

3 | Interfacing Actuatoren

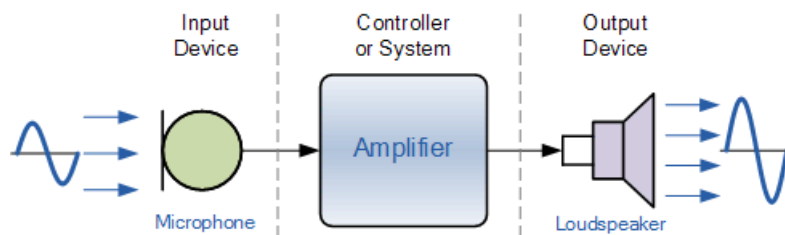


3.1 Inleiding

Eerder bespraken we een selectie van *ingangssignaalgevers* die als doel hadden fysische grootheden te 'voelen' of te detecteren. Deze groep van signaalgevers, die we aansluiten op de ingangen van een microcontroller bijvoorbeeld, noemen we *sensoren*. Behalve sensoren is er nog een groep van componenten die we koppelen aan een microcontroller, maar nu aan de *uitgangen*. Deze uitgangskomponenten noemen we gewoonlijk '**actuatoren**'.

Definitie

- Een **actuator** zet een *elektrisch* signaal om in een overeenkomstige *fysische grootheid* zoals beweging, kracht, geluid,...
- Deze uitgangsomzetters kunnen zowel *binair* (bv. relais) als *continu* (bv. luidspreker, motor) van aard zijn.



△ Fig.3.1 In een audiosysteem is de microfoon de sensor en de luidspreker de actuator.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

3.2 Elektromechanisch relais

3.2.1 Gebruik van relais

De meest fundamentele eigenschap van om het even welk toestel is zijn mogelijkheid om het AAN of UIT te zetten. De eenvoudigste manier om dit te doen is om de voedingsspanning te onderbreken met behulp van een eenvoudige *schakelaar*. Het grootste nadeel van het gebruik van schakelaars is dat we ze *manueel* AAN of UIT moeten zetten. Maken we daarentegen gebruik van een elektrische relais^[25], dan overwinnen we dit nadeel. In essentie kunnen we een relais beschouwen als een elektrisch bediende schakelaar. Relais komen voor in oneindig veel toepassingen. Er bestaan veel verschillende uitvoeringsvormen, zowel wat betreft aantal en functie van de contacten, de functie van het relais zelf, de waarde van de spoelspanning,...



△ Fig.3.1 | Typisch miniatuurrelais.
Bron: <https://www.digikey.be>

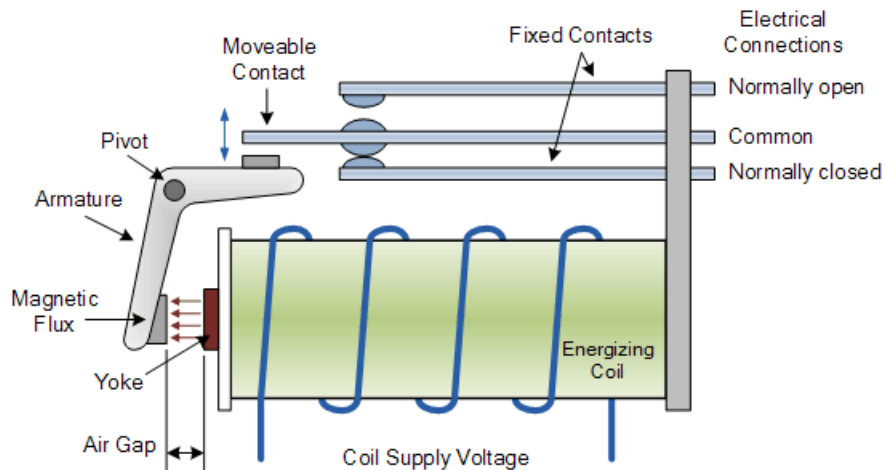
In dit dossier bespreken we de zogenaamde 'light duty' elektromechanische relais die we kunnen gebruiken om bijvoorbeeld kleine DC-motortjes en gloeilampjes in en uit te schakelen. Dit relaistype is meestal geschikt voor printmontage. De stuurspanning bedraagt dikwijls maar enkele volts.

[25] Relais: de naamgeving verwijst naar de herberg waar de paarden van een postkoets werden verwisseld. In de 19^e eeuw was de post de enige manier om informatie van de zender naar de ontvanger te brengen...
Met de komst van de telegraaf in 1837 kwam de moderne telecommunicatie pas goed op gang. Het elektromechanische relais van Samuel Morse was een onmisbare schakel in zijn telecommunicatiesysteem.
Een elektrisch signaal, in morse-code, moest dikwijls 'ververst' worden om van de westkust naar de oostkust van de VS te geraken.

3.2.2 Samenstelling en werking

Principe

- Een **relais** is een *elektromagnetisch* bediende schakelaar die een aantal schakelcontacten kan openen of sluiten.
- Met behulp van een klein elektrisch vermogen, om de spoel van de elektromagneet te bekrachtigen, kunnen we een hoge spanning en/of grote stroom schakelen.
- We onderscheiden twee kringen: de *stuurkring* met de spoel en de *vermogenkring* waarin zich de te schakelen belasting bevindt.
- Dankzij de *spanningsloze contacten* kunnen we zowel AC als DC belastingen in en uit schakelen.



△ Fig.3.2 | Elektromechanisch relais.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

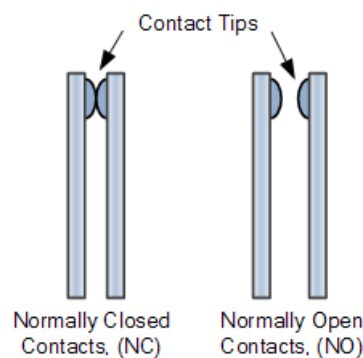
Door een spanning op de aansluitingen (A1, A2) van de spoel te zetten vloeit er stroom die de spoelkern magnetiseert. Het anker (armature) wordt nu aangetrokken en duwt tegen het gemeenschappelijke (common) beweegbare gedeelte van het schakelcontact. Zo ontstaat een elektrische verbinding tussen de twee bovenste aansluitingen en tegelijkertijd wordt de verbinding tussen de twee onderste aansluitingen verbroken. Deze opstelling vormt een zogenaamd wisselcontact. Als we de spanning van de spoel afhalen, valt het anker af en komt het terug in zijn oorspronkelijke positie. Een eenvoudig relais heeft slechts een moedercontact (C) en een maakcontact (NO) of een verbreekcontact (NC).

3.2.3 Contact-types

Het eenvoudige relais van figuur 3.2 bezit twee sets van contacten: 'Normally Open' (**NO**) en 'Normally Closed' (**NC**). Een normaal open contact wordt ook wel een 'maakcontact' genoemd. Een 'verbreekcontact' is de alternatieve benaming voor het NC-contact. De naamgeving van het contacttype gaat uit van de toestand van het relais in *rust*.

Parate kennis!

- In **rust** (zonder bekrachtiging):
 - ✓ staat een NO-contact open;
 - ✓ is een NC-contact gesloten.
- Bij **bekrachtiging**:
 - ✓ sluit een NO-contact;
 - ✓ opent een NC-contact.

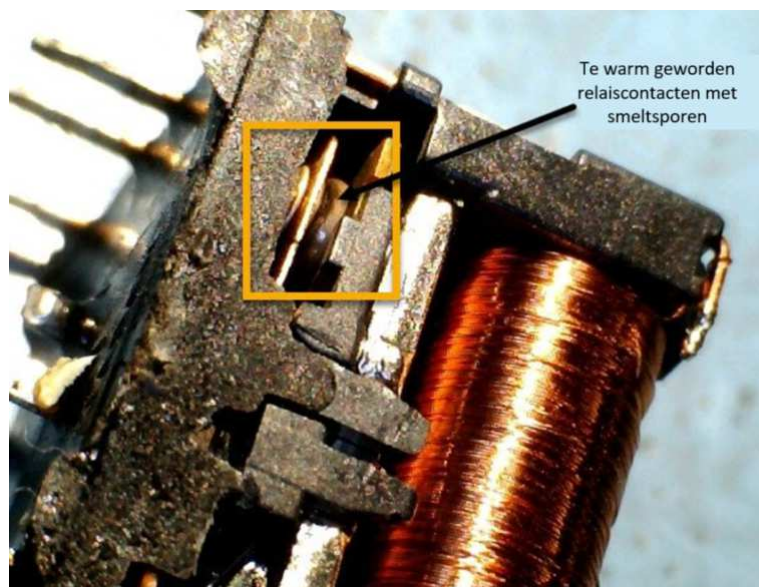


△ Fig.3.3 | NO-contact en NC-contact.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Wanneer de contacten open zijn is de weerstand tussen de contactpunten zeer hoog, in de orde van mega-ohms. Wanneer de contacten sluiten zou de weerstand in theorie nul ohm moeten zijn maar we meten wel degelijk een bepaalde 'ON-weerstand', meestal minder dan $0,2\Omega$ voor een splinternieuw relais met schone contactpunten. Door veelvuldig gebruik zal de contactweerstand echter snel toenemen.

