

1 Wisselstroomtheorie

Herhaling AC-grootheden



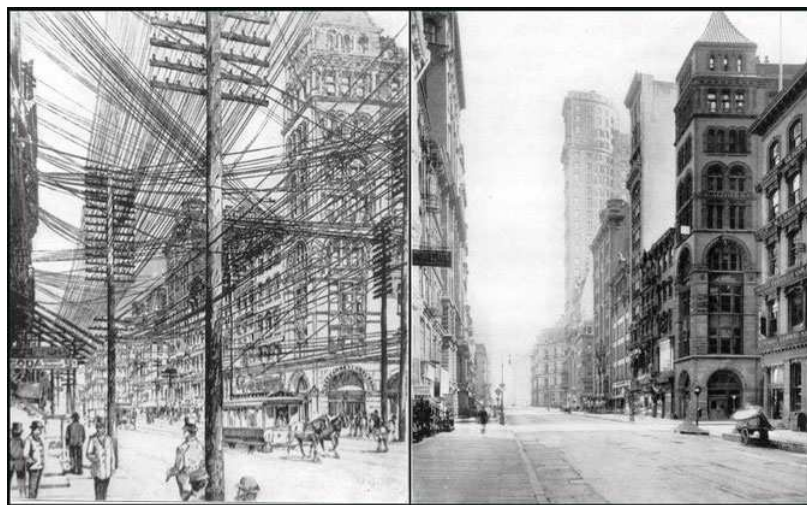
1.1 De elektrische revolutie

1.1.1 Einde van het stoomtijdperk

De stoommachine was dé uitvinding om schepen en treinen in beweging te brengen. Ook 'automobielen' reden op stoom. De pompen en de liften in de mijnbouw en de weefgetouwen in de weverijen werden via een ingenieus systeem van riemen en assen door een stoommachine aangedreven. Een handiger manier om energie te transporteren zou weldra het wereldbeeld bepalen: **elektriciteit**.

1.1.2 Het gelijkstroomstelsel van Edison

Thomas Alva *Edison* (1847-1931) trok in die tijd getalenteerde mensen aan om in zijn laboratorium te experimenteren. Edison was voorstander om elektrische energie via zijn **gelijkstroom**-systeem te verdelen aan de aanvankelijk weinige verbruikers.



△ Fig.1.1 | Wisselstroom versus gelijkstroom.
Bron: <https://teslaresearch.jimdofree.com>

Toen het aantal verbruikers snel begon te stijgen kwamen ook de beperkingen van een gelijkstroomsysteem snel aan het licht. Een wirwar van kabels ontsierde het straatbeeld van het toenmalige New-York en kortsluitingen en branden waren dagelijkse kost.

1.1.3 Het wisselstroomsysteem van Tesla

Nikola Tesla (1856-1943) slaagde erin om **wisselstroomenergie** te transporteren over een grote afstand. Hij maakte gebruik van transformatoren om deze klus te klaren. Aanvankelijk spartelde Edison tegen maar hij moest snel toegeven dat het systeem van zijn vroegere medewerker performanter was. De twee systemen beconcureerden elkaar enige tijd en historici spreken van een heuse 'War of the currents'.



△ Fig.1.2 | Twee opponenten: rechts een gewiekst zakenman en links een visionaire geest.
Bron: <http://iworldenergy.blogspot.com>

In 1896 werd er onder leiding van Tesla bij de Niagarawatervallen een waterkrachtcentrale van 15 000 pk opgestart. Het water dreef de turbines aan en driefasige wisselstroomgeneratoren zette deze mechanische energie om in elektrische wisselstroomenergie. De straat-, de bedrijfs- en de woningverlichting waren geboren. Zo kwam de **elektrische revolutie** op gang...



1.2 Gelijkstroom

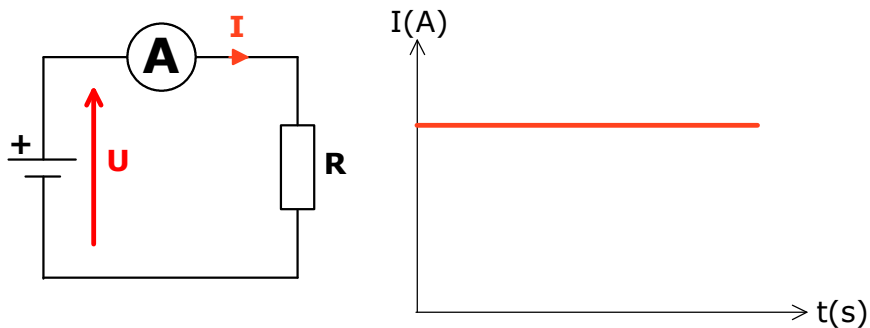
1.2.1 Constante gelijkstroom

Definitie

- Een **constante gelijkstroom** is een stroom die onveranderlijk is.
- Hij blijft dezelfde waarde behouden en in dezelfde zin stromen.



