

Radiosender

Radioempfänger

A. Reichert

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung	3
2. Radiosender	4
2.1 Schaltplan des Senders	4
2.2 Funktion der Schaltung	5
2.3 Betriebsdaten der Schaltung	5
2.4 Aufbau der Schaltung	5
2.5 Tabelle der benötigten Bauteile	7
2.6 Zusätzliche Anmerkungen zur Schaltung	7
3. Radioempfänger	9
3.1 Empfang des Senders mit einem Weltempfänger	9
3.2 Empfang bei Amplitudenmodulation	9
3.3 Empfang bei Frequenzmodulation	11
3.4 Empfang mit einem Audion-Empfänger	17
3.5 Empfang mit einem Pendelaudion-Empfänger	20
3.6 Empfang mit einem Superhet-Empfänger	22
4. Antenne	24
4.1 Antenne für Schallwellen	25
4.2 Antennen für elektromagnetische Wellen	26

1. Einleitung

Radio und Fernsehen sind Unterrichtsthemen, bei denen selbst der letzte Physikmuffel unter den Schülern aus seinem notorischen Dämmerenschlaf erwacht. Alleine der Anblick einer solchen Kiste im Unterricht erweckt bei so manchem Schüler neue Lerngeister. Erschlägt der Lehrer ihn dann nicht sofort mit vielen elektronischen, technischen Raffinessen moderner Radios, 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 von Radiosender und Radioempfänger 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 als Radiosender einen einfachen KW-Oszillator vor, der aufgrund seines Aufbaues frequenz- und amplitudenmoduliert werden kann. Beide Modulationsarten sind in der Rundfunk- und Fernsehtechnik sehr verbreitet. 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. Sender mit AM sind störanfälliger, beanspruchen dafür aber einen kleineren Frequenzbereich für die übertragenen Signale.

Im zweiten Teil werden die Vorgänge untersucht, die sich beim Empfang der Signale im Radio abspielen. Dabei wird zunächst gezeigt, dass der selbstgebaute Sender in einem käuflichen Radio empfangen werden kann. Danach wird anhand mehrerer Versuche erklärt, wie im Empfangskreis bei AM bzw. FM das NF-Signal zurückgewonnen, also demoduliert wird.

Im letzten Kapitel kommen ein paar Aspekte zum Thema Antenne zur Sprache. Sie stellt ein wichtiges 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

2.2 Funktion der Schaltung

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 Ω) 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.

2.3 Betriebsdaten der Schaltung

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 $\mu\text{s}/\text{cm}$ x 3 oder falls möglich 0,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ und für die Spannungsachse je nach Betriebsspannung 2 V/cm oder 5 V/cm.

2.4 Aufbau der Schaltung

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 X 9 cm. Die Abbildung 2 zeigt die Verdrahtung auf einer solchen Platine.

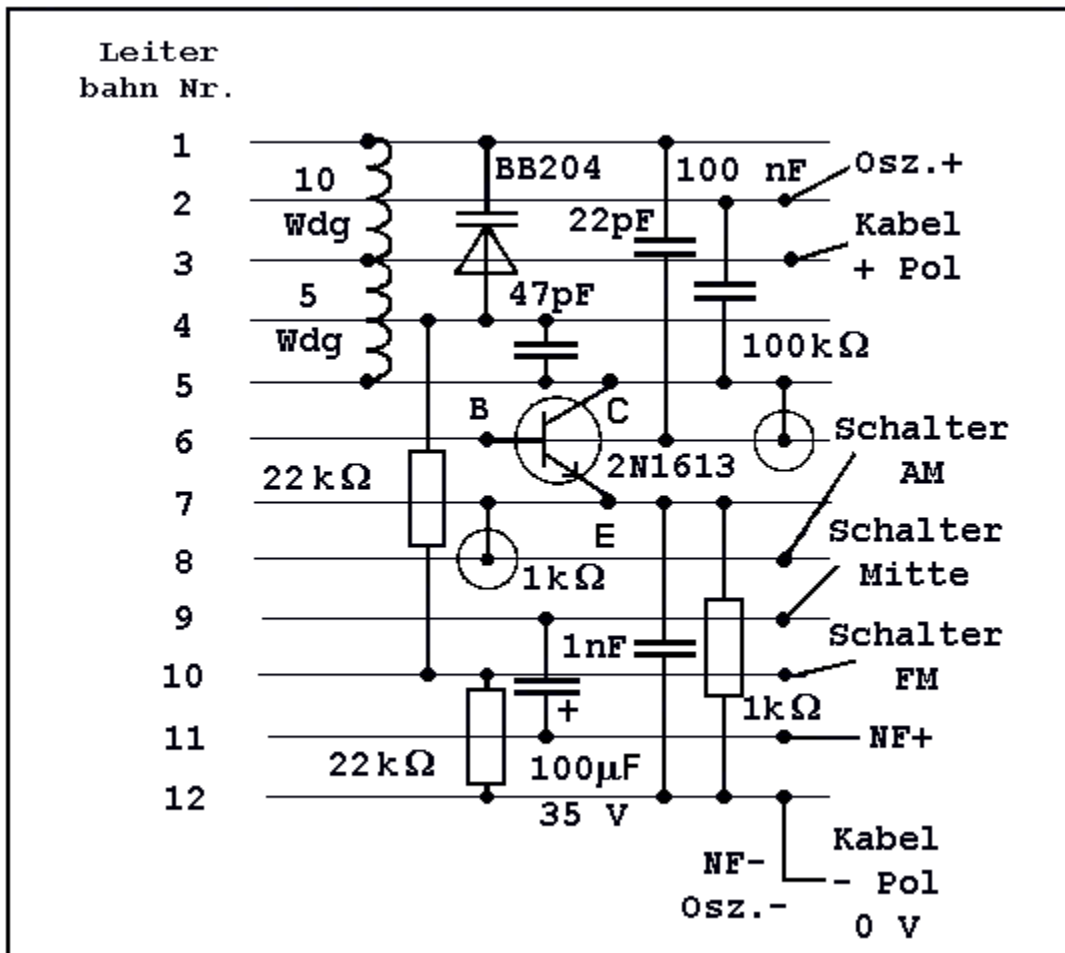


Abb.2: Platinenlayout

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 be-

steht 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 Schalltlitze mit den Buchsen bzw. mit den Anschlüssen des Umschalters. Den Deckel der Dose kann man zum Schluss mit etwas Klebeband verschließen.