3.2.4 Vonkvorming

Als de contactpunten beginnen te verslijten en als ze bovendien niet naar behoren worden beveiligd tegen hoog inductieve en capacitieve belastingen, zullen er tekenen van **vonkschade** beginnen optreden. Het effect hiervan is dat de stroom doorheen de contactpunten van een NO-contact blijft doorvloeien, ook al is de spoelspanning weggenomen. Deze vonkvorming doet de contactweerstand verder toenemen en op een bepaald ogenblik zijn de contactpunten zodanig ingebrand dat er nauwelijks nog stroom door kan. De vonkschade kan zo ernstig zijn dat de contacten zich zelf kunnen vastlassen door de ontwikkelde hitte als gevolg van deze toegenomen contactweerstand. Een gevolg hiervan is dat het relais in permanente kortsluiting verkeert en moet vervangen worden door een nieuw exemplaar.

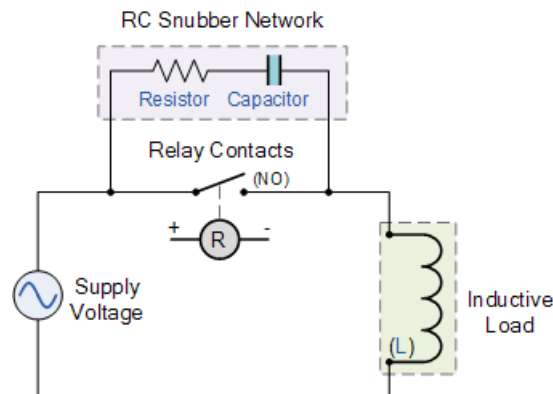


△ Fig.3.4 | Ingebrand relaiscontact.
Bron: <https://www.amt.nl>

Om de effecten van vonkschade als gevolg van contactbogen te reduceren worden moderne relaiscontacten uitgevoerd met contactpunten op basis van *zilverlegeringen*. De levensduur kan op die manier betekenisvol verlengd worden.

3.2.5 Vonkblussing met RC-snubbernetwerk

Relaisfabrikanten geven in hun datasheets de maximale gebruiksomstandigheden van de contacten op bij resistieve belastingen op DC-regime. Deze maximum waarden moeten we naar beneden bijstellen voor sterk inductieve en capacitieve belastingen op AC-regime. Om een lange levensduur en betrouwbare werking van de relaiscontacten op **AC-regime** te garanderen is een vorm van *vonkonderdrukking* of filtering noodzakelijk.



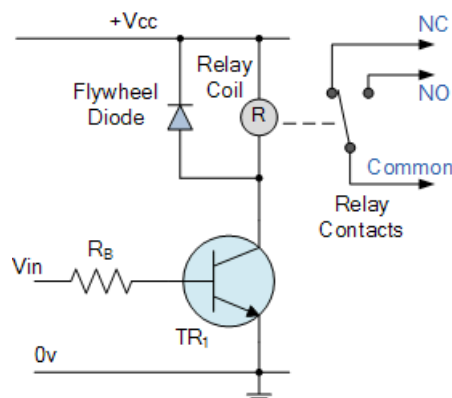
△ Fig.3.5 | RC-snubber bij AC-belastingen.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

De verlenging van de levensduur van de contactpunten bereiken we door een **RC-snubbernetwerk**^[26] toe te passen zoals aangegeven in figuur 3.5. De RC-snubber sluiten we parallel over de contacten aan. De spanningspiek, die ontstaat tijdens het openen, wordt door dit netwerk veilig kortgesloten zodat de eventuele vorming van spanningsbogen wordt onderdrukt.

[26] to snub (Eng): plotseling inhouden, plat drukken
Snubbers worden dikwijls gebruikt wanneer zeer inductieve kringen moeten uitgeschakeld worden. Het plotse onderbreken van de inductieve stroom geeft aanleiding tot het ontstaan van stijle spanningspieken over de schakelende contacten.

3.2.6 Vonkblussing met vrijloopdiode

Een belangrijk onderdeel van elk elektromechanisch relais is zijn spoel. We weten dat deze spoel dient om een elektromagnetisch veld op te wekken zodat we de contacten mechanisch kunnen bedienen. Het voornaamste probleem met relaisspoelen is hun zeer **inductieve** karakter. Wanneer er doorheen een spoel een **DC**-regimestroom vloeit, wordt er een magnetisch veld opgebouwd. Via dit veld heeft de spoel elektro-magnetische energie opgestapeld. Bij het plots onderbreken van de regimestroom kan dit elektromagnetische veld niet onmiddellijk instorten. De spoel tracht eventjes de regimestroom te onderhouden door zelf de rol van spanningsbron te spelen. De polariteit van deze *zelfinductiespanning* is omgekeerd aan die van de originele voedingsspanning en de grootte van deze zelfinductiespanning is afhankelijk van de opgestapelde energie-inhoud en de snelheid van het onderbreken van de stroom. Hoe sneller we de spoelstroom trachten te onderbreken, hoe hoger deze zelfinductiespanning. Deze zelfinductiespanning kan vele malen groter zijn dan de toegepaste voedingspanning, en hier schuilt dus het gevaar!



△ Fig.3.6 | Vrijloopdiode bij DC-bekrachtiging.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Meestal sturen we een relaisspoel aan met behulp van een bipolaire junctietransistor of een unipolaire FET. De hoge inverse zelfinductiespanning kan deze halfgeleiders beschadigen indien we niet de nodige maatregelen treffen. Een manier om de schakeltransistoren te beschermen is door over de relaisspoel een invers gepolariseerde **vrijloopdiode**^[27] te plaatsen.

[27] In het Engels: Flywheel diode, Free-wheeling diode, Fly-back diode.
In het Nederlands spreken we ook wel van een 'blusdiode'.

Wanneer de DC-stroom door de bekrachtigingsspoel uitschakelt, genereert de spoel een hoge inverse zelfinductiespanning. De vrijloopdiode komt hierdoor in geleiding en dissipeert de opgeslagen elektromagnetische energie. De spanning over de schakelende halfgeleidercomponent wordt hierdoor begrensd tot de waarde van de voedingsspanning plus ca. 0,7 volt. Naast de vrijloopdiode bestaan er nog manieren om halfgeleiders te beschermen tegen de hoge zelfinductiespanningen: RC-snubber-netwerken, en het toepassen van metaaloxide varistors en zenerdiodes.

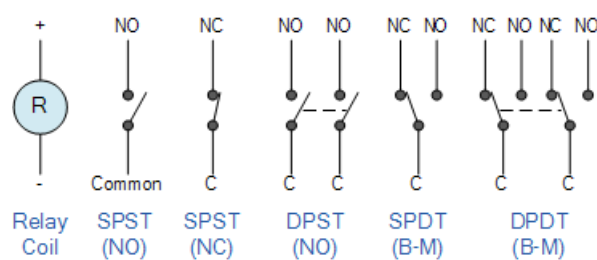
3.2.7 Contactconfiguraties

Naast het NO en NC aspect kunnen we relaiscontacten ook rangschikken volgens hun schakelgedrag. We spreken van 'Single Pole' (enkelpolige) en 'Double Pole' (dubbelpolige) contacten. Het aantal connecties die elke pool kan maken wordt aangegeven met de jargontermen 'Single Throw' (enkelvoudige aansluiting) en 'Double Throw' (tweevoudige aansluiting).

Relaisfabrikanten vermelden dit in hun datsheets als volgt:

- SPST – Single Pole Single Throw
- SPDT – Single Pole Double Throw
- DPST – Double Pole Single Throw
- DPDT – Double Pole Double Throw

Waarbij nog wordt aangegeven hoe het schakelwijze verloopt bij bekrachtiging: 'Make' (maak) of 'Break' (verbreek).



△ Fig.3.7 | Contactconfiguraties.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

De contactbeschrijving is dan bijvoorbeeld: 'Single Pole Double Throw – Break before Make', of kortweg 'SPDT-B-M'.

