# Inhoudsopgave

12 Radio: modulatie en zenders ..... 12-3
12.1 Wat leer je in dit hoofdstuk ..... 12-3
12.2 Analoge modulatie ..... 12-3
12.2.1 Wat is modulatie? ..... 12-3
12.2.2 Amplitudemodulatie, AM ..... 12-4
12.2.3 Het frequentiespectrum van AM ..... 12-7
12.2.4 De bandbreedte van een AM-signaal ..... 12-7
12.2.5 Het vermogen van een AM-signaal, Peak Envelope Power (PEP) ..... 12-8
12.2.6 Kan die informatieloze draaggolf niet weg? Jawel! ..... 12-9
12.2.7 Enkelzijbandmodulatie (EZB): nog zuiniger ..... 12-10
12.2.8 Morse-telegrafie (CW) ..... 12-11
12.2.9 Frequentie- en fasemodulatie (FM en PM) ..... 12-12
12.3 Digitale modulatie ..... 12-17
12.3.1 Inleiding ..... 12-17
12.3.2 Transmissiesnelheid: de twee eenheden bps en Bd ..... 12-17
12.3.3 Amplitude Shift Keying (ASK) ..... 12-17
12.3.4 Frequency Shift Keying (FSK) ..... 12-18
12.3.5 Phase Shift Keying (PSK) ..... 12-19
12.3.6 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) ..... 12-21
12.3.7 Overzicht van tot nu toe behandelde modulatevormen ..... 12-22
12.3.8 Enkele andere vormen van digitale modulatie in het amateurverkeer ..... 12-22
12.3.9 Pariteit: nog een manier van foutcontrole ..... 12-23
12.4 Zenders en modulatoren ..... 12-24
12.4.1 Een zender zonder modulator ..... 12-24
12.4.2 Mengschakelingen en het maken van AM, DZB en EZB ..... 12-25
12.4.3 Schakelingen voor CW ..... 12-34
12.4.4 Schakelingen voor FM ..... 12-34
12.4.5 Schakelingen voor PM ..... 12-35
12.5 De decibel en zenders ..... 12-36

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

12.5.1 De basis..... 12-36
12.5.2 Rekenen met dB..... 12-36
12.5.3 De dB bij spanningen en stromen in plaats van bij vermogens..... 12-37

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

# 12 Radio: modulatie en zenders

## 12.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

Modulatie maakt dat een laagfrequent signaal (LF) als spraak of tekst op een hoogfrequent signaal (HF) van zender naar ontvanger kan “meeliften”. Zonder modulatie geen radio.

Modulatie verpakt het over te brengen LF-signaal in het HF-signaal. Samen worden ze één HF-signaal. Modulatie kan analoog en digitaal. We behandelen eerst analoge modulatievormen, daarna digitale.

Analoge modulatie omvat amplitudemodulatie (AM) en de daarvan afgeleide vormen dubbelzijband (DZB) en enkelzijband (EZB), CW (morsetelegrafie met onderbroken draaggolf), frequentiemodulatie (FM) en fasemodulatie (PM). Bij CW gaat het om tekst. Bij de andere modulatievormen gaat het om geluid, meestal spraak. Ook digitale modulatievormen kunnen meestal met analoge modulatie worden overgebracht.

De digitale modulatievormen vormen tegenwoordig een omvangrijk gezelschap. Er komen er nog steeds bij. We beperken ons tot de vormen die bij het examen worden gevraagd. Je maakt kennis met de basisbegrippen baud en bps (bits per seconde). Daarna volgen ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) en begrippen die bij digitale modulatievormen horen.

Daarna volgen zenders en schakelingen voor analoge modulatievormen, gevolgd door een korte paragraaf met iets meer informatie over de decibel (dB) dan in vorige hoofdstukken.

## 12.2 Analoge modulatie

### 12.2.1 Wat is modulatie?

Laagfrequente informatie (LF) zoals spraak kan niet zonder meer via een antenne worden uitgezonden om op afstanden van enkele tot duizenden km te worden ontvangen en verstaan. Daarom moet ze meereizen met een hogere frequentie waarmee dat wel kan. Die hoge frequentie heet *draaggolf*. Het LF-signaal wordt verpakt in de draaggolf. Dat heet *moduleren*. Een LF-signaal dat een draaggolf moduleert, wordt aangeduid met *modulatie*.

Voor verstaanbare spraak gebruikt men frequentiegebied van 300–2700 Hz of 300-3000 Hz. Lagere frequenties voegen aan de verstaanbaarheid weinig toe, hogere ook niet. Bij de zendamateur staat verstaanbaarheid centraal. Wat spraakmodulatie betreft beperken we ons daarom tot het gebied van 300-3000 Hz.

Naast spraakmodulatie kan ook tekst worden overgebracht. Op Morsetelegrafie (CW) na gaat het daarbij om digitale modulaties. Die komen in de volgende paragraaf aan de orde.

We behandelen de volgende soorten modulatie

- Amplitudemodulatie (AM) en daarvan afgeleide modulatiesoorten

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

- Morse- telegrafie (CW)
- Frequentie- en fasemodulatie

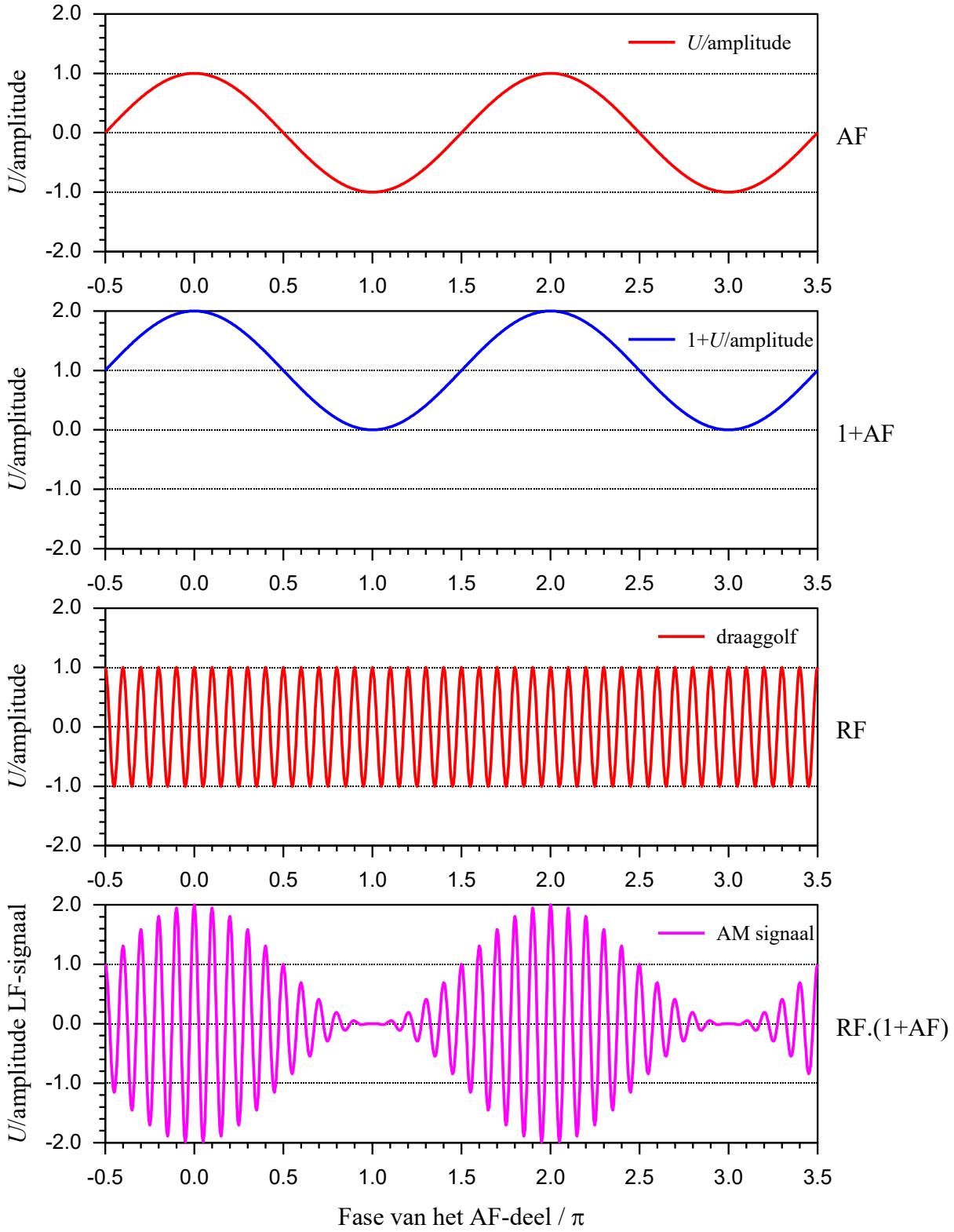
### 12.2.2 Amplitudemodulatie, AM

Een ongemoduleerde draaggolf is niet meer dan een hoogfrequente wisselspanning of -stroom zonder dat er informatie in zit. Bij amplitudemodulatie (AM) varieert de amplitude van de draaggolf (HF, ook wel RF genoemd van RadioFrequent) met die van het audiosignaal (AF, audiofrequent).

Bij AM worden AF en HF wiskundig gezien met elkaar vermenigvuldigd. Bij een hoge momentele waarde van het AF hoort een grote amplitude van het HF en bij een lage momentele waarde van het AF een kleinere. De momentele waarde van het AF mag geen minteken hebben, want dan zou de amplitude van het HF ook een minteken krijgen. Negatieve amplitudes bestaan niet. De oplossing: tel eerst bij het AF de waarde van de maximale amplitude op en alle mintekens verdwijnen.

De gang van zaken zien we in Figuur 12.2-1. De verticale as geeft de signaalwaarde gedeeld door zijn amplitude, zodat AF en RF beide tussen +1 en -1 variëren. Zoals gezegd komt er bij het AF-bestanddeel vervolgens 1 bij. De horizontale as geeft de fase van het AF-deel (het modulerende signaal of kortweg *modulatie*) in eenheden $\pi$. Een 1 op de horizontale as betekent daarom 1.$\pi = \pi$.

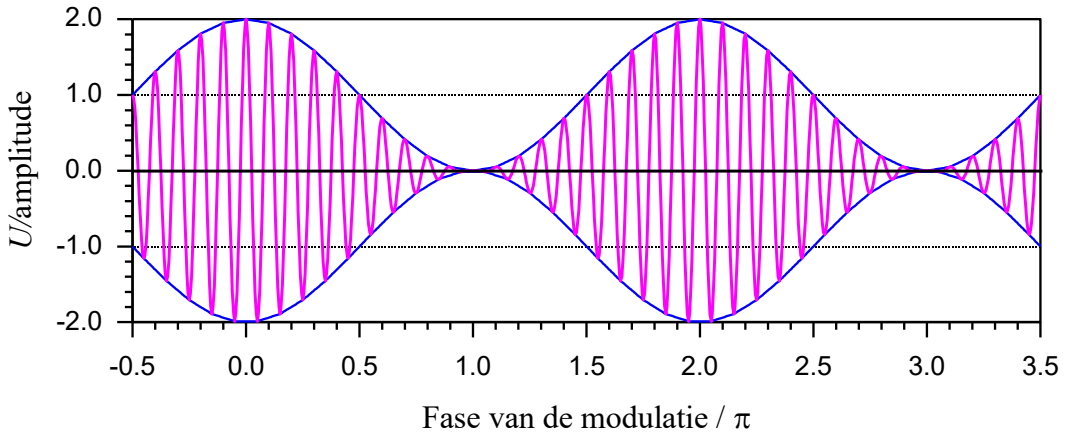
© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.2-1. Van audiosignaal (AF) via 1+AF en RF-draaggolf naar amplitudegemoduleerd RF-signaal.*

Trek nu een verbindingslijn langs de bovenkanten en de onderkanten van het AM-signaal. Dan ontstaan twee curven die samen de *omhullende* heten (Figuur 12.2-2).

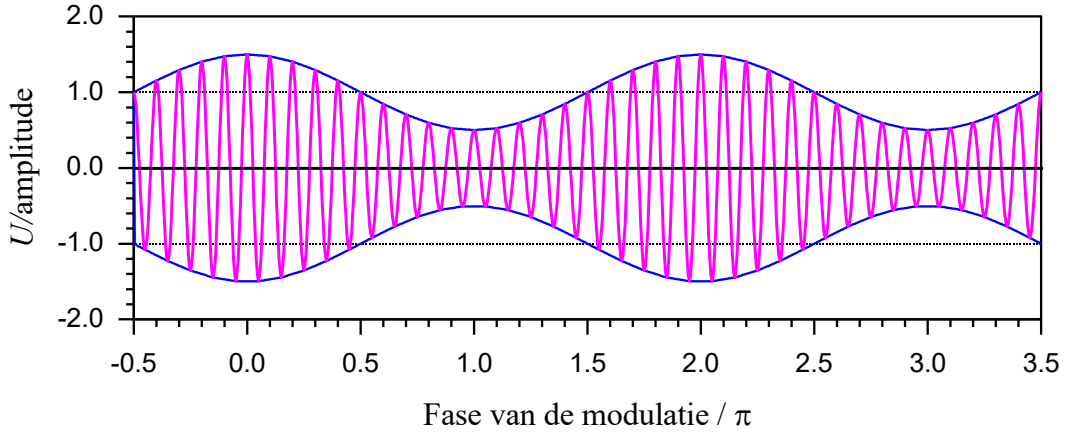
© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.2-2. AM-signaal uit Figuur 12.2-1 met omhullende (blauw). De vorm van de omhullende is dezelfde als die van het oorspronkelijke AF-signaal: één keer zoals in de tweede grafiek van Figuur 12.2-1 en één keer het spiegelbeeld ervan.*

De omhullende heet in het Engels *envelope*. De vorm is die van het modulerende signaal, één keer rechtop en één keer in spiegelbeeld.

In Figuur 12.2-2 hebben de curven van de omhullende een even grote amplitude als de oorspronkelijke draaggolf. Kleiner kan ook, bijvoorbeeld de helft, zoals in Figuur 12.2-3.




