

Hoofdstuk 3: Zenerdiodes

1: Inleiding

Schets een typische grafiek voor een in sperrichting (“reverse”) gepolariseerde Si-diode (I_R in functie van U_R).

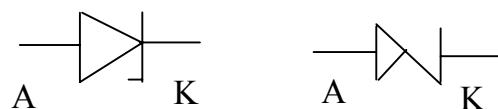
Een zenerdiode is niets anders dan een Si-diode waarbij speciaal gezorgd is voor een goed gedefinieerde en zo stabiel mogelijke doorslagspanning, een scherpe knik en een zo vertikaal mogelijk doorslaggebied. Illustreer de gewenste eigenschappen aan de hand van uw diodegrafiek.

Die goed gedefinieerde doorslagspanning kan variëren tussen 2,7 V en 100 V.

Het is dus duidelijk dat een zenerdiode speciaal bedoeld is om gebruikt te worden in haar doorslag- of zenergebied. Dit laatste uiteraard met een gecontroleerde, dus beperkte, stroom. In dat gebied is de diodespanning U_Z nagenoeg constant, ongeacht de diodestroom I_Z . Duid dit aan op de figuur. Beschouw I_Z -waarden van 10 mA tot 100 mA en veronderstel dat $U_Z = 6$ V bij $I_Z = 50$ mA. Deze eigenschap (nagenoeg constante U_Z bij nochtans veranderende I_Z) heeft zeer belangrijke toepassingen.

1.1: Voorstelling

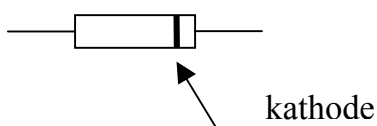
Vooraleer in Paragraaf 1.2 een belangrijke toepassing te schetsen vermelden we eerst de schematische voorstelling van een dergelijke zenerdiode. Zoals op Figuur 3.1 te zien is, zijn er hierbij twee mogelijkheden.



Figuur 3.1: Voorstelling zenerdiodes

De zenerdiode is bedoeld om in gesperde toestand gebruikt te worden. De zenerspanning U_Z is dan ook de spanning U_{KA} (dus $U_Z = U_{KA} = -U_{AK}$). De zenerstroom $I_Z = I_{KA} = -I_{AK}$. Aangezien U_{AK} en I_{AK} bij normale werking van de zenerdiode negatief zijn, zijn U_Z en I_Z positief.

Net zoals bij gewone diodes is de kathode op de behuizing van de zenerdiode te herkennen:



Figuur 3.2: Zenerdiode

1.2: De zenerdiode als spanningsstabilisator

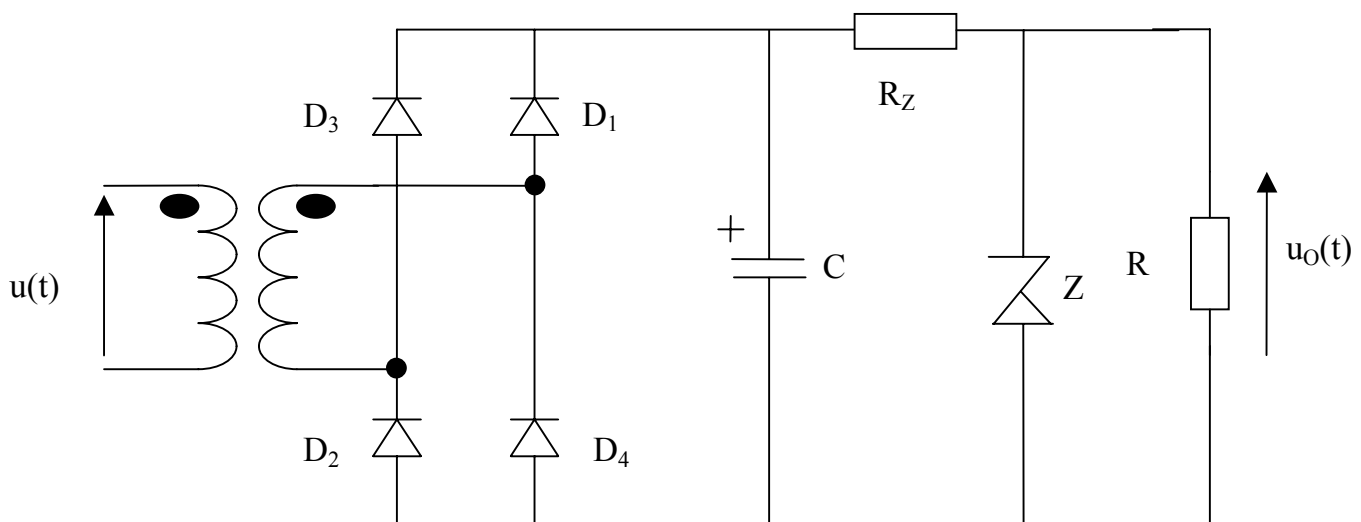
Beschouw de dubbelzijdige bruggelijkrichter met afvlakcondensator C en belastingsweerstand R . Dit is de schakeling weergegeven in Figuur 2.15 en Figuur 2.16 (Hoofdstuk 2) met een extra afvlakcondensator.