3.2.8 Voordelen & nadelen

Elektromechanisch relais

De voornaamste **voordelen** zijn:

- eenvoudig
- robuust
- galvanische scheiding tussen stuur- en vermogenkring
- spanningsloze contacten
- geschikt voor AC en DC belastingen

De voornaamste **nadelen** zijn:

- traag
- beperkte schakelfrequentie
- niet slijtvast
- spoel is een zeer inductieve belasting
- vonkblussing noodzakelijk
- verstorende contactdender bij digitale toepassingen



3.3 Halfgeleider relais

3.3.1 Minpunten van mechanische relais

De grootste tekortkoming van een traditioneel elektromechanisch relais is het feit dat het een **mechanische** schakelcomponent is. Bewegende mechanische onderdelen beperken in grote mate de *schakelsnelheid*. Bovendien zijn mechanische onderdelen onderhevig aan *slijtage*. Het inbranden van de contactpunten door vlam-bogen en corrosie hebben een negatieve invloed op de levensduur en de feilloze werking. Verder is er het probleem van *contact-dender*, inherent aan het schakelen met mechanisch bewegende contacten. Gelukkig bestaat er een component die vrij is van al deze mankementen: het *contactloze* **halfgeleider relais**. In het Engels spreken we van een '**Solid State Relay**', kortweg SSR.

3.3.2 Solid State Relais

Definitie

- Een **solid state relais** (SSR) is een zuiver elektronische schakelcomponent zonder bewegende onderdelen.
- De mechanische contacten zijn vervangen door halfgeleiders zoals transistoren, thyristoren en TRIAC's.
- De galvanische scheiding tussen het ingangsstuursignaal en de uitgangsspanning, aan de zijde van de belasting, gebeurt via opto-couplers.

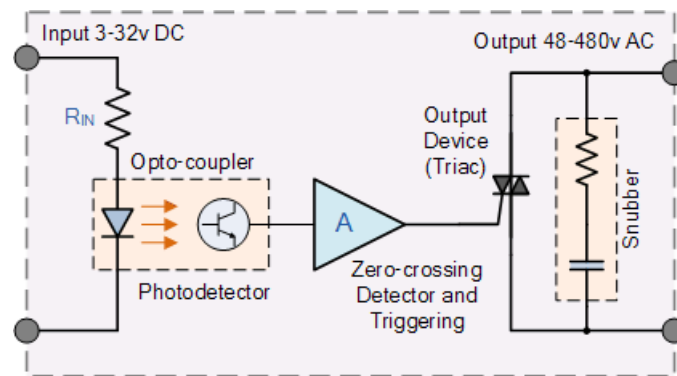


△ Fig.3.8 | Typisch SSR-relais.
Bron: <https://nl.farnell.com/finder>

Halfgeleider relais zijn zeer betrouwbaar en quasi onverslijtbaar. Door de afwezigheid van elektromagnetische velden is de elektromagnetische interferentie (EMI) minimaal. In vergelijking met hun mechanische broertjes zijn ze supersnel.

3.3.3 Blokschema van een SSR

Een halfgeleider relais van het **AC-type** schakelt in bij de *nul-doorgang* van de sinusvormige netspanning. Zo vermijden we hoge inschakelstromen. Afschakelen van inductieve en capacitieve belastingen gaat gepaard zonder vonkvorming omdat *thyristoren* en *TRIAC's* nu zorgen voor het uitschakelen.

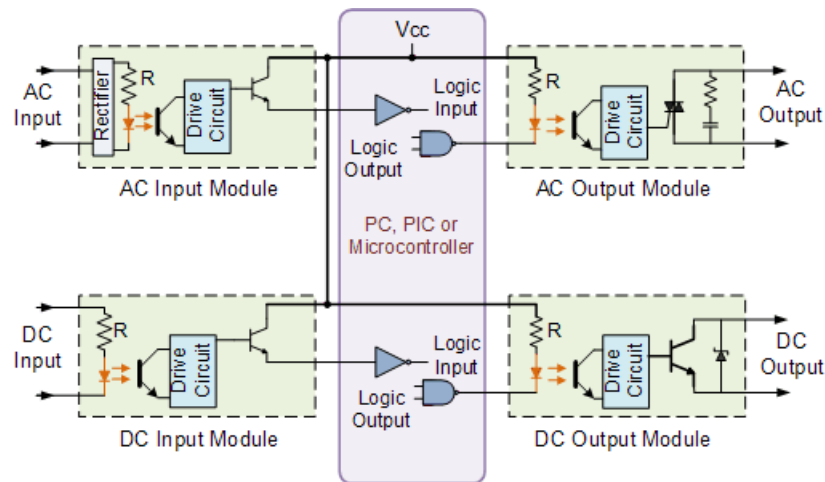


△ Fig.3.9 | Blokschema van een SSR.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Dankzij de *opto-coupler* aan de ingang kunnen we een SSR rechtstreeks aansturen met digitale 5V-logica: interfacing met bijvoorbeeld een Arduino-microcontroller is nu een fluitje van een cent! Over de uitgang bevindt zich steeds een *RC-snubbern timer* om de halfgeleiders die het schakelwerk verrichten, te beveiligen tegen piekvormige overgangsverschuiven als gevolg van inductieve of capacitieve belasting. Omdat de belasting door halfgeleiders in- en uitgeschakeld wordt, is de ON-weerstand veel groter dan de contactweerstand van een elektromechanisch relaiscontact. De spanningsval over de uitgangsklemmen bedraagt typisch zo'n 1,5 tot 2 volt. Wanneer het inschakelen gebeurt bij grote stroomsterkten is koeling met behulp van een extra *koellichaam* noodzakelijk.

3.3.4 SSR als I/O-interfacecomponent

Een **Input/Output Interface Module** is een ander type SSR die speciaal is ontworpen om te interfaceren met computers, microcontrollers en digitale logica. Er zijn vier basistypen in compacte IC-vorm beschikbaar. Elke I/O module bevat de noodzakelijke schakelingen om een complete interface te realiseren met de garantie van een perfecte galvanische scheiding. Ze bestaan in 4, 8 of 16 kanaals variant.



△ Fig.3.10 I/O interface modules.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

3.3.5 Voordelen & nadelen

Tot hier toe zwaaiden we enkel met lof, maar er vallen ook enkele minpunten te noteren. De grootste nadelen van solid state relais, in vergelijking met een elektromechanisch relais, zijn: de meerkost, het vloeien van een lekstroom in de OFF-stand, het feit dat enkel SPST-types beschikbaar zijn, de grote spanningsval over de uitgangsklemmen in de ON-stand, de warmte-ontwikkeling zodat extra koeling noodzakelijk is en het niet kunnen schakelen van zeer kleine belastingsstromen.

Solid State Relay (SSR)

De voornaamste **voordelen** zijn:

- slijtvast
- reactietijd in de grootte-orde van milliseconden
- galvanische scheiding tussen stuur- en vermogenkring
- AC-types beschikken over 'zero-crossing' detectie
- geïntegreerde RC-snobber
- geen contactdender
- geen vonkvorming
- geen elektromagnetische interferentie



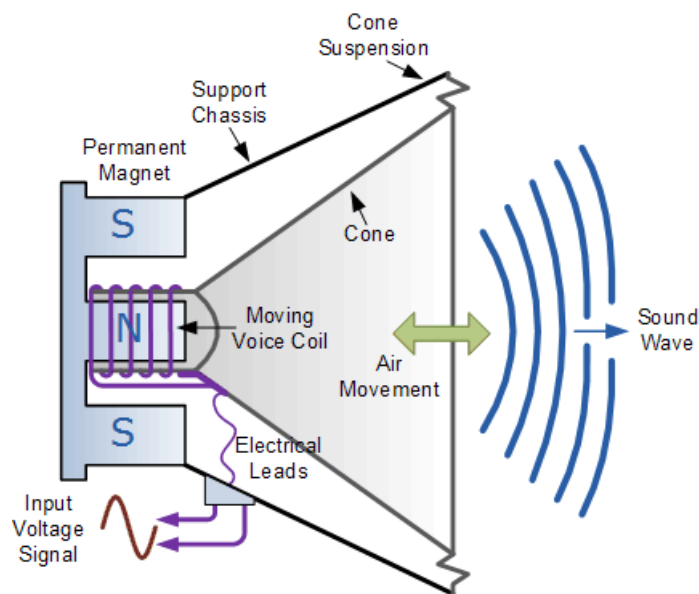
De voornaamste **nadelen** zijn:

- duur
- grote verliesspanning in ON-stand
- koeling meestal noodzakelijk
- OFF-weerstand is niet oneindig (lekstroom)
- schakelen van kleine belastingsstromen niet mogelijk
- enkel SPST contacttype beschikbaar

3.4 Zoemers

3.4.1 Geluidsbronnen

Een trillend object kan de lucht op één of andere manier verstoren zodat wij dit kunnen waarnemen als **geluid**. Dit object kan bijvoorbeeld een *elektrodynamische luidspreker* zijn. Als de luidsprekerconus naar voren beweegt, drukt de lucht ervoor samen waardoor de luchtdruk vlak voor de conus iets toeneemt. Als daarna de conus weer naar achteren beweegt zal de luchtdruk iets verlagen. Zo ontstaat een *geluidsgolf* van pakketjes dikkere en dunnere lucht die zich verplaatst weg van de geluidsbron met een snelheid van ca. 340 m/s. Elke golf wordt gekarakteriseerd door een *golflengte* en een *amplitude*. De golflengte is omgekeerd evenredig met de frequentie: hoe hoger de frequentie, hoe korter de golflengte en hoe hoger de waargenomen toon. De amplitude van de golf bepaalt hoe luid we een klank ervaren. De voor het menselijke oor waarneembare *audioband* is gestandaardiseerd en gaat van 20 Hz tot 20 kHz.