2.5 Tabelle der benötigten 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 μ F/35 V
- 2 Widerstände 1 k Ω , 0,25 W
- 2 Widerstände 22 k Ω , 0,25 W
- 1 Widerstand 100 k Ω , 0,25 W
- 1 Transistor 2N1613
- 4 Holzschrauben, \varnothing 2 mm, Länge: 11 mm
- 2,5 m Kupferlackdraht, \varnothing 0,5 mm
- etwas Schalltlitze
- etwas Patex, Klebeband und festes Papier

2.6 Zusätzliche Anmerkungen zur Schaltung

1) Bei der Kapazitätsdiode BB 204 handelt es sich um eine Doppel-diode in einem TO-92 Gehäuse, wobei der mittlere Anschluss die gemeinsame Kathode bildet. Für die Schaltung benötigt man nur ei-

ne 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.

3. Radioempfänger

3.1 Empfang des Senders mit einem 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).

3.2 Empfang bei Amplitudenmodulation

Versuch 1:

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

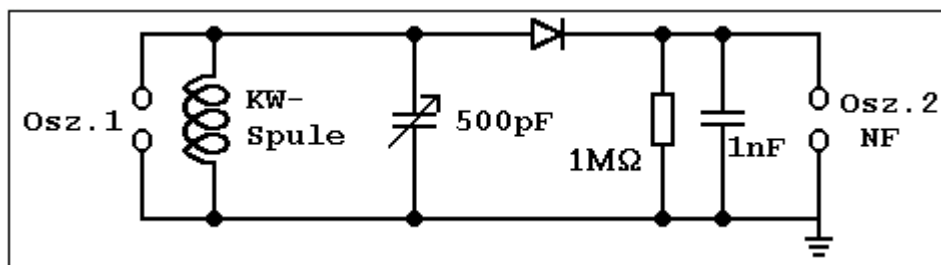


Abb.3: **Empfangskreis**

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.

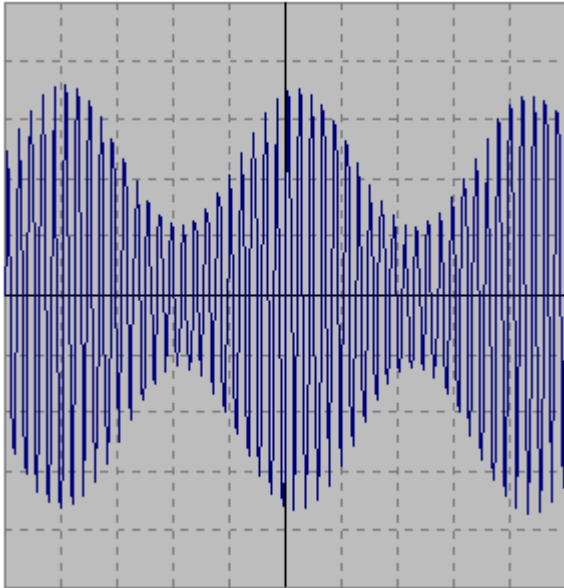


Abb.4: **Osz.1, HF-Signal**

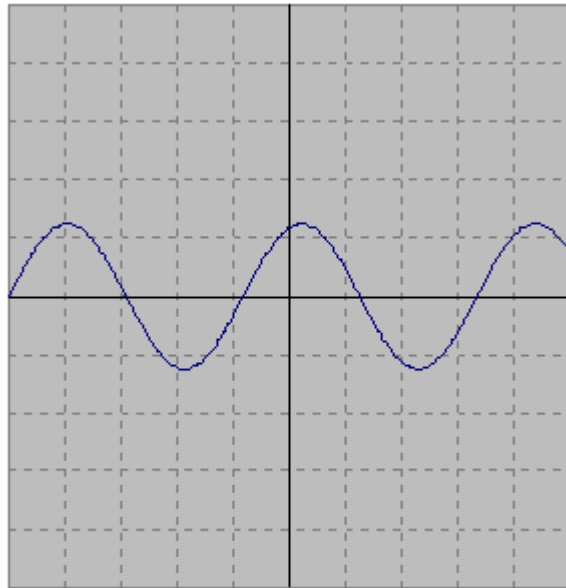


Abb.5: **Osz.2, NF-Signal**

Versuch 2:

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

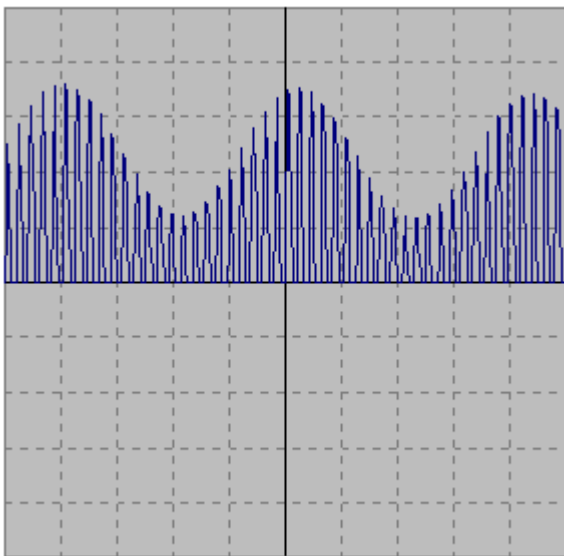


Abb.6: **gleichgerichtetes HF-Signal**

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

$$Z = 1 / \sqrt{(1/R^2 + 1/R_c^2)} = 13,3 \ \Omega.$$

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.

