

Hoofdstuk 2

De diode

2.1 De werking en opbouw van de diode.

Net als bij de weerstand, spoel en condensator heeft de diode twee aansluitingen (Anode en Kathode), die echter polariteit afhankelijk zijn.

Diodes zijn gemaakt van z.g. halfgeleidermateriaal; silicium (Si) of germanium (Ge). Zuiver silicium of germanium is matig geleidend (halfgeleidend). Door het aanbrengen van vreemde atomen (doperen) is de geleidbaarheid te verbeteren. Zo verkrijgt men een goed geleidend P- of N-materiaal. Door nu P- en N-materiaal tegen elkaar aan te plaatsen krijgt men een PN-overgang of diode. De spanning, waarbij een diode redelijk geleidt, wordt de drempelspanning U_d genoemd. Een silicium diode heeft een drempelspanning van ongeveer 0,6 V en een germanium diode heeft een drempelspanning van ongeveer 0,3 V. De behuizingsvorm van diodes is zeer afhankelijk van de toepassing. Vermogens-diodes hebben een zeer grote behuizing (soms met een koellichaam) om de ontwikkelde warmte af te voeren. Licht-diodes hebben een transparante behuizing om het licht te kunnen doorlaten. Schakeldiodes zijn zeer klein uitgevoerd om zo weinig mogelijk capaciteit te verkrijgen. Voor een meer fysische beschrijving van de werking van de diode op elektronen en gaten niveau wordt verwezen naar andere vakken (elektronica, halfgeleider fysica). In figuur 2.1 is de opbouw en het symbool van de diode getekend.

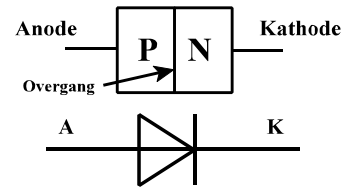


Fig. 2.1: Opbouw en symbool diode.

Om te weten met welke diode we te doen hebben staat meestal het typenummer van de diode op de behuizing van de diode gedrukt. Het type wordt soms ook d.m.v. een kleurcode aangegeven. In figuur 2.2a is de diode met de positieve spanning op de kathode (sperrichting) aangesloten, er vloeit slechts de lek- of sperstroom (I_s).

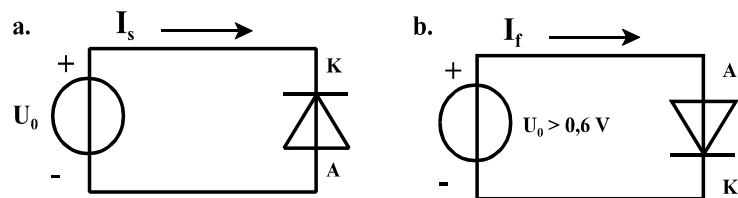


Fig. 2.2: Diode in sper en doorlaat aangesloten.

Een zeer kleine stroom (praktisch 0) loopt van kathode naar anode. Sluit men, zoals in figuur 2.2b, de diode met de positieve spanning op de anode aan (doorlaat-richting), dan loopt er een veel grotere stroom I_f van anode naar kathode. De grootte van de stroom wordt bepaald door de aangelegde spanning. Bij een lineaire weerstand is de wet van Ohm altijd van toepassing; $U = R \cdot I$ geldt voor AC- (wissel) en DC- (gelijk) stroom, in iedere richting. Het maakt dus niet uit of er met DC- of AC-grootheden gewerkt wordt en ook de richting maakt niet uit. De diodekarakteristiek daarentegen is niet-symmetrisch en niet-lineair. Het niet-symmetrisch zijn wil zeggen dat de diode in doorlaat-richting zich anders zal gedragen dan in sperrichting. Het niet-lineair zijn van de grafiek heeft gevolgen voor de “weerstand” van de diode. Voor gelijkstroom heeft de diode een andere weerstand dan voor wisselstroom. In figuur 2.3 is het spanning-stroom verloop van de diode getekend. Bij toenemende sperspanning zal bij een bepaalde spanning de diodestroom plotseling zeer sterk toe. Dit effect heet doorslag. De diode heeft ten gevolge van het doorslaan niet

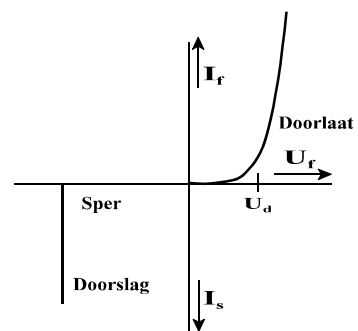


Fig. 2.3: Diode karakteristiek.

kapot te gaan, maar het is geen gewenste bedrijfstoestand. Pas als ten gevolge van de doorslag het maximaal te dissiperen vermogen overschreden wordt gaat de diode kapot.

2.2 Typen dioden.

Voor specifieke toepassingen zijn speciale dioden verkrijgbaar; we zullen er een aantal bespreken:

Zenerdiode

Light Emitting Diode (LED)

Varicap of Capaciteits-diode

Fotodiode

De Zenerdiode

Een zenerdiode is een diode die gebruikt wordt in de sperrichting. De diode maakt gebruik van het gebied waarin een normale diode bij voorkeur niet werkt, namelijk het doorslaggebied. Bij een diode in sper loopt er zeer weinig stroom, terwijl de sperspanning U_s wel kan toenemen. Boven een bepaalde spanning U_z (= zenerspanning) slaat de diode door: de stroom neemt zeer sterk toe, terwijl de spanning nauwelijks verandert. Zolang het vermogen onder het maximaal toegestane blijft, gaat de diode niet kapot. Dit betekent in de praktijk dat de stroom door de zenerdiode begrensd wordt door bijvoorbeeld een serieweerstand. De karakteristiek en het symbool van een zenerdiode is in figuur 2.4 getekend. Voor een zenerdiode wordt gespecificeerd bij welke spanning de doorslag optreedt, bijvoorbeeld BZX79 5V6. Dit is een zenerdiode uit de BZX79 serie met een zenerspanning van 5,6 V. Zenerdiodes zijn er in talloze uitvoeringen, van 3 tot 100 V en van 0,1 tot 100 W. Een toepassing van de zenerdiode is de spanning voor een toepassing constant (stabilisatie schakelingen) te houden op de spanning U_z .

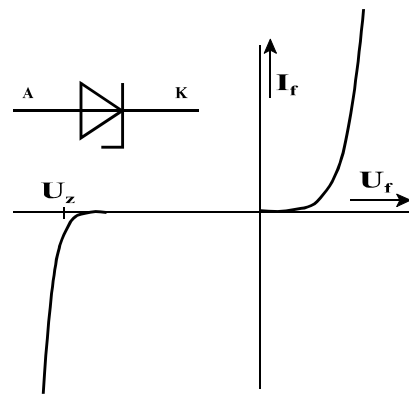


Fig. 2.4: Symbool en karakteristiek van een zenerdiode.