△ Fig.3.11 | Principe van een elektrodynamische luidspreker.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

3.4.2 Elektro-magnetische zoemer

In microcontrollerprojecten maken we meestal geen gebruik van een elektrodynamische luidspreker als actuator maar wel van een **zoemer** of **buzzer**. Elektrodynamische luidsprekers vinden we terug in *audiosystemen* waar het van belang is om een zo getrouw mogelijke weergave van het originele audiosignaal te realiseren.

Als de nadruk ligt op het genereren van akoestische *alarmen*, of als er maar een *beperkte plaats* beschikbaar is voor de inbouw van de actuator, dan zijn zoemers een valabel alternatief. We onderscheiden twee versies: *elektromagnetische* types en *piëzo-elektrische* types. Elk van beide types bestaat in een *actieve* of in een *passieve* uitvoering.

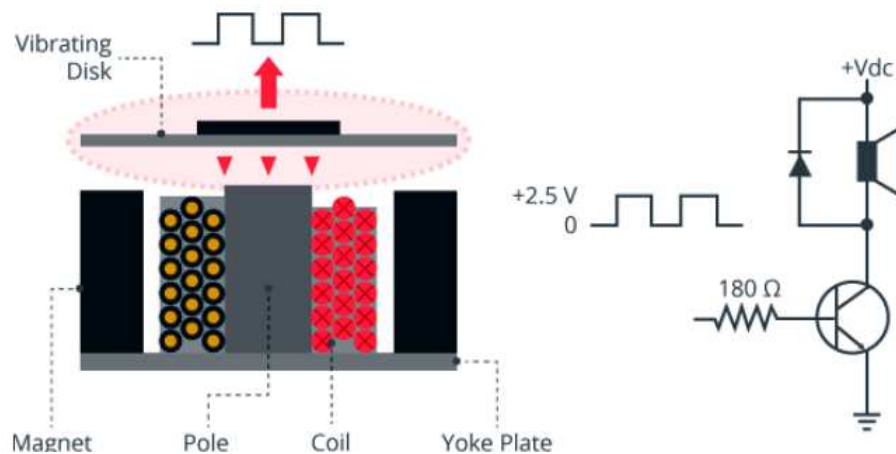
Passieve & actieve zoemer

- Een **passieve zoemer** (transducer) is een akoestische actuator *zonder* interne stuu-elektronica.
 - ✓ aansturen met een blokvormig *PWM-sig-naal*
 - ✓ toonhoogte is *instelbaar*
 - ✓ extra schakelelektronica nodig
- Een **actieve zoemer** (indicator) is een akoestische actuator *met* interne stuu-elektronica.
 - ✓ aansturen met *vaste* DC-spanning
 - ✓ *vaste* toonhoogte
 - ✓ 'plug & play'



△ Fig.3.12 | Passieve elektromagnetische zoemer
Bron: <https://benl.rs-online.com>

Figuur 3.13 toont de opbouw van een typische elektromagnetische zoemer. Dit type is zowel beschikbaar in passieve als in actieve versie. De *actieve* zoemer zal een toon met *vaste frequentie* produceren als je er een gelijkspanning met de juiste polariteit op aansluit. Onder de motorkap steekt een oscillatorcircuit met een schakeltransistor. Bij de *passieve* versie ontbreekt deze stuur-elektronica. Een passieve buzzer vereist een *blokgolfsignaal* om correct te functioneren.



△ Fig.3.13 | Opbouw van een magnetische zoemer
Bron: <https://www.cuidevices.com>

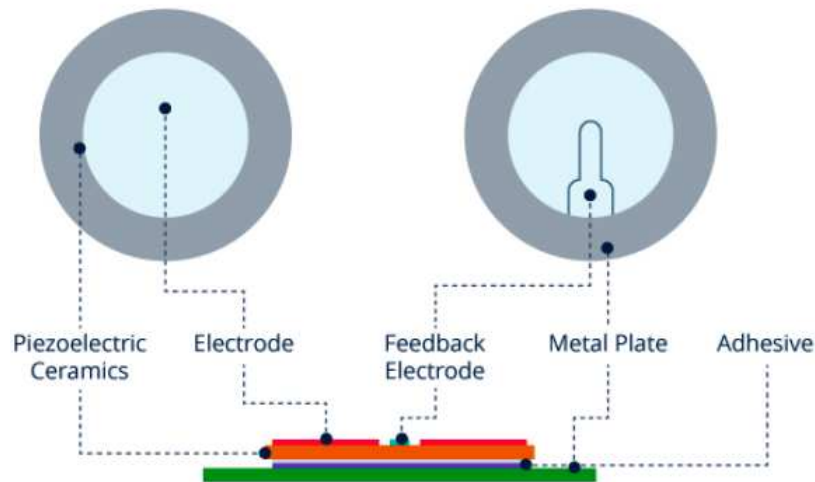
Principe

- Wanneer we een elektromagneet voeden met een AAN/UIT-spanning, dan ontstaat er een fluctuerend magnetisch veld.
- Een magnetische schijf wordt door een pool van dit wisselende veld aangetrokken en begint daarom te trillen op dezelfde frequentie als de frequentie van het stuursignaal.
- De trillende schijf genereert nu een *toon* waarvan de frequentie identiek is aan de frequentie van het stuursignaal.



3.4.3 Piëzo-elektrische zoemer

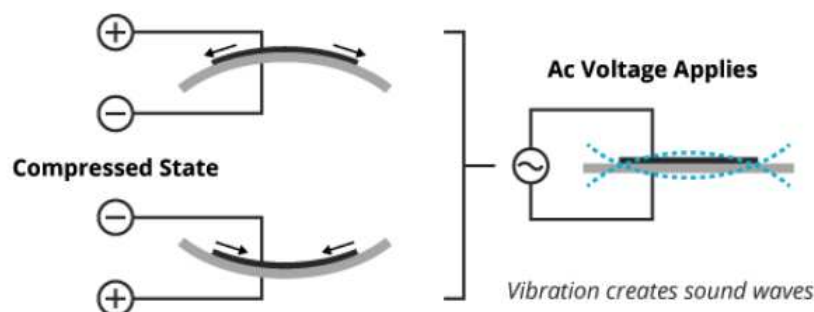
Het hart van alle piëzo-zoemers is het *piëzo-elektrische element*. Dit piëzo-element bestaat uit keramisch materiaal dat bevestigd is op een metalen schijfvormige plaat. Aan beide zijden van dit schijfvormige piëzo-element bevindt zich een aansluitelektrode. Een piëzo-buzzer maakt dankbaar gebruik van het zogenaamde **piëzo-elektrisch effect**.



△ Fig.3.14 | Opbouw van een piëzo-elektrische zoemer
Bron: <https://www.cuidevices.com>

Piëzo-elektrische effect

- Onderwerpen we het piëzo-keramisch element aan *mechanische rek*, dan genereert het element een **elektrisch veld**.
- Omgekeerd, wanneer we het piëzo-keramische element blootstellen aan een *elektrisch veld*, dan zal het element op zijn beurt mechanisch **vervormen**.