3.3 Empfang bei Frequenzmodulation

Versuch 1:

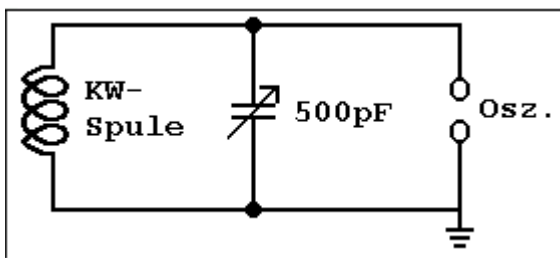


Abb.7: **einfacher Empfangskreis**

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 er-

scheint 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.

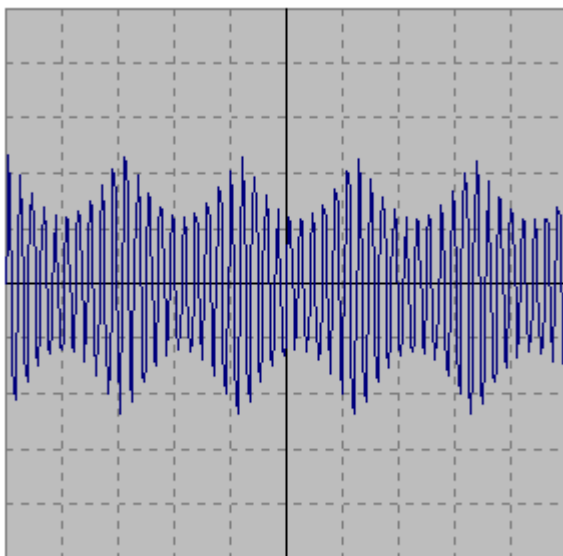


Abb.8: **verzerrtes FM-Sinussignal**

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.

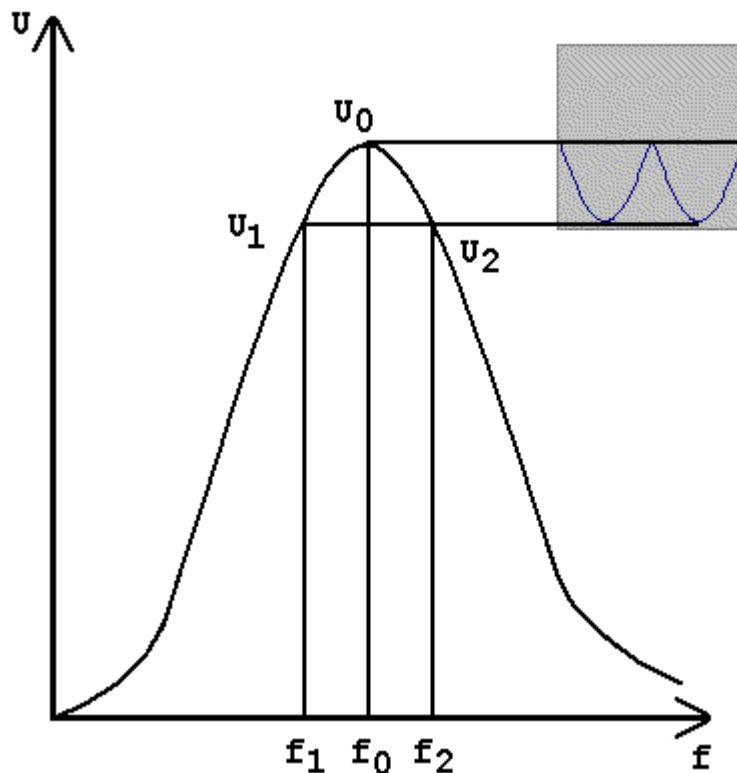


Abb.9: Erklärung zur Abb.8

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.