*Figuur 12.2-3. AM-signaal als in Figuur 12.2-2, maar met een AF-signaal waarvan de amplitude die de helft is van dat in Figuur 12.2-2,*

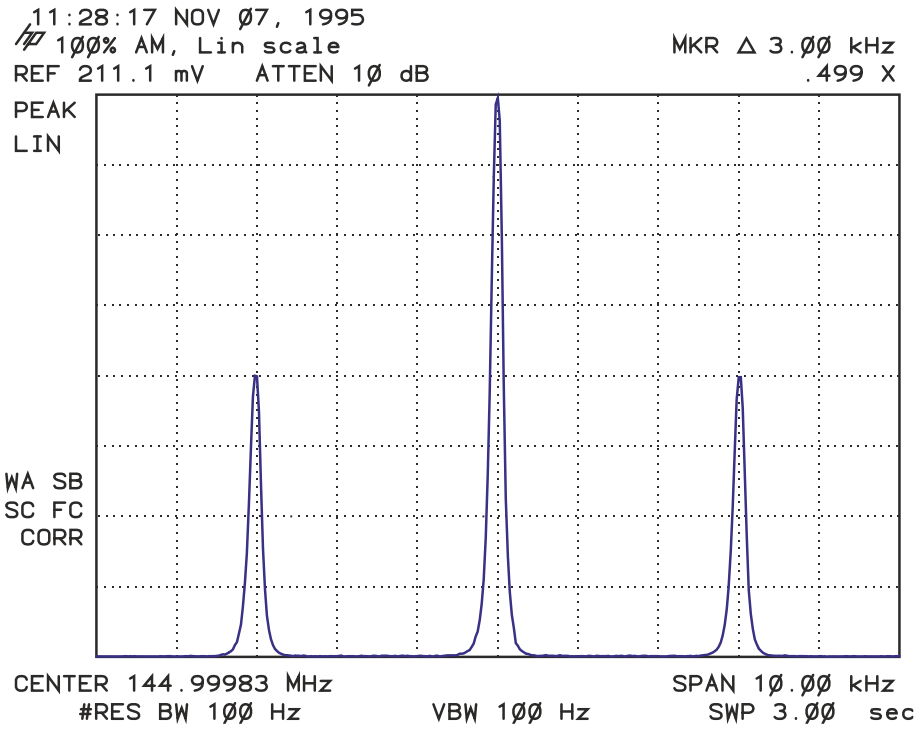
De amplitude van de gemoduleerde draaggolf varieert nu tussen 0,5 maal en 1,5 maal de amplitude van de oorspronkelijke draaggolf. $M$, de *modulatiediepte*, is de grootheid die dat beschrijft. $M$ is minimaal 0 en maximaal 1, of 0% en 100%. $M$ is de verhouding van de amplitudes van de oorspronkelijke draaggolf en de amplitude van het modulerende signaal. In Figuur 12.2-2 is $M = 1$, in Figuur 12.2-3 is $M = 0{,}5$. Pogingen om de modulatiediepte te vergroten tot boven de 100% leiden tot vervorming. Dat heet *overmodulatie*. $M = 0$ betekent dat er alleen een draaggolf en geen modulerend signaal is.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

### 12.2.3 Het frequentiespectrum van AM

Figuur 12.2-4 laat het frequentiespectrum zien van een draaggolf van afgerond 145 MHz, AM-gemoduleerd met één frequentie van 3 kHz. De modulatiediepte *M* is 1 (100%). Het spectrum omvat drie frequenties:

1. De draaggolffrequentie met amplitude in het midden,
2. Een zijband met de som van draaggolffrequentie en audiofrequentie en met de halve draaggolfamplitude rechts
3. Een zijband met het verschil van draaggolffrequentie en audiofrequentie en met de halve draaggolfamplitude links.



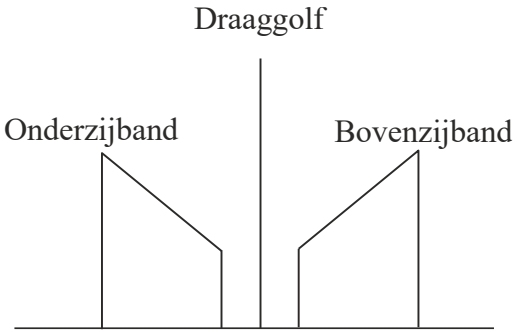

*Figuur 12.2-4. Spectrum van een AM-signaal op 145 MHz met zijbanden 3 kHz erboven en 3 kHz eronder. Als amplitudes van de draaggolf en die van het modulerend signaal even groot zijn (modulatiediepte M=1), is de amplitude van de zijbanden half zo groot (VRZA-cursus 1999, iets aangepast).*

De hoogte van elke piek staat voor de amplitude van de bijbehorende frequentie. De amplitude van elke zijbande is de helft van die van de draaggolf (midden). Het vermogen van elke zijband is een kwart (¼) van dat van de draaggolf., want vermogen is evenredig met het kwadraat van de amplitude. Bij AM met $M = 100\%$ zit de informatie dus in twee kwarten (= de helft) van het draaggolfvermogen. De draaggolf bevat geen informatie.

### 12.2.4 De bandbreedte van een AM-signaal

We zijn tot hier uitgegaan van een modulerend signaal dat bestaat uit 1 frequentie. Spraak bevat een heleboel frequenties tegelijk met elk hun eigen amplitude. Een AM-modulator levert van elke frequentie in het spraaksignaal twee gespiegelde zijbandfrequenties. Zo

ontstaan aan weerszijden van de draaggolf twee frequentiegebieden die elkaars spiegelbeeld zijn. Figuur 12.2-5 toont ze in gestileerde vorm.

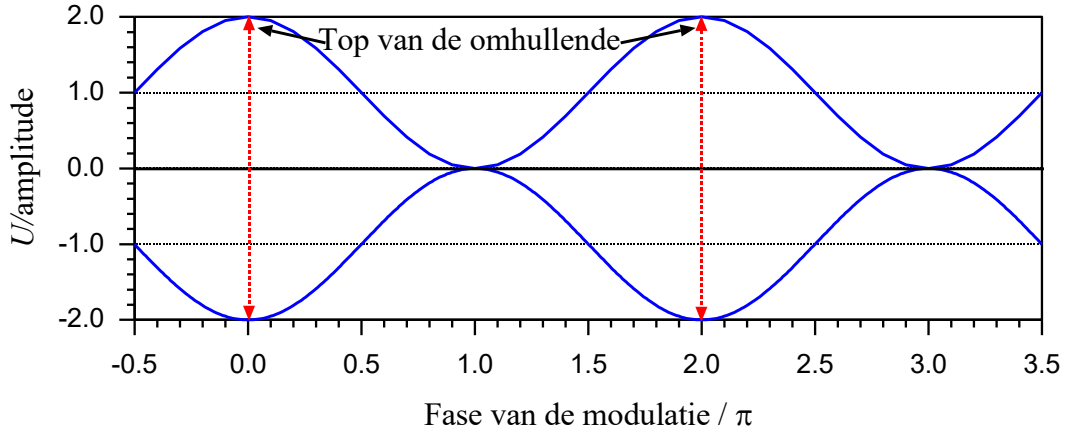



*Figuur 12.2-5. Gestileerd frequentiespectrum van een AM-signaal met audiomodulatie (VRZA-cursus 1999).*

De frequentiegebieden lopen van binnen naar buiten op. Dat toont waar de lage en hoge spraakfrequenties zitten. Hoe verder van de draaggolf, hoe hoger. Als de onderzijband zich uitstrekt tot 3 kHz onder de draaggolffrequentie en de bovenzijband tot 3 kHz erboven, dan is de bandbreedte van dit AM-signaal 6 kHz. ***De algemene regel bij AM: de bandbreedte is 2x de hoogste modulerende frequentie.***

### 12.2.5 Het vermogen van een AM-signaal, Peak Envelope Power (PEP)

Een gemoduleerd AM-signaal verandert steeds van amplitude. Het vermogen verandert mee. Daarom kun je bij AM niet spreken van "het" vermogen. De gangbare aanduiding is *PEP*, *Peak Envelope Power*. Dat is het gemiddelde vermogen van één sinusperiode van het gemoduleerde signaal, waarvan maximum en minimum samenvallen met de hoogste, resp. laagste waarde van de omhullende (Figuur 12.2-6, de rode gestippelde pijlen).




*Figuur 12.2-6. Vorm van de omhullende (envelope) bij een modulatiediepte M=1 (100%). Rode pijlen: plaats waar PEP optreedt.*

Bij een belasting $R$ geldt

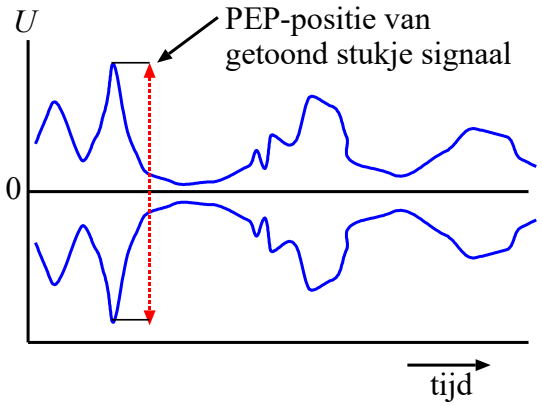
$$P_{PEP} = \frac{U_{eff}^2}{R} \qquad (12.2\text{-}1)$$

De spanning $U_{DG}$ van de draaggolf is bij een modulatiediepte $M = 1$ de helft van $U_{PEP}$. Dan geldt voor het draaggolfvermogen $P_{DG}$

$$P_{DG} = \frac{\left(\frac{1}{2}U_{eff}\right)^2}{R} = \frac{1}{4}P_{PEP} \qquad (12.2\text{-}2)$$

Het draaggolfvermogen is bij een modulatiediepte van 1 gelijk aan ¼ *PEP*. *PEP* is gelijk aan 4x het draaggolfvermogen. In getallen: bij een draaggolfvermogen $P_{DG}$ van 100 W is *PEP* gelijk aan 400 W als $M = 1$.

Bij een gemoduleerd spraaksignaal zijn er veel frequenties en amplitudes tegelijk. Het recept: vind het hoogste punt van de omhullende. Daar zit de PEP (Figuur 12.2-7).



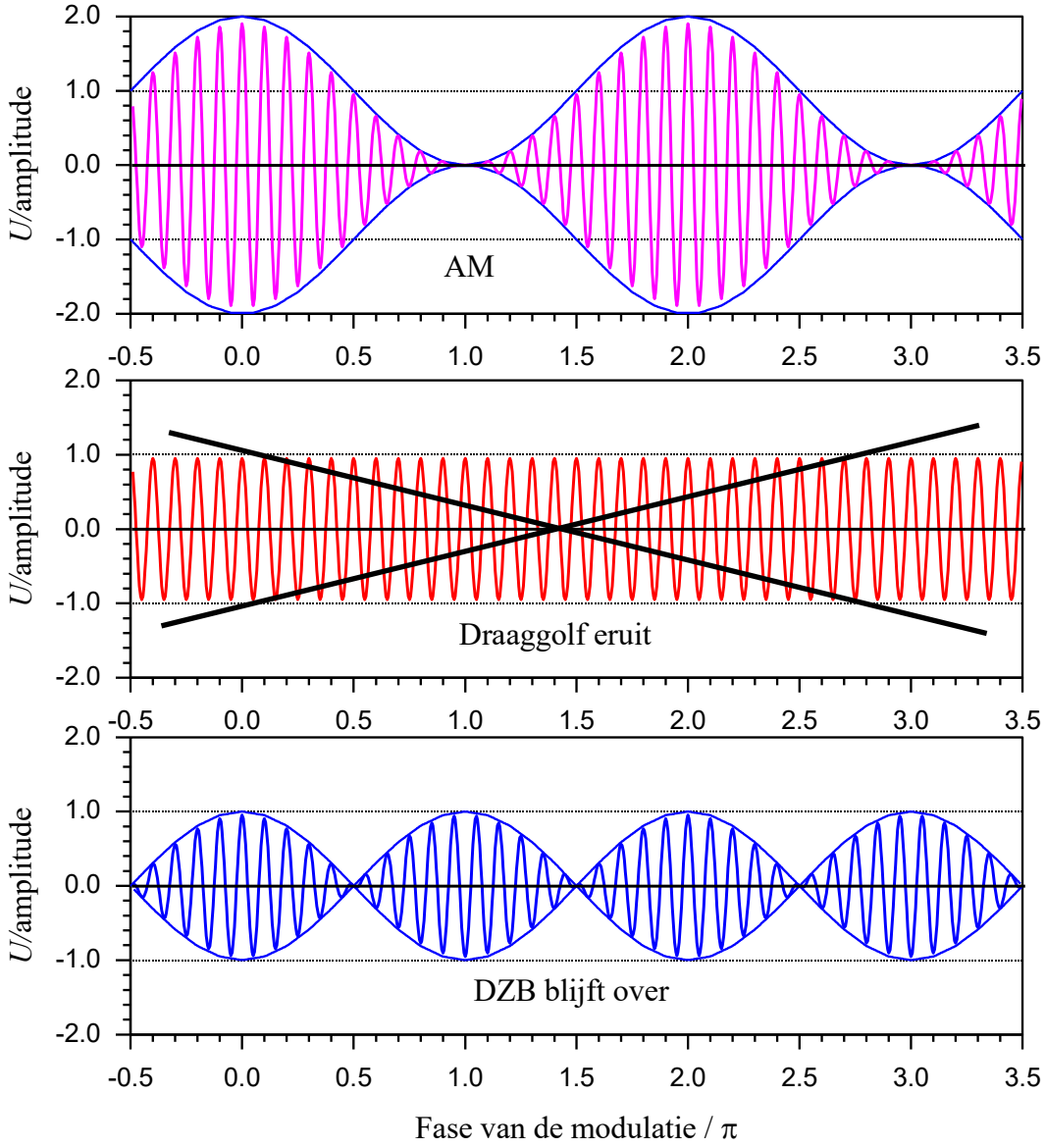

*Figuur 12.2-7. Positie van PEP-punt in een stukje AM-modulatie dat wat meer "uit het leven gegrepen" is dan in vorige grafieken.*

### 12.2.6 Kan die informatieloze draaggolf niet weg? Jawel!

We hebben gezien dat de vermogensverhouding onderzijband : draaggolf : bovenzijband gelijk is aan 1:4:1. De informatie zit in de zijbanden die maar half zoveel vermogen krijgen als de draaggolf.

Inderdaad kan de vermogen vretende draaggolf weg. Dan blijven de zijbanden over. Die modulatievorm heet *dubbelzijbandmodulatie*, afgekort DZB of in het Engels DSB ("double sideband"). Figuur 12.2-8 laat zien wat er gebeurt.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.2-8 Van AM naar DZB door verwijdering van de draaggolf.*

De twee zijbanden (DZB) blijven over. De grafiek van DZB (onder) ziet er anders uit dan die van AM-modulatie. De omhullende heeft twee keer zoveel maxima en minima in dezelfde tijd en zijn amplitude is de helft van die van het oorspronkelijke AM-signaal. De PEP van het DZB-signaal is daarvan dan ¼. De bandbreedte is dezelfde als bij AM.

### 12.2.7 Enkelzijbandmodulatie (EZB): nog zuiniger

Het kan nog zuiniger. De twee DZB-zijbanden zijn elkaars spiegelbeeld met dezelfde informatie. Dan kan er één weg. Nog eens 2x zo efficiënt en een gehalveerde bandbreedte en gehalveerde ruis als extraatje. Dat heet EZB (enkelzijband) of SSB (*single sideband*). Onder amateurs is de afkorting SSB gebruikelijk.

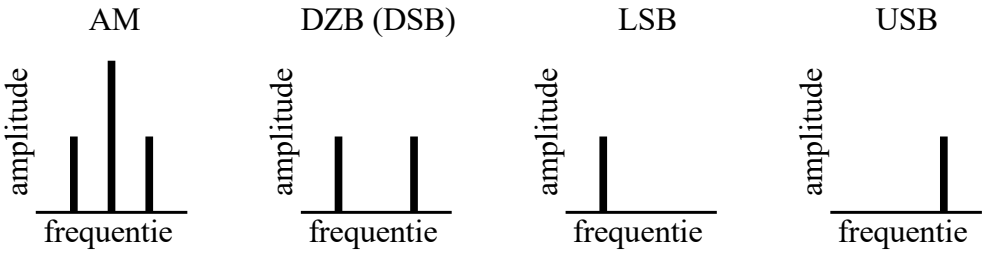
De frequentie van de bovenzijband is de som van de modulatiefrequentie en de oorspronkelijke draaggolffrequentie. De onderzijband is het verschil van die twee. De

amplitude van de modulatie zit in beide. Is er even geen LF, dan is er geen en in de praktijk nagenoeg geen signaal.