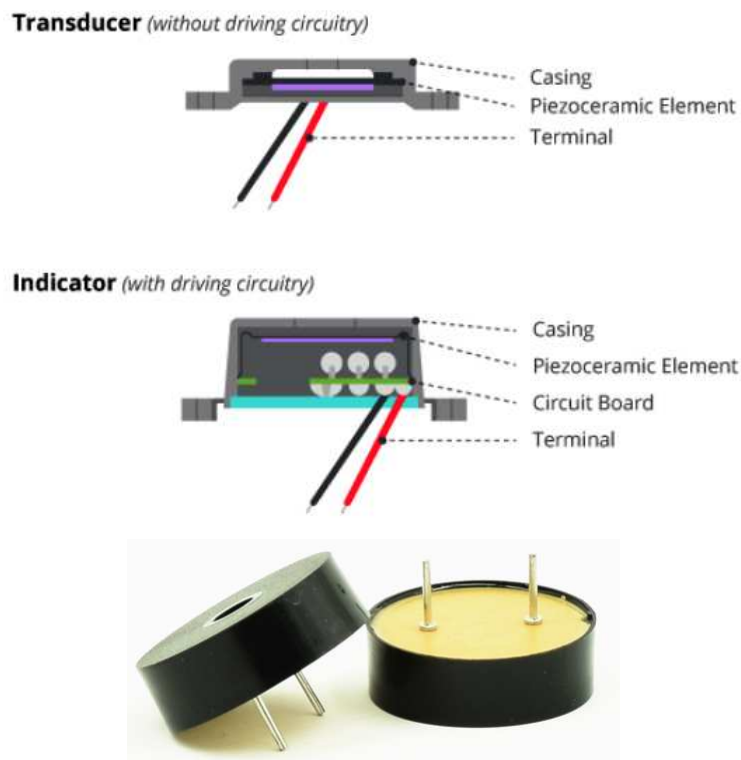
△ Fig.3.15 | Het piëzo-elektrische effect
Bron: <https://www.cuidevices.com>

Principe

- Voeden we het piëzo-keramische element met een blokvormige spanning, dan zal het element achtereenvolgens uitzetten en krimpen.
- Het element zal snel beginnen trillen en genereert also een toon waarvan de frequentie identiek is aan die van het stuursignaal.



Zoals bij de magnetische buzzers bestaan er ook twee types piëzo-buzzers: *passieve* (transducers) en *actieve* (indicators). Een passieve piëzo-buzzer bestaat enkel uit een behuizing, een piëzo-keramisch element en aansluitklemmen. Om een toon te kunnen opwekken sluiten we een blokvormige signaalspanning aan op de aansluitklemmen. Een elektronische print met daarop de nodige aanstuurelektronica vervolledigt de actieve piëzo-buzzer. Dit type vereist enkel een bepaalde DC-spanning op de aansluitklemmen om een toon te kunnen genereren.

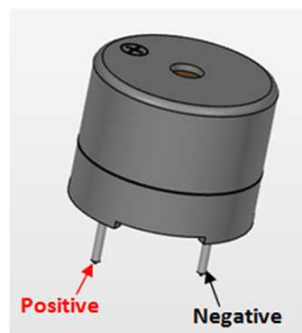


△ Fig.3.16 | Passieve en actieve piëzo-buzzer
Bron1: <https://wap.buzzer-supplier.com>
Bron2: <https://www.cuidevices.com>

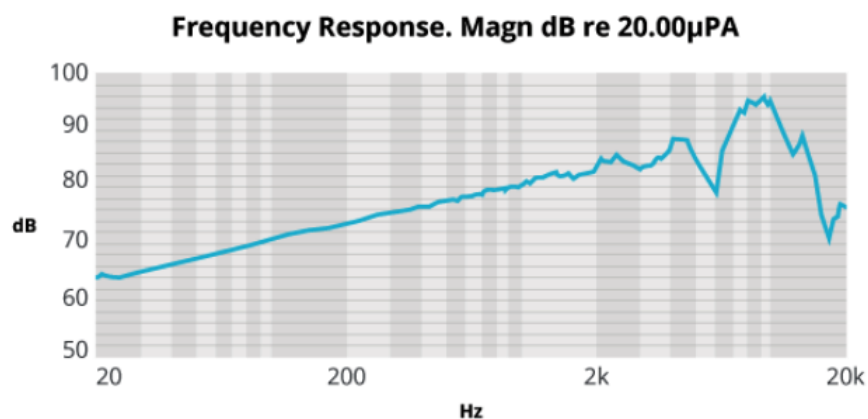
3.4.4 Buzzer specificaties

Typische kenmerken

- **Elektromagnetische zoemer:**
 - ✓ werkspanning: 1 - 16 volt
 - ✓ stroomverbruik: 30 - 100 mA
 - ✓ geschikt voor lagere toonfrequenties
 - ✓ lager geluidsdrukniveau
- **Piëzo-elektrische zoemer:**
 - ✓ werkspanning: 3 - 250 volt
 - ✓ stroomverbruik: minder dan 30 mA
 - ✓ geschikt voor hogere toonfrequenties
 - ✓ hoger geluidsdrukniveau



△ Fig.3.17 | Populaire buzzer-behuizing
Bron: <https://components101.com>



△ Fig.3.18 | Typische buzzer frequentieresponsie-curve
Bron: <https://www.cuidevices.com>

3.5 DC-motoren

3.5.1 Basistypes

De **gelijkstroommotor** is een handige actuator om continue beweging te realiseren. Omdat het vrij eenvoudig is om zijn snelheid aan te passen, is hij populair bij *snelheidsregelingen*, *servo-systemen* en in toepassingen waar een bepaalde *positieonering* wordt verlangd.

Parate kennis!

- Elke elektrische motor bestaat uit twee onderdelen: de **stator** en de **rotor**.
 - ✓ de *stator* is het vaststaande gedeelte
 - ✓ de *rotor* is het draaibare gedeelte
- We onderscheiden drie basistypes:
 - ✓ de conventionele **DC-commutatormotor**
 - ✓ de **borstelloze DC-motor**
 - ✓ de **DC-servomotor**
- De **rotatiesnelheid** afhankelijk is van de toegepaste DC-spanning.
- De stroom doorheen de motorwindingen bepaalt het geleverde **motorkoppel**.



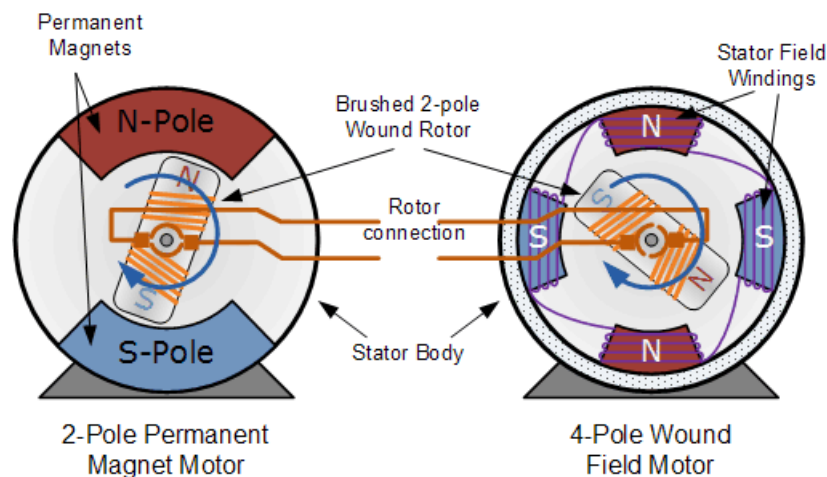
De *commutatormotor* of **borstelmotor** bezit een gewikkelde rotor en een gewikkelde stator. Om deze machine te doen draaien, keert de *commutator* de stroom door de rotor op het juiste moment om van polariteit. Daarvoor zijn *borstels* uit koolstof (vandaar de bijzondere naamgeving) en *sleepringen* nodig.

De *borstelloze* DC-motor maakt gebruik van een **permanente magneet** om het rotorveld te creëren. De commutatie gebeurt hier elektronisch met behulp van *Hall-effect* schakelaars.

Servomotoren zijn DC-motoren met extra terugkoppelmechanismen om de positie van de as te controleren. We sturen ze meestal aan met behulp van *pulsbreedte modulatie* (PWM).

3.5.2 DC-motor met commutator

De borstelmotor, met in de stator *permanente* magneten, is meestal kleiner en goedkoper dan zijn broertje met een *veldwikkeling* in de stator. Voor de productie van de zeer sterke permanente statormagneten zijn dikwijls zeldzame aardmetalen nodig. Het gebruik van permanente magneten resulteert in een betere lineairiteit van de koppel/snelheid-karakteristiek. Daarom zijn ze zeer geschikt voor robot-toepassingen en in servosystemen. Borstelmotoren hebben een hoog rendement en zijn vrij goedkoop. De *vonkvorming* aan de borstels is zijn voornaamste minpunt. Hierdoor wordt zijn levensduur beperkt en is er kans op beschadiging van de schakeltansistoren van de sturelektronica. Om deze nadelen te overwinnen zijn de *borstelloze* DC-motoren ontwikkeld.



