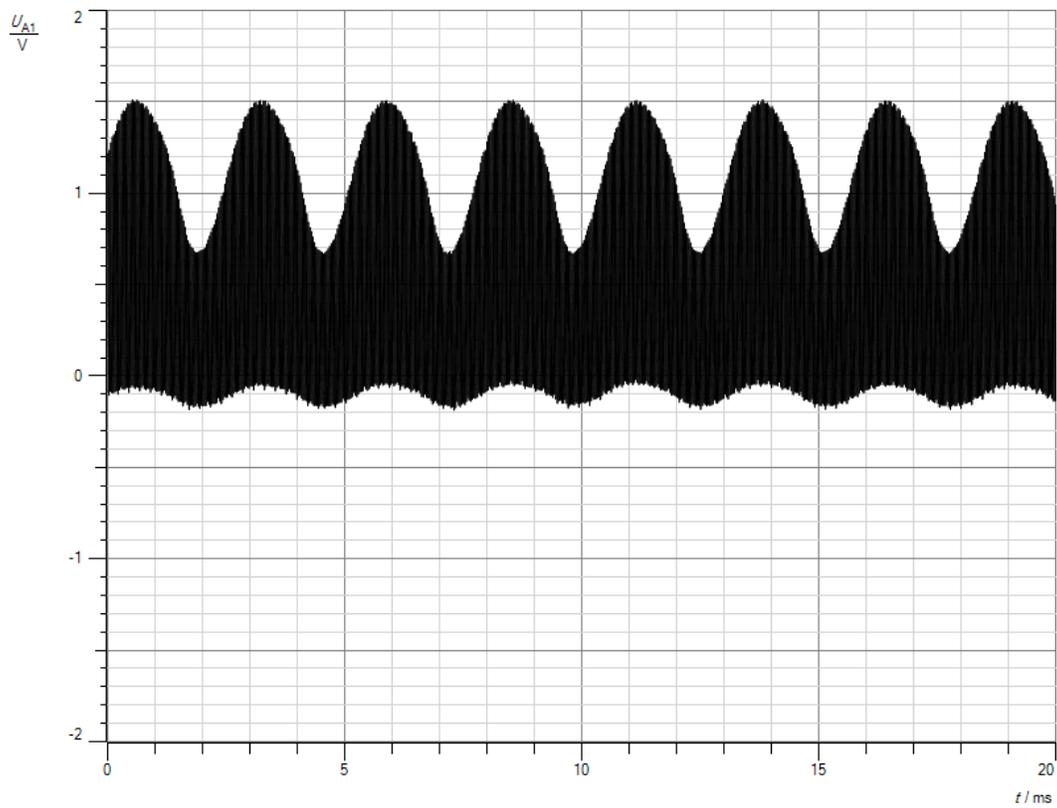
Das in den Sender eingespeiste Sinussignal moduliert die Amplitude der entdämpften Schwingung des Senders. Im Empfänger regt dieses amplitudenmodulierte Signal den Schwingkreis zu

Resonanzschwingungen an (s. Abb. 5a). Das Signal wird durch die Diode gleichgerichtet (s. Abb. 5b) und anschließend durch den Siebkondensator  $C = 1 \text{ nF}$  von der Trägerfrequenz bis auf wenige Reste befreit (s. Abb. 5c). So gewinnt man das Sinussignal zurück. Wird das Signal nicht gleichgerichtet, sondern nur von der Trägerfrequenz befreit, so erhält man am Ausgang bis auf ein Rauschen eine Nullspannung (s. Abb. 5d), da die NF-Signale beider Halbwellen um  $180^\circ$  phasenverschoben sind und sich zu jedem Zeitpunkt zu Null addieren (s. Abb. 5a). Alternativ kann man die NF-Signale für beide Polungen der Diode mit cassy lab 2 getrennt aufzeichnen und dann softwaremäßig addieren. Man erhält Abb. 5e. Ohne Gleichrichter kann man das NF-Signal nicht zurückgewinnen.

