

# 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.<sup>1</sup> 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 Fernstechnik 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.

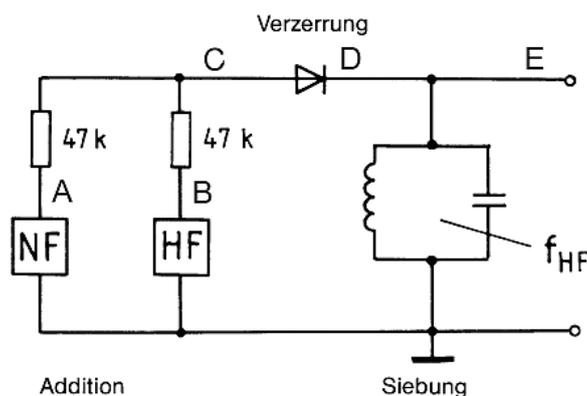
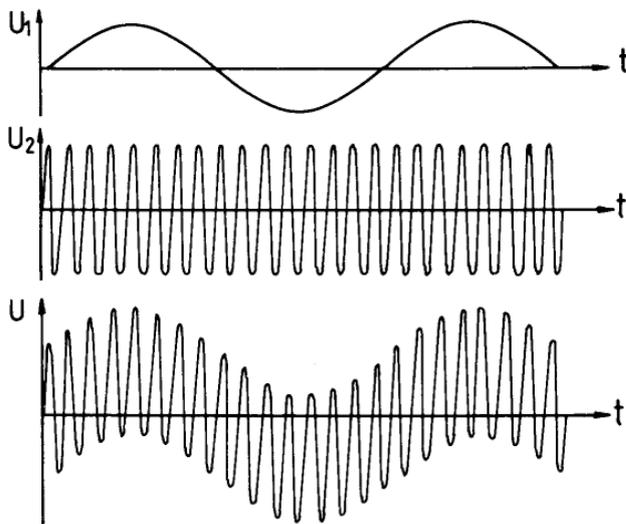


Abb. 1: Prinzipschaltung für Amplitudenmodulation<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> <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.

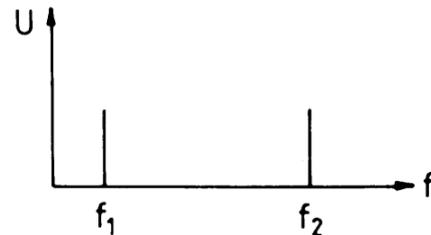
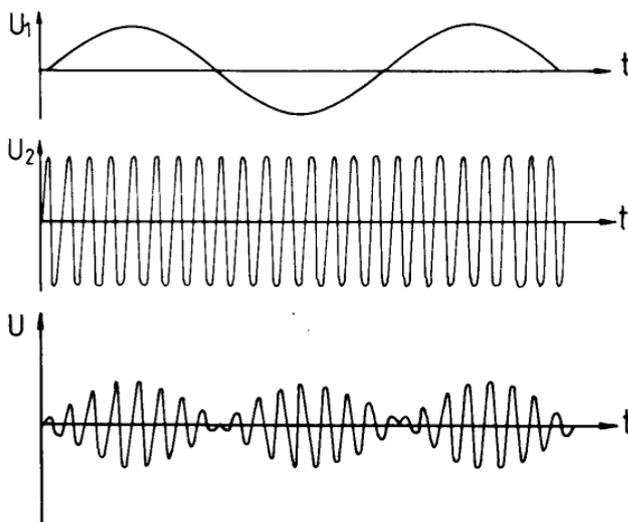


Abb. 2: Überlagerung zweier Sinusschwingungen<sup>3</sup>

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.

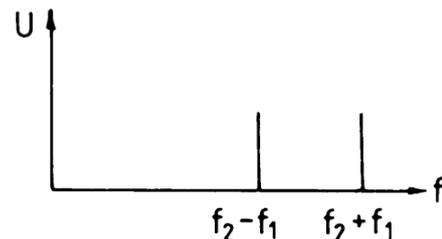


Abb. 3: Erzeugung einer amplitudenmodulierten Schwingung<sup>4</sup>

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

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

<sup>4</sup> <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.

