

Modulation und Demodulation

Alle Rechte an dieser Präsentation: Andreas Krüger, DJ3EI, dj3ei@famsik.de, 2017
Sie darf genutzt werden unter
Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Generic License



Erinnerung:
Mischen ist Multiplikation
SSB, USB, LSB

Mischen ist Multiplikation



Mischen ist Multiplikation



$$\cos(2\pi A t) \cos(2\pi B t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(A+B)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(A-B)t)$$

Multiplikation ist nicht-linear

Lineare Stufen addieren nur oder ziehen ab.

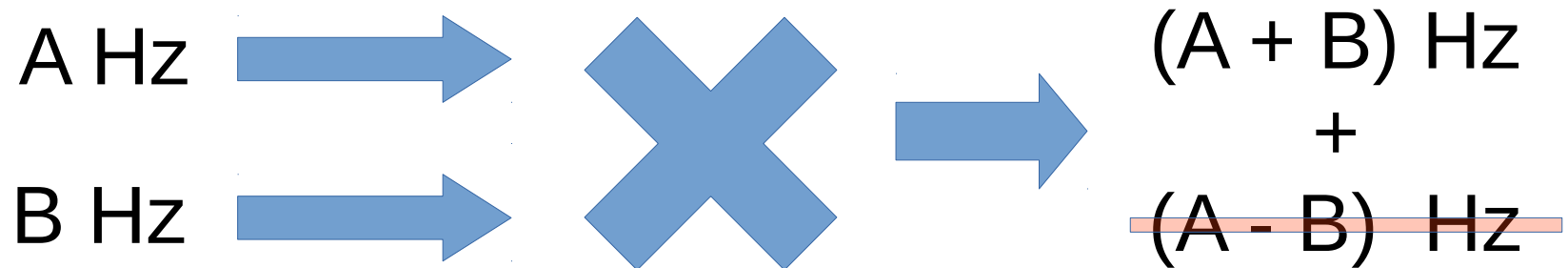
Sie multiplizieren nicht.

Jeder Mischer arbeitet daher im
nichtlinearen Betrieb.

Frage TF328:

Die Mischstufe eines Überlagerungsempfängers
arbeitet (richtig ist:) im nichtlinearen Betrieb.

Frequenzen verschieben.



Mischen.

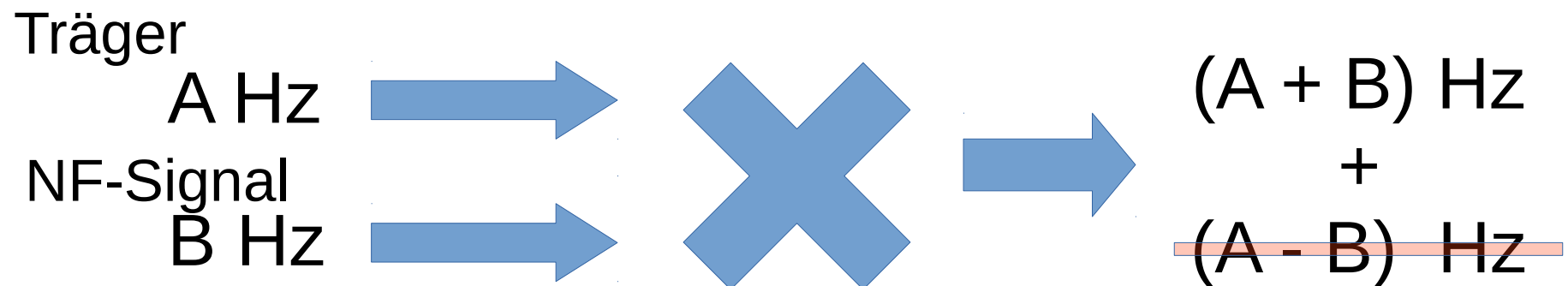
Anschließend das Differenzprodukt wegfiltern.

Ergebnis:

Das B-Signal wurde um A Hz in der Frequenz verschoben.

Das ist

USB-Modulation



Mischen.

Anschließend das Differenzprodukt wegfiltern.

Ergebnis:

Das B-Signal wurde um A Hz in der Frequenz verschoben.

Frequenzen verschieben und kippen



Mischen.

Anschließend das Summenprodukt wegfiltern.

Ergebnis:

Das B-Signal wurde um A Hz in der Frequenz verschoben
und anschließend „gekippt“.

Das ist

LSB



Mischen.

Anschließend das Summenprodukt wegfiltern.

Ergebnis:

Das B-Signal wurde um A Hz in der Frequenz verschoben und anschließend „gekippt“.

Leichte Frage

Was kommt raus, wenn der Träger
mit 0 multipliziert wird?

Richtige Antwort:

0

(Fast) die gleiche Frage: TG302

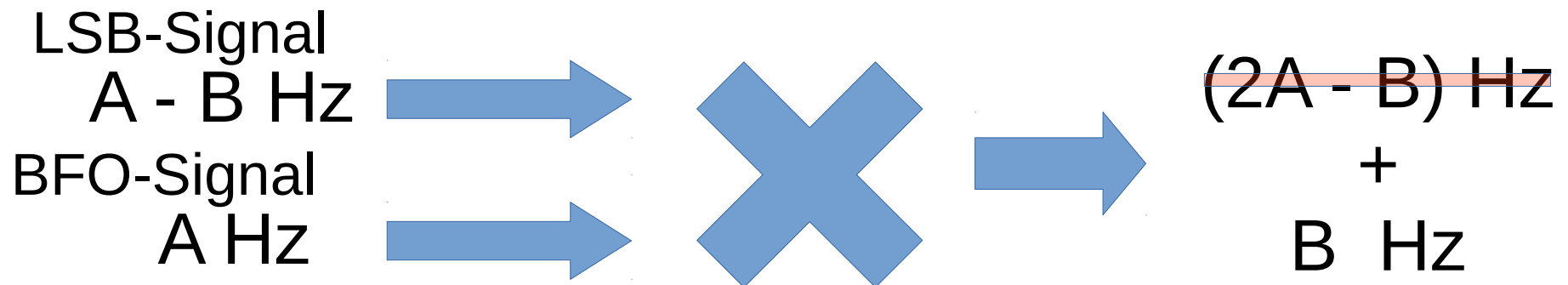
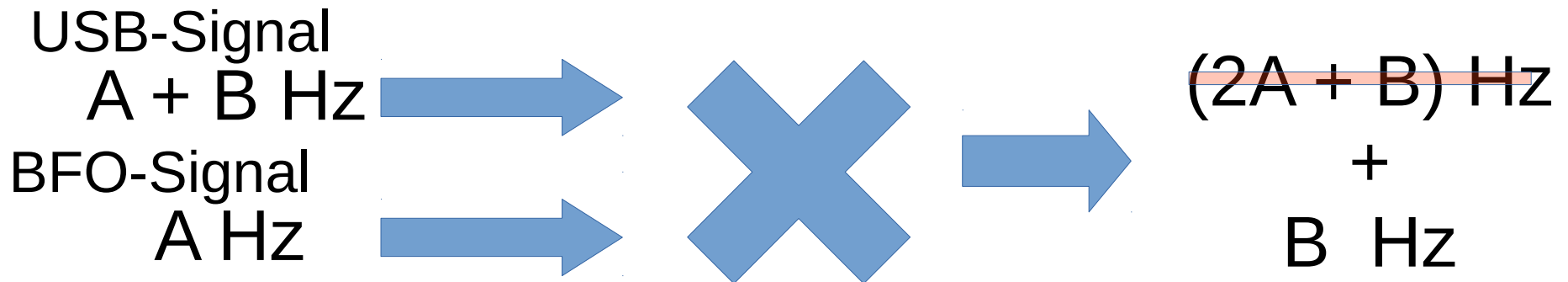
Was kann man bezüglich der Ausgangsleistung eines SSB-Senders in Abhängigkeit von der Modulation aussagen?

Beste Antwort:

Sie ist sehr gering,
wenn der Sender nicht moduliert wird.

Demodulation

Zur Demodulation eines SSB-Signals
braucht man nur wieder einen Mischer.



BFO besser Quarz

Hochwertige Empfänger haben schmale
Quarzfilter in der ZF.

Damit der BFO nicht wegwandert,
nimmt man dann auch gerne
einen quarzgesteuerten Oszillator.

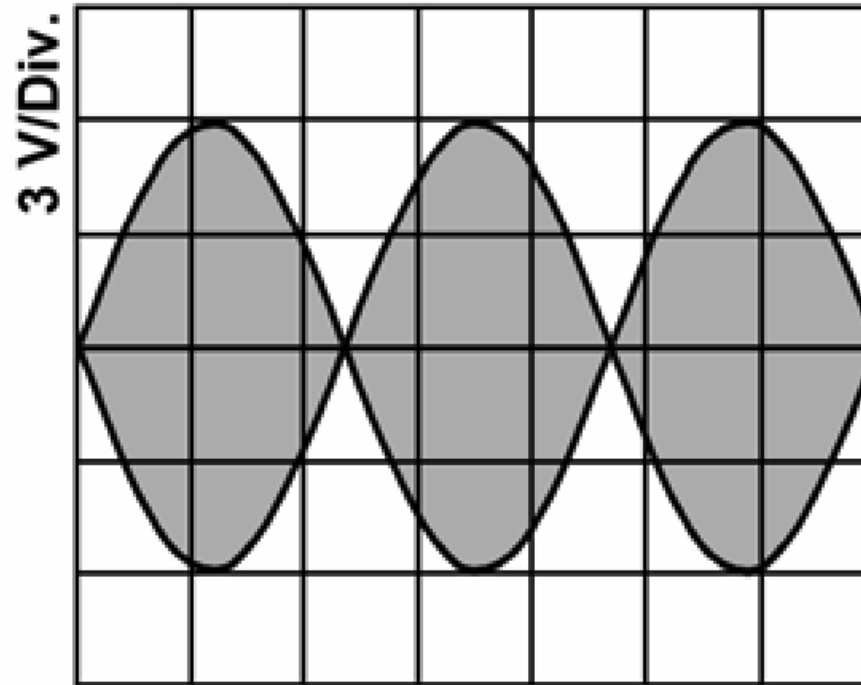
Vokabel in der entsprechenden Frage TF417:
Der BFO heißt dort „Hilfsträger“.

Das ist vielleicht dem (historischen) Gedanken geschuldet, dass SSB aus AM entsteht, und zwar durch
Weglassen des Trägers und eines Seitenbandes.

(Man kann auch argumentieren, dass AM aus SSB entsteht durch Hinzufügen von Überflüssigem.)

Zweitonsignal

Zweitonsignal

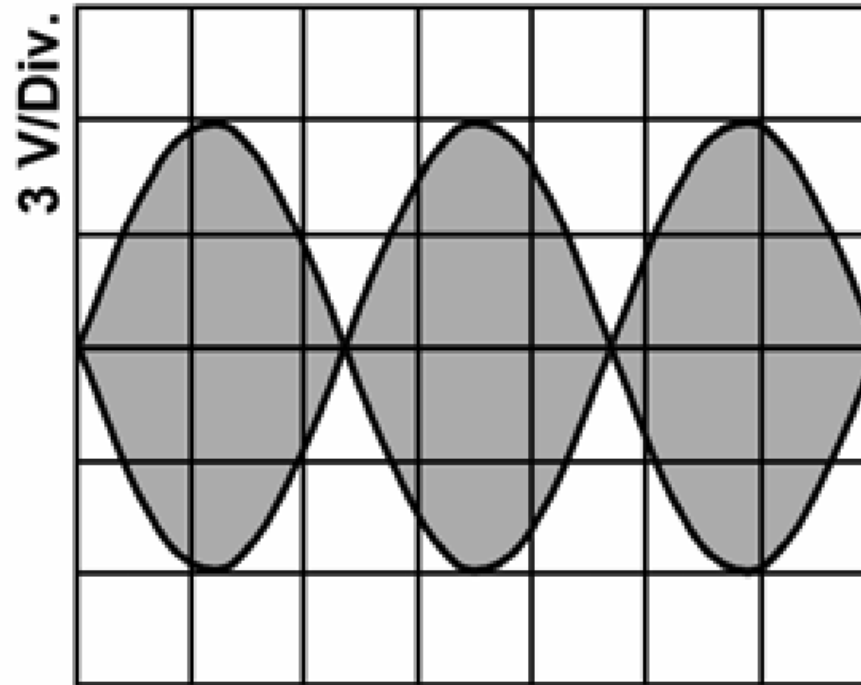


Quelle: BNetzA Fragenkatalog, TE113

Die graue Fläche besteht (hier nicht erkennbar) aus vielen eng beieinanderliegenden Sinuswellen.

Signal besteht aus der Summe zweier gleich starker Sinussignale mit eng beieinanderliegenden Frequenzen.

Zweitonsignal

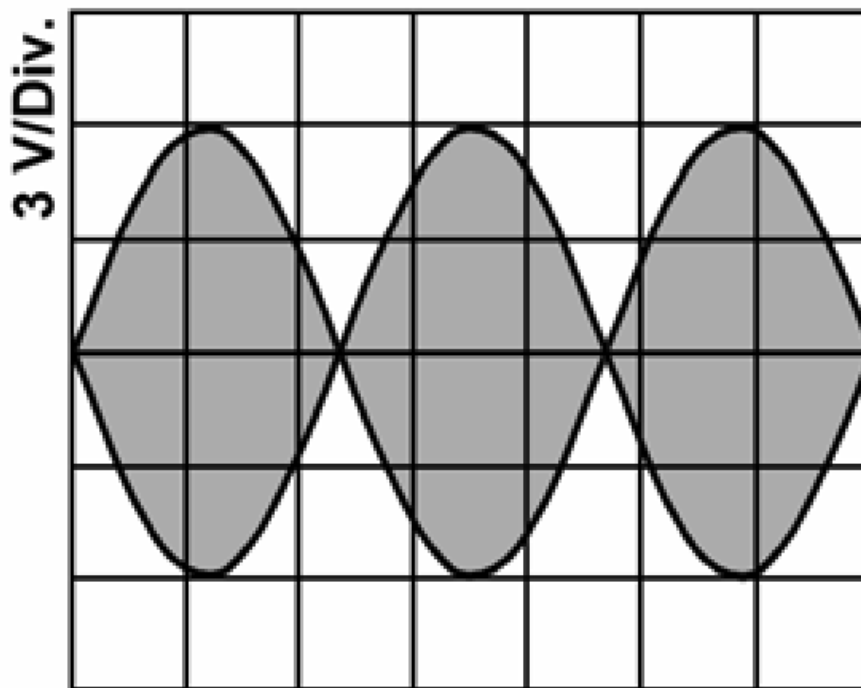


Mögliche Herstellung:

SSB-Sender wird mit zwei NF-Sinustönen moduliert.