Light Emitting Diodes, LED's

LED's hebben de eigenschap, dat als zij geleiden zichtbaar (en soms onzichtbaar) licht wordt uitgestraald. Het licht kan rood, groen, geel, blauw of infra-rood zijn. Door Gallium met een andere stof te combineren ontstaan de verschillende kleuren. Het uitstralen van licht is een gevolg van een fysisch effect, het foto-elektrisch effect. Een LED heeft een hogere drempelspanning dan 'gewone' diodes. In figuur 2.5 zijn karakteristieken van een aantal LED's getekend.

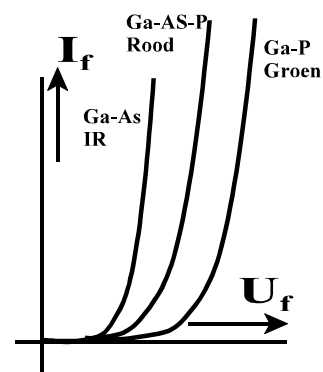


Fig. 2.5: LED's van verschillende materialen.

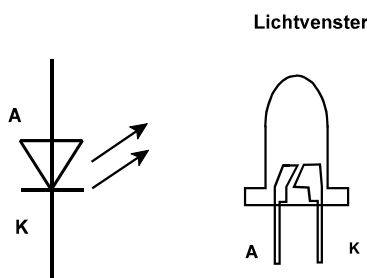


Fig. 2.6: Symbool en uitvoering LED.

Figuur 2.6 laat het symbool en een uitvoeringsvorm van een LED getekend.

Infra-rood LED's worden onder andere toegepast in afstandsbedieningen, normale LED's worden toegepast als indicatie en signalering. Er zijn vele uitvoeringsvormen van LED's zoals b.v. in de vorm van pijlen, strepen, driehoeken, SMD-uitvoeringen, 7-segments displays, 17-segments displays, fietsverlichting enz.

Fotodiode

Een fotodiode is als een gewone diode in een lichtdoorlatende behuizing, toegepast in sperrichting. Als er licht valt op de P-N-overgang, dan ontstaan er ten gevolge van de toegevoerde energie (licht) vrije ladingdragers en kan er een stroom gaan lopen. De stroom verandert lineair met de lichtsterkte. Fotodiodes worden uitgevoerd met een lichtvenster en een groot P-N gebied om zoveel mogelijk licht op te vangen en om te zetten in elektrische stroom. Figuur 2.7 geeft de opbouw en het elektrisch symbool van een fotodiode weer. Als er geen licht op de fotodiode valt dan vloeit er slechts de lek- of donkerstroom, voor silicium is dit enkele honderden nA. Wordt de fotodiode belicht dan gaat er stroom lopen, waarvan de grootte afhankelijk is van de lichtsterkte (lux). Een en ander is weergegeven in de stroom-spanning karakteristiek van de fotodiode getekend in figuur 2.8 Samen met een LED vormt de fotodiode (figuur 2.9) een optisch communicatie-systeem, waarbij de LED als zender fungeert en de fotodiode als ontvanger. Deze combinatie wordt o.a. toegepast in barcode-lezers, afstandsbedieningen, glasvezel communicatie. Behalve het feit dat licht snel en storingvrij getransporteerd kan worden heeft het ook uitstekende elektrisch isolerende eigenschappen en is onafhankelijk van elektrische (stoor-)velden. Zo zijn galvanische scheidingen te maken met opto-couplers (LED en fotodiode in één huis, figuur 2.9).

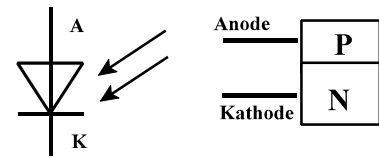


Fig. 2.7: Symbool en opbouw van een fotodiode.

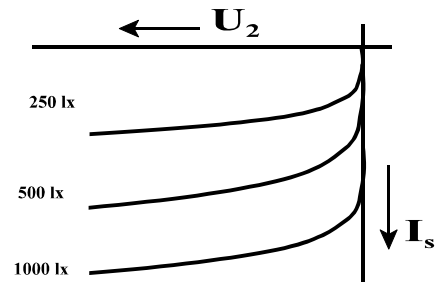


Fig. 2.8: karakteristieken van een fotodiode.

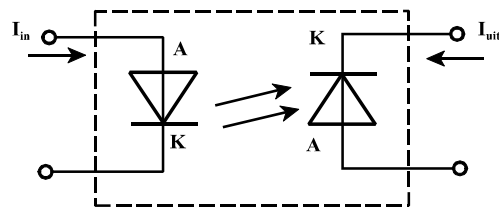


Fig. 2.9: Optocoupler.

Capaciteitsdiode

Een condensator of capaciteit is opgebouwd uit 2 geleiders (de platen) gescheiden door een isolator (diëlektricum). Zo'n opbouw is ook te onderscheiden bij een diode in sper; zie ook figuur 2.10. In sper gebruikt, vormt er zich een barrière gebied op het grensvlak van het P- en N-materiaal van de diode. In de barrière bevinden zich bijna geen vrije ladingdragers, dus deze is slecht geleidend. Deze opbouw is te vergelijken met die van een "echte" capaciteit van twee geleidende platen gescheiden worden door een isolator.

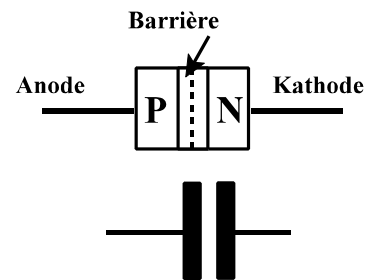
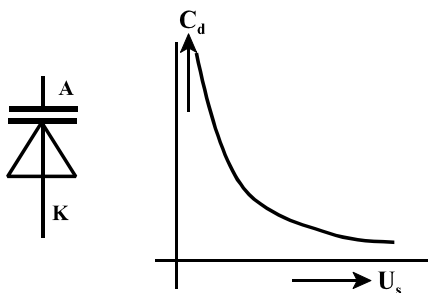


Fig. 2.10: PN-lagen als condensator.



Figuur 2.11: Symbool en capaciteitsverloop

Wanneer nu de sperspanning van de capaciteitsdiode wordt vergroot, dan wordt het barrière gebied groter en neemt de capaciteit af. Een spanningsverlaging zal de capaciteit doen toenemen. In figuur 2.11 is het symbool van de varicap en het verloop van de capaciteit ten opzichte van de sperspanning getekend. De curve is een hyperbool. Iedere capaciteitsdiode heeft een bepaald capaciteitsbereik, afhankelijk van de opbouw en de maximale sperspanning.

Capaciteitsdioden of varicaps worden hoofdzakelijk gebruikt in ontvangers. Bij een tuner is een banddoorlaatfilter nodig om een bepaalde tv-zender door te laten en alle andere zenders te blokkeren. Zo'n banddoorlaatfilter is eenvoudig te maken met een spoel en een condensator parallel. Meestal is de condensator als variabele component uitgevoerd om de juiste doorlaatfrequentie te kunnen kiezen. Door een capaciteitsdiode in serie toe te passen is met een instelbare spanning de doorlaatfrequentie te kiezen. Zo wordt het juiste tv-station ontvangen. In figuur 2.12 is het ontvangstprincipe getekend.