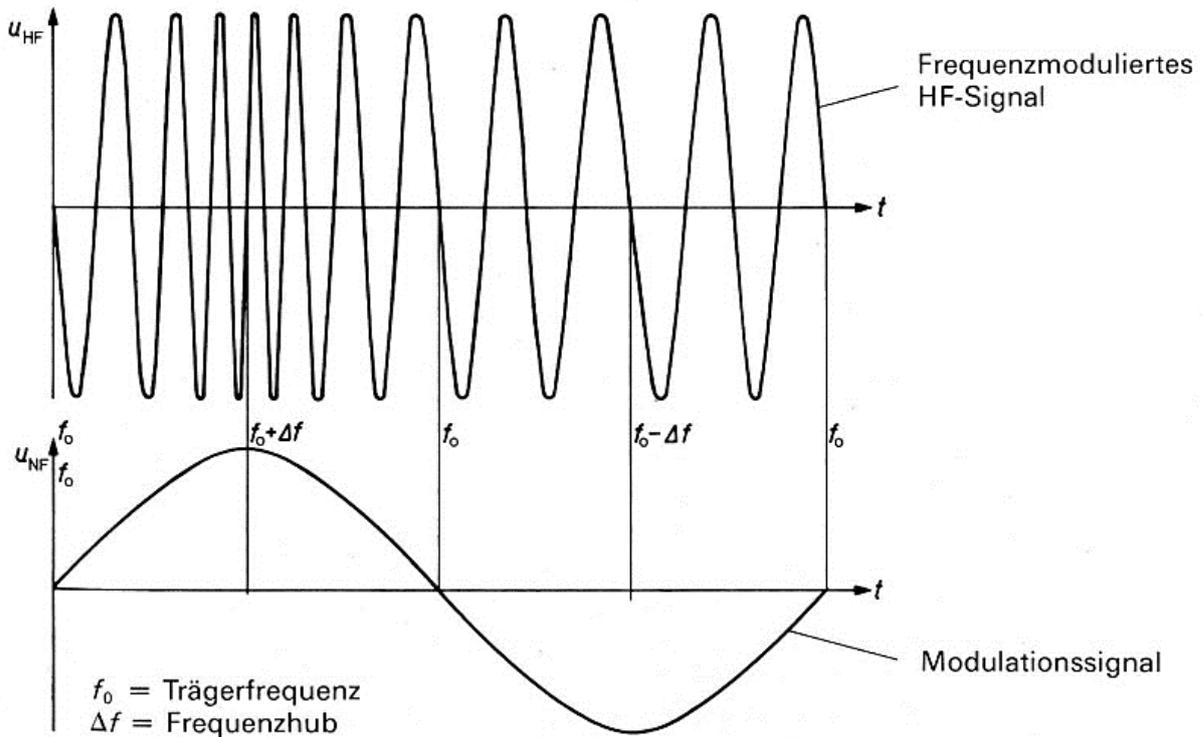


Abb. 6: Erzeugung einer frequenzmodulierten Schwingung<sup>6</sup>

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 Impulstörungen (Zündfunken von Fahrzeugen oder elektrostatische Entladungen bei einem Gewitter) nicht problematisch aus.

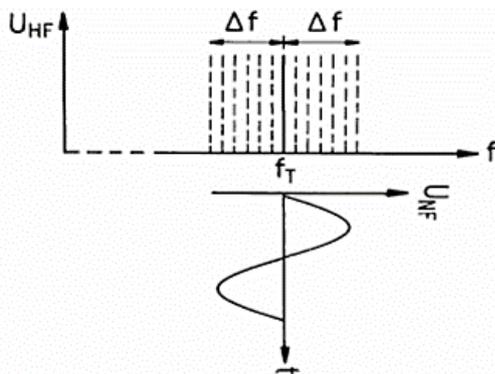


Abb. 7: Frequenzhub<sup>7</sup>

Unter dem Frequenzhub  $\Delta f$  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.