De bovenzijband heet vrijwel standaard USB, (*Upper Sideband*), niet te verwarren met een bepaald type computeraansluiting. De onderzijband heet LSB (*Lower Sideband*). Ze zijn gelijkwaardig. Per amateurband kan de voorkeur voor een van de twee verschillen. Bij een op USB ingestelde ontvanger is LSB onverstaanbaar. Omgekeerd geldt hetzelfde.

Het belangrijkste nadeel van AM en de AM-varianten is storinggevoeligheid. De meeste storingen, of ze nu uit een apparaat of uit de atmosfeer komen, zijn van het AM-soort.

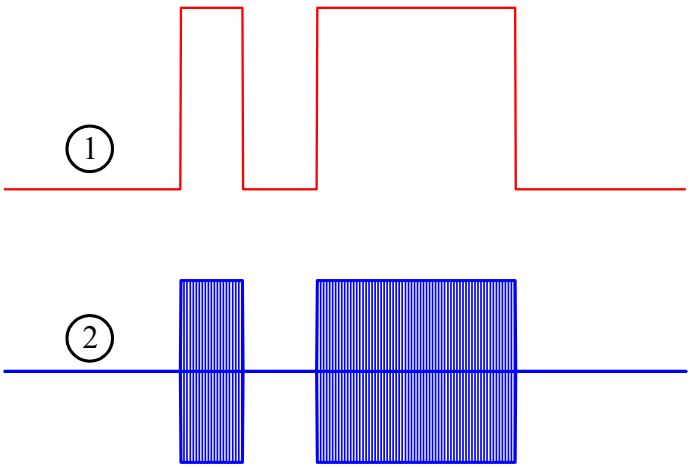
Ter afronding een "familieportret" van de "AM-familie" (Figuur 12.2-9)




*Figuur 12.2-9. "Familieportret" van het spectrum van AM en zijn varianten.*

### 12.2.8 Morse-telegrafie (CW)

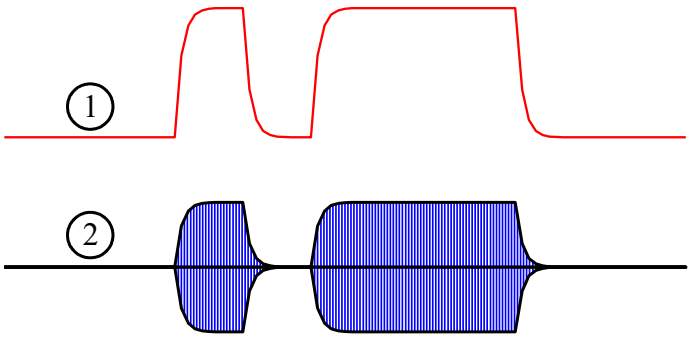
Morse-telegrafie is de oudste manier om berichten via radio over te brengen. Onder amateurs heet dit *CW* van *Continuous Wave*. CW betekent in de wereld weinig meer, maar onder amateurs leeft het volop. Een zender is met weinig onderdelen te maken en met weinig vermogen kunnen grote afstanden worden overbrugd. CW werkt alleen voor tekst. De modulatie is draaggolf aan, draaggolf uit. Meer niet. Figuur 12.2-10 laat het zien.




*Figuur 12.2-10. Signaalvorm bij morse-telegrafie (CW). (1): bron (seinsleutel); (2) gemoduleerd signaal. De figuur toont de letter a.*

De figuur toont de letter “a” in morseschrift. Een ontvanger maakt er een korte en een lange toon van.

De abrupte overgang van draaggolf naar geen draaggolf kan storing veroorzaken, zowel op amateurbanden als bij de buren. De storingen heten *sleutelclicks*. De scherpe overgang wordt gedempt via een laagdoorlaatfilter in het circuit van de seinsleutel. Dan ziet het beeld van Figuur 12.2-10 er ongeveer uit als in Figuur 12.2-11.




*Figuur 12.2-11. Signaalvorm bij CW met filtering. (1) bron; (2) gemoduleerd signaal.*

Een voordeel van CW is de kleine bandbreedte. Filters voor CW in zendontvangers hebben meestal een bandbreedte van ongeveer 500 Hz, nog geen 20% van de bandbreedte van een gebruikelijk EZB-filter (circa 2700 Hz). Dat leidt tot overeenkomstig minder ruis.

### 12.2.9 Frequentie- en fasemodulatie (FM en PM)

#### De golfvorm, frequentiezwaai

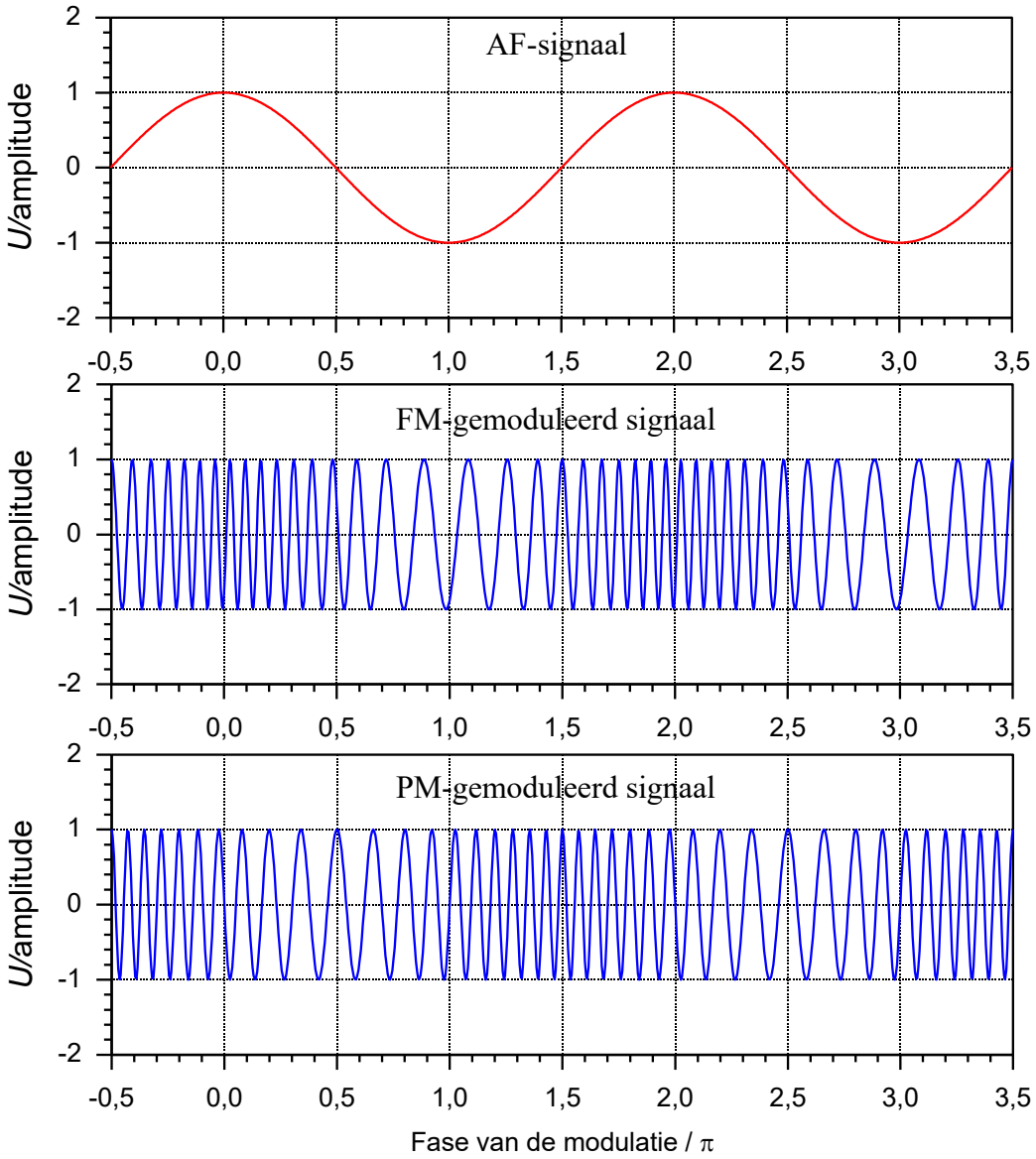
FM en PM moduleren niet de hoogte, maar de breedte van elke draaggolfperiode. Dat is de periodetijd *T*. Als je *T* van de draaggolf laat afhangen van de momentele waarde van het modulerende signaal, varieer je de frequentie *f*. Dat is frequentiemodulatie (FM).

Bij fasemodulatie (PM) hangt de draaggolffrequentie niet af van de hoogte van de momentele waarde, maar van de snelheid waarmee de momentele waarde verandert. De fase van de draaggolf moet de veranderende momentele waarde van de modulatie als het ware “bijsloffen”.

Beide modulatievormen zijn afgebeeld in Figuur 12.2-12.

Voor wie zich afvraagt waar die “P” in PM vandaan komt: de Engelse benaming is Phase Modulation. Omdat in het Nederlands Frequentie en Fase allebei met een F beginnen, is de Engelse afkorting PM ook in ons land de standaard geworden. Heel lang geleden werd in het Nederlands het woord *fase* trouwens ook als *phase* gespeld.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.2-12. FM en PM van eenzelfde AF-signaal. FM heeft de hoogste frequentie bij de toppen en de laagste bij de dalen van het AF-signaal. PM heeft de hoogste frequentie bij de opgaande flanken van het AF-signaal en de laagste bij de dalende flanken.*

Wie Figuur 12.2-12 bekijkt, ziet dat FM en PM weinig verschillen. Dat gaat zo ver, dat het signaal van een PM-zender die met een constante toon wordt gemoduleerd, via metingen niet te onderscheiden is van een FM-zender die met diezelfde toon wordt gemoduleerd. Dat kan pas als de frequentie $f_i$ van de modulerende toon verandert.

De frequentiezwaai $\Delta f$ is het verschil tussen de draaggolffrequentie $f_d$ en de hoogste momentele frequentie $f_{max}$:

$$\Delta f = f_{max} - f_d \qquad (12.2\text{-}3)$$

De modulatie-index *m* is de verhouding van de frequentiezwaai en de frequentie $f_i$ (met de ***i*** van ***i****nformatie*) van het modulerende signaal, de bovenste grafiek in Figuur 12.2-12.

$$m = \frac{\Delta f}{f_i} \qquad (12.2\text{-}4)$$

De zwaai verandert bij PM recht evenredig met $f_i$. Een PM-zender werkt dan ook met een constante modulatie-index.

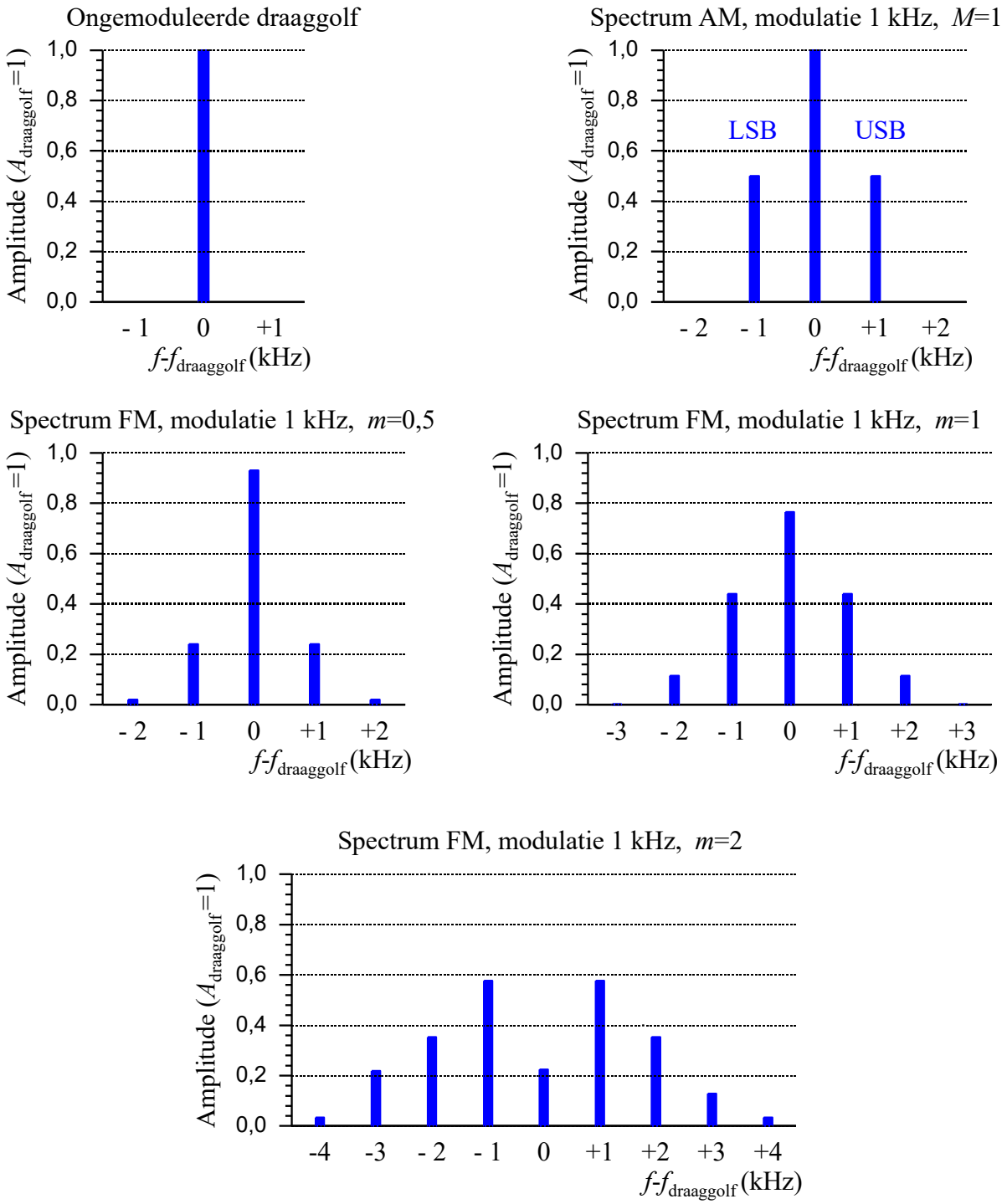
Het verschil tussen FM en PM is in de praktijk zo klein, dat een FM-signaal prima met een PM-ontvanger of omgekeerd kan worden ontvangen. In de praktijk wordt tussen beide modulatievormen dan ook vaak geen onderscheid gemaakt.

