

# Bekijk een hoofdstuk uit de lesstof



# OVER DE LESSTOF

Alleen bij de LOI ontvang je speciaal ontwikkeld lesmateriaal, waardoor het bijzonder geschikt is om zelfstandig te bestuderen. Dat zie je terug in de slimme opbouw.

## **Toegankelijk geschreven**

Het lesmateriaal is toegankelijk geschreven, overzichtelijk en zo opgebouwd dat je je kennis steeds verder verdiept.

## **Relevant**

Aan het begin van ieder hoofdstuk wordt aangegeven wat je gaat leren én waarom het belangrijk is dat je dat leert. Zo weet je altijd waar je naartoe werkt en wat je aan deze kennis hebt.

## **Trefwoorden**

In de kantlijn staan trefwoorden. Hiermee kun je een onderwerp makkelijk en snel terugvinden.

## **Oefenopgaven**

Met de oefenopgaven test je of je de opgedane kennis kunt toepassen. Aan het eind van het hoofdstuk zijn de antwoorden opgenomen. Kun je de oefenopgaven niet goed uitwerken, dan betekent dit dat je het bijbehorende deel van de leerstof nog eens moet doornemen.

## **Parate-kennisvragen**

Aan het einde van het hoofdstuk vind je de parate-kennisvragen. Hiermee kun je testen of je de leerstof voldoende kent. De vragen zijn genummerd. Het antwoord kun je snel terugvinden dankzij de genummerde verwijzrondjes in de kantlijn.

## **Inzendopgaven**

Als je de antwoorden op de parate-kennisvragen weet en de oefenopgaven goed kunt uitwerken, ga je verder met de inzendopgaven. Deze stuur je via de online leeromgeving ter beoordeling naar je docent. Binnen een paar dagen heb je een uitgebreid antwoord terug.

## **Bekijk nu een hoofdstuk uit de leerstof en ervaar het zelf**

# 1

## BASISPRINCIPES

**Elektrocardiografie is de hoeksteen van de cardiologie en dus ook van hartfunctieonderzoek. In deze module leert u hoe een ecg wordt geregistreerd, welk gereedschap u daarbij nodig hebt en hoe dit gereedschap in elkaar zit. Achtereenvolgens passeren afleidingen, analoge en digitale cardiografen, ecg-monitoren en Holtercardiografen de revue. Maar allereerst treft u een aantal basisbegrippen aan die u nodig hebt om de cardiograaf en het registreren van een ecg te begrijpen.**

Elke hartslag heeft slechts één doel: het rondpompen van bloed. Het hart bestaat uit een holle spier die onvermoeibaar ritmisch samentrekt. Tijdens dit proces vloeien elektrische stromen door de spier. Deze elektrische stromen zijn aan het huidoppervlak meetbaar.

Wanneer deze elektrische verschijnselen op papier in de tijd worden vastgelegd, spreken we van een *ElektroCardioGram*, kortweg *ecg*. Het apparaat waarmee een ecg wordt gemaakt, heet een cardiograaf, ecg-apparaat of ecg-toestel. Wanneer het papier voor een beeldscherm wordt vervuld, hebt u te maken met een *ecg-monitor*, ook wel "scoop" of kortweg monitor genaamd. Een speciale cardiograaf is de ambulante cardiograaf, ook wel *Holter* genoemd. Het betreft hier een recorder die gedurende lange tijd het ecg kan vastleggen.

### Plaats van het ecg in de hartfunctie

Het ecg speelt binnen hartfunctieonderzoek een centrale rol. Behalve als zelfstandig onderzoek wordt ecg-registratie als ondersteuning bij alle andere hartfunctieonderzoeken gebruikt. Vrijwel alle huisartsen en specialisten vragen ecg's aan; cardiologen zijn gewend om van bepaalde patiënten elke dag een nieuw ecg te laten maken, soms enkele op één dag. Een gemiddeld algemeen ziekenhuis is goed voor tienduizenden ecg's per jaar. Het ecg is dus blijkbaar een populair onderzoek. Daar is een aantal redenen voor:

- een ecg geeft relatief veel informatie over het hart
- een ecg is snel en relatief eenvoudig te vervaardigen
- het is een pijnloos en niet-belastend onderzoek
- er zijn geen grote financiële investeringen nodig.

- ① Met behulp van een ecg is het *hartritme* in rust en in inspanning te interpreteren. Daarnaast is het ecg een leidraad bij het bepalen van de *bloedvoorziening* en de *stofwisseling* van de hartspier.

Ten slotte is, zoals is gezegd, het ecg de grafische weergave van de *elektrische* activiteit van de hartspier. Onder normale omstandigheden zal er na elektrische activering mechanische actie volgen het samentrekken van het hart. Het uiteindelijke doel van het hart is dus mechanisch: het rondpompen van bloed. Het is zinvol de volgende overweging goed

te bestuderen en nooit meer te vergeten: *de aanwezigheid van elektrische activiteit, zoals is vastgelegd op het ecg, is geen garantie voor de aanwezigheid van mechanische activiteit!*

We spreken in zo'n geval van *elektromechanische dissociatie*, letterlijk het uiteenvallen of ontbreken van samenhang tussen elektrische en mechanische activiteit. De absolute zekerheid over het daadwerkelijk bestaan van een bloedcirculatie kan worden verkregen door het voelen van pulsaties in slagaders, dan wel het meten van de bloeddruk.

## Fysiologische, fysische en technische basisprincipes

Om inzicht te krijgen in de werking van een cardiograaf, de opbouw van een ecg en de mogelijke bewerkingen en veranderingen van het ecg-sigitaal, is het noodzakelijk de gebruikte fysiologische en fysische basisprincipes en technische principes te begrijpen. U hebt deze kennis in de volgende hoofdstukken nodig. Bij de behandeling van de volgende begrippen richten we ons specifiek op het ecg.

### Elektrische spanning

Wanneer er tussen twee punten een verschil in elektrische lading is, bestaat er tussen die twee punten een potentiaalverschil. We spreken ook wel van een *spanningsverschil*. Het symbool van elektrische spanning is  $U$ . De eenheid van elektrische spanning is volt, afgekort  $V$ . Hiervan afgeleid is de millivolt, de  $mV$ , en de microvolt, de  $\mu V$ .

$$\textcircled{2} \quad 1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V}$$
$$1 \mu\text{V} = 0,000.001 \text{ V.}$$

Het spanningsverschil dat door de hartspier wordt opgewekt en dat overal aan het lichaamsoppervlak kan worden gemeten, bedraagt maximaal ongeveer  $5 \text{ mV}$ .

### Elektrische stroom

Wanneer er tussen twee punten een elektrisch spanningsverschil is en er een elektrische verbinding tussen die twee punten bestaat, dan zal er tussen die twee punten een *elektrische stroom* vloeien. Het symbool van elektrische stroom is  $I$ . De eenheid van elektrische stroom is ampère, afgekort  $A$ . Hiervan afgeleid is de milliampère, de  $mA$ , en de microampère, de  $\mu A$ .

$$1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}$$
$$1 \mu\text{A} = 0,000.001 \text{ A.}$$

De elektrische stroom door de hartspier en de overige weefsels ligt in de orde van grootte van enkele tienden van  $\mu A$ 's.

