

VOM DETEKTOR ZUM SUPERHET

In diesem Beitrag geht es um analoge Empfangstechnik. Radioempfänger lassen sich aufgrund der Art der Gewinnung des Nutzsignals in Geradeausempfänger und in Überlagerungsempfänger einteilen. Bei den ersteren verläuft der Weg des Eingangssignals bis zum Demodulator ohne Frequenzumsetzung, also geradeaus, bei den letzteren wird zuerst eine Zwischenfrequenz gebildet. Der Vorteil einer konstanten Zwischenfrequenz ist, dass ZF-Filter nur für eine einzige Frequenz bemessen werden müssen.

1 Modulationsverfahren

Die analoge Funktechnik kennt drei Modulationsverfahren: Amplitudenmodulation (AM), Frequenzmodulation (FM) und Phasenmodulation (PM). Frequenz- und Phasenmodulation gehören zur Winkelmodulation.

In den Anfängen der Radiotechnik benutzte man die Amplitudenmodulation, ab Mitte der 1930er Jahre führte Edwin H. Armstrong erste Versuche mit frequenzmodulierten Funksignalen durch.¹ Für die langwelligeren Frequenzbänder (LW, MW, KW) benutzt man nach wie vor Amplitudenmodulation. Für die kurzwelligeren Frequenzbänder (UKW) wird Frequenzmodulation verwendet. Phasenmodulation wird u.a. in der Stereophonie und in der Fernsehtechnik eingesetzt. Auch kombinierte Modulationsarten sind anzutreffen.

1.1 Amplitudenmodulation

1) Das niederfrequente Nutzsignal (A) und der hochfrequente Träger (B) werden addiert und bilden ein Überlagerungssignal (C). Die Amplitude des Trägers ist überall gleich gross (oszilliert aber um die Mittellage); eine Modulation ist daher noch nicht vorhanden.

Um ein amplitudenmoduliertes Signal (D) zu bilden, wird eine geknickte Kennlinie (Diode, Transistor, Elektronenröhre) benötigt. Die infolge der Diodenrichtwirkung fehlenden negativen Halbwellen werden mit einem Schwingkreis regeneriert.

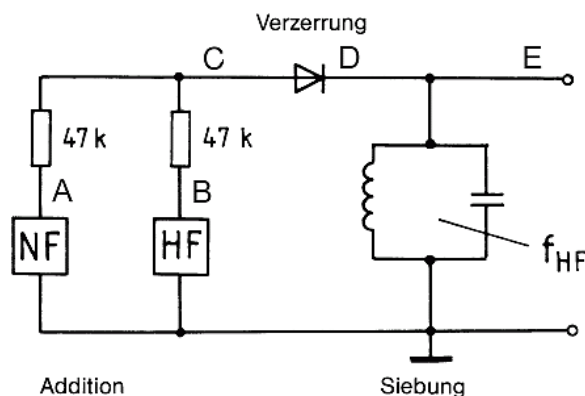
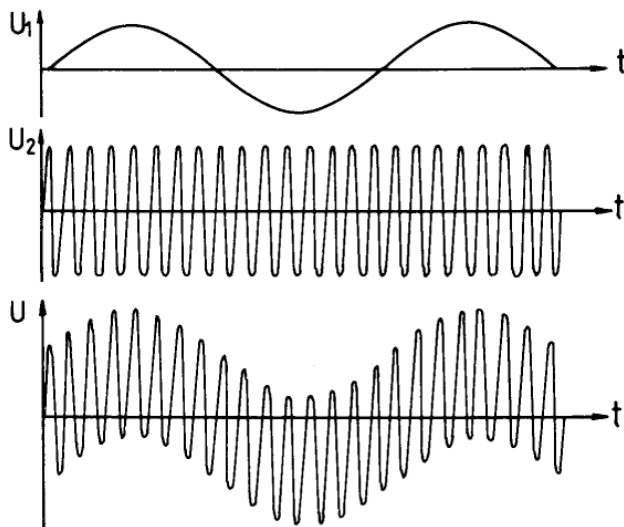


Abb. 1: Prinzipschaltung für Amplitudenmodulation²

¹ E. H. Armstrong: A Method of Reducing Disturbances in Radio Signaling by a System of Frequency Modulation (Vortrag beim Institute of Radio Engineers in New York 1935).

² <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a12/>

a) Überlagerung zweier Signale mit unterschiedlichen Frequenzen.



Überlagerung (Superposition):

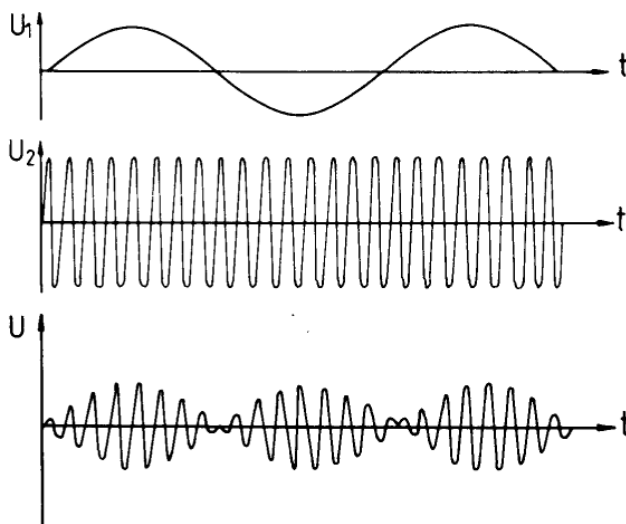
$$u = \hat{u}_2 \sin(\omega_2 t) + \hat{u}_1 \sin(\omega_1 t)$$

Die ursprüngliche Frequenzen bleiben erhalten.



Abb. 2: Überlagerung zweier Sinusschwingungen³

b) Durch anschließende Verzerrung (Diode) und Siebung (LC-Kreis) entsteht ein amplitudenmoduliertes Signal (E). Das Nutzsignal (Basisband) ist in der Hüllkurve enthalten.



AM-Modulation:

$$u = \hat{u}_2 \sin(\omega_2 t) \cdot \hat{u}_1 \sin(\omega_1 t)$$

Es entstehen zwei neue Frequenzen.

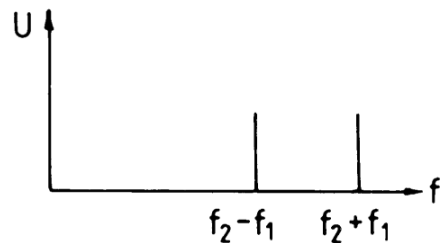


Abb. 3: Erzeugung einer amplitudenmodulierten Schwingung⁴

Für das Produkt von "Sinus mal sinus" gilt:

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

Daraus folgt die Formel für ein amplitudenmoduliertes Signal.

$$u_{AM} = \frac{1}{2} \hat{u}_m [\cos(\omega_T - \omega_m)t - \cos(\omega_T + \omega_m)t]$$

\hat{u}_T Träger (Carrier)

\hat{u}_m Nutzsignal

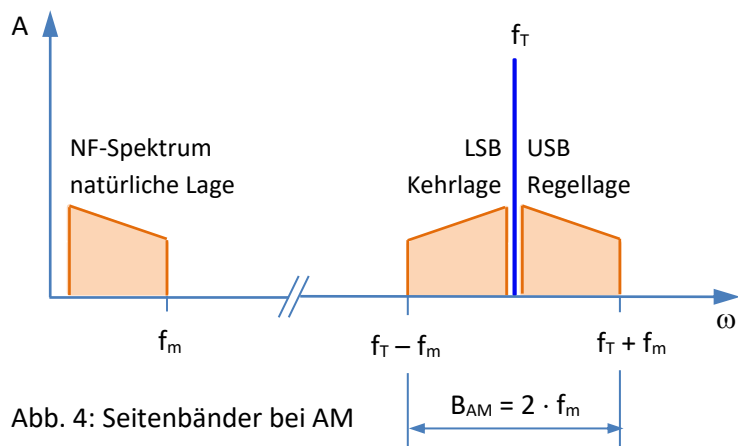
In den beiden Kosinusgliedern sind einmal die Summe ($f_T + f_m$) und zum anderen die Differenz ($f_T - f_m$) der an der Modulation beteiligten Frequenzen enthalten. Moduliert man bspw. einen

³ <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a12/>

⁴ <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a12/>

Träger von 4'200 kHz mit einem NF-Signal von 1 kHz, so entstehen zwei Seitenfrequenzen von 4'199 kHz und 4'201 kHz.

Moduliert man den Träger mit einem NF-Spektrum, so entstehen zwei ausgeprägte Seitenbänder. Das untere Seitenband wird als *Lower side band (LSB)*, das obere als *Upper side band (USB)* bezeichnet.



Wird der Träger unterdrückt, so spricht man von Zweiseitenband-Modulation (DSB) mit unterdrücktem Träger. Oft wird zu diesem Zweck ein Ringmodulator mit vier im Ring geschalteten Dioden verwendet. Modulation mit unterdrücktem Träger wird im Amateurfunk, bei Rundfunk-Stereophonie und in der Farbfernsehtechnik angewandt.

2) Parameter der Amplitudenmodulation

Modulationsgrad:
$$m = \frac{\hat{u}_m}{\hat{u}_T}$$

 \hat{u}_T Trägerspannung
 \hat{u}_m Modulationsspannung

Bei Rundfunksendern beträgt der Modulationsgrad höchstens 80 %, bei mittlerer Lautstärke des NF-Signals etwa 30 %.

Bandbreite AM: $B_{AM} = 2 \cdot f_m$ f_m höchste Modulationsfrequenz

1.2 Frequenzmodulation

1) Abb. 5 zeigt eine einfache Schaltung für die Erzeugung eines frequenzmodulierten Signals.

