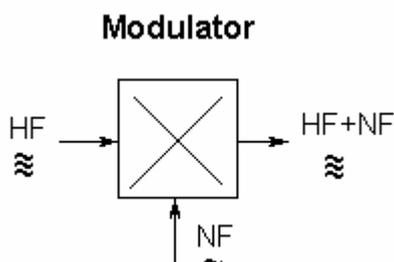
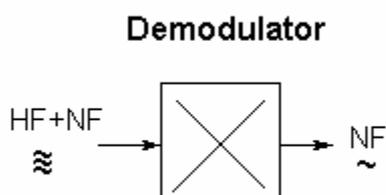


Modulation, Demodulation

Unter Modulation versteht man das Verbinden von Information (Sprache, NF, Daten, etc.) mit einem hochfrequenten Signal, mit dem Träger.



Demodulation ist das umgekehrte Verfahren, nämlich aus dem modulierten HF-Signal die Information wieder zurückzugewinnen.

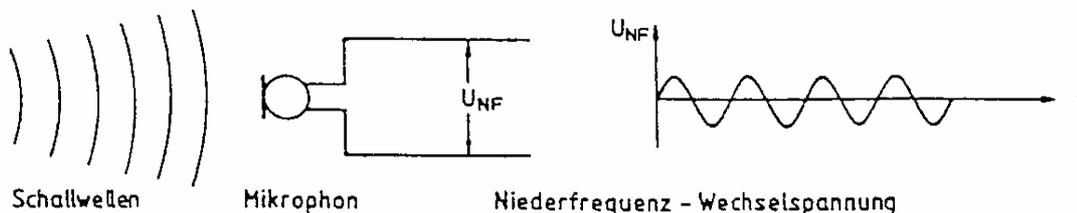


Im Amateurfunk häufig angewandte Modulationen:

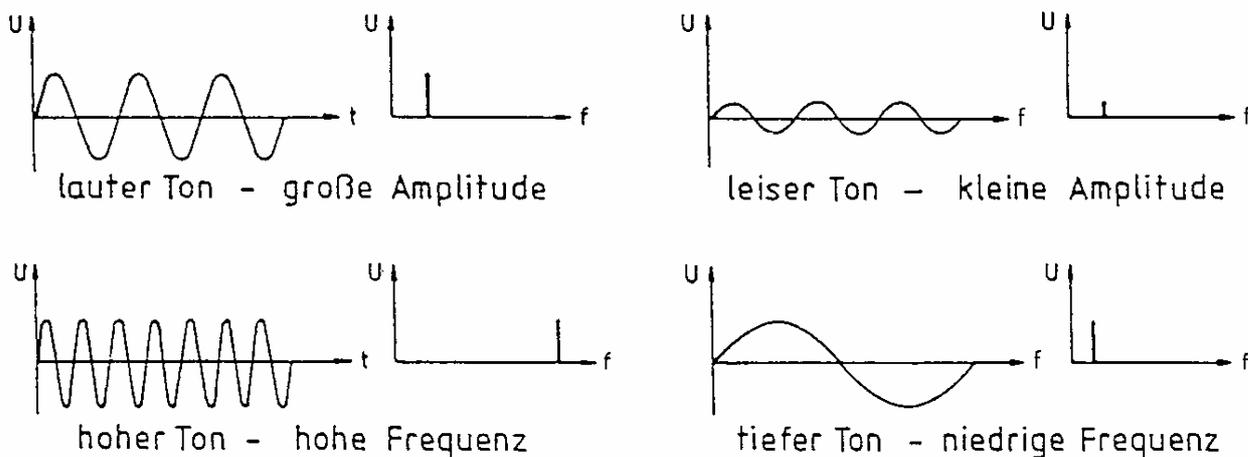
- | | | | | |
|---------------------------|-----|--------|--|------------|
| • Amplitudenmodulation | A3E | (AM) | A mplitude M odulation | (veraltet) |
| • Telegrafie | A1A | (CW) | C ontinuous W ave | |
| • Einseitenbandmodulation | J3E | (SSB) | S ingle S ide B and | |
| • Frequenzmodulation | F3E | (FM) | F requency M odulation | |
| • Frequenzumtastung | F1B | (FSK) | F requency S hift K eying | |
| • Audiofrequenzumtastung | F2A | (AFSK) | A udio F requency S hift K eying | |
| • | | | | |

Die modulierende NF-Wechselspannung

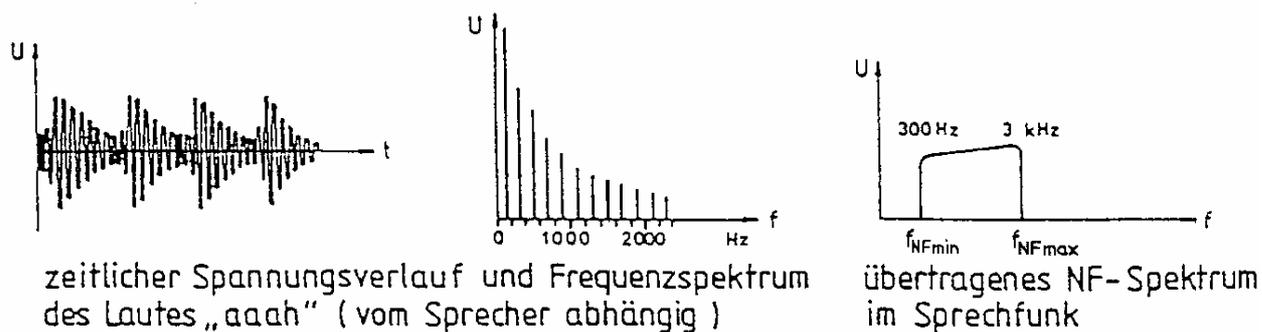
UMWANDLUNG VON SCHALLSCHWINGUNGEN IN EINE WECHSELSPANNUNG



EIGENSCHAFTEN VON NF-SINUSTÖNEN



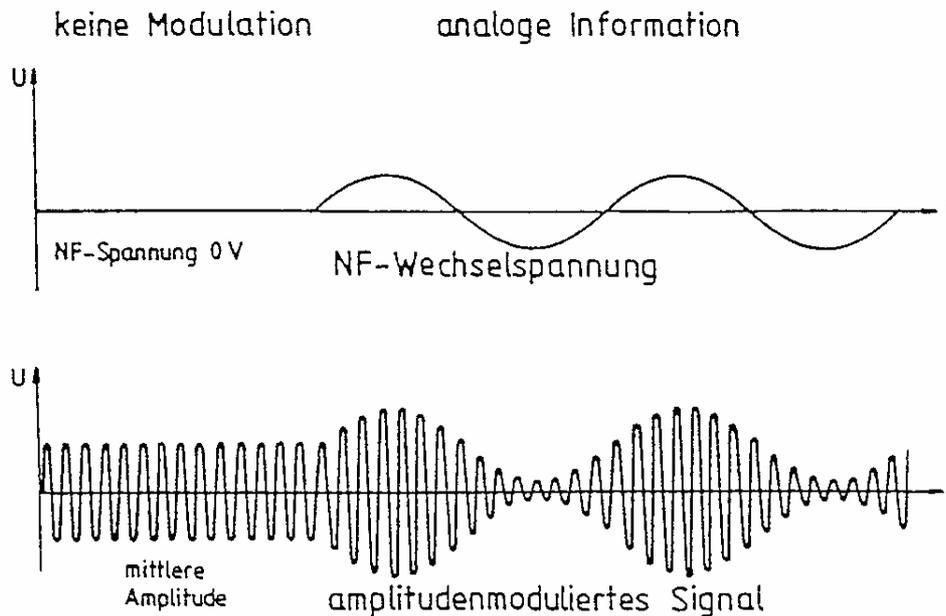
NF-WECHSELSPANNUNG BEI SPRACHE



MORSEZEICHEN ALS DIGITALE INFORMATION



Amplitudenmodulation "AM" (neu: A3E)



- Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude (→Höhe der HF-Spannung) des Trägersignals nach der modulierenden NF-Wechselspannung verändert.
- Die Frequenz des Trägers (f_T) bleibt konstant.
- Die Kurve der Amplitudenspitzen der modulierten HF-Schwingung nennt man Hüllkurve.
- Die Information (NF) steckt in der Hüllkurve.

Anwendung von AM:

früher: - Sprechfunk bei Amateur-, Betriebs- und sonstigen Funkdiensten
- Fernsteuerungen, Personenrufanlagen

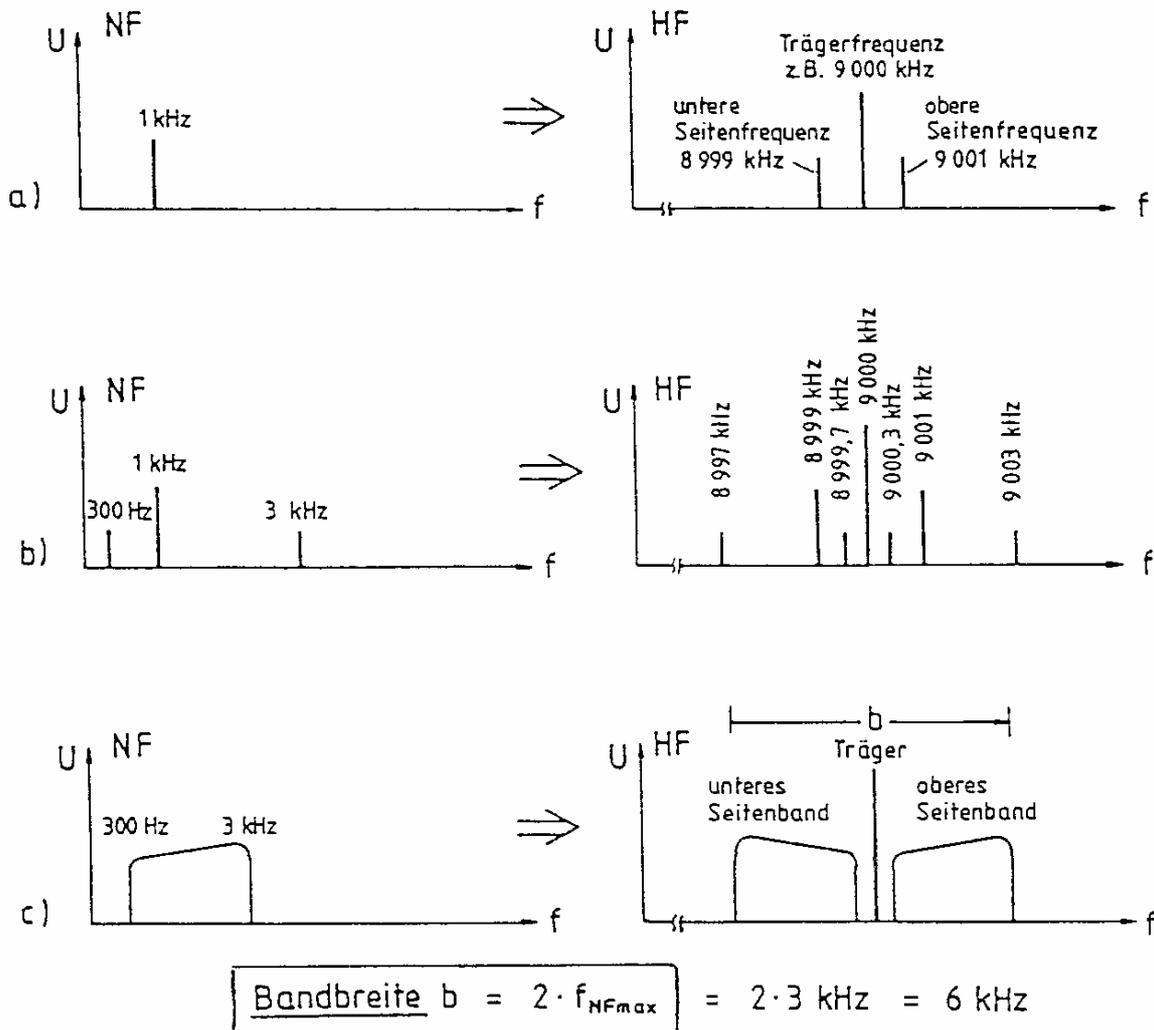
noch heute: - Sprechfunk im Flugfunk
- LW-, MW- und KW-Rundfunk
- TV-Rundfunk (spezielle Art von AM)