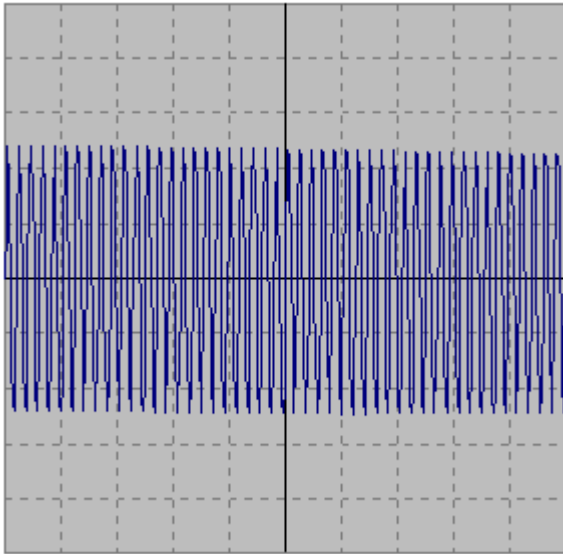


Abb.10: **verzerrtes FM-Rechtecksignal**

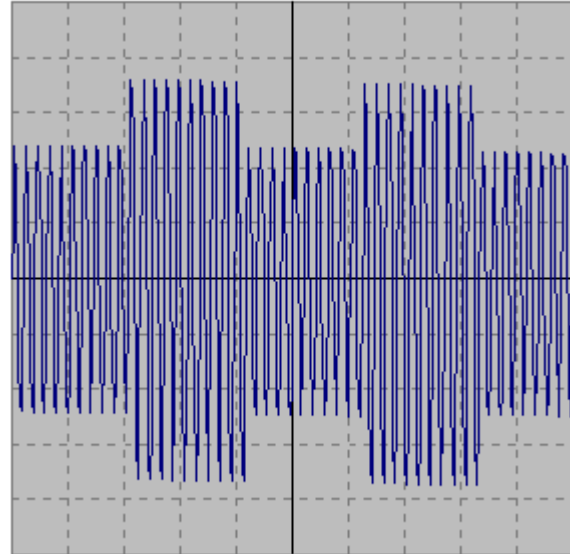


Abb.11: **korrektes FM-Rechtecksignal**

Erklärung:(s. Abb. 12)

Da die Sendefrequenz f_0 und die Resonanzfrequenz des Empfängskreises nicht mehr übereinstimmen, liefert die Trägerfrequenz f_0 am Empfängskreis eine Spannung U_0 , die kleiner als die Resonanzspannung ist. Je nach Verstimmung des Empfängskreises 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 Empfängskreis 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 Empfängskreis 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 Empfängskreises 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 Empfängskreis 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.

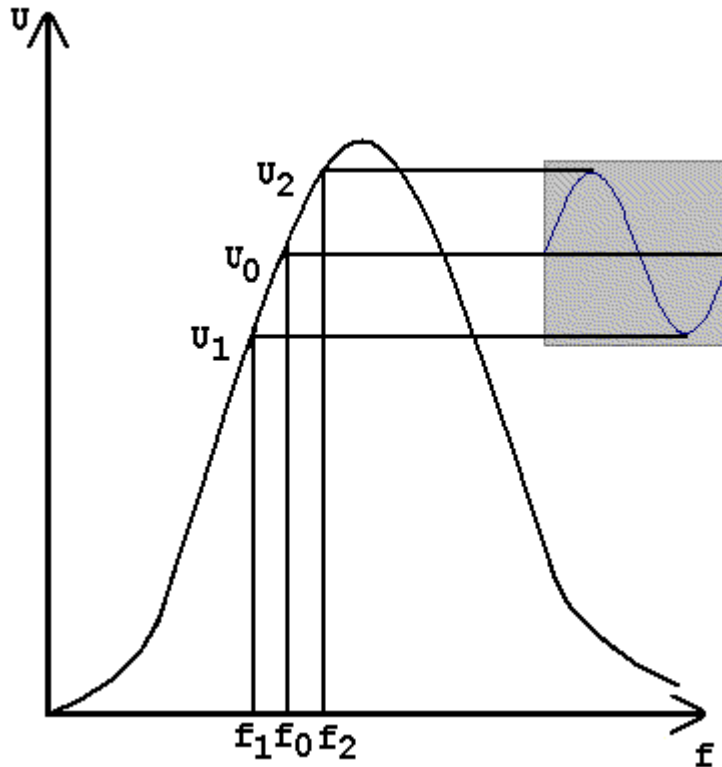


Abb.12: Erklärung des Empfangs bei FM

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

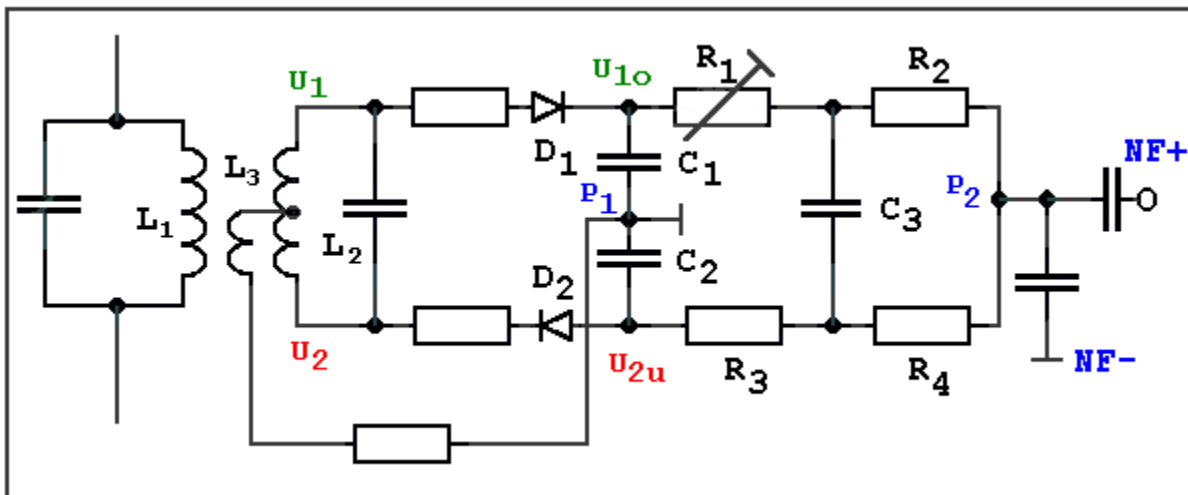


Abb. 13: Ratiotektor

Um die Vorgänge im Ratiotektor 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.