### Weerstand

Bestaat er tussen twee punten een elektrisch spanningsverschil en er is een elektrische verbinding dan vloeit er dus een elektrische stroom. De hoeveelheid stroom is afhankelijk van de kwaliteit van de verbinding. Een maat voor de kwaliteit van de verbinding

is de *weerstand*. Hoe lager deze weerstand, hoe beter de geleiding en hoe hoger de elektrische stroom bij een gelijkblijvend spanningsverschil.

Het symbool van elektrische weerstand is R. De eenheid van elektrische weerstand is ohm, met het symbool  $\Omega$ . Hiervan afgeleid is de kilo-ohm, de  $k\Omega$ , en de megaohm, de  $M\Omega$ .

$$1 \text{ k}\Omega = 1.000 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 1.000.000 \Omega.$$

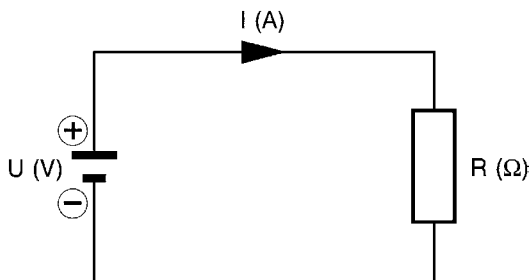
Het verband tussen elektrische spanning, stroom en weerstand is vastgelegd in de *wet van Ohm*. Deze wet stelt dat de elektrische stroom recht evenredig is met de elektrische spanning en omgekeerd evenredig met de elektrische weerstand. In formulevorm:

$$\textcircled{3} \quad I = \frac{U}{R}$$

I = stroomsterkte

U = spanning

R = weerstand.



**Afb. 1** De relatie tussen spanning, stroom en weerstand. (Bron: OGN.)

Dus: bij een gelijkblijvende weerstand zal een toename van het potentiaalverschil een hogere stroom opleveren. Evenzo zal bij een gelijkblijvend potentiaalverschil een afname van de weerstand tot een hogere stroom leiden.

Elk weefseltype in het lichaam heeft een andere elektrische weerstand. Spieren, bloedvaten en andere vochtrijke weefsels hebben een relatief lage weerstand van enkele kilo-ohms. Vetten, bindweefsel en opperhuid daarentegen hebben een relatief hoge weerstand van honderden kilo-ohms tot enkele megaohms. Met name de hoornige opperhuid met zijn hoge weerstand speelt bij het ecg een belangrijke rol. We komen daar nog op terug.

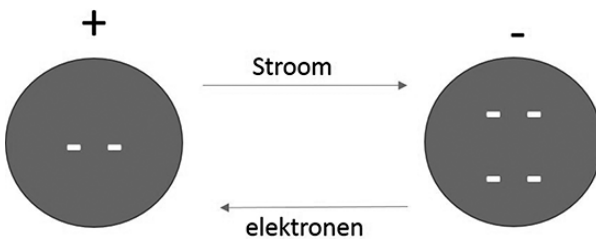
### Oefenopgave 1

- In een gesloten stroomkring is de weerstand  $850 \Omega$ , en is de aangelegde spanning  $34 \text{ V}$ . Hoe groot is de elektrische stroom?
- In dezelfde stroomkring wordt de weerstand verdubbeld. Hoe groot wordt nu de elektrische stroom?

## Polariteit

We blijven nog even bij onze twee punten. Tot nu toe is er slechts gesproken over potentiaalverschil, een *verschil* in elektrische lading, maar er is niet aangegeven welke van die twee punten de *grootste* elektrische lading bezit. De *richting* van de elektrische stroom is hiervan uiteraard afhankelijk.

Lading, lees: een hoeveelheid elektronen, vloeit van het punt met de *meeste* elektronen naar het punt met de *minste* elektronen. Aangezien elektronen negatief zijn geladen, vloeit de stroom dus van het punt met de meeste negatieve lading, de min, naar het punt met de minste negatieve lading, de plus. Dit is een beetje verwarrend. We zijn toch gewend om elektrische stroom van plus naar min te laten stromen? In wezen is dit dan ook niet juist. Neem het punt met de grootste elektrische lading in gedachten. Aangezien elektronen negatief geladen zijn, zal dit punt de minste elektronen bevatten en dus positiever geladen zijn dan het punt met de meeste elektronen. Dus zal de elektronenstroom in werkelijkheid van de minpool naar de pluspool vloeien. In afbeelding 2 ziet u dit verduidelijkt. De rechterbol bevat 4 elektronen en is dus meer negatief geladen dan de linkerbol die 2 elektronen bevat. De linkerbol is de meest negatieve, de min-pool. De rechter is de plus-pool. De elektronen vloeien van rechts naar links, en per conventie spreken we dan van stroom die van links naar rechts loopt.

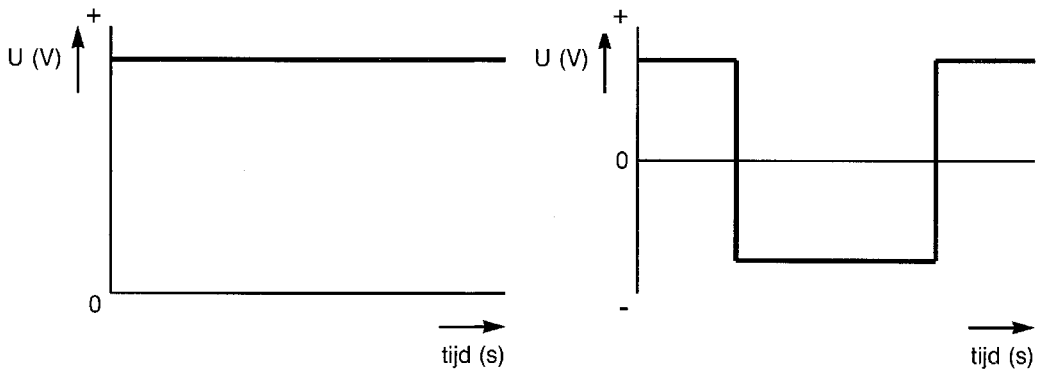


**Afb. 2** Stroom en elektronen. (Bron: OGN.)

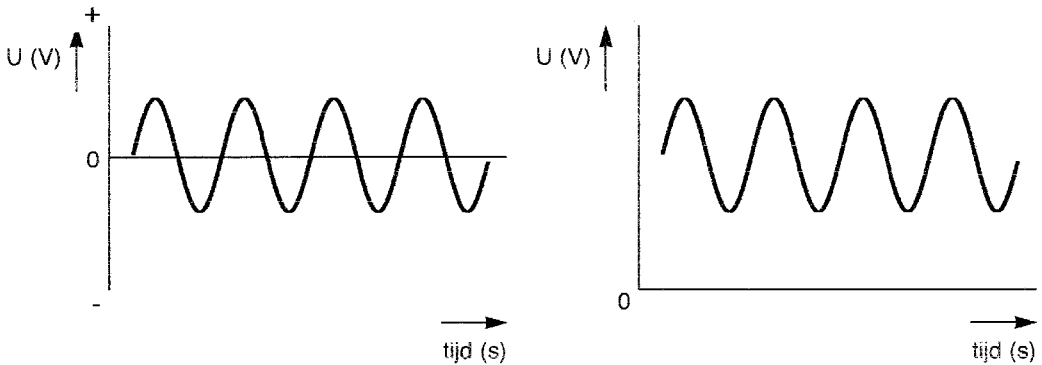
Wanneer de elektrische stroom bij voortdurende *dezelfde* richting heeft, is dit *gelijkstroom*. Het maakt dan niet uit of de sterkte van de stroom varieert, misschien pulseert, constant is of een sinusvorm heeft. Zolang de richting maar niet verandert, blijft het een gelijkstroom. Gelijkstroom wordt vaak aangeduid met de afkorting DC, wat staat voor "Direct Current".