Vor- und Nachteile von AM:

Vorteile: - sehr leicht zu demodulieren
- geringe HF-Bandbreite

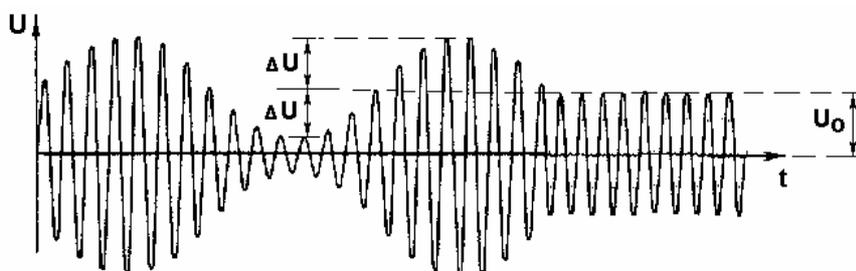
Nachteile: - sehr anfällig gegen Funkenstörungen (Zündfunken, Lichtschalter, Blitz, etc.)
- aufwendige Modulatoren und Sendeendstufen (Linearität)

HF-Spektrum und Bandbreite bei AM:



Größe der NF-Amplitude (Lautstärke) bei AM:

Als Größe für die Lautstärke bei AM steht der Modulationsgrad "M". Er gibt an, wie groß die Änderung der HF-Amplitude ist, bezogen auf die unmodulierte HF-Schwingung.



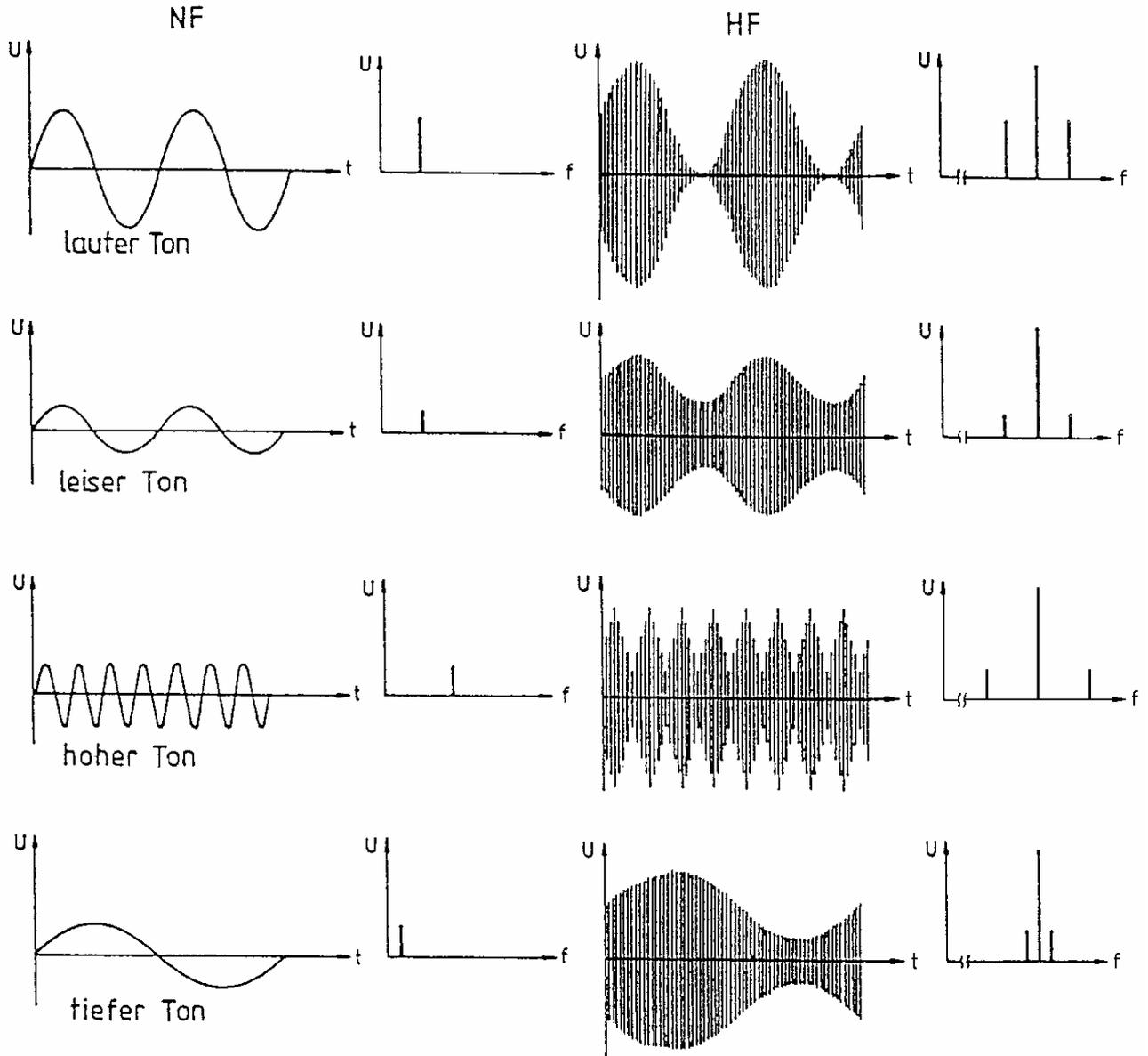
$$M_{[\%]} = 100 \cdot \frac{\Delta U}{U_0}$$

- U_0 = Amplitude der unmodulierten HF-Schwingung
- ΔU = Änderung der HF-Amplitude bei Modulation

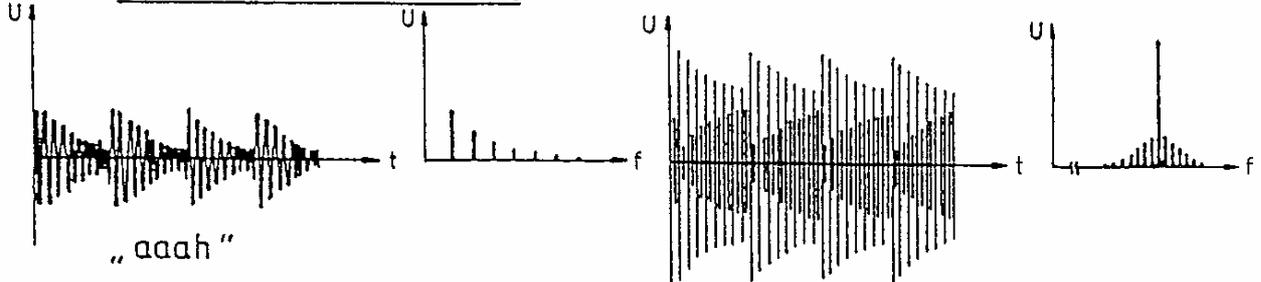
M kann bei normaler Aussteuerung maximal einen Wert von 100% erreichen. Wird der AM-Sender übersteuert ($M > 100\%$), ergeben sich "Trägerlücken" mit der Folge von Verzerrungen in der Modulation und HF-Störprodukten in der Ausstrahlung.