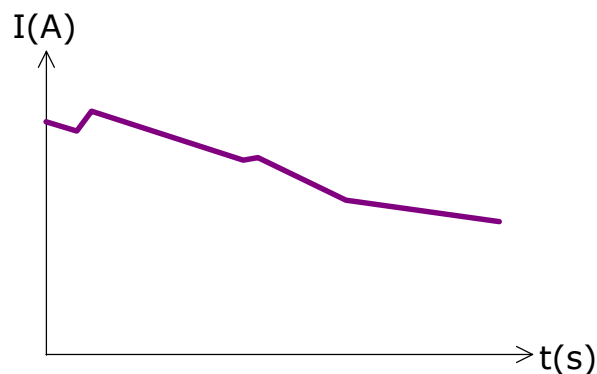
Bekijk de kring in figuur 1.3. Houd je de spanning constant, dan merk je dat het stroomverloop onveranderlijk is in de tijd. De figuur geeft $I=f(t)$ grafisch weer.



△ Fig.1.3 | Constante gelijkstroom.
Tekening: W. Van Wichelen

1.2.2 Veranderlijke gelijkstroom

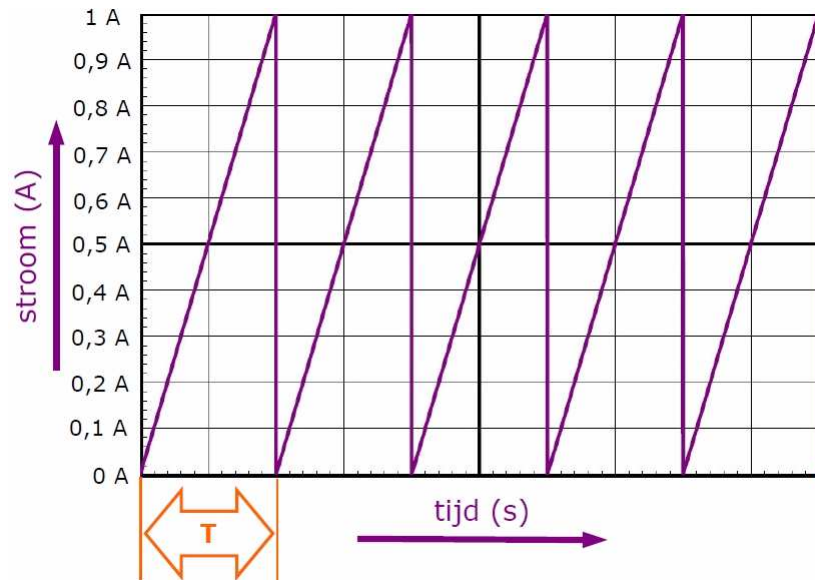
Bij een constante gelijkstroom blijft zowel de zin als de waarde van de gelijkstroom dezelfde. Toch spreken we nog steeds van een gelijkstroom als je de *waarde* van de gelijkstroom **veranderlijk** maakt:



△ Fig.1.4 | Veranderlijke gelijkstroom.
Tekening: W. Van Wichelen

1.2.3 Periodieke gelijkstroom

Indien je het veranderlijke karakter van een veranderlijke stroom een vast ritmisch patroon oplegt, dan verkrijg je een **periodieke** (pulserende) **gelijkstroom** zoals afgebeeld in figuur 1.5.



△ Fig.1.5 | Pulserende gelijkstroom.
Tekening: W. Van Wichelen

Definitie

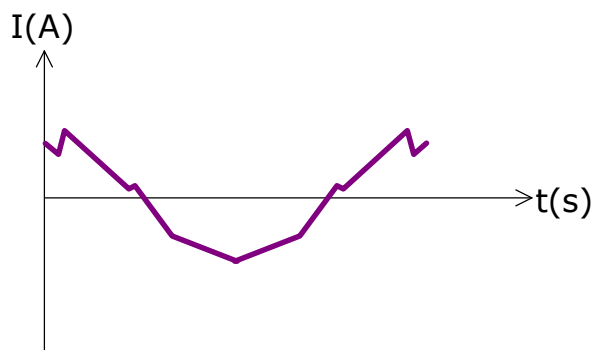
- Een **periodieke gelijkstroom** is een verzameling van gelijke stroomtijdsintervallen, die alle dezelfde eigenschappen hebben.
- Het stroomtijdsinterval noem je **periode**, uitdrukt in seconden. Symbool: 'T'



1.3 Wisselstroom

1.3.1 Wisselende stroom

Indien je de veranderlijke gelijkstroom ook van **polariteit** laat wisselen, dan creëer je een *wisselende* stroom:



△ Fig.1.6 | Wisselende stroom.
Tekening: W. Van Wichelen

1.3.2 Wisselstroom

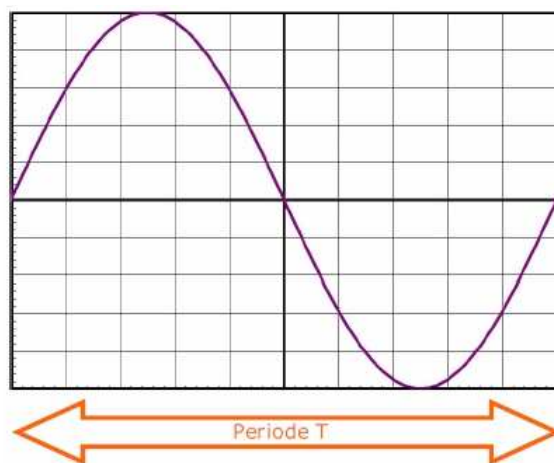
Als je de wisselende stroom nu een ritmisch patroon oplegt, dan verkrijg je een **wisselstroom**.