De uitgangsspanning van een dergelijke schakeling bevat een rimpel ten gevolge van het ontladen van de afvlakcondensator. Bovendien zijn er nog extra spanningsvariaties ten gevolge van netspanningsvariaties (in de praktijk kunnen die oplopen tot 10 %) en/of eventuele belastingsvariaties.

De in het schema getekende belastingsweerstand R is bijvoorbeeld de geluids-eindversterker van een radio. Ten gevolge van de spanningsvariaties neemt deze steeds een variërende stroom op. In vele praktische schakelingen is een veel constantere gelijkspanning vereist. In dergelijke gevallen kan een "stabilisatieschakeling" met zenerdiodes een oplossing bieden. Dit is geïllustreerd in de onderstaande Figuur 3.3.

De schakeling van Figuur 3.3 vertrekt van Figuur 2.15 of Figuur 2.16 uit Hoofdstuk 2 en wordt extra aangevuld met behulp van een weerstand R_Z en een zenerdiode Z . Dank zij de plaatsing van de zenerdiode is de uitgangsspanning $u_o(t)$ veel mooier constant.

Indien de spanning over de afvlakcondensator C varieert, zal de stroom door de zenerdiode I_Z mee variëren. Dit betekent echter niet dat $u_o(t)$ mee zal variëren. De spanning $u_o(t)$ zal nagenoeg constant blijven. Dus voor alle t geldt dat $u_o(t) \cong U_O$. Verklaar dit m.b.v. de karakteristiek van de zenerdiode.



Figuur 3.3: Spanningsstabilisatie m.b.v. zenerdiode Z

Is de weerstand R_Z echt noodzakelijk? Mag men de zenerdiode Z onmiddellijk parallel met de condensator C verbinden?

1.3: De noodzaak van een constante gelijkspanning bij AM-ontvangst

Is de spanning $u_C(t)$ (de spanning over de afvlakcondensator) geschikt als afstemspanning voor een radio met varicap-afstemming? Is de uitgangsspanning $u_o(t) \cong U_o$ geschikt als afstemspanning voor een radio of TV met varicap-afstemming?

Het is nodig de mooi constante uitgangsspanning U_o te gebruiken en niet de spanning $u_C(t)$.

Inderdaad, stel dat u een AM-zender die uitzendt met een draaggolf van 1000 kHz wilt ontvangen en beluisteren. Uw ontvangstantenne ontvangt meerdere zenders en u wilt enkel die ene zender beluisteren. Die ene gewenste zender selecteert u uit die andere zenders met behulp van een parallel RLC-kring die afgestemd is op de frequentie van de draaggolf (namelijk 1000 kHz).

Dit afstemmen van de RLC-kring gebeurt door een regelbare condensator in de RLC-kring de gepaste waarde mee te geven. Die regelbare condensator kan een luchtcondensator zijn wiens waarde u wijzigt door de elektrodes ten opzichte van elkaar te verdraaien. Die capaciteit kan echter ook (in moderne schakelingen zelfs meestal of altijd) een varicap diode zijn. De werking van de varicap diode is uitgelegd in Paragraaf 3 van het vierde hoofdstuk.

Een varicap diode, welke in sper gepolariseerd is, gedraagt zich als een capaciteit wiens waarde afhankelijk is van de aangelegde spanning. Nu is het niet enkel van belang dat die varicap diode voor de gewenste capaciteitswaarde zorgt. De capaciteitswaarde moet ook voldoende constant zijn. Die voldoende constante capaciteitswaarde wordt bekomen door aan de varicap diode een voldoende constante spanning aan te leggen. De spanning $u_C(t)$ is dus zeker niet geschikt.

Dat de spanning echt slechts heel weinig mag variëren, volgt uit de vaststelling dat de capaciteitswaarde en dus de afstemfrequentie van de RLC-keten slechts erg weinig mag variëren.

Stel dat het te beluisteren AM-gemoduleerd signaal met een draaggolf van 1000 kHz een bandbreedte heeft van 9 kHz. Indien de afstemfrequentie slechts 0,9 % (dit betekent 9 kHz / 1000 kHz) afwijkt, is de ontvanger volledig naast het te ontvangen kanaal afgestemd.

1.4: De noodzaak van een constante gelijkspanning

Nu zijn er in de techniek nog meer toepassingen waar een mooi constante gelijkspanning absoluut vereist is. Denk bijvoorbeeld aan de referentiespanning voor

een A/D-converter in een digitale voltmeter. Denk bijvoorbeeld aan de voedingsspanning voor een gevoelige microfoonversterker.

2: Werkingsprincipe en eigenschappen

In de voorgaande paragrafen hebben we ruw uitgelegd wat het nut is van een zenerdiode en wat zijn voornaamste eigenschappen zijn. Vooraleer de werking van Figuur 3.3 in detail te bespreken, gaan we eerst iets dieper in op de interne werking van de zenerdiode.