De situatie verandert wanneer de elektrische stroom ten enenmale van richting verandert. Dan is dit *wisselstroom*. Wisselstroom wordt vaak aangeduid met de afkorting AC, wat staat voor "Alternating Current".

Zo op het eerste gezicht is het onderscheid tussen wissel- en gelijkstroom eenvoudig zolang u maar naar de richting van de stroom kijkt. Neemt u echter de verschillende eigenschappen van gelijkstroom en wisselstroom als uitgangspunt, dan is er wel degelijk verschil tussen een constante gelijkstroom en een variërende gelijkstroom. Deze laatste lijkt dan veel meer op wisselstroom dan op gelijkstroom en wordt dan ook vaak als wisselstroom behandeld.



**Afb. 3** De linkerfiguur is een spanning-tijddiagram van een gelijkspanning. De rechterfiguur stelt een wisselspanning voor. (Bron: OGN.)



**Afb. 4** De linkerfiguur is een spanning-tijddiagram van een wisselspanning. De rechterfiguur stelt een wisselende gelijkspanning voor. (Bron: OGN.)

De figuren in afbeelding 4 lijken niet toevallig erg veel op elkaar. De linkerfiguur is een echte *sinusvormige wisselstroom*, de rechterfiguur een *sinusvormige wisselende gelijkstroom*. Eén belangrijke eigenschap, de sinusvorm, hebben ze gemeen. In dit hoofdstuk worden vanaf nu wisselstromen en wisselende gelijkstromen als gelijken beschouwd.

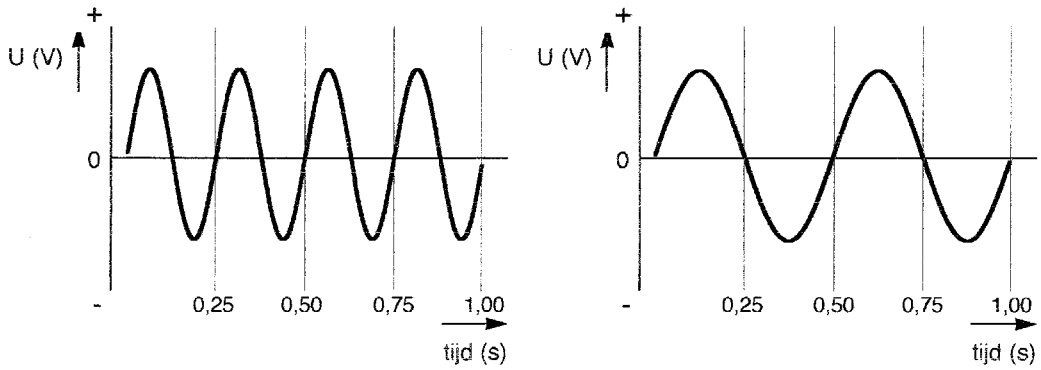
- ④ In het voorgaande wordt gesproken over wisselstromen en gelijkstromen. Zo kunnen we ook spreken van wisselspanningsbronnen en gelijkspanningsbronnen. De spanningsbron, die de hartspier naast spierpomp in wezen is, is een *wisselspanningsbron*.

## Frequentie

Het aantal malen dat een wisselstroom in één seconde een volledige periode doorloopt, heet de *frequentie* van die wisselstroom. Het symbool van frequentie is  $f$ . De eenheid van frequentie is hertz, afgekort Hz, waarvan de kilohertz, de kHz en de megahertz, de MHz is afgeleid.

$$1 \text{ kHz} = 1.000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ MHz} = 1.000.000 \text{ Hz.}$$



**Afb. 5** Links een frequentie van 4 Hz: er gaan vier volledige perioden in één seconde. Rechts een frequentie van 2 Hz: twee perioden in één seconde. (Bron: OGN.)

De relatie tussen de tijdsduur van een volledige periode (*periodetijd*) en frequentie is dus eenvoudig: het aantal volledige periodes in één seconde heet de frequentie. In formulevorm:

$$f = \frac{1}{\text{periodetijd}}$$

f = frequentie  
periodetijd in seconden.

In de linkerfiguur heeft de spanning een frequentie van 4 Hz (er staan 4 volledige sinussen in 1 seconde), in de rechterfiguur heeft de spanning een frequentie van 2 Hz (slechts 2 sinussen in 1 seconde). De frequentie is dus gehalveerd. Een verdubbeling of halvering van frequentie wordt een octaaf genoemd. Anders gezegd: de frequentie is één *octaaf* naar beneden gegaan. De frequentie gaat evenzo één octaaf omhoog wanneer de frequentie wordt verdubbeld. In het algemeen verschuift de frequentie één octaaf wanneer deze wordt gehalveerd of verdubbeld.

De hartspeer is een wisselspanningsbron die niet zo'n mooie constante frequentie laat zien. Een registratie van de pulsformige potentiaalverschillen hiervan kan een groot bereik aan frequenties bevatten variërend van vrijwel 0 tot > 1 KHz.

### Impedantie

- ⑤ Kunt u zich onze twee punten nog herinneren? Er bestond een elektrisch spanningsverschil, er was een elektrische verbinding en er liep dus een elektrische stroom. Een maat voor de kwaliteit van die verbinding was de weerstand. Dit alles geldt voor een gelijkstroom. Vloeft er echter een wisselstroom, dan wordt de weerstand *impedantie* genoemd. Weerstand en impedantie zijn verschillend.

Elektrische *weerstand* is afhankelijk van het gebruikte materiaal, de lengte en de dikte van dat materiaal. Elektrische *impedantie* is naast voornoemde eigenschappen ook nog afhankelijk van de frequentie van de elektrische stroom die door de geleider vloeit.

Het symbool van elektrische impedantie is  $Z$ . De eenheid van elektrische impedantie is eveneens ohm, met het symbool  $\Omega$ .

Bij *gelijkstromen* spreken we dus van *weerstand*.

Bij *wisselstromen* spreken we dus van *impedantie*.

Dat de hartspier een wisselspanningsbron is, wist u al. We spreken vanaf nu dan ook alleen nog maar over impedantie en niet meer over weerstand.