Definitie

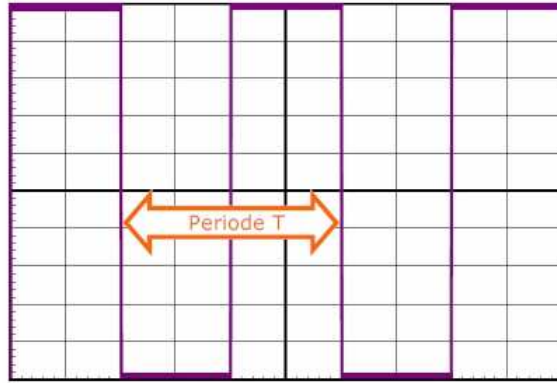
- Een **wisselstroom** bezit geen vaste *polariteiten*.
- De polen wisselen *periodiek* om.



Onderstaande figuren tonen enkele praktisch voorkomende wisselstromen van bijvoorbeeld een functiegenerator:



△ Fig.1.7 | Sinus golfvorm.
Tekening: W. Van Wichelen



△ Fig.1.8 | Blok golf.
Tekening: W. Van Wichelen



△ Fig.1.9 | Driehoek.
Tekening: W. Van Wichelen

Notaties

- **Kleine** letters: worden gereserveerd voor alle *veranderlijke* waarden van spanning en stroom en vermogen in functie van de tijd.
- Voorbeelden: i , u , p ,...
- **Hoofd**letters: voor vaste waarden zoals *gelijkspanning*, *topwaarden*, *effectieve* waarden.
- Voorbeelden: I , U , P ,...



1.4 Terminologie

1.4.1 Periode van een sinusgolf

Definitie

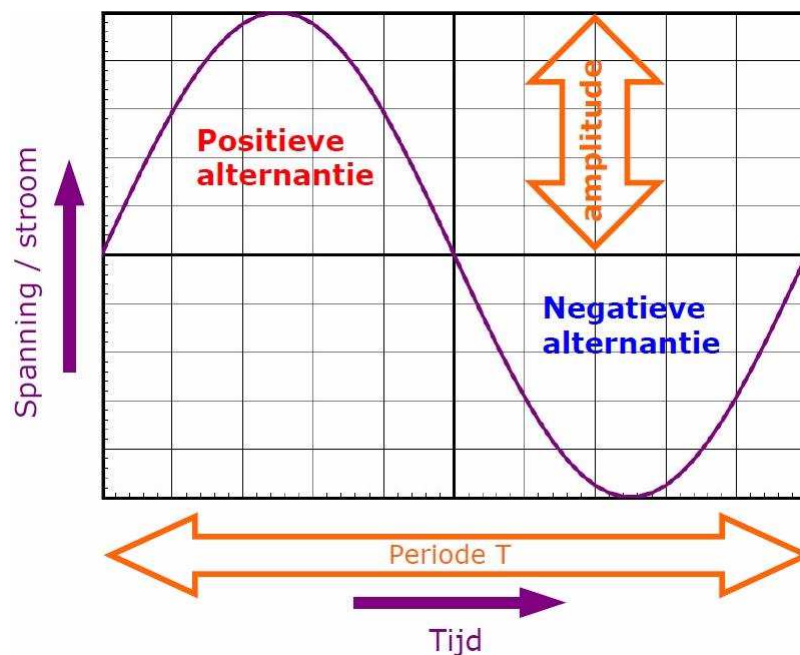
- De **periodetijd**, periodeduur of herhalingstijd (**T**) is de tijd die nodig is om het sinusvormige signaal juist éénmaal volledig te beschrijven.
- 'T' wordt uitgedrukt in **seconden** (s).



1.4.2 Amplitude van een sinusgolf

Definitie

De **amplitude** van een sinusspanning is de waarde van de spanning gemeten van de nuldoorgang tot de *maximum*waarde.



△ Fig.1.10 | Periode en amplitude van een sinusgolf.
Tekening: W. Van Wichelen

Parate kennis!

- Per periode zijn er twee amplituden: een *positieve* en een *negatieve alternantie*.
- Beide hebben dezelfde absolute waarde.



1.4.3 Peak-to-peak waarde

Definitie

- De **peak-to-peak** waarde (U_{ptp} of I_{ptp}) is de waarde die gemeten wordt tussen de twee amplitudes van een sinusgolf.
- Voor een sinusspanning geldt: $U_{ptp} = 2 \times U_p$



1.4.4 Frequentie

Definitie

- De **frequentie** (f) van een wisselspanning of wisselstroom is een maatgetal dat aangeeft hoeveel maal de golfvorm zich herhaalt per seconde.
- We drukken de frequentie uit in 'hertz' (**Hz**).
- Verband tussen frequentie en periode: $f = 1/T$.