### Bandbreedte

De frequentieverandering in een FM- of PM-gemoduleerd signaal houdt een afwijking van de zuivere sinusvorm in. Dat betekent zijbanden. Het spectrum omvat de draaggolffrequentie met aan weerskanten frequenties op afstanden die gehele veelvouden zijn van de modulerende frequentie. Een draaggolf van bijvoorbeeld 1000 kHz die met 1 kHz is gemoduleerd, levert de draaggolf zelf, frequenties van 1001 kHz, 1002 kHz, 1003 kHz, enz. en 999 kHz, 998 kHz, 997 kHz, enz. Hoe verder van de draaggolf, des te kleiner wordt hun amplitude. In theorie gaat dat oneindig ver door, maar in werkelijkheid zijn de verste zo klein dat ze in de ruis verdwijnen. De modulatie-index *m* bepaalt het aantal zijbanden waarmee men rekening moet houden.

Figuur 12.2-13 toont enkele spectrumgrafieken. Een AM-spectrum dient als vergelijking.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.2-13. Spectra van een draaggolf (linksboven), een AM-signaal met 100% modulatie (rechtsboven), FM-modulatie met modulatie-index m=0,5 (midden links), m=1 (midden rechts) en m=2 (onder). Alle modulerende frequenties zijn 1 kHz. Waar FM staat, mag je ook PM lezen.*

De FM/PM-grafieken laten zien dat bij toenemende *m* het spectrum breder wordt. Een hogere modulatie-index en een hogere modulatiefrequentie leiden daarom beide tot een grotere bandbreedte. De bandbreedte van een FM- of PM-signaal is groter dan die van een AM-signaal, laat staan die van een EZB-signaal.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Bij FM en PM kun je niet zeggen, waar het spectrum eindigt, want het eindigt niet. Daarom wordt de bandbreedte ervan meestal gedefinieerd als het frequentiegebied waarbinnen 99% van het uitgezonden vermogen zit. Dat betekent dat 1% = -20 dB buiten deze "bandbreedte" ligt. Die 20 dB zit aan weerskanten van het signaal. Per kant is dat -23 dB. Een vuistregel voor de bandbreedte $B$ bij een $m$ die niet veel groter is dan 1, is

$$B \approx 2(f_i + \Delta f) \qquad (12.2\text{-}5)$$

Dat is hetzelfde als

$$B \approx 2f_i\left(1 + \frac{\Delta f}{f_i}\right) = 2f_i(1+m)$$

We geven **een voorbeeld met getallen**: Op amateurbanden wordt meestal een hoogste audiofrequentie $f$ gehanteerd van 3 kHz. Als de maximale frequentiezwaai, of kortweg *zwaai*, gelijk is aan die 3 kHz, dan is $m$=1 en vinden we voor $B$:

$$B \approx 2f_i(1+m) = 2.3.(1+1)\text{ kHz} \approx 12\text{ kHz}$$

Voor $m$ = 0,5 wordt dat

$$B \approx 2f_i(1+m) = 2.3.(1+0{,}5)\text{ kHz} \approx 9\text{ kHz}$$

Er zijn examenvragen die hierop ingaan. Verwissel het antwoord niet met dat voor AM en DZB (beide 6 kHz) of EZB (SSB): bij een $f_i$ tussen 300 Hz en 3 kHz is $B$ = 2,7 kHz !

Een FM-ontvanger moet die grote FM- of PM-bandbreedte kunnen verwerken. Maken we de bandbreedte te groot voor de ontvanger, dan ontstaat bij ontvangst vervorming.

Bij FM en PM is de amplitude van het totale gemoduleerde signaal constant. Kijk maar naar Figuur 12.2-12. Bij AM en daarvan afgeleide modulatievormen is dat anders. Bij een EZB-signaal bijvoorbeeld, varieert de amplitude van het gemoduleerde signaal met die van het modulerende signaal, bij FM en PM niet. Het gevolg is dat FM of PM nauwelijks gevoelig zijn voor storingen die een AM-karakter hebben, zoals piekjes op het lichtnet, oude elektrische koffiemolens of onweer.

### Nadelen van FM/PM

- In tegenstelling tot AM en zijn varianten levert een FM- of PM-zender altijd evenveel vermogen, ook al is het modulerende signaal afwezig. Een zendervoeding wordt met FM en PM dan ook veel warmer dan bij EZB met gelijk vermogen.
- Door hun minstens 3x zo grote bandbreedte zijn FM en PM minder geschikt voor het overbruggen van grote afstanden dan EZB.
- Hun bandbreedte maakt FM en PM minder geschikt voor de toch al drukke amateurbanden op de korte golf. Je vindt ze dan ook vooral op de hogere amateurfrequenties. Daar is de beschikbare frequentieruimte groter.

### Voordelen van FM/PM

- De afstemming is niet kritisch. Van een afstemfout van 1 of 2 kHz merk je weinig.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

- De constructie van de zender is eenvoudiger dan bij EZB. HF-trappen kunnen worden ingesteld in klasse C, want de amplitude wordt niet beïnvloed door de modulatie.
- FM en PM zijn weinig gevoelig voor storingen, want die houden merendeels amplitudeverandering in. Je kunt storing verder onderdrukken met een schakeling die de amplitude begrenst door alles boven een bepaalde amplitude, "op maat te knippen". Zo'n schakeling heet niet voor niets een *clipperschakeling*.
- Bij gebruik van FM/PM is de kans dat je stem (vervormd) uit de luidspreker bij de buren komt, minimaal. Bij EZB is dat wel anders. Dat bespreken we in hoofdstuk 16, want een zendamateur moet in staat zijn, dit soort storingen te verhelpen.

## 12.3 Digitale modulatie

### 12.3.1 Inleiding

Alle digitale modulatievormen die voor het zendexamen worden gevraagd, gaan over transmissie (overbrenging) van tekst. We beginnen daarom met het begrip transmissiesnelheid. Daarna volgen vier modulatievormen die voor het examen worden gevraagd. Dat zijn FSK, 2-PSK, 4-PSK en QAM. Daarbij behandelen we ook de modulatievorm ASK, omdat QAM zonder ASK moeilijker te begrijpen is. De betekenissen van die afkortingen worden uitgelegd waar ze in dit hoofdstuk worden behandeld.

### 12.3.2 Transmissiesnelheid: de twee eenheden bps en Bd

Transmissiesnelheid is de snelheid waarmee informatie effectief wordt overgebracht. Daarvoor kennen we twee eenheden, bits per seconde en baud:

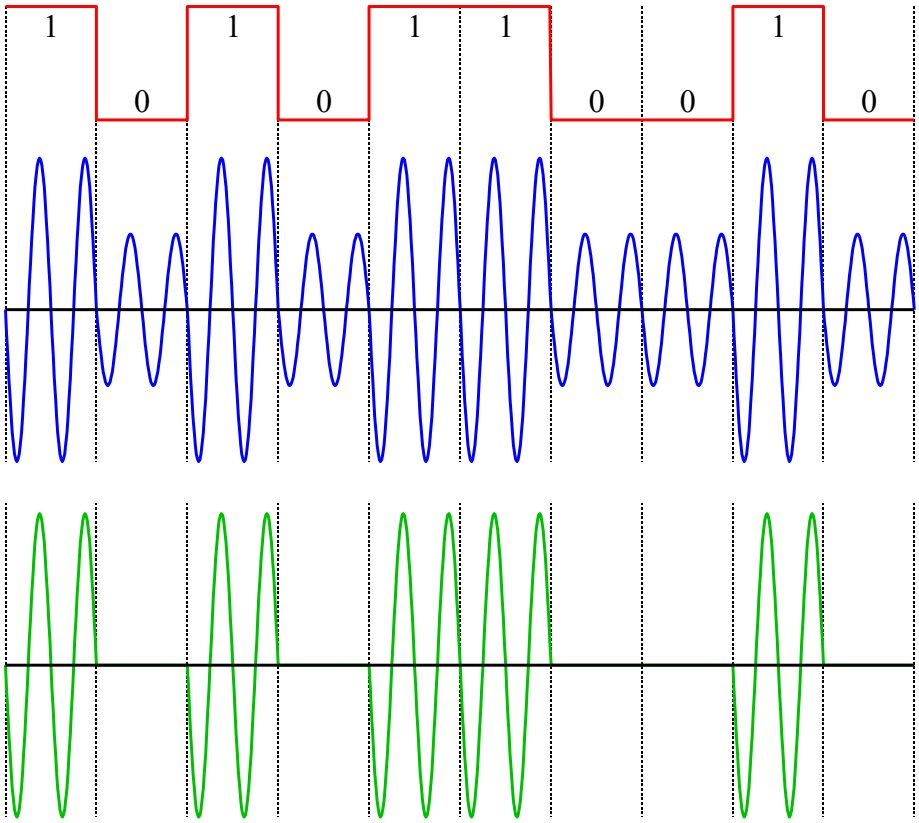
- **Bits per seconde**, afgekort bps, is het aantal overgebrachte bits per seconde. We kennen ook kbps (kilobits per seconde) en Mbps (megabits per seconde).
- **Baud**, afgekort Bd is tekens of symbolen per seconde. Hij kan ook in kBd of MBd gaan. Bd is met hoofdletter, want genoemd naar de Fransman Emile Baudot.

Bestaat een teken of symbool uit 1 bit, dan is de snelheid in Bd gelijk aan het aantal bps. Een (lees)teken omvat meestal meer dan 1 bit, want met enkel 0 en 1 komen we niet ver. Bestaat een teken uit 2 bits, dan is het aantal Bd ½ maal het aantal bps, bij 4 bits ¼, enz.

### 12.3.3 Amplitude Shift Keying (ASK)

ASK is een soort digitale AM. Bij de wisseling tussen 0 en 1 blijven fase en frequentie dezelfde; de amplitude verandert. Voor de binaire 0 is hij kleiner dan voor de 1 (Figuur 12.3-1, midden). De meest extreme vorm heet "on/off keying". Daarbij is de amplitude afwezig bij een binaire 0 en aanwezig bij een 1, net als bij CW (Figuur 12.3-1, onder). De symboolsnelheid is bij ASK gelijk aan de bitsnelheid.

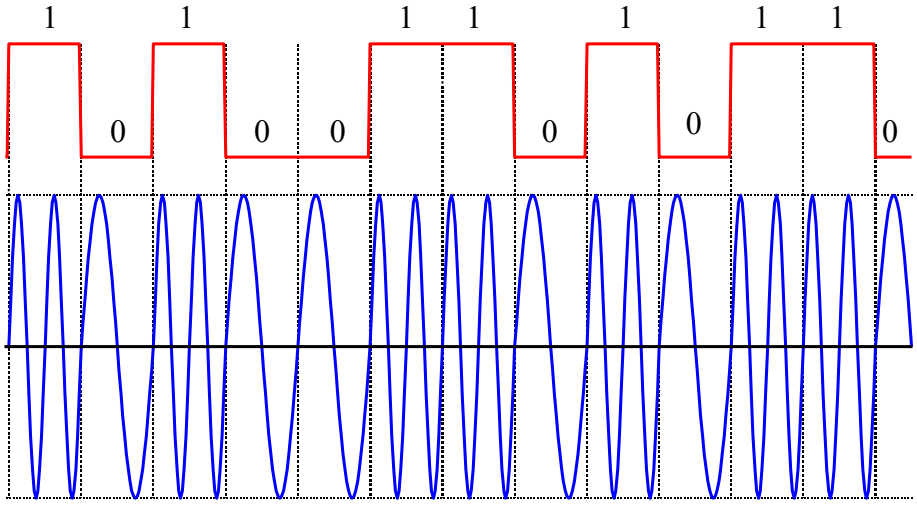
© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.3-1. Digitaal signaal boven (rood). Midden: "gewone" ASK (blauw). Onder On/Off keying modulatie (groen).*

### 12.3.4 Frequency Shift Keying (FSK)

De Nederlandse naam die vrijwel niemand gebruikt, is *frequentieverschuivingsmodulatie*. FSK bestaat uit twee frequenties met een even grote amplitude. De hogere frequentie staat doorgaans voor de 1, de lagere voor de 0. In diagram kan dat eruitzien als in Figuur 12.3-2.




*Figuur 12.3-2. FSK-modulatie. Boven: digitaal signaal (rood). Onder: gemoduleerd signaal (blauw). Voor de duidelijkheid zijn frequentieverschillen overdreven voorgesteld.*

De twee frequenties liggen bij amateurverkeer meestal 170 Hz uit elkaar. Dat verschil heet *shift*. In theorie is elke shift toepasbaar. Hogere shifts vragen meer bandbreedte. Gevolg: meer ruimtebeslag op amateurbanden en meer ruis bij ontvangst. In Figuur 12.3-2 is voor de duidelijkheid van de figuur het frequentieverschil sterk overdreven. Bij "normale" FSK zijn baud- en bitsnelheid gelijk. Symbolen (tekens) worden seriëel, dat is bit voor bit, overgebracht, net als bij ASK.

Als de bitsnelheid gelijk is aan de symboolsnelheid (baud rate) $f_S$ en de bandbreedte $B$ van de modulatie gelijk is aan $\Delta f$ = de halve shift (zoals ook bij FM en PM), geldt ongeveer

$$B \approx 2(1{,}6 f_S + \Delta f) \qquad (12.3\text{-}1)$$

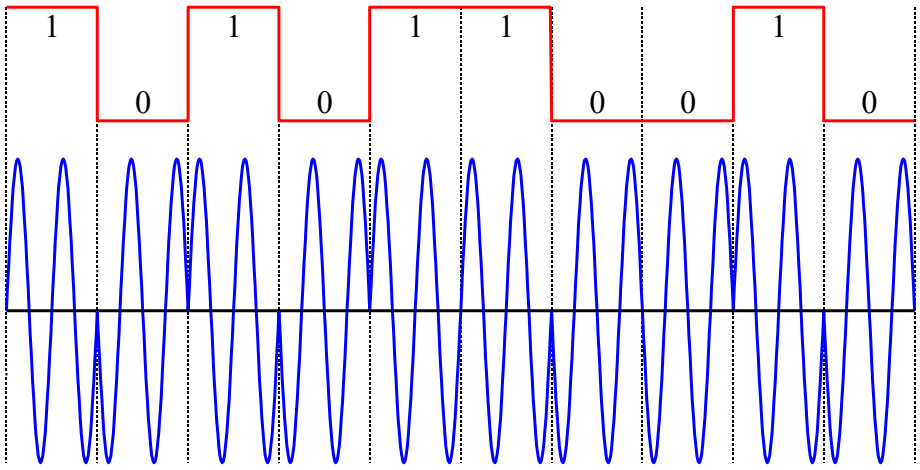
Bij $\Delta f = 170$ Hz en een bitsnelheid van 50 bps wordt dat 170+160 Hz = 330 Hz. Het is in principe ook mogelijk, bij FSK met drie frequenties te werken. Dan kun je per frequentieverandering symbolen van twee bits tegelijk overbrengen en is het aantal Bd gelijk aan de helft van het aantal bps. Dat gebeurt in de praktijk weinig. Onder amateurs wordt bij FSK meestal Morse-code op het signaal gemoduleerd.