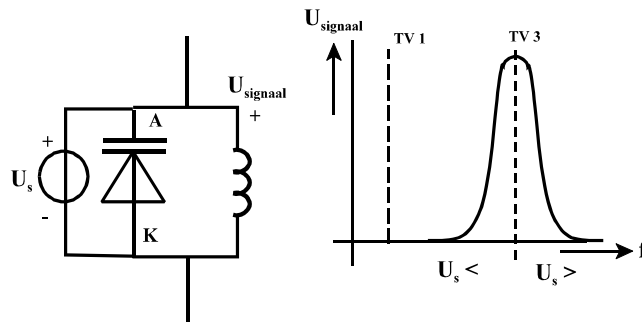


Fig. 2.12: Varicap in een filterschakeling.

2.3 De diodekarakteristiek

Om de werking van de diode beter te kunnen begrijpen, kijken we eerst nauwkeurig naar de diodekarakteristiek van figuur 2.13. De lekstroom in sperrichting is zeer klein, om toch de karakteristiek te kunnen tekenen is de stroom-as in sper-richting in pA (picoampère) aangegeven, terwijl in doorlaatrichting de stroom in mA staat. De diode karakteristiek is te beschrijven volgens de relatie:

$$I_d = I_s \cdot (e^{\frac{q \cdot U_d}{kT}} - 1)$$

Hierin is:

- I_d = diode-stroom, variabel
- I_s = sperstroom, afhankelijk van type diode
- e = grondtal van de natuurlijke logaritme
- q = lading van het elektron, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C
- U_d = diode-spanning, variabel
- k = constante van Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T = absolute omgevingstemperatuur (300 K bij kamertemperatuur)

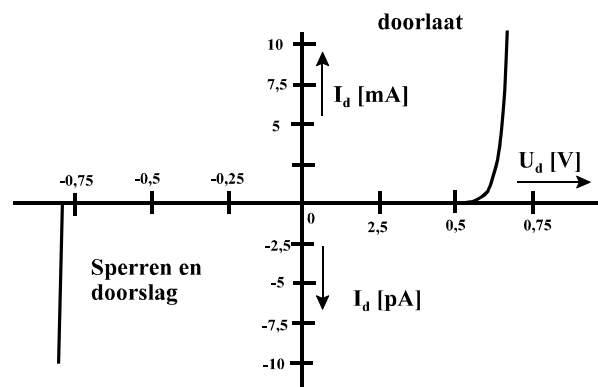


Fig. 2.13: De diode karakteristiek.

De sperstroom I_s is afhankelijk van het type diode en de temperatuur. Omwille van de eenvoud wordt deze stroom in eerste benadering als constant beschouwd. Voor de absolute omgevingstemperatuur wordt vaak gerekend met een kamertemperatuur van 27^0 ofwel 300 K. Als we een spanning hebben van een ongeveer 0,1 V of groter dan heeft de factor "-1" uit de spanning-stroom relatie nagenoeg geen invloed op de stroom en mag de "-1" wel verwaarloosd worden. Het verschijnsel van doorslag wordt bovengenoemde formule niet beschreven!

Dat de stroom door de diode temperatuurafhankelijk is, blijkt uit de diodeformule waarin de temperatuur in de e-macht voorkomt. Voor de eenvoud was de sperstroom constant gesteld, maar ook deze is in feite afhankelijk van de temperatuur. Indien al deze temperatuur-effecten afzonderlijk bekeken worden, wordt de diode wel erg complex. Eenvoudiger is het om het temperatuureffect op te meten en voortaan met een vuistregel te hanteren. De vuistregel is een benadering maar is in de praktijk goed bruikbaar. Voor een diode in doorlaat geldt dat het temperatuureffect $-2\text{mV}/\text{C}$ is. In woorden; bij een temperatuurverhoging van 1^0 C is voor dezelfde stroom 2 mV minder "forward" spanning nodig.

Voor een diode in sper geldt dat de sperstroom ongeveer iedere 10^0 C verdubbelt. De sperstroom is dus sterk afhankelijk van de temperatuur, maar blijft praktisch zeer klein (praktisch 0).

Bij een grote stroom zal de P-N-overgang warm worden en van temperatuur veranderen. Het een en ander is ook afhankelijk van de diode-opbouw; is er een groot of klein oppervlak waar de stroom doorheen moet, heeft de diode een grote of kleine behuizing. Een grote stroom en een kamertemperatuur van 20° C kan binnen de behuizing met slechte koeling tot wel zo'n 80° of hoger oplopen. Omdat de temperatuur een belangrijke invloed op de diodekarakteristieken heeft, moet voor een aantal toepassingen met dit effect rekening worden gehouden. Voor de warmte afvoer een goede koeling, voor een goede werking van de schakeling door temperatuur-compensatie.

2.4 De statische en dynamische weerstand

Bij elektronica (en dus ook bij netwerken) wordt onderscheid gemaakt tussen gelijkspanning en wisselspanning en gelijkstroom en wisselstroom. De gelijkstroom en -spanning is de statische waarde van de grootheid (DC-situatie). Met wisselstroom en -spanning wordt de variatie ten opzichte van de DC-waarde bedoeld, ook wel aangegeven met Δu en Δi (AC-situatie). Met de statische weerstand van een component wordt bedoeld de DC-weerstand ofwel de weerstand voor gelijkstroom en -spanning: $U = R_d \cdot I$

R_d = statische (DC-) weerstand

In de diode karakteristiek is de statische (DC) weerstand te bepalen door de spanning en de bijbehorende stroom op elkaar te delen. Met de dynamische weerstand van een component wordt bedoeld de AC-weerstand ofwel de weerstand voor wisselstroom en spanning:

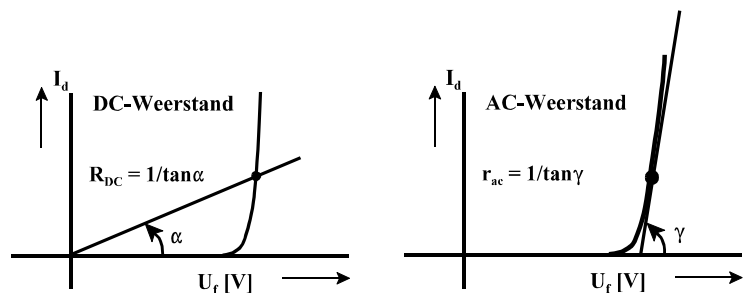


Fig. 2.14: Statische en dynamische weerstand.

r = dynamische weerstand = AC- weerstand

De statische en dynamische weerstandswaarden zijn te construeren zoals getekend in figuur 2.14. Het verschil in statische en dynamische weerstand is een belangrijk verschil. Met name de dynamische weerstand speelt in de elektronica een belangrijke rol. Bij de bepaling van de statische weerstand is de richtingscoëfficiënt van de lijn door de oorsprong en het punt op de karakteristiek waarin de weerstand bepaald wordt, gelijk aan $\tan \alpha = 1/R_d$. Bij de bepaling van de dynamische weerstand is de richtingscoëfficiënt van de raaklijn in het punt op de karakteristiek gelijk aan $\tan \gamma = 1/r$.