1.4.5 Hoeksnelheid

Definitie

- De **hoeksnelheid**, cirkelfrequentie of pulsatie is een wiskundig begrip dat in verband staat met het toerental waarmee een winding in een tweepolig magnetisch veld draait.
- We drukken hoeksnelheid uit in 'radialen per seconde' (**rad/s**).



Parate kennis!

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\pi \text{ rad} = 180^\circ$$



1.4.6 Ogenblikkelijke waarde

Definitie

De **ogenblikkelijke** of *momentele* waarde van een stroom of spanning is die waarde van de spanning (of stroom) die op een bepaald ogenblik (moment) vast te stellen is.

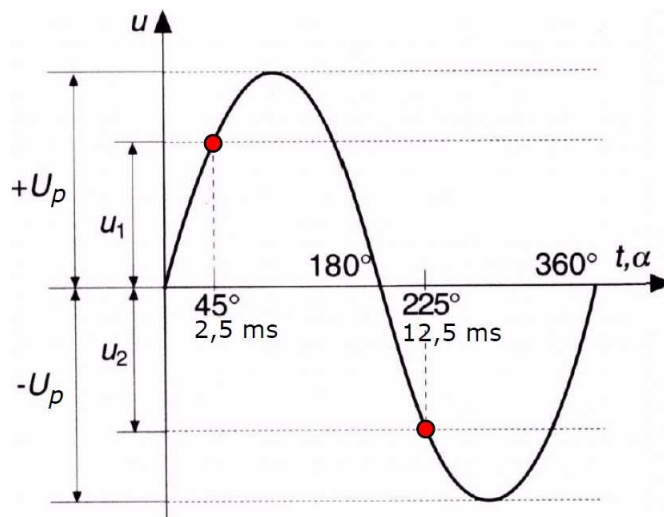


Vermits de stroom of de spanning een sinusoidaal verloop kent, kan je het ogenblik vaststellen in functie van de doorlopen hoek van deze stroom of spanning. De doorlopen hoek bepaal je vanaf de *nuldoorgang* voorafgaand aan de positieve alternantie.

$$u(t) = U_p \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



- $u(t)$: ogenblikkelijke spanning in volt (V)
- U_p : amplitude in volt (V)
- ω : hoeksnelheid in radialen per seconde (rad/s)
- t : momenteel tijdstip in seconde (s)



△ Fig.1.11 | Ogenblikkelijke waarde van een sinusgolf.
Tekening: W. Van Wichelen

1.4.7 Gemiddelde waarde

Definitie

- De **gemiddelde** waarde wordt ook wel de *DC-component* van een spanning of stroom genoemd.
- Wiskundig is dit de horizontale lijn (evenwijdig met de t-as) welke de gemiddelde spanning of stroom voorstelt, zodoende dat de oppervlakte boven deze DC-lijn dezelfde is als onder deze DC-lijn.



1.4.8 Gemiddelde waarde van een sinus

Voor de gemiddelde waarde van een sinusspanning of een sinusstroom kunnen we kort zijn. Immers, een sinussignaal is mooi *symmetrisch* t.o.v. de tijdas, dus is het logisch dat de (wiskundig) gemiddelde spanning (of stroom) gelijk is aan nul. We zeggen dan dat de DC-component gelijk is aan nul.

Parate kennis!

- De **gemiddelde** waarde van een **sinus**spanning of een **sinus**stroom is gelijk aan **nul**.
- Anders gezegd, de *DC-component* is gelijk aan **nul**.



1.4.9 Effectieve waarde

Laten we een gedachtenexperiment doen. Stel dat we het 230V-net willen meten met een *gemiddelde-waarde-meter*. De netspanning is sinusvormig, dus onze gemiddelde-waarde-meter zal nul volt aanduiden. En toch kunnen we bijvoorbeeld lampen doen branden wanneer we ze aansluiten op dit 'nul-volt-net'...

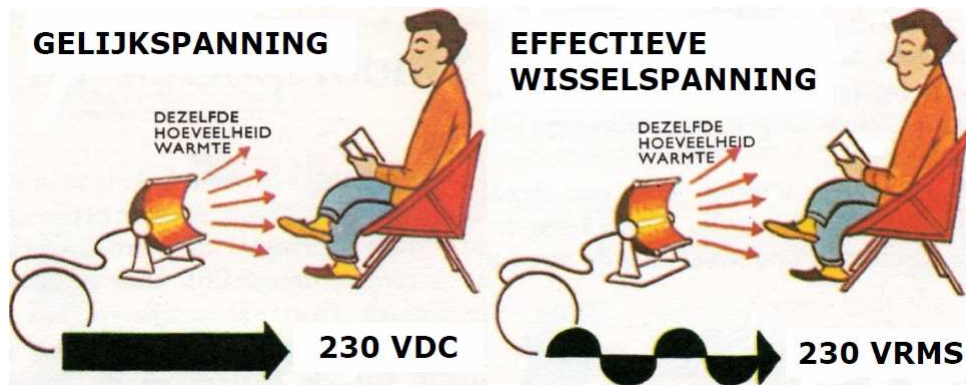
Om deze problematiek uit de weg te gaan heeft men het begrip **effectieve waarde** bedacht.

Definitie

De **effectieve waarde** van een sinusspanning is een denkbeeldige vlakke gelijkspanning, die in een elektrische weerstand hetzelfde vermogen omzet in warmte als de beschouwde sinusvormige spanning.