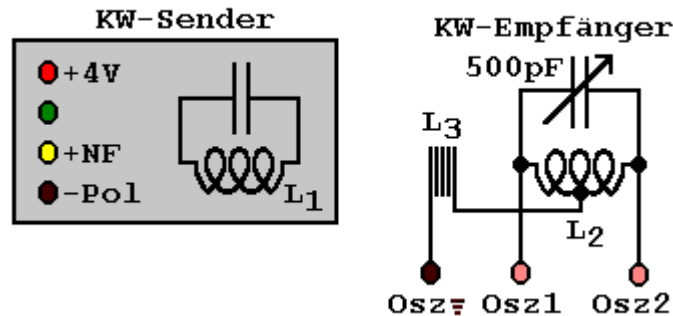


Abb.14: Versuchsaufbau zum Ratiodetektor

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° 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 Ratiodetektor 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° 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° und der anderen Hälfte der Sekundärspannung -90° beträgt.

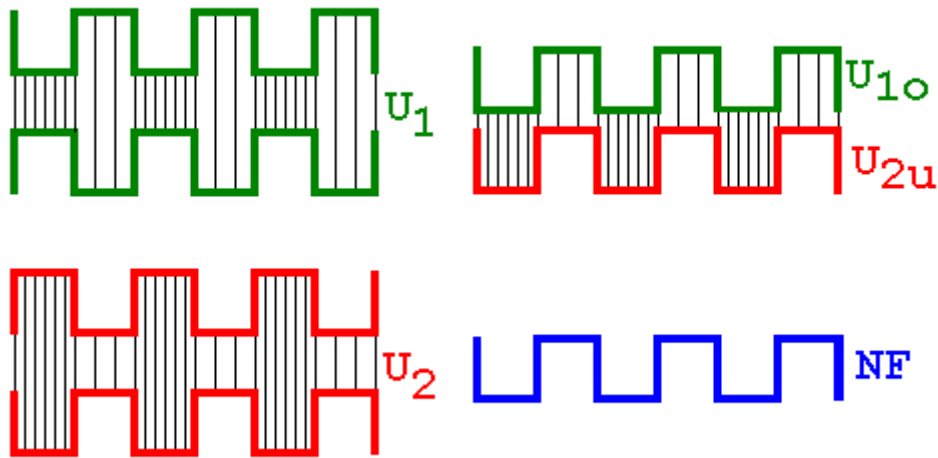


Abb.15: auftretende Spannungen in der Ratiodetektorschaltung

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° abweicht, für die eine Hälfte der Sekundärspannung steigt sie somit über 90° (z.B. auf 110°), für die andere über -90° (z.B. auf -70°). 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° , für die untere auf -110° . 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 Brückenzweig geschaltet ist, gleicht Schwankungen der HF-Spannung aus und bewirkt so, dass Störungen unterdrückt werden. In einem Radio wird nicht die empfangene HF im Ratiodetektor demoduliert, sondern die Zwischenfrequenz ZF (s. Kapitel 3.6).

3.4 Empfang mit einem Audion-Empfänger

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.

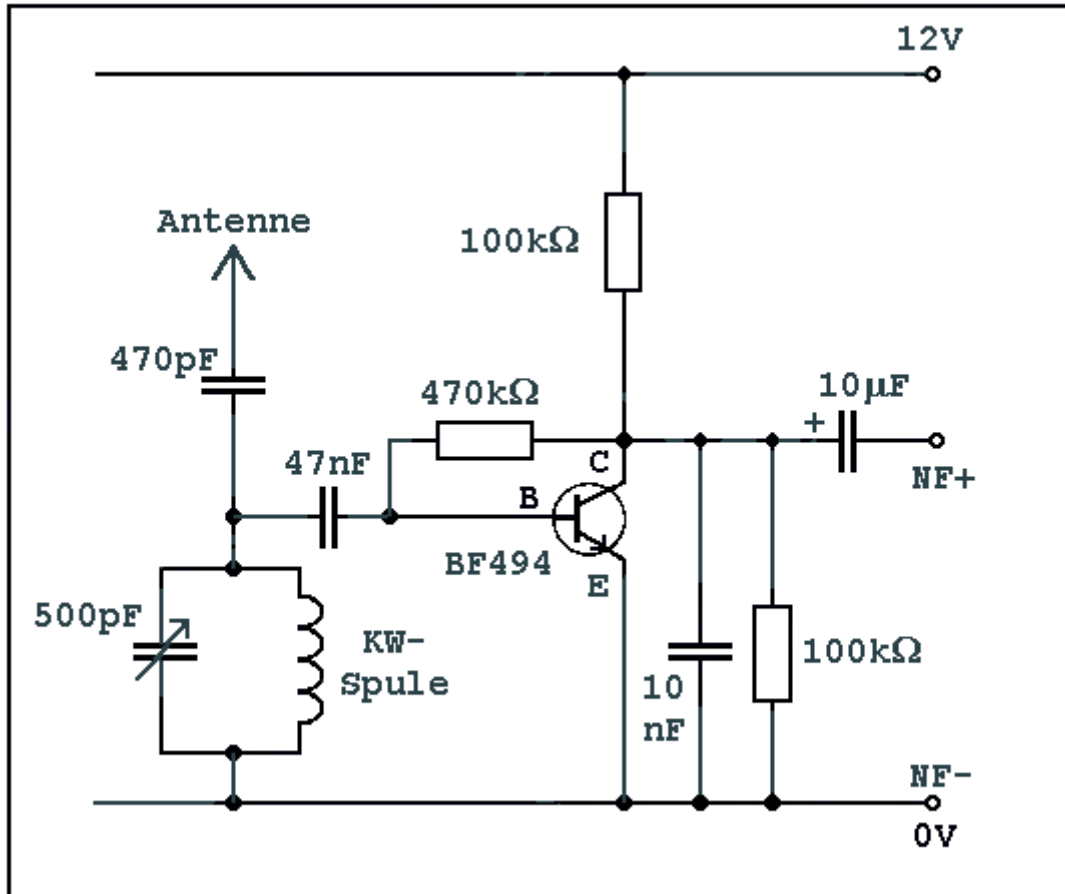


Abb. 16: Audion-Empfänger

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 BF494
 1 Kondensator 470 pF
 1 Kondensator 47 nF
 1 Kondensator 10 nF
 1 Kondensator 10 μ F
 2 Widerstände 100 k Ω
 1 Widerstand 470 k Ω
 1 Drehkondensator 500 pF von Phywe
 1 MW- oder KW-Spule von Phywe
 4 Holzschrauben, \varnothing 2 mm, Länge: 11 mm
 etwas Schaltlitze
 etwas Patex, etwas Klebeband