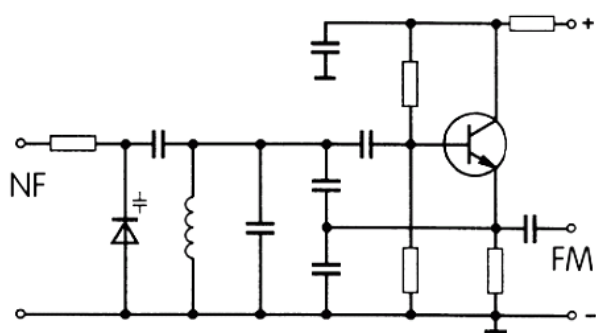


Abb. 5: Schaltung zur Frequenzmodulation⁵

Verwendet wird ein Oszillator in Colpitts-Schaltung. Die parallel zum Schwingkreis angeordnete Kapazitätsdiode wird mit einer Vorspannung in Sperrrichtung beaufschlagt. Steigt die von einer Signalquelle (Mikrofon) kommende und sich mit der Diodevorspannung überlagernde Modulationsspannung, so nimmt auch die Sperrspannung an der Diode zu. Dies hat zur Folge, dass die Kapazität der Diode ab-

⁵ <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a12/>

nimmt und die Schwingkreisfrequenz bei gleichbleibender Amplitude grösser wird. Sinkt die Amplitude des modulierenden Signal, so wird die Frequenz kleiner.

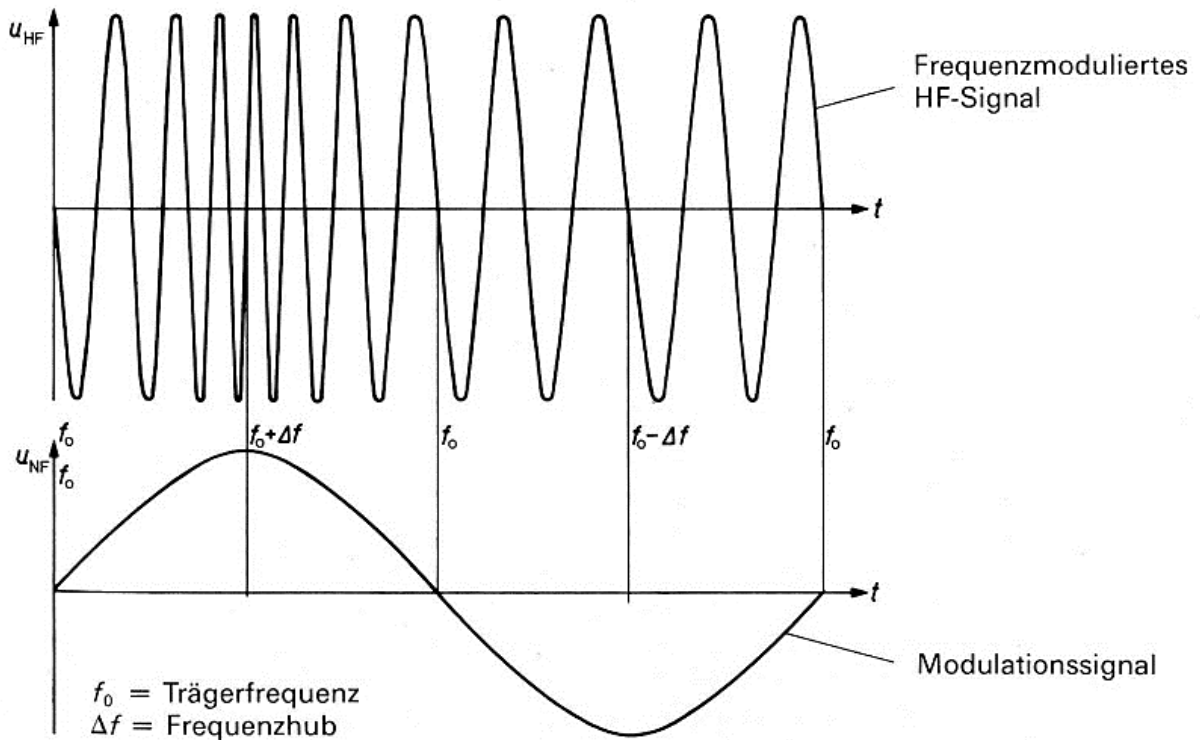


Abb. 6: Erzeugung einer frequenzmodulierten Schwingung⁶

Das modulierende Signal beeinflusst nicht die Amplitude, sondern die Frequenz des modulierten Signals.

Die Formel für ein frequenzmoduliertes Signal lautet:

$$u_{FM} = \hat{u}_T \sin[\omega_T t + \eta \sin(\omega_m t)]$$

\hat{u}_T Träger
 \hat{u}_m Nutzsignal

Bei der Frequenzmodulation werden die Nachteile der Amplitudenmodulation weitgehend vermieden. Infolge der konstanten Amplitude des FM-Signals (und einer möglichen Amplitudenbegrenzung im Empfänger) wirken sich Impulsstörungen (Zündfunken von Fahrzeugen oder elektrostatische Entladungen bei einem Gewitter) nicht problematisch aus.

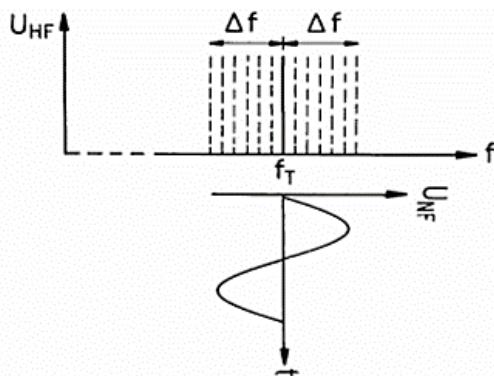


Abb. 7: Frequenzhub⁷

Unter dem Frequenzhub Δf versteht man die zur jeweiligen Modulationsspannung symmetrische Frequenzänderung der Trägerfrequenz. Der Frequenzhub – und letztlich auch der Modulationsindex – ist von der Lautstärke (Amplitude) des modulierenden Signals abhängig.

⁶ Technische Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker Bnd. 2 (Eidg. Druck- und Materialzentrale, 1977).

⁷ <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a12/>

Die Fourierspektren eines FM-Signals sind vom Modulationsindex abhängig und können sehr breit werden. Die nachfolgenden Bilder zeigen charakteristische FM-Spektren mit unterschiedlichem Modulationsindex.

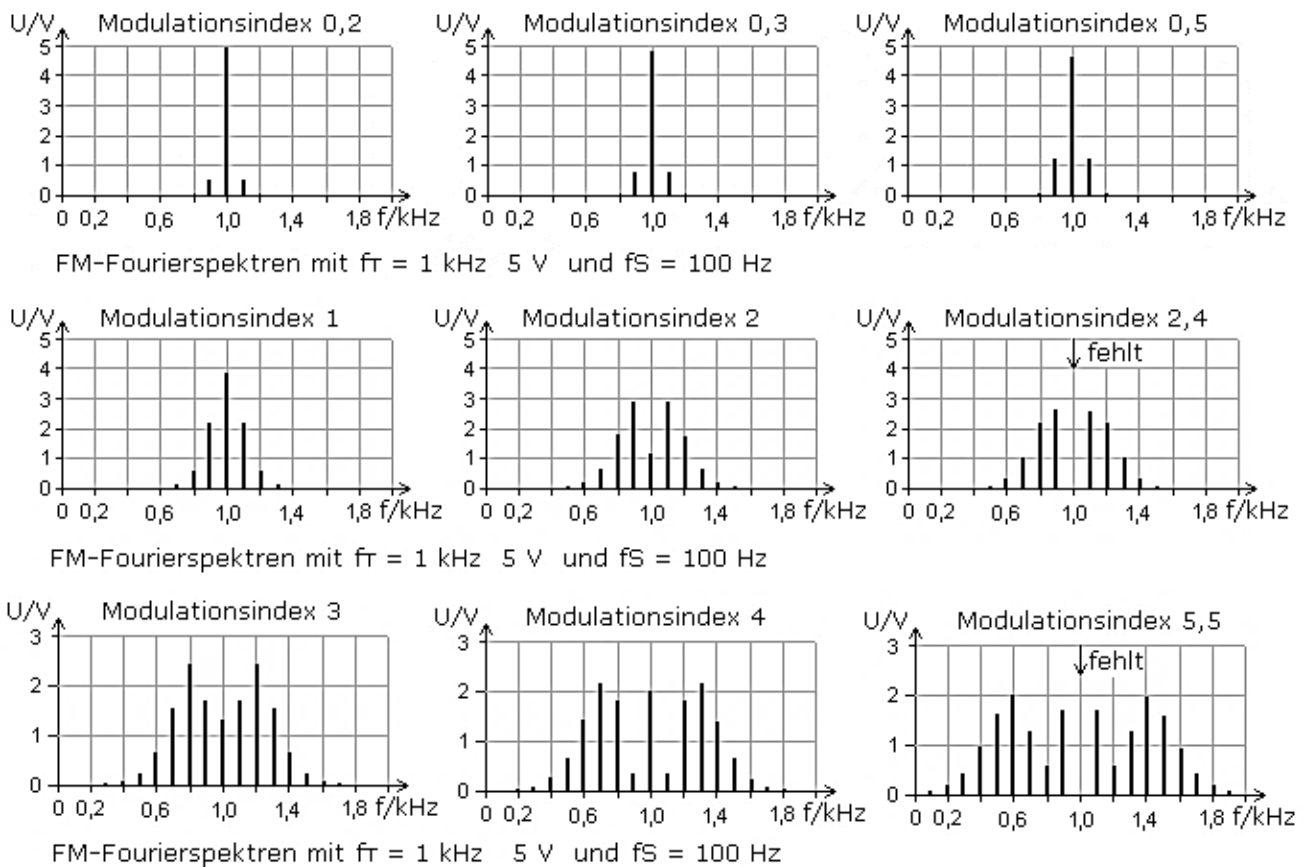


Abb. 8: Amplituden-Frequenz-Spektrum eines frequenzmodulierten Signals⁸

In der Praxis wird mit einer endlichen Bandbreite gerechnet, bei der die aussen befindlichen Spektren mit einer Amplitude von kleiner als 10 % der maximalen Signalamplitude unberücksichtigt bleiben.