Figuur 1.12 maakt de definitie voor de effectieve waarde iets anschouwelijkker:



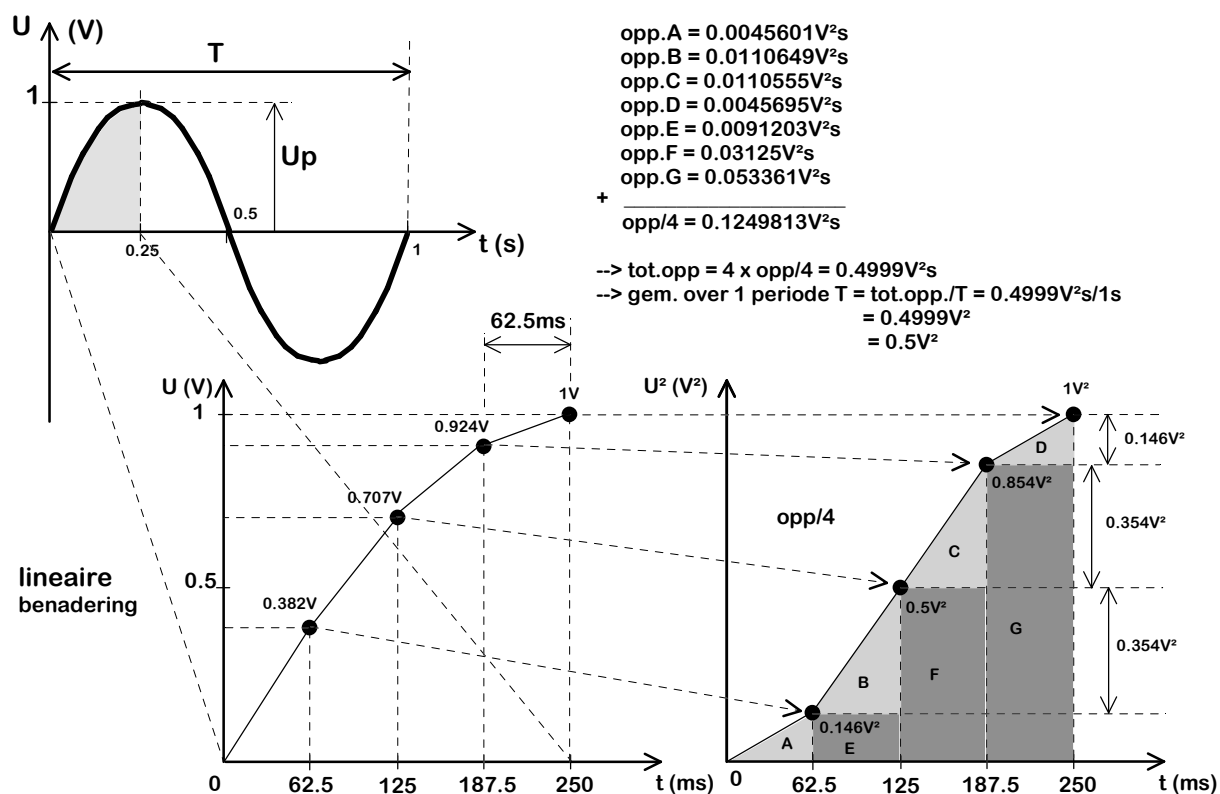
△ Fig.1.12 Effectieve waarde.
Bron: De bliksem aan banden
Uitgever: De Nationale Uitgeverij - Rotterdam.

Dus, of we nu de weerstand aansluiten op een *gelijkspanning* van 230 V_{DC} of we sluiten diezelfde weerstand aan op een *sinusvormige wisselspanning* van 230 V_{eff}, hij zal even warm worden!

1.4.10 RMS-waarde

In het Engels spreekt men van de '**Root Mean Square**' van een sinusspanning of sinusstroom, afgekort tot de '**RMS**'. Deze Engelse benaming geeft eigenlijk aan hoe we deze effectieve waarde moeten berekenen:

1. **kwadrateer** de sinusgolf
2. bereken hiervan het **gemiddelde** over 1 periode
3. trek uit dit gemiddelde de **vierkantswortel**



△ Fig.1.13 | Bepalen van de RMS-waarde van een sinus.
Tekening: W. Van Wichelen

Het gemiddelde van de *gekwadrateerde sinus* over één periode bedraagt:

$$gem[(A \cdot \sin(\omega \cdot t))^2] = 0,5 = \frac{1}{2}$$

We trekken nu de *vierkantswortel*:

$$U_{eff} = U_{R.M.S} = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$$



Let op!

- Bovenstaande formule geldt enkel voor SINUS-spanningen en SINUS-stromen!
- Periodische golfvormen die afwijken van een zuivere sinusvorm hebben een andere effectieve waarde.



Wanneer we in een wisselstroomomgeving een bepaalde waarde opgeven, dan bedoelen we steeds de *effectieve* spanning of *effectieve* stroom. We maken dus geen gebruik van indexen, enkel wanneer er twijfel kan bestaan is dit zinvol: $5\text{ V} = 5\text{ V}_{\text{eff}} = 5\text{ V}_{\text{RMS}}$.