Iedere diode zal bij het aanleggen van een bepaalde sperspanning doorslaan. Op dat moment wordt de veldsterkte over de junctie zodanig groot dat elektronen uit hun covalente bindingen worden losgerukt. Dit losrukken van de elektronen heeft tot gevolg dat de geleiding flink groter wordt. Dit is het zogenaamde “zenereffect”.

De veldsterkte die nodig is om dit effect te bereiken is ongeveer 200 kV/cm. Bij “gewone” diodes wordt die veldsterkte pas bereikt indien een hoge inverse spanning van bijvoorbeeld 500 V of 1000 V aangelegd is.

Indien we er voor zorgen dat dit verschijnsel bij veel lagere spanningen optreedt, dan kan het doorslaggebied van de diode wel een praktische rol spelen in elektronische schakelingen.

Het verlagen van de inverse doorslagspanning is geen groot probleem. Slagen we er in de sperzone te versmallen, dan zal vlugger de maximale veldsterktegradiënt bereikt worden. Dit versmallen bekommen we door bijvoorbeeld de halfgeleiders meer dan normaal te verontreinigen. Aldus kan men doorslagspanningen creëren vanaf ongeveer 3 V tot 220 V.

Diodes die op die manier “aangepast” werden om in hun doorslaggebied te kunnen werken krijgen algemeen de naam van zenerdiodes.

2.1: Zener- en lawine-effecten

Zenerdiodes kunnen meestal in twee categorieën opgesplitst worden. De verschillen tussen beide bespreken we in de huidige paragraaf.

Vooreerst is er het reeds eerder besproken zenereffect. Dit zenereffect is dominant als de zenerspanning U_Z kleiner dan 5 V is. Onder zenereffect verstaan we het verbreken van de covalente bindingen omwille van het aanbrengen van een te grote potentiaal over de sperzone (zie hierboven).

Bij het overschrijden van deze potentiaal worden er elektronen losgerukt en kunnen deze dus aan de geleiding deelnemen. Diodes met een doorslagspanning tot ongeveer 5,6 V ondervinden hoofdzakelijk dit zenereffect.

Bedenk dat er bij hogere junctietemperatuur meer vrije ladingsdragers aanwezig zijn. De diode zal dus bij een lagere sperspanning al doorslaan. Dit betekent dan ook dat een dergelijke diode een negatieve temperatuurscoëfficiënt heeft. Op de temperatuursinvloeden wordt dieper ingegaan in Paragraaf 2.5.

Ten tweede is er ook het lawine-effect. Bij zenerdiodes die een doorslagspanning hebben die groter is dan 6 V, treedt natuurlijk ook het zenereffect op. Doch daarnaast komt er een bijkomend verschijnsel meespelen, namelijk het lawine-effect.

Wanneer er elektronen vrijkomen worden zij zodanig versneld naar de positieve spanningsklem, dat ze bij botsing met andere atomen extra elektronen vrijmaken. Deze laatste op hun beurt versnellen ook, botsen, maken extra elektronen vrij enz... Er ontstaat een lawine van vrije elektronen.

Het resultaat van dit lawine-effect is dat de doorslagknik veel scherper wordt. Trouwens, precies omdat een scherpe doorslagknik gewenst is, zijn zenerdiodes uit Silicium vervaardigd en niet uit Germanium.

Tevens hebben dergelijke diodes een positieve temperatuurscoëfficiënt. Immers, de vrije weglengte alvorens de elektronen botsen wordt kleiner bij stijgende temperatuur. De kinetische energie van deze elektronen is dus kleiner bij een botsing, en er worden bijgevolg minder elektronen vrijgemaakt. Om een zelfde aantal elektronen te kunnen losrukken moet er een hogere spanning aangelegd worden. Deze diodes vertonen dus een positieve temperatuurscoëfficiënt. Op de temperatuursinvloeden wordt dieper ingegaan in Paragraaf 2.5.