Das ist ein üblicher Test für SSB-Sender
(sieht das Ergebnis so aus wie oben?).

Zweitonsignal



Alternative Herstellung:

Ein einzelner NF-Sinuston und ein HF-Signal in einen Mischer ergibt ein solches Zweitonsignal.

Übrigens: Ein PSK31 – Signal sieht auch so aus (wenn gerade keine Zeichen gesendet werden).

Frequenzmarkengenerator Quarzoszillatoren

Frequenzmarkengenerator

Ein möglichst stabiler Quarzoszillator erzeugt ein möglichst oberwellenreiches Signal (nicht Sinus, sondern kurze Nadelimpulse!) bei einer „glatten“ Frequenz, z.B. 100 kHz.

Die Oberwellen sind im ganzen Kurzwellenbereich gut hörbar.

Wenn ich z.B. die Marke bei 7000 kHz höre, weiß ich: „Hier Bandende, nicht tiefer senden.“

Früher wichtig, als die Frequenzskalen der TRX noch nicht genau waren.

Prüfungsfrage TF412:

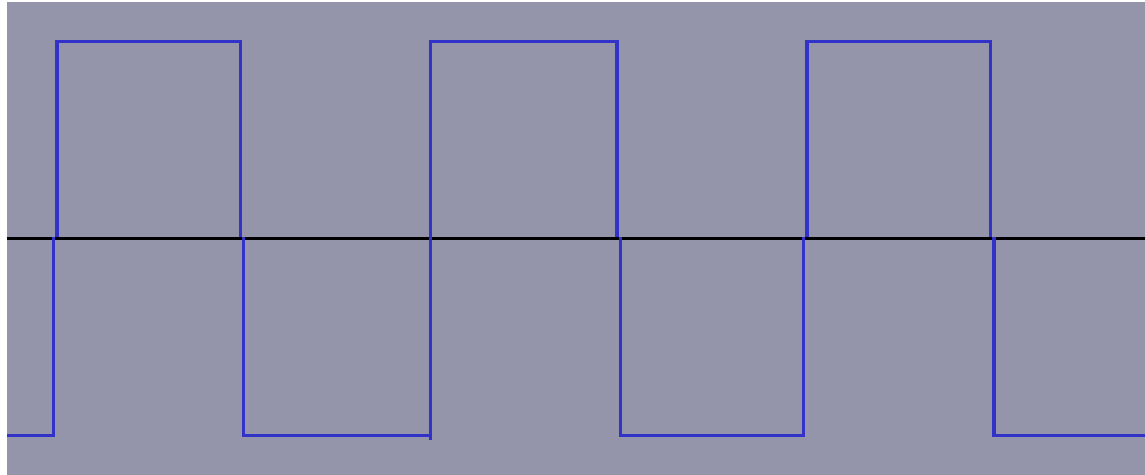
Dafür nimmt man etwas möglichst stabiles, also einen **Quarzoszillator**.

Bandbreite vs. Oberwellen

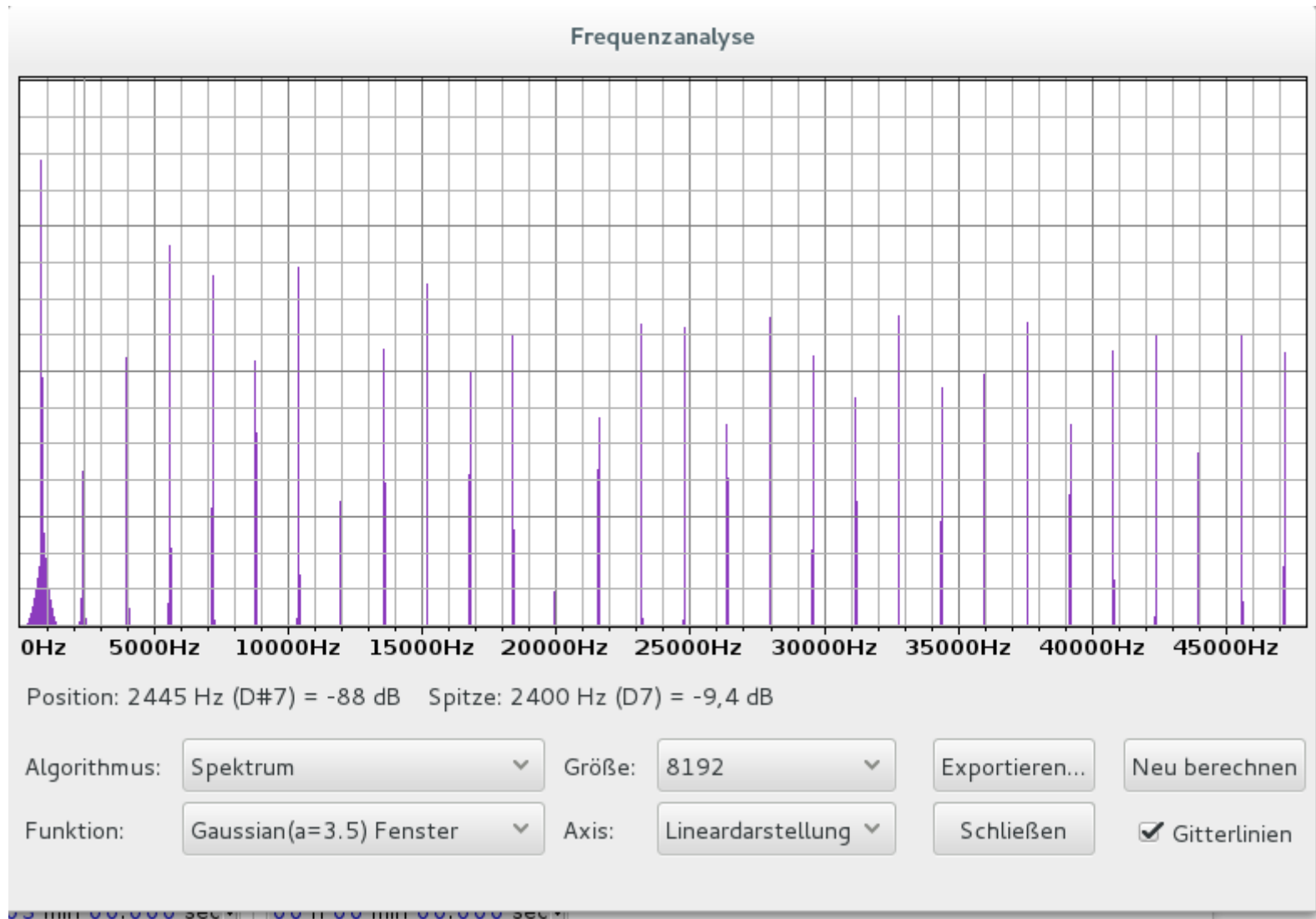
Spektrum-Faustregeln

- Die einzelne Periode sieht so aus wie eine Sinuskurve, über viele Perioden betrachtet gibt es Amplituden- oder Frequenzschwankungen: Das Spektrum des Signals liegt (mehr oder weniger breit) um eine Hauptfrequenz herum.
- Die einzelne Periode sieht nicht so aus wie eine Sinuskurve (hat z.B. „platte“ Abschnitte, Rechteckform, oder gar Impulsnadeln): Das Spektrum des Signals enthält Oberwellen.

Beispiel: Rechtecksignal



Hat Grundfrequenz sowie Oberwellen bei ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz.



Frequenzanalyse Rechtecksignal mit Audacity.

(Kommt im Screenshot nicht gut rüber.)

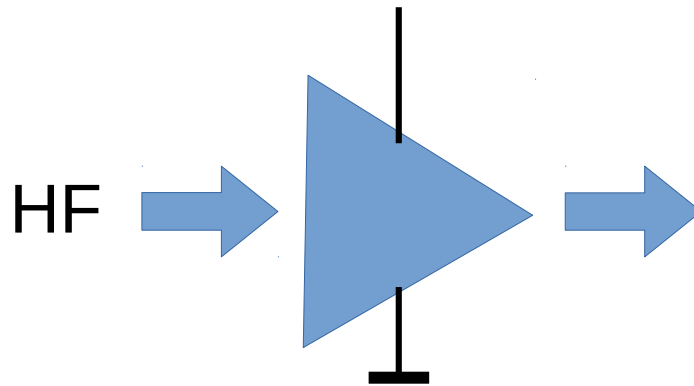
Amplitudenmodulation herstellen

Wie multiplizieren?

Möglichkeit: Versorgungsspannung HF-PA ändern.

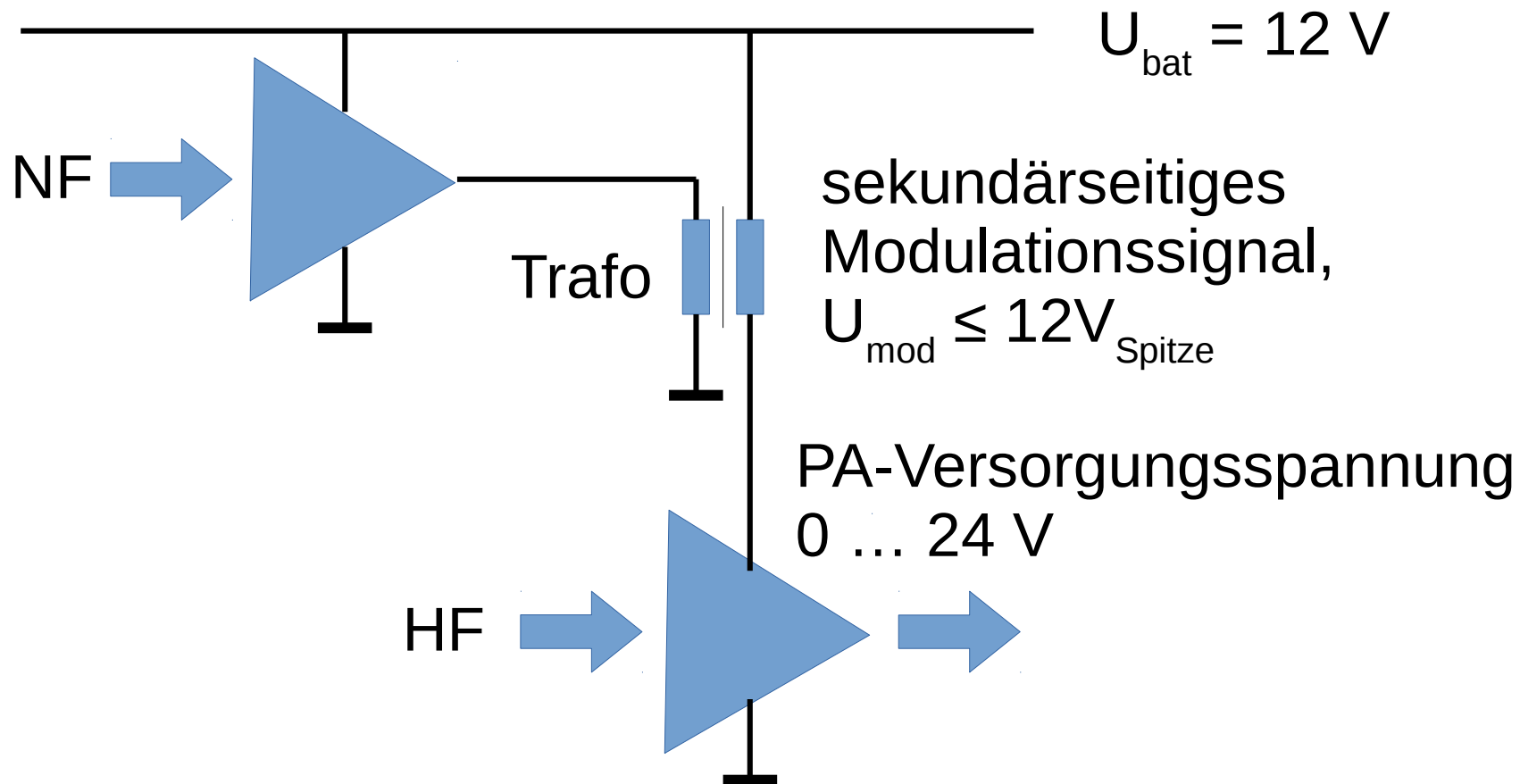
PA Versorgungsspannung verdoppelt \Rightarrow
HF-Ausgangsspannung verdoppelt.