### Spanningsverhoudingen

- ⑥ Vergeet die twee punten nu even en stel u twee potentiaalverschillen voor,  $U_1$  en  $U_2$ . In de elektrotechniek worden voortdurend spanningsverschillen met elkaar vergeleken en worden *verhoudingen* tussen spanningsverschillen bepaald. Stel,  $U_1$  is 220 V, en  $U_2$  is 2 mV. Dan is de verhouding  $0.002 : 220 = 1 : 110.000$ , hetgeen een onhandig groot getal is. De oplossing is het gebruik van een logaritmische verhoudingsmaat. Deze heet de Bel, afgekort B. Beter bekend is de één tiende Bel, de *decibel*, afgekort dB. In formulevorm:

$$U_1 : U_2 = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} \text{ (in dB's)}$$

Met deze formule is uit te rekenen dat de spanningsverhouding uit het voorbeeld hiervoor ongeveer 100 dB is. Overigens, wanneer een spanning verdubbelt, levert dit een toename van ongeveer 6 dB op. We spreken dan van een spanningsverhouding van plus 6 dB, kortweg +6dB. Een halvering van de spanning is ook met de hiervoor staande formule te berekenen en geeft een uitkomst van -6dB. Aangezien in veel gevallen bij het vergelijken van spanningen de uitgangswaarde  $U_2$  is, en de te vergelijken waarde  $U_1$ , betekent een *positieve* waarde dus een groter, en een *negatieve* waarde een kleiner spanningsverschil.

De dB komt u in de dagelijkse praktijk van electrocardiografie niet tegen. Echter, de cardiograaf is een elektrisch apparaat waarbij de dB wel degelijk van belang is.

### Oefenopgave 2

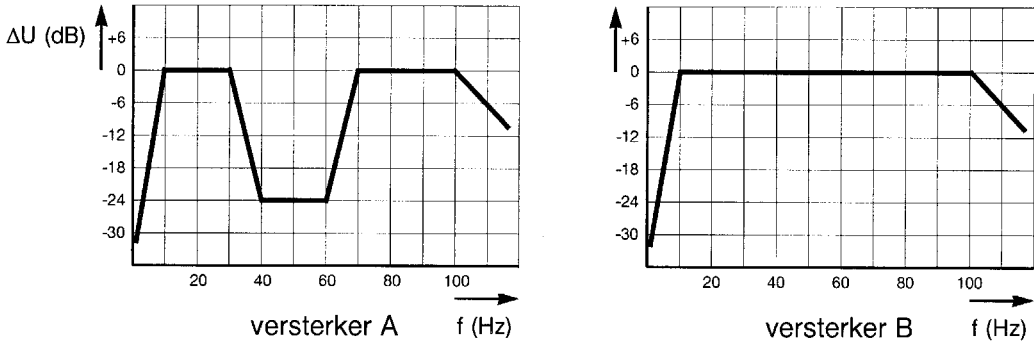
Bereken de spanningsverhouding tussen  $U_1$  en  $U_2$  als  $U_1 = 16$  mV en  $U_2 = 350$  V.

### Bandbreedte

Een wisselspanning kan bestaan uit één frequentie, die dan een zuivere sinusvorm heeft. Maar het is ook mogelijk meer frequenties bij elkaar op te tellen en in één wisselspanning onder te brengen. Al deze zuivere sinusvormen, met elk een eigen frequentie, leveren dan een *samengestelde wisselspanning* op. De elektrische activiteit van de hartspier is hier een voorbeeld van. Deze is opgebouwd uit combinaties van talloze aparte frequenties.

- ⑦ Onder *bandbreedte* verstaan we de in een samengestelde wisselspanning aanwezige frequenties. Ze wordt opgegeven als een bereik van de laagste frequentie tot de hoogste frequentie. Staat er slechts één frequentie, dan wordt het bereik van 0 Hz tot die frequentie bedoeld. Grafisch kan dit worden weergegeven in de zogenaamde *frequentie-*

*karacteristiek* waarin de onderlinge sterkteverhoudingen tussen de verschillende frequenties zijn af te lezen. Op de horizontale x-as vindt u de frequentie in Hz, op de verticale y-as de spanningsverhouding in dB's. In het geval van het te registreren signaal is dit een gegeven omdat dit signaal eenvoudigweg deze eigenschap bezit, maar bij een signaalverwerkend apparaat schuilt er een addertje onder het gras.



**Afb. 6** Links ziet u de frequentiekaracteristiek van versterker A, rechts die van versterker B.

(Bron: OGN.)

De in afbeelding 6 staande frequentiekaracteristieken zijn van twee wisselspanningsversterkers. Deze versterkers moeten frequenties tussen 10 Hz en 100 Hz even hard versterken. De kwaliteit van versterker A is in de linkerfiguur af te lezen. De bandbreedte loopt weliswaar van 10 Hz tot 100 Hz, maar tussen 30 Hz en 70 Hz is er iets aan de hand: deze frequenties worden aanmerkelijk zachter behandeld. Versterker B doet het aanmerkelijk beter: alle frequenties worden even hard versterkt.

Het mag duidelijk zijn dat bij een signaalverwerkend apparaat niet alleen de laagste en de hoogste frequentie van belang zijn, maar ook de wijze waarop alle tussenliggende frequenties worden behandeld. Als eis voor bandbreedte wordt gesteld dat alle frequenties niet méér mogen afwijken ten opzichte van de "ideale lijn" dan plus of min 3 dB.

U mag de typische versterkingsfactor van de versterker als de ideale lijn beschouwen. Bijvoorbeeld, wanneer u een groep frequenties van bijvoorbeeld 0-200 Hz met een spanning van 20 mV aan de ingang van een versterker aanbiedt, en die versterker heeft een versterkingsfactor van tien, dan zult u aan de uitgang van die versterker voor al die frequenties een spanning van 200 mV meten. Dan is de ideale lijn voor dit geval gedefinieerd op 200 mV. Biedt u vervolgens een frequentie aan van 300 Hz met een spanning van diezelfde 20 mV, en meet u vervolgens aan de uitgang 100 mV, dan is dit nog maar de helft van 200 mV, en dus -6 dB ten opzichte van de ideale lijn. 300 Hz valt dan zeker buiten de bandbreedte van deze versterker.

De cardiograaf registreert de elektrische activiteit van de hartspier en dient dus samengestelde wisselspanningen te kunnen registreren. In alle gevallen, of we het nu hebben over de signaalgever (de hartspier) of de signaalverwerker (de cardiograaf), kunnen we spreken over bandbreedte. Het signaal heeft een bandbreedte, het apparaat dat het

signaal registreert eveneens. In principe moet het registrerende apparaat dezelfde of een grotere bandbreedte hebben dan de bandbreedte van het te registreren signaal, maar als er signaal afgekapt wordt dat geen waarde heeft, dan is dat niet erg.