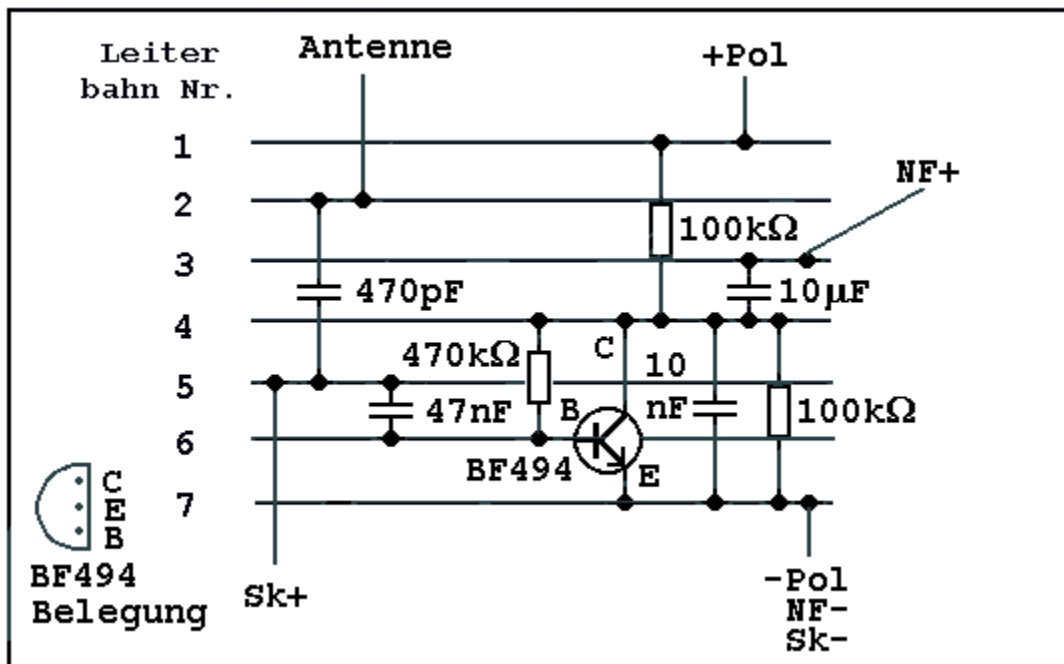


Abb. 17: Platine Audion

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 Schalllitze mit den Buchsen. Den Deckel der Dose kann man zum Schluss mit etwas Klebeband verschließen.