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

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



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.<sup>9</sup>

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

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

Als Differentialgleichung zweiter Ordnung besitzt die Besselsche Differentialgleichung zwei linear unabhängige Lösungen, die als Bessel-Funktionen erster Art ( $J_\nu$ ) und als Bessel-Funktionen zweiter Art ( $Y_\nu$ ) 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.

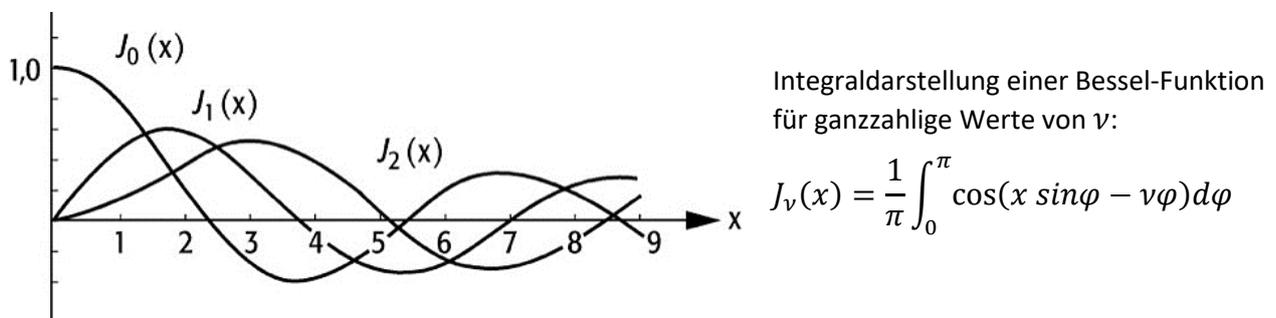


Abb. 9: Bessel-Funktionen erster Art der nullten, ersten und zweiten Ordnung

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  $J_\nu(\eta)$ .<sup>10</sup>

	Seitenbandamplituden										
	Carrier	1st	2d	3d	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
$\eta$	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$
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	<b>0,00</b>	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	<b>0,00</b>	-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	---

<sup>9</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Besselsche\\_Differentialgleichung](https://de.wikipedia.org/wiki/Besselsche_Differentialgleichung)

<sup>10</sup> 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.