Het signaal mag een grotere bandbreedte hebben dan het apparaat dat het signaal registreert zolang het resultaat maar aan de minimale eisen voldoet. Zo is de bandbreedte van de menselijke stem veel groter dan de bandbreedte van een telefoontoestel. Toch kunnen we ons met dit communicatieapparaat uitstekend redden. Het klinkt wel niet zo mooi, maar de verstaanbaarheid is ruim voldoende. Iets dergelijks geldt ook voor de cardiograaf. Het hart heeft een bandbreedte van circa 1 kHz, de cardiograaf komt niet veel verder dan 150 Hz. Op het eerste gezicht lijkt dit te weinig, maar toch is deze bandbreedte voldoende voor een klinisch waardevol ecg. De aanbeveling van de American Heart Association is dat de bandbreedte van een elektrocardiogram 0.05 - 150 Hz moet zijn. In 2001 werd echter een artikel gepubliceerd door van Rijnbeet en medewerkers dat dit voor kinder ecg's nog te weinig is, daar moet de bovengrens eigenlijk omhoog naar 250 Hz.

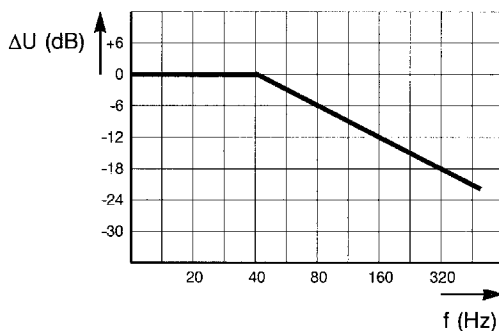
(Bron: Van Rijnbeet et al *Circulation*. 2001;104:3087-3090.)

### Oefenopgave 3

Van een versterker is de ideale lijn afgesteld op 2,0 V. U biedt aan de ingang van deze versterker steeds hoger worden frequenties aan, oplopend vanaf 0 Hz. Aan de uitgang meet u voortdurend de spanning, en u ziet daar steeds keurig 2,0 V. Bij 160 Hz meet u echter een spanning van 1,5 V. Valt 160 Hz binnen de bandbreedte van deze versterker? Motiveer uw antwoord.

### Elektrische filters

In elektrische apparatuur kan de bandbreedte worden aangepast door het signaal met een *filter* te bewerken. Soms vormen filters een vast onderdeel van het elektrische circuit, soms kunnen ze door de gebruiker worden in- of uitgeschakeld. Zo'n filter bestaat uit elektrische componenten, zoals weerstanden, spoelen en condensatoren. Afhankelijk van de elektrische eigenschappen van de componenten en de wijze waarop de schakeling is samengesteld, worden de frequenties van het binnenkomende signaal verschillend behandeld.



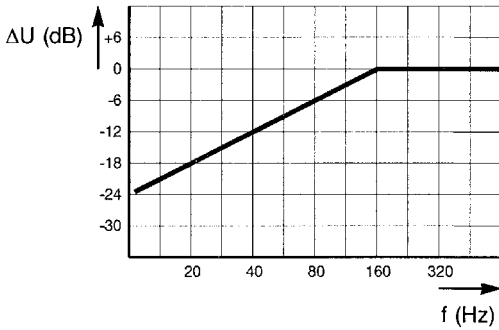
**Afb. 7** De frequentiecarakteristiek van een laagdoorlaatfilter. (Bron: OGN.)

## Laagdoorlaatfilter

- ⑧ Zoals de naam al suggereert, laat dit filter lage frequenties ongemoeid en onderdrukt het hoge frequenties. Het laagdoorlaatfilter wordt ook wel hoogaf-filter genoemd.

## Hoogdoorlaatfilter

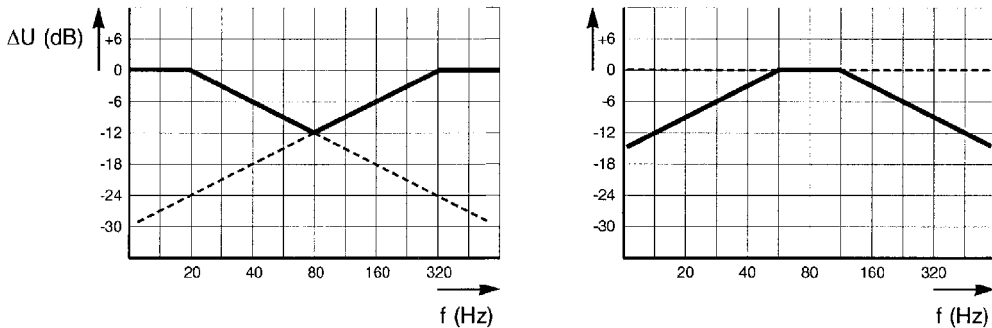
Het hoogdoorlaatfilter laat hoge frequenties ongehinderd passeren, terwijl lage frequenties worden onderdrukt. Dit type filter wordt ook wel laagaf-filter genoemd.



**Afb. 8** De frequentiecarakteristiek van een hoogdoorlaatfilter. (Bron: OGN.)

## Bandfilters

- ⑨ Bandfilters zijn combinaties van hoogdoorlaat- en laagdoorlaatfilters. Door een uitgekiende keuze van beide typen kan worden bereikt dat een groepje frequenties wordt doorgelaten: het *banddoorlaatfilter*. Daarnaast kan juist een groepje frequenties worden onderdrukt: het *bandsperfilter*.

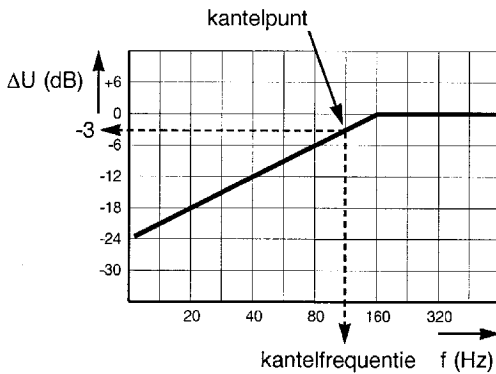


**Afb. 9** De frequentiecarakteristieken van respectievelijk links een bandsperfilter en rechts een banddoorlaatfilter. (Bron: OGN.)

Voor het eeg geldt dat frequenties onder de 0.05 Hz niet meer interessant zijn voor het eeg. Hierbij gaat het om zeer trage schommelingen:  $1/0.05 = 1 \times$  per 20 seconden. Dergelijke trage variaties worden veelal door beweging veroorzaakt. Zoals eerder genoemd maken frequenties boven de 100 Hz niet een belangrijk deel uit van het signaal. Een bandpassfilter van 0.05 - 100 Hz is dan ook een gebruikelijke keuze in de praktijk.

## Kantelpunt

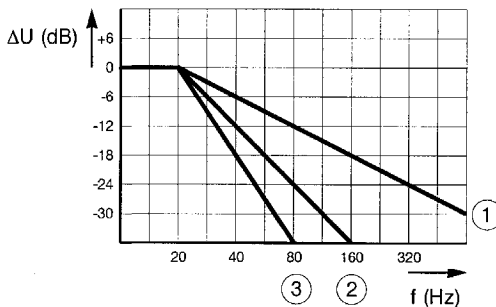
Kijkt u naar het effect van een filter, dan kunt u duidelijk twee gebieden onderscheiden: enerzijds een groep frequenties waar niets mee gebeurt, anderzijds een groep frequenties waar verzwakking optreedt. De frequentie waarbij een verzwakking van 50% oftewel 3 dB optreedt, heet het *kantelpunt* of de *kantelfrequentie*. U kunt ook stellen dat het kantelpunt die frequentie is die net niet meer aan de eis van bandbreedte voldoet: de afwijking van de ideale lijn mag maximaal plus of min 3 dB zijn, en de kantelfrequentie zit precies op -3 dB.