Eigenschaften von AM

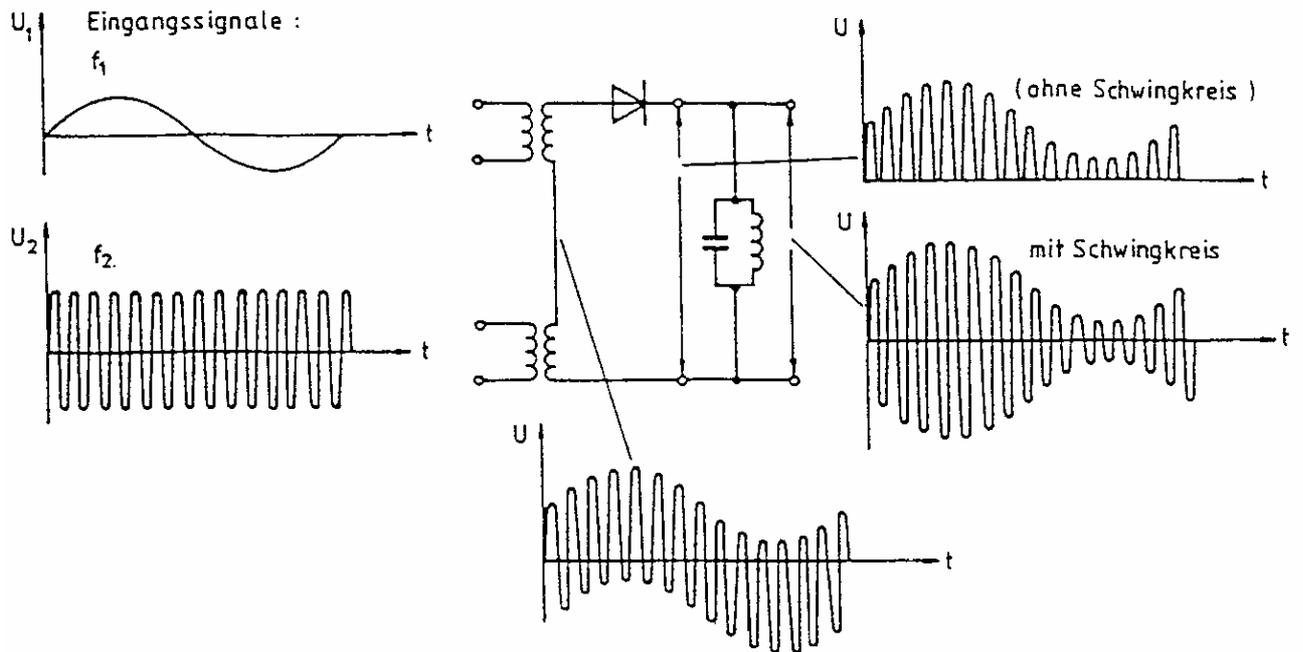
MODULATION MIT EINEM SINUSTON



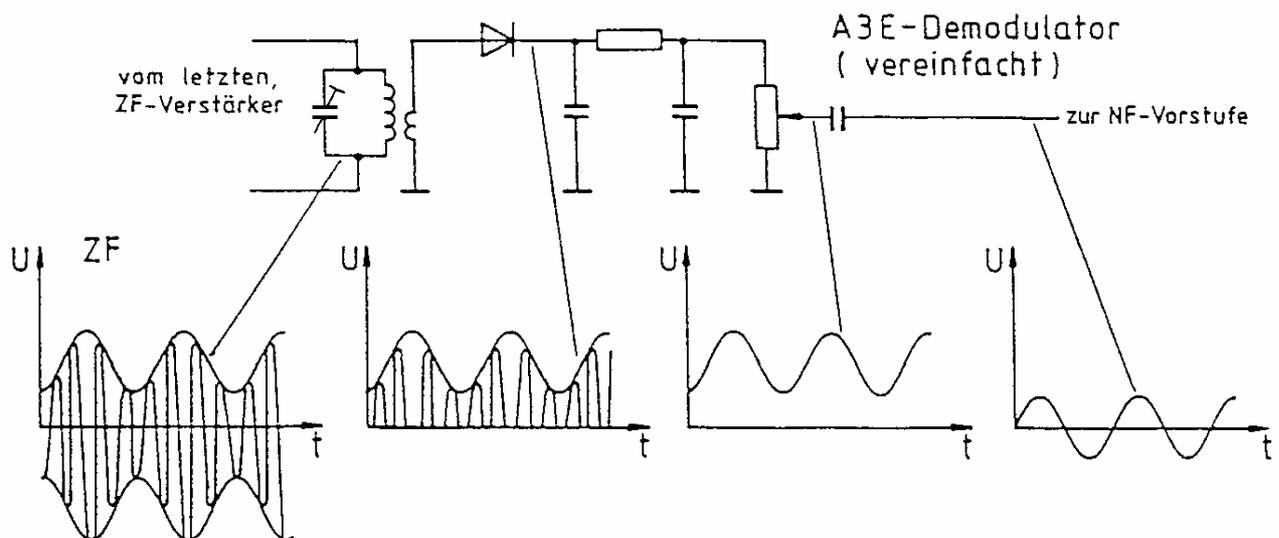
MODULATION MIT SPRACHE



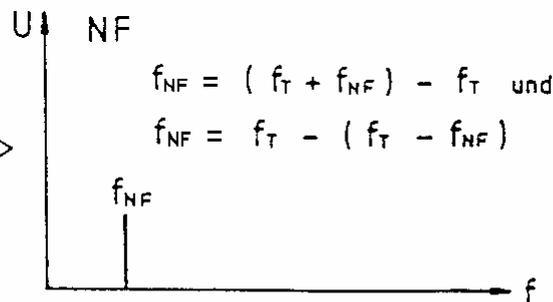
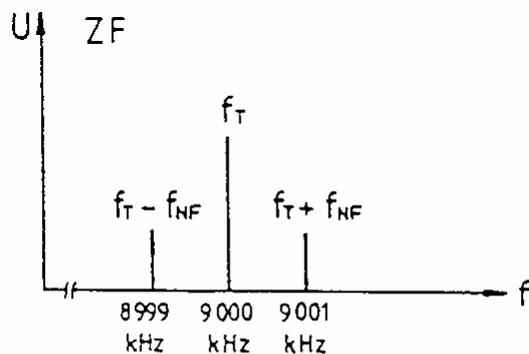
AM-Erzeugung (Modulation)



NF-Rückgewinnung (Demodulation)



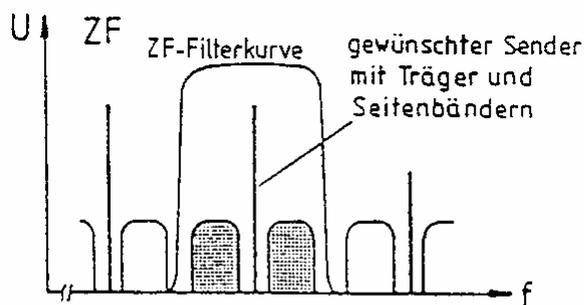
Bandbreite (ZF-Bandbreite) eines AM-Empfängers



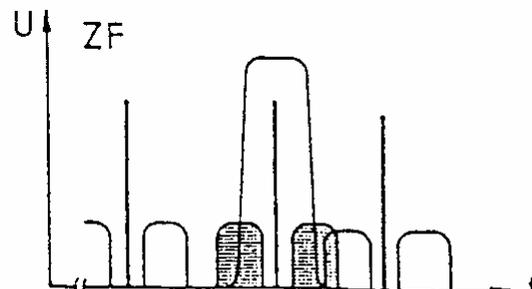
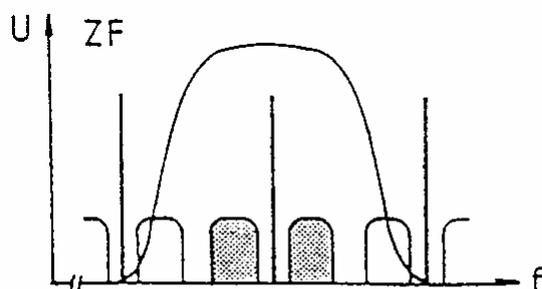
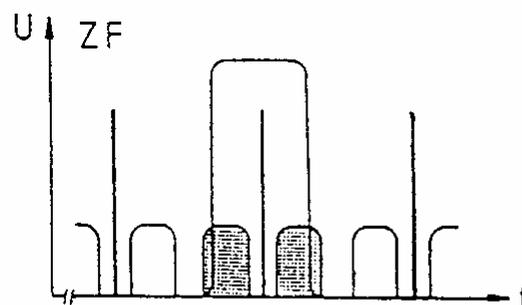
$f_{NF} = 9001 \text{ kHz} - 9000 \text{ kHz} = 1 \text{ kHz}$

$f_{NF} = 9000 \text{ kHz} - 8999 \text{ kHz} = 1 \text{ kHz}$

A3E - Demodulation im Frequenzspektrum

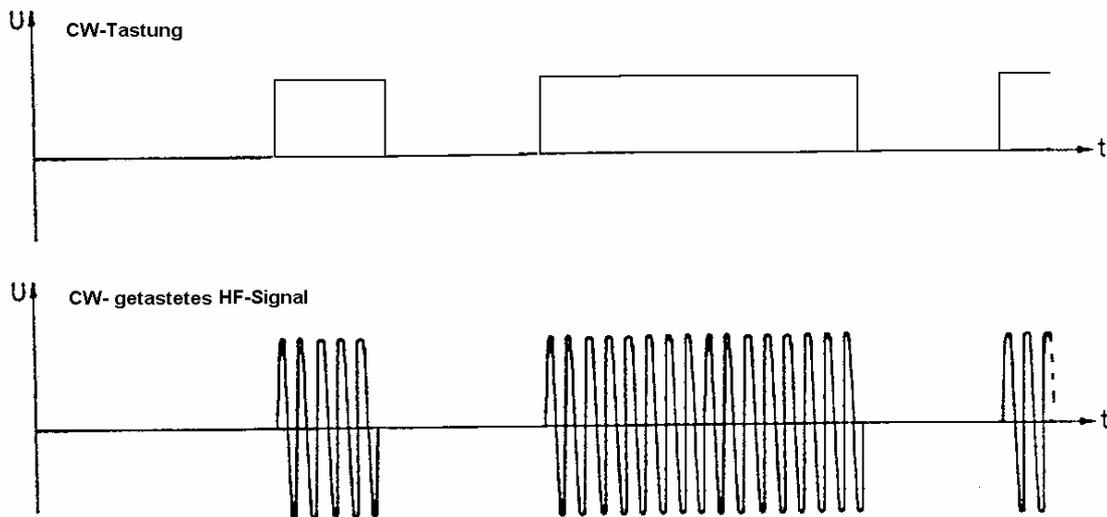


richtige ZF-Bandbreite
 $b = 2 \cdot f_{NFmax}$
 $b = 2 \cdot 3 \text{ kHz} = 6 \text{ kHz}$



ZF-Bandbreite bei A3E

(Morse-)Telegrafie "CW" (neu: A1A)



- Telegrafie (CW) ist eine einfache Sonderform der Amplitudenmodulation; das Trägersignal wird im Rhythmus der Tastung ein- und ausgeschaltet → Amplitudenmodulation.
- Die Frequenz des Trägers (f_T) bleibt konstant.
- Die Information (Tastung der Morsezeichen) steckt in der Hüllkurve.

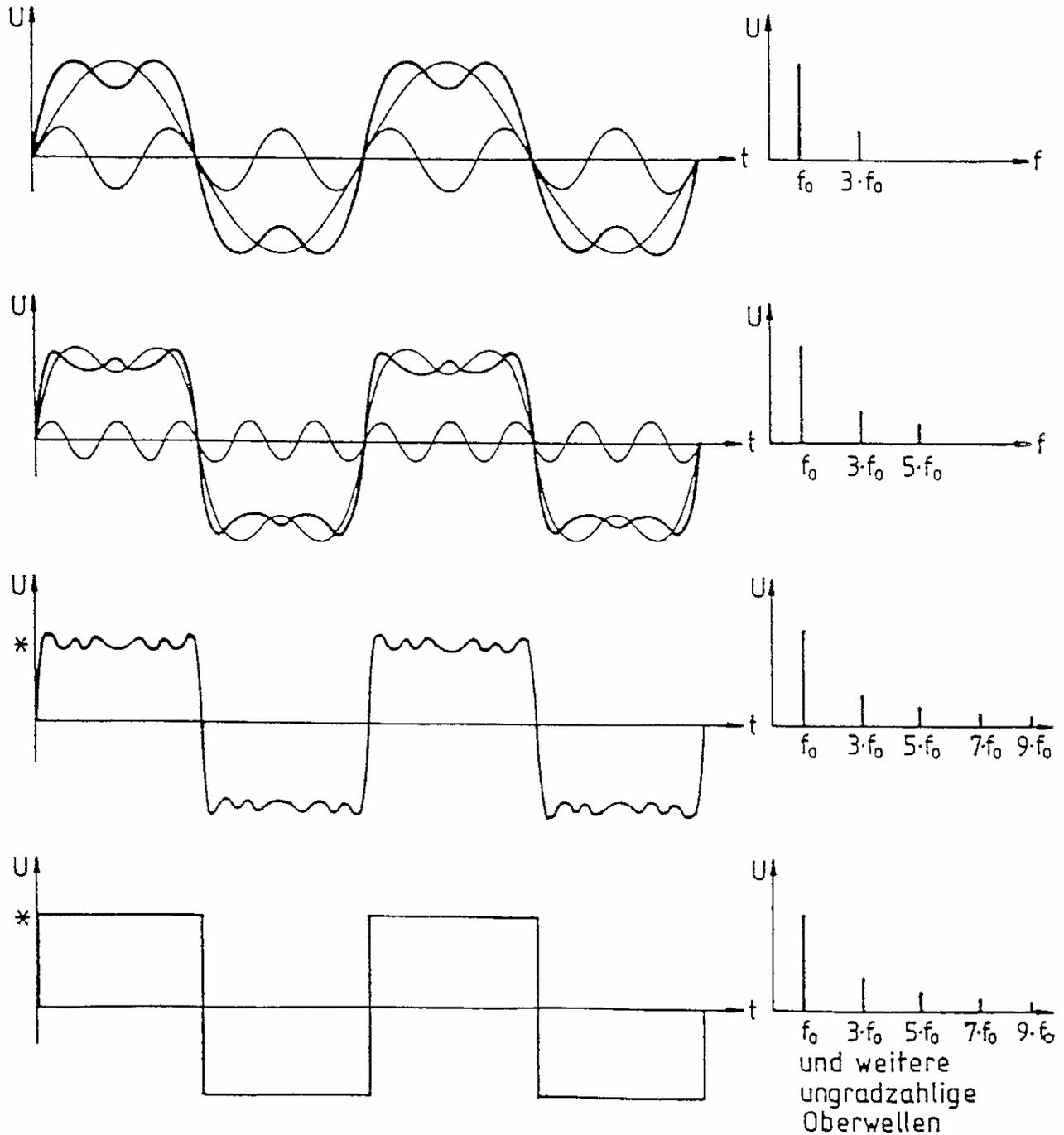
Anwendung von CW:

- früher und heute:
- weltweite Nachrichtenübertragung auf Kurzwelle:
Schifffahrt, Küstenfunkstellen, Botschaften, Nachrichtenagenturen,
...Wetterfunk, Flugfunk, Sicherheitsdienste, etc.
 - Nachrichtenübertragung auf allen Bändern:
Amateurfunk
Notfunk jeglicher Art (!!!)
Identifizierung von Funkbaken (Funkfeuer) im Flug- und Seefunk