De beschrijving van de raaklijn is te vinden door de originele diode formule te differentiëren naar U_d .

Voor de afgeleide vinden we:

$$\frac{dI_d}{dU_d} = \frac{q}{kT} \cdot I_s \cdot e^{\frac{qU_d}{kT}} \approx \frac{q}{kT} \cdot I_d = 40 V^{-1} \cdot I_d$$

Hierbij is $k.T/q = 25$ mV voor kamertemperatuur genomen en de factor -1 is verwaarloosd t.o.v. de e-macht. De factor dI_d/dU_d geeft de steilheid (S) van de grafiek aan en is gedefinieerd als parameter S:
 $S = 40 \cdot I_d$ [mA/V] met I_d in mA.

De dynamische weerstand (in doorlaat) is dan:

$$r = \frac{du}{di} = \frac{1}{S} = \frac{1}{40 \cdot I_d} = \frac{25 \text{ mV}}{I_d}$$

De grootte van de wisselstroomweerstand r_d is omgekeerd evenredig met de gelijkstroom I_d . De consequentie van het voorgaande is dat om aan het wisselstroom gedrag van de diode te kunnen rekenen de gelijkstroominstelling bekend moet zijn! Indien er een DC-stroom van 1 mA vloeit, dan is de wisselstroomweerstand 25Ω . Is de DC-stroom 0,5 mA, dan is de wisselstroomweerstand 50Ω . Bij een instelstroom van 2 mA hoort een wisselstroomweerstand van $1,5 \Omega$.

Bovenstaande afleiding geldt alleen voor een diode in doorlaat. In het spergebied is de lekstroom bijna onafhankelijk van de sperspanning. De e-macht is verwaarloosbaar klein t.o.v. -, zodat $I_d = -I_s$. Hierbij wordt I_s als constant verondersteld. Als we nu differentiëren dan wordt:

$$\frac{di}{du} = S = 0$$

De steilheid S wordt 0, zodat de dynamische weerstand in dit gebied oneindig is:

$$r = \text{dynamische weerstand (in sper)} = \infty.$$

Het is logisch dat de wisselstroomweerstand r van een diode niet in de databoeken is te vinden, want deze is direct afhankelijk van de gelijkstroominstelling van de diode.

2.5 Het vervangingschema diode

Vervangingschema's (modellen) worden gebruikt om berekeningen eenvoudiger en overzichtelijker te maken. Ze zijn benaderingen van de werkelijkheid. Het basisidee achter modellen is het feit dat de toepasbare grafieken zoveel mogelijk gelineariseerd kunnen worden. In een bepaalde situatie met een gegeven DC-instelling wordt de grafiek als een rechte beschouwd. De zo verkregen grafiek kan dan voorgesteld worden door een lineaire weerstand. Deze benadering geldt alleen, indien niet al te veel van de instelling afgeweken wordt, dus als het AC-signaal klein is ten opzichte van het DC-signaal (de instelling). In figuur 2.15 is de diodekarakteristiek getekend, waarbij 3 gebieden te onderscheiden zijn.

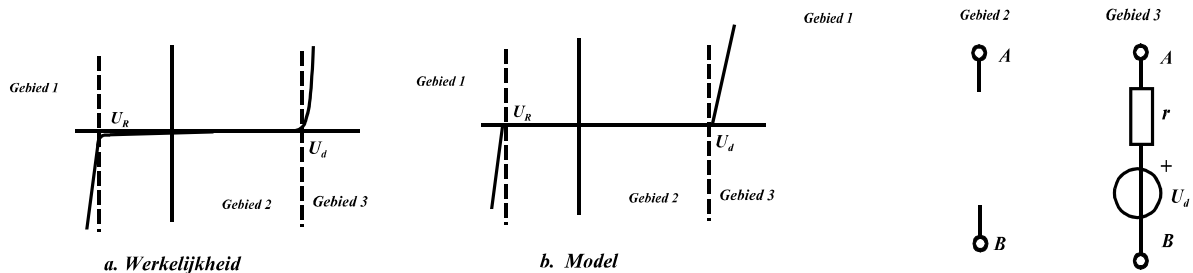


Fig. 2.15: De werkelijke en gemodelleerde diode karakteristiek.

Fig. 2.16: Vervangingschema van een diode.

Gebied 1: Doorslag gebied.

Indien er een grotere spanning dan de doorslagspanning U_R van de diode wordt aangeboden, dan neemt de stroom enorm snel toe. Dit is een ongewenste situatie, het risico is groot dat de diode onherstelbaar beschadigd wordt. Een normale diode wordt niet in dit deel van de karakteristiek gebruikt.

Gebied 2: Sper gebied.

Een willekeurig aangelegde sperspanning tussen de drempelspanning en U_d , heeft nagenoeg geen invloed op de sperstroom I_s . De stroom is praktisch onafhankelijk van de aangelegde spanning (ongeveer 0 nA). Dit wordt voorgesteld door een open verbinding of een oneindige weerstand.

Gebied 3: Doorlaat gebied.

Indien er een grotere spanning dan de drempelspanning op de diode wordt aangeboden, dan neemt de stroom exponentieel toe. De helling van de raaklijn aan de grafiek is de dynamische weerstand welke wordt bepaald door de DC-instelstroom.

In figuur 2.16 staan de vervangingsschema's voor de diode in de verschillende gebieden. In gebied 1 is de figuur met opzet leeg gelaten aangezien de diode niet in dit gebied gebruikt mag worden.

In figuur 2.17 zijn van de zenerdiode de geldende vervangingsschema's getekend. Gebied 1 is nu wel in gebruik en de zenerspanning U_z is daar van belang. Gebied 3 is bij een zenerdiode niet zo belangrijk. Hier gedraagt de zener zich als een "gewone" diode.

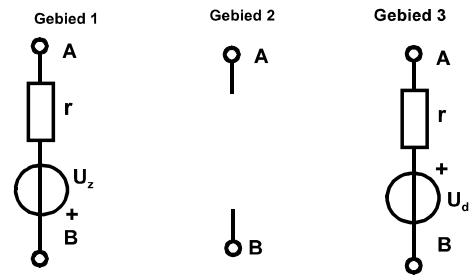


Fig. 2.17: Vervangingsschema's van de zenerdiode.