**Afb. 10** De kantelfrequentie is de frequentie op het -3 dB-punt. (Bron: OGN.)

## Steilheid

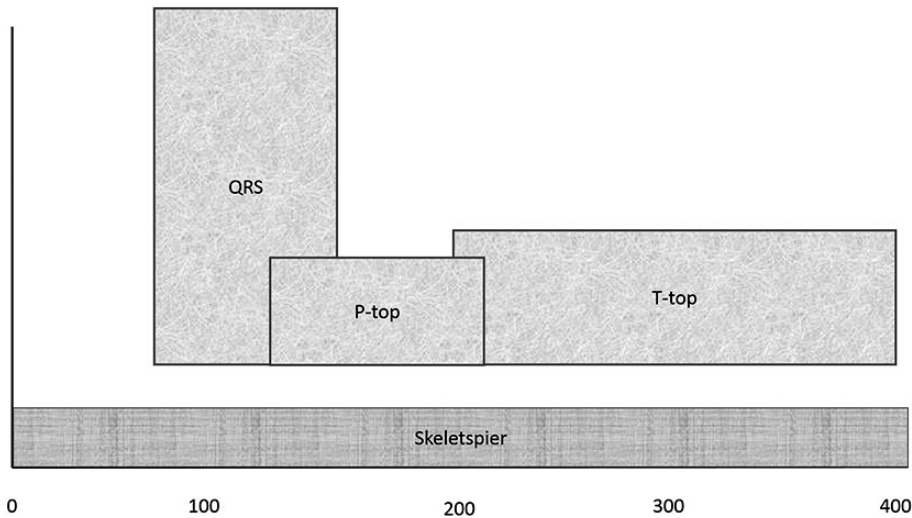
- ⑩ De steilheid van een filter is een maat voor de *effectiviteit*. In z'n eenvoudigste vorm heeft een filter een steilheid van 6 dB per octaaf. Krachtiger filters zijn samengesteld uit een reeks achter elkaar geplaatste eenvoudige filters. Zo heeft een filter dat bestaat uit drie "basiseenheden" een steilheid van 18 dB/octaaf.



**Afb. 11** De toenemende steilheid van een laagdoorlaatfilter bij (1), (2) en (3) gekoppelde basisfilters. (Bron: OGN.)

Een klein voorbeeld om het te verduidelijken. Als u naar afbeelding 12 kijkt, ziet u een P, QRS, T-complex. Van deze 3 onderdelen is het QRS het scherpst, oftewel: de hoogste frequenties uit het signaal komen voor in het QRS. Als de hoogste frequentie van een filter op een ecg te ver teruggebracht wordt, zal dus de scherpte van het QRS afnemen. De laatste frequenties van het signaal bevinden zich in de T-top. Als de laagste frequentie van een filter op een ecg te ver teruggebracht wordt, zal dus de T-top afvlakken. Het

vereist niet veel fantasie om zich voor te stellen dat dit desastreus is voor het meten van bijvoorbeeld ST-afwijkingen.



**Afb. 12** P QRS T, het QRS is de scherpste deflectie. (Bron: OGN.)

#### Oefenopgave 4

Een laagdoorlaatfilter heeft een kantelpunt van 80 Hz en een steilheid van 12 dB/octaaf. Hoeveel verzwakking treedt op bij een frequentie van 640 Hz?

#### Digitale verwerkingstechnieken

De elektrische potentiaalverschillen van de hartspier, de trillende snaar van een gitaar, de kwikkolom in een thermometer, het zijn allemaal voorbeelden van een *analoog* signaal. Dit heet analoog, omdat de waarnemer de gegevens verwerkt in de vorm van fysische grootheden die gelijkvormig zijn aan de bron. Zo brengt de trillende snaar het trommelvies gelijkvormig in trilling, de hoogte van de kwikkolom is evenredig, en dus als het ware gelijkvormig aan de temperatuur.

Het registreren van analoge signalen verloopt niet zonder problemen. Denk maar eens aan de inmiddels verouderde analoge langspeelplaat met ruisen, krassen en zwevende tonen. Daarnaast is het kopiëren van een analoog signaal zonder verlies niet mogelijk. Oude opslagsystemen zoals magneetbanden waren beperkt houdbaar, de magnetische lading van de tape ging na verloop van tijd verloren. Het alternatief is digitale verwerking van het te registreren signaal. Digitale verwerkingstechnieken zijn sinds jaren de standaard, ook in de elektrocardiografie.

#### Algemeen

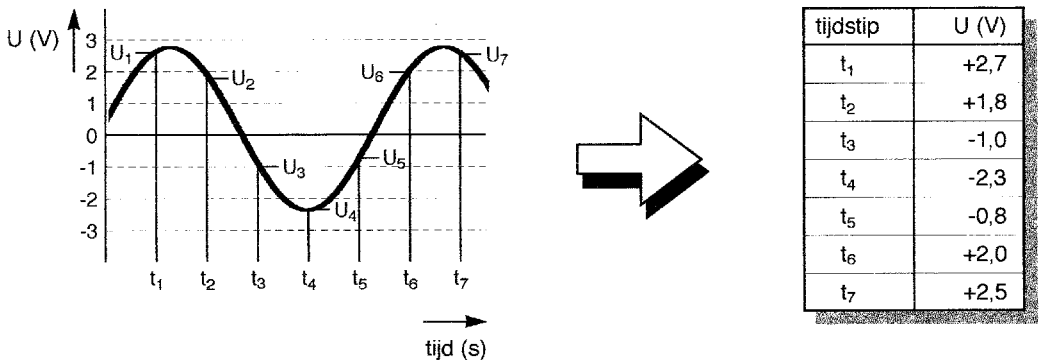
Digitaal verschilt wezenlijk van analoog. Digitale signalen zijn *niet gelijkvormig* aan analoge signalen. Een digitaal signaal bestaat louter uit *getallen*, want dat is het enige waar computers mee overweg kunnen.