2.2: Karakteristieken

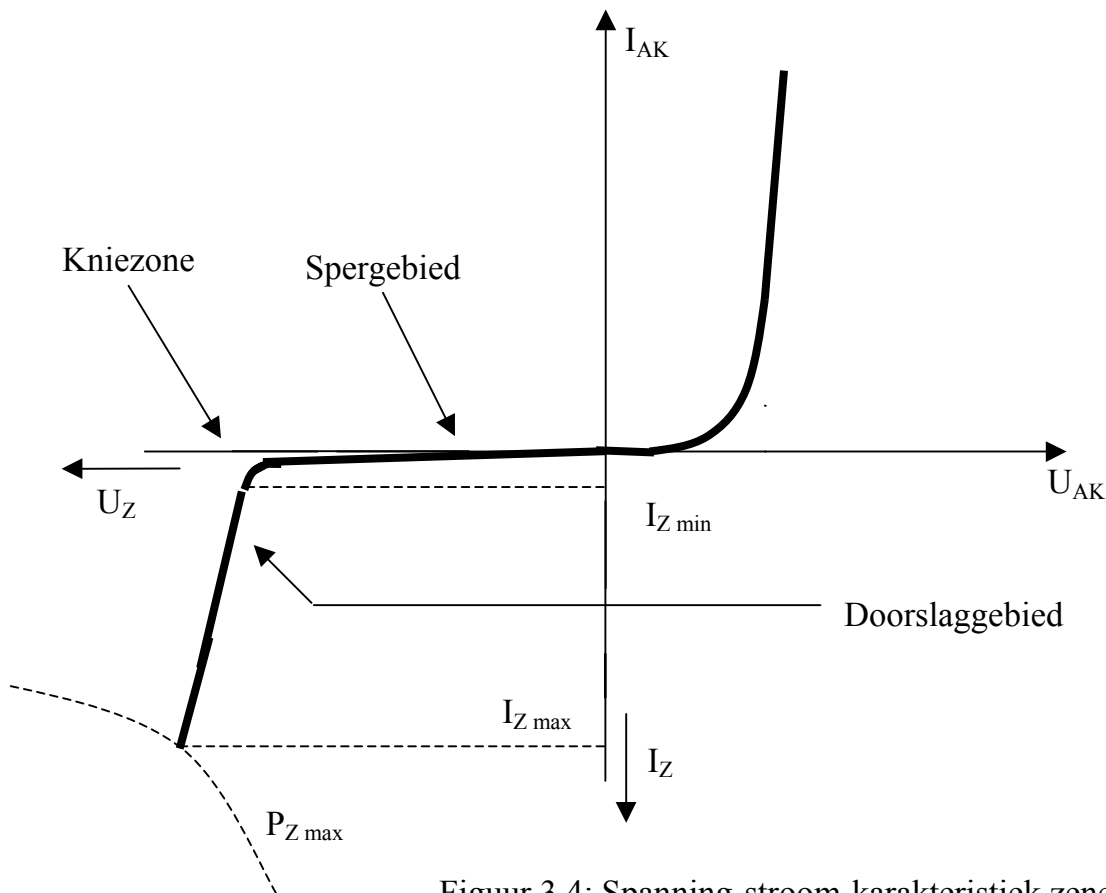
Polariseren we de zenerdiode in voorwaartse zin, dan bekomen we een normale diodekarakteristiek in doorlaatrichting.

In sperszin gepolariseerd, bekomen we de typische zenerkarakteristiek, met hoofdzakelijk drie gebieden:

- het spergebied (zenereffect treedt nog niet op), wel is er al een kleine sperstroom
- de kniezone, het verbreken van de covalente bindingen neemt een aanvang
- het doorslaggebied, hier is het zener- of lawine-effect reeds volop aan de gang

Een zenerdiode wordt meestal in zijn inverse richting gebruikt. Om er met positieve getalwaarden te kunnen werken, veranderen we soms de assen van zin. We spreken dan van I_Z en U_Z zoals aangegeven is in de inleiding en op Figuur 3.4.

Globaal kunnen we van een zenerdiode de volgende karakteristiek verwachten:



Figuur 3.4: Spanning-stroom-karakteristiek zenerdiode

2.3: Praktische eigenschappen

In het doorslaggebied moet er steeds over gewaakt worden dat het maximale vermogen $P_{Z\ max}$ waarvoor de zener ontworpen werd, niet overschreden wordt. De hyperbool van $P_{Z\ max}$ welke we aangeduid hebben op Figuur 3.4 mag dus niet overschreden worden want anders loopt de temperatuur van de zenerdiode te hoog op. Een eventuele kortstondige overschrijding van die hyperbool is wel toegelaten. Hiervoor verwijzen we echter naar de gedetailleerde gegevens door de fabrikanten zelf verstrekt in hun datasheets.

Zoals op Figuur 3.4 te zien is, legt het snijpunt van de $P_{Z\ max}$ -hyperbool en de diodekarakteristiek de maximale stroom $I_{Z\ max}$ vast.

De stroom $I_{Z\ min}$ is de minimale stroom die door de diode moet vloeien om volledig in het doorslaggebied te kunnen vertoeven. $I_{Z\ min}$ is ongeveer een tiende van $I_{Z\ max}$.

Zenerdiodes worden opgebouwd in reeksen. Zo hebt u bijvoorbeeld de 500 mW-reeks BZX79. De datasheets (van de fabrikant General Semiconductor) van de reeks BZX79

zijn te vinden achteraan de cursus. Deze reeks bevat diodes met zenerspanningen tussen 2,4 V en 75 V.

Een zenerdiode uit deze reeks is bijvoorbeeld de BZX79-C5V6. Deze zenerdiode heeft een nominale zenerspanning van 5,6 V. Deze zenerspanning heeft een tolerantie van ongeveer 5 %. Dit is weergegeven via de letter C in de naam BZX79-C5V6.