2.6 Het vermogen in een diode

Een diode in doorlaat voert een stroom I_f en heeft een doorlaat-spanning U_f . De diode neemt dus vermogen op, dit noemt men ook wel de dissipatie van de diode. De dissipatie is uit te rekenen volgens: $P_d = U_f \cdot I_f$. Door de dissipatie zal de temperatuur van het diodekristal toenemen. Indien de temperatuur te hoog wordt zal de warmte via de behuizing naar de omgeving moeten worden afgevoerd. Iedere diode heeft een maximale junctietemperatuur (junctie = PN-overgang) die bepaalt in welke mate een diode gekoeld moet worden. Als van een diode (of in het algemeen van een component) de maximale dissipatie gegeven is (bijvoorbeeld $P_{max} = 300 \text{ mW}$), dan is een karakteristiek te tekenen met alle mogelijke maximale dissipaties. Als de stroom en spanning onafhankelijk van elkaar zijn, dan kan de maximale dissipatie optreden bij:

- a. een kleine spanning en een grote stroom
- b. een matige spanning en een matige stroom
- c. een grote spanning en een kleine stroom.

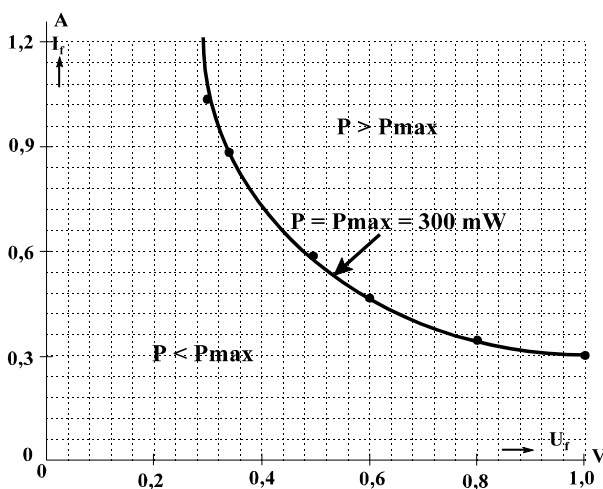


Fig. 2.18: Hyperbool van $P = 300\text{mW}$.

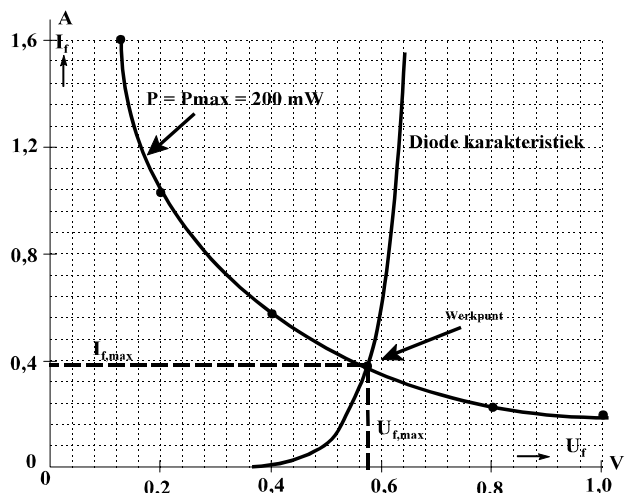


Fig. 2.19: Het werkpunt van een diode.

Al deze mogelijke punten met elkaar vormen een hyperbool, de zogenaamde dissipatiehyperbool. Indien een instelpunt boven de dissipatiehyperbool gekozen wordt, dan wordt de maximale dissipatie overschreden en gaat de component na korte tijd kapot. Indien een instelpunt onder de dissipatie hyperbool gekozen wordt dan is het gedissipeerde vermogen kleiner dan het maximale vermogen en zal de component zonder problemen werken.

In figuur 2.18 is de hyperbool voor $P_{\max} = 300 \text{ mW}$ getekend. Boven de hyperbool is het vermogen groter dan 300 mW ; eronder is het vermogen kleiner dan 300 mW . Voor een diode geldt dat stroom en spanning niet onafhankelijk van elkaar gekozen kunnen worden, zodat er maar één punt van de dissipatie-hyperbool het maximale instelpunt aangeeft. In figuur 2.19 is dit instelpunt (werkpunt) van de diode getekend. Het maximale vermogen dat deze diode mocht dissiperen is 200 mW .

Behalve de maximale dissipatie geldt voor de diode ook dat de stroom door de diode en de spanning over de diode bepaalde maximale waarden niet mogen overschrijden. Als de stroom te groot wordt smelten de interne verbindingen, als de spanning te hoog wordt kan uiteindelijk het materiaal te veel geleiden, zodat er doorslag plaats kan vinden.

De unieke eigenschap van de diode om stroom doorlaten en sperren wordt in veel schakelingen toegepast. Zo kunnen met een diode signalen gelijkgericht worden, elektronische schakelaars in digitale schakelingen en beveiligingsschakelingen gerealiseerd worden. Schakelingen met een zenerdiode zijn geschikt om spanningen te stabiliseren.

2.7 Gelijkrichting

Een gelijkrichterschakeling moet ervoor zorgen dat een wisselspanning wordt omgezet naar een gelijkspanning. Zo'n schakeling is bijvoorbeeld ingebouwd in een netvoedingsapparaat. Het netvoedingsapparaat wordt aangesloten op het lichtnet (in Europa $230 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ wisselspanning) en levert bijvoorbeeld een 12 V gelijkspanning. Er zijn twee methodes om spanningen gelijk te richten n.l.

- enkelfasige gelijkrichting
- dubbelfasige gelijkrichting.

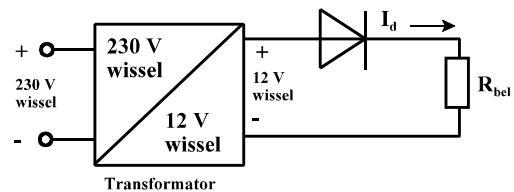


Fig. 2.20: Netvoedingsapparaat.

2.7.1 Enkelfasige gelijkrichting

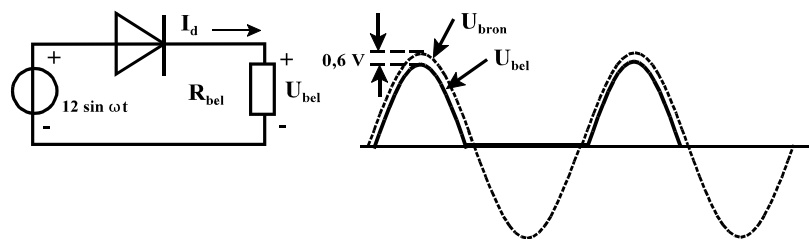


Fig 2.21: Schakeling en spanningvormen van netvoedingsapparaat.