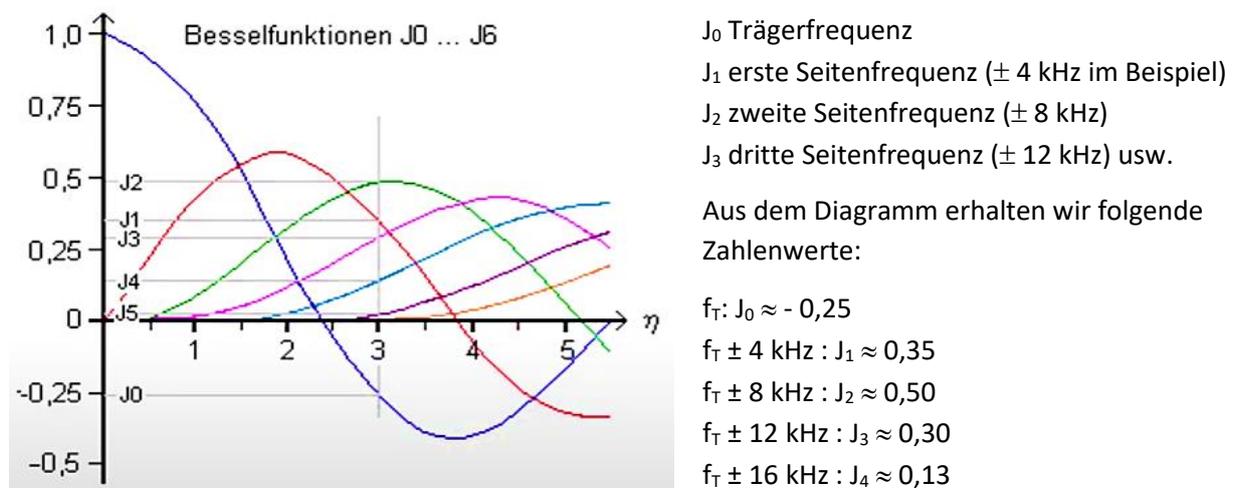


Abb. 10: Normiertes Bessel-Diagramm mit Amplitudenwerten der Seitenlinienpaare<sup>11</sup>

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.

<sup>11</sup> <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.

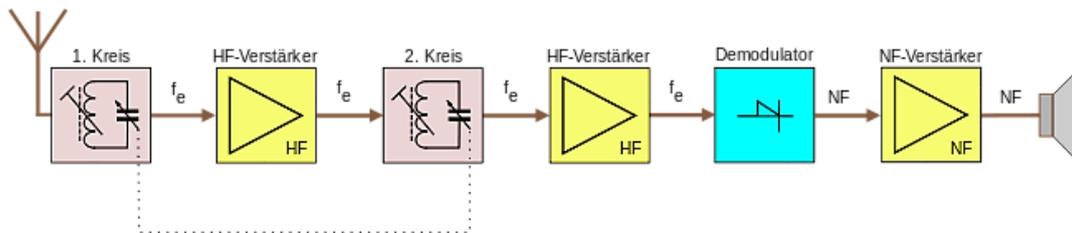


Abb. 11: Blockschaltbild eines Geradeempfängers<sup>12</sup>

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.<sup>13</sup> 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.

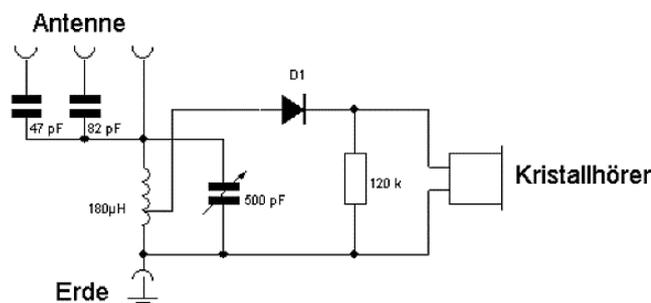


Abb. 12: Detektorempfänger<sup>14</sup>

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

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

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

<sup>14</sup> <http://www.wolfgangs-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.

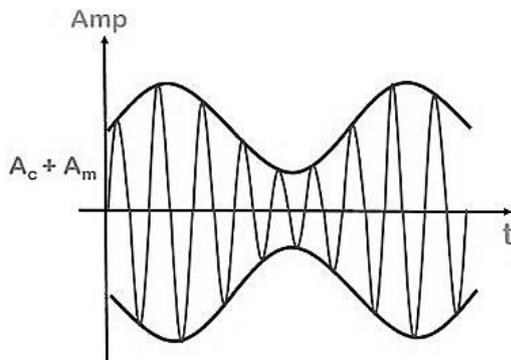


Abb. 13: Hüllkurve eines amplitudenmodulierten Signals<sup>15</sup>

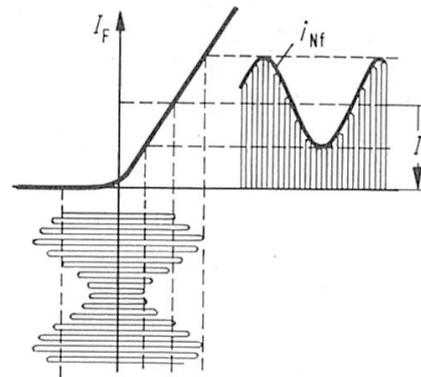


Abb. 14: Prinzip der Amplitudendemodulation mittels "geknickter" Kennlinie<sup>16</sup>