2) Parameter der Frequenzmodulation

$$\text{Frequenzhub: } \Delta f = \frac{1}{2}(f_2 - f_1)$$

Im UKW-Rundfunk werden NF-Signale mit max. 15 kHz übertragen. Der Frequenzhub beträgt 75 kHz.

$$\text{Modulationsindex: } \eta = \frac{\Delta f}{f_m} \quad \begin{array}{l} \Delta f \text{ Frequenzhub} \\ f_m \text{ Modulationsfrequenz} \end{array}$$

Näherungsformel von Carson (1922) für die Bandbreite eines frequenzmodulierten Signals:

$$\begin{array}{ll} \text{Bandbreite FM-Mono: } B_{FM_{mono}} = 2(\Delta f + f_m) = 180 \text{ kHz} & \text{Bei Amplitudenmodulation} \\ \text{Bandbreite FM-Stereo: } B_{FM_{stereo}} = 2(\Delta f + 2f_m) = 210 \text{ kHz} & \text{wäre eine Bandbreite von} \\ & \text{nur 30 kHz erforderlich.} \end{array}$$

⁸ <https://www.elektroniktutor.de/signalkunde/fm.html>

3) Bei einem frequenzmodulierten Signal treten **Bessel-Funktionen** erster Art $J_\nu(\eta)$ in Erscheinung, mit welchen sich die Amplituden der beteiligten Frequenzen resp. Seitenlinienpaare bestimmen lassen. Bessel-Funktionen sind Zylinderfunktionen und kommen als Lösungen der *Besselschen Differentialgleichung* vor. Sie spielen eine wichtige Rolle in Physik und Technik.

Besselsche Dgl.⁹

$$x^2 \frac{d^2y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \nu^2)y = 0$$

x und ν sind reelle oder komplexe Zahlen; die Lösungen heißen Bessel-Funktionen ν -ter Ordnung.

Als Differentialgleichung zweiter Ordnung besitzt die Besselsche Differentialgleichung zwei linear unabhängige Lösungen, die als Bessel-Funktionen erster Art (J_ν) und als Bessel-Funktionen zweiter Art (Y_ν) bezeichnet werden. Letztere werden auch *Neumann-Funktionen* (gelegentlich auch *Weber-Funktionen*) genannt. Im Kontext sind für uns allein Bessel-Funktionen der ersten Art von Interesse.

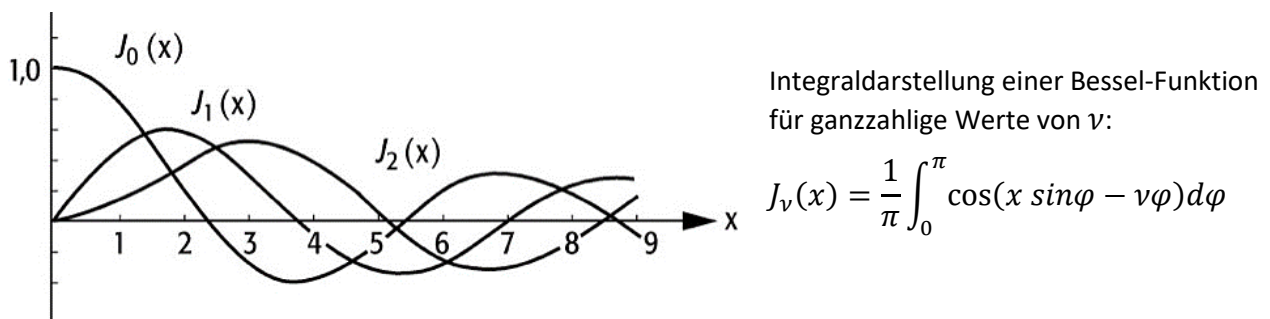


Abb. 9: Bessel-Funktionen erster Art der nullten, ersten und zweiten Ordnung

Bei den Werten 2.4, 5.5 und 8.6 – also bei den Nullstellen von $J_0(\eta)$ – verschwindet der Träger aus dem Spektrum (siehe dazu auch Abb. 8). Die höheren Funktionen $J_1 \dots J_n$ zeigen die Amplitudenwerte der zugehörigen Seitenlinienpaare in Abhängigkeit vom Modulationsindex.

Auch ohne tiefere Kenntnisse der höheren Mathematik lassen sich Bessel-Funktion verwenden. Von Nutzen ist dabei eine Excel-Tabelle mit den Zahlenwerten der $J_\nu(\eta)$.¹⁰

	Seitenbandamplituden										
	Carrier	1st	2d	3d	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
η	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}
0,00	1,00	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0,25	0,98	0,12	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0,50	0,94	0,24	0,03	---	---	---	---	---	---	---	---
1,00	0,77	0,44	0,11	0,02	---	---	---	---	---	---	---
1,50	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01	---	---	---	---	---	---
2,00	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03	---	---	---	---	---	---
2,41	0,00	0,52	0,43	0,20	0,06	0,02	---	---	---	---	---
2,50	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02	0,01	---	---	---	---
3,00	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01	---	---	---	---
4,00	-0,40	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02	---	---	---
5,00	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	---	---
5,53	0,00	-0,34	-0,13	0,25	0,40	0,32	0,19	0,09	0,03	0,01	---
6,00	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	---

⁹ https://de.wikipedia.org/wiki/Besselsche_Differentialgleichung

¹⁰ Das Tabellenkalkulationsprogramm *Excel* von Microsoft bietet die Wiedergabe von Bessel-Funktionen an.

Praxisbeispiel 1:

Es soll die Bandbreite für ein frequenzmoduliertes Funksignal berechnet werden. Die maximale Modulationsfrequenz beträgt 4 kHz bei einem Frequenzhub von 12 kHz.

Zunächst wird der Modulationsindex bestimmt:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{12 \text{ kHz}}{4 \text{ kHz}} = 3,0$$

Bei $\eta = 3,0$ ziehen wir im Funktionsdiagramm (Abb. 10) eine senkrechte Linie. Dann lesen wir für die in Frage kommenden Seitenfrequenzen die Amplitudenwerte ab. Werte kleiner als 0,1 bzw. 10 % der max. Amplitude müssen in praxi nicht berücksichtigt werden.

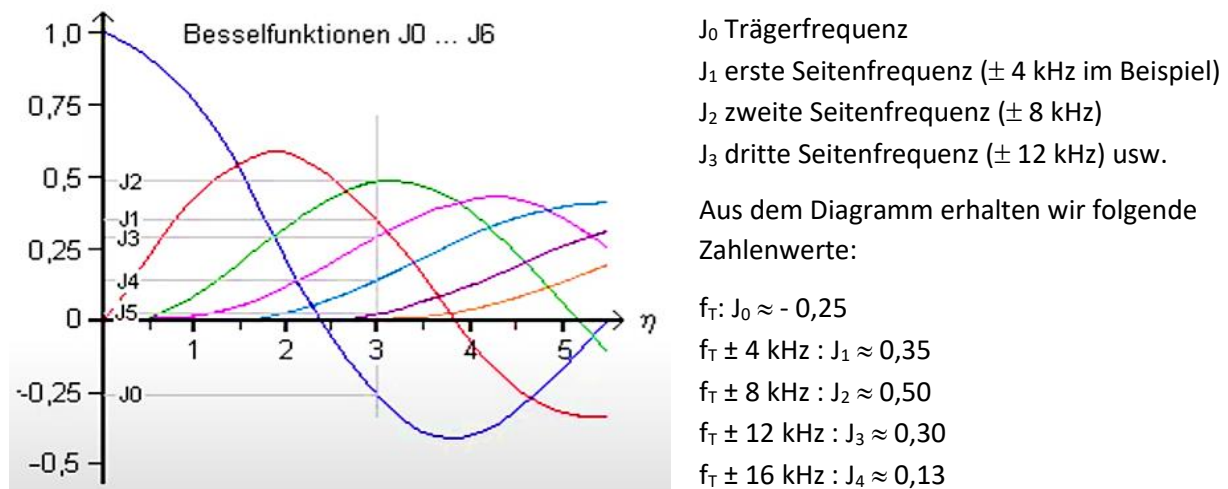


Abb. 10: Normiertes Bessel-Diagramm mit Amplitudenwerten der Seitenlinienpaare¹¹

Die abgelesenen Werte für vier Seitenlinienpaare stimmen gut mit den Tabellenwerten überein. Die höchste noch zu berücksichtigende Amplitude ist bei J_4 mit $\eta \approx 0,13$; daraus ergibt sich eine Bandbreite von $2 \cdot 16 \text{ kHz} = 32 \text{ kHz}$.

Praxisbeispiel 2:

Ein Spektrumanalysator zeigt die erste Nullstelle für den Träger eines mit einem Tonsignal modulierten FM-Signals an, die sich bekanntlich bei $\eta = 2,4$ auf der horizontalen Achse des Bessel-Diagramms befindet.

Wie groß ist die Modulationsfrequenz, wenn der Hub 3 kHz beträgt?

Aus $\eta = \frac{\Delta f}{f_m}$ folgt: $f_m = \frac{\Delta f}{\eta}$

Die Modulationsfrequenz beträgt 1'250 Hz.

¹¹ <https://www.youtube.com/watch?v=iT0kZW-XA6g>

2 Geradeempfänger

Vor dem zweiten Weltkrieg waren Geradeempfänger (Tuned Radio frequency Receiver) die verbreitetsten Radiogeräte. In Deutschland war diesbezüglich der "Volksempfänger" in beinahe jedem Haushalt zu finden. Nach dem Krieg wurden diese Geräte zunehmend durch Überlagerungsempfänger verdrängt.