1.4.11 AC-grootheden

'**AC**' staat voor 'alternating current'. Letterlijk vertaald: 'stroom in alternerende richtingen'. In het Nederlands spreken we van **wisselstroom** en **wisselspanning**.

Parate kennis!

- We spreken van een **zuiver AC**-signaal als het *gemiddelde* over één periode gelijk is aan **nul**.
- De *DC-component* van een **zuivere AC**-spanning is dus **nul** volt.



Bestudeer een zuiver sinusoidale wisselspanning. Over één periode zien we dat er evenveel signaal boven de t-as uitsteekt, als er onder: het gemiddelde is dus nul volt. Een **sinus**spanning (of een sinusstroom) is een veel voorkomende AC-golfvorm. Er bestaan ook andere AC-golfvormen: een audiosignaal bijvoorbeeld is uitgemiddeld over de tijd ook nul. AC-golfvormen worden opgewekt door *AC-generatoren*, *oscillatoren* en *functiegeneratoren*.

1.4.12 DC-grootheden

'**DC**' staat voor 'direct current'. Letterlijk vertaald: 'stroom in één richting'. In het Nederlands spreken we van **gelijkspanning** en **gelijkstroom**.

Parate kennis!

Wanneer het **gemiddelde** van een golfvorm niet nul is, dan heb je te maken met een **DC**-golfvorm of met een AC-golfvorm met een **DC-component**.



De meest voorkomende DC-spanning is de spanning die je afneemt van een **accu** of een **batterij**. De spanning is dan bijvoorbeeld constant +12 V. Ze duikelt nooit onder de t-as en het gemiddelde kan nooit gelijk zijn aan nul volt. Vele elektronische circuits moeten gevoed worden met een zo vlak mogelijke DC-spanning. Een transistorversterker moet gevoed worden met een DC-spanning van bijvoorbeeld +12 V. Digitale telmodules, CPU's, schuifregisters,... worden meestal gevoed met +5 V. Uiteraard worden deze schakelingen niet steeds gevoed vanuit een accu: er bestaan ook zogenaamde DC-voedingen die verbonden worden met het 230 VAC-net en een mooie 'batterijspanning' afleveren.

1.4.13 Pro en contra

Nadelen van AC

- Gelijkspanning omzetten naar wisselspanning (DC/AC) is minder eenvoudig dan wisselspanning omzetten naar gelijkspanning (AC/DC).
- Wisselstroomenergie (AC) kan je niet opslaan in een accu.



Voordelen van AC

- Het opwekken van wisselspanning is eenvoudiger.
- De distributie van wisselspanning is praktischer omdat ze kan op- en neergetransformeerd worden. Zo kun je de jouleverliezen beperken.
- De vastheid van de netfrequentie geeft de gebruiker het voordeel klokken, timers en tellers te sturen.
- Een wisselstroommotor is veel eenvoudiger van constructie dan een gelijkstroommachine.
- Met elektronische gelijkrichters kan je de wisselspanning gemakkelijk omzetten in gelijkspanning.



Wel dienen we op te merken dat we de voor- en nadelen tegenwoordig kunnen relativeren omdat we kunnen beschikken over elektronische *spanningsomvormers* en *frequentie-omvormers*.

1.5 Vectorvoorstelling

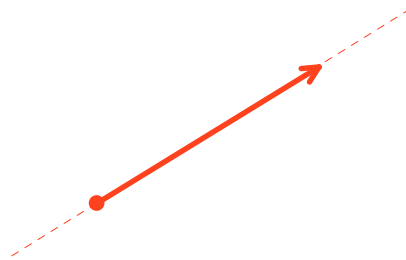
1.5.1 Nadelen van een tijddiagram

Het werken met getekende sinuslijnen kan dan wel mooi zijn, erg praktisch is het niet. Om op een functionele manier te werken, gaan we **vectoren** gebruiken. Dit gebeurt op een analoge manier in de mechanica. Een kracht stellen we voor door een vector, die we in *verhouding* tekenen met de *grootte* van de eigenlijke kracht. Naar analogie met de mechanica kunnen we op een grafische manier een stelsel van spanningen en stromen uitwerken.

1.5.2 Werken met vectoren

Definitie

- Een **vector** is een lijnstuk met een begin- en een eindpunt.
- Elke vector heeft een bepaalde **lengte**, een bepaalde **richting** en een bepaalde **zin**.

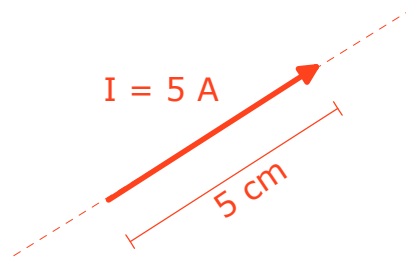


△ Fig.1.14 | Vectorvoorstelling
Tekening: W. Van Wichelen

Dit past bij de voorstelling van een elektrische grootheid zoals de stroom, die een bepaalde *grootte* en een *richting* met een *zin* heeft. Een vectoriële voorstelling is een vereenvoudigde vertaling van de oorspronkelijke analoge grootheid. Indien we de schaal hierbij vermelden, is de omzetting na de vectoriële bewerkingen eenvoudig uit te voeren.