PA-Versorgungsspannung



Technische Umsetzung

NF-PA und Modulationstransformator
Klassisch, Stil der 50er...60er Jahre:

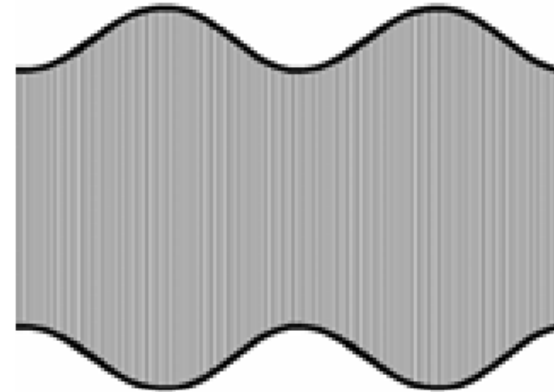


Das Ergebnis: AM

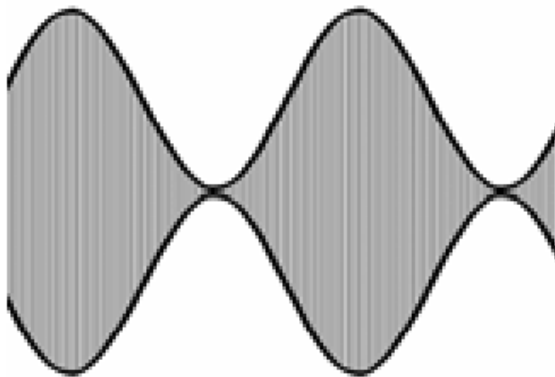
Ohne Modulation



Mittlere Modulationsspannung

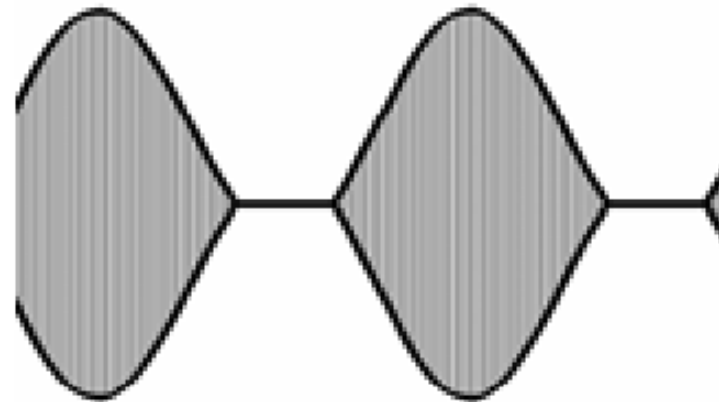


Maximale Modulation



Modulationsgrad 100%.

Übermoduliert



Quelle: BNetzA Fragenkatalog, TE110

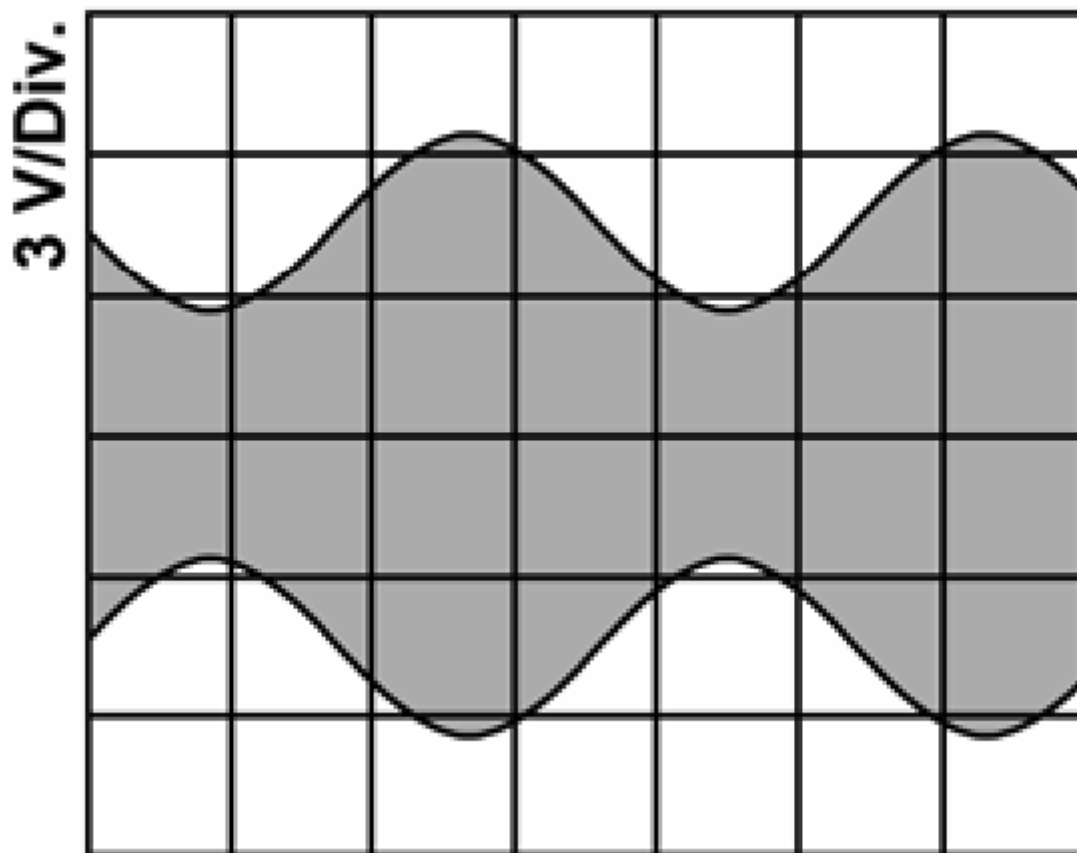
Modulationsgrad AM

$$\text{Modulationsgrad} = \frac{U_{\text{modS}}}{U_{\text{bat}}} \cdot 100$$

in %.

Dabei wird für U_{modS}
die **einfache Spitzenspannung** benutzt.

Modulationsgrad Beispiel



Quelle: BNetzA Fragenkatalog TE112

Höchste Spannung etwa 2,2 Kästchen.

Niedrigste Spannung etwa 0,8 Kästchen.

$$U_{\text{modS}} = (2,2 - 0,8) / 2 \\ = 0,7 \text{ Kästchen.}$$

$$U_{\text{bat}} = (2,2 + 0,8) / 2 \\ = 1,5 \text{ Kästchen.}$$

Modulationsgrad

$$0,7 / 1,5 * 100 = 47\%$$

Richtige Antwort

„ca. 45%“.

Nachteil AM

Wir können so nicht mit negativen Zahlen multiplizieren. Die NF wird angehoben, bis alle Spannungen im positiven Bereich sind.

Nachteil AM

Wir können so nicht mit negativen Zahlen multiplizieren. Die NF wird angehoben, bis alle Spannungen im positiven Bereich sind.

Deshalb erhalten wir oberes Seitenband, unteres Seitenband, und Träger.

Für die Informationsübertragung ist der Träger nutzlos.

Von z.B. 60 W Sendeleistung gehen im besten Fall 40 W in den Träger und je 10 W in jedes Seitenband.

Bei nicht voll ausmoduliertem Signal ist die Bilanz noch schlechter.

Wenn man die kompletten 60 W in nur *ein* Seitenband steckt, reicht das Signal deutlich weiter: SSB.

Nachteil AM

Wir können so nicht mit negativen Zahlen multiplizieren. Die NF wird angehoben, bis alle Spannungen im positiven Bereich sind.

$$\begin{aligned} \cos(2\pi A t) (1 + \cos(2\pi B t)) = \\ \cos(2\pi A t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(A+B)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(A-B)t) \end{aligned}$$

Deshalb erhalten wir oberes Seitenband, unteres Seitenband, und Träger.

Für die Informationsübertragung ist der Träger nutzlos.

Von z.B. 60 W Sendeleistung gehen im besten Fall 40 W in den Träger und je 10 W in jedes Seitenband.

Bei nicht voll ausmoduliertem Signal ist die Bilanz noch schlechter.

Wenn man die kompletten 60 W in nur *ein* Seitenband steckt, reicht das Signal deutlich weiter: SSB.

Nachteil AM

Ein AM-Signal ist mehr als doppelt so breit, verglichen mit der Bandbreite des NF-Signals.

Beispiel:

- NF von 300 bis 3000 Hz,
- Bandbreite NF $3000 - 300 = 2700$ Hz
das ist auch die Bandbreite von SSB
- Bandbreite AM = 6000 Hz.

Frage TG511

Um Nachbarkanalstörungen zu minimieren sollte die Übertragungsbandbreite bei SSB

Richtige Antwort:

höchstens 3 kHz betragen.

Splatter

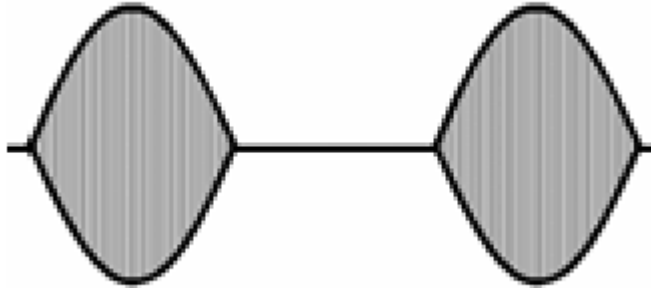
Übermodulation (über 100%)
führt zu einem
sehr breiten AM-Signal.

Nachbarkanäle werden massiv gestört.

Man nennt solche Nachbarkanalstörungen
„Splatter“.

Splatter erklärt

Das übermodulierte AM-Signal



sollte eigentlich eine
NF-Sinuskurve modulieren.

Quelle: Fragenkatalog BNetzA, TE105

Dasselbe Signal entsteht auch bei „sauberer“ AM-Modulation wenn man mit dieser (kranken) NF-moduliert.



Dieses kranke NF-Signal hat laut
Faustregel erhebliche Oberwellen,
also große NF-Bandbreite.

Das übermodulierte AM-Signals ist doppelt so breit
wie die höchsten Frequenzen des
Oberwellenspektrums des kranken NF-Signals.

Durch Übermodulation
von SSB-Sendern
entsteht ebenfalls Splatter.

AM aus Versehen

TG207:

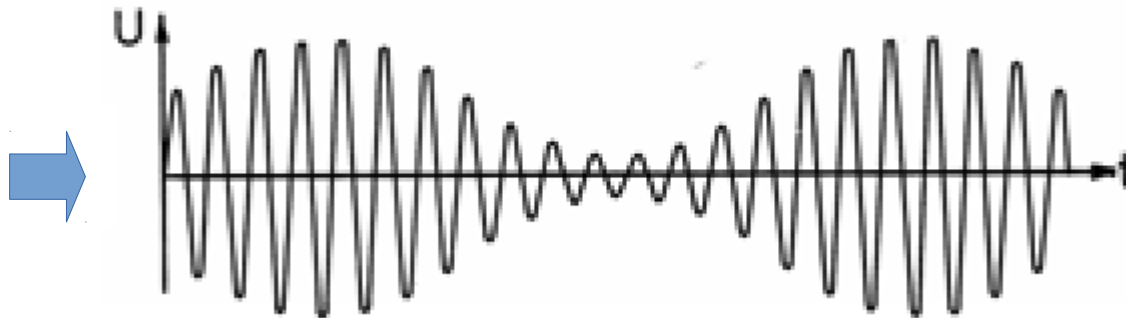
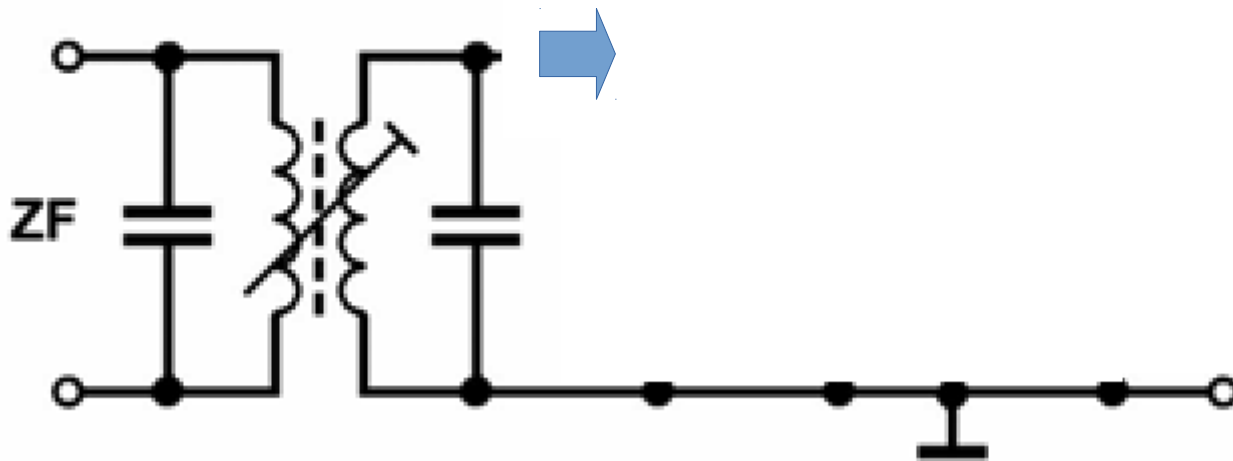
Wenn der Stromversorgung einer Endstufe NF-Signale überlagert sind, kann dies unerwünschte Modulation der Sendefrequenz erzeugen. Diese zeigt sich als

Richtige Antwort:

AM.