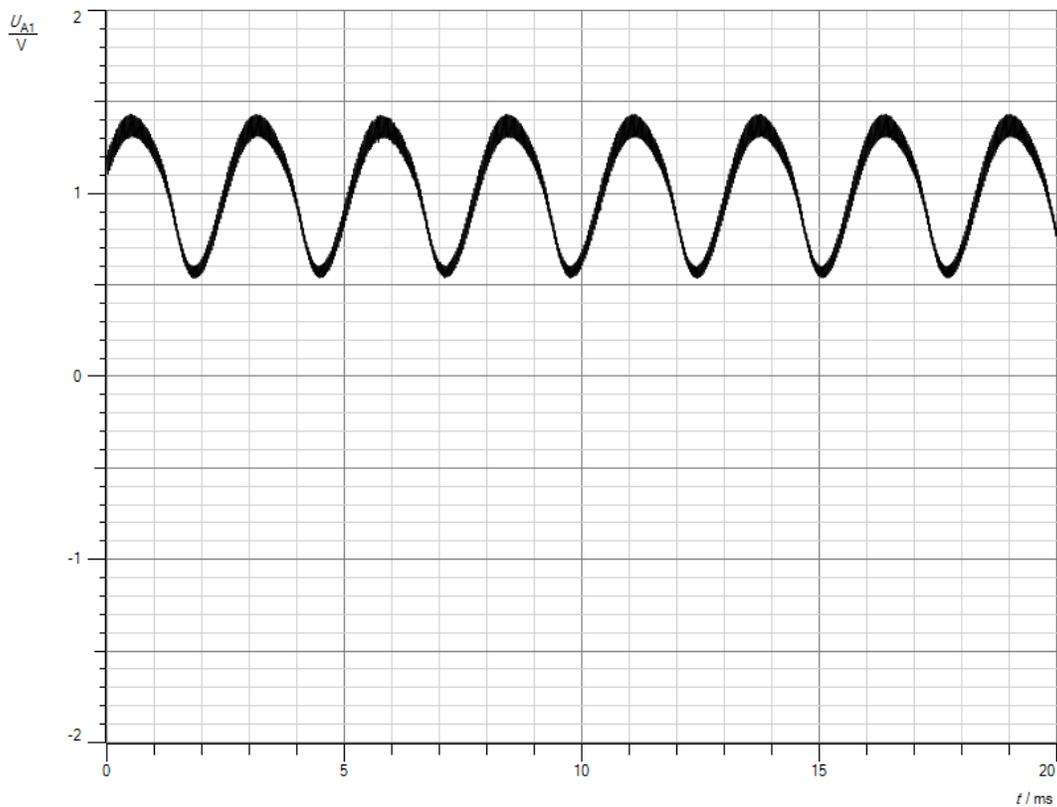
Führt man den Versuch mit einer Audioquelle wie dem Ohrhörerausgang eines Radios durch, so kann man zeigen, dass die Überlegungen für beliebige Audiosignale gelten. Allerdings verlaufen die Kurven in Bezug auf das NF-Signal nicht mehr synchron, da sie zeitlich versetzt aufgenommen werden müssen, weil cassy mobile nur einen Spannungseingang besitzt.