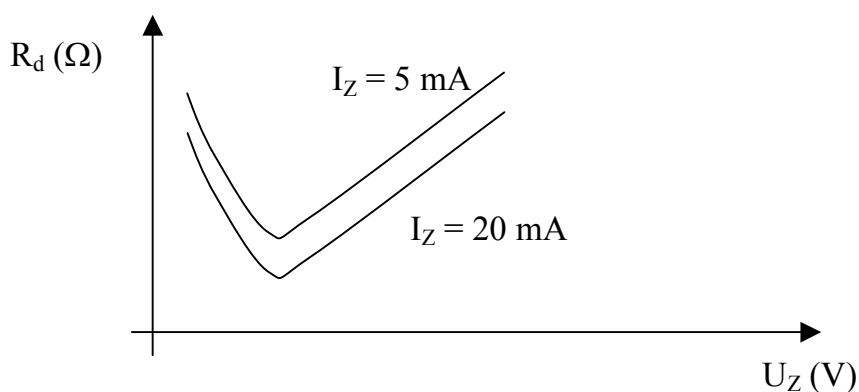
De BZX79 reeks is uiteraard niet de enige reeks, ook de reeksen BZX55 en BZX84 zijn populair en kunnen bij verschillende fabrikanten aangekocht worden. Vroeger was de reeks BZY88 erg populair, doch deze is nu verouderd.

2.4: De dynamische weerstand

De dynamische weerstand van een halfgeleiderelement hebben we eerder gedefinieerd als $R_d = \Delta U / \Delta I$. Bij een zenerdiode in het zenergebied is $R_d = \Delta U_Z / \Delta I_Z$. Het is wel zo dat zowel ΔU_Z als ΔI_Z erg klein zijn. Eigenlijk zijn ΔU_Z en ΔI_Z infinitesimaal klein zodat $R_d = dU_Z / dI_Z$.

De dynamische weerstanden van een zenerdiode worden opgegeven door de fabrikant in datasheets, maar algemeen hebben de curven de vorm voorgesteld in Figuur 3.5.

Zoals weergegeven is in Figuur 3.5 is de dynamische weerstand lager (wat goed is) indien de zenerstroom I_Z groter is. Zo is het bijvoorbeeld realistisch bij een $U_Z = 7$ V een $R_d = 4 \Omega$ te hebben wanneer $I_Z = 5$ mA. Bij een zelfde spanning is R_d bijvoorbeeld al 1Ω wanneer $I_Z = 20$ mA.



Figuur 3.5: De dynamische weerstand van een zenerdiode

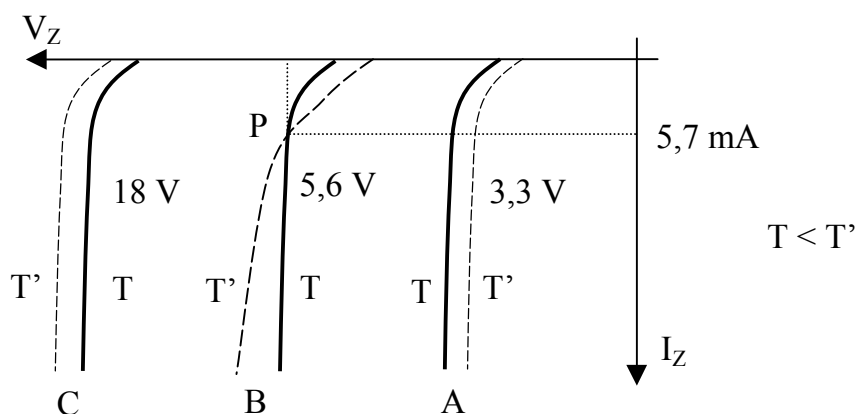
Zoals op de bovenstaande Figuur 3.5 te zien is, is de dynamische weerstand eveneens afhankelijk van de zenerspanning U_Z . Bij zenerdiodes van ongeveer 7 V is de dynamische weerstand het kleinst. Deze zenerdiodes zullen dan ook de beste resultaten geven in stabilisatieschakelingen.

2.5: Temperatuursinvloed op de zenerspanningen

In deze paragraaf onderzoeken we het gedrag van de karakteristieken van de zenerdiodes bij een veranderende temperatuur. In Paragraaf 2.1 zagen we dat zenerdiodes met een lage zenerspanning (kleiner dan 5,6 V) duidelijk een negatieve temperatuurscoëfficiënt hebben. We zagen ook reeds dat zenerdiodes met een hoge zenerspanning (groter dan 6 V) een positieve temperatuurscoëfficiënt hebben.

Er zijn echter ook diodes die een zeer kleine temperatuurscoëfficiënt hebben. Dit zijn diodes waarbij het zenereffect met zijn negatieve temperatuurscoëfficiënt de positieve temperatuurscoëfficiënt van het beginnend lawine-effect neutraliseert.