### 12.3.5 Phase Shift Keying (PSK)

Zoals FSK werkt met wisseling van frequentie, werkt PSK met wisseling van fase. De wisseling is een fasesprong. De sprong kan onder meer 180, 90 of 45 graden zijn. In 360° past 2x 180°. Dat betekent dat dan één fasesprong dan één bit is: een sprong van 1 naar 0 of van 0 naar 1. Is de fasesprong 90°, dan kan een fasesprong een twee-bits code omvatten (00, 01, 10 en 11), dus een getal 0-3. Bij 45° worden dat drie bits met getallen van 0-7, enz.

#### Binary phase shift keying (BPSK of 2-PSK)

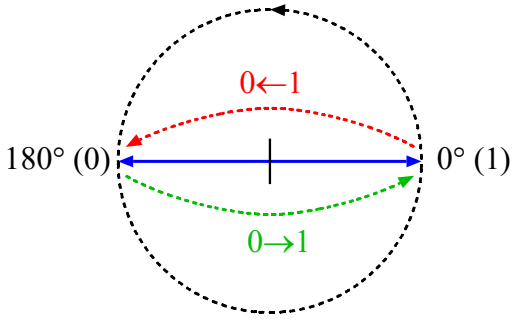
De eenvoudigste vorm van PSK is BPSK (soms 2-PSKgenoemd). De fasesprong is 180° (Figuur 12.3-3).




*Figuur 12.3-3. Voorbeeld van BPSK. Een 1 begint op 0 °en een 0 op 180 ° (π). Het aantal sinusperioden per bit is groter dan in de tekening, maar voor de duidelijkheid van de figuur is dat aantal klein gehouden.*

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

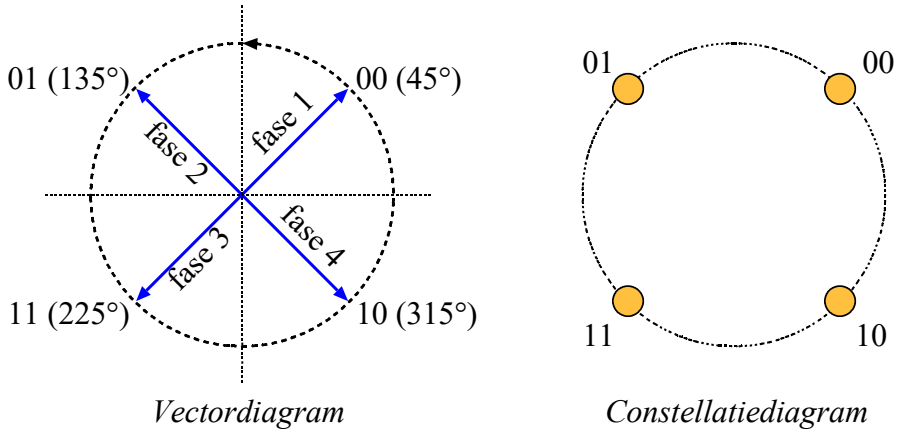
De fasesprong zit bij 2-PSK bij de nullijn. Dat voorkomt plotselinge sprongen in de spanning en de daarmee samenhangende extra bandbreedte. Een sinusgolf voor een 1 begint bij 0°, één voor een 0 bij 180°. In vectorvorm ziet dat eruit als in Figuur 12.3-4.



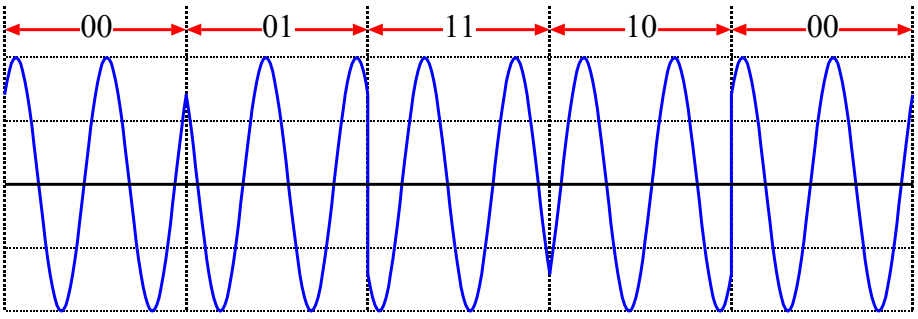

*Figuur 12.3-4. BPSK of 2-PSK in vectorvorm met fasesprongen 1→0 (rode stippellijn) en 0→1 (groene stippellijn).*

## Quadrature Phase Shift Keying (QPSK of 4-PSK)

Bij 4-PSK is de fasesprong 90°. Zo kunnen vier binaire waarden worden aangegeven: 00, 01, 10 en 11, decimaal 0, 1, 2 en 3. Figuur 12.3-5 toont links het fasediagram De 00 ligt op 45° en vervolgens komen 01, 11 en 10, steeds 90° verder. Rechts in de figuur zijn de vectorpijlpunten vervangen door rondjes. Dat noemt men een *constellatiediagram*.




*Figuur 12.3-5. 4-PSK (QPSK) in vectorvorm (links) en als constellatiediagram (rechts).*




*Figuur 12.3-6. De bitcombinaties 00, 01, 10, en 11 in QPSK. Let op de fasesprongen.*

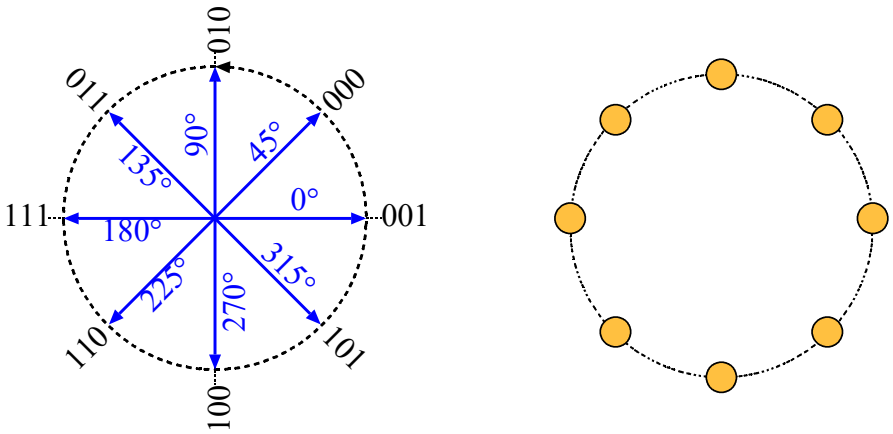
Figuur 12.3-6 toont een grafiek met de vier bitcombinaties en fasesprongen daartussen. De figuur laat zien dat overgangen tussen de bitcombinaties steile spanningssprongen kunnen zijn. Die dragen bij aan de bandbreedte van een 4-PSK signaal.

De bitsnelheid van QPSK is twee keer zo groot als die van BPSK bij dezelfde sinusfrequentie, want bij fasewisselingen worden twee bits in plaats van één overgebracht. De symboolsnelheid is bij 4-PSK daarom de helft van de bitsnelheid.

### 8-PSK

Met 8 fasesprongen in plaats van 4 kun je drie bits tegelijk overbrengen. Dat heet 8-PSK. Daarmee codeer je drie bits per fasesprong. De fasesprong van 45 graden is wat moeilijker te detecteren dan de 90 graden bij 4-PSK.

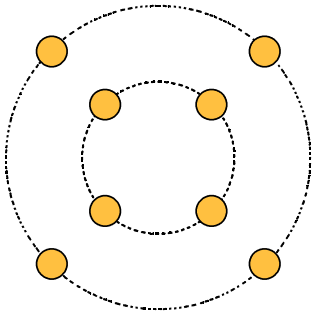
De symboolsnelheid bij 8-PSK is 3x zo klein als de bitsnelheid, want 1 symbool bevat drie bits. Vector- en constellatiediagram staan in Figuur 12.3-7.




*Figuur 12.3-7. Vectordiagram (links) en constellatiediagram (rechts) van 8PSK.*

## 12.3.6 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

QAM is ASK en PSK in één modulatie. Door amplitude mee te moduleren, is een snellere gegevensoverdracht mogelijk. Als we uitgaan van QPSK (4-PSK) en twee amplitudes, dan kan zo'n systeem 3 bits tegelijk aan. Dat heet 8-QAM. De symboolsnelheid is dan 1/3 van de bitsnelheid. Het constellatiediagram staat in Figuur 12.3-8



*Figuur 12.3-8. Constellatiediagrammen van 8-QAM in 2 uitvoeringen. Bij 1 is de fase bij kleine en grote amplitude gelijk, bij plaatje 2 verschillend (45°om precies te zijn).*

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Er is ook 16-QAM, 32-QAM, enz. 16-QAM heeft 4 bits per symbool, 32-QAM 5, enz.

### 12.3.7 Overzicht van tot nu toe behandelde modulatevormen

Tabel 12.3-1 geeft een overzicht van tot hiertoe behandelde modulatievormen.

*Tabel 12.3-1. Overzicht van analoge en digitale modulatiesystemen die binnen de exameneisen vallen.*

| Analoog | Kenmerk | Digitaal | Kenmerk |
|---|---|---|---|
| CW, Cont. Wave | Draaggolf aan/uit | Opt/glasvezel | LED/Laser aan/uit |
| AM, amplitudemod. | Freq. constant, amplitude variabel | ASK, Amplitude Shift Keying | Freq. const., amplit. variabel of aan/uit |
| FM, frequentiemod. | Freq. variabel, amplitude constant | FSK, Frequency Shift Keying | Amplitude constant, frequentie variabel |
| PM, fasemodulatie | Freq. en amplitude constant, fase var. | PSK, Phase Shift Keying | Ampl. & freqentie constant, fase var. |
| | | QAM, Quadrature Amplitude Mod. | Combinatie ASK en PSK |

### 12.3.8 Enkele andere vormen van digitale modulatie in het amateurverkeer

In deze sub-paragraaf gaat het om digitale modulatiesoorten die zelf geen onderdeel uitmaken van de exameneisen. Echter: ofwel de namen komen soms voor in (onjuiste) antwoorden bij multiple-choice examenvragen, ofwel eraan verbonden termen zijn wel examenstof. Dat laatste klinkt niet logisch, maar uw schrijver heeft dat niet bedacht.

#### PSK31

PSK31 is een veelgebruikte vorm van PSK. BPSK31 is 2-BPSK. QPSK31 is 4-PSK. De bitsnelheid is 31,5 bps, vandaar de “31” in de naam. Het bijzondere eraan is dat de code voor PSK31, Varicode, voor de meest gebruikte letters symbolen van 2 opeenvolgende bits gebruikt, voor iets minder vaak gebruikte 3 bits, enz. Dat versnelt de data-overdracht. PSK31 heeft een bandbreedte van niet meer dan ongeveer 65 Hz.

#### Packet

Bij Packet Radio worden meerdere tekens in een pakketje van maximaal 512 informatiebits verzonden. Daarom heet het zo. Packet Radio gebruikt de complete ASCII-tekenset. ASCII is een 8-bits coderingssysteem. Het is de afkorting van *American Standard Code for Information Interchange.*

Van (examen)belang is de kwaliteitscontrole, bekend onder de afkorting CRC. CRC betekent *Cyclic Redundancy Check*. Het is een manier om te controleren of de ontvangen bits gelijk zijn aan wat verzonden is. Uit het pakketje data wordt bij de afzender via een wiskundig omschreven manier een getal afgeleid. Dat getal wordt meegestuurd. Bij de ontvanger wordt het getal uit de ontvangen tekst opnieuw berekend. Als dat gelijk is aan het meegestuurde getal, wordt aangenomen dat het pakket bits onvervormd is aangekomen.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Het ontvangende station stuurt een bevestigingscode “ACK” van *acknowledged* (bevestigd) als de CRC een positief resultaat geeft. Dan kan het volgende pakketje data worden verstuurd. Is het resultaat van de CRC negatief, dan gaat een “NAK” van *not acknowledged* (niet bevestigd) naar het zendende station. Het ontvangende station kan ook een bepaalde tijd stil blijven, waarna alles nog een keer verstuurd wordt.

Zo krijg je een foutloze overdracht. Bij een slechte verbinding (storing of zwak signaal) kan het lang duren, voordat een bericht is overgebracht.

Bij packet radio is de overdrachtssnelheid van tekst effectief 1200 bps. Door gebruik van enkele slimme technieken kan de bandbreedte worden beperkt tot ongeveer 500 Hz.

### AMTOR

AMTOR betekent **Am**ateur **T**eleprinting **O**ver **R**adio. De gegevensoverdracht gaat in een vorm van FSK met 100 Bd (=100 bps). Het is een mode die is gebaseerd op de ouderwetse telex. Die had een 5-bits code (CCITT-code). AMTOR werkt met 7-bits code en foutcorrectie via *ARQ* (**A**utomatic **R**epeat **R**equest, automatisch verzoek tot herhaling als iets niet klopt) of *FEC* (**F**orward **E**rror **C**orrection).

Een symbool bestaat uit 7 bits. Een blok symbolen bevat 3 stuks. Elk symbool kent 3x “space” (een ”0”) en 4x “mark” (een “1”). Met ARQ is daarmee bij de ontvanger te constateren of een blok tekens waarschijnlijk goed of fout is overgekomen. Is het goed, dan wordt code ACK teruggestuurd en kan het volgende blok worden verstuurd. Anders volgt een NAK en wordt het blok nog eens verstuurd.

FEC werkt anders. Er wordt informatie met het blok meegestuurd, waarmee de ontvangende partij niet alleen kan vaststellen of er iets is fout gegaan, maar in veel gevallen ook het oorspronkelijke blok kan reconstrueren.

## 12.3.9 Pariteit: nog een manier van foutcontrole

De ASCII-tekenset heeft 8 bits. Daarmee zijn $2^8$=256 combinaties te maken. Dat betekent, 256 tekens (symbolen). Vaak zijn die niet allemaal nodig en kan worden volstaan met 7 bits, Het achtste bit kan dan voor controle op de kwaliteit van de overdracht dienen. Dat heet *pariteitscontrole*. Pariteit betekent dat er in een symbool altijd een even of oneven aantal bits “1” moet zijn. Dat heet bij een even aantal enen *even pariteit* (Engels: *even parity*), bij een oneven aantal *oneven pariteit* (Engels: *odd parity*).

Bevat het over te brengen symbool een oneven aantal keren “1” en de pariteit is even, dan wordt het achtste bit voor verzending “1” om het aantal bits met “1” even te maken. Heeft het symbool al een even aantal enen, dan wordt het pariteitsbit “0”.

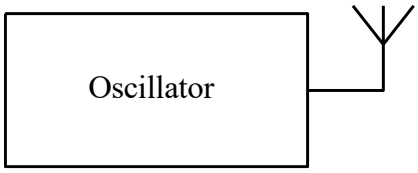
Oneven pariteit werkt net zo, maar het aantal enen wordt dan bij alle symbolen met behulp van het achtste bit oneven gemaakt.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

## 12.4 Zenders en modulatoren

### 12.4.1 Een zender zonder modulator

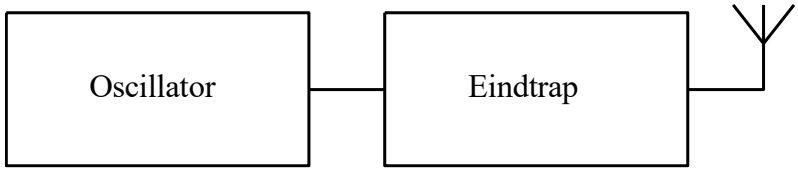
Een zender zonder modulator kan alleen een draaggolf uitzenden. De simpelste uitvoering is een oscillator met een antenne eraan (Figuur 12.4-1).