Een enkelfasige voeding is getekend in figuur 2.21. De voeding is opgebouwd met een wisselspanningsbron van 12 V en

een diode. Aan de uitgang wordt een belastingsweerstand aangesloten. Hoe de spanning van 230 V d.m.v. een transformator naar 12 V wordt omgezet maken we ons nu niet druk om. De diode gaat pas geleiden wanneer de spanning groter wordt dan $+0,6 \text{ V}$ en sperren bij een lagere spanning dan $+0,6 \text{ V}$. De diode geleidt in de positieve helft van de spanning ($> +0,6 \text{ V}$) en spert in de negatieve helft van de spanning ($< +0,6 \text{ V}$). Het resultaat is dat door de belasting bij een positieve spanning een stroom loopt. Gedurende de tijd dat de diode spert, loopt er geen stroom door de belastingsweerstand en is derhalve is de spanning erover 0 . Hier kan nauwelijks gesproken worden van een gelijkspanning, slechts van een spanning die niet negatief wordt. In figuur 2.21 is het spanningsverloop in de tijd getekend. De stroom door de weerstand R_{bel} volgt nagenoeg de positieve spanning. Door nu een condensator C toe te passen kan dit signaal afgevlakt worden. In de positieve fase wordt de belasting van stroom voorzien én de condensator opgeladen. Als de diode nu spert, dan staat er nog spanning op de geladen condensator en kan de weerstand R_{bel} stroom halen uit de condensator. Als de condensator stroom levert zakt de condensatorspanning waardoor er dus een rimpel u_r op het uitgangssignaal ontstaat. De condensator wordt weer bijgeladen op het moment dat de diode weer in

geleiding komt. Een grote waarde voor de condensator zorgt voor een kleine rimpel u_r , een kleine belastings-weerstand zorgt voor een grote rimpelspanning. De condensator is een buffer, deze slaat lading op als diode geleidt en levert lading als de diode spert. In figuur 2.22 is het circuit en zijn de spanningsverlopen getekend. Deze schakeling wordt enkelfasig genoemd omdat eigenlijk maar één helft van de wisselspanning gebruikt wordt om de DC-spanning te maken.

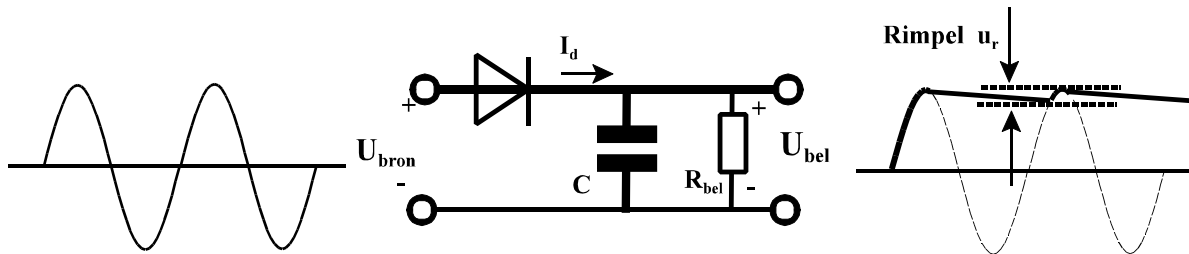


Fig. 2.22: Gelijkrichting met afvlak condensator.

2.7.2 Dubbelfasige gelijkrichting

In figuur 2.23 is het schema getekend van een schakeling waarin dubbelzijdige gelijkrichting met een zogenaamde Graetz-schakeling wordt toegepast. Gedurende de eerste halve periode van de wissel-spanning geleiden de diodes D1 en D3, gedurende de tweede halve periode de diodes D2 en D4. Hierdoor loopt de stroom in de belasting altijd in de zelfde richting. Ten opzichte van de schakeling van figuur 2.21 heeft deze schakeling het voordeel dat beide fasen van de wisselspanning benut worden waardoor een stabielere uitgangsspanning ontstaat. De extra kosten voor de diodes worden meestal ruimschoots terugverdiend, omdat met een veel kleinere afvlakcondensator kan worden volstaan. Een nadeel kan zijn dat nu twee keer een diodespanning van 0,6 V verloren gaat. In figuur 2.24 zijn de golf-vormen getekend die bij de schakeling met afvlakking horen.

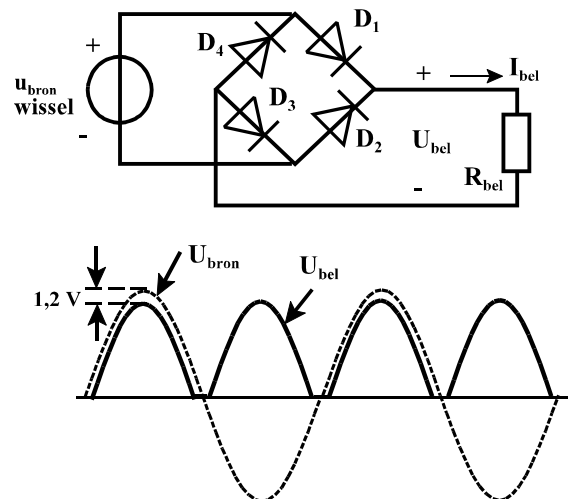


Fig. 2.23: Dubbelfasige gelijkrichting met een Graetz-schakeling.

2.7.3 Berekening rimpelspanning

Bij het ontwerp van voedingsschakelingen is het van belang te weten hoe groot de rimpelspanning op het uitgangssignaal zal zijn. De grootte van de rimpelspanning is afhankelijk van de grootte van de afvlakcondensator, de grootte van de belastingsstroom en de frequentie waarmee de condensator bijgeladen wordt. In de praktijk liggen de (maximale) grootte van de belastingsstroom en de frequentie meestal vast waaruit een waarde voor de afvlakcondensator kan worden berekend. Het verband tussen de stroom door een condensator en de spanning over en condensator wordt gegeven door de differentiaalvergelijking:

$$i_C = C \cdot \frac{du}{dt}$$

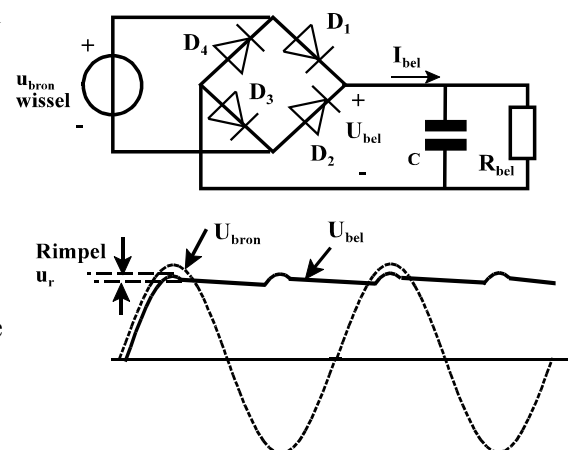


Fig. 2.24: Dubbelfasige gelijkrichting met afvlakking.

Wanneer uit gegaan wordt een condensator die relatief langzaam ontladend kan de vergelijking gelineariseerd worden tot:

$$i_c = C \cdot \frac{du}{dt} = C \cdot \frac{u_r}{\Delta t}$$

u_r = de rimpelspanning

Δt = de ontlad tijd van de condensator

Als de oplaadtijd van de condensator verwaarloosd wordt kan Δt eenvoudig berekend worden uit de frequentie van de wisselspanning. Een wisselspanning van bijvoorbeeld 50 Hz geeft bij enkelzijdige gelijkrichting een Δt van 0,02 s en bij dubbelzijdige gelijkrichting 0,01 s.