△ Fig.3.19 | Principe borstelmotor
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

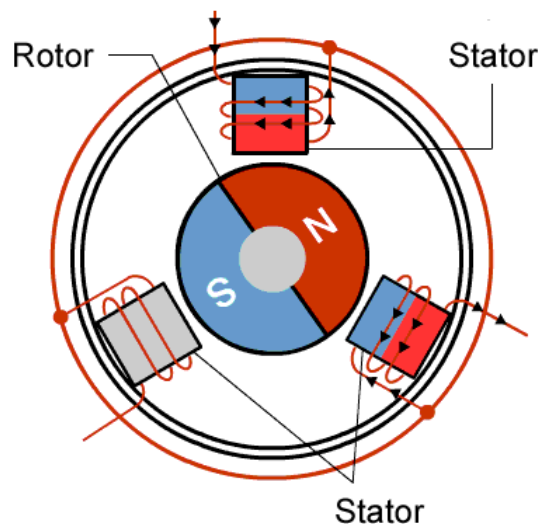
Voordelen & nadelen

- De **voordelen** van een DC-commutatormotor zijn:
 - ✓ goed rendement
 - ✓ goedkoop
 - ✓ eenvoudige snelheidsregeling
- De **nadelen** van een DC-commutatormotor zijn:
 - ✓ vonkvorming
 - ✓ niet slijtvast
 - ✓ elektro-magnetische interferenties



3.5.3 Borstelloze DC-motor

De **borstelloze DC-motor** vertoont veel gelijkenissen met de borstelmotor met permanente magneten. Het grootste verschil is de afwezigheid van de koolstofborstels met de onvermijdelijke commutatievonken. Door gebruik te maken van een *elektronisch stuurcircuit* voor de statorpolen kunnen we de commutator met zijn koolstofborstels weglaten.



△ Fig.3.18 | Principe borstelloze DC-motor
Bron: <https://www.renesas.com>

De rotor bestaat uit een *permanente* magneet en de stator uit meerdere magneetpolen die gevormd worden door *elektromagneten*. De stuelelektronica zorgt voor een permanente *synchronisatie* van de rotor met het resulterende statorveld. Hij lijkt qua ontwerp veel op een driefasige synchrone AC-motor.



△ Fig.3.19 | Kleine borstelloze DC-motor
Bron: <https://www.maxongroup.nl>

Om synchronisatie mogelijk te maken is een nauwkeurige regeling van snelheid en koppel noodzakelijk. Meestal maken we gebruik van *Hall-effect sensoren* om de juiste rotorhoekverdraaiing te detecteren. Deze meetgegevens vormen de input voor de stuur-elektronica om via vermogentransistoren de juiste magneetpolen te bekrachten met de juiste polariteit. Ten opzichte van borstelmotoren zijn de borstelloze types betrouwbaarder, efficiënter en produceren ze nauwelijks elektro-magnetische interferenties. De motorsnelheid is zeer precies te regelen en hoge toerentallen zijn mogelijk. Minpunten zijn de kostprijs en de complexere aansturing.

Voordelen & nadelen

- De **voordelen** van een borstelloze DC-motor zijn:
 - ✓ beter rendement dan de borsteltypes
 - ✓ slijtvast
 - ✓ nauwkeurige snelheidsregeling mogelijk
 - ✓ hoge toerentallen mogelijk
 - ✓ geen elektro-magnetische interferenties
- De **nadelen** van een borstelloze DC-motor zijn:
 - ✓ duurder dan de borsteltypes
 - ✓ complexe aansturing



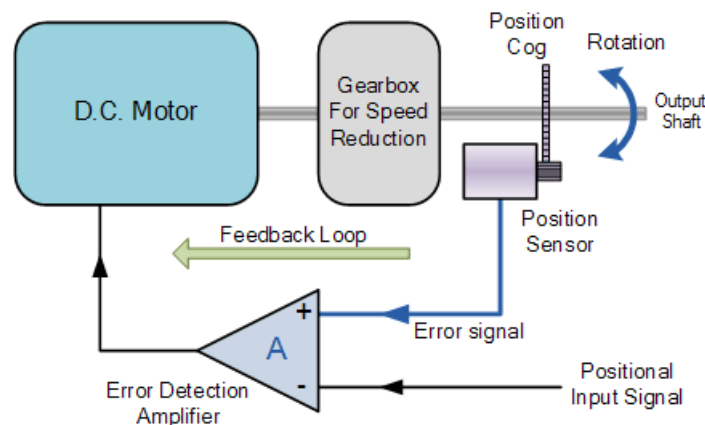
3.5.4 DC-servomotor

DC-servomotoren vinden we terug in zogenaamde *closed-loop* toepassingen waar we de positie van de motoras terugkoppelen naar een controle-orgaan. Typische feedback componenten om de actuele positie door te geven zijn: *resolvers*, *encoders* en *potentiometers*.



△ Fig.3.20 | Kleine servomotor voor microcontrollerprojecten
Bron: <https://en.wikipedia.org>

Servomotoren vinden we zowel in grootschalige industriële omgevingen terug als in meer bescheiden robotica-toepassingen. Dikwijls is een *tandwielkast* ingebouwd om, naast het reduceren van het motortoerental, ook het motorkoppel te verhogen. Daarnaast is er nog een *positieterugkoppeling* voorzien samen met een vorm van *foutcorrectie*. Afhankelijk van de ingestelde *wenswaarde* kunnen we op deze manier het toerental of de hoekverdraaiing aanpassen.



△ Fig.3.21 | Principe servomotor
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

De *foutversterker* 'kijkt' naar het ingangssignaal, dat een maat is voor de *wenswaarde*, en vergelijkt dit met het *foutsignaal* dat afkomstig is van de actuele toerentalmeting. Detecteert de foutversterker een verschil tussen deze twee signalen, dan stuurt hij de motor bij tot het foutsignaal weggeregeld is.

RC-type servomotor

- **RC-type** staat voor Radio Control (speelgoed)
- In staat om over een hoek **180°** te verdraaien in beide richtingen
- Zeer geschikt om nauwkeurige hoekverdraaiingen te realiseren.
- Aansturing met **PWM**-signaal
- Slechts **drie** aansluitdraden:
 - ✓ *massapotentiaal* (zwart)
 - ✓ *voedingsspanning* (rood)
 - ✓ *signaaldraad* (wit)

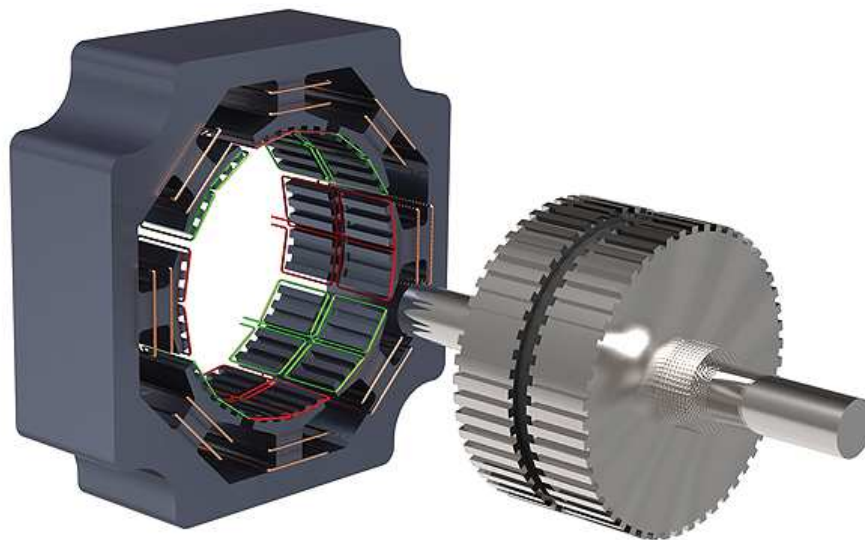


3.5.5 DC-stappenmotor

Stappenmotoren zetten een pulserend digitaal ingangssignaal om in een vast gedefinieerde hoekverdraaiing. Deze actuator is zeer wijdverspreid en we vinden hem terug in tal van industriële toepassingen. Het is een *borstelloze* motor met een volledige *synchronisiteit* tussen rotor en stator. Zoals zijn naam doet vermoeden, zal een stappenmotor niet ronddraaien op een continue manier zoals de conventionele DC-motor.