1.5.3 Statische vectorgrootheid

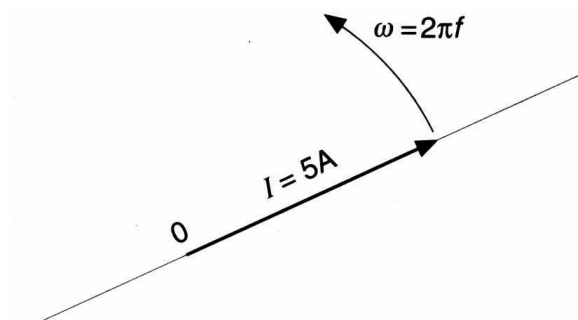
We kunnen een stroom van 5 A op een eenvoudige wijze tekenen. De voorstelling, zoals in figuur 1.15, heeft de beperking dat ze alleen **statische** toestanden weergeeft, zoals een *gelijkspanning* of *gelijkstroom*. In combinatie met een **hulpvector** kunnen we bijkomende informatie geven.



△ Fig.1.15 | Statische vectorvoorstelling
Tekening: W. Van Wichelen

1.5.4 Dynamische vectorgrootheid

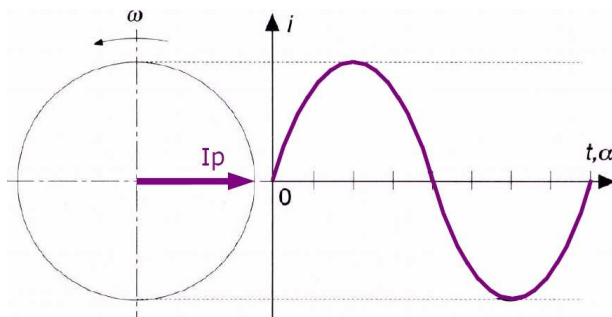
Geven we de stroomvector I een continue *draaibeweging* ten opzichte van punt 0, dan stel je een *wisselstroom* voor door een **roterende** vector met de *cirkelfrequentie* ($\omega = 2 \times \pi \times f$). Volgens afspraak laten we deze dynamische vectorgrootheid *tegenwijzerzin* roteren.



△ Fig.1.16 | Dynamische vectorvoorstelling
Bron: Elektra 2, Plantyn ISBN 9030158662

1.5.5 Verband tussen vector en sinusvoorstelling

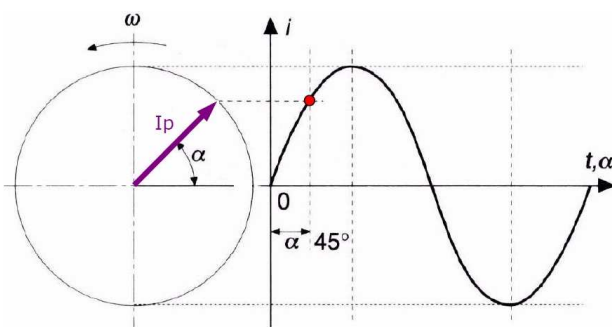
Figuur 1.17 toont het vertrek bij 0° :



△ Fig.1.17 | Vertrek bij 0° .
Tekening: W. Van Wichelen

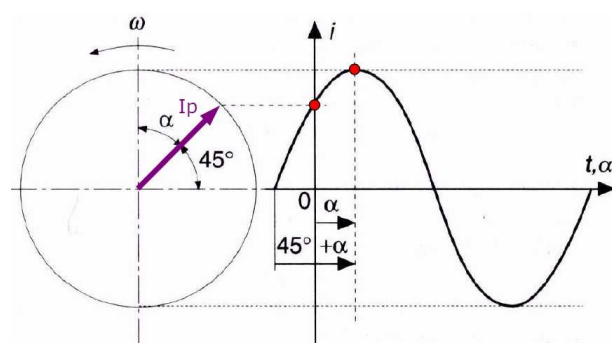
De wiskundige uitdrukking $i(t) = I_p \cdot \sin(\omega \cdot t)$ staat voor de momentele waarde $i(t)$ van I_p met een cirkelfrequentie $\omega = 2 \times \pi \times f$. De hoek α wordt bepaald door $\omega \times t$.

Figuur 1.18 toont de ogenblikkelijke stroom bij 45° :



△ Fig.1.18 | Ogenblikkelijke stroom bij 45° .
Tekening: W. Van Wichelen

Figuur 1.19 toont een stroom die 45° voorijlt:

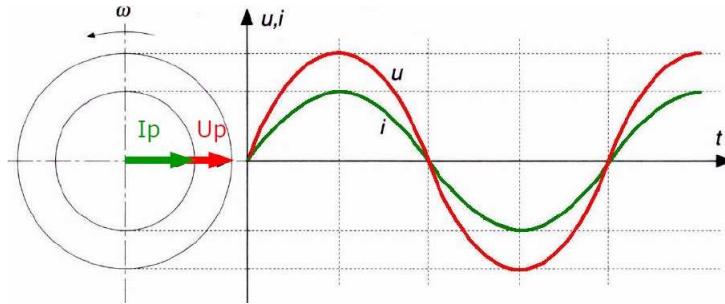


△ Fig.1.19 | Stroom die 45° voorijlt.
Tekening: W. Van Wichelen

1.5.6 Fasehoek

Indien we meerdere wisselspanningen of stromen met elkaar willen vergelijken, dan doen we dit in een orthogonaal assenstelsel waarin de tijd-as de gemeenschappelijke as is.