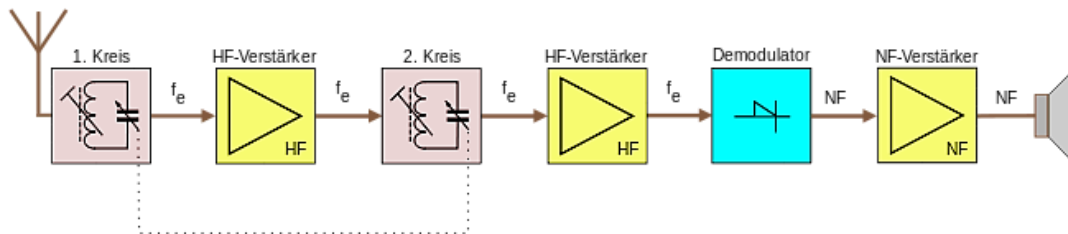


Abb. 11: Blockschaltbild eines Geradeempfängers¹²

Beim Geradeempfänger kann eine weitere Unterteilung vorgenommen werden nach der Anzahl der Abstimmkreise. So gibt es Einkreiser und Mehrkreiser. Mit der Anzahl der Abstimmkreise steigt zwar die Trennschärfe, aber zugleich ist der Gleichlauf der einzelnen Kreise schwieriger zu realisieren.

2.1 Detektorempfänger

1) Beim von Dunwoody 1906 entwickelten "Detektor" – als einfachstem Geradeempfänger – versteht man in der Radiotechnik einen Empfänger, der aus einem Abstimmkreis, einer Diode und einem hochohmigen Kopfhörer besteht. Damit gelingt mit geeigneter Antenne der Empfang genügend starker Sender im Lang- und Mittelwellenbereich.

Zentrales Bauteil ist die Diode. Sie dient der Gleichrichtung des amplitudenmodulierten Eingangssignals. In den Anfängen der Radiotechnik wurde eine Kristalldiode benutzt, bestehend aus Bleiglanz oder Pyrit.¹³ Die Gegenelektrode (Metallspitze) war aus Gold, Silber oder Bronze. Später kam die Spitzendiode (OA21, 1N82) dazu. Für den Nachbau empfiehlt sich eine Germaniumdiode (AA 113). Wird stattdessen eine Siliziumdiode eingesetzt, muss wegen der höheren Durchlaßspannung eine Hilfsspannungsquelle verwendet werden.

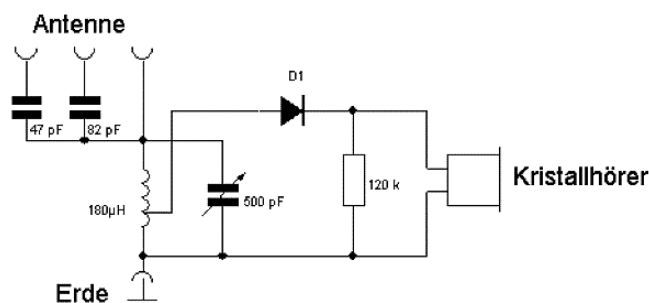


Abb. 12: Detektorempfänger¹⁴

2) Weil es sich beim hochfrequenten Empfangssignal um eine amplitudenmodulierte Schwin-

¹² <http://www.jogis-roehrenbude.de/Detektor/Detektortechnik.htm>

¹³ General Dunwoody von der United States Army verwendete einen "Karbonium-Detektor". Karborund ist ein kristallines Hartmetall aus Silikonformen in Elektroöfen.

¹⁴ <http://www.wolfgang-radio-homepage.de/Volksempfaenger.htm>

gung handelt, erfolgt die Gewinnung des niederfrequenten Nutzsignals durch Gleichrichtung, so dass nur der obere Teil der Hüllkurve übrig bleibt. Zu diesem Zweck wird ein Bauteil mit einem ausgeprägten Knick in der Kennlinie benötigt (im einfachsten Fall eine Diode). Übrig bleibt das modulierende Signal (Geräusch, Sprache, Musik), welches einem hochohmigen Kopfhörer zugeführt wird.

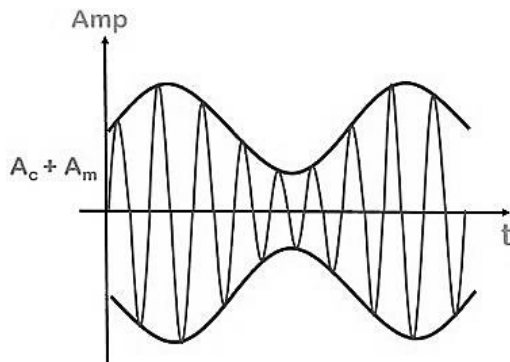


Abb. 13: Hüllkurve eines amplitudenmodulierten Signals¹⁵

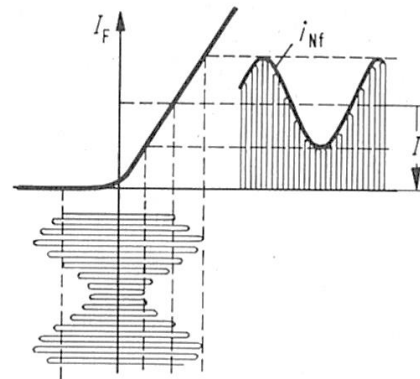


Abb. 14: Prinzip der Amplitudendemodulation mittels "geknickter" Kennlinie¹⁶

2.2 Audion

Als Audion wird eine Schaltung aus der Anfangszeit der Radiotechnik bezeichnet. Verstärkung und Demodulation erfolgen mit demselben Bauteil, eine zusätzliche Diode wird nicht benötigt. Ein weiterer Vorteil ist, dass keine Spiegelfrequenzen auftreten (siehe 3.2). Die für den Nachbau benutzte Röhre (EF 95) erfüllt drei Aufgaben: Entdämpfung des Schwingkreises, Demodulation des HF-Signals und Verstärkung des gewonnenen NF-Signals. Obwohl die EF 95 für eine wesentlich höhere Betriebsspannung entwickelt wurde, arbeitet die Röhre auch mit 12 V einwandfrei, so dass sich diese Schaltung sehr gut für ein Taschenradio eignet.

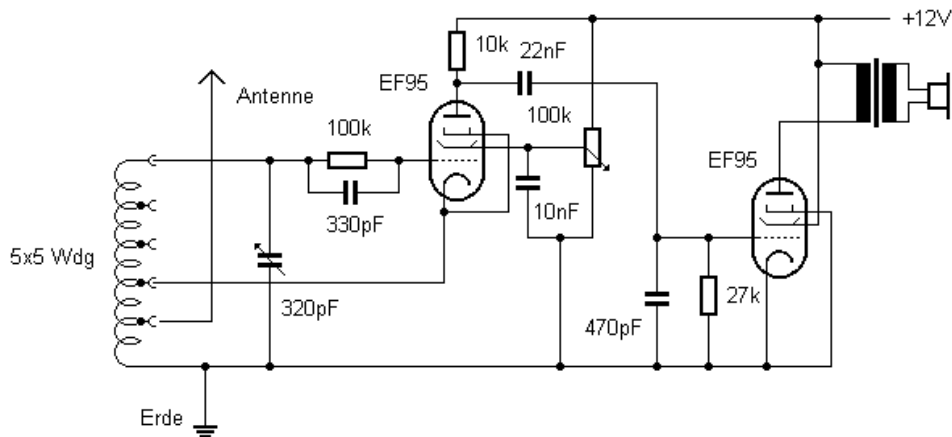


Abb. 15: Audion-Einkreiser mit NF-Ausgangsstufe¹⁷

Steilheit und Verstärkung der Röhre werden über die Schirmgitterspannung eingestellt. Über die Kathode erfolgt die Rückkopplung in den Schwingkreis, wobei das amplitudenmodulierte

¹⁵ <https://electronicscoach.com/amplitude-modulation.html>

¹⁶ O. Limann: Funktechnik ohne Ballast (Franzis).

¹⁷ <http://www.elexs.de/ef955.htm>

Signal zugleich demoduliert wird. Mit einer zweiten Röhre desselben Typs wird das NF-Signal verstärkt. Weil die Heizspannung 6,3 V beträgt, werden die Heizungen der beiden Röhren in Reihe geschaltet. Zur Anpassung eines Kopfhörers an den hochohmigen Röhrenaussgang dient ein Übertrager.

Ein entscheidendes Merkmal eines guten Audions ist der "weiche" Einsatz der Rückkopplung durch eine sich selbst zurückregelnde Verstärkung bei zu grosser Amplitude. Empfindlichkeit und Trennschärfe sind dann optimal, wenn gerade soviel Schwingungsenergie an das Audion zurückgeführt wird, daß die Röhre noch nicht in bleibendes Schwingen gerät (also keine Selbsterregung erfolgt). Ansonsten beginnt der Empfänger zu heulen. Zudem könnten lokale Empfänger, die auf denselben Sender eingestellt sind, gestört werden. Die Kunst besteht folglich darin, mit dem Rückkopplungs-Potentiometer den richtigen Punkt zu finden, bevor das Pfeifen und Heulen einsetzt.

2.3 Reflexempfänger

Beim Reflexempfänger wird in einer linear arbeitenden Verstärkerstufe zunächst die Hochfrequenz verstärkt und anschließend einem Dioden-Demodulator zugeführt. Die auf diese Weise entstehende Niederfrequenz wird auf den Eingang derselben Verstärkerstufe zurückgeführt und nochmals (nun als NF) verstärkt. Reflexempfänger benutzen das verstärkende Bauteil (Röhre oder Transistor) folglich in doppeltem Sinne. Möglich ist dies, weil sich die zu verstärkenden Signale in voneinander unabhängigen Frequenzbändern befinden und daher problemlos voneinander getrennt werden können.

Zunächst gelangt das hochfrequente Eingangssignal an die Basis von Transistor T1, welcher als linearer Verstärker in Emitterschaltung arbeitet. Das verstärkte Signal gelangt über den Kondensator C6 zur Diode D1, um dort demoduliert zu werden. Über den Schleifer des Potentiometers P1 gelangt das niederfrequente Nutzsignal erneut an die Basis von T1. Noch vorhandene Hochfrequenzreste werden durch den Kondensator C3 eliminiert. Das nochmals verstärkte, nun aber im NF-Bereich befindliche Signal gelangt über die Drossel Dr.2 zum Übertrager Tr.1, der das Signal an die Verstärkerstufe mit dem Transistor T2 anpasst. Vom Kollektor von T2 gelangt das Signal zum Ausgangsübertrager Tr.2 und über diesen zum Lautsprecher.