Een veel gebruikte vuistregel voor deze berekening luidt:

$$u_r = \frac{8 \cdot I}{C}$$

Hierin is u_r de rimpelspanning (in V), I de stroom waarmee de condensator ontladen wordt (de belastingsstroom, in mA) en C de waarde van de afvlakcondensator (μF). In het getal 8 zit een compensatie dat niet gedurende de hele halve periodetijd de condensator wordt ontladen. Let bij het gebruiken van deze vuistregel op het gebruik van de juiste eenheden en op het feit dat deze vuistregel alleen geldt bij een wisselspanning met een frequentie van 50 Hz en dubbelzijdige gelijkrichting!

2.8 Stabilisatie schakelingen met een zenerdiode

Een stabilisatieschakeling moet ervoor zorgen dat een variërende gelijkspanning gestabiliseerd wordt. De variatie moet onderdrukt worden terwijl de

gelijkspanning, al dan niet verzwakt, doorgegeven moet worden. In figuur 2.25 is een schakeling getekend waar het ingangsspanning een variërende spanning is, terwijl aan de uitgang een constante spanning vereist wordt.

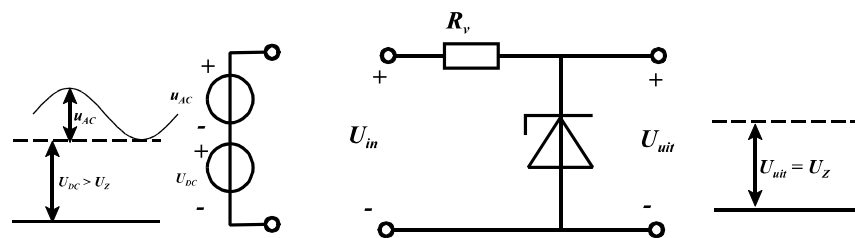


Fig. 2.25: Spanningsstabilisatie met een zenerdiode.

De variërende gelijkspanning is voor te stellen door een gelijkspanningsbron in serie met sinusvormig spanningsbron met een kleine amplitude. Voor DC-signalen is de zenerdiode een gelijkspanningsbron met een spanning U_z . Voor AC-signalen is de zener een kleine weerstand met de waarde r_{zener} (dynamische weerstand).

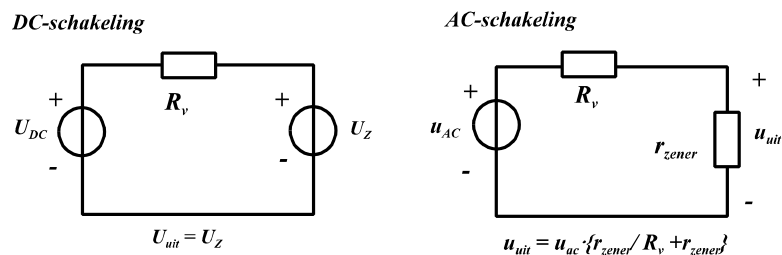


Fig. 2.26: DC- en AC- schakelingen.

De DC-spanning wordt verschoven naar het niveau van de zener-spanning, de AC-spanning wordt met een weerstandsdeling gedeeld naar een zeer kleine waarde. Aangezien beide bronnen tegelijkertijd actief zijn, wordt het uitgangssignaal gevormd door de som van beide signalen. De voorschakel weerstand R_v begrenst de stroom door het circuit. Deze mag niet te groot gekozen worden want dan loopt er een zeer kleine stroom door het circuit en werkt de zener mogelijk niet meer. Deze mag ook niet te klein gekozen worden want, dan wordt de stroom door het circuit te groot en kan de zener defect raken. Beide karakteristieke punten moeten uit de specificatie van de zenerdiode gehaald worden.

Omdat r_{zener} niet helemaal 0 is, zal er altijd een deel van de AC-spanning op de uitgang komen. De mate van verzwakking van het AC-signaal wordt weergegeven door de stabilisatiefactor S_z . In dit geval is S_z makkelijk uit te drukken in de weerstanden.

De stabilisatiefactor is dimensieloos. Een S_z van 1 wil zeggen geen stabilisatie; $S_z = 0$ wil zeggen maximale stabilisatie. Dus:

$$S_z = \frac{u_{uit}}{u_{ac}} = \frac{r_{zener}}{r_{zener} + R_v}$$

Voorbeeld

Gegeven:

De schakeling van figuur 2.27 is een voorbeeld van een schakeling waarin een variabele ingangsspanning met behulp van een zenerdiode gestabiliseerd wordt.

In deze schakeling geldt:

$$U_{in} = 15,5 \dots 22 \text{ V}, R_{bel} = 2 \text{ k}\Omega \dots 10 \text{ k}\Omega$$

$$U_z = 10 \text{ V}, I_{z,min} = 0,5 \text{ mA}, P_{max} = 150 \text{ mW}, r_{zener} = 4 \Omega$$

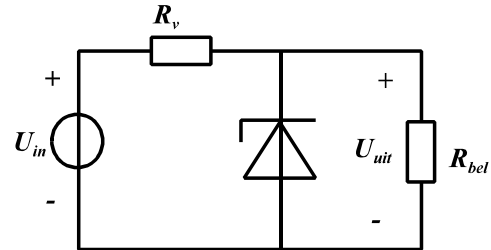


Fig. 2.27: Voorbeeld stabilisatie.

Gevraagd:

- Bepaal de minimale en de maximale waarde van de voorschakelweerstand R_v , zodanig dat de schakeling bij elke ingangsspanning en elke belasting goed werkt.
- Bepaal de verandering in de uitgangsspanning ten gevolge van de variërende ingangsspanning en als gevolg van een variërende belasting $R_v = 800 \Omega$.

Oplossing

- Voor de zenerdiode geldt een minimale instelstroom van 0,5 mA en een maximale instelstroom van :

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_z} = \frac{0,15}{10} = 15 \text{ mA}$$

De voorschakelweerstand R_v bepaalt, in combinatie met de ingangsspanning, de zenerspanning en de belastingsweerstand R_{bel} de waarde van de stroom door de zenerdiode. De zenerstroom is minimaal als de ingangsspanning minimaal is, de belasting zijn minimale waarde heeft en R_v maximaal is, dus

$$U_{in} = 15,5 \text{ V}, R_{bel} = 2 \text{ k}\Omega, I_{z,min} = 0,5 \text{ mA} \Rightarrow R_{v,max}$$

$$U_{Rv} = U_{in,min} - U_z = 15,5 - 10 = 5,5 \text{ V}$$

$$I_{Rv} = I_{z,min} + I_{bel} = 0,5 + 5 = 5,5 \text{ mA} \Rightarrow R_{v,max} = 1 \text{ k}\Omega$$

De zenerstroom is maximaal als de ingangsspanning maximaal is, de belasting zijn grootste waarde heeft en R_v minimaal is, dus

$$U_{in} = 22 \text{ V}, R_{bel} = 10 \text{ k}\Omega, I_{z,max} = 15 \text{ mA} \Rightarrow R_{v,min}$$

$$U_{Rv} = U_{in,max} - U_z = 22 - 10 = 12 \text{ V}$$

$$I_{Rv} = I_{z,max} + I_{bel} = 15 + 1 = 16 \text{ mA} \Rightarrow R_{v,min} = 750 \Omega$$

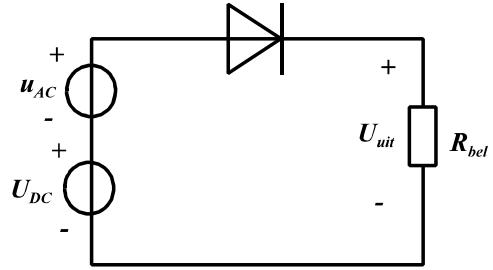
- Als de ingangsspanning varieert zal de uitgangsspanning in grote lijnen gelijk blijven. De variatie van de spanning over R_v is dus 6,5 V. De variatie in de stroom door R_v is dan 8,15 mA, dit zal ook de variatie in de zenerstroom zijn. Met een dynamische zener-weerstand r_{zener} van 4 Ω geeft dit een variatie in de zenerspanning van 32,5 mV.