Principe

- De **rotor** bestaat uit honderden tanden van permanent magnetisch materiaal.
- De **stator** herbergt enkele bekrachtigingswikkelingen.
- Hij voert de draaibeweging uit in kleine *stapjes* met een **vaste hoektoename** van enkele graden.
- Deze hoektoename hangt af van het aantal **statorpolen** en het aantal **rotortanden**.
- De hoekverdraaiing is proportioneel met het aantal **input-pulsen**.



△ Fig.3.22 | Principe van een stappenmotor
Bron: <https://www.motioncontroltips.com>

Stappenmotoren zijn beschikbaar in drie versies: het *variabele reluctance* type, het *permanente magneet* type en het *hybride* type, dat een combinatie is van de twee voorgaande.

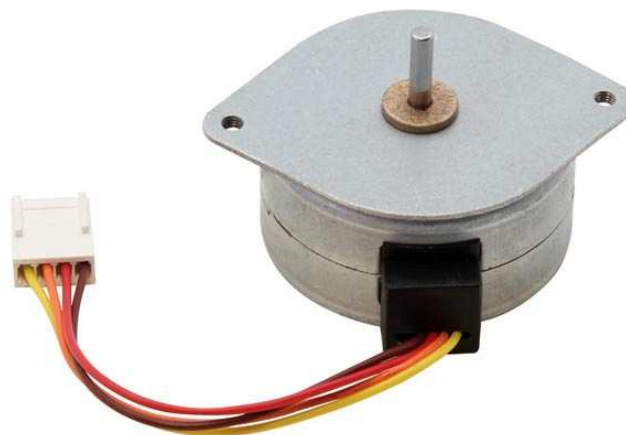
Omdat de rotor verdraait in kleine vaste stapjes is het eenvoudig om hem te laten draaien over een vooropgestelde hoek van bijvoorbeeld 7,5 graden. Stel dat een stappenmotor één volledige omwenteling volbrengt in 100 stapjes. We kunnen deze staphoek eenvoudig berekenen. De staphoek in ons voorbeeld zal 3,6° zijn.

Staphoek

staphoek = $360^\circ / \text{aantal stappen voor 1 toer}$



Stappenmotoren zijn zeer geschikt voor *nauwkeurige positionering* en om *repeterende* handelingen te verrichten. Ze zijn inzetbaar bij toepassingen die *snelle reactie* vereisen zoals plots stoppen, plots starten, en plots omkeren van de draaizin. De *rotatiesnelheid* van een stappenmotor laat zich ook vlot regelen. Een ander zeer interessant aspect is dat een stappenmotor in staat is zijn laatste ingenomen *positie* te *handhaven*, ook al is de bekrachtiging weggefallen.



△ Fig.3.23 | Kleine stappenmotor met een staphoek van 7,5°
Bron: <https://www.velleman.eu>

Een veel gebruikte stappenmotor heeft een 50-tandige rotor en een vierfasige stator en doet 200 stapjes voor één omwenteling. Hij bezit een typische staphoek van **1,8°**. Veel voorkomende staphoeken zijn ook nog 15° en 7,5°. Tegenwoordig zijn er veelpolige en veeltandige stappenmotoren verkrijgbaar met een staphoek die kleiner is dan 0,9°. Met een staphoek van 0,9° moeten we 400 pulsen aanbieden om juist één omwenteling te realiseren. Deze zeer nauwkeurige types vinden we terug in bijvoorbeeld *harde schijven*, *printers* en *robotsystemen*.

Het voordeel van stappenmotorsturing is dat er geen bijkomende terugkoppeling van informatie over de aspositie nodig is. Door simpelweg het aantal stuurpulsen te *tellen*, weten we perfect in welke positie de motoras zich bevindt. Dit is een typisch voorbeeld van een '**open lus**' regeling, die eenvoudiger en goedkoper is dan een 'gesloten lus' regeling.

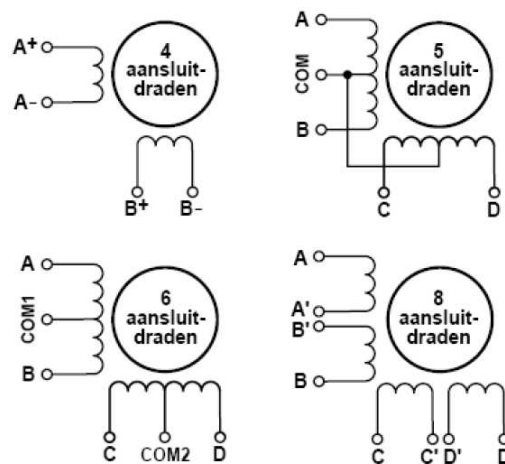
Voordelen & nadelen

- De **voordelen** van een stappenmotor zijn:
 - ✓ kleine afmetingen
 - ✓ geen terugkoppeling nodig zoals bij servomotoren
 - ✓ zeer nauwkeurig te positioneren
 - ✓ constant houdkoppel bij bekrachtiging
 - ✓ geen vonkvorming & slijtvast
 - ✓ draaisnelheid is onafhankelijk van de belasting
 - ✓ snelle reactie op versnellen, vertragen en stapcommando's
 - ✓ goede prestaties op lage snelheid
- De **nadelen** van een stappenmotor zijn:
 - ✓ bij gebrekkige aansturing kunnen resonanties optreden
 - ✓ maximale draaisnelheid begrensd tot 1000 RPM
 - ✓ bij overbelasting gaat de positie-informatie verloren



3.5.6 Identificatie van stappenmotoren

De meest toegepaste stappenmotoren tegenwoordig zijn de *twee-fasige bipolaire hybride stappenmotor* met een staphoek van $1,8^\circ$ en zijn *vierfasige unipolaire* tegenhanger. Er bestaan uitvoeringen met 4, 5, 6 of 8 draden. Het aantal draden is afhankelijk van het type. We onderscheiden **unipolaire** stappenmotoren en **bipolaire** stappenmotoren.



△ Fig.3.24 | Identificatie van een stappenmotor.
Bron: RTC-Oost-Vlaanderen, M. Bonner

Met een *ohmmeter* kunnen we de verschillende wikkelingen uitmeten zodat we de common-draad kunnen identificeren. De weerstand tussen de twee fasedraden is dubbel zo groot als tussen een fase en de gemeenschappelijke draad. Tussen de draden van verschillende wikkelingen meten we uiteraard geen weerstand.

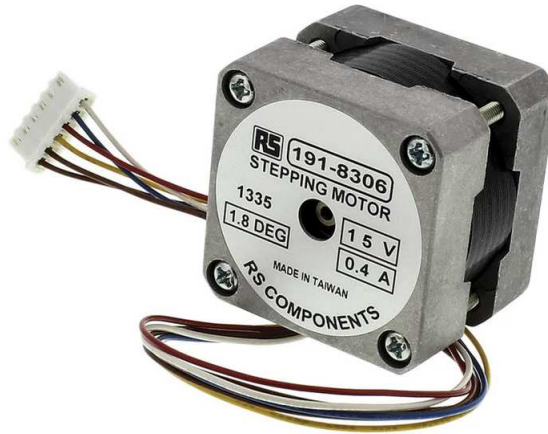
Parate kennis!

- **Unipolaire** stappenmotoren beschikken over twee wikkelingen met elk een *middenaftakking* wat resulteert in een uitvoering met **zes** aansluitdraden.
- We sluiten de middenaftakkingen (**common**) steeds aan op één van de klemmen van de voedingsspanning.



In sommige gevallen zijn beide common-aansluitingen met elkaar verbonden en heeft de motor maar vijf aansluitdraden. De vier andere aansluitdraden worden door de besturing steeds wel of niet met de andere klem van de voedingsspanning verbonden.

Doordat we de fasen van een unipolaire stappenmotor steeds met dezelfde polariteit bekrachtigen, kunnen we gebruik maken van zeer *eenvoudige transistorschakelingen* voor de aansturing. Het nadeel van dit type is dat we per stap maar een halve wikkeling bekrachtigen, waardoor er minder motorkoppel beschikbaar is.



△ Fig.3.25 | Unipolaire hybride stappenmotor.
Bron: <https://benl.rs-online.com>

Parate kennis!

- **Bipolaire** stappenmotoren hebben twee statorwikkelingen zonder middenaftakking.
- Deze uitvoering heeft **vier** aansluitdraden en is momenteel het meest gangbare type.
- Om dit type aan te sturen maken we gebruik van twee **H-bruggen** om de stroom in de fasen om te keren.