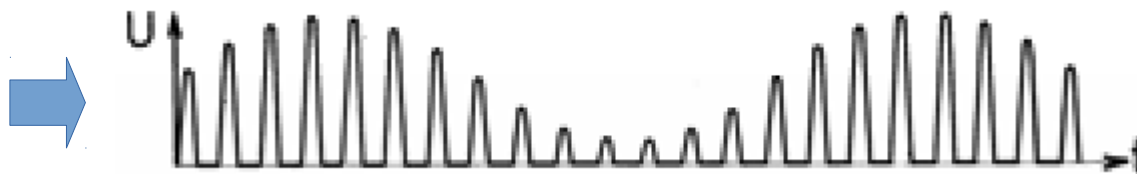
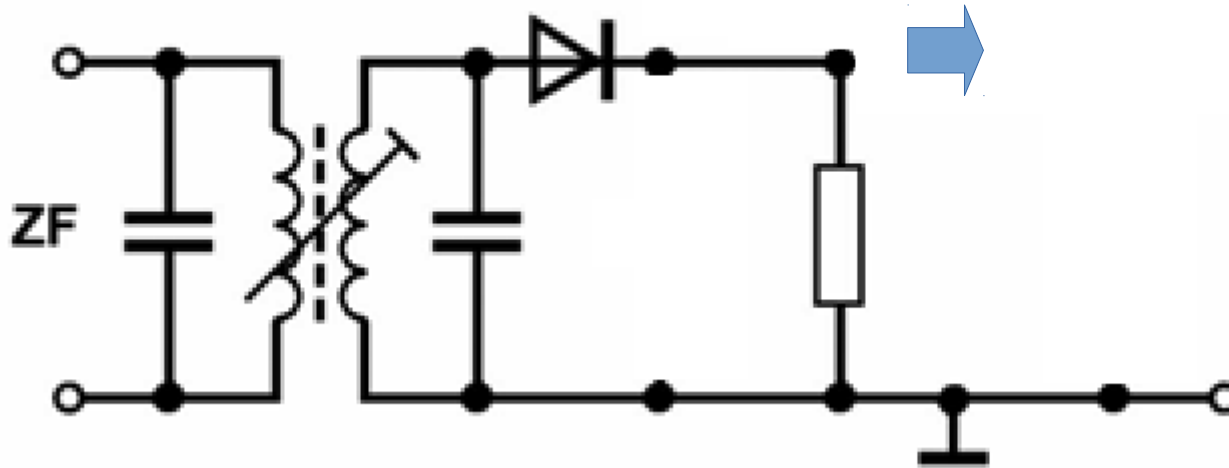
Amplitudenmodulation demodulieren

AM-ZF-Signal



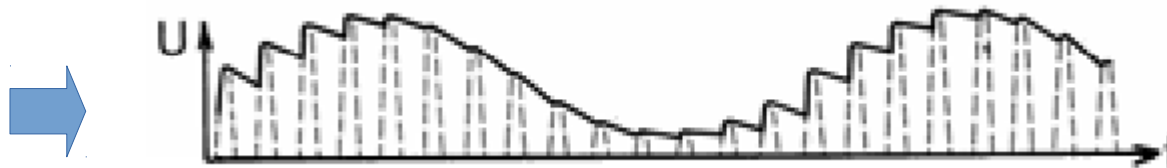
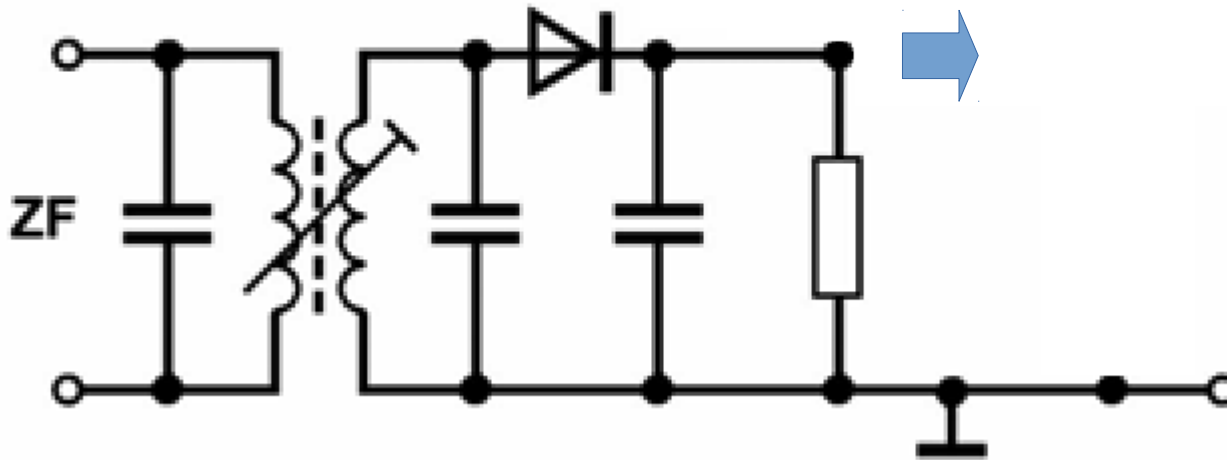
Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TD504

Halbwellen-Gleichrichtung



Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TD504

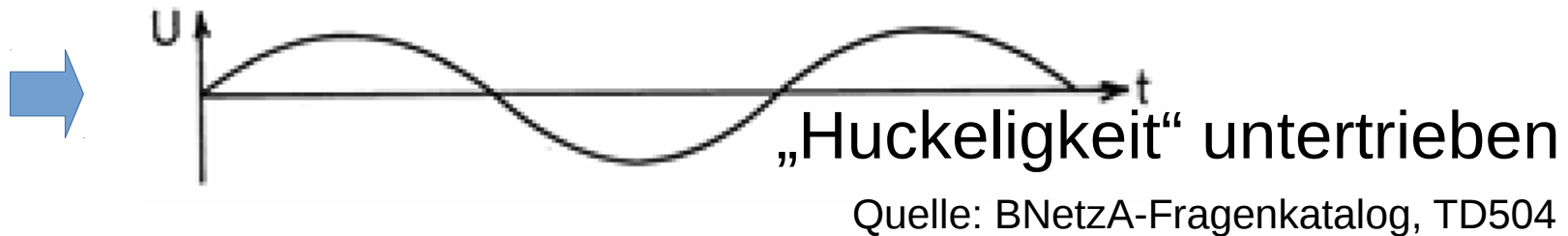
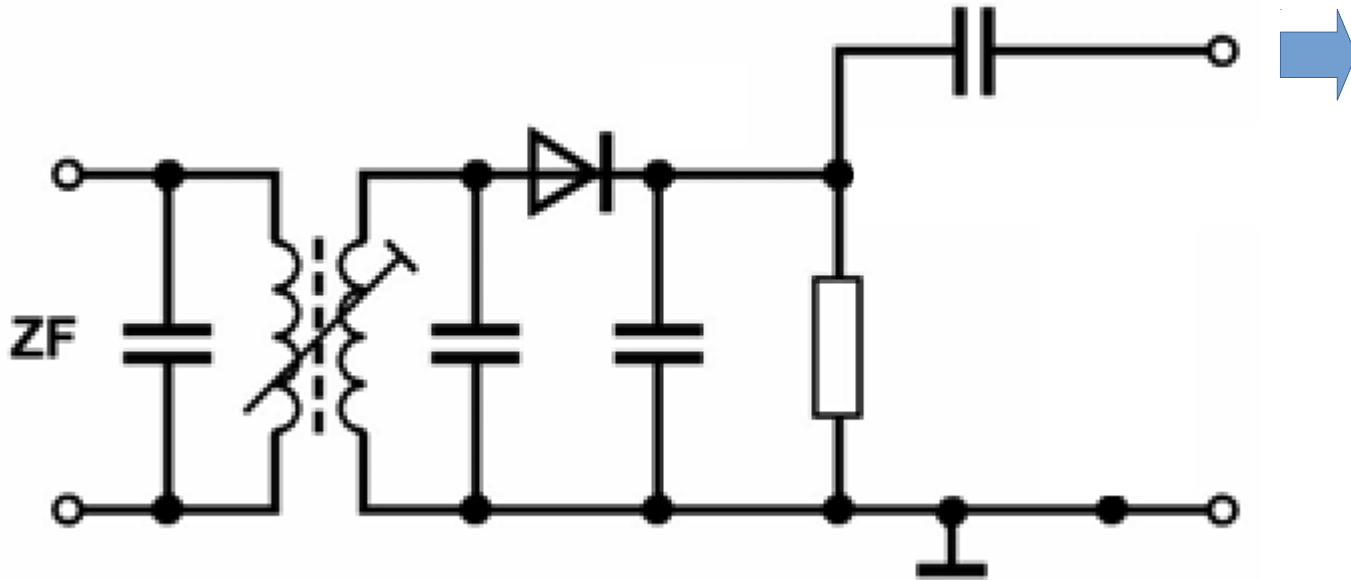
Geglättetes Signal



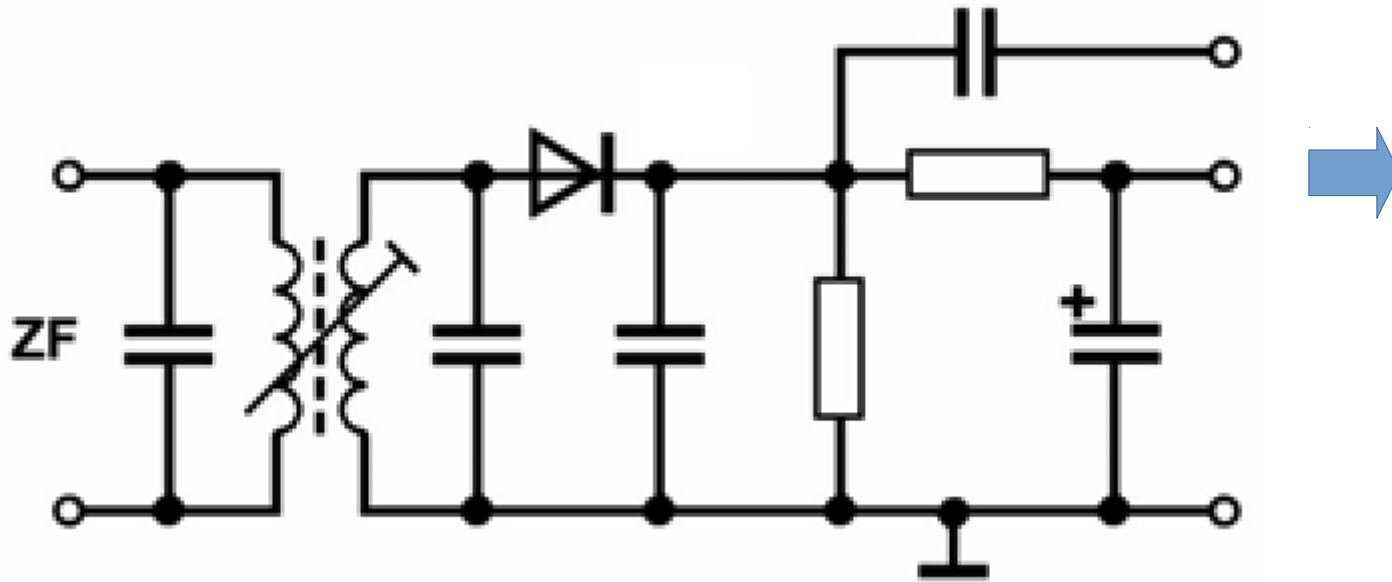
„Huckeligkeit“ übertrieben

Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TD504

NF-Signal (gleichspannungsfrei)



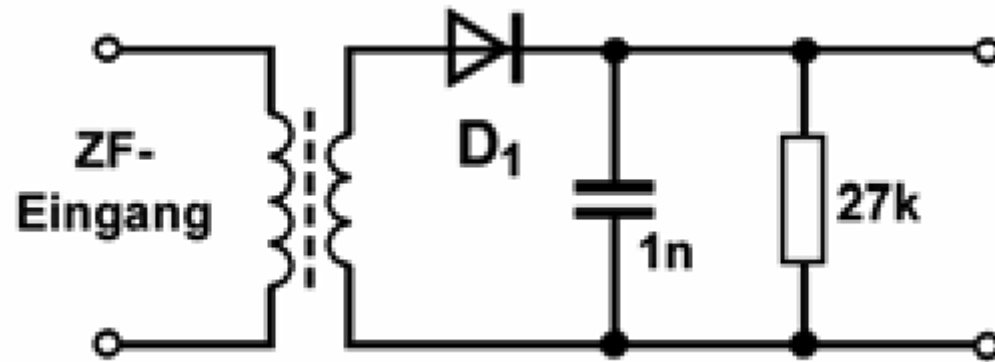
Regelspannung (für AGC)



AGC = „automatic gain control“
Herunterregelung der Verstärkung
bei großen Eingangssignal.

Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TD504

AM-Demodulator, Sparversion

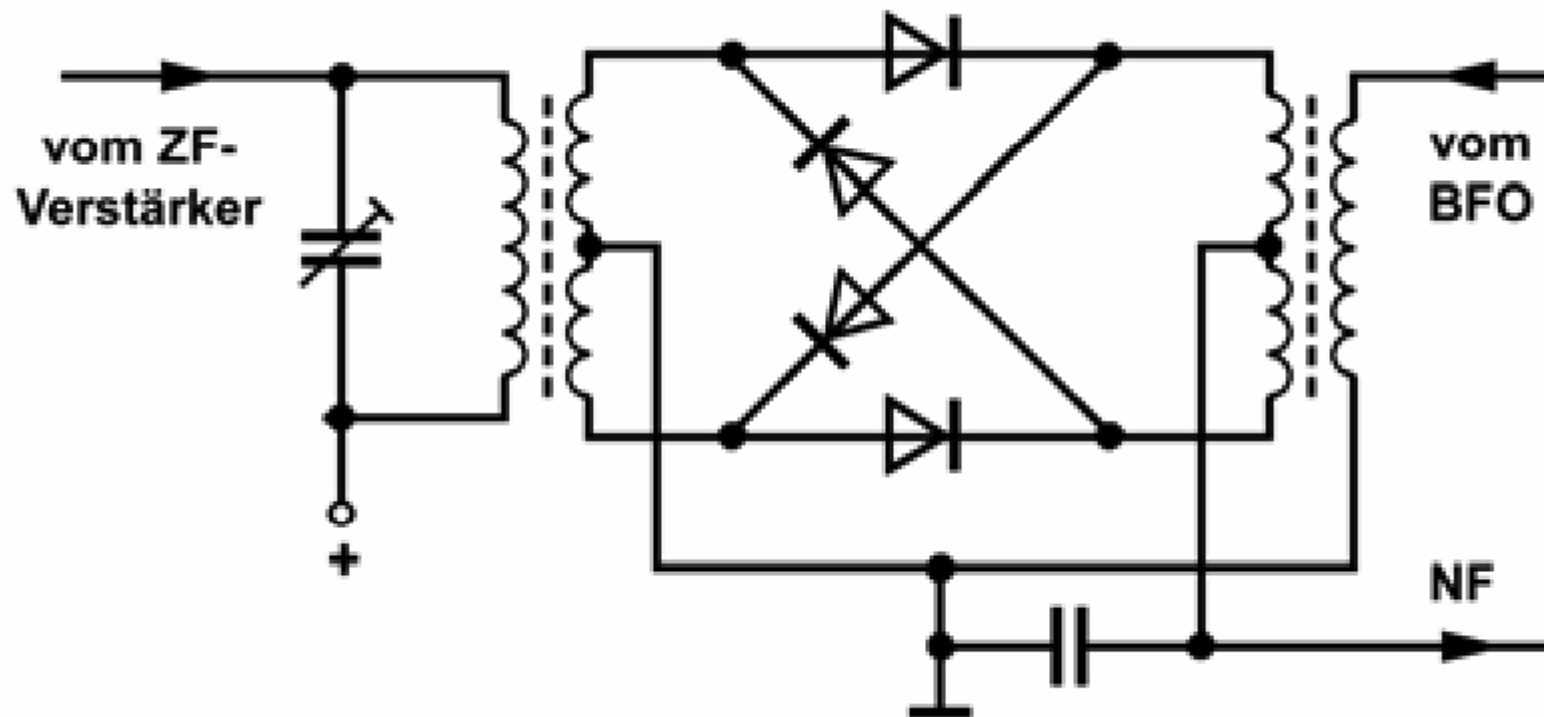


Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TF317

jetzt erst mal Pause?

Schaltmischer (Produktdetektor)

Realer Produktdetektor



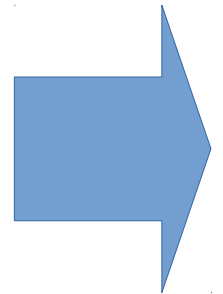
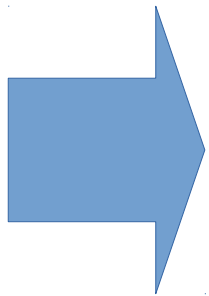
„zur Demodulation von SSB-Signalen“

Quelle: BNetzA-Fragenkatalog, TD511.

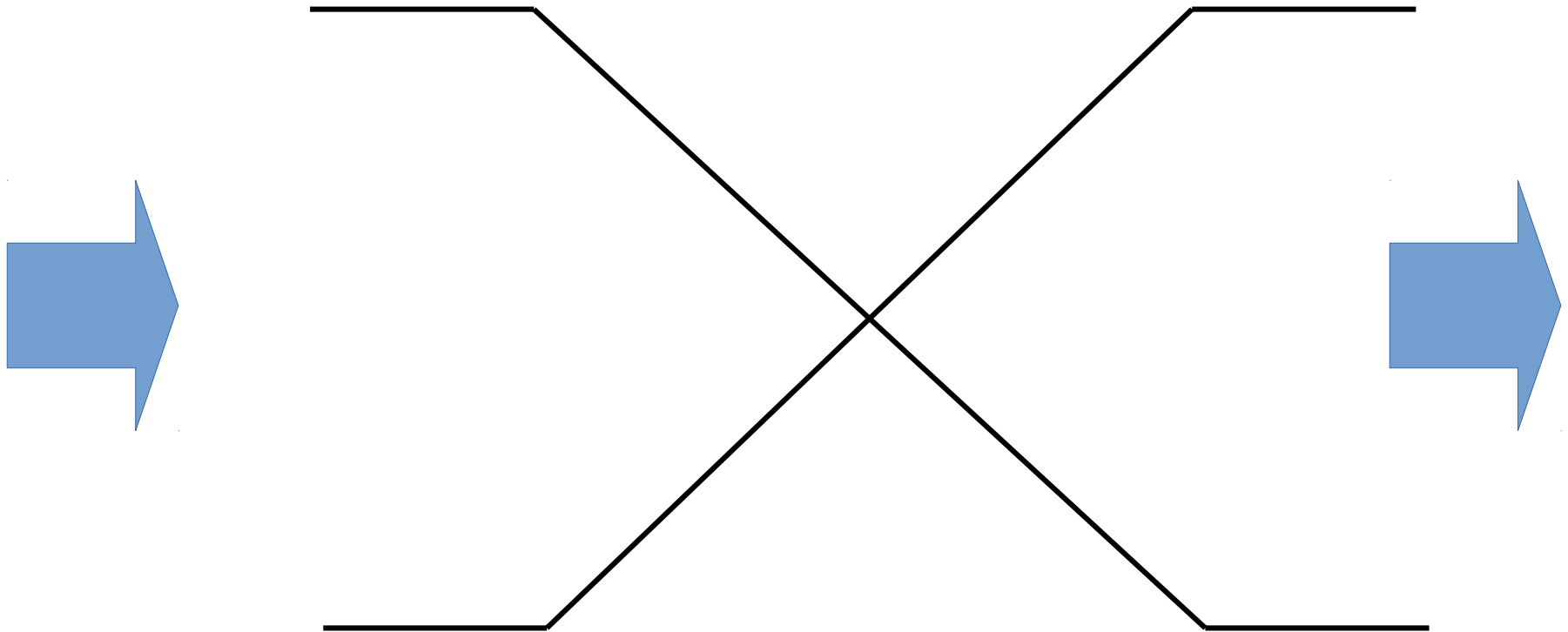
Bonusmaterial

Schaltmischer (Produktdetektor)
kapieren.

Multiplikation mit 1: simpel



Multiplikation mit -1: geht auch

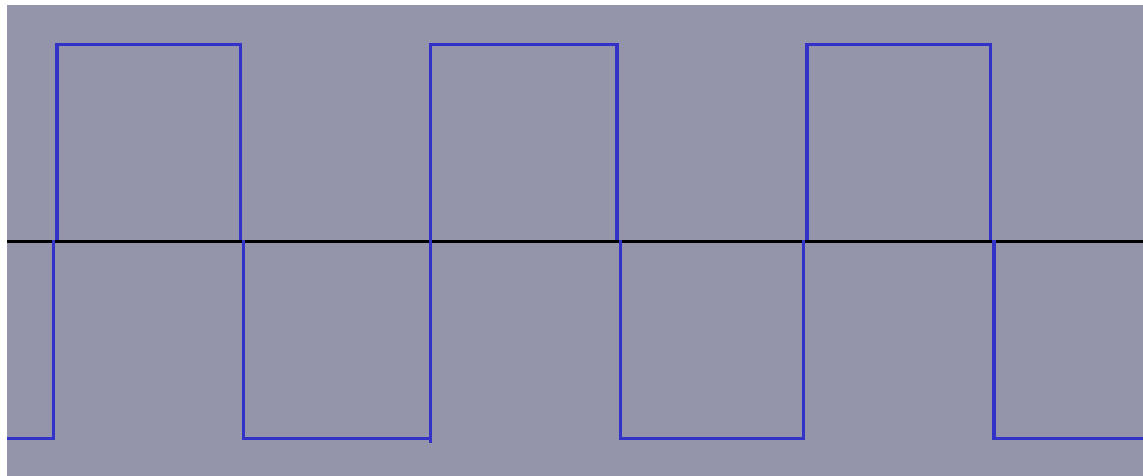


Prinzip Schaltmischer (Produktdetektor)

Ein Schaltmischer besteht aus schnellen elektronisch steuerbaren Schaltern.

Zwischen den beiden Zuständen „Multiplikation mit +1“ und „Multiplikation mit -1“ wird ständig hin- und her geschaltet.

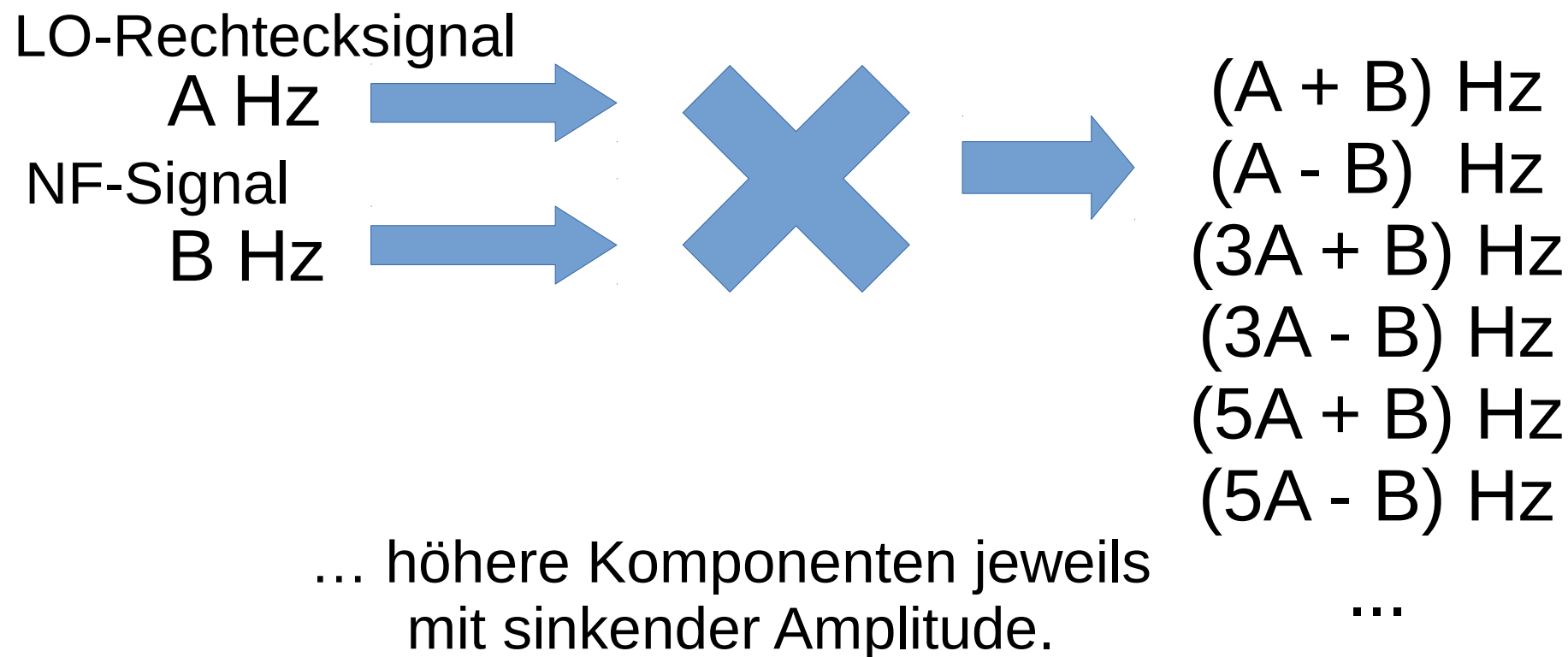
Man multipliziert so mit...



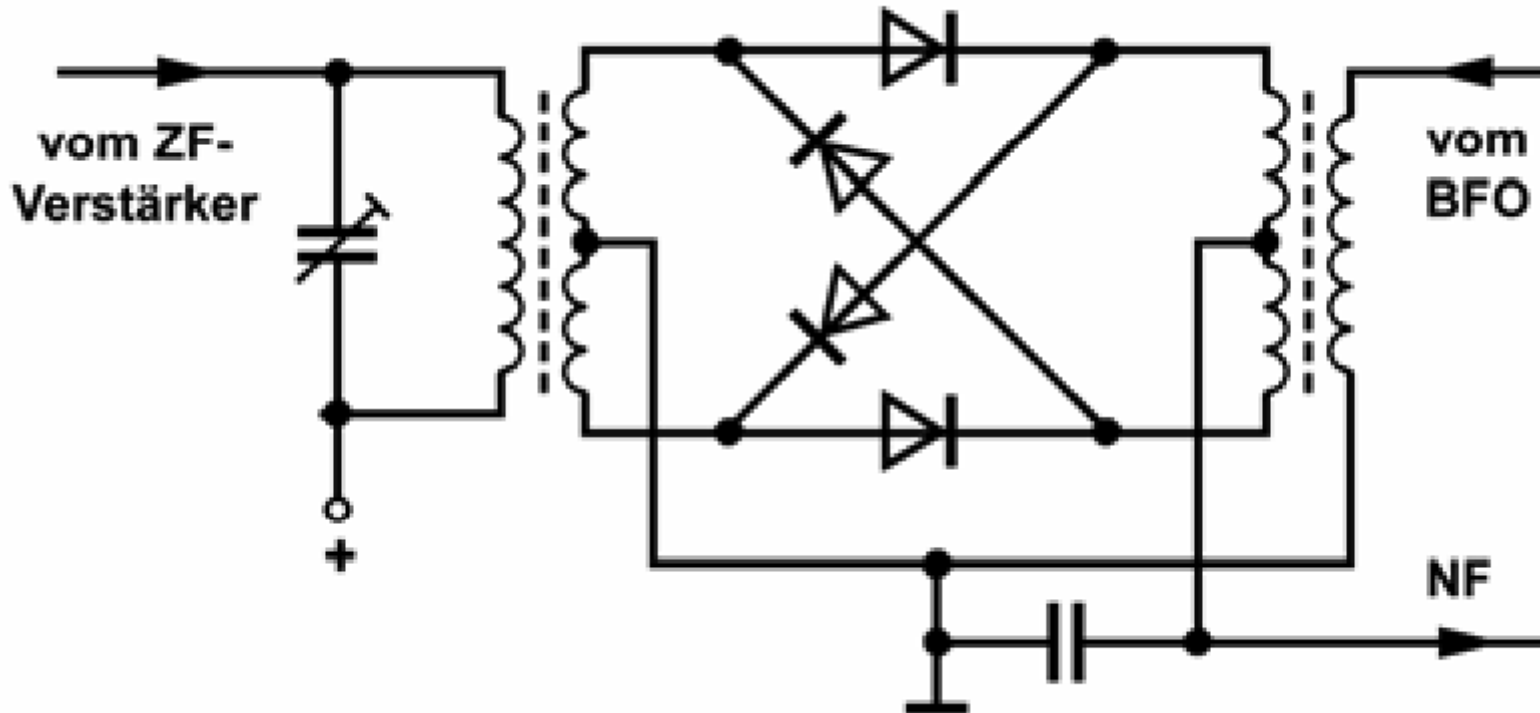
... einem Rechtecksignal.