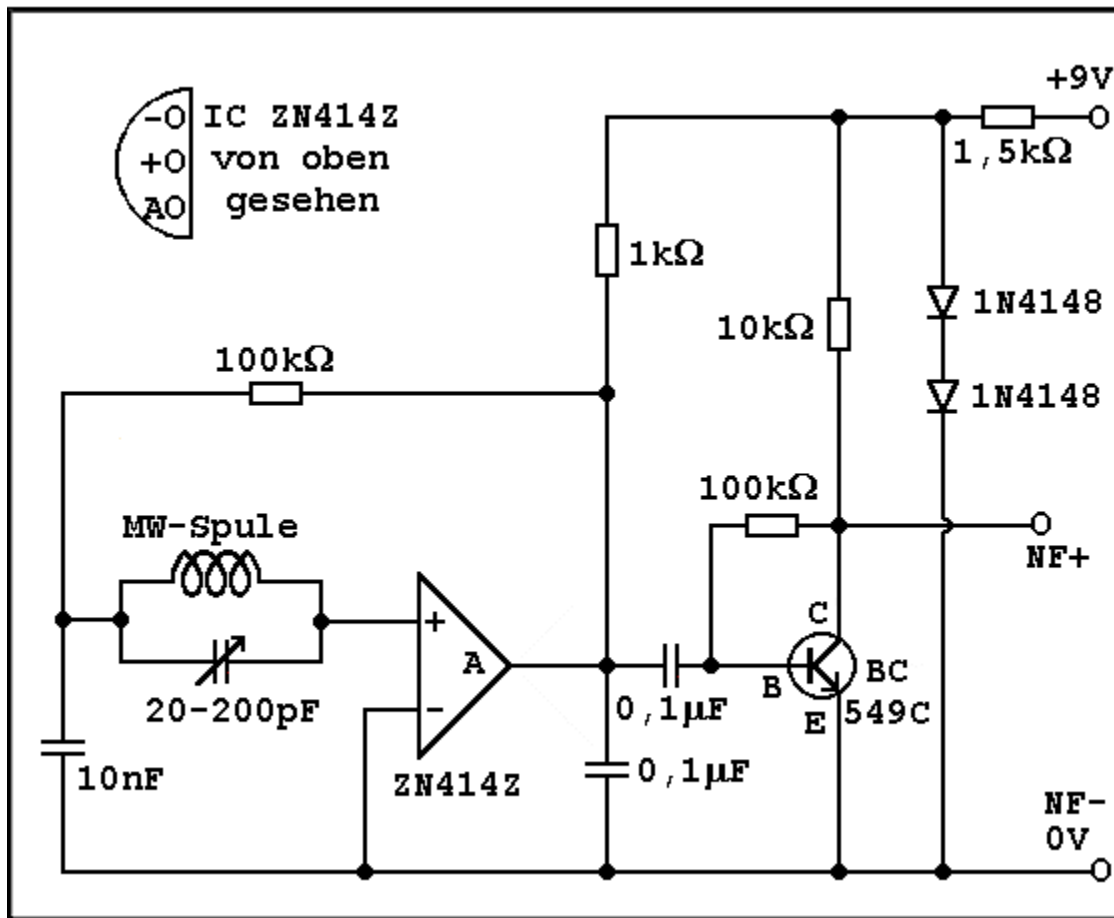


Abb. 18: Schaltplan MW-Empfänger

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 k Ω 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 Ω 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.

3.5 Empfang mit einem Pendelaudion-Empfänger

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. 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 Pendelaudioschaltung gleichzeitig als Sender wirkt, müssen im professionellen Einsatz durch eine Vorstufe Antenne und Pendelaudio sauber getrennt werden, um Störungen benachbarter Sender zu vermeiden. Das Pendelaudio 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.

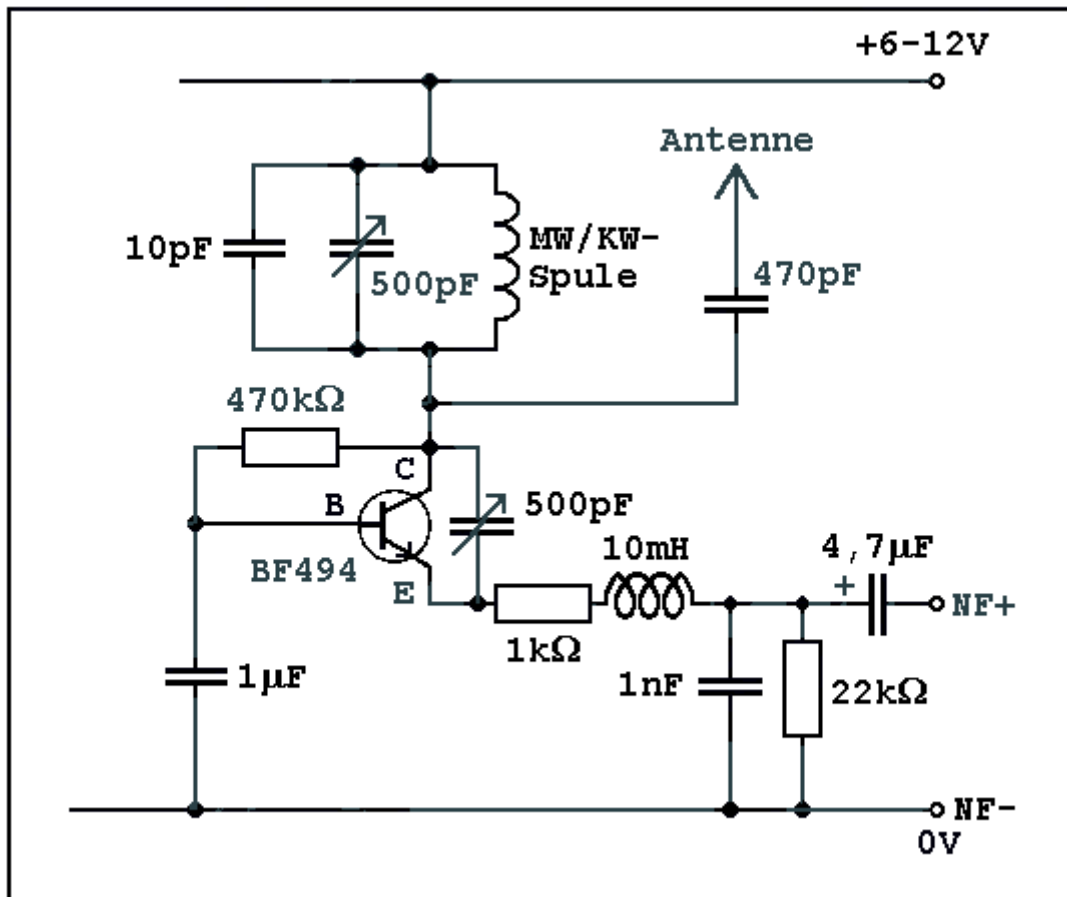


Abb. 19: Pendelaudio

3.6 Empfang mit einem Superhet-Empfänger

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 Stummschalter („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.