Vor- und Nachteile von CW:

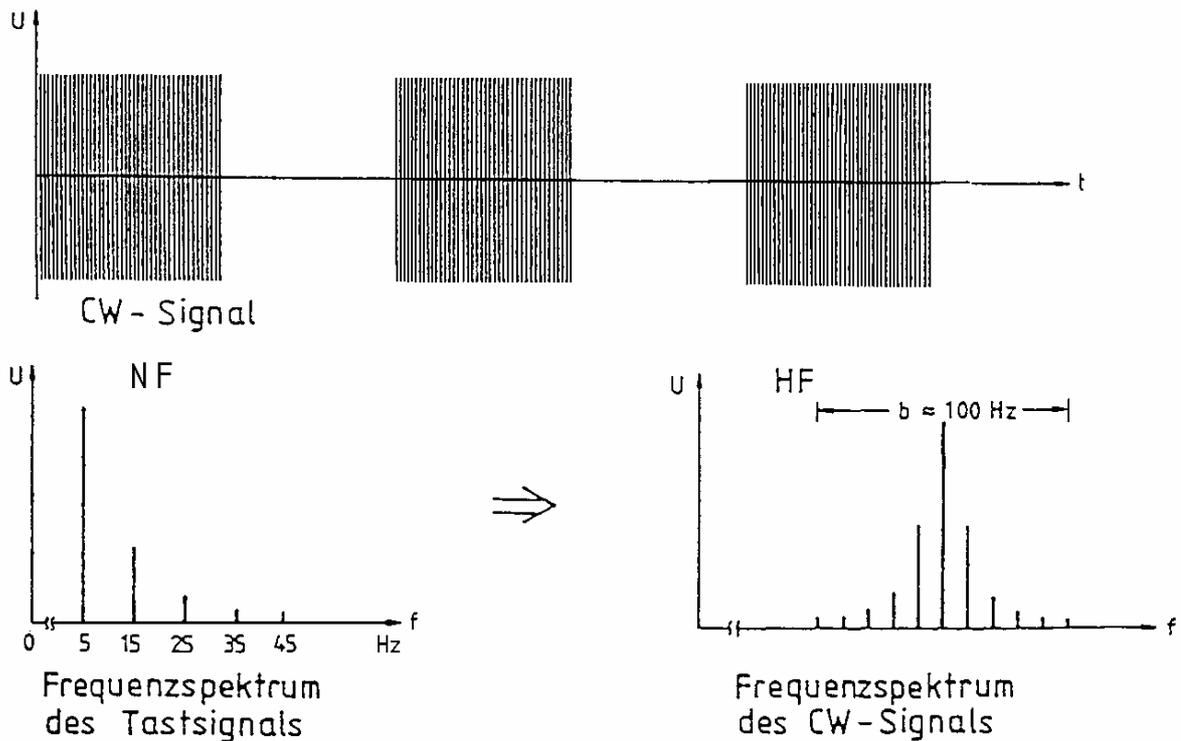
- Vorteile:
- sehr geringe HF-Bandbreite
 - geringer Schaltungsaufwand beim Sender
 - gute Demodulierbarkeit auch bei hohem Rauschanteil (menschliches Ohr !!!)
- Nachteile:
- geringe Übertragungsrate
 - keine Datensicherheit
 - schwierige automatische Textrückgewinnung (per Computer)

Zusammensetzung eines Rechtecksignals aus Grund- und Oberwellen (Harmonischen):
(Bitte gut merken; nicht nur für CW wichtig !!!)

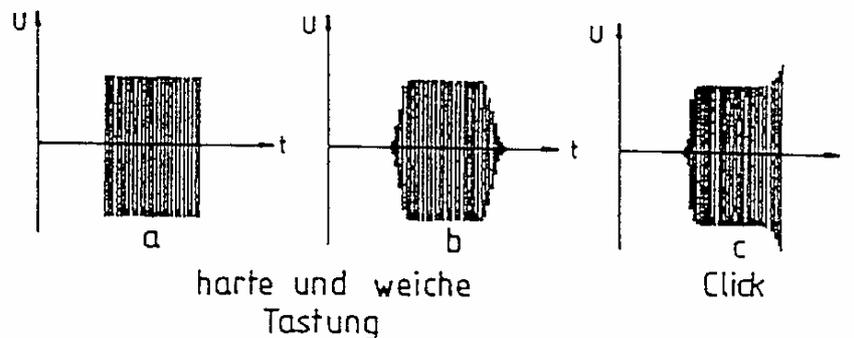


* nur Summensignal dargestellt

HF-Spektrum und Bandbreite bei CW:



Bandbreite abhängig von der Tastgeschwindigkeit und der Zeichenform

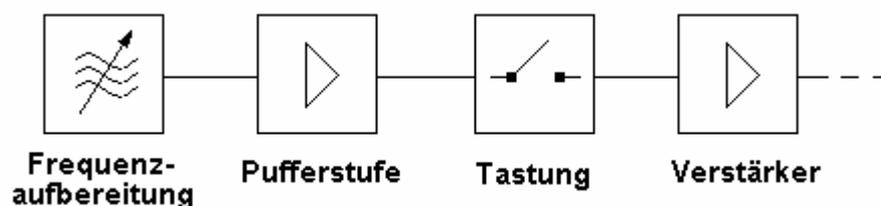


CW-Erzeugung (Modulation)

Die Erzeugung von CW geschieht durch einfaches Ein- und Austasten des Sendesignals.

Dabei ist zu bemerken, daß nicht der gesamte Sender getastet werden soll, sondern eine Stufe **nach** der Frequenzaufbereitung. Jeder Oszillator (PLL, VFO, etc.) hat eine gewisse Einschwingzeit (Zeit von Einschalten bis die endgültige Frequenz erzeugt wird). Würde der Oszillator mitgetastet, müßte dieser bei jedem Zeichen erneut einschwingen, was sich auf der Empfängerseite in einem "Singen" oder "Vogelgezwitscher" (chirp) bemerkbar macht.

Richtige Positionierung der Taststufe:



Zeichen-Rückgewinnung (Demodulation)

Da ein CW-Signal - im HF-Frequenzspektrum betrachtet - nur ein ein- und ausgetastetes HF-Signal (Träger) ist, würde eine einfache AM-Demodulation nichts Sinnvolles ergeben.

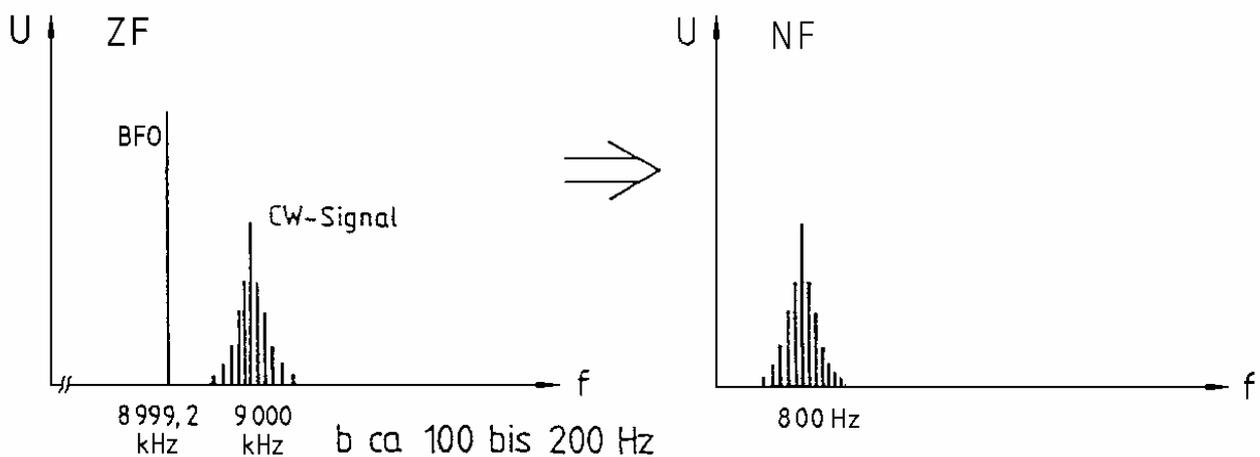
Bei der CW-Demodulation benötigt man einen hochfrequenten "Hilfsträger".

Dieser Hilfsträger wird in einem Frequenzabstand von ca. 800Hz neben dem eigentlichen CW-Signal gesetzt und stellt für die CW-Demodulation einen ähnlichen Träger dar, wie der Träger bei AM oder SSB.

Das Hilfsträger-Signal wird von einem zusätzlichen Oszillator (BFO - Beat Frequency Oscillator) im Empfänger erzeugt und liegt ständig an.

Erscheint ein CW-Signal, so wird es mit dem Signal des Hilfsträgers überlagert (gemischt):

Ergebnis: Ein mit der Differenzfrequenz (800Hz) modulierte AM-Signal (mit nur einem Seitenband). Dieses wird dann mit Hilfe eines AM-Demodulators demoduliert; die CW-Zeichen erscheinen als Pieptöne mit einer Frequenz von 800Hz..



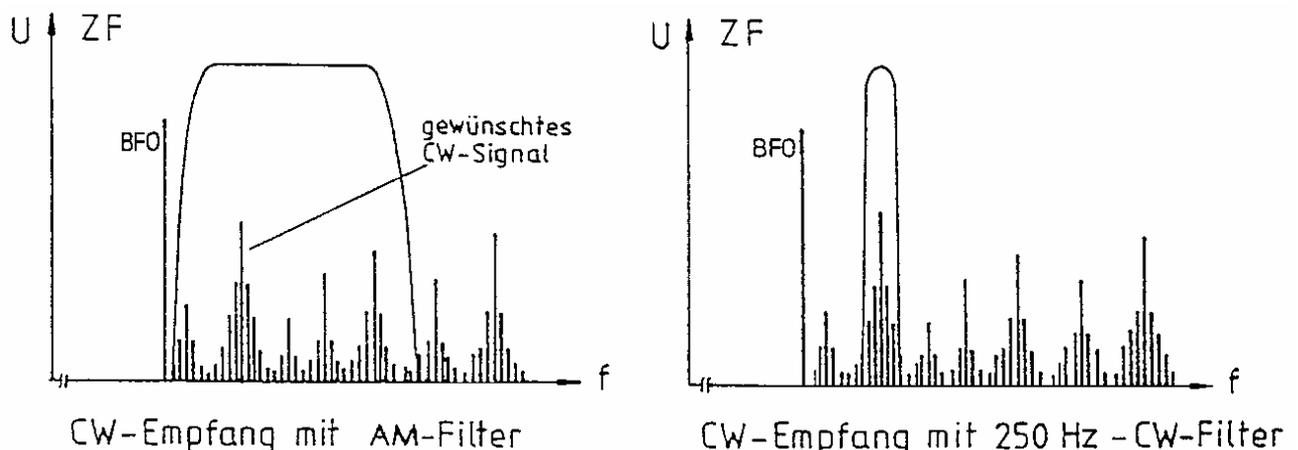
Bandbreite (ZF-Bandbreite) eines CW-Empfängers

Wird ein CW-Signal nach Zusetzen eines BFO-Signals zu einem AM-Signal gemacht, kann es mit einem normalen AM-Demodulator empfangen (demoduliert) werden.