## 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.

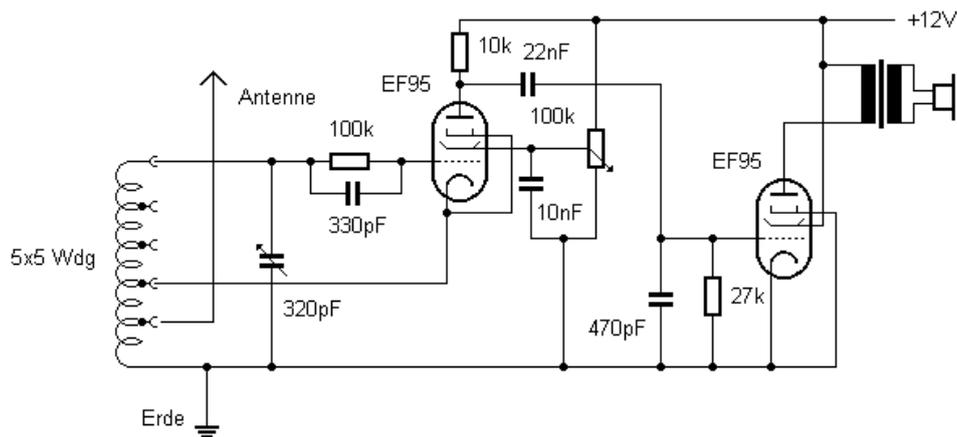


Abb. 15: Audion-Einkreiser mit NF-Ausgangsstufe<sup>17</sup>

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

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

<sup>16</sup> O. Limann: Funktechnik ohne Ballast (Franzis).

<sup>17</sup> <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.

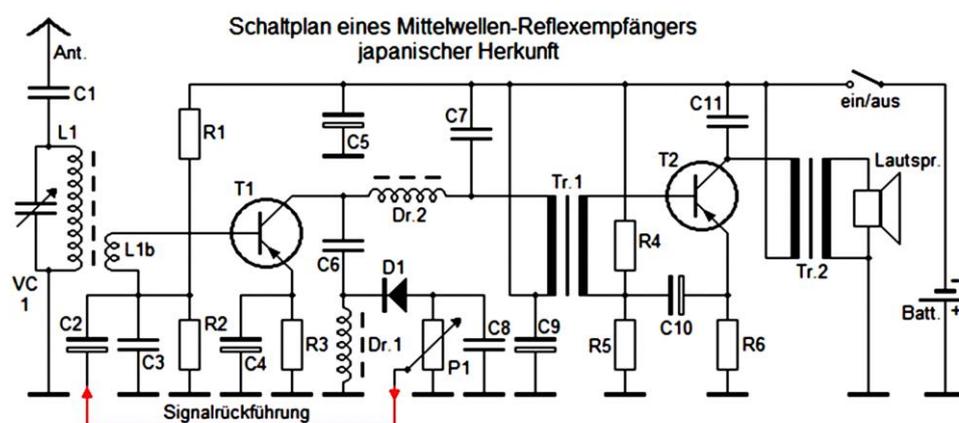


Abb. 16: Reflexempfänger aus den 1960-er Jahren<sup>18</sup>

<sup>18</sup> <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.