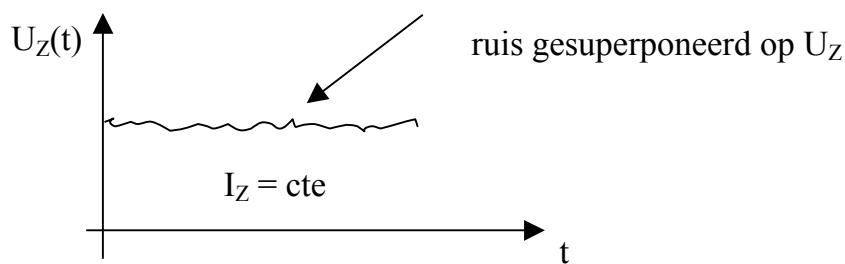
Op de onderstaande Figuur 3.6 zijn een aantal diodekarakteristieken getekend. De karakteristieken in volle lijn zijn geldig bij een temperatuur T . De karakteristieken in streeplijn zijn geldig bij een temperatuur $T' > T$. De karakteristieken A hebben een negatieve temperatuurscoëfficiënt. De karakteristieken C hebben een positieve temperatuurscoëfficiënt. Bij de karakteristieken B is er een werkingspunt waar de temperatuurscoëfficiënt werkelijk nul is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een zenerdiode met een nominale zenerspanning $U_Z = 5,6 \text{ V}$ indien de zenerstroom $I_Z = 5,7 \text{ mA}$ is (werkpunt P).



Figuur 3.6: Temperatuursafhankelijkheid van zenerdiodes

2.6: Ruis

We vermelden in deze paragraaf een korte opmerking in verband met ruis. De zenerdiodekarakteristieken hebben een kniegebied waar het zener-effect en het lawine-effect op gang komen. Dit op gang komen van het zener-effect of lawine-effect veroorzaakt ruis. Onder meer omwille van deze reden zal men meestal vermijden dat de zenerdiode in een werkingspunt in dit kniegebied ingesteld is. Wanneer de diode toch in een dergelijk kniegebied ingesteld is, zal men de aanwezige ruis sterk reduceren door een capaciteit van $0,1 \mu\text{F}$ parallel met de zenerdiode te schakelen.



Figuur 3.7: Ruis aanwezig in het kniegebied

2.7: Zenerdiodespecificaties

Net zoals we in Paragraaf 3.4 van Hoofdstuk 1 een aantal diodespecificaties opgesomd hebben in verband met “gewone” diodes, zullen we hier een aantal specificaties opsommen die betrekking hebben op zenerdiodes.

Vooreerst is er uiteraard de zenerspanning U_Z met de bijhorende tolerantie. Doch naast die zenerspanning zijn er ook nog een aantal stroomspecificaties:

I_Z : De maximaal toegelaten gemiddelde zenerstroom.

I_{ZRM} : De maximaal toegelaten herhalende piekwaarde van de zenerstroom.

I_F : De maximaal toegelaten voorwaartse stroom.

I_{FRM} : De maximaal toegelaten herhalende voorwaartse piekstroom.

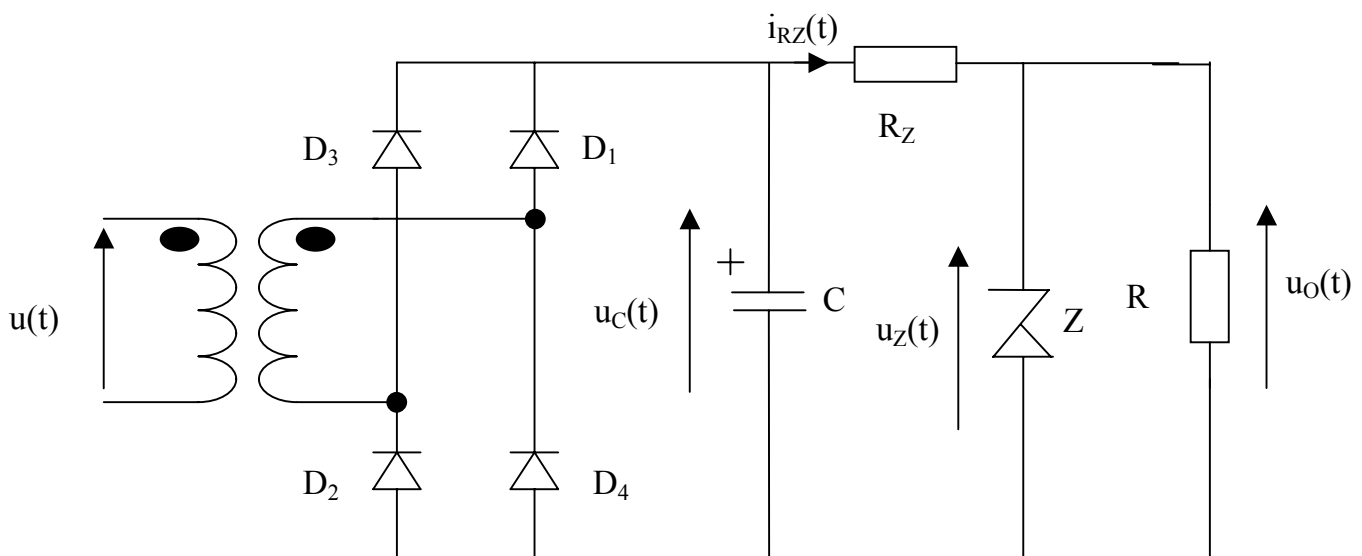
Indien u datasheets bestudeert, zult u bijvoorbeeld zien dat $I_Z < I_F$. Dit komt omdat de zenerdiode slechts een beperkt vermogen kan dissiperen. Indien de diode zenert is de zenerspanning (qua absolute waarde) groter dan de spanning welke over een geleidende diode staat. Dus een relatief hoge zenerspanning laat slechts een relatief lage zenerstroom toe. Omgekeerd laat een relatief lage spanning over een voorwaarts gepolariseerde diode een relatief grote voorwaartse stroom toe.