- ⑪ Om van een analoog signaal een digitale representant te maken moet dit signaal worden omgezet. Dit gebeurt met een Analoog-Digitaal omzetter, kortweg *AD-omzetter*. Een

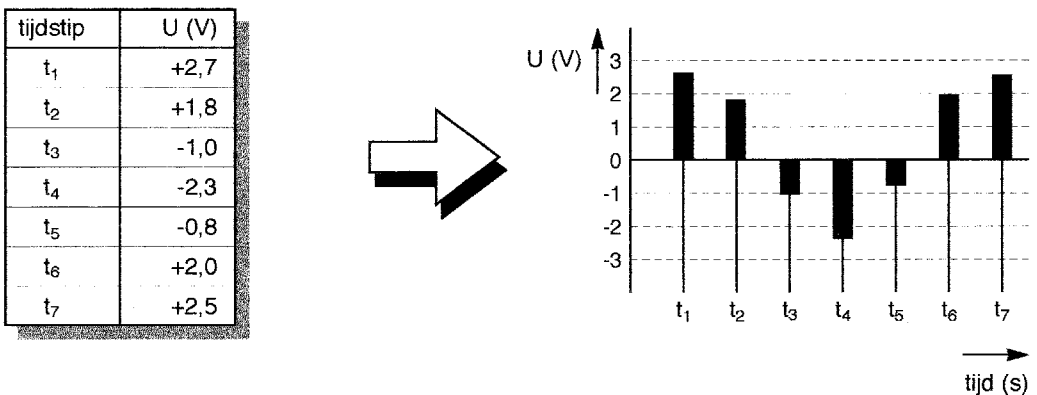
digitaal signaal wordt met een *DA-omzetter* weer naar een analoge signaal omgezet. U treft ook de benamingen *AD-convertor* en *DA-convertor* aan.

De *AD-omzetter* doet in principe niets anders dan op gezette tijden de waarde van het analoge signaal bekijken, deze waarde omzetten in een getal en vervolgens dit getal in een tabel plaatsen. Deze tabel wordt opgeslagen in een geheugen.

Moet naderhand vanuit deze tabel het analoge signaal worden gereconstrueerd, dan haalt de *DA-omzetter* op dezelfde gezette tijden het opvolgende getal uit de tabel en kent hier de bijbehorende analoge spanningswaarde aan toe.



**Afb. 13** Van analogo naar digitaal. De waarde van de spanning op de tijdstippen  $t$  is in het spanning-tijddiagram af te lezen en terug te vinden in de tabel. (Bron: OGN.)



**Afb. 14** Van digitaal terug naar analogo. (Bron: OGN.)

De digitale spanningswaarden op dezelfde tijdstippen  $t$  worden uit de tabel gehaald en omgezet naar een analoge spanningswaarde. De trapjes die zo ontstaan, worden met een laagdoorlaatfilter als het ware gladgestreken zodat een vloeiend analoge signaal ontstaat. Dit is echter een inschatting van de werkelijkheid. Wanneer alleen de informatie uit het rechter-deel van afb. 14 beschikbaar is, weet je domweg niet meer wat er tussen twee van dergelijke balkjes gebeurd is. Als je dat wel had willen weten, had je meer meetpunten moeten verzamelen (sneller sampelen).

### De bemonsteringsfrequentie

- ⑫ Het op gezette tijden bepalen van de waarde van het analoge signaal heet "bemonsteren", ook wel "samplen" (Engels). Er wordt als het ware periodiek een monster genomen. Het aantal malen dat er per seconde wordt bemonsterd, heet de *bemonsteringsfrequentie*, ook wel *sampling rate* (Engels). Hoe hoger de aanwezige frequenties in het signaal, hoe hoger de bemonsteringsfrequentie moet zijn. De bemonsteringsfrequentie moet *tweemaal zo hoog* zijn als de bovenste frequentie van de bandbreedte van het analoge signaal. In formulevorm:

bemonsteringsfrequentie =  $2 \times$  bovenste frequentie bandbreedte.

Wilt u een analoge signaal van 200 Hz digitaliseren, dan dient de AD-omzetter elke seconde minimaal 400 monsters te nemen.

### De woordbreedte

- ⑬ In voorgaande tabellen treft u de getallen van 0 tot en met 9 aan. Een computer kan echter alleen werken met "zwart-wit", "aan-uit" of "ja-nee". In de mensenwereld regeert het tientallig (decimaal) stelsel, in de digitale wereld het tweetallig, ofwel *binair stelsel*. De symbolen in dit binaire stelsel zijn 0 en 1.

In het decimale stelsel zijn grotere getallen mogelijk door het gebruiken van meer posities, zoals tientallen, honderdtallen en duizendtallen. Zo bestaat het decimale getal 47.233 uit vijf posities. We zeggen ook wel: het getal 47.233 heeft een breedte van vijf posities.

Iets dergelijks is ook in het binaire stelsel het geval. In computervaktaal spreken we echter niet over "het aantal posities", maar over de *woordbreedte*. Uiteraard neemt bij het toenemen van de woordbreedte de grootte van het getal ook toe, net als in het decimale stelsel.

Daarnaast wordt er in dezelfde vaktaal niet over posities gesproken, maar over "bits". Een bit kan 0 of 1 zijn. De woordbreedte van het binaire getal "00110100" is acht bits.

Een groep van acht bits heet ook wel een "*Byte*". Afgeleiden hiervan zijn de kiloByte, de kB en de megaByte, de MB. Het voornoemde binaire getal van acht bits is dus precies één Byte. De voorvoegsels "kilo" en "mega" zijn overigens misleidend, want ze representeren niet precies een factor duizend:

1 kB = 1.024 B

1 MB = 1.024 kB.

De woordbreedte van de AD-omzetter en de DA-omzetter bepaalt nu hoeveel verschillende niveaus in het analoge signaal kunnen worden onderscheiden. Hoe meer bits, hoe groter het aantal verschillende niveaus. In formulevorm:

aantal niveaus =  $2^{(\text{aantal bits})}$ .

Zouden er bij het digitaliseren van het analoge signaal bijvoorbeeld slechts twee bits worden gebruikt, dan kunnen vier spanningsniveaus worden onderscheiden. Is de woordbreedte daarentegen acht bits, dan levert dit  $2^8 = 256$  verschillende niveaus op. Het maximale getal dat in een x-aantal bits kunnen opslaan is (2 tot de macht X) -1. Samen met het getal 0 levert dat 2 tot de macht x mogelijkheden.

Zoek nu op internet de systematiek van binair tellen op en maak u die eigen. U hoeft niet te kunnen rekenen met een binair getal als 101, maar u moet kunnen herleiden en begrijpen dat dit het getal 5 voorstelt.

### Capaciteit

Wilt u weten hoeveel *geheugencapaciteit* of *transportcapaciteit* er in de digitale techniek per tijdseenheid nodig is, dan bepaalt u het product van tijd, bemonsteringsfrequentie en woordbreedte. Neem bijvoorbeeld een registratie van 20 seconden, gedigitaliseerd met een bemonsteringsfrequentie van 150 Hz en een woordbreedte van 12 bits. Er is een verbinding nodig die elke seconde  $150 \times 12 = 1.800$  bits kan verwerken. Aan geheugencapaciteit is nodig  $150 \times 12 \times 20 = 36.000$  bits, oftewel 4.500 bytes.

In het rekenvoorbeeld wordt uitgegaan van de ideale transportverbinding. In werkelijkheid ligt de capaciteit altijd lager dan de theoretisch haalbare capaciteit. Dit komt doordat een gedeelte van de transportcapaciteit wordt gebruikt om de verbinding tot stand te brengen en te houden, en de verzonden gegevens op juistheid te controleren.