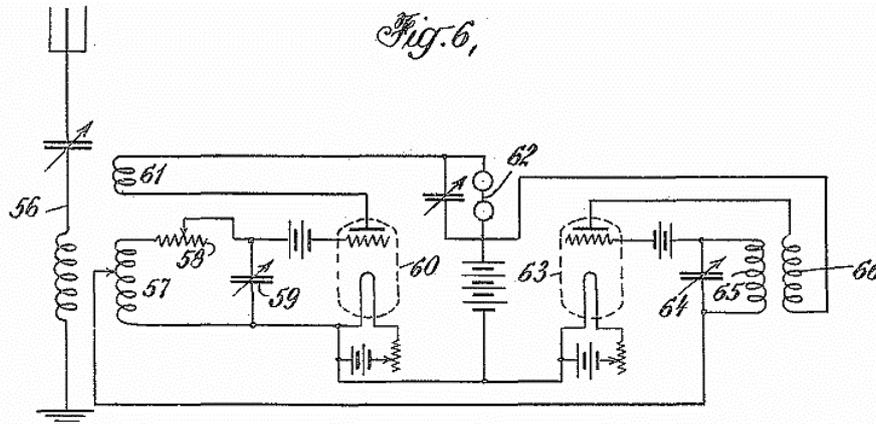


Abb. 17: Pendelaudion von Armstrong<sup>19</sup>

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.

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

### 3 Überlagerungsempfänger

Als Superhet<sup>20</sup> 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.

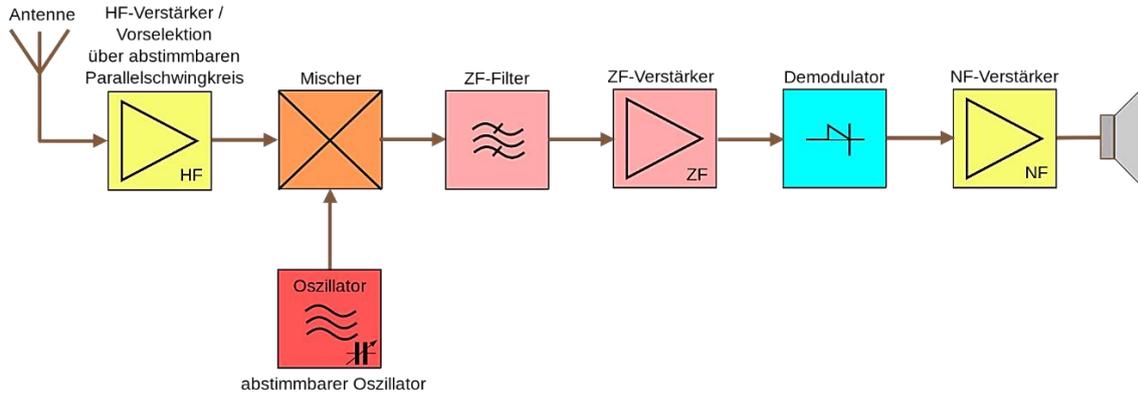


Abb. 18: Blockschaltbild eines Überlagerungsempfängers<sup>21</sup>

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.

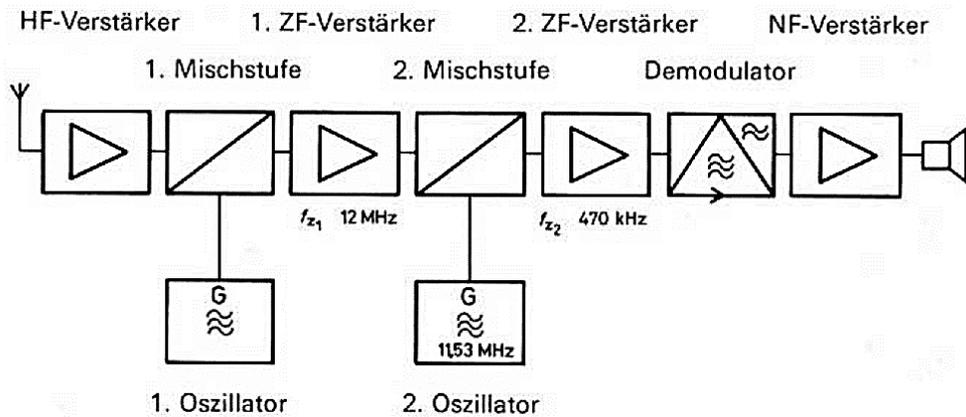


Abb. 19: Superhet mit Zweifachmischung<sup>22</sup>

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.<sup>23</sup>

<sup>20</sup> Superhet, von *Superheterodyne* abgeleitet.