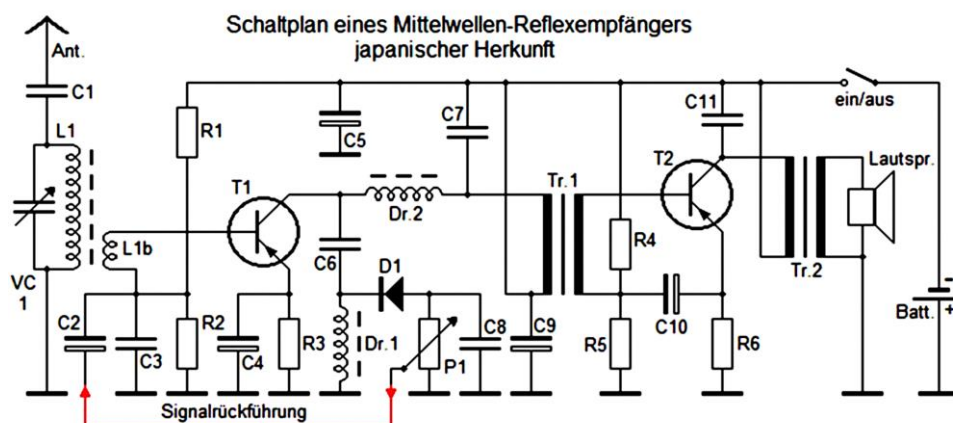


Abb. 16: Reflexempfänger aus den 1960-er Jahren¹⁸

¹⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Reflexschaltung>

2.4 Pendelaudion

Aufgrund der Signalrückkopplung beim Audion erwies sich die exakte Sendereinstellung oft als problematisch. Diese Schwachstelle wurde mit dem Pendelaudion (auch als Superregenerativempfänger bezeichnet) von Edward. H. Armstrong beseitigt.

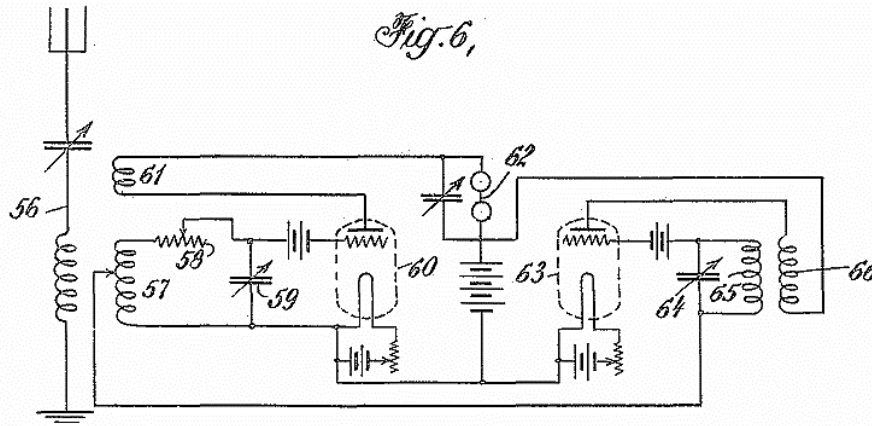


Abb. 17: Pendelaudion von Armstrong¹⁹

Die erste Röhre arbeitet als Oszillator in Meißner-Schaltung auf der Empfangsfrequenz. Die zweite Röhre arbeitet als Oszillator für die Pendelfrequenz. Das Audion wird so abgeglichen, dass es zwischen zwei Arbeitspunkten – Verstärkung und Oszillation – pendelt; daher der Name dieser Schaltung. Mit dieser Methode wird der Bereich höchster Empfindlichkeit gezielt genutzt. Die Pendelfrequenz von ca. 30 kHz befindet sich ausserhalb des menschlichen Hörbereichs und wirkt sich somit nicht störend aus. Weil der Schwingungseinsatz nur kurz "angeschnitten" wird, ist auch kein störendes Pfeifen vorhanden.

¹⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Superregenerativempf%C3%A4nger>

3 Überlagerungsempfänger

Als Superhet²⁰ oder "Super" werden Radioempfänger bezeichnet, die durch Mischung zweier Frequenzen (Eingangsfrequenz und Oszillatorfrequenz) eine feste Zwischenfrequenz (Intermediate frequency) erzeugen. Aus der Zwischenfrequenz (ZF) wird anschliessend durch Demodulation das niederfrequente Nutzsignal gewonnen. Dieses Verfahren ermöglicht bei gleichzeitig hoher Verstärkung eine verbesserte Trennschärfe (Selektivität) und Empfindlichkeit.

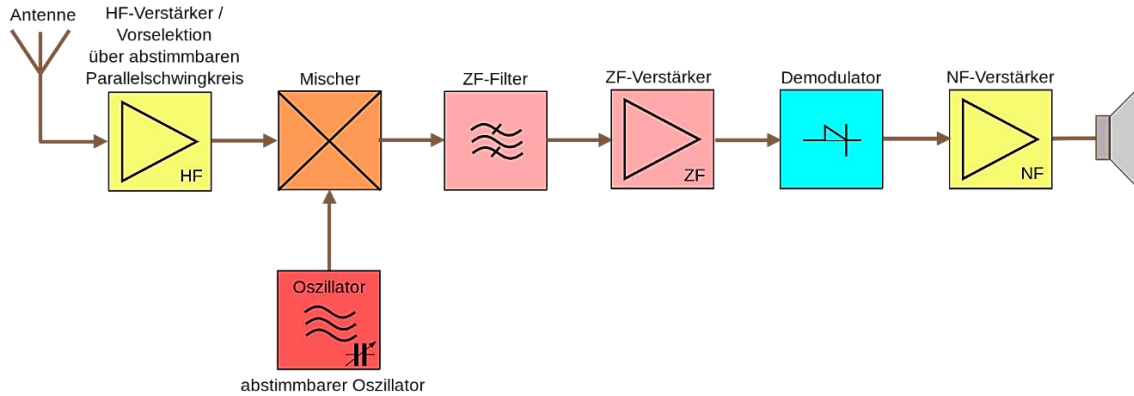


Abb. 18: Blockschaltbild eines Überlagerungsempfängers²¹

Eine niedrige ZF besitzt den Vorteil, dass die benötigten Bandfilter einfacher zu realisieren und daher preiswert sind. Um die störende Spiegelfrequenz (3.2) zu unterdrücken, wäre eine hohe ZF aber besser. Diese Erwägung führt zum *Doppel-Super*, bei dem zwei Mischstufen verwendet werden.

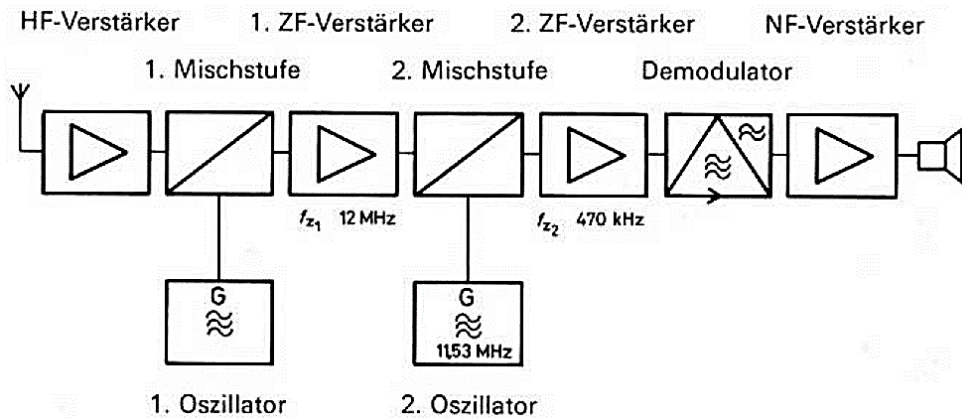


Abb. 19: Superhet mit Zweifachmischung²²

Die Empfangsfrequenz wird zunächst in eine höhere ZF (f_{z1}) umgesetzt und verstärkt; danach erfolgt die Umsetzung in eine tiefere Zwischenfrequenz (f_{z2}). Der für die zweite Mischung benötigte Oszillator arbeitet mit einer Festfrequenz, so dass Gleichlaufprobleme entfallen. Ein weiterer Entwicklungsschritt führt zum *Dreifach-Super*. Das Drake-Modell 2-B für die klassischen Amateurfunkbänder bspw. hat als erste ZF 3,5 bis 4,1 MHz, als zweite ZF 455 kHz und als dritte ZF 50 kHz.²³

²⁰ Superhet, von *Superheterodyne* abgeleitet.

²¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberlagerungsempf%C3%A4nger>

²² Technische Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker Bnd. 2 (Eidg. Druck- und Materialzentrale, 1977).

²³ F. Sichla: Empfangsprinzipien und Empfängerschaltungen (vth).

3.1 Frequenzmischung

Grundsätzlich entstehen bei der Mischung zwei neue Frequenzen, die der Summe oder der Differenz von Oszillatorfrequenz und Empfangsfrequenz entsprechen.

Supradyne ($\omega_{osz} > \omega_e$): $f_{osz} = f_e + f_z$

Infradyne ($\omega_{osz} < \omega_e$): $f_{osz} = f_e - f_z$

Benötigt wird nur die Differenzfrequenz, welche herausgefiltert und als Zwischenfrequenz (ZF) genutzt wird.