*Figuur 12.4-1. Blokschema van een zender die alleen bestaat uit een oscillator.*

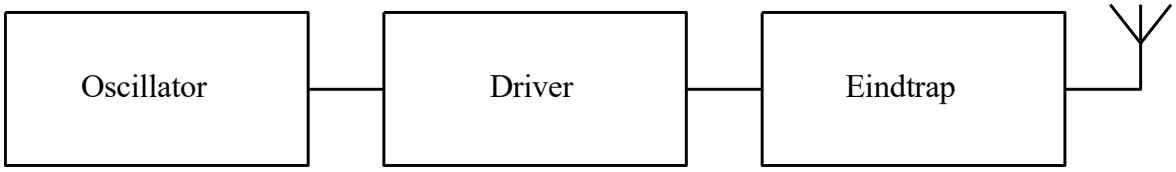
Door onderbreken van de draaggolf kan informatie worden overgebracht. Dat is de telegrafie- of CW-zender.

Een zender als in Figuur 12.4-1 kan alleen goed werken als de oscillator ongevoelig is voor belastingsvariaties. Een variatie in de belasting heeft gevolgen voor de frequentie. Een vogel op de antenne kan voldoende zijn om de frequentie merkbaar te laten veranderen. Voor de frequentiestabiliteit is het nodig dat de oscillatortemperatuur zo constant mogelijk is. Dat betekent dat een oscillator maar weinig vermogen mag leveren. Willen we meer vermogen en een frequentie die onafhankelijk is van de belasting, dan moet er tussen oscillator en antenne een versterker zijn. Die versterker tussen oscillator en antenne heet toepasselijk *eindtrap*. Zie Figuur 12.4-2.




*Figuur 12.4-2. Blokschema van een zender die bestaat uit een oscillator en een eindtrap.*

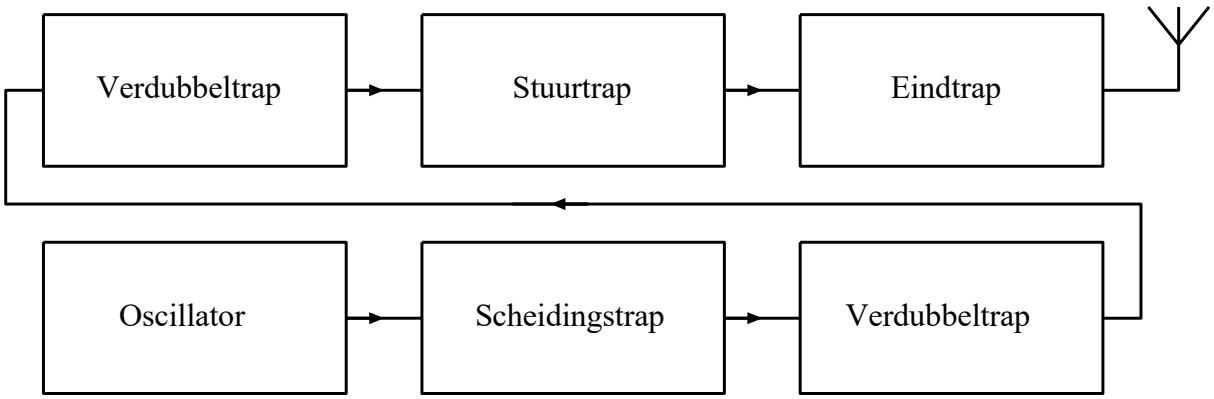
Ook in Figuur 12.4-2 wordt de oscillatortrap belast. De eindtrap neemt vermogen uit de oscillator op. Een *driver* of *stuurtrap* die de eindtrap aanstuurt en de belasting op de oscillator verder verkleint, lost dat probleem op (Figuur 12.4-3).




*Figuur 12.4-3. Blokschema van een zender die bestaat uit een oscillator, een eindtrap en een drivertrap ertussen.*

Vrijlopende oscillatoren, dat zijn oscillatoren gebaseerd op een LC-kring, zijn over het algemeen stabieler naarmate hun frequentie lager is. Als toch een hogere frequentie gewenst is, is frequentievermenigvuldiging een optie. Een sinusvormige wisselspanning

wordt flink vervormd. Dat geeft harmonischen. Daaruit wordt met een afgestemde kring de gewenste harmonische, meestal de tweede of derde, geselecteerd, ontdaan van ongewenste bestanddelen en verder versterkt (Figuur 12.4-4).

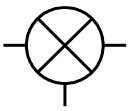



*Figuur 12.4-4. Blokschema van een zender als in Figuur 12.4-3, aangevuld met twee verdubbeltrappen.*

### 12.4.2 Mengschakelingen en het maken van AM, DZB en EZB

In subparagraaf 12.2.2 zagen we dat je voor amplitudemodulatie frequenties met elkaar moet vermenigvuldigen. Mengschakelingen doen dat. Dan krijg je naast de oorspronkelijke twee frequenties een som- en een verschilfrequentie. Mengschakelingen heten ook *mixers*, een Engelse term die ook bij ons is ingeburgerd. Het maken van AM is maar één van de toepassingen van mixers.

Vaak wordt een mixer niet voluit getekend, maar vind je in een schema het symbool in Figuur 12.4-5.

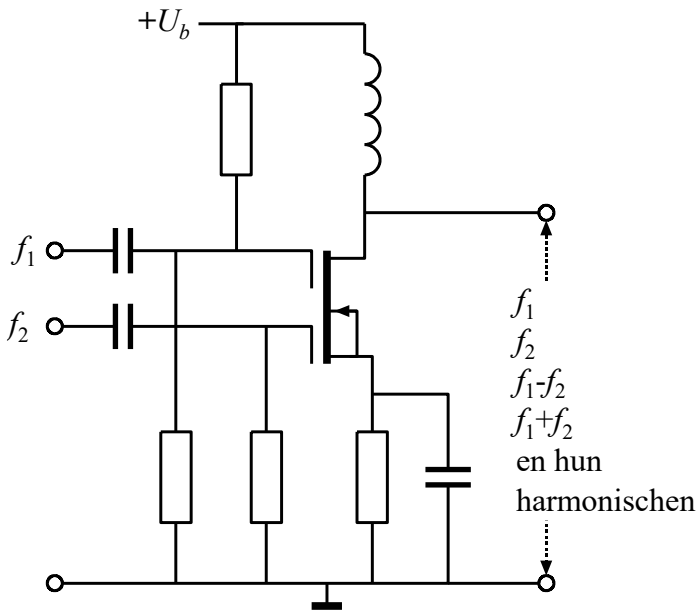


*Figuur 12.4-5. Schemasymbool van een mengschakeling (mixer).*

Een mixer heeft drie aansluitingen: twee inputs voor de twee frequenties en één output.

#### Een eenvoudige mengschakeling

Figuur 12.4-6 laat een mengschakeling zien met een N-kanaals dual gate MOSFET. Met twee J-FET's, twee bipolaire transistoren of een buis met meerdere roosters kan het ook.




*Figuur 12.4-6. Mengschakeling met dual-gate MOSFET.*

De tweede gate wordt hier gebruikt als tweede stuurelektrode.

De frequentie $f_1$ komt binnen op de bovenste gate, $f_2$ op de onderste. De dual-gate FET kun je in dit verband zien als twee in serie geschakelde FET's met elk één gate. De stroom door de onderste FET varieert in het ritme van $f_2$. Die stroom moet ook door de bovenste FET, maar die gehoorzaamt aan $f_1$ en 'ziet' de onderste FET als een soort sourceweerstand, waarvan de grootte wordt bepaald door de momentele waarde van $f_2$. Een grote sourceweerstand geeft een kleine versterking, een kleine sourceweerstand een grote versterking (hoofdstuk 8).

Zo wordt de versterking van $f_1$ bepaald door de momentele waarde van $f_2$, en omgekeerd de versterking van $f_2$ door de momentele waarde van $f_1$. Op de drain verschijnen de oorspronkelijke frequenties $f_1$ en $f_2$, de somfrequentie $f_1$+$f_2$ en de verschilfrequentie $f_1$ -$f_2$ (of $f_2$-$f_1$ als $f_2$ groter is dan $f_1$).

Er zijn veel meer mengschakelingen met FET's, buizen of bipolaire transistoren. Het is niet de bedoeling, die voor het examen allemaal uit het hoofd te leren. Maar snappen wat ze doen, hoort er wel bij. Dat laatste is voor deze eenvoudige mixer terug te brengen tot:

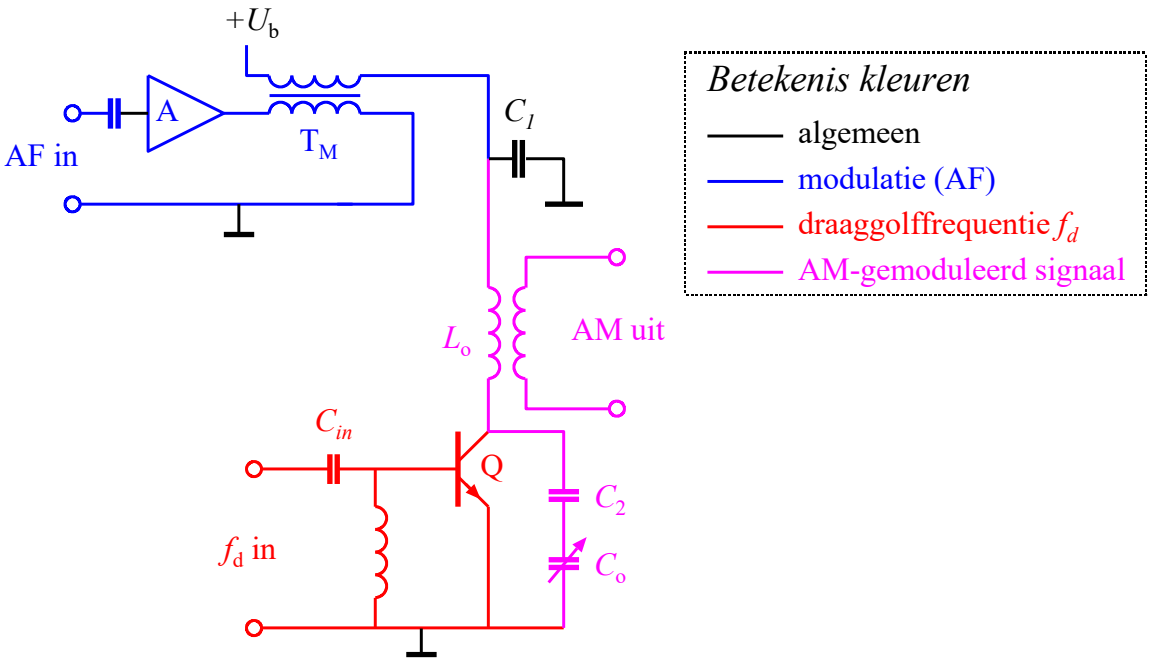
1. Er gaan twee frequenties in
2. Diezelfde frequenties komen er ook weer uit, maar samen met
    a. De som- en verschilfrequentie en
    b. Meestal een hoeveelheid harmonischen en mengproducten van alle vier de genoemde frequenties.

De mixer van Figuur 12.4-6 is niet in staat, AM met 100% modulatiediepte te leveren. Figuur 12.4-7 laat er één zien die dat wel kan.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

## Een “ouderwetse” AM-modulator

Figuur 12.4-7 laat een modulator zien die 100% modulatiediepte kan leveren èn een flink vermogen. De drie verschillende functies voor audiofrequent (AF), draaggolf en het AM-deel hebben in het schema verschillende kleuren.




*Figuur 12.4-7. Collectormodulator. De kleuren geven aan, welk deel vooral met modulatie, draaggolf het AM-gemoduleerde signaal van doen heeft, dan wel een algemene functie heeft.*

De draaggolf $f_d$ komt binnen op de basis van transistor Q die in klasse C staat. De modulatie (AF) komt binnen via de versterker A en de modulatietransformator $T_M$.

Q is normaal gesproken een transistor voor een flink vermogen. De collectorstroom komt binnen via de secundaire van $T_M$. Daardoor varieert de collectorspanning in het ritme van de modulatie (AF). Is de momentele waarde van de AF-spanning laag, dan zal de amplitude van de draaggolf op de collector ook laag zijn. Is de momentele waarde van de AF-spanning hoog, dan is de amplitude van de draaggolf op de collector ook hoog.

De afgestemde kring, bestaande uit spoel $L_o$ en variabele condensator $C_o$, verwijdert harmonischen en AF. De amplitudegemoduleerde draaggolf blijft over. $C_o$ dient om de kring precies op de goede frequentie in te stellen. Om geen handcontact met de collectorspanning te krijgen, staat $C_2$ in serie met $C_o$. De spoel die inductief met $L_o$ is gekoppeld, zorgt voor de uitkoppeling naar de schakeling die de aanpassing aan de antenne verzorgt (zulke schakelingen komen in een volgend hoofdstuk).

De condensator $C_1$ ontkoppelt de verbinding tussen de afgestemde kring en modulatietransformator $T_M$. Zo wordt voorkomen dat de AM in de schakeling op plekken buiten de modulator terechtkomt, waar hij ongewenst is.

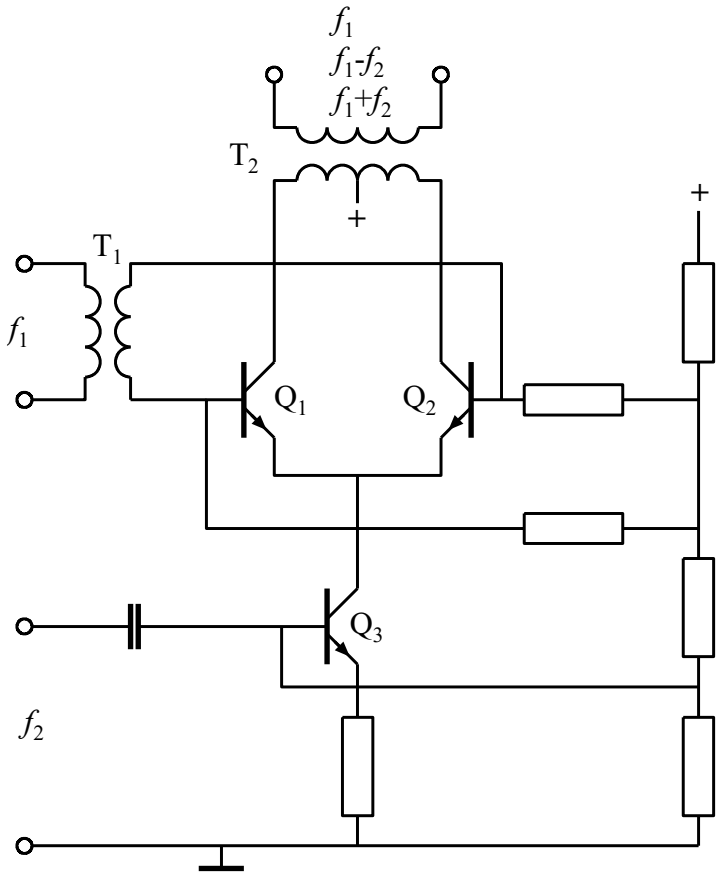
© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

De smoorspoel tussen de basis van Q en aarde voorziet de basis van de juiste gelijkspanning en voorkomt dat het draaggolfsignaal de gelijkstroominstelling van de transistor verandert. Door voldoende AF-vermogen toe te voeren via versterker A, is 100% modulatiediepte ($M$=1) bereikbaar.