Figuur 1.20 toont een stroom en spanning die in **fase** zijn:



△ Fig.1.20 | Spanning en stroom in fase.
Tekening: W. Van Wichelen

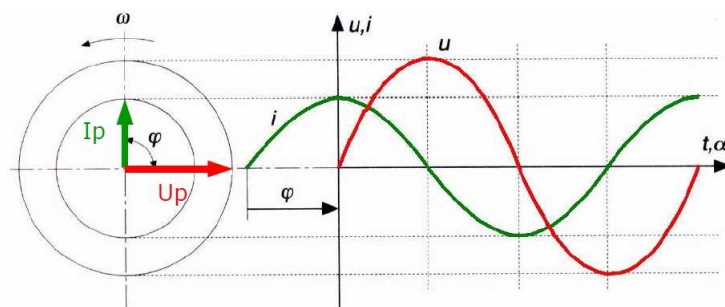
Definitie

Een spanning en een stroom zijn in **fase** als hun respectievelijke nulwaarden en hun positieve maxima (of hun minima) samenvallen in de tijd.



De spanning en de stroom van een kring zullen in fase zijn als deze kring een zuiver **resistief** gedrag vertoont. Zo zal de spanning en stroom mooi gelijklopen bij elektrische verwarmingstoestellen en gloeilampen. Van deze gelijkloop is echter geen sprake meer bij bijvoorbeeld elektrische motoren.

Figuur 1.21 toont een stroom die voorijlt op de spanning:



△ Fig.1.21 | Stroom ijlt voor op spanning.
Tekening: W. Van Wichelen

Definitie

Een stroom of spanning is **voorijlend** wanneer deze zijn maximumwaarde eerder bereikt dan de referentie-stroom- of spanning.

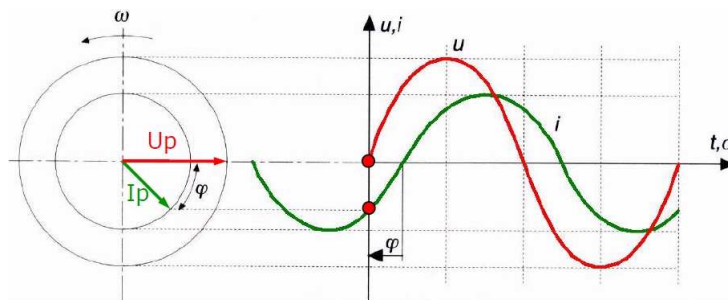


In figuur 1.21 ijlt de stroom (I) 90° voor op de spanning (U). Het is vanzelfsprekend dat de faseverschuiving willekeurig kan zijn, als deze gelegen is tussen 0° en 180°. Je kan de hoek zowel in graden als in radialen aanduiden: I is 90° voor op U of I is $\pi/2$ rad voor op U. Wiskundig geeft dit voor de stroom:

$$i(t) = I_p \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

- $i(t)$: momentele waarde van de stroom in A
- I_p : amplitude van de stroom in A
- ω : hoeksnelheid in rad/s
- t : ogenblikkelijk tijdstip in s
- φ : (positieve) fasehoek in rad

In figuur 1.22 ijlt de stroom (I) na op de spanning (U):



△ Fig.1.22 | Stroom ijlt na op spanning.
Tekening: W. Van Wichelen

Definitie

Een stroom of spanning is **na-ijlend** wanneer deze zijn maximumwaarde later bereikt dan de referentie-stroom- of spanning.

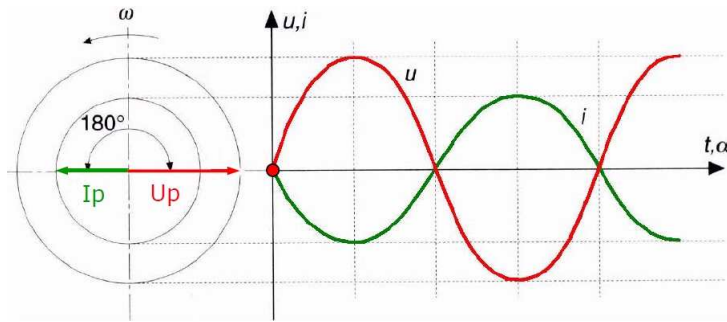


Wiskundig geeft dit voor de stroom:

$$i(t) = I_p \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

- φ : (negatieve) fasehoek in rad

In figuur 1.23 zijn spanning en stroom in tegenfase:



△ Fig.1.23 | Stroom en spanning in tegenfase.
Tekening: W. Van Wichelen

Definitie

- Bij **tegenfase** liggen de 2 vectoren precies in elkaars verlengde.
- De twee vectoren hebben een *tegengestelde* zin.
- Een faseverschuiving van **180°** wordt daarom een *tegenfase* genoemd.