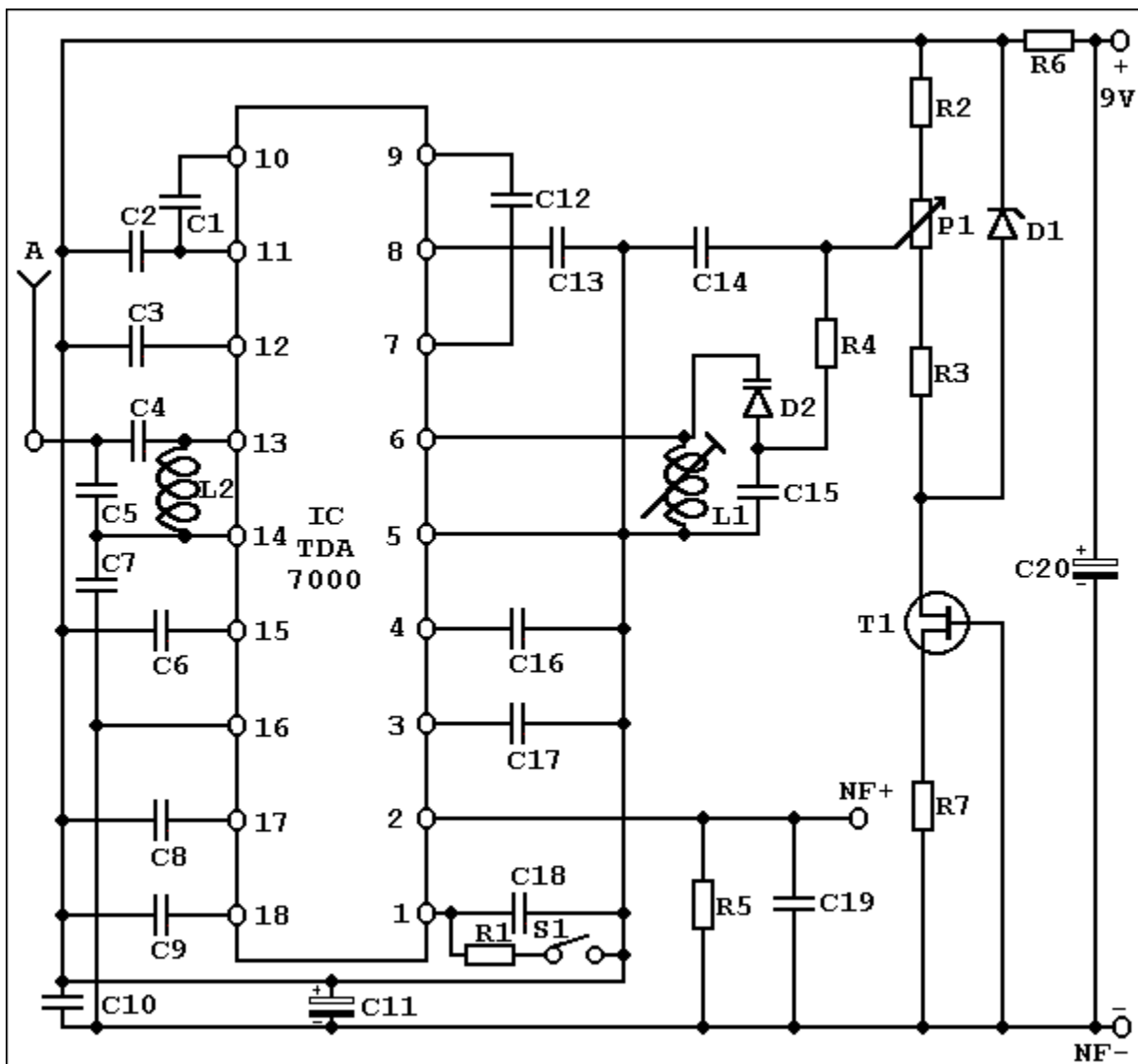


Abb. 20: Mono-UKW-Empfänger

Die benötigten externen Bauteile haben folgenden Wert.

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

Tabelle 1: Externe Bauteile

4. Antenne

4.1 Antenne für Schallwellen

Versuch 1:

Man schließt an einen Tonfrequenzgenerator einen Lautsprecher an. Den Generator stellt man auf eine Frequenz $f = 378$ Hz und eine geringe Lautstärke ein. Dann hält man vor den Lautsprecher eine beidseitig offene Glasröhre der Länge $l = 0,45$ 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 $f = 450$ 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 λ gilt:

$$\lambda = c/f \quad (4.1)$$

mit c als Ausbreitungsgeschwindigkeit und f als Frequenz. Setzt man $c = 340$ m/s und $f = 450$ Hz ein, so erhält man letztendlich für die erforderliche Länge $l = 37,8$ cm. Die verwendete Röhre ist also zu lang. Für $f = 378$ Hz errechnet man $l = 45$ 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 $f = 189$ 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.

4.2 Antennen für elektromagnetische 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:

$$l = \lambda/2 \text{ bzw. } l = \lambda/4,$$

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 unter Beachtung der Gleichung 4.1 wie folgt:

1) LW-Bereich: $l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / (2 \cdot 250 \text{ kHz}) = 600 \text{ m}$ bzw.

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

2) MW-Bereich: $l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / (2 \cdot 1 \text{ MHz}) = 150 \text{ m}$ bzw.

$$l = \lambda/4 = 75 \text{ m.}$$

3) KW-Bereich: $l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / (2 \cdot 10 \text{ MHz}) = 15 \text{ m}$ bzw.

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

4) UKW-Bereich: $l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / (2 \cdot 100 \text{ MHz}) = 1,5 \text{ m}$ bzw.

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

Darin wurden für die Frequenzen in etwa die mittleren Werte der einzelnen 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 solche einfachen Drahtantennen nur für den UKW-Bereich praktikabel. In allen anderen Fällen sind die benötigten Drahtlängen viel zu groß. Im UKW-Bereich werden in Tran-

sistorradios in der Tat Teleskopantennen, also ausziehbare Metallstäbe der berechneten Länge $l \approx 0,75$ m als Antennen verwendet. Bei feststehenden UKW-Empfängern setzt man häufig Metallbänder der Länge $l = 1,5$ 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 $\mu_r \gg 1$ λ sehr viel kleiner und damit auch die benötigte Stablänge. Für λ gilt dann nämlich

$$\lambda = c'/f = c/(\sqrt{\mu_r} * f),$$

da nach Maxwell in diesem Falle

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

ist.