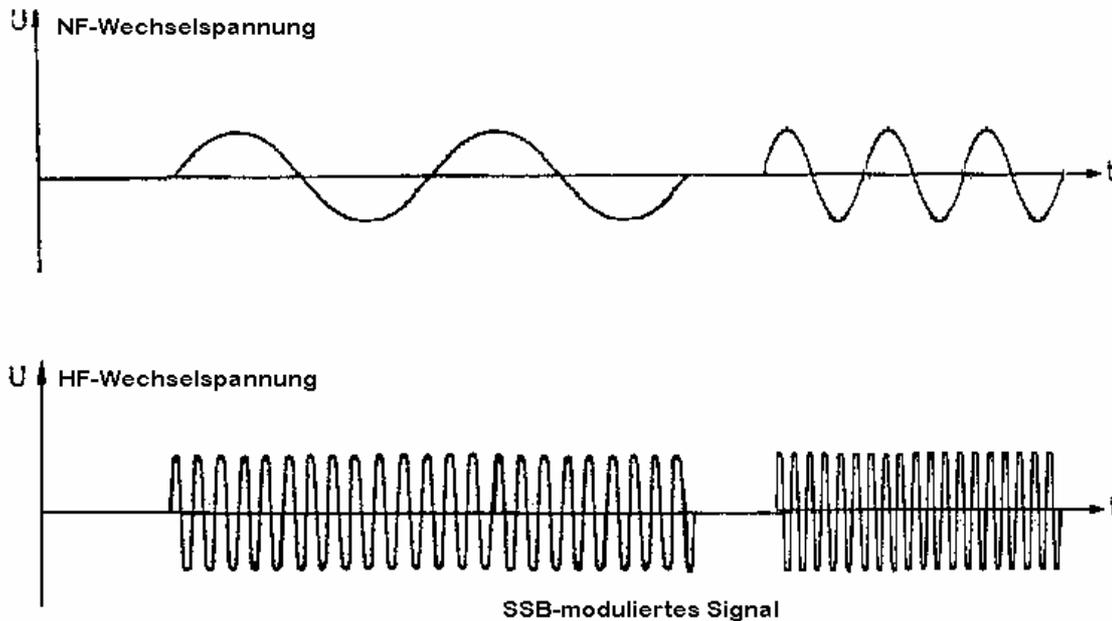
Hierbei ist nur zu beachten, daß durch die geringe Bandbreite eines CW-Signals leicht mehrere CW-Signale in die ZF-Bandbreite des AM-Demodulators "passen", die allesamt demoduliert werden und so das gewünschte Signal nur schwer erkennbar wird. Abhilfe: schmales CW-Filter.

Problem

Abhilfe



Einseitenband-Modulation **“SSB“** (neu: J3E)
(Single Side Band)



- Einseitenband-Modulation (SSB) ist eine weitere Sonderform der Amplitudenmodulation; ein SSB-Signal es ist ein Teil des Frequenzspektrums eines AM-Signals.
- SSB enthält keinen Träger, nur die Modulationsteile werde übertragen.

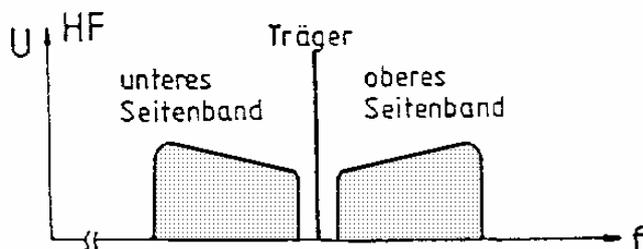
Anwendung von SSB:

- früher und heute:
- weltweite Sprechfunkübertragung auf Kurzwelle:
Schifffahrt, Küstenfunkstellen, Telefonverbindungen (auslaufend)
Wetterfunk, Flugfunk, Sicherheitsdienste, etc.
 - Sprechfunkübertragung auf allen Bändern:
Amateurfunk

Vor- und Nachteile von SSB:

- Vorteile:
- geringe HF-Bandbreite
 - hoher Wirkungsgrad
- Nachteile:
- anfällig gegen Funkenstörungen (Zündfunken, Lichtschalter, Blitz, etc.)
 - aufwendige Modulatoren/Demodulatoren und Endstufen (Linearität)
 - nur subjektiver Frequenzbezug (manuelle Einstellung am RX nötig)

Was ist SSB ?



Ein AM-Signal besteht aus einem Träger und zwei Seitenbändern.

Der Träger selbst hat keinen Informationsgehalt, er dient nur als Frequenzbezug.

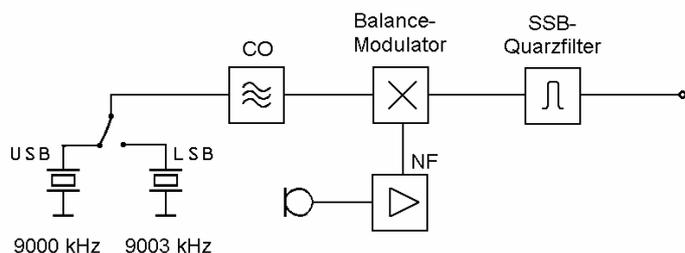
Die Seitenbänder enthalten beide dieselbe Information (NF); sind lediglich in der Frequenzachse gespiegelt.

Zur Übertragung der Information (NF) genügt es aber, nur ein Seitenband zu übertragen.

Dies hat neben der geringeren Bandbreite (von ca. 2,7 kHz gegenüber ca. 6 kHz bei AM) noch den großen Vorteil, daß man die gesamte Leistung des TX für ein Seitenband nutzen kann (bei AM, $M=100\%$ ist die Amplitude der Seitenbänder nur halb so groß wie die des Trägers. Die Leistung eines Seitenbandes ist also nur 25% von der des Trägers. Damit teilt sich die Gesamtleistung wie folgt auf: 66,7% Träger + 16,7% je Seitenband).

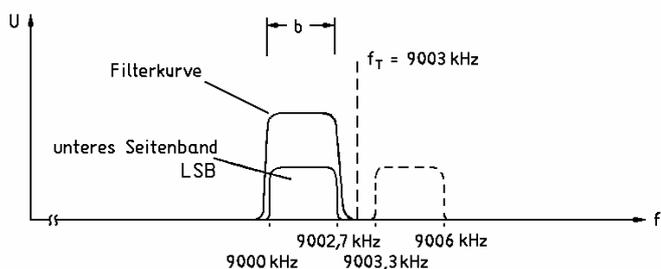
→ Bei der SSB-Übertragung erhält man einen 6-fachen Wirkungsgrad, verglichen mit AM.

Erzeugung eines SSB-Signals:

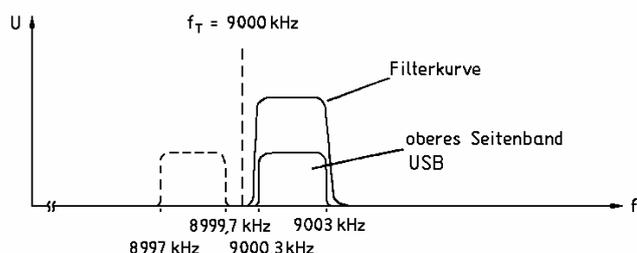


Zuerst wird mit Hilfe eines Balance-Modulators aus einem Oszillatorsignal und der NF ein Doppelseitenband-Signal (wie AM, nur ohne Träger) erzeugt.

Mit einem sehr schmalen Quarzfilter wird das gewünschte Seitenband herausgefiltert.



Erzeugung des unteren Seitenbandes (LSB)



Erzeugung des oberen Seitenbandes (USB)

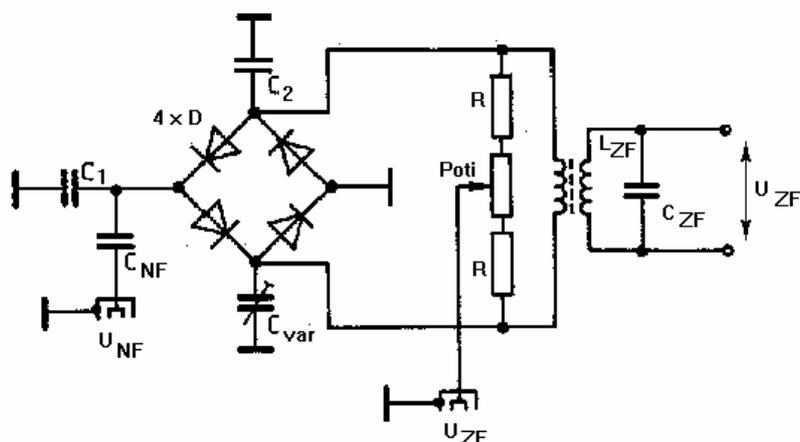
Seitenbandwahl:

Die meisten KW-Sender sind nach der sogenannten Ein-Filter-Methode aufgebaut.

Schaltet man die Oszillatorfrequenz um 3 kHz um, so erscheint nach dem Balance-Modulator einmal das untere Seitenband (LSB, lower side band) und einmal das obere Seitenband (USB, upper side band) innerhalb des Seitenbandfilters.

So kann ein Filter mit fester Filterkurve für beide Seitenbänder verwendet werden.

Erzeugung eines DSB-Signals (Balance-Modulator)



Das Oszillatorsignal (U_{ZF}) wird durch $2 \times R$ und einem Poti symmetriert und auf den Diodenring gegeben.

Die Dioden sind als Ring geschaltet (nicht mit Brückengleichrichter-Schaltung verwechseln !)

C_1 ist für die f_{ZF} sehr niederohmig, so daß der NF-Einspeisepunkt für f_{ZF} auf Masse liegt; für f_{NF} ist C_1 nicht vorhanden.

Mit C_2 und C_{var} wird der Diodenring symmetriert.

Wenn $U_{NF}=0$, wird die U_{ZF} auf die Dioden gleichmäßig verteilt, in allen Dioden fließt der gleiche Strom, es herrscht ein elektrisches Gleichgewicht

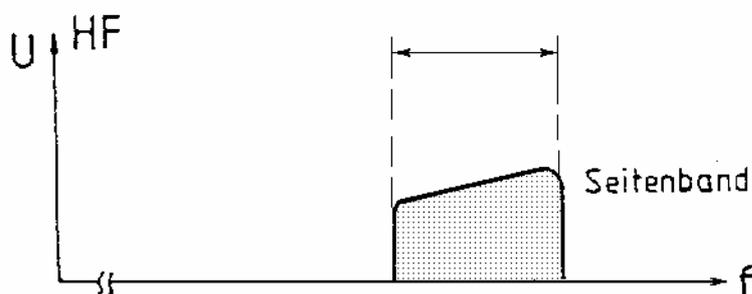
→ Keine Spannungsdifferenz am ZF-Übertrager → Kein Signal am ZF-Ausgang

Wenn $U_{NF} \ll 0$, wird das Gleichgewicht "gestört", es fließen in den Dioden ungleiche Ströme

→ Spannungsdifferenz am ZF-Übertrager → Signal am ZF-Ausgang

Resultat: Am Ausgang des Balance-Modulators erscheint eine von der NF gesteuerte ZF, ein DSB-Signal (Spektrum wie AM nur mit unterdrücktem Träger)