Deze schakeling kan ook met een buis of vermogensFET worden uitgevoerd.

### Schakelingen voor DZB en EZB: de enkel gebalanceerde mengschakeling

Bij zowel DZB (Eng.: DSB) als EZB (Eng.: SSB) is het zaak om van de AM-draaggolf af te komen. Dat kan met een *enkel gebalanceerde mengschakeling* (Figuur 12.4-8).




*Figuur 12.4-8. Enkel gebalanceerde mengschakeling (single balanced mixer).*

De schakeling in de figuur heeft drie transistoren. Twee, $Q_1$ en $Q_2$, staan parallel. Samen staan ze in serie met $Q_3$. $Q_3$ werkt als spanninggestuurde stroombron. De sturende spanning is de gelijkspanning op de basis plus de wisselspanning met frequentie $f_2$.

De collectorstroom van $Q_3$ wordt verdeeld over $Q_1$ en $Q_2$. Beide hebben ze dezelfde basisspanning. De stroomverdeling is gelijk als $Q_1$ en Q2 exact aan elkaar gelijk zijn. Dat kan het best als beide transistoren in één IC zitten.

Frequentie $f_1$ komt binnen via transformator $T_1$. Op de basis van $Q_1$ is dit signaal in tegenfase met dat op de basis van $Q_2$. De mengproducten ontstaan in beide transistoren op

een manier die te vergelijken is met wat in de dual-gate MOSFET-schakeling van Figuur 12.4-6 gebeurt. Voorbij de collectoren loopt alles via de primaire van transformator $T_2$. Daar vallen beide wisselstromen met frequentie $f_2$ tegen elkaar weg. Oorzaak: in beide helften van de primaire wikkeling zijn hun magnetische velden gelijk en tegengesteld. Vooral daarom moeten $Q_1$ en $Q_2$ zo goed mogelijk aan elkaar gelijk zijn.

Frequentie $f_1$ en de mengproducten $f_1 + f_2$ en $f_1 - f_2$ op de collectoren van $Q_1$ en $Q_2$ zijn onderling in tegenfase. In de primaire van $T_2$ belanden ze op de tegenoverliggende uiteinden. Hun magnetische velden heffen elkaar daarom niet op. Ze staan alle drie over de uitkoppelwikkeling van trafo $T_2$.

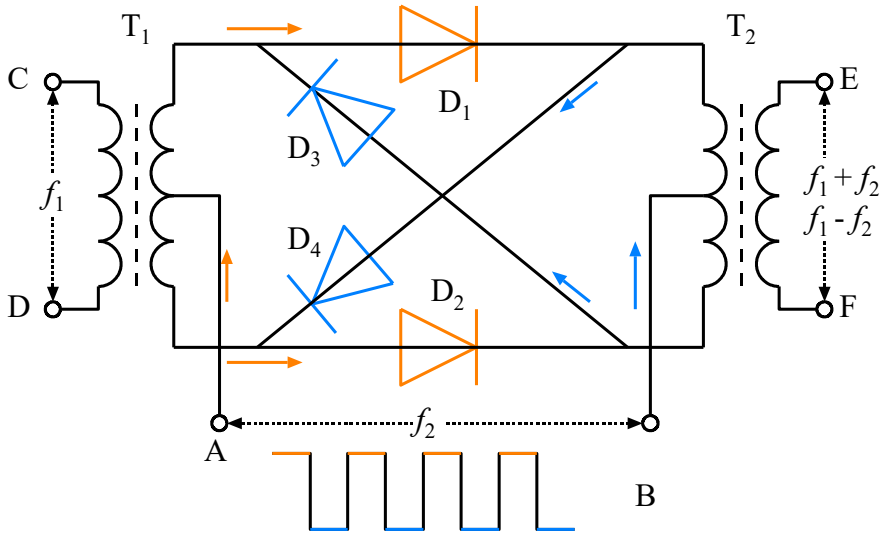
Als bij aansluiting van de schakeling wordt gezorgd dat $f_2$ de AM-draaggolffrequentie is, zijn we die kwijt en blijft een DZB-signaal plus modulerende frequentie $f_1$ over. Die laatste is door het grote frequentieverschil met de draaggolf simpel weg te filteren.

Met een kristalfilter met een bandbreedte van 2,7 kHz is van het op deze manier verkregen DZB-signaal op eenvoudige wijze EZB te maken.

**Samengevat**: maak AM-modulatie met een enkel gebalanceerde mixer en je krijgt DZB. Filter het DZB-signaal, zodat één zijband overblijft en je krijgt EZB.

### De dubbel gebalanceerde mengschakeling (DBM).

Een dubbel gebalanceerde mengtrap (Engels: *Double Balanced Mixer*, *DBM*) onderdrukt beide ingangssignalen. Op de uitgang blijven som- en verschilfrequentie over. Figuur 12.4-9 toont een schema met dioden.




*Figuur 12.4-9. Een dubbel gebalanceerde mengschakeling met dioden, ook wel ringmodulator of balansmodulator genoemd.*

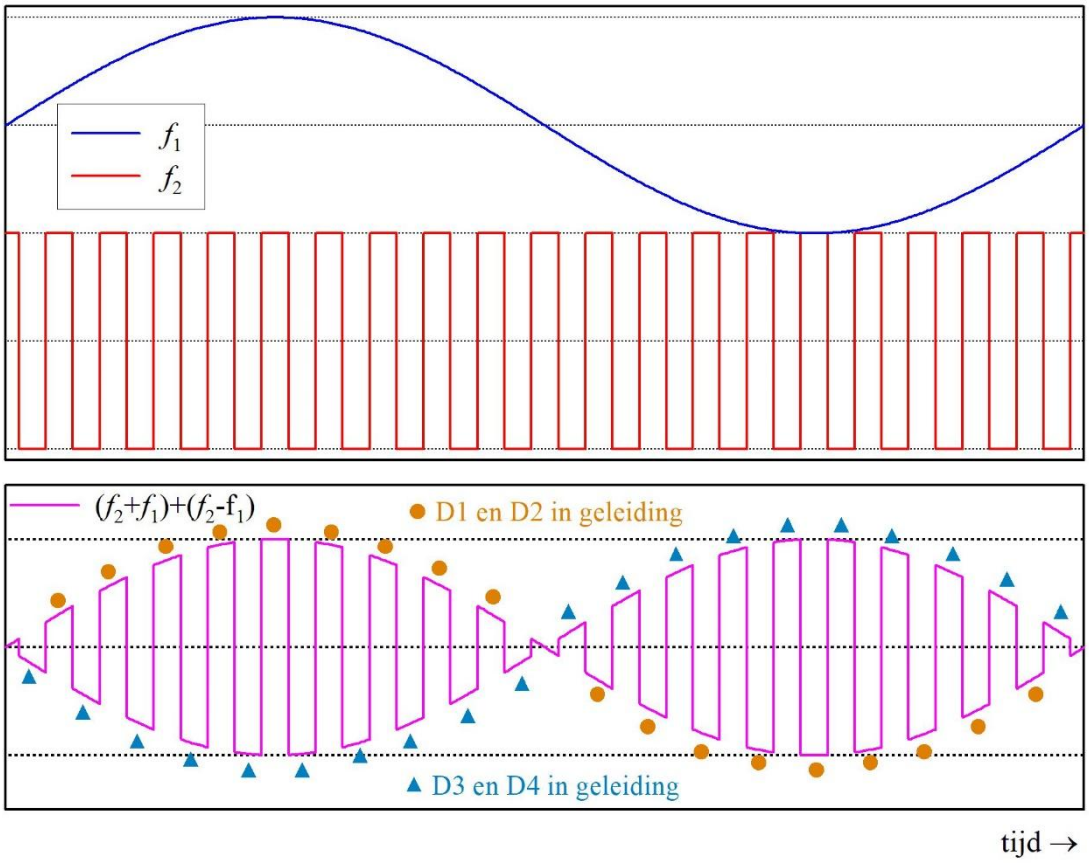
De vier dioden zijn meestal geïntegreerd op één Si-chip. De transformatoren $T_1$ en $T_2$ zijn mee ingebouwd in de behuizing, niet in het IC, want daarin passen ze niet. Nu de werking.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Frequentie $f_2$ krijgt een zo grote amplitude dat de dioden als schakelaars gaan fungeren. Dat laatste gebeurt als $f_2$ in doorlaatrichting passeert en zijn amplitude groot genoeg is om de dioden in geleiding te houden als $f_1$ met kleinere amplitude zich in sperrichting aandient. Snel schakelen wordt bevorderd door $f_2$ als blokgolf toe te voeren.

Als $f_2$ op punt A positief is (oranje bovenkanten in de blokgolf in Figuur 12.4-9), dan zijn dioden $D_1$ en $D_2$ in geleiding. De stroom volgt de oranje pijlen. $D_3$ en $D_4$ sperren. In de volgende periodehelft is $f_2$ op punt B positief (blauwe onderkanten blokgolf) en negatief op A. Dan geleiden $D_3$ en $D_4$ en sperren $D_1$ en $D_2$. De stroom volgt de blauwe pijlen. Zowel de velden van de "blauwe" als de "oranje" helften heffen elkaar in trafo $T_2$ op en weg is $f_2$.

Frequentie $f_1$ komt binnen via de punten C en D en trafo $T_1$. Geleiden $D_1$ en $D_2$, dan komt er een stukje $f_1$ ter breedte van een halve periode van $f_2$ in fase op de uitgang. Slaat de geleiding van $D_1$ en $D_2$ om in geleiding door $D_3$ en $D_4$, dan komt het volgende stukje $f_1$ ter breedte van een halve periode op de uitgang, maar in tegenfase. Figuur 12.4-10 laat het verloop van in- en uitgangsspanning zien.

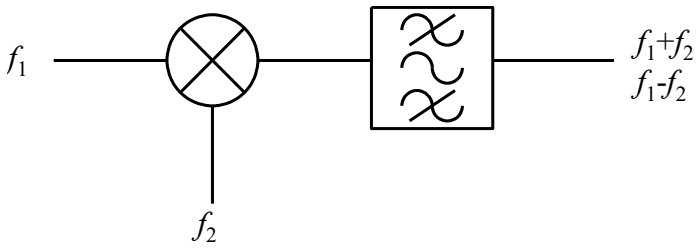



*Figuur 12.4-10. Boven: invoer van $f_1$ (blauw) en $f_2$ (rood). Onder: uitvoer. De oranje rondjes geven de delen aan waar in Figuur 12.4-9 dioden $D_1$ en $D_2$ geleiden; de blauwe driehoekjes waar $D_3$ en $D_4$ geleiden.*

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Zo ontstaat een golfvorm die, afgezien van de erin verwerkte blokgolf van $f_2$, nogal lijkt op het DZB-signaal dat we eerder in Figuur 12.2-8 zagen. Een laagdoorlaatfilter of een bandfilter (LC-kring) maakt van de blokgolf een sinus en we hebben een DZB-signaal.

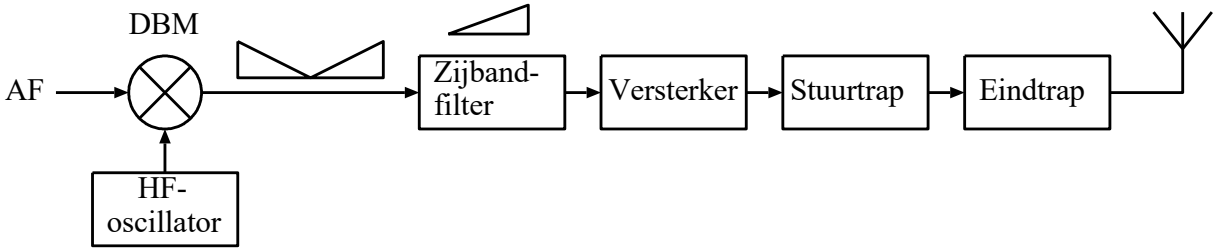
Figuur 12.4-11 laat zo'n schakeling in blokschema zien.




*Figuur 12.4-11. DBM met bandfilter levert som- en verschilfrequentie. Het bandfilter kan eventueel ook een laagdoorlaatfilter zijn. Het is bedoeld om van de harmonischen van $f_2$ af te komen.*

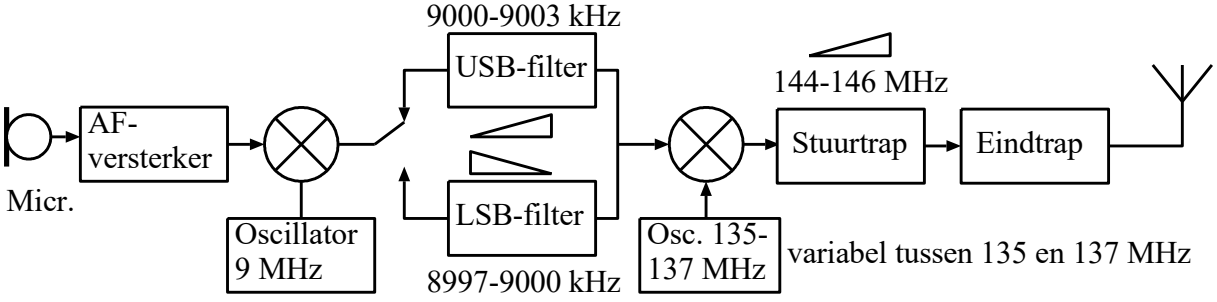
Een DBM is ook te maken met buizen, bipolaire transistoren of FET's.

Ook bij een DBM is met een scherp filter, meestal opgebouwd uit enkele kristallen, DZB om te zetten in EZB. Door de frequentie $f_2$ in de schakeling van Figuur 12.4-9 aan te passen, passeert óf alleen de bovenzijband óf alleen de onderzijband het filter. Deze manier van EZB (SSB) maken heet de *filtermethode*. Het blokschema van een eenvoudige SSB-zender kan er dan uitzien als in Figuur 12.4-12.




*Figuur 12.4-12. Blokschema van een eenvoudige SSB-zender.*

Figuur 12.4-13 geeft een blokschema van een USB-LSB-zender voor de amateurband 144-146 MHz. Daarin zitten twee mixers. De modulatie komt uit een 9 MHz-systeem dat vervolgens via een tweede mengschakeling naar 144-146 MHz wordt gemengd.




*Figuur 12.4-13. Blokschema van een zender voor de amateurband 144-146 MHz.*

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Er is nog een andere manier, de **fasemethode**. Die valt buiten de exameneisen.

Tot slot een opmerking. Als je de schakeling in Figuur 12.4-9 iets anders tekent, is het een ringschakeling (Figuur 12.4-14). Op het zendexamen kan een herkenningsvraag voorkomen of een ringschakeling met vier dioden een ringmodulator (DBM) is, een bruggelijkrichter of iets anders. Hoe zie je snel het verschil? Zie Figuur 12.4-14.