Er zijn bij een zenerdiode dus ook limieten opgelegd wat betreft het toegelaten gedissipeerd vermogen. Zo is er:

P_{tot} : Maximaal toegelaten dissipatie bij een maximale omgevingstemperatuur van bijvoorbeeld 50 °C.

P_{ZSM} : Maximaal toegelaten niet-herhalende piekwaarde van de dissipatie. Deze waarde is afhankelijk van de omgevingstemperatuur (en van de junctietemperatuur die u wilt toelaten) en de tijdsduur.

3: Praktische werking van een spanningsstabilisatieschakeling

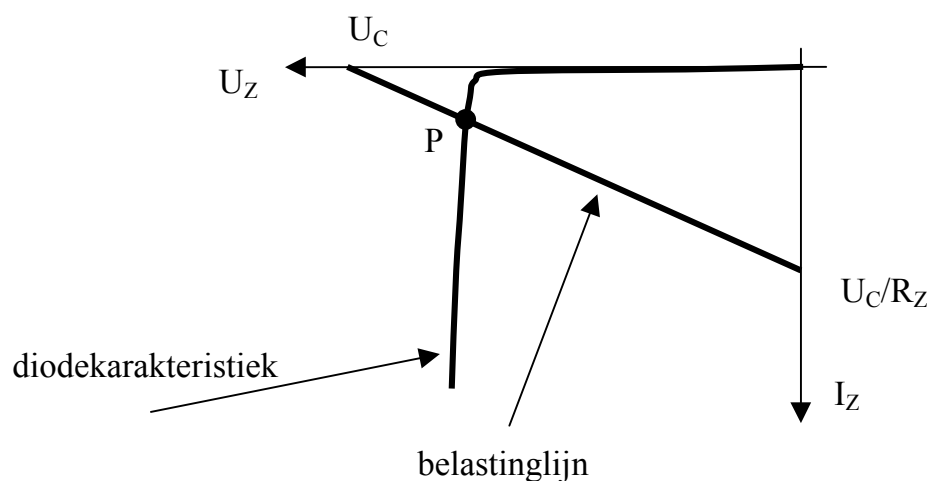


Figuur 3.8: Spanningsstabilisatie m.b.v. zenerdiode Z

Zoals kort uitgelegd in Paragraaf 1.2 heeft de schakeling van Figuur 3.8 als doelstelling er voor te zorgen dat de spanningsrimpel in de DC-spanning $u_O(t) = u_Z(t)$ kleiner is dan de rimpel in de DC-spanning $u_C(t)$.

Steunende op de spanningswet van Kirchoff weten we dat $u_C(t) = R_Z i_{RZ}(t) + u_Z(t)$. Deze uitdrukking laat ons toe om in Figuur 3.9 de belastingsweerstand te tekenen.

Als we er eenvoudigheidshalve van uit gaan dat de voeding onbelast is, dus dat de belastingsweerstand R oneindig groot is, dan is de stroom door de zenerdiode $i_Z(t)$ gelijk aan de stroom $i_{RZ}(t)$ door de weerstand R_Z .



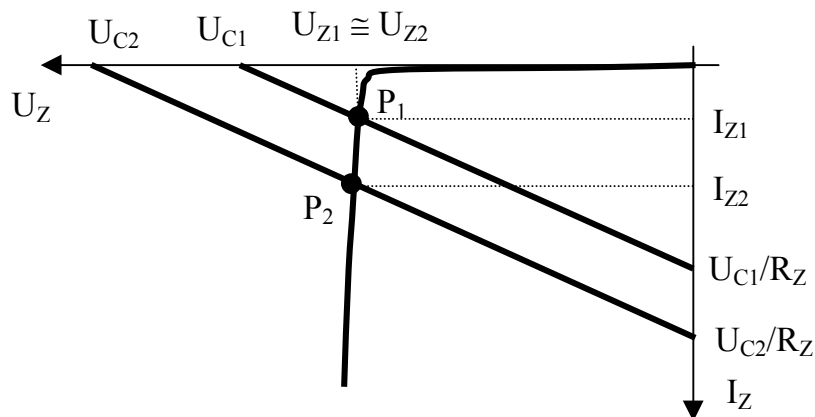
Figuur 3.9: Bepalen werkingpunt zenerdiode

Op de bovenstaande figuur vinden we eerst en vooral de diodekarakteristiek terug en verder ook de belastingslijn. De belastingslijn is een rechte die de I_Z -as snijdt in het punt U_C/R_Z . De belastingslijn snijdt de U_Z -as in het punt U_C . Deze belastingslijn is dus afhankelijk van R_Z en van U_C . Indien U_C wijzigt schuift de belastingslijn evenwijdig op. Hoe groter U_C is, hoe verder de belastingslijn verwijderd is van de oorsprong. Indien R_Z wijzigt, verandert de helling van de belastingslijn.