Spektrum, Bandbreite eines SSB-Signals



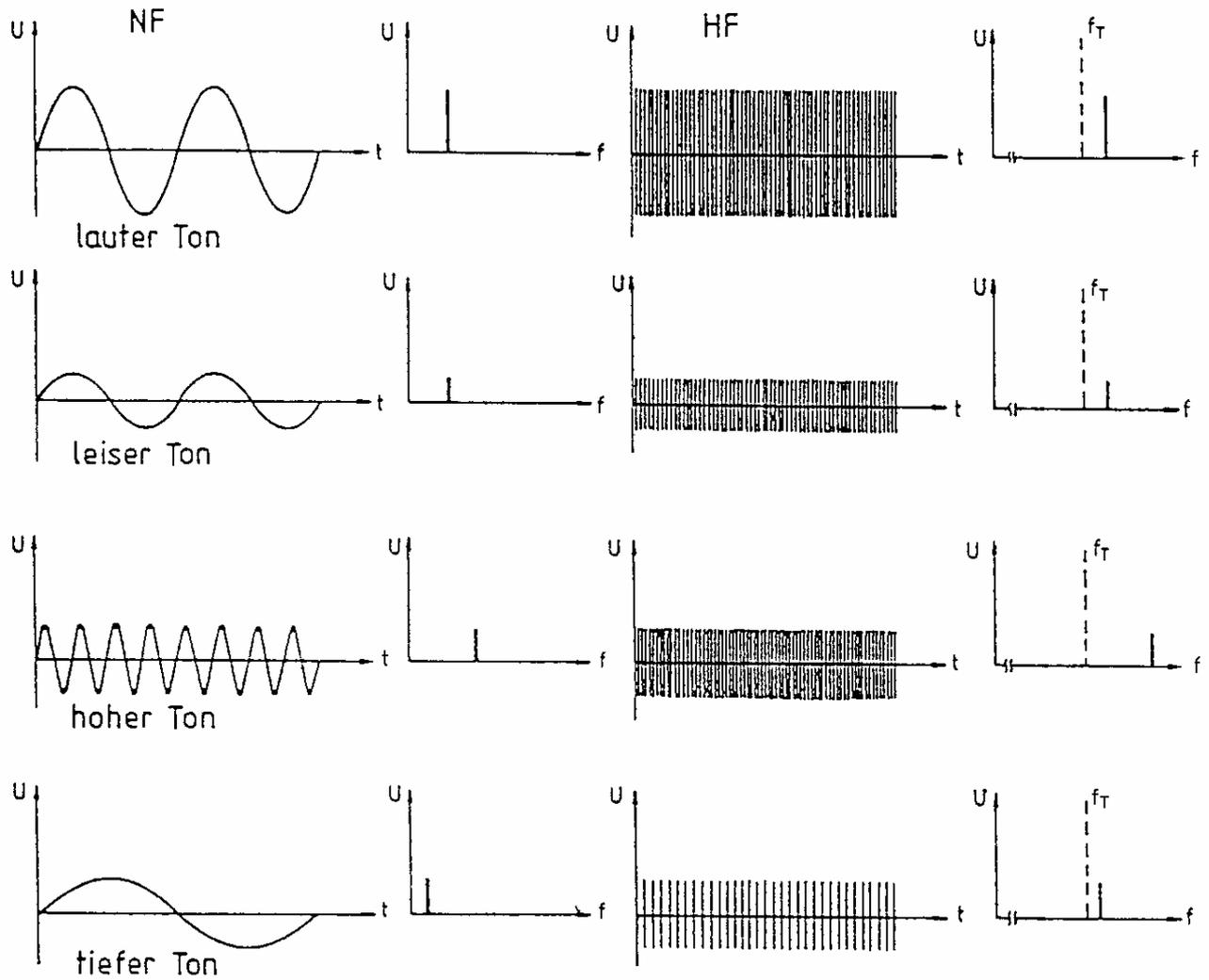
Ein USB-Signal ist in der HF-Ebene vergleichbar mit einem NF-Signal, welches um die Trägerfrequenz nach oben in den HF-Bereich verschoben wurde (USB).

Ein LSB-Signal ist zusätzlich noch in der Frequenzlage gespiegelt (niedrige NF-Frequenzen erscheinen im HF-Spektrum höher und höhere NF-Frequenzen niedriger)

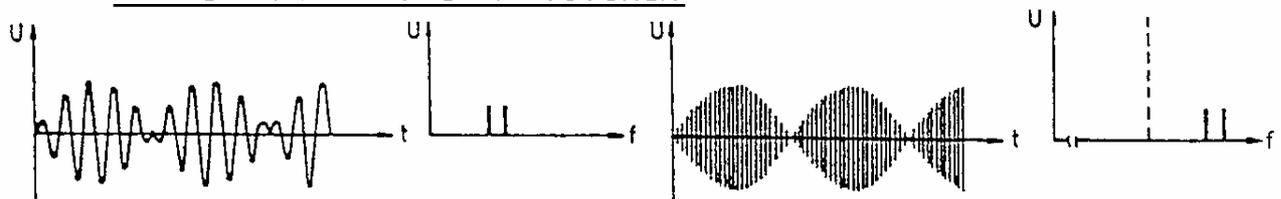
Die Trägerfrequenz ist im Spektrum nicht vorhanden → ein SSB(LSB oder USB)-Signal hat keinen definierten Frequenzbezug.

Eigenschaften von SSB

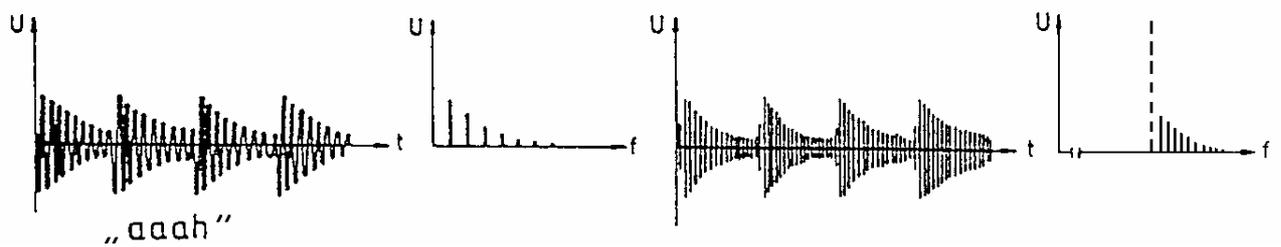
MODULATION MIT EINEM SINUSTON



MODULATION MIT ZWEI SINUSTÖNEN



MODULATION MIT SPRACHE

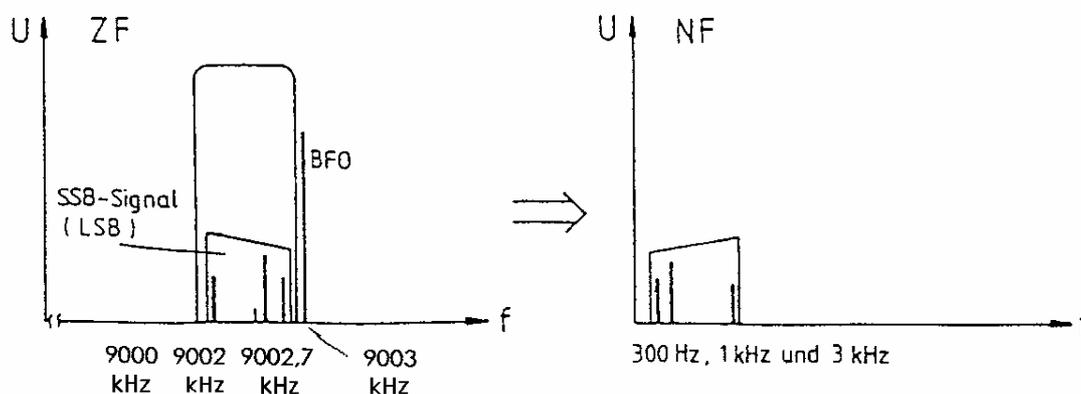
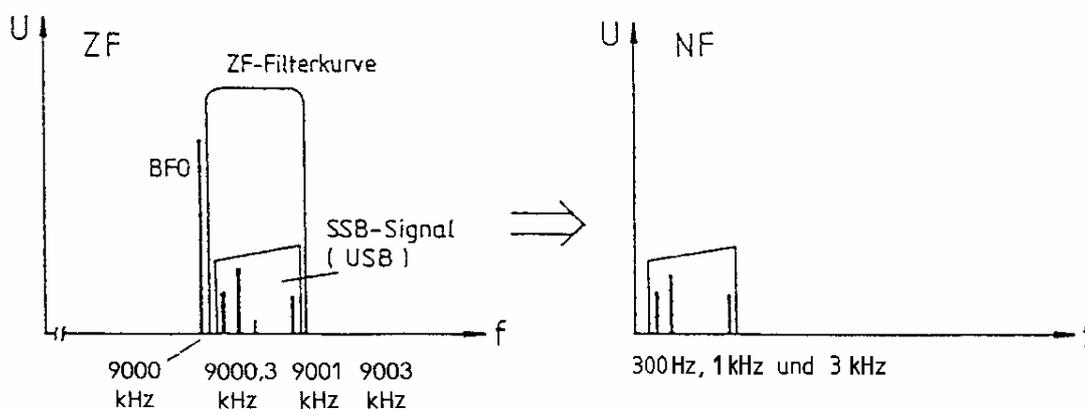
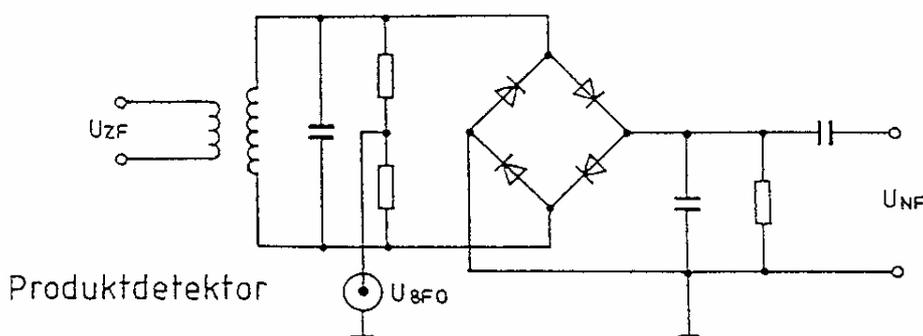
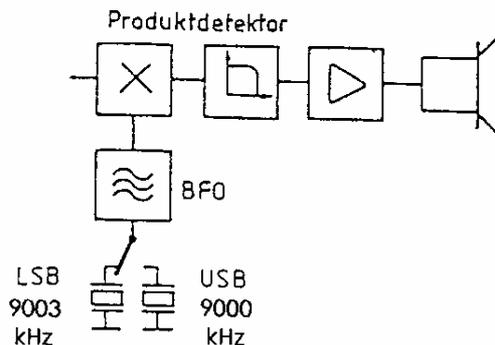


NF-Rückgewinnung (Demodulation)

Da ein SSB-Signal keinen Träger beinhaltet und damit keinen Frequenzbezug hat, muß zur Demodulation der NF wieder ein Träger zugesetzt werden. Dies geschieht mit einem Überlagerungsoszillator "BFO" (Beat-Frequency-Oszillator);

Das ZF- und das BFO-Signal werden in einem Produkt-detektor (ähnlich dem Balance-Modulator) zusammengesetzt (gemischt);

Am Ausgang des Produktdetektors liegt die demodulierte NF an.



Demodulation eines SSB - Signals bestehend aus 3 NF-Tönen

Regelspannung (bei AM, CW, SSB)

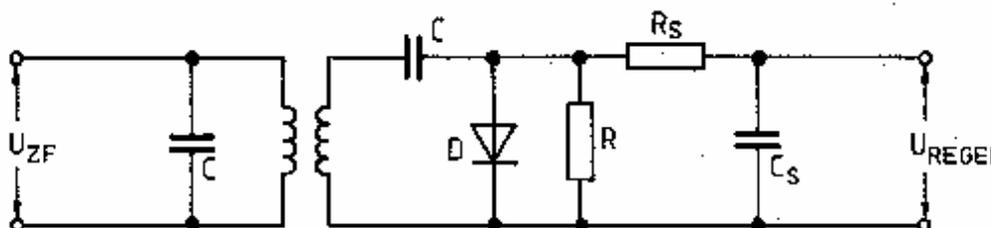
engl. "AGC" Automatic Gain Control

Bei einem AM-, SSB- oder CW-Empfänger hängt die Lautstärke des demodulierten Signals von der Höhe des empfangenen HF-Signals ab. Um eine relativ gleichmäßige Empfangslautstärke zu erhalten, müssen im RX einige Verstärkerstufen bei schwachen Empfangssignalen "aufgeregelt" und bei starken Signalen "abgeregelt" werden.