$f_z = f_{osz} - f_e$ ZF für AM (Kurz-, Mittel- und Langwelle): 455 bis 473 kHz
 ZF für FM (UKW): $10,7 \pm 0,1$ MHz

Das (hochfrequente) Eingangssignal wird in eine tiefere Frequenzlage transponiert, verstärkt und dann einem Demodulator zugeführt. Dies im Unterschied zum Geradeempfänger, bei dem das RF-Signal ohne Frequenzumsetzung auf direktem Wege zum Demodulator gelangt.

1) Bei der **additiven Mischung** werden zwei Schwingungen addiert, d.h. überlagert, und gemeinsam einem Bauteil mit gekrümmter Kennlinie zugeführt. Aufgrund der Nichtlinearität entstehen zusätzliche Frequenzen.

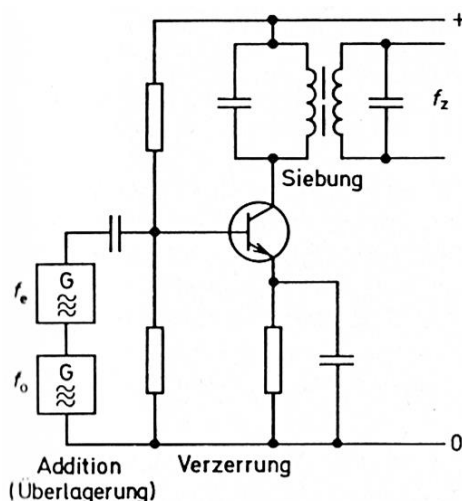


Abb. 20: Additive Mischstufe mit VFO²⁴

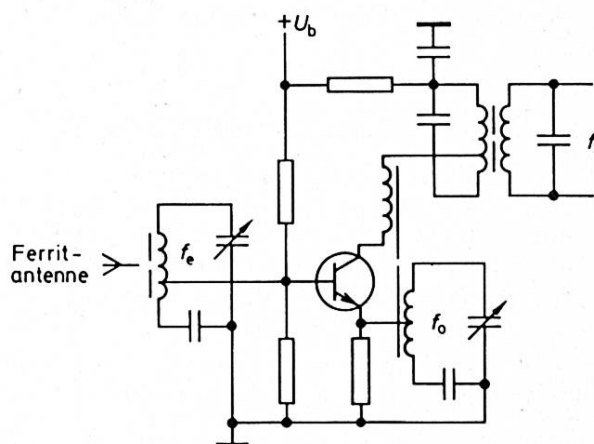


Abb. 21: Selbtschwingende additive Mischstufe

Ein Vorteil bei der additiven Mischung ist zweifellos, dass bei einer selbstschwingenden Mischstufe kein separater Oszillator benötigt wird.

2) Bei der **multiplikativen Mischung** wird eine Mehrgitterröhre (Heptode-Triode) oder ein Doppelgate-FET²⁵ verwendet. Die zu mischenden Signale wirken sich multiplizierend auf das Ausgangssignal aus.

2a) Bei einer Röhrenschaltung wird die Spannung des RF-Signals an das erste Steuergitter und die Oszillatorspannung an das zweite Steuergitter angelegt. Je nach Gitterspannung übt das zweite Gitter einen mehr oder weniger dominanten Einfluss auf die Steilheit der zum ersten Gitter gehörenden I_a/U_g -Kennlinie aus, welche zwischen S_{max} und S_{min} um ihren Fusspunkt

²⁴ H. Häberle et al: Elektronik 3 – Nachrichtentechnik (Europa Lehrmittel).

²⁵ FET = Feldeffekttransistor

gekippt wird. Auf diese Weise erfolgt die erforderliche Steilheitsveränderung und damit die Signalmischung.

2b) Bei einer Transistorschaltung wird die Spannung des RF-Signals an die Steuerelektrode G1 und die Oszillatorspannung an die Steuerelektrode G2 eines Feldeffekttransistors angelegt. Der erzielbare Effekt ist derselbe wie bei der Röhrenschtaltung. Die Zwischenfrequenz wird im Beispiel zur weiteren Verarbeitung mit einem Übertrager ausgekoppelt.

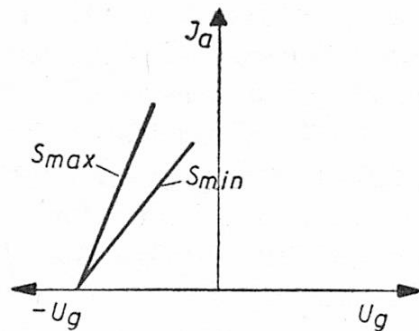


Abb. 22: Wirkprinzip der multiplikativen Mischung mit einer Heptode-Triode²⁶

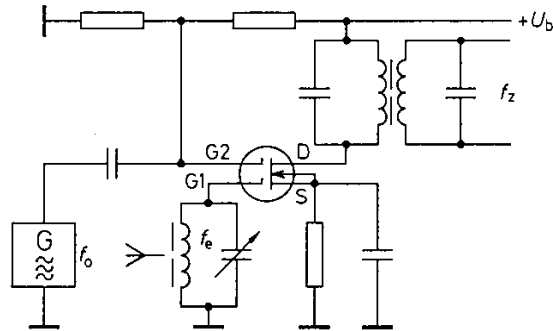


Abb. 23: Multiplikative Mischung mit Doppelgate-FET²⁷

Anm.: Ausser den auf dem *Superheterodyne*-Prinzip basierenden Empfängern werden für bestimmte Zwecke (z.B. Mobiltelefone) auch Empfänger eingesetzt, die nach dem *Homodyne*-Prinzip arbeiten. Diese setzen das hochfrequente Eingangssignal direkt ins niederfrequente Nutzsignal um. Der Oszillator schwingt dazu auf der Empfangsfrequenz ($\omega_{osz} = \omega_e$), eine Zwischenfrequenz im eigentlichen Sinne existiert nicht. Dieses als *Direktmischung* bezeichnete Verfahren kommt vorwiegend in der digitalen Signalübermittlung zur Anwendung. In der analogen Funktechnik sind Homodyne-Empfänger allenfalls im Amateurfunk bekannt.

3.2 Spiegelfrequenzempfang

Beim Super-Heterodyne-Empfänger besteht die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Sender gleichzeitig zu empfangen. An sich spielt es keine Rolle, ob die Eingangsfrequenz oder die Oszillatorfrequenz höher ist. In praxi wird in der Regel die Oszillatorfrequenz als höhere Frequenz benutzt. Der erwünschte Sender liegt dabei um die Zwischenfrequenz tiefer als die Oszillatorfrequenz, der störende Sender um die Zwischenfrequenz höher.

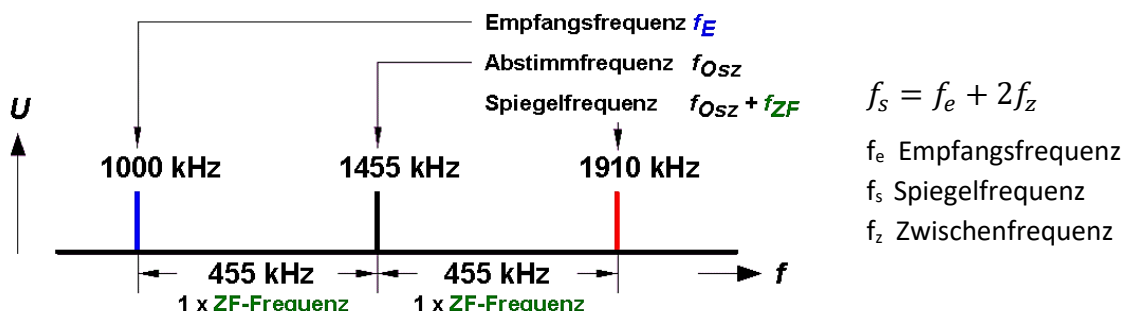


Abb. 24: Empfangsfrequenz und Spiegelfrequenz²⁸

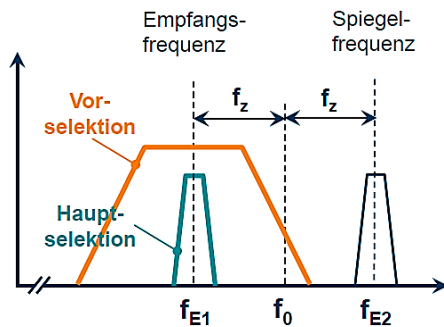
²⁶ H. Richter: Neue Schule der Radiotechnik und Elektronik, Bd. 2 (Telekosmos-Verlag).

²⁷ Häberle et al: Elektronik 3 – Nachrichtentechnik (Europa Lehrmittel)

²⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberlagerungsempf%C3%A4nger>

Die störende Frequenz wird als **Spiegelfrequenz** bezeichnet, weil Empfangsfrequenz (f_{E1}) und störende Frequenz (f_{E2}) spiegelbildlich zur Oszillatorfrequenz liegen.

Um eine genügende Trennschärfe zu gewährleisten, sollte die Spiegelfrequenz nicht zu nahe an der Empfangsfrequenz liegen. Aus diesem Grunde muss die Zwischenfrequenz genügend gross gewählt werden. Letztere soll zudem in einem Bereich liegen, in dem keine Sender arbeiten.



Der Spiegelfrequenzempfang muss bereits im HF-Vorkreis unterdrückt werden, welcher gemeinsam mit dem Oszillatorkreis abgestimmt wird.

Abb. 25: Spiegelfrequenzunterdrückung

3.3 FM-Demodulation

Für die Gewinnung des Nutzsignals aus der Zwischenfrequenz werden Diskriminatoren eingesetzt, die das frequenzmodulierte Eingangssignal in ein amplitudenmoduliertes Signal umwandeln, welches anschliessend demoduliert wird. Die Umwandlung erfolgt durch einen frequenzabhängigen Widerstand wie bspw. eine Induktivität.

3.3.1 Flankendiskriminator

Im einfachsten Fall übernimmt ein Schwingkreis mit Diode die erforderlichen Aufgaben. Die dazu benötigte Schaltung wird als *Flankendiskriminator* bezeichnet. Der Schwingkreis wird dazu leicht verstimm, so dass die ZF von 10,7 MHz etwa in der Mitte des einigermaßen geraden Anstieges der Flanke liegt.