Mischprodukte Schaltmischer

Ein Rechtecksignal mit Frequenz A
hat Komponenten bei A , $3A$, $5A$, $7A$...

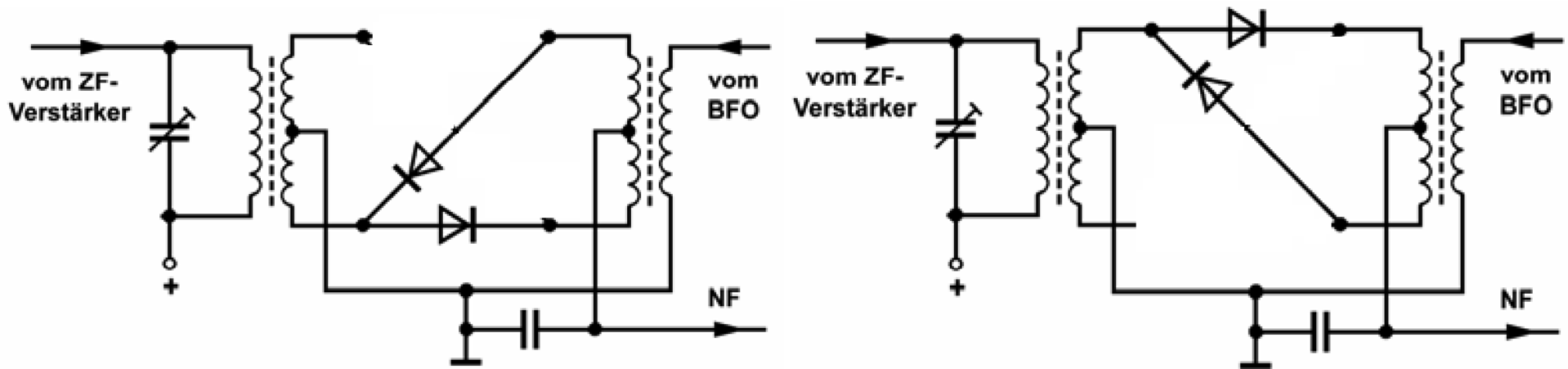


Realer Produktdetektor



Der ZF-Trafo links ist in der Mitte geerdet.
Die obere Hälfte liefert das „+1“ Signal,
die untere das „-1“ Signal.

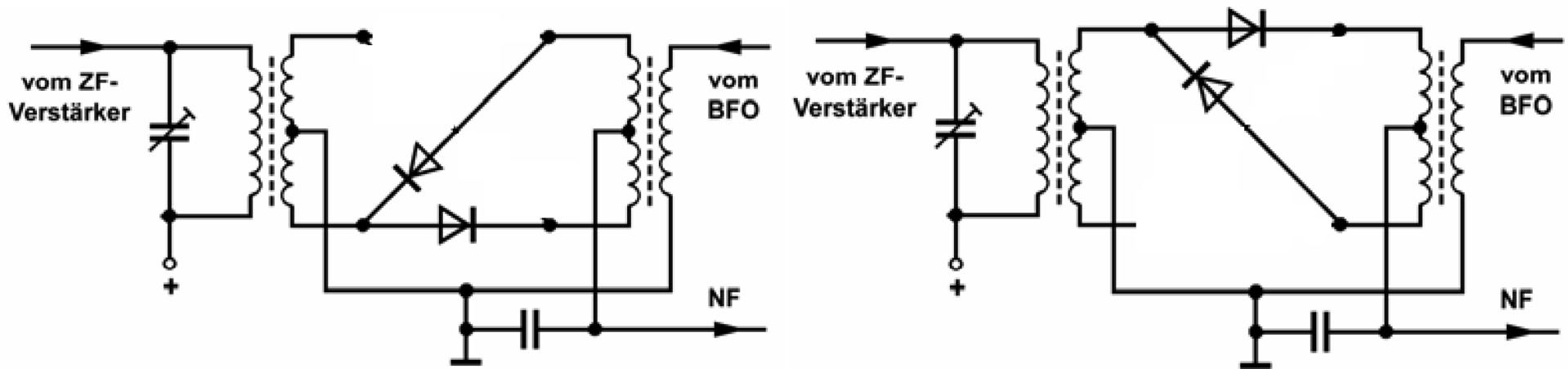
Realer Produktdetektor



Je nach Polarität des BFO-Signals werden zwei Dioden leitend, die anderen beiden sperren.

Sperrende Dioden lassen nichts durch, leitende bilden einen Kurzschluss.

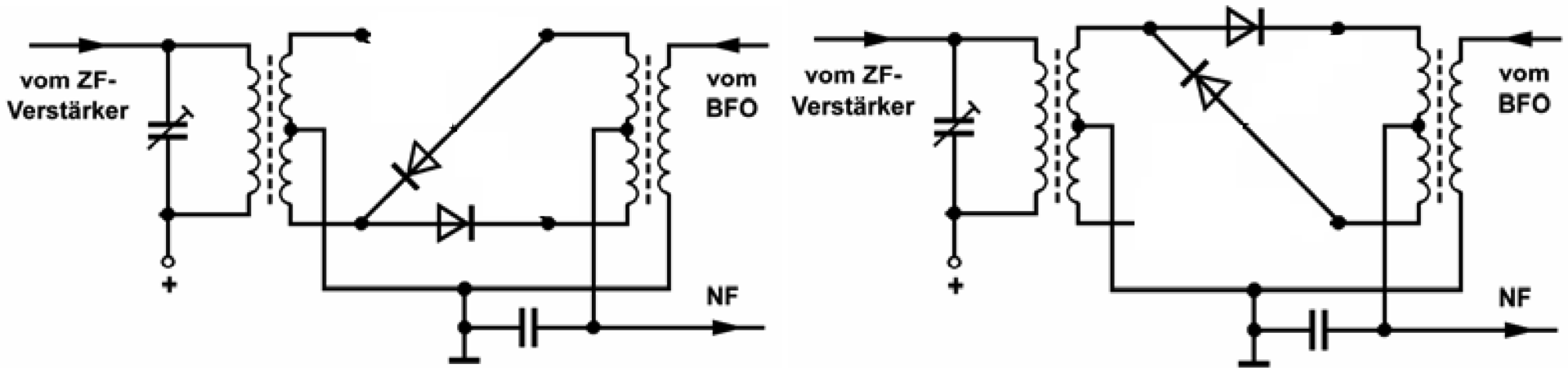
Realer Produktdetektor



So wird mal das „+“-Signal, mal das „-“-Signal mit beiden Enden der BFO-Trafowicklung verbunden.

Von dort geht es dann durch den Trafo zum NF-Ausgang.

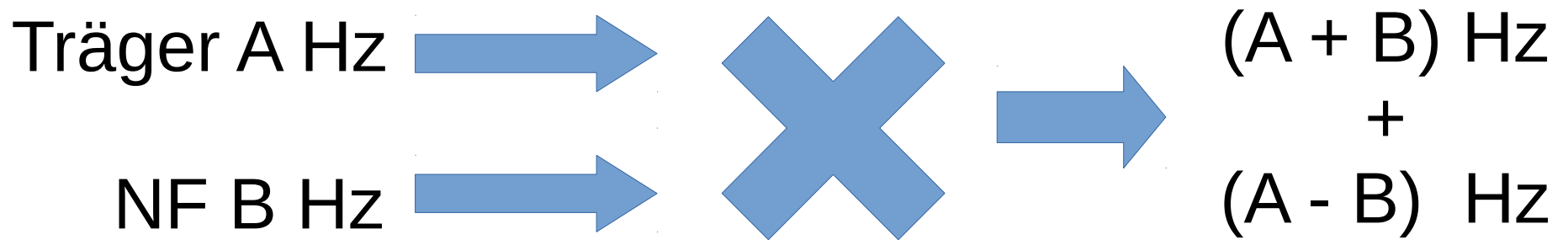
Realer Produktdetektor



Bonus dieser Konstruktion:

Ist alles symmetrisch, erreicht das (starke) BFO-Signal nicht den NF-Ausgang.

AM mit unterdrücktem Träger

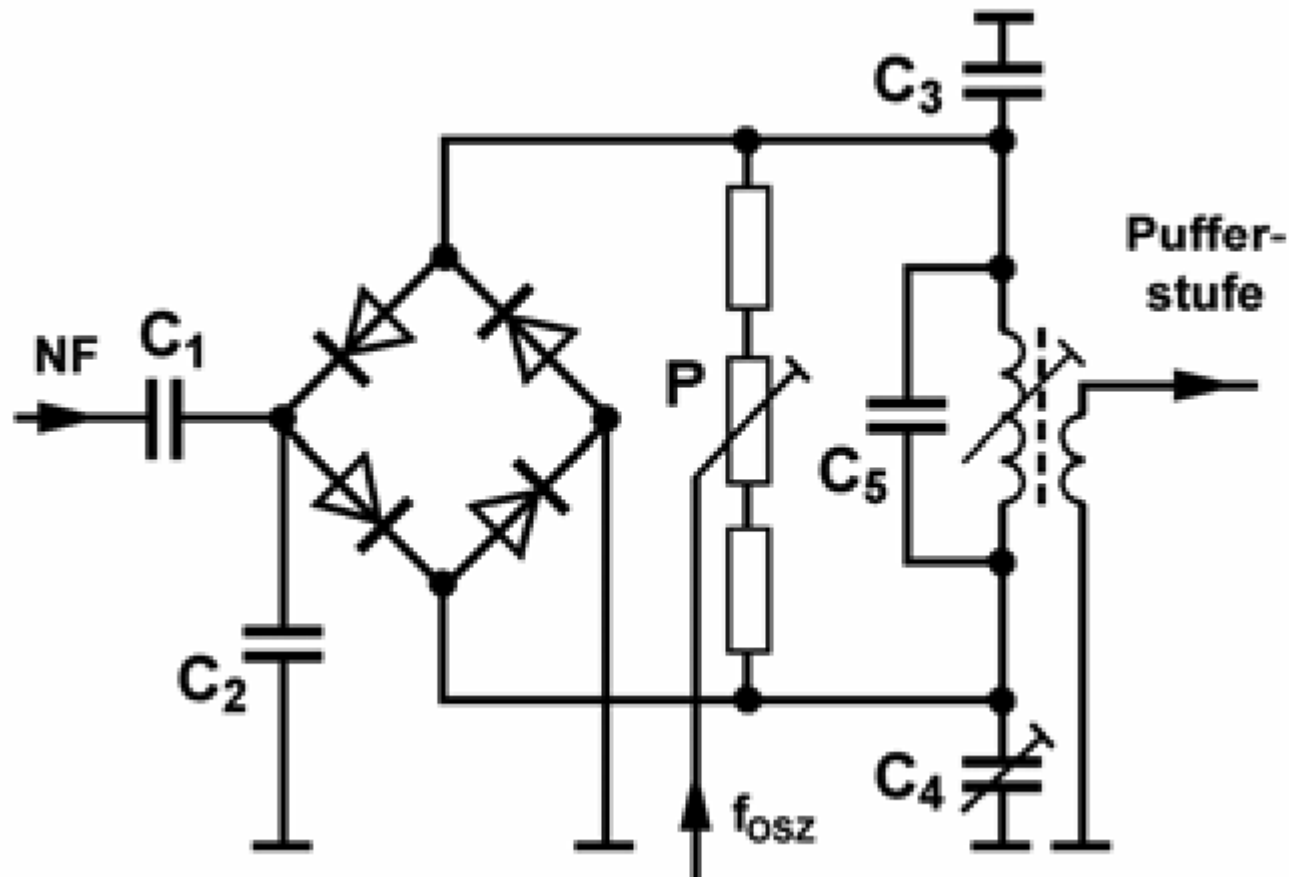


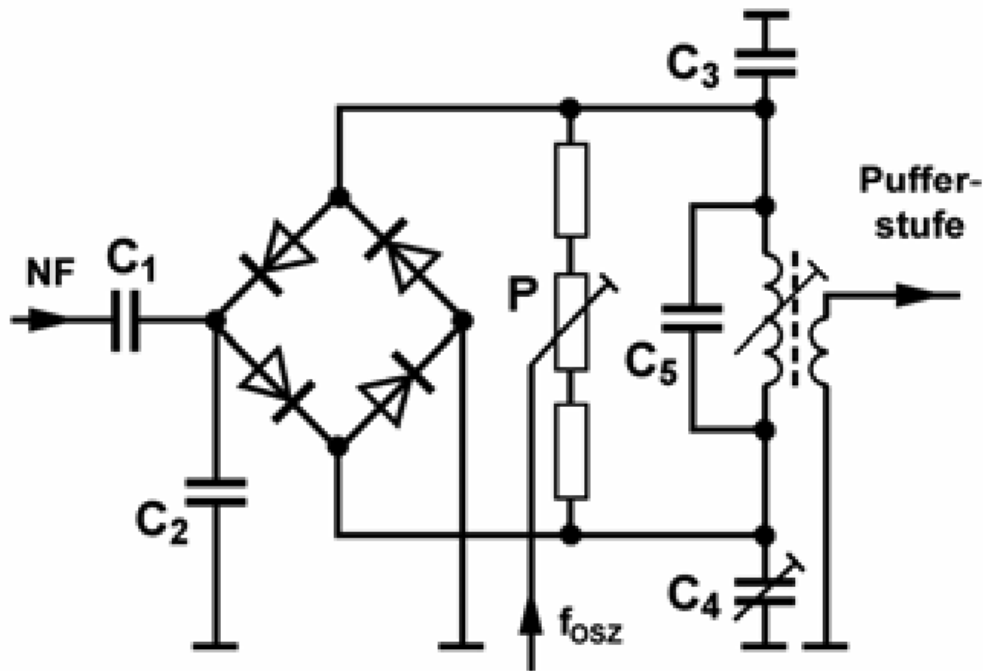
Als Zwischenprodukt der Filtermethode für SSB erzeugt ein Mischer zunächst ein Signal, das aus beiden Seitenbändern besteht.