Wäre dies nicht der Fall, würde man schwache Signale nicht empfangen und starke Signale würden den RX übersteuern (NF-Verzerrungen).

Eine spezielle Schaltung (AGC) mißt die Größe des demodulierten Signals und regelt die HF- und ZF-Verstärkerstufen auf das optimale Maß nach.

Schaltung zur Erzeugung der Regelspannung:

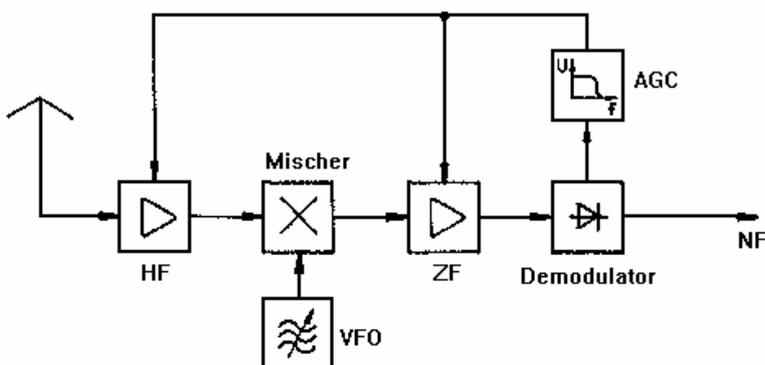


Der Aufbau der Schaltung gleicht der eines AM-Demodulators, bis auf

- negative Polarität der Regelspannung

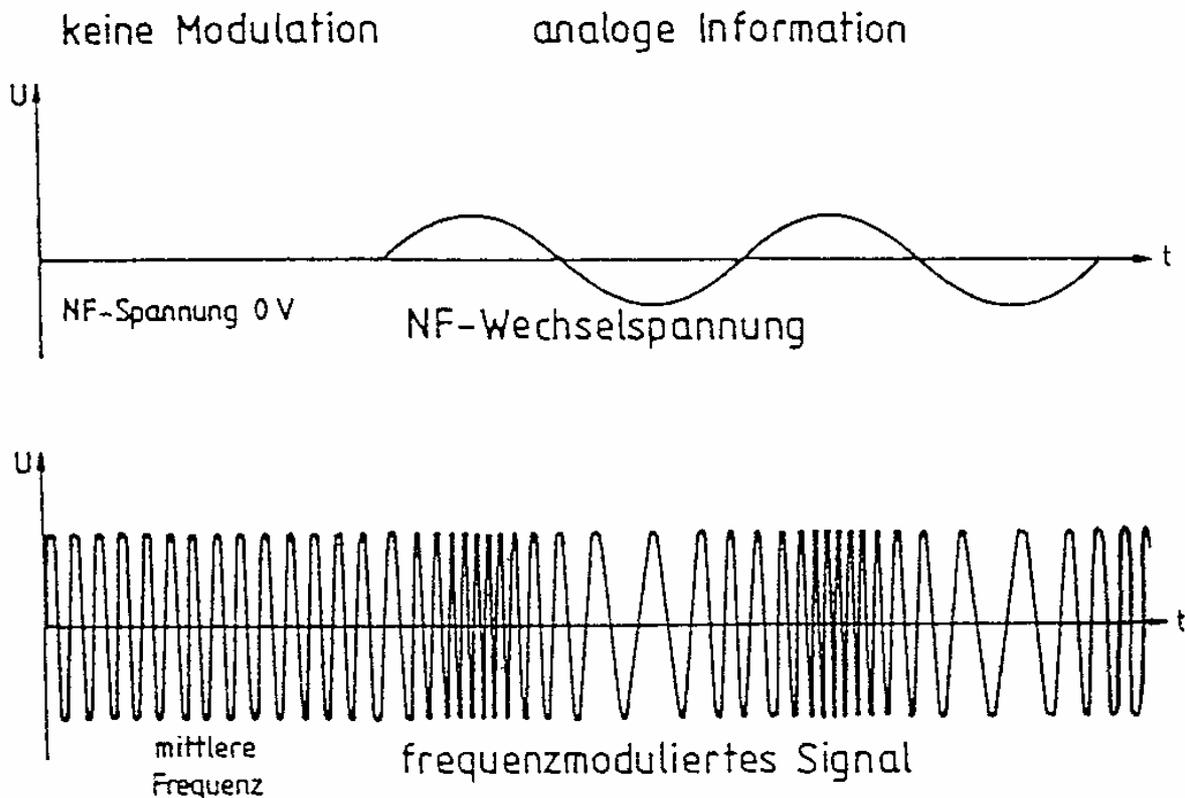
Grund: Alle Spannungspotentiale (Arbeitspunkte) in Verstärkerstufen sind positiv. Um bei starken Signalen eine Verstärkungsabnahme bzw. bei schwachen Signalen eine -zunahme zu erzielen (gegenläufige Regelung), verwendet man entgegengesetzte Polarität.

- wesentlich größere Zeitkonstante (niedrigere Grenzfrequenz) des Tiefpasses aus R_S/C_S
Grund: In Sprachpausen (SSB) oder Pausen zwischen CW-Zeichen würde der RX (aufgrund des dann fehlenden Signals) schnell "aufregeln", was zu einem unangenehmen Ansteigen des Rauschens führen würde. Diesen Effekt vermeidet man mit einer größeren Zeitkonstante; d.h. der RX regelt dann langsamer auf.



Die Regelspannung wird nach der Demodulation (durch den Produktdetektor) erzeugt und allen geregelten HF- und ZF-Verstärkerstufen zugeführt.

Frequenzmodulation "FM" (neu: F3E)



- Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz des Trägersignals nach der modulierenden NF-Wechselspannung verändert.
- Die Amplitude des Trägers (f_T) bleibt konstant.
- Die Information (NF) steckt in der Frequenzänderung.

Anwendung von FM:

- Sprechfunk bei Amateur-, Betriebs- und sonstigen Funkdiensten
- Fernsteuerungen, Personenrufanlagen
- UKW-Rundfunk, Tonträger bei TV-Rundfunk
- TV-Rundfunk (Bildübertragung) via Satellit und Amateurfunk-TV

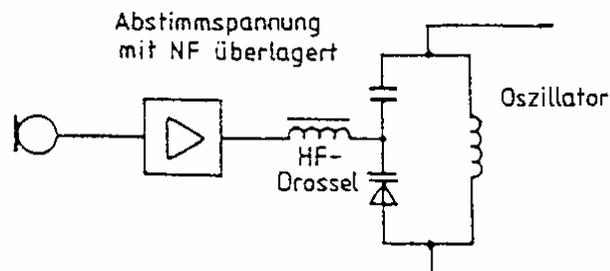
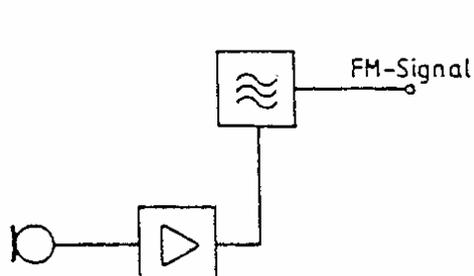
Vor- und Nachteile von FM:

- Vorteile:
- einfache Modulatoren und Senderendstufen (keine Linearität erforderlich)
 - relativ unanfällig gegen Funkenstörungen (Zündfunken, Blitz, etc.)
 - geringere Leistung nötig (für gleichen Störabstand)

- Nachteile:
- große HF-Bandbreite
 - aufwendige Demodulationsschaltungen (früher)

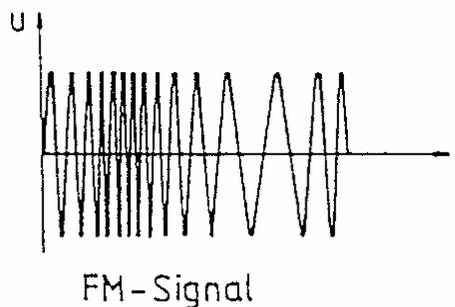
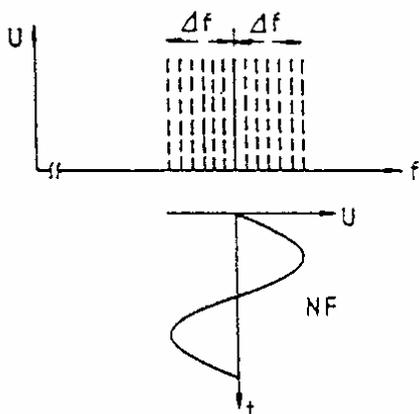
FM-Erzeugung (Modulation)

Bei der Frequenzmodulation wird die Trägerfrequenz abhängig von der NF-Wechselspannung verändert. Die Modulation geschieht achsensymmetrisch zum Träger; d.h. die Trägerfrequenz wird um denselben Betrag nach unten wie nach oben verändert.



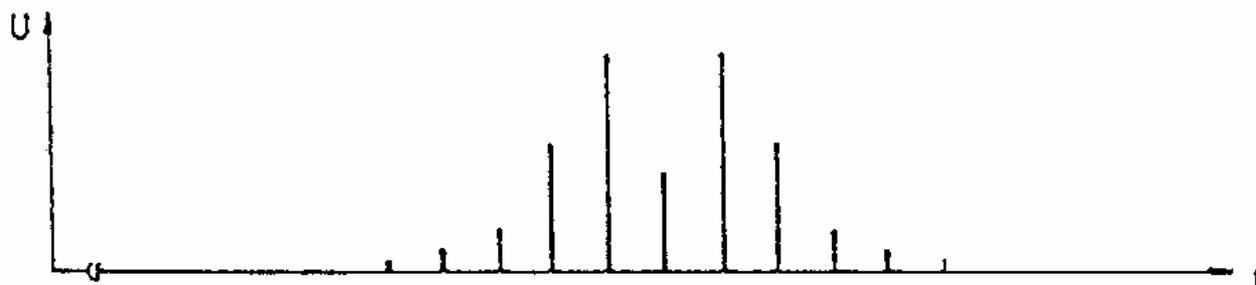
Erzeugung von FM :
Der Oszillator wird moduliert

Die Resonanzfrequenz des VCO-Schwingkreises schwankt im Rhythmus der NF-Wechselspannung



Vereinfachte Vorstellung :
Die Trägerfrequenz schwankt entsprechend der NF-Wechselspannung