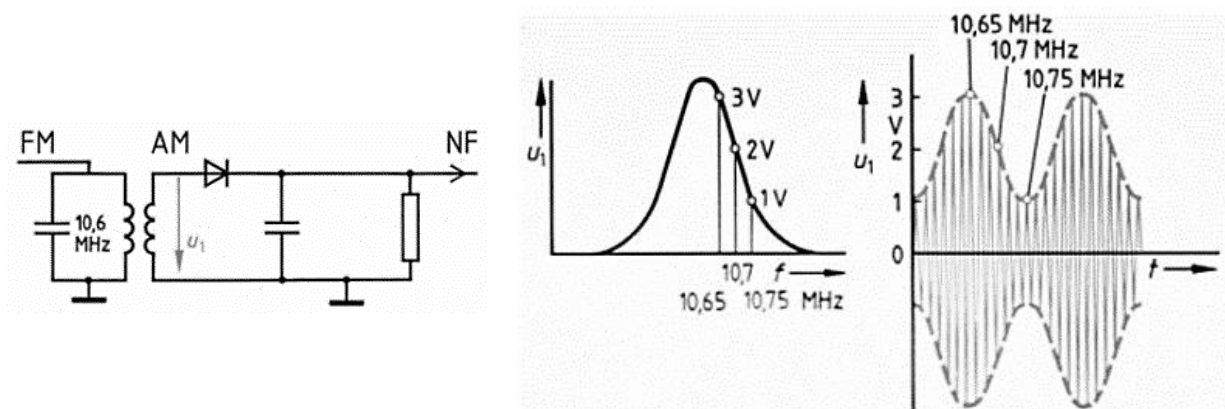


Abb. 26: Umformung einer FM in ein amplitudenmoduliertes Signal²⁹

Bei der Resonanzfrequenz (10,6 MHz) liefert der Schwingkreis die größte Spannung, welche nach beiden Seiten abfällt. Eine dieser Flanken lässt sich als Frequenz-Spannungs-Wandler

²⁹ <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehgang-ta/a12/>

verwenden. Bei der Mittenfrequenz (10,7 MHz) entstehen im Beispiel 2 V, bei der höchsten Frequenz (10,75 MHz) 1 V und bei der niedrigsten Frequenz (10,65 MHz) 3 V. Aus der Frequenzmodulation ist damit eine Amplitudenmodulation geworden, die mit einem Hüllkurvengleichrichter (Diode) demoduliert werden kann. Störend bei diesem Verfahren ist der Umstand, dass die Flanke nicht wirklich linear ist, so dass es zu Verzerrungen kommt. Abhilfe schafft eine verbesserte Schaltung wie der Phasendiskriminator. Nach dem Demodulator wird das Nutzsignal dem NF-Verstärker zur weiteren Verarbeitung zugeführt.

3.3.2 Phasendiskriminator

Bekanntlich erfolgt beim kritisch oder unterkritisch gekoppelten Bandfilter bei Resonanz eine Phasenverschiebung der Spannungen von 90° zwischen Primär- und Sekundärkreis, welche bei Abweichungen von der Resonanzfrequenz grösser oder kleiner wird. Die Dioden D_1 und D_2 des *Phasendiskriminators* werden im Gegentakt betrieben und erzeugen an den Widerständen R_1 und R_2 entsprechende Richtspannungen. Zwischen Ausgang und Masse wird das demodulierte NF-Signal abgegriffen, das sich aus der Differenz der Spannungen an den beiden Widerständen ergibt.

Eine Abweichung von der Resonanzfrequenz erzeugt eine Änderung der Phasenlage. Die an den Dioden gebildeten Spannungen sind daher ungleich. Die Frequenzmodulation wird damit in eine Amplitudenmodulation überführt. Je grösser die Frequenzabweichung ist, desto grösser wird auch die Differenzspannung der beiden Widerstände. Das durch Demodulation erzeugte NF-Signal wird zur Weiterverarbeitung einem NF-Verstärker zugeführt.

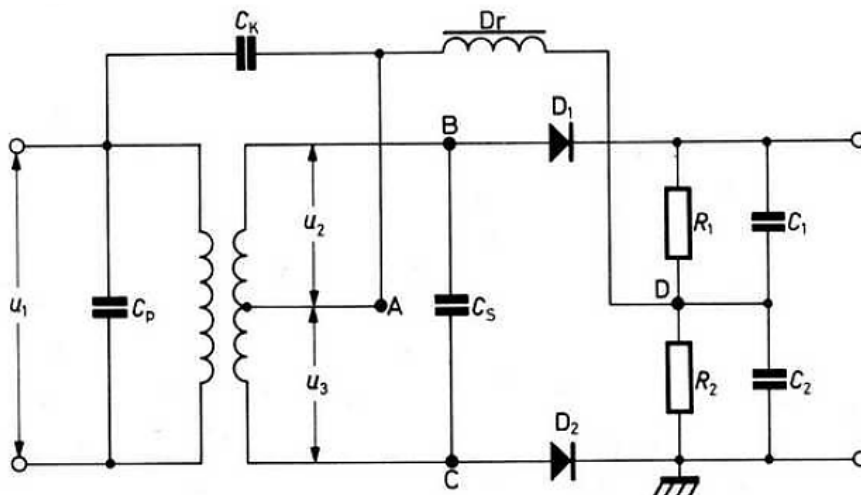


Abb. 27: Phasendiskriminator³⁰

Mit einem Meßsender und einem hochohmigen Voltmeter kann die Durchlasskurve des Diskriminators bestimmt werden. Das Voltmeter am Ausgang zeigt solange keine Spannung an, als die Spannungen an den Widerständen R_1 und R_2 gleich gross sind, d.h. solange das eingangseitige Bandfilter mit der Resonanzfrequenz arbeitet. Durch schrittweise Erhöhung oder Verringerung der Messfrequenz verändert sich die Phasenlage und damit die Spannung an den

³⁰ Technische Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker, Band II (Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 1977).

Widerständen. Die aus der Differenz beider Spannungen gewonnene Ausgangsspannung kann nun abgelesen und in ein U/f-Diagramm eingezeichnet werden. Es entsteht eine s-förmige Kurve, die im Arbeitsbereich proportional zum Frequenzhub ist. Zur Demodulation von FM-Signalen muss der Phasendiskriminator mit einer konstanten Signalspannung eingespiesen werden. Diese Aufgabe übernimmt ein vorgeschaltetet Begrenzer.

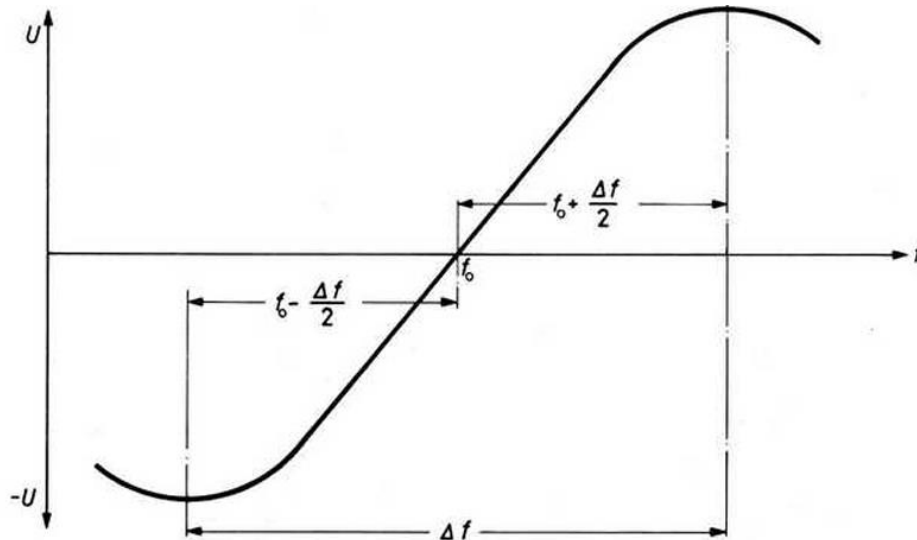


Abb. 28: Durchlasskurve eines Phasendiskriminators³¹

3.3 Verhältnisdiskriminator

Der *Verhältnisdiskriminator* – auch als *Ratiodetektor* bezeichnet – ist ein in Radioempfängern häufig verwendeter FM-Demodulator. Seine Funktion besteht in Umwandlung und Begrenzung des frequenzmodulierten Eingangssignals in ein amplitudenmoduliertes Signal, aus dem das niederfrequente Ausgangssignal gewonnen wird.

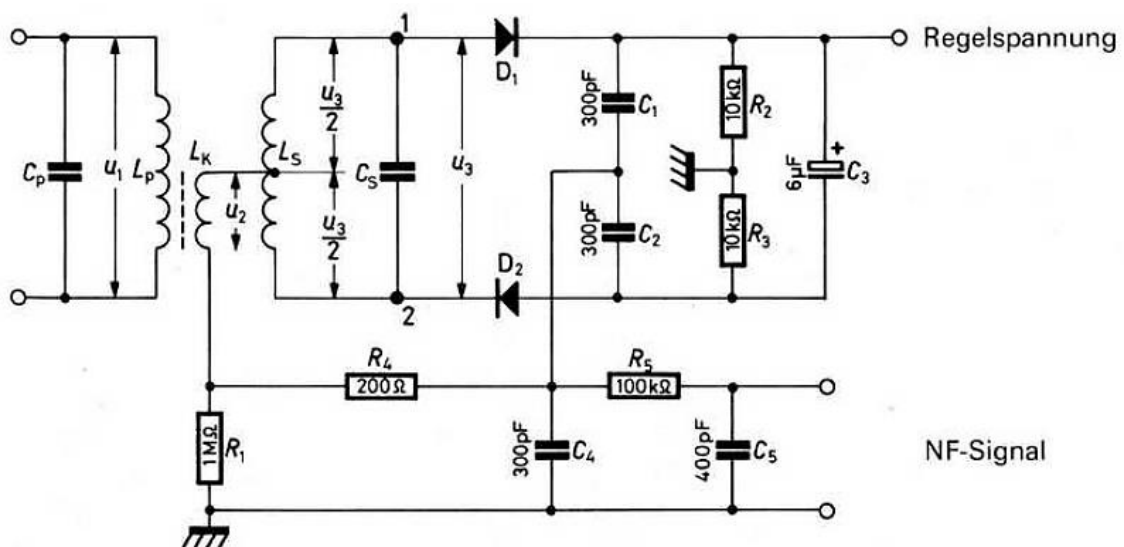


Abb. 29: Verhältnisdiskriminator³²

³¹ Ebenda.