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

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

<sup>23</sup> 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.

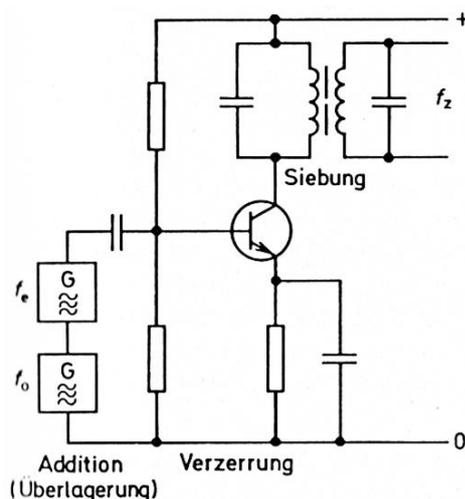


Abb. 20: Additive Mischstufe mit VFO<sup>24</sup>

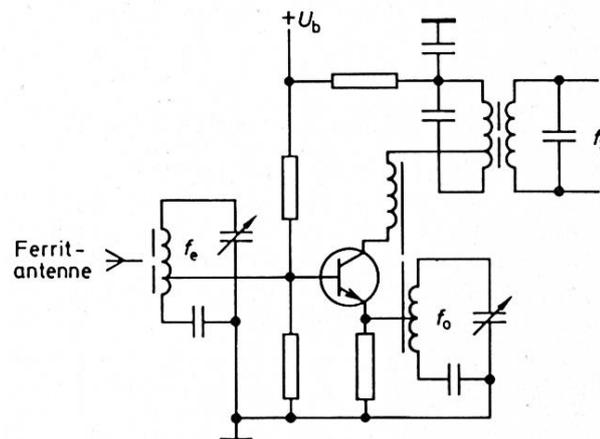


Abb. 21: Selbtschwingende additive Mischstufe

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-FET<sup>25</sup> verwendet. Die zu mischenden Signale wirken sich multiplizierend auf das Ausgangssignal aus.

2a) Bei einer Röhrenschtaltung 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

<sup>24</sup> H. Häberle et al: Elektronik 3 – Nachrichtentechnik (Europa Lehrmittel).

<sup>25</sup> 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.

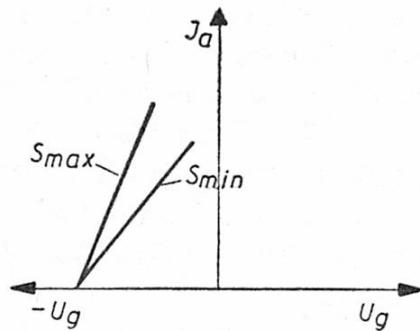


Abb. 22: Wirkprinzip der multiplikativen Mischung mit einer Heptode-Triode<sup>26</sup>

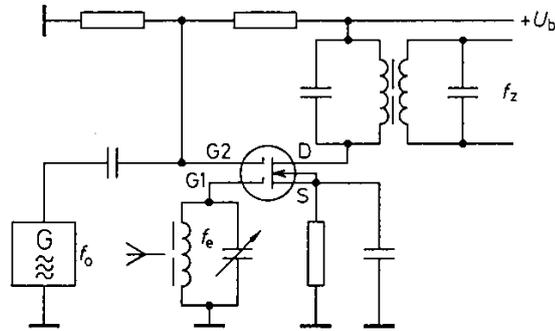


Abb. 23: Multiplikative Mischung mit Doppelgate-FET<sup>27</sup>

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.