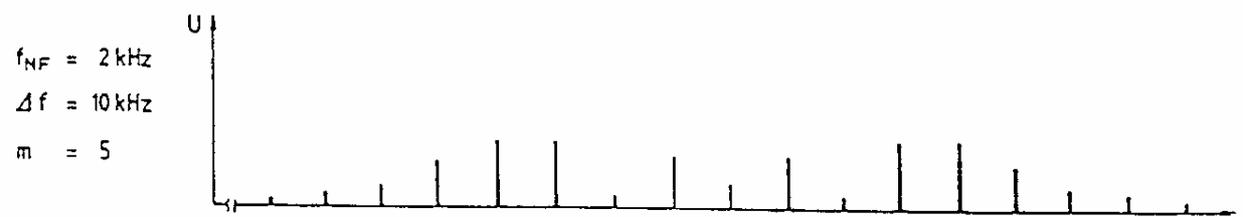
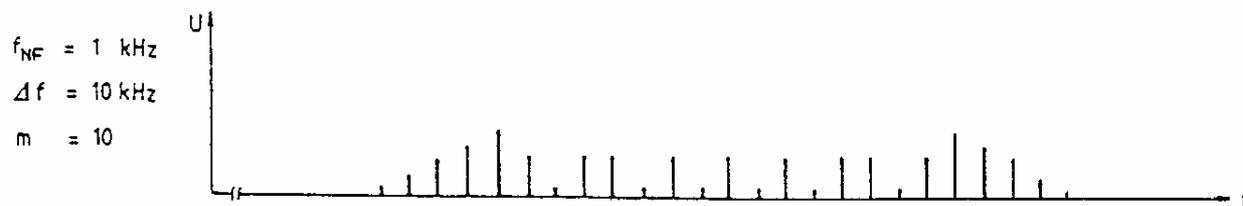
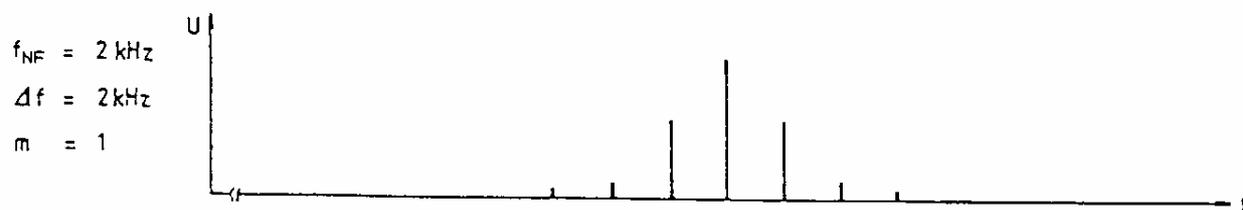
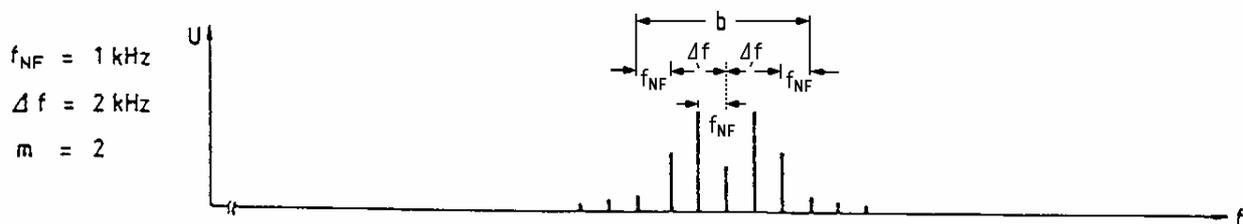
Auch bei einem FM-Signal entstehen Seitenfrequenzen (Seitenbänder), nur ist die Berechnung dieser Frequenzen nicht so einfach, wie es bei AM möglich ist.



Zur genauen Bestimmung eines FM-Spektrums sind relativ komplexe Rechenverfahren notwendig (→ "Besselfunktionen").

Bandbreite, Eigenschaften von FM

SEITENBANDSPEKTREN EINES FM-SENDERS
BEI MODULATION MIT EINEM SINUSTON



Modulationsindex $m = \frac{\Delta f_{max}}{f_{NFmax}} = \frac{3 \text{ kHz}}{3 \text{ kHz}} = 1$

Bandbreite

$$\begin{aligned}
 b &= 2 \cdot (\Delta f_{max} + f_{NFmax}) \\
 &= 2 \cdot \Delta f_{max} + 2 \cdot f_{NFmax} \\
 &= 2 \cdot 3 \text{ kHz} + 2 \cdot 3 \text{ kHz} \\
 &= 6 \text{ kHz} + 6 \text{ kHz} \\
 &= 12 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

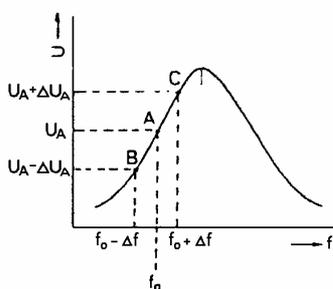
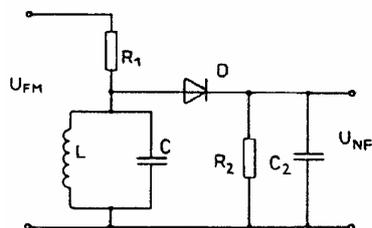
Als Größe für die Lautstärke steht bei FM der Frequenzhub Δf . Das ist der Betrag, um wieviel die Trägerfrequenz maximal nach unten und oben verschoben wird

Der Modulationsindex m ist das Verhältnis von Frequenzhub zu maximaler Modulationsfrequenz f_{NFmax} .

$m \geq 1$

NF-Rückgewinnung (FM-Demodulation)

Zur FM-Demodulation ist eine Schaltung nötig, die eine Frequenzänderung (FM) in eine Spannungsänderung (\rightarrow NF) umwandelt.



Einfachste Art: Flankendemodulator

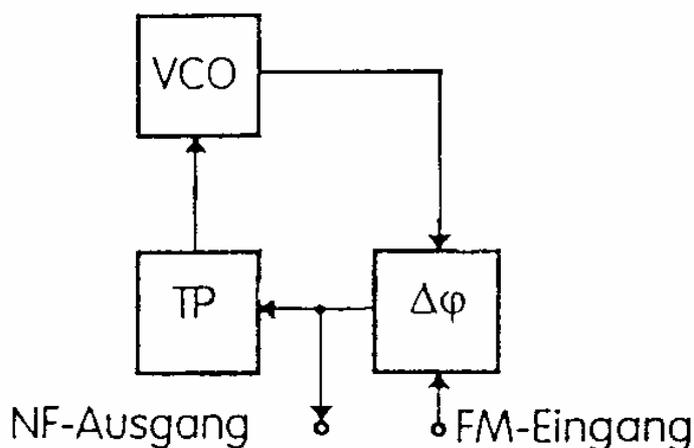
Das FM-Signal wird auf einen Bandpaß gegeben. Die f_0 (Trägerfrequenz) wird frequenzmäßig **unsymmetrisch** zur f_{res} des Bandpasses gelegt, d.h. die Bandmitte des FM-Signals liegt auf der **Flanke** des Bandpasses.

Bedingt durch die Durchlaßkurve des Bandpasses ergibt ein Δf nach oben (näher zu f_{res}) eine höhere Ausgangsspannung, ein Δf nach unten (weiter entfernt von f_{res}) eine niedrigere.

Wirkung: Frequenzänderung \rightarrow Spannungsänderung

Vorteil: sehr einfache Schaltung; geeignet zur FM-Demodulation mit einem AM-Empfänger bei sehr kleinen Hübten.

Nachteil: nur bei kleinen Aussteuerungen linear; Verzerrungen bei größeren Hübten.



Besser: PLL-Demodulator

Der VCO hat die gleiche Frequenz, wie das ankommende FM-Signal (f_0). Beide Frequenzen werden mit Hilfe des Phasenvergleichers ($\Delta\phi$) verglichen. Ohne Modulation hat die Regelspannung für den VCO einen mittleren Wert. Bei einer Frequenzabweichung erzeugt der Phasenvergleich eine Spannung, die den VCO nachregeln soll (so, daß beide Frequenzen wieder gleich sind)

Durch den in die Regelspannungsleitung eingefügten Tiefpaß bekommt der VCO die relativ schnellen Frequenzänderungen bei Modulation ($\pm \Delta f$) nicht mit und regelt die Frequenz nicht aus, so daß für den Phasenvergleich eine konstante Referenzfrequenz bleibt.

Die vor dem Tiefpaß noch enthaltenen Spannungsänderungen, die den Frequenzänderungen (Modulation) entsprechenden, werden auskoppelt \rightarrow NF.

Wirkung: Frequenzänderung \rightarrow Spannungsänderung

Vorteil: linear in einem sehr weiten Aussteuerungsbereich.

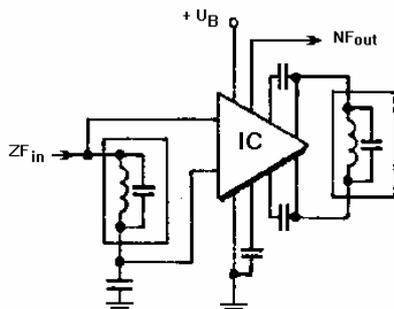
Nachteil: bei fehlendem Eingangssignal sehr starkes Rauschen, da der Phasenvergleich keinen Frequenzbezug hat und "wild" schwingt.

Praktische FM-Demodulatoren (Tips für den Eigenbau)

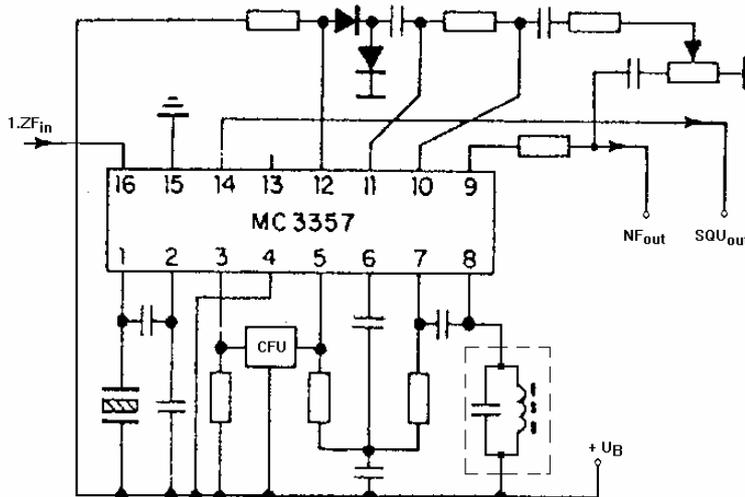
FM-Demodulatoren werden in der Praxis heute nicht mehr diskret (also mit einzelnen Bauelementen) aufgebaut; man verwendet hierfür ausschließlich IC's (integrierte Schaltkreise).

Beispiele:

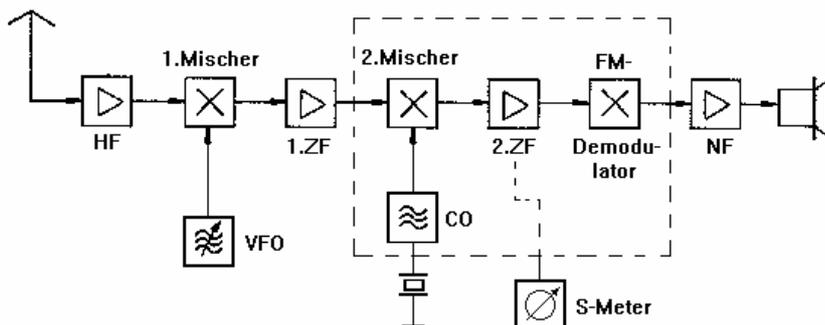
"SO 41 P" bzw.
"TBA 120"



"MC 3357 bis
MC 3363"



Anmerkung: Die Bausteine MC 3357 .. MC 3363 enthalten (je nach Typ) außer dem eigentlichen **FM-Demodulator** noch einen **Mischer für die 2. ZF** mit eigenem **Oszillator** und **ZF-Verstärker**, eine **Rauschsperrschaltung** und eine Schaltung zur Anzeige der Empfangsfeldstärke (**S-Meter**).



Mit diesen Bausteinen können komplette FM-Empfänger relativ einfach, mit wenig zusätzlichen Bauelementen aufgebaut werden.