*Figuur 12.4-14. Bruggelijkrichter (links) en ringmodulator (DBM) met dioden (rechts).*

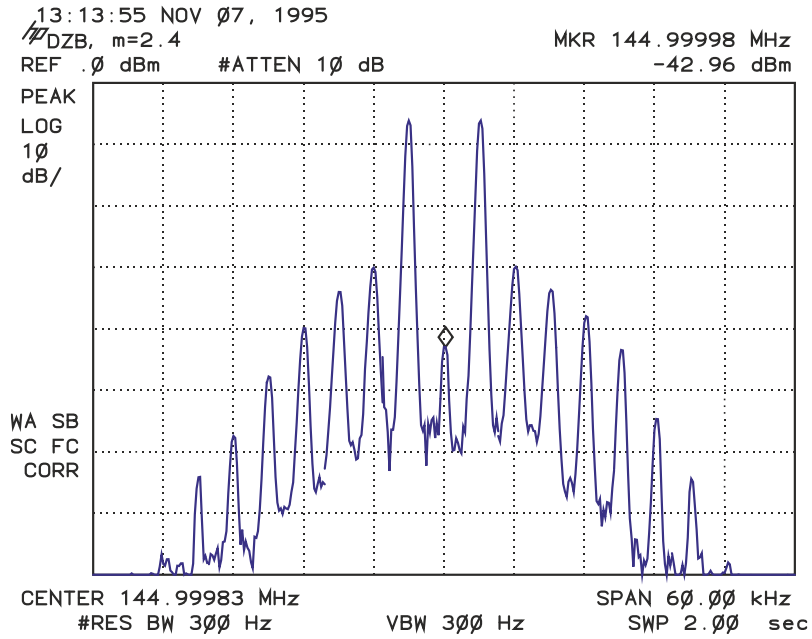
De DBM herken je zo: kies een punt tussen twee dioden. Verplaats in gedachten het punt in de geleidingsrichting van de naastliggende diode. Bij een balansmodulator kom je na vier dioden weer op je uitgangspunt uit. Bij een bruggelijkrichter stopt de route na de eerste of tweede diode, want dan volgt een diode die in tegengestelde richting geleidt.

## Intermodulatie en ALC

Intermodulatie ontstaat in elke versterkertrap die meer dan één frequentie tegelijk versterkt, doordat geen enkele versterker helemaal lineair is. Die frequenties maken dan onderling modulatieproducten. Dat verschijnsel heet *intermodulatie*. De kunst is, de intermodulatieproducten zo klein mogelijk te houden.

Een versterker kan worden *overstuurd*. Dat betekent dat hij een sterker signaal krijgt aangeboden dan hij kan verwerken. Dan is de vervorming groot. Maar bij meer dan één frequentie ontstaan ook extra veel intermodulatieproducten. Spraak bevat vele frequenties. Een voorbeeld van een frequentiespectrum dat ontstaat in de eindtrap van een DZB-zender die met een enkele sinus wordt gemoduleerd, is te zien in Figuur 12.4-15.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.4-15 Intermodulatie van een DZB-signaal in de eindtrap van een zender (VRZA-cursus 1999)*

Met meer frequenties dan die enkele sinus wordt het allemaal nog veel erger.

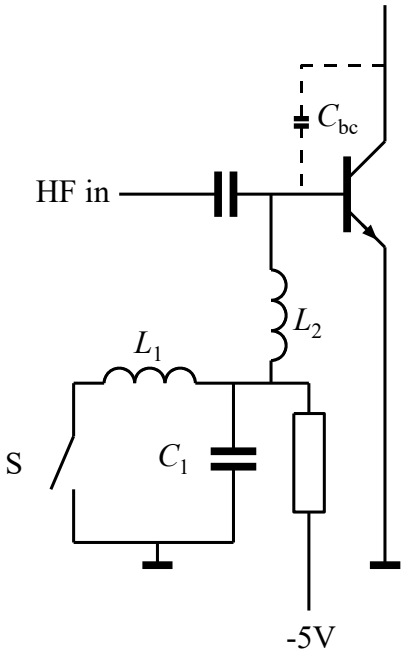
De gewenste zijbanden (eigenlijk zijfrequenties, want er is maar één modulerende frequentie) zijn $f_1$ en $f_2$. De figuur zit vol met harmonischen van verschilfrequenties van het type $2f_2 - f_1$, $2f_1 - f_2$, $3f_2 - 2f_1$, $3f_1 - 2f_2$, enz. Ze liggen dicht bij de gewenste frequenties, dat zijn de twee hogere pieken in het midden. Daardoor zijn ze praktisch niet weg te filteren zonder verlies van de wèl gewenste frequenties.

De somfrequenties liggen zo ver van de gewenste frequenties af dat ze gemakkelijk zijn te onderdrukken met een laagdoorlaatfilter na de eindtrap.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

### 12.4.3 Schakelingen voor CW

Uit het voorgaande blijkt dat een EZB-zender geen eenvoudig apparaat is. Vergeleken daarmee is de CW-zender een wonder van eenvoud. Als we met een seinsleutel de eindtrap aan en uit kunnen schakelen in het ritme van het signaal, zijn we in theorie klaar. Zoals in 12.2.8 al is opgemerkt, zijn maatregelen tegen sleutelclicks nodig. Bovendien kan rechtstreeks schakelen met de seinsleutel alleen voor kleine vermogens. Als een sleutel per keer indrukken een aantal ampère moet verwerken, is hij snel stuk. Op de eindtrap van een buizenzender staat al gauw 1 kV. Ook dat is zacht gezegd onwenselijk voor een met de hand bediend metalen ding.




*Figuur 12.4-16. CW-eindtrap met seinsleutel in het basiscircuit.*

Figuur 12.4-16 toont een voorbeeld waarin de basisspanning van een transistor wordt geschakeld met een seinsleutel.

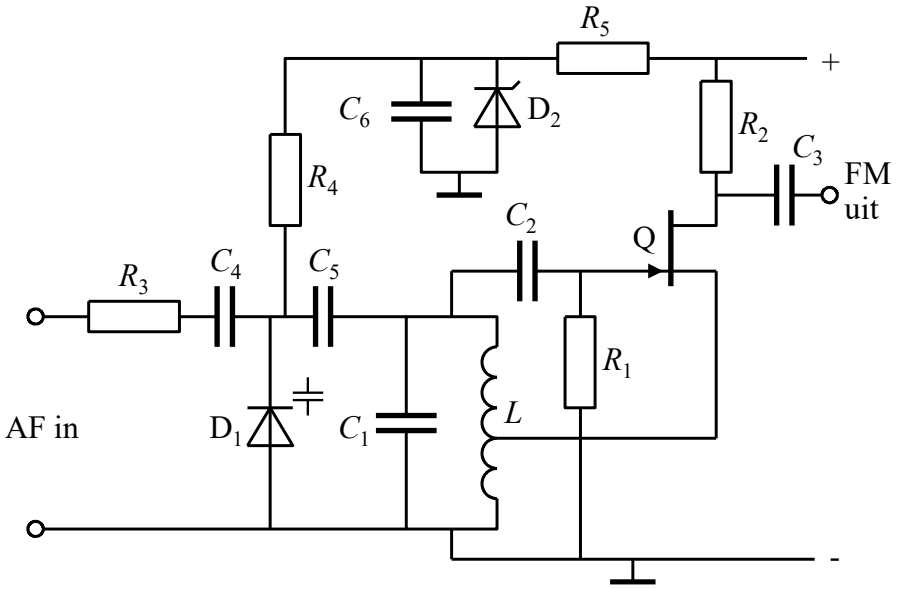
Het filter $L_1C_1$ onderdrukt de steile flanken die leiden tot de sleutelklik. Dat beperkt de bandbreedte. $L_2$ onderdrukt het HF voor het sleutelcircuit. Is sleutel S open, dan ligt de basis aan -5 V en spert de transistor. Maar de basis-collectorcapaciteit $C_{bc}$ laat dan toch nog wat HF door. Dat is niet de bedoeling. Dit effect is grotendeels te verhelpen door het sleutelcircuit ook de stuurtrap te laten aansturen.

Merk op dat de transistor in klasse C staat. Bij CW is dat geen probleem, want als de sleutel gesloten is, is er maar één frequentie met één amplitude. Harmonischen worden weggefilterd in de schakeling tussen transistor en antenne die onder andere als laagdoorlaatfilter werkt.

### 12.4.4 Schakelingen voor FM

FM is het eenvoudigst te maken met een oscillator waarin (een deel van) de capaciteit in de afgestemde kring uit een varicap bestaat. Zo'n schakeling hebben we in Hoofdstuk 10 al een keer gezien: de Clapp-oscillator met afstemdiode. Daarin werd de frequentie bepaald door de spanning over de afstemdiode. Het is dan een koud kunstje, die spanning te laten variëren met spraak die in een microfoon is omgezet in een wisselspanning. Dan ontstaat FM. Figuur 12.4-17 toont bij wijze van voorbeeld een Hartley-oscillator die FM produceert.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 




*Figuur 12.4-17. FM met behulp van een varicap in een Hartley-oscillator.*

De oscillator is opgebouwd rondom de FET Q. De modulatie loopt via varicap $D_1$. Die staat via $C_5$ parallel staat aan condensator $C_1$ en de spoel $L$. De voorspanning op $D_1$ komt van het regelsysteem $R_4$, $R_5$, $C_6$ en zenerdiode $D_2$. Die laatste is liefst voor temperatuur gestabiliseerd. De condensator $C_6$ helpt tegen ruis.

Voor de hoge frequenties van bijvoorbeeld de amateurband 144-146 MHz zal de frequentie van deze vrij eenvoudige oscillator meestal niet stabiel genoeg zijn. Om dat probleem op te lossen, zijn er verschillende mogelijkheden, zoals:

- De FM-modulator op een lage frequentie laten werken en die via een mengschakeling met een tweede stabiele frequentie op een hogere frequentie brengen
- De modulator opnemen in een zogenoemde fasevergrendelde lus of Phase Locked Loop (PLL). Die wordt besproken in Hoofdstuk 13.

FM kan heel goed worden gebruikt voor morsetelegrafie via de in subparagraaf 12.3.4 besproken FSK. Verbind via de sleutel het knooppunt van D1, C4, C5 en R4 met een zodanige spanning dat de frequentie met de gewenste grootte verspringt en klaar is Kees. Wordt de sleutel weer losgelaten, dan heeft de spanning op dat knooppunt weer de oude grootte en de frequentie dus ook.

Een andere mogelijkheid voor FSK is gebruik van een via de seinsleutel in frequentie veranderbare LF-oscillator, gekoppeld aan de modulatie-ingang van een EZB-zender.

### 12.4.5 Schakelingen voor PM

Echte fasemodulatoren komen we in apparatuur van na ruwweg 1990 niet meer tegen. We hebben in subparagraaf 12.2.9 gezien dat het onderscheid tussen analoge PM en FM vaak lastig te maken is. Het maken van PM kan ook met een FM-modulator. Daartoe

kunnen we in het LF-deel een frequentiefilter opnemen waarvan de frequentiedoorlaat evenredig toeneemt met de frequentie met 6 dB voor elke verdubbeling van de LF-frequentie.

Voor de verstaanbaarheid van een signaal is onderdrukking van de laagste frequenties gunstig. In de meeste zenders voor spraakcommunicatie worden de lage audiofrequenties daarom al verzwakt. In feite wordt zo al een benadering van PM uitgezonden.

## 12.5 De decibel en zenders

### 12.5.1 De basis

De basis van de decibel (dB) is behandeld in Hoofdstuk 2. We geven hier een korte herhaling en aanvulling voor de toepassing bij zenders.

De decibel (dB) is het tiende deel van een bel (B).

$$1\ \text{B} = \log 10 = 10\ \text{dB} \qquad (12.5\text{-}1)$$

1 B is de logaritme van de verhouding van twee vermogens. Voor twee vermogens $P_1$ en $P_2$ zijn B en dB gedefinieerd volgens

$$\text{B} = \log\frac{P_1}{P_2} \quad \text{en} \quad \text{dB} = 10\log\frac{P_1}{P_2} \qquad (12.5\text{-}2)$$

Net als 1 m = 10 dm.

Een vermogen van 1 W verschilt $10\log 1000 = 30$ dB van 1 mW. En 1 kW is weer 30 dB meer dan 1 W.

Bij verzwakking krijgt de dB-waarde een minteken. 100 W in en 1 W uit is -20 dB versterking.

De logaritme verandert een vermenigvuldiging in een optelling, doordat alleen exponenten worden geschreven. +20 dB betekent vermogen vermenigvuldigen met 100 en -20 dB betekent vermogen delen door 100. Zo kunnen grote versterkingen of verzwakkingen worden gevat in hanteerbare getallen.

### 12.5.2 Rekenen met dB

1. Elke verdubbeling van vermogen is 3 dB erbij, want $\log 2 \approx 0{,}3$.
2. Van 1 naar 4 W is 2x verdubbbelen, dus +6 dB. Van 1 naar 8 W is +9 dB en van 1 naar 10 W is +10 dB ($10\log 10 = 10$).
3. +1 dB is vermenigvuldigen met ongeveer 1,25.
4. Een halvering is -3 dB, verzwakking met factor 4 is -6 dB, enz.
5. Geen verandering is 0 dB.
6. Vervijfvoudigen? Maal 10 en delen door 2: +10 dB min 3 dB is +7 dB.

Versterkingen in dB van achter elkaar geschakelde versterkers worden opgeteld. Voorbeeld: voorversterker 15 dB, eindversterker 6 dB, totaal 21 dB.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 

Een zender is via een kabel verbonden met de antenne. Vaak bestaat zo'n kabel uit een geïsoleerde kabel met een geleidende mantel eromheen. Bij de antennes gaan we daar dieper op in. Voor nu is het voldoende, te weten dat in zo'n *coaxiale kabel* verliezen optreden. Die worden meestal gegeven in dB per 100 m kabel.

Er zijn ook andere typen antennekabel, zoals twee evenwijdige enkelvoudige draden. Ook die hebben verliezen. Antennekabels komen aan de orde in Hoofdstuk 14.

### 12.5.3 De dB bij spanningen en stromen in plaats van bij vermogens.

Een spanning over een weerstand betekent opname van vermogen door de weerstand. Dat vermogen is evenredig met het kwadraat van de spanning:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Dat betekent dat verdubbeling van spanning geen 3 dB, maar 6 dB betekent en vervijfvoudiging geen 7 dB, maar 14 dB.

Voor stroom geldt hetzelfde, want

$$P = I^2 R$$

Berekeningen met dB en spanningen komen in de praktijk vaker voor dan met dB en stromen.

**Een voorbeeld**:

De uitgang van een zender wordt belast met een bepaalde weerstand. De effectieve spanning over de weerstand is 100 V. Deze wordt verhoogd naar 141 V.

Dan wordt het vermogen vergroot met een factor $\left({}^{141}/_{100}\right)^2 \approx 2$. Dat wordt dus 3 dB en geen 1,5 dB.

© 2021-2025, Vereniging van Radiozendamateurs VRZA 