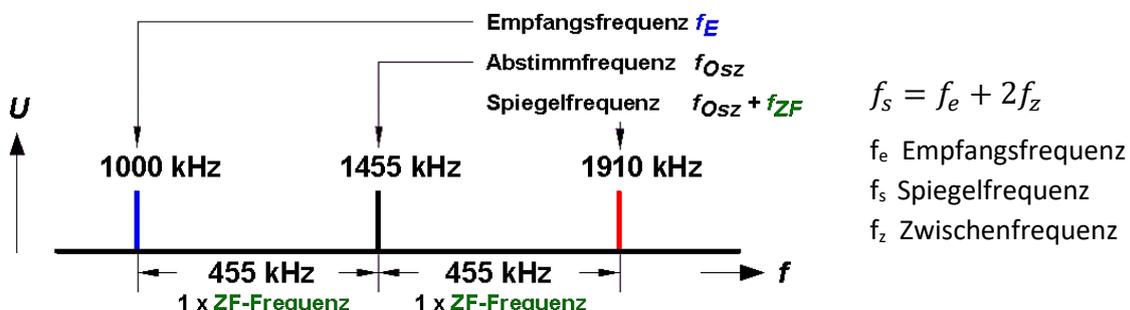


Abb. 24: Empfangsfrequenz und Spiegelfrequenz<sup>28</sup>

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

<sup>27</sup> Häberle et al: Elektronik 3 – Nachrichtentechnik (Europa Lehrmittel)

<sup>28</sup> <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.

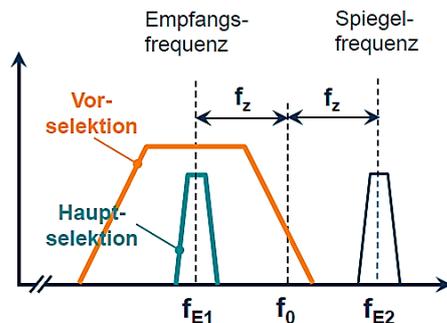


Abb. 25: Spiegelfrequenzunterdrückung

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

### 3.3 FM-Demodulation

Um aus einem frequenzmodulierten Signal das niederfrequente Nutzsignal zu gewinnen, wird die FM zunächst in ein amplitudenmoduliertes Signal umgewandelt und erst danach demoduliert. Im einfachsten Fall erbringt ein Schwingkreis mit Diode diese Leistung. Die dazu benötigte Schaltung wird als *Flankendiskriminator* bezeichnet.

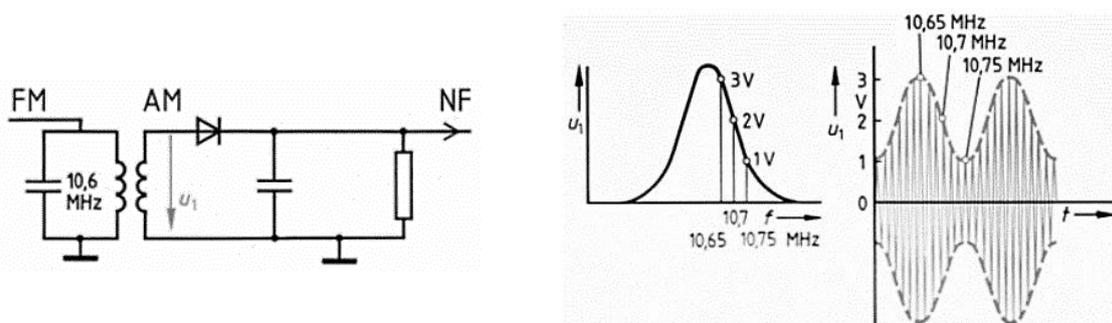


Abb. 26: Umformung einer FM in ein amplitudenmoduliertes Signal<sup>29</sup>

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 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 Einweggleichrichter (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 hier z.B. ein *Ratiodetektor*. Nach dem Demodulator wird das Nutzsignal dem NF-Verstärker zur weiteren Verarbeitung zugeführt.

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



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)

### **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/>