(Anschließend entscheidet ein Filter, ob USB oder LSB produziert wird.)

Das Zwischenprodukt nennt die BNetzA „AM mit unterdrücktem Träger“.

Realer Schaltmischer / Modulator für „AM mit unterdrücktem Träger“





Mit P und C_4 stellt man Symmetrie her für die **Trägerunterdrückung**.

Das Osz-Signal soll nicht zur Pufferstufe!

Bonusmaterial: Erklärung der Funktionsweise:

Es schalten im Diodenquadrat gegenüberliegende Dioden gleichzeitig durch.

Je nach Polarität des Osz-Signals wird mal die NF mit C_3 verbunden und Masse mit C_4 , mal umgekehrt.

CW-Demodulation = A1A-Demodulation

Um ein Morsesignal zu demodulieren, mischt man mit einem BFO-Signal, das z.B. 800 Hz höher oder tiefer liegt.

Das Mischprodukt $A - B$ liegt dann bei 800 Hz und ist hörbar.

„BFO“ = „beat frequency oscillator“

CW-Demodulation

Bonusmaterial:

Jeder SSB-Empfänger ist unmittelbar für CW-Empfang einsetzbar, indem er z.B. 800 Hz höher (LSB-Empfänger) oder tiefer (USB-Empfänger) als die CW-Frequenz eingestellt wird.

Komische Frage zu BFO für A1A-Empfang

Frage TF420:

Welchem Zweck dient ein BFO
in einem Empfänger?

Die BNetzA hält für richtig:

Zur Trägererzeugung,
um A1A-Signale hörbar zu machen.

„Um A1A-Signale hörbar zu machen“ - stimmt.

Aber „Zur Trägererzeugung“? Was soll das bedeuten?

Die BFO-Frequenz liegt ja gerade z.B. 800 Hz neben
dem (auf die ZF verschobenen) A1A-Träger.

FM

FM-Ausgangsleistung

Bei FM wird die Frequenz moduliert.

Bei FM wird die Leistung nicht moduliert.

Die Leistung ändert sich also nicht
in Abhängigkeit von der Modulation.

FM-Hub = Lautstärke

- Lauter sprechen \Rightarrow mehr Hub
- Leiser sprechen \Rightarrow weniger Hub (TG401, TG510)
- Mehr Hub \Rightarrow mehr Krach aus dem Lautsprecher
- Weniger Hub \Rightarrow weniger Krach

Preemphasis / Deemphasis

Man hebt vor dem Senden die hohen Töne an (macht sie lauter): Preemphasis.

Nach dem Empfang macht man dieses Anheben wieder rückgängig: Deemphasis.

Grund:

Insgesamt erhöht dieses System den Signal/Rausch-Abstand.

(Für den gleichen Signal/Rausch-Abstand braucht eine hohe zu übertragende Frequenz mehr Hub als eine niedrige.)

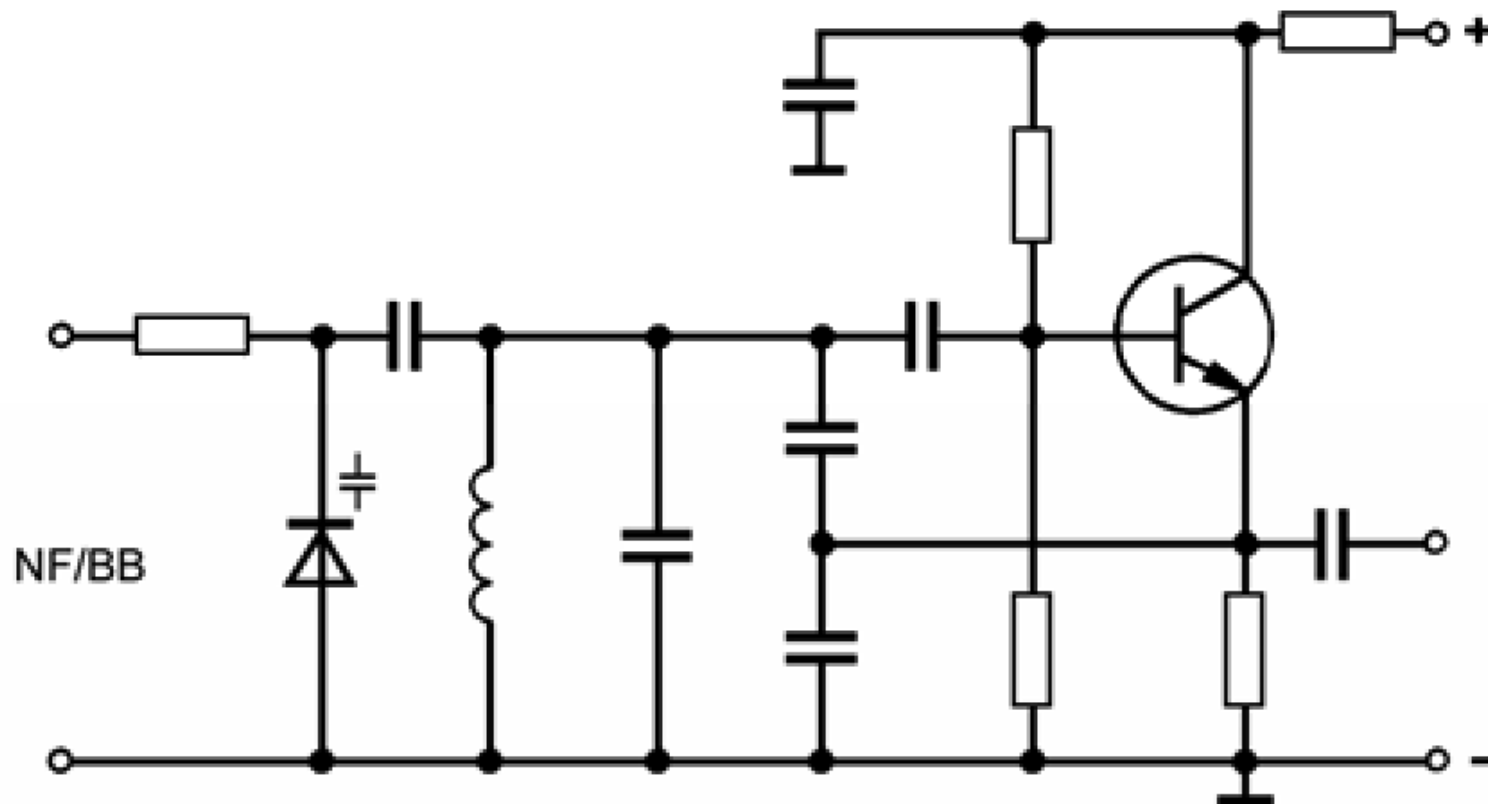
Unterschied „Phasenmodulation“ „Frequenzmodulation“

- Weitgehend akademisch.
- Modulierte ich einen einzelnen Sinuston, sind FM und PM nicht zu unterscheiden.
- Wenn ich dagegen eine *Gleichspannung* in einen Modulator gebe (und halte), bleibt bei FM die Frequenz dauerhaft erhöht oder erniedrigt, bei PM nicht.

Empfindlichkeit FM-Modulator
wird angegeben in

kHz / V

FM-Modulator



Klassische Oszillatorschaltung.

Kapazitätsdiode verstimmt den Schwingkreis \Rightarrow Modulation.

FM oder PM? Gleichspannung ergibt dauernde Verstimmung \Rightarrow FM.

Quelle: BNetzA Fragenkatalog, Frage TD514

Das geht sogar mit Quarz.

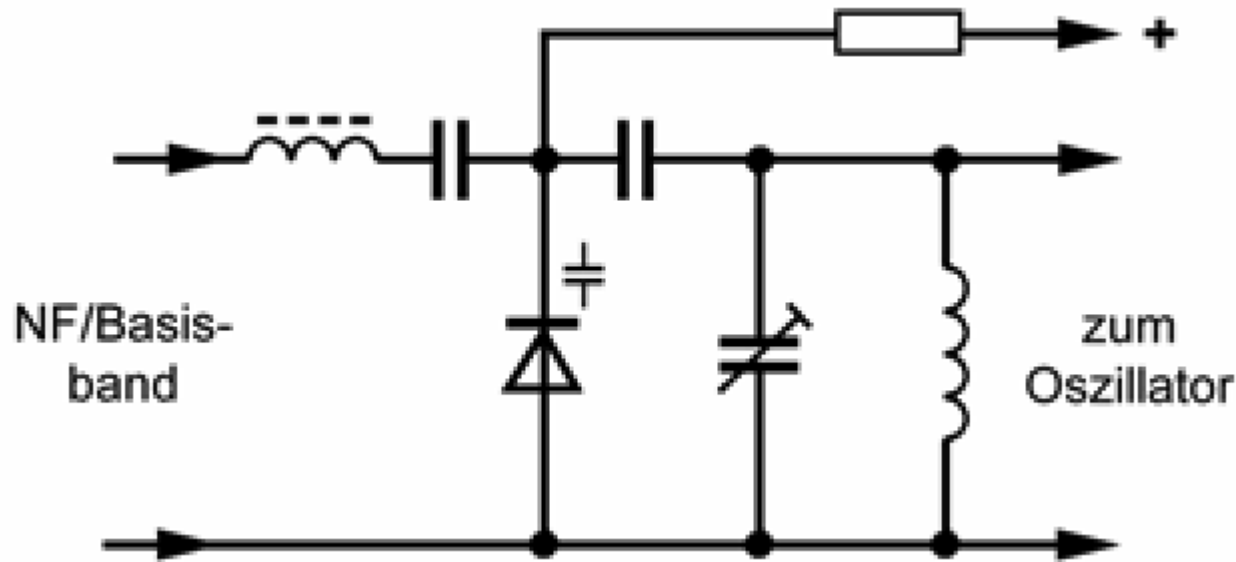
TE208:

Die Änderung der Kapazität einer über einen Quarzoszillator angeschalteten Varicap-Diode stellt eine Möglichkeit dar

Richtige Antwort:

Frequenzmodulation zu erzeugen.

PM-Modulator (Ausschnitt)



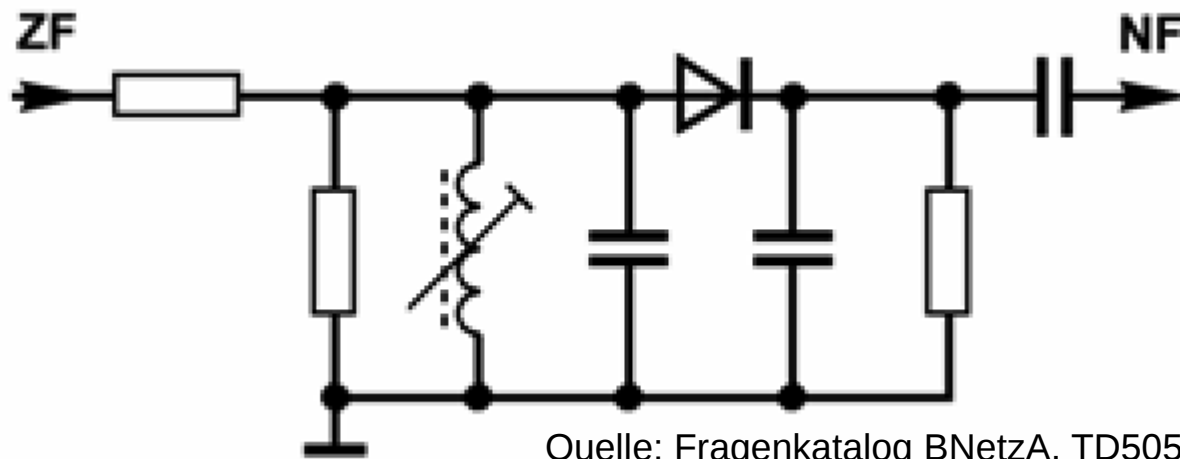
Quelle: BNetzA Fragenkatalog, Frage TG212

Die Diode (richtigste Antwort:) beeinflusst die Resonanzfrequenz des Schwingkreises in Abhängigkeit von den Frequenzen im Basisband und moduliert so die Oszillatorfrequenz.

FM-Demodulation

Flankendiskriminator

Ein simpler AM-Demodulator mit absichtlich etwas neben die Frequenz abgestimmtem Schwingkreis kann FM demodulieren.