**Abb. 5a: Amplitudenmoduliertes HF-Signal**



**Abb.5b: Gleichgerichtetes HF-Signal**



**Abb.5c: NF-Signal**

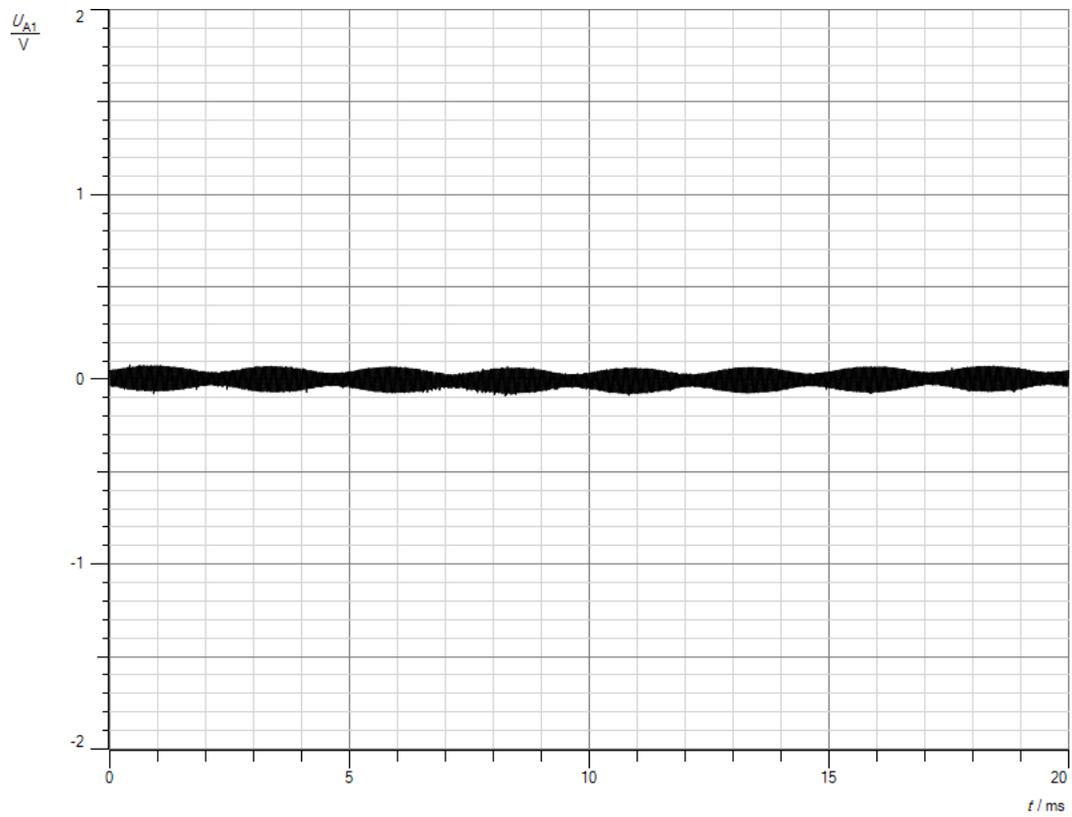


Abb.5d: Spannungsverlauf ohne Diode

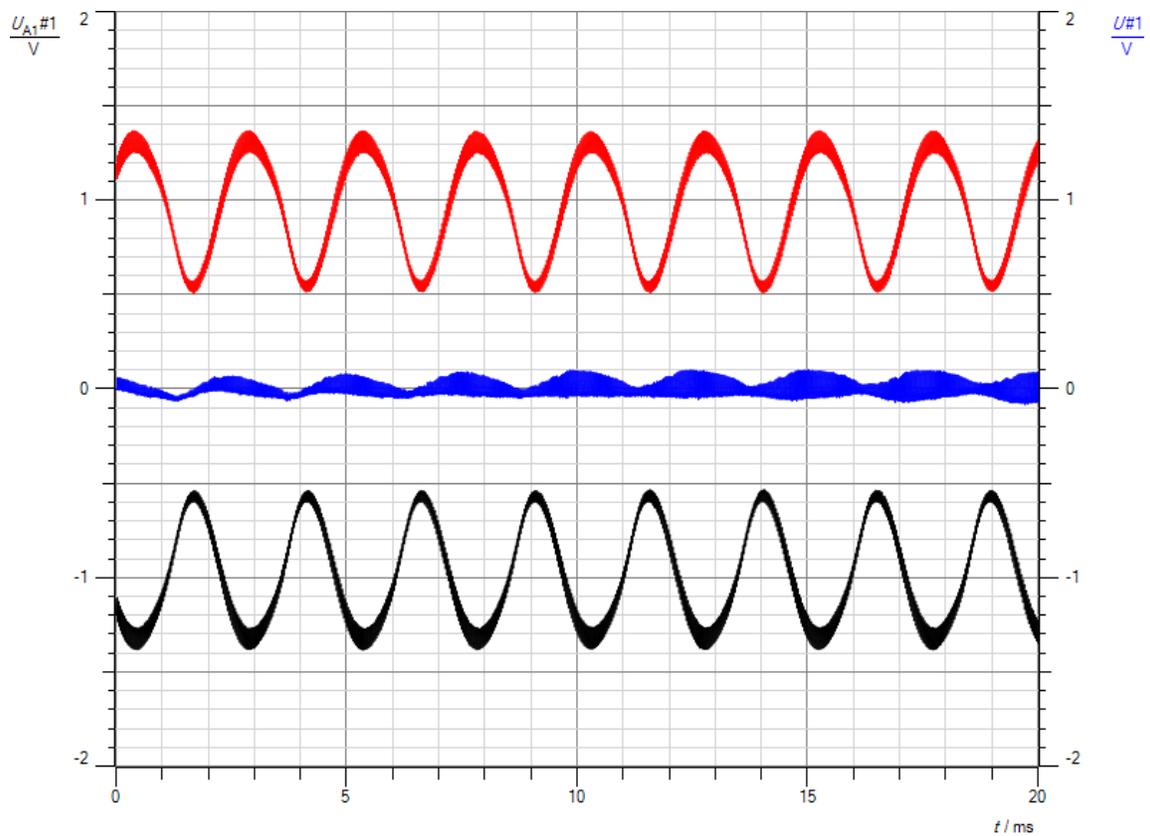


Abb. 5e: Addition der beiden NF-Signale

## 6. Antenne

### 6.1 Schallwellen

#### Versuch 1:

Man schließt an einen Tonfrequenzgenerator einen Lautsprecher an. Den Generator stellt man auf eine Frequenz  $f = 378 \text{ Hz}$  und eine geringe Lautstärke ein. Dann hält man vor den Lautsprecher eine beidseitig offene Glasröhre der Länge  $l = 0,45 \text{ m}$ .

Beobachtung: Mit Glasröhre klingt der Ton wesentlich lauter als ohne Glasröhre.

Erklärung: In der Glasröhre baut sich durch wiederholte Reflexion der Schallwelle an den Enden der Glasröhre eine stehende Welle auf, die den abgestrahlten Ton durch Resonanz verstärkt.

#### Versuch 2:

Man verstellt den Tonfrequenzgenerator aus Versuch 1 etwas, etwa auf die Frequenz  $f = 450 \text{ Hz}$ .

Beobachtung: Die verstärkende Wirkung der Glasröhre ist verschwunden.

Erklärung: In der Glasröhre kann sich keine stehende Welle mehr ausbilden, da die Grundbedingung  $l = \lambda/2$  nicht mehr erfüllt ist, wobei für  $\lambda$  gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

mit  $c$  als Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $f$  als Frequenz. Setzt man  $c = 340 \text{ m/s}$  und  $f = 450 \text{ Hz}$  ein, so erhält man letztendlich für die erforderliche Länge  $l = 37,8 \text{ cm}$ . Die verwendete Röhre ist also zu lang. Für  $f = 378 \text{ Hz}$  errechnet man  $l = 45 \text{ cm}$ . Das entspricht genau der Länge der Röhre in Versuch 1.

#### Versuch 3:

Man ersetzt die Glasröhre in Versuch 1 durch eine halb so lange einseitig geschlossene Röhre. Alternativ kann man die Röhre aus Versuch 1 auch mit einer Glasplatte an einer Seite verschließen. Dann muss man jedoch die Frequenz des Generators auf  $f = 189 \text{ Hz}$  reduzieren.

Beobachtung: Auch in diesem Falle erhöht die Glasröhre die Lautstärke des abgestrahlten Tones.