### Oefenopgave 5

- Als u met een woordbreedte van 12 bits 500 samples per seconde wilt nemen, hoeveel bits hebt u dan elke seconde nodig?
- Als u 30 seconden wilt samplen, en u hebt een verbinding met een nuttige transportcapaciteit van 15 kB/s, hoelang duurt het dan om de gegevens te versturen?

### Kwaliteit

In het algemeen geldt dat de kwaliteit van analoog-digitaalconversie en vice versa *recht evenredig* is met zowel de bemonsteringsfrequentie als de woordbreedte. Hier geldt echter hetzelfde principe als bij bandbreedte: zowel bemonsteringsfrequentie als woordbreedte wordt zó gekozen dat de kwaliteit voldoende is voor het doel waarvoor die bestemd is. De samplefrequentie van digitale electrocardiografen wisselt van merk tot merk. Terwijl op zich voor het ecg 500 Hz voldoende is, wordt voor andere doeleinden een samplefrequentie tot wel 10.000 Hz gehanteerd. De woordbreedte ligt meestal zo rond de 12-14 bits, maar soms ook hoger, en met een woordbreedte van 10 tot 14 bits.

Andere apparatuur werkt met andere bemonsteringsfrequenties. Zo werkt een Holter-recorder gemiddeld op 120-250 Hz. Een signaal dat met een frequentie van 250 Hz bemonsterd wordt heeft dus een resolutie van  $1.000/250 = 4$  ms. Dit betekent dat signalen met een duur korter dan 4 ms volledig gemist kunnen worden.

## Voor- en nadelen

Nadelen van digitale signaalverwerking:

- Bij het ontbreken of verloren gaan van samples kan het analoge signaal niet of beperkt worden gereconstrueerd en treden er grote vervormingen op.

⑭ Voordelen van digitale signaalverwerking:

- Storingsinvloeden hebben weinig invloed op het digitale signaal.
- Het digitale signaal kan verliesvrij over grote afstanden worden getransporteerd.
- Er kunnen verliesvrij kopieën worden vervaardigd.
- Met behulp van speciale technieken kan het digitale signaal worden bewerkt en veranderd op een wijze die niet met analoge technieken mogelijk is.
- In digitale vorm zijn signalen gemakkelijk te archiveren en te catalogiseren.

## Parate-kennisvragen

- ① Over welke twee diagnostische hoofdgroepen geeft het eeg informatie?
- ② Hoeveel volt is één millivolt?
- ③ Geef de wet van Ohm in formulevorm.
- ④ Wat voor soort spanningsbron is de hartspier?
- ⑤ Geef een ander woord voor wisselstroomweerstand.
- ⑥ Met welke eenheid worden spanningsverhoudingen aangeduid?
- ⑦ Welke eenheid staat er bij een frequentie karakteristiek op de x-as? En welke op de y-as?
- ⑧ Wat doet een laagdoorlaatfilter?
- ⑨ Wat is een bandfilter?
- ⑩ Welke steilheid heeft een filter in zijn eenvoudigste vorm?
- ⑪ Wat is de functie van respectievelijk de AD-omzetter en de DA-omzetter?
- ⑫ Geef een ander term voor bemonsteringsfrequentie.
- ⑬ Hoe noemt men het tweetallig stelsel?
- ⑭ Wat zijn de voordelen van digitale signaalverwerking?

## Uitwerking van de oefenopgaven

### *Uitwerking oefenopgave 1*

- a. U maakt gebruik van de volgende gegevens:
- de spanning U is 34 V
  - de weerstand R is 850  $\Omega$ .

Gebruik de wet van Ohm:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{34}{850} \Rightarrow I = 0,04 \text{ A}$$

- b. U maakt nu gebruik van de volgende gegevens:
- de spanning blijft 34 V
  - de weerstand wordt tweemaal zo hoog, dus  $2 \times 850 = 1.700 \Omega$ .

Gebruik weer de wet van Ohm:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{34}{1.700} \Rightarrow I = 0,02 \text{ A}$$

Merk op dat een verdubbeling van de weerstand een halvering van de elektrische stroom veroorzaakt, onder voorwaarde dat de elektrische spanning dezelfde blijft.

### *Uitwerking oefenopgave 2*

Er is gegeven:

- $U_1 = 16 \text{ mV}$
- $U_2 = 350 \text{ V}$

Gebruik de volgende formule:

$$U_1 : U_2 = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2}$$

Vul  $U_1$  en  $U_2$  in, maar let op dat beide spanningen in dezelfde grootte staan, volts of millivolts. Dus:

$$U_1 : U_2 = 20 \cdot \log \frac{0,016}{350} = 20 \cdot \log 0,00004571 = 20 \cdot -4,33 = -86,8 \text{ dB}$$

Merk op dat indien  $U_1$  kleiner is dan  $U_2$ , de waarde in dB's negatief is.

***Uitwerking oefenopgave 3***

Definieer de ideale lijn van 2,0 V als 0 dB, en bepaal de verhouding tussen de spanning bij 160 Hz en de spanning van 2,0 V.  $U_1$  is dus 1,5 V,  $U_2$  is 2,0 V.

$$U_1 : U_2 = 20 \cdot \log \frac{1,5}{2,0} = 20 \cdot \log 0,75 = 20 \cdot -0,125 = -2,5 \text{ dB}$$

U hebt uitgerekend dat 160 Hz 2,5 dB zwakker is dan de ideale lijn, die immers 0 dB is. Aangezien er geldt dat aan de eis van bandbreedte wordt voldaan indien frequenties niet méér van de ideale lijn afwijken dan plus of min 3 dB, mag u stellen dat 160 Hz binnen de bandbreedte van deze versterker valt.

***Uitwerking oefenopgave 4***

Een laagdoorlaatfilter laat lage frequenties ongehinderd passeren, en verzwakt hogere frequenties. Het punt waarop het filter 3 dB verzwakt heet het kantelpunt, en is in dit filter 80 Hz. De effectiviteit van dit filter is 12 dB/octaaf. Dit betekent dat wanneer u steeds een octaaf omhoog gaat, de verzwakking steeds 12 dB méér wordt. Dus:

- bij 80 Hz is de verzwakking 3 dB
- een octaaf hoger, bij 160 Hz, is de verzwakking  $3 + 12 = 15$  dB
- weer een octaaf hoger, bij 320 Hz, is de verzwakking  $15 + 12 = 27$  dB
- aangekomen bij 640 Hz, is de verzwakking  $27 + 12 = 39$  dB.

***Uitwerking oefenopgave 5***

- a. 500 samples per seconden betekent  $500 \times 12$  bits = 6.000 bits per seconde.
- b. 30 seconden samplen betekent dat er 30 seconden lang elke seconde 6.000 bits nodig zijn.

dus: in totaal  $30 \times 6.000 = 180.000$  bits.

Een transportcapaciteit van 15 kB/s betekent dat elke seconde  $15 \times 1.024$  bytes kunnen worden getransporteerd.

Dit is  $15 \times 1.024 \times 8 = 122.880$  b/s.

Er is dus aan tijd nodig:

$$\frac{180.000}{122.880} = 1,465 \text{ s.}$$