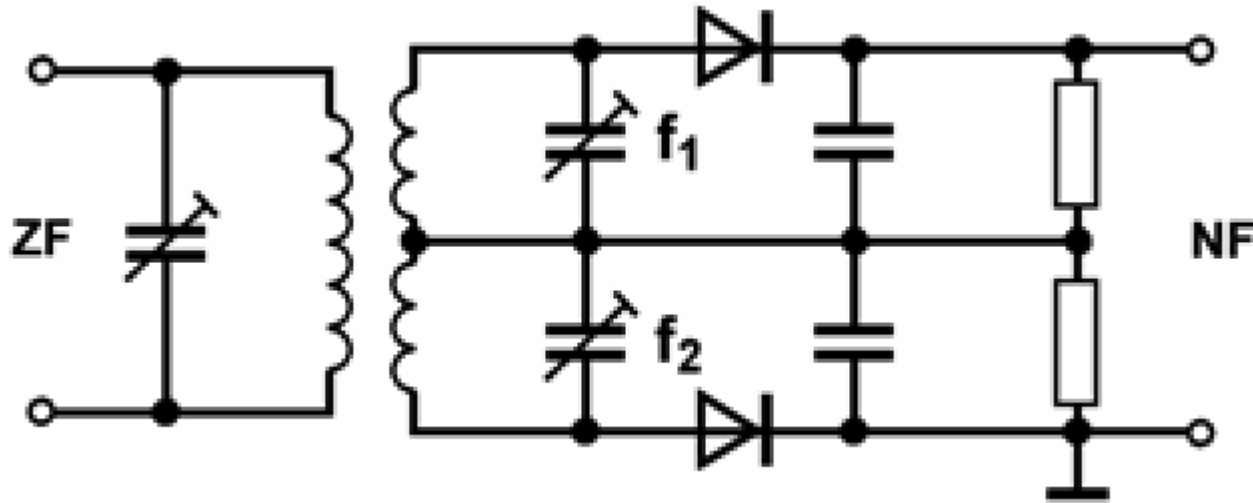


Quelle: Fragenkatalog BNetzA, TD505

Momentane ZF
näher an Resonanz:
Höhere Spannung.
Weiter weg:
Niedrigere Spannung.

- FM-Träger auf der Flanke des Schwingkreises – daher „Flankendiskriminator“.
- Der parallele Widerstand verschlechtert die Schwingkreisgüte und verbreitert die Flanke. (Würde man bei AM nicht machen).

Gegentakt-Flankendiskriminator



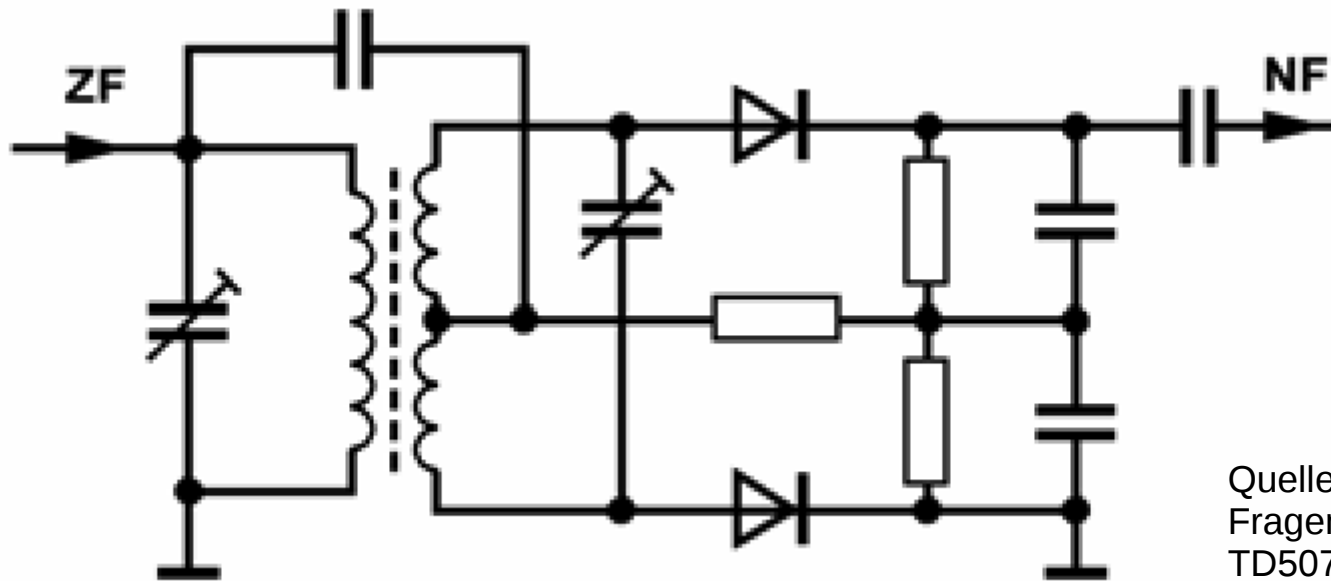
Quelle: Fragenkatalog BNetzA, TD506

Verdopplung des gleichen Prinzips.

Der eine Schwingkreis ist etwas oberhalb,
der andere etwas unterhalb
der FM-Trägerfrequenz eingestellt.

Die erzeugten Spannungen arbeiten gegeneinander.

Phasendiskriminator



Quelle:
Fragenkatalog BNetzA,
TD507

- Diesmal ist der Schwingkreis (rechts) auf die Trägerfrequenz abgestimmt.
- Es ist nur ein Schwingkreis an der Demodulation beteiligt.
- Das ZF-Signal wird außerdem auf die Mittenanzapfung gegeben.
- Die Schwingkreisspannung ist z.B. oben um $+90^\circ$ und unten um -90° phasenverschoben zur in die Mitte eingespeisten. (Oder umgekehrt?)
- Bei Verstimmung aus seiner Resonanz ändern sich die Phase im Schwingkreis. Z.B. um $+10^\circ$, das gibt dann oben $+100^\circ$ und unten -80° .
- Die Mittelspannung und die Schwingkreisspannung arbeiten dann oben mehr gegeneinander, unten mehr miteinander.

Begrenzerverstärker

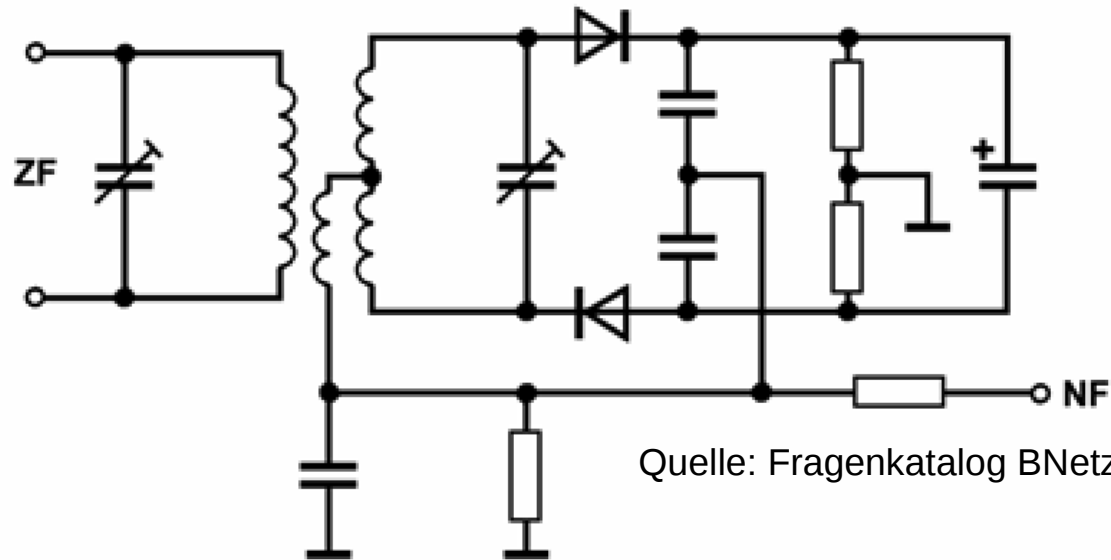
Alle bisher vorgestellten FM-Demodulatoren liefern lautere Signale bei höherer Feldstärke.

Das ist unerwünscht bei schwankenden Feldstärken (z.B. im Fahrzeug).

Man benutzt daher Begrenzerverstärker.

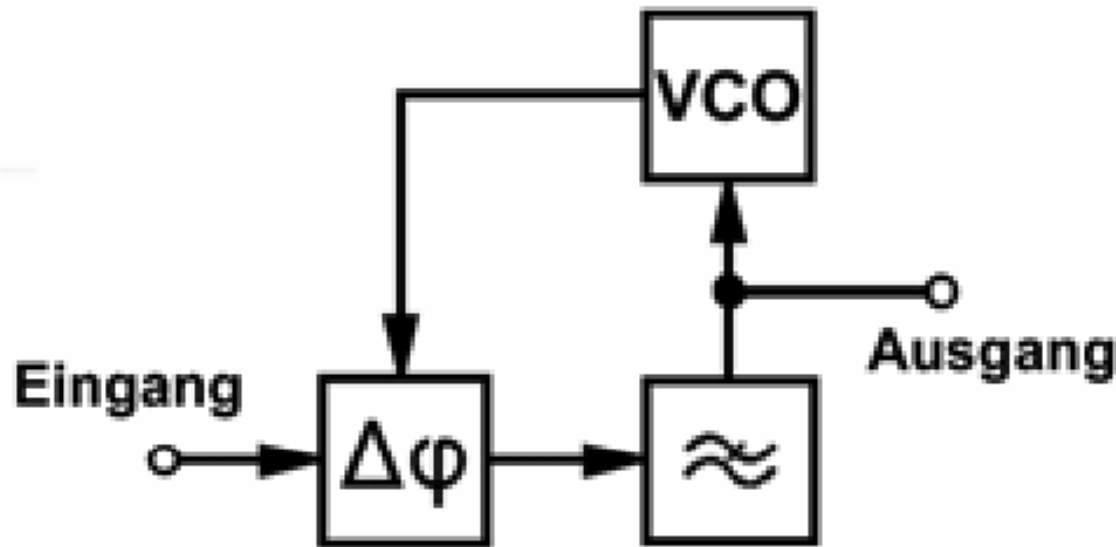
Das sind Verstärker, die (ab einem gewissen Eingangspegel) absichtlich in die Begrenzung gehen (also übersteuern) und am Ausgang ein begrenztes Signal konstanter Amplitude abgeben.

Ratiodetektor



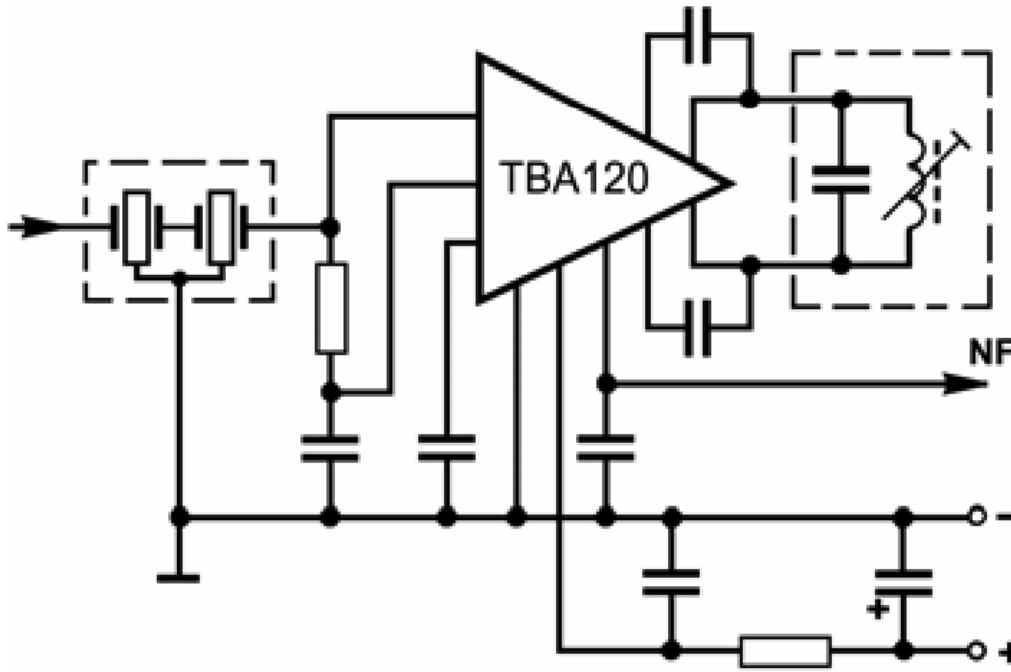
- Grundsätzliche Wirkungsweise analog Phasendiskriminator.
- Einspeisung des 90° versetzten Signals über zusätzliche Wicklung statt Kondensator.
- Die beiden Dioden arbeiten wieder gegeneinander, auch wenn es zunächst nicht so aussieht.
- Ein großer (Elektrolyt-)Kondensator sorgt dafür, dass die Summe der beiden von den Dioden gleichgerichteten Spannungen sich nicht schnell ändern kann.
- Nur ihr Verhältnis zueinander kann der Modulation folgen.
- Das macht den Ratiodetektor unempfindlicher gegenüber AM.

PLL-FM-Demodulator



- Eine PLL stellt einen Regelkreis dar.
- Die Frequenz des „voltage controlled oscillator“ folgt der des Eingangssignals (Ziel der Regelung).
- Die benötigten anderen Elemente sind Phasenvergleicher und Regel-Tiefpassfilter.
- Ändert sich die Frequenz am Eingang, so wird der VCO zur neuen Frequenz gesteuert.
- Die Steuerspannung gibt Auskunft über die Frequenzänderung.

Denksportaufgabe



- Am Eingang ein Quarzfilter, vermutlich ein ZF-Filter.
- Am Ausgang „NF“, also handelt es sich um einen Demodulator.
- Der Demodulator benutzt einen abstimmbaren Schwingkreis.

- Ein *Quarzfilter* würde man nicht mit einem *Schwingkreis-BFO* kombinieren. Also ist TBA120 vermutlich kein Mischer / Produktdetektor.
- Also handelt es sich um einen FM-Demodulator.

Herzlichen Dank!