Erklärung: In der Glasröhre kann sich auch diesmal eine stehende Welle ausbilden, wobei jetzt die Resonanzbedingung  $l = \lambda/4$  lautet. Am geschlossenen Enden haben sich nämlich die Reflexionsbedingungen für die Schallwellen geändert.

#### Versuch 4:

Man hält nach Versuch 1 die Glasröhre nicht an den Lautsprecher, sondern in die Nähe eines Ohres.

Beobachtung: Die Glasröhre lässt den Ton auch dieses Mal lauter erklingen.

Erklärung: Die in das Glasrohr eindringenden Schallwellen erzeugen in der Luft der Röhre eine stehende Welle, die den Ton durch Resonanz verstärkt. Der Abstand zur Schallquelle spielt dabei keine Rolle.

## 6.2 EM-Wellen

Aus den Versuchen in Kapitel 4.1 kann man folgern, dass eine Antenne für Wellen aus einem Stück Wellenleiter passender Länge besteht. Damit sich eine stehende Welle ausbilden und damit die Welle durch Resonanz verstärkt werden kann, muss für die benötigte Länge  $l$  gelten:

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4}$$

je nachdem, wie das eine Ende des Leiters beschaffen ist. Ferner können Antennen offenbar am Sender und oder am Empfänger eingesetzt werden.

Leiter für EM-Wellen sind Metallstäbe. Damit besteht die einfachste Antenne für EM-Wellen aus einem Stück Metalldraht der oben angegebenen Länge. Da für EM-Wellen  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s ist, errechnet sich die erforderliche Länge  $l$  für die verschiedenen Frequenzbereiche der Radiosender wie folgt:

### LW-Bereich:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 250 \text{kHz}} = 600 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 300 \text{m}$$

### MW-Bereich:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 1 \text{MHz}} = 150 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 75 \text{m}$$

**KW-Bereich:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 10 \text{MHz}} = 15 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 7,5 \text{m}$$

**UKW-Bereich:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 100 \text{MHz}} = 1,5 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 0,75 \text{m}$$

**Handy D-Netz:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 920 \text{MHz}} = 0,163 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 0,0815 \text{m}$$

**Handy E-Netz:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 1795 \text{MHz}} = 0,0836 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 0,0418 \text{m}$$

**WLAN 1. Band:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 2,4 \text{GHz}} = 0,0625 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 0,03125 \text{m}$$

**WLAN 2. Band:**

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f} = \frac{3 * 10^8 \text{m/s}}{2 * 5 \text{GHz}} = 0,03 \text{m}$$

bzw.

$$l = \frac{\lambda}{4} = 0,015 \text{m}$$

Darin wurden für die Radio- und Handyfrequenzen in etwa die mittleren Werte der Sendebereiche eingesetzt.

Soll die Antenne als  $\lambda/4$ -Dipol ausgeführt werden, so muss das eine Ende mit einem festen Bezugspotential, etwa der Erde verbunden werden.

Offensichtlich sind einfache Drahtantennen nur für den UKW-, Handy- und WLAN-Bereich praktikabel. In allen anderen Fällen sind die benötigten Drahtlängen viel zu groß. Im UKW-Bereich werden in Transistorradios in der Tat Teleskopantennen, also ausziehbare Metallstäbe der berechneten Länge  $l \approx 0,75 \text{ m}$  als Antennen verwendet. Bei feststehenden UKW-Empfängern setzt man häufig Metallbänder der Länge  $l = 1,5 \text{ m}$  ein, die in der Mitte abgegriffen werden. Für die anderen Bereiche werden statt der einfachen Drahtantennen sogenannte Ferritantennen in die Radios eingebaut. In ihnen ist wegen  $\mu_r \gg 1$   $\lambda$  sehr viel kleiner und damit auch die benötigte Stablänge. Für  $\lambda$  gilt dann nämlich

$$\lambda = \frac{c'}{f} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r} * f}$$

da nach Maxwell in diesem Falle

$$c' = \frac{c}{\sqrt{\mu_r}}$$

ist. Beim Handy und WLAN sind die Antennen meist als kurze Metallbänder in die Platine integriert.