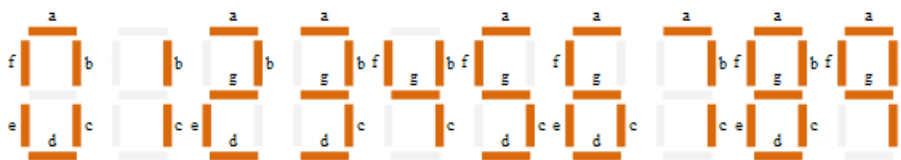
△ Fig.3.26 | Bipolaire hybride stappenmotor.
Bron: <https://benl.rs-online.com>

3.6 7-segment display

3.6.1 Principe

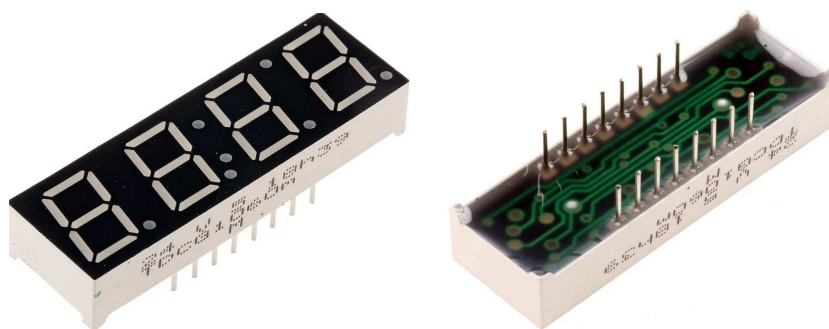
Lichtgevende diodes^[28] (LED's) hebben vele voordelen t.o.v. de traditionele signaallampjes. Ze zijn klein van formaat, hebben een lange levensduur, zijn beschikbaar in vele kleuren, verbruiken bijna geen stroom en bovenal zijn ze heel goedkoop. Het is ook een ideale component om gemakkelijk te *interfaceren* met bijvoorbeeld digitale logica.

Figuur 3.27 toont de basisversie van een **7-segment display** en bestaat uit zeven LED's die op een bepaalde manier zijn geschikt zodat ze alle decimale cijfers kunnen vormen van 0 tot 9.



△ Fig.3.27 | Principe van een 7-segment display.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Elk van de zeven LED's noemen we een **segment** omdat bij het oplichten, het betreffende segment een onderdeel vormt van het *decimaal* of *hexadecimaal* cijfer dat we willen weergeven. Soms voegen we een bijkomende LED toe om een *decimaal punt* (DP) weer te geven. Door meerdere 7-segment displays aan elkaar te koppelen kunnen we getallen weergeven die groter zijn dan 9.



△ Fig.3.28 | 7-segment display voor weergave van de tijd.
Bron: <https://benl.rs-online.com>

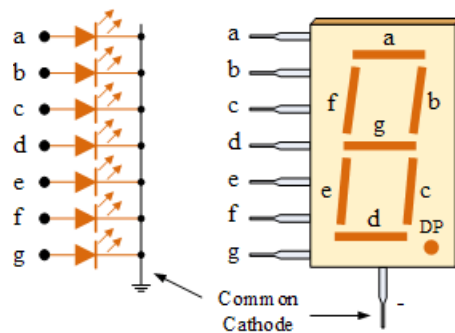
[28] LED staat voor Light Emitting Diode

3.6.2 Common anode & common cathode

Van elk LED-segment is één aansluiting met een overeenkomstige behuizingspin verbonden terwijl de andere aansluiting verbonden is met een *gemeenschappelijke* (**common**) pin. Deze gemeenschappelijke pin helpt ons het type display te identificeren. De LED pins zijn gemarkeerd van 'a' tot 'g'. Eerder leerden we dat een LED twee klemmen heeft: de *anode* en de *kathode*. Zo bestaan er twee display types: '**Common Cathode**' en '**Common Anode**'.

Common Cathode (CC)

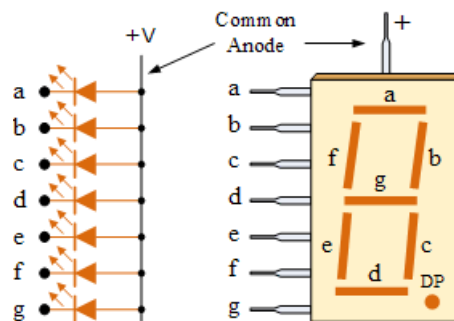
- Bij een **common cathode** 7-segment display zijn alle kathoden van de LED-segmenten met elkaar verbonden en vormen samen de *common* pin.
- De **common** pin plaatsen we op *massapotential* of een logisch **laag** niveau (L).
- De individuele **LED-segmenten** lichten op door pinnen a, b,..., g op een logisch **hoog** niveau (H) te brengen via een gepaste *voorschakelweerstand*.
- Stuurprincipe: **sourcing**
- Dit type wordt niet vaak toegepast.



△ Fig.3.29 | Common cathode 7-segment display.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Common Anode (CA)

- Bij een **common anode** 7-segment display zijn alle anoden van de LED-segmenten met elkaar verbonden en vormen samen de *common* pin.
- De **common** pin plaatsen we op de positieve voedingsspanning (+VCC) of een logisch **hoog** niveau (H).
- De individuele **LED-segmenten** lichten op door pinnen a, b,..., g op een logisch **laag** niveau (L) te brengen via een gepaste *voorschakelweerstand*.
- Stuurprincipe: **sinking**
- Meest voorkomende type.



△ Fig.3.30 | Common anode 7-segment display.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

Omdat de meeste digitale logische bouwstenen beter in staat zijn om stroom te 'sinken' in plaats van te 'sourcen' verkiezen we dikwijls de CA-displays boven de CC-displays. Merk op dat beide typen niet één op één inwisselbaar zijn in een concrete schakeling.

3.6.3 Waarheidstabel

Afhankelijk van het decimale cijfer dat we willen weergeven dienen we de betreffende LED-segmenten voorwaarts te polariseren. Om bijvoorbeeld cijfer '0' weer te geven zullen we 6 LED-segmenten (a, b, c, d, e en f) laten oplichten. Elk cijfer komt overeen met het aansturen van meerder pinnen volgens de **waarheidstabel** van figuur 3.31.

Decimal Digit	Individual Segments Illuminated						
	a	b	c	d	e	f	g
0	x	x	x	x	x	x	
1		x	x				
2	x	x		x	x		x
3	x	x	x	x			x
4		x	x			x	x
5	x		x	x		x	x
6	x		x	x	x	x	x
7	x	x	x				
8	x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x			x	x

△ Fig.3.31 | Waarheidstabel van een 7-segment display.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

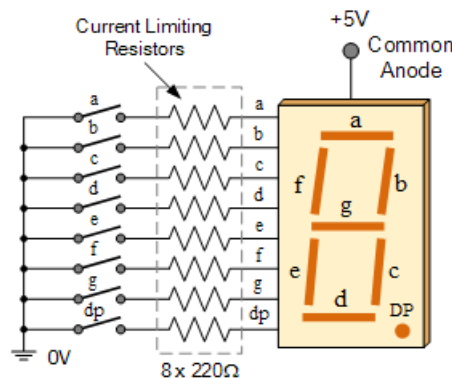
3.6.4 Aansturing

Parate kennis!

- Alle LED-segmenten van het display moeten beveiligd zijn tegen **overstroom**.
- Dit realiseren we door in serie met elk segment een gepaste **voorschakelweerstand** te plaatsen.
- De *voorwaartse spanningsval* over een **rode** LED is ongeveer **2** tot **2,2** volt bij een *voorwaartse stroom* van ca. **15 mA**.
- De *voorwaartse spanningsval* over **blauwe** en **witte** LED-segmenten kan oplopen tot ca. **3,6** volt.



Een typische stroomwaarde voor een rood 7-segment display waarbij het segment correct oplicht is 15 mA. Voor een digitale 5 volt omgeving kunnen we de waarde van de voorschakelweerstand als volgt berekenen. De spanningsval over elke voorschakelweerstand is 3 volt (5 volt - 2 volt). Via de wet van Ohm bekomen we een weerstandswaarde van 200 ohm ($3 \text{ volt} / 15 \text{ mA}$). We kiezen een waarde uit de welgekende E12-reeks juist boven de berekende waarde: **220** ohm.



△ Fig.3.32 | Aansturen met voorschakelweerstand.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

In het voorbeeld van figuur 3.32 doen we de segmenten van het CA-display oplichten door de juiste schakelaars te sluiten. We maken dan een connectie naar massa zodat het betreffende segment voorwaarts wordt gepolariseerd en het juiste segment kan oplichten. Dit is uiteraard niet erg praktisch om op deze manier een 7-segment display aan te sturen. In de praktijk maken we daarvoor gebruik van **decoders** en **drivers** in *IC-vorm*.