Als de belasting varieert van 2 tot 10 k Ω zal de stroom door de belasting variëren van 5 tot 1 mA. Dit is gelijk aan de variatie in de zenerstroom aangezien de spanning over R_v ongeveer constant blijft. De variatie in de zenerspanning is in dit geval 16 mV ($\Delta I \cdot r_{zener}$).

2.9 Opgaven

2.9.1 Van een diode is de sperstroom $I_s = 8,4 \cdot 10^{-14}$ A. Reken de stroom door de diode uit, bij een diode spanning van 600 mV in doorlaat, en bij een diode spanning van 600 mV in sper bij kamertemperatuur.

2.9.2 In figuur OP 1 is D een ideale diode;
 $U_d = 0,6$ V, $r = 0 \Omega$, $R_{bel} = 1k\Omega$.
 U_{DC} is een gelijk-,
 u_{AC} een wisselspanningsbron.



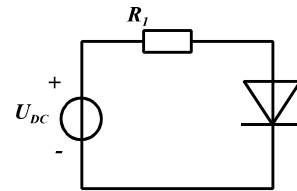
Op 1

- a. Teken $u_{it} = f(t)$ als geldt:

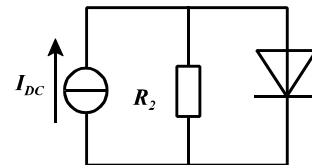
| | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------|
| $U_{DC} = -1,0$ V | $u_{AC} = 2$ Vtop-top | $f_l = 1000$ Hz |
| $U_{DC} = -0,4$ V | $u_{AC} = 2$ Vtop-top | $f_l = 1000$ Hz |
| $U_{DC} = 0,0$ V | $u_{AC} = 2$ Vtop-top | $f_l = 1000$ Hz |
| $U_{DC} = +0,6$ V | $u_{AC} = 2$ Vtop-top | $f_l = 1000$ Hz |
| $U_{DC} = +2,0$ V | $u_{AC} = 2$ Vtop-top | $f_l = 1000$ Hz |
- b. Bereken in het laatste geval de DC-stroom door de diode (niet de gemiddelde waarde).

2.9.3 Bepaal van de nevenstaande schakelingen van grafisch of via een berekening het instelpunt als we uitgaan van een diodemodel van $r = 2 \Omega$ en een drempelspanning van 0,6 V

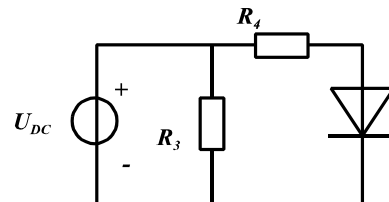
- a. $U_{DC} = 5$ V, $R_1 = 2,5$ k Ω



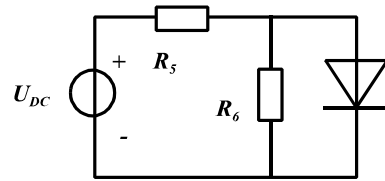
- b. $I_{DC} = 2$ mA, $R_2 = 2,5$ k Ω



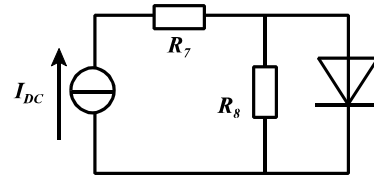
- c. $U_{DC} = 5$ V, $R_3 = 5k\Omega$, $R_4 = 2,5k\Omega$
 vergelijk deze schakeling met a) conclusie?



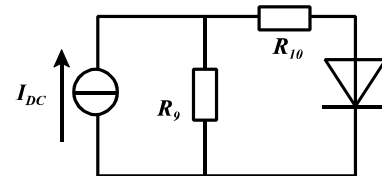
- d. $U_{DC} = 5V, R_5 = 5k\Omega, R_6 = 2,5k\Omega$



- e. $I_{DC} = 2\text{ mA}, R_7 = 5k\Omega, R_8 = 2,5k\Omega$
 vergelijk deze schakeling met b), conclusie?



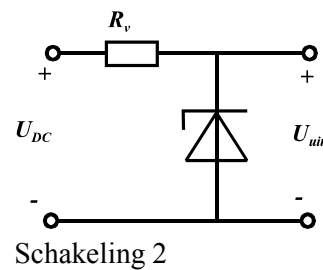
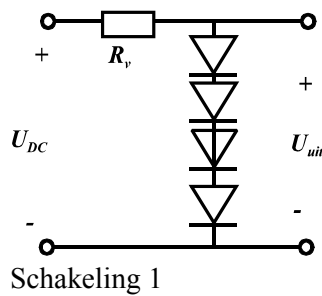
- f. $I_{DC} = 2\text{ mA}, R_9 = 5k\Omega, R_{10} = 2,5k\Omega$



2.9.4 $D1=D2=D3=D4$ zijn niet ideale dioden met een drempelspanning van $U_d = 0,6V$.

Voor de zenerdiode geldt: $U_d = 2,4\text{ V}$ en voor de zener weerstand $r_{zener} = 30\text{mA}/I_z \Omega$
 $U_{DC} = 12\text{ V}, R_v = 3k\Omega$

- Hoe groot is U_{uit} in beide gevallen?
- Bereken de dynamische weerstand van de diode en van de zener
- Wat is de definitie van de stabiliteitsfactor S_z ?
- Bereken de stabiliteitsfactor S_z voor beide schakelingen.
- Op de DC-spanning staat een rimpel van 100 mV gesuperponeerd, hoeveel van die rimpelspanning staat er respectievelijk op uitgang 1 en uitgang 2?



2.9.5 U_{DC} is een variabele DC-spanning; $24V < U_{DC} < 30V$. Voor de zener geldt: $U_z = 10\text{ Volt}, r_{zener} = 8\Omega$ en $0,5\text{ mA} < I_z < 10\text{ mA}$

- Bereken de minimale en maximale voorschakelweerstand R_v
- Hoe groot is de spanningsvariatie op U_z ten gevolge van de variatie in de ingangsspanning indien $R_v = 16\text{ k}\Omega$.