³² Ebenda.

1) Der Verhältnisdiskriminator begrenzt das Eingangssignal durch die Dioden D_1 und D_2 und benötigt deshalb keine vorgeschaltete Begrenzerstufe. Die zugeführte HF-Spannung liegt zwischen den Punkten 1 und 2. Die beiden in Reihe geschalteten Dioden üben mehrere Funktionen aus, darunter die Gleichrichtung des Radiosignals. Die Gleichspannung baut sich an den Widerständen R_2 , R_3 und dem parallel geschalteten Elektrolytkondensator C_3 auf. Die Innenwiderstände der Dioden bedämpfen dabei den Sekundärkreis des Bandfilters, Je grösser die Hochfrequenz ist, desto stärker wird auch das Bandfilter bedämpft. C_3 wirkt für Hochfrequenzreste infolge seiner geringen Impedanz als Nebenschluss.

2) Die Umwandlung des frequenzmodulierten Signals in ein amplitudenmoduliertes Signal erfolgt auf dieselbe Weise wie beim Phasendiskriminator, wobei die über eine zusätzliche Koppungsspule L_K generierte Spannung U_2 in Phase mit der Eingangsspannung des Primärkreises ist.

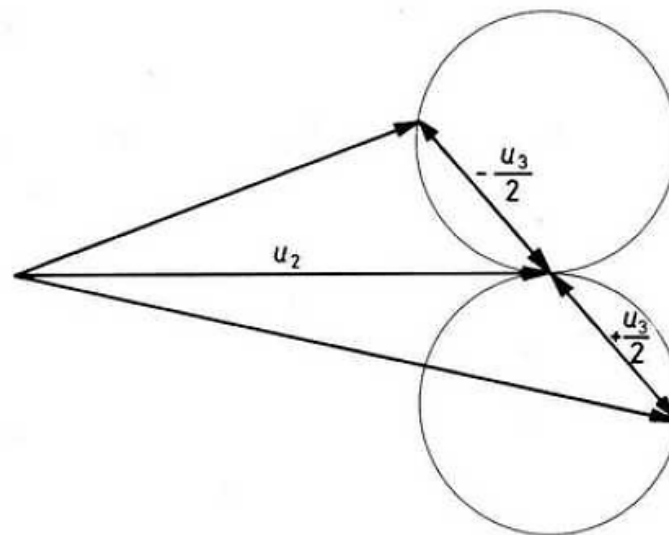


Abb. 30: Vektordiagramm der Teilspannungen³³

3) Die Demodulation des AM-Signals erfolgt mit der durch die Dioden und der Mittelanzapfung der Sekundärspule gebildeten Brückenschaltung. Sind die durch die Dioden fließenden Ströme gleich gross (was nur bei Resonanz der Fall ist), so heben sich die Spannungsabfälle an R_1 auf und das NF-Signal ist Null. Bei unterschiedlichen Strömen dagegen erzeugt der Differenzstrom einen Spannungsabfall, welcher bezüglich Richtung und Grösse dem Modulationsindex folgt. Am Widerstand R_4 kann deshalb das gesuchte NF-Signal entnommen werden.

4) Das aus R_5 und C_5 gebildete RC-Glied wirkt als *De-Emphasis*, d.h. hohe Frequenzen werden abgesenkt. Diese Abschwächung ist deshalb erforderlich, weil die betreffenden Frequenzen im Sender angehoben wurden, ein Vorgang, der als *Pre-Emphasis* bezeichnet wird. Bei der anschliessenden Verstärkung des Nutzsignals wirken sich die im oberen Frequenzbereich vorhandenen Störfrequenzen somit weniger stark aus und die Signalqualität verbessert sich.

Der Ratiometektor beinhaltet gegenüber anderen Diskriminatorschaltungen etliche Vorteile. Einziger Nachteil ist ein schwächeres NF-Signal, woraus eine grössere Verstärkung resultiert.

³³ Ebenda.

4 NF-Verstärker

Aufgrund der vielen Bauteile für einen hochwertigen Audioverstärker nehmen auch die Fehlermöglichkeiten zu. Mit einem Signalverfolger (Signalinjektor/Signalempfänger) sowie einem Röhrevoltmeter fand ein Servicetechniker der alten Schule bald die Fehlerstelle. Heutzutage verwenden wir anstelle eines Signalverfolgers einen Funktionsgenerator und ein digitales Speicheroszilloskop.



Abb. 29: In den 1950ern mit Signalverfolger und Röhrevoltmeter auf Fehlersuche³⁴



Abb. 30: In den 1970ern kamen Transistorvoltmeter auf³⁵

In den Topmodellen aus den 1950er Jahren et ultra wurden Vorverstärker mit ausgeklügeltem Klangregister (Tiefen- und Höhenregler, Tonblende usw.) eingebaut, welche die Endstufe mit einem brillanten Klang belieferten.

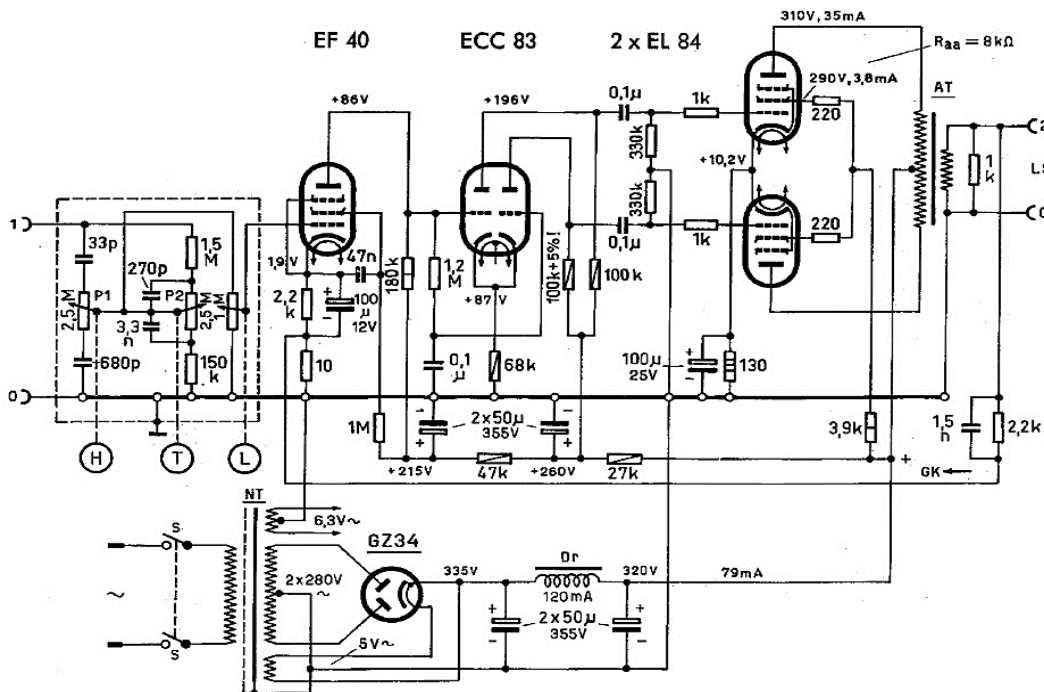


Abb. 31: Hi-Fi-Verstärker für UKW- und Schallplattenwiedergabe³⁶

³⁴ <http://www.pauls-roehren.de/geraete/geraete.php>

³⁵ Heathkit Bausatz

³⁶ Bildquelle: Funkschau 3/1955.

Die Schaltung zeigt einen dreistufigen NF-Verstärker für einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 30'000 Hz mit geringem Klirrfaktor, bestehend aus einer rauscharmen Eingangsstufe (EF 40) mit bis zu 200facher Verstärkung, einer nachfolgenden Verstärkerstufe mit Phasenumkehr (ECC 83) sowie einer Gegentakt-Endstufe (2 x EL 84) in AB-Betriebsart und 10 W Ausgangsleistung. Potentiometer im Eingangskreis dienen der Höhen-, Tiefen- und Lautstärkeeinstellung.

5 Lernquellen

5.1 Fachliteratur

- Erich Stadler: Modulationsverfahren (Vogel Fachbuch).
- Otto Limann: Funktechnik ohne Ballast (Franzis Verlag).
- Eike Grund: Radios der 50er Jahre 3 Bde. (BoD, Norderstedt).
- Georg Rose: Grosse Elektronik-Formelsammlung (Franzis Verlag).
- Jürgen F. Hemme: Rote Röhren, grüne Spulen (Westkreuz-Verlag).
- Frank Sichlas: Empfangsprinzipien und Empfängerschaltungen (vth).
- Heinz Häberle et al: Elektronik 3 - Nachrichtenelektronik (Europa Lehrmittel).
- Heinz Richter: Neue Schule der Radiotechnik und Elektronik (Telekosmos-Verlag).
- Eckart Moltrecht: Amateurfunklehrgang für das Amateurfunkzeugnis Klasse A (vth).
- Technische Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker, 2 Bde. (Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 1977).

5.2 Weblinks

- <http://www.50er-radios.de/>
- <http://www.jogis-roehrenbude.de/>
- <https://b-kainka.de/Radiobau.htm>
- <https://www.elektroniktutor.de/signalkunde/am.html>
- <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/darc-online-lehrgang/>