Ga zelf na hoe de belastingslijn wijzigt als R_Z stijgt. Hoe wijzigt de belastingslijn als R_Z daalt?

Het snijpunt van de diodekarakteristiek en de belastingslijn bepaalt het werkingpunt van de zenerdiode. Dit werkingpunt P geeft dus weer wat de diodestroom I_Z en de diodespanning U_Z is. Indien U_C of R_Z wijzigt, wijzigt de belastingslijn en dus ook het werkingpunt P.

Figuur 3.10 geeft weer op welke manier het werkingpunt wijzigt indien U_C de waarden U_{C1} en U_{C2} aanneemt. Hierbij gaan we er van uit dat $U_{C1} < U_{C2}$. Omwille van de steilheid van de zenerdiodekarakteristiek (kleine dynamische weerstand) wijzigt de diodespanning bijna niet. De diodestroom wijzigt van de waarde I_{Z1} naar de waarde I_{Z2} waarbij $I_{Z1} < I_{Z2}$.



Figuur 3.10: Wijzigen werkingpunt zenerdiode

Het tijdsafhankelijk zijn van de condensatorspanning $u_C(t)$ zorgt er voor dat de belastingslijn verandert in functie van de tijd. Dit betekent dat het werkingpunt P zich wijzigt in functie van de tijd. Het is echter wel zo dat de zenerspanning die overeenstemt met dit werkingpunt nauwelijks wijzigt. De spanning $u_Z(t) = u_O(t)$ wijzigt dus weinig wat betekent dat de uitgangsspanning effectief erg stabiel is.

De spanningsvariaties op u_Z zijn enkel klein indien de belastingslijn ogenblikkelijk steeds lager ligt dan de kniezone (en het spergebied). Dit betekent dat het werkingpunt ogenblikkelijk steeds in het doorslaggebied van de zenerdiode gelegen

moet zijn. De stroom door de zenerdiode mag met andere woorden nooit te klein worden. Dit vereist enerzijds dat $u_C(t)$ steeds voldoende groot is en anderzijds dat R_Z voldoende klein is.

Er moet ook op gelet worden dat $u_C(t)$ niet te groot wordt en dat de bijhorende R_Z niet te klein is want dan is de stroom door de zenerdiode te groot. Dit betekent niet enkel energieverlies want het kan ook tot oververhitting en dus beschadiging van de zenerdiode leiden.

4: Geleide oefeningen

4.1: Geleide oefening 1

Gegeven:

Met behulp van de schakeling van Figuur 3.8 willen we een constante uitgangsspanning van 6,8 V bekomen. De belastingsweerstand heeft een waarde van 2,2 k Ω . Er is een gelijkrichterbrug met afvlakcondensator beschikbaar die een spanning $u_C(t)$ genereert waarvan we schatten dat de spanning varieert tussen $U_{C,min} = 10$ V en $U_{C,max} = 13$ V.

Gevraagd:

Bepaal de zenerdiode en de grootte van de weerstand R_Z .

Oplossing:

Kies een zenerdiode met een zenerspanning $U_Z = 6,8$ V. Indien de zenerdiode een maximaal vermogen $P_{Z,max} = U_Z I_{Z,max} = 0,25$ W heeft, dan stemt daar dus een $I_{Z,max} = 36,8$ mA mee overeen. Teneinde steeds werkingpunten in het doorslaggebied van de zenerdiode te hebben, eisen we dat de diodestroom minstens $I_{Z,min} \cong I_{Z,max}/10$ is. In ons geval stellen we een $I_{Z,min} = 4$ mA voorop.

Bij een normale werking is de stroom door de belastingsweerstand $R = 2,2$ k Ω gelijk aan $I_L = 6,8$ V/2,2 k $\Omega = 3,1$ mA.

De stroom door de weerstand R_Z moet minstens $I_{Z,min} + I_L = 7,1$ mA zijn. De stroom door R_Z is minimaal op het ogenblik dat $u_C(t) = 10$ V. Dit betekent dat de waarde van $R_Z < (10$ V – 6,8 V)/7,1 mA = 450 Ω moet zijn. Een verantwoorde keuze is een $R_Z = 390$ Ω (eventueel ook nog net 470 Ω).

Met de keuze van $R_Z = 390$ Ω is de stroom door R_Z maximaal $(u_{C,max} - U_Z)/R_Z$. Die maximale stroom van 15,9 mA levert een belastingsstroom van 3,1 mA en een diodestroom van 12,8 mA. Ook deze zenerdiodestroom is aanvaardbaar.

4.2: Geleide oefening 2

Gegeven:

Een gelijkrichterschakeling (transformator, bruggelijkrichter en afvlakcondensator C) voedt de audio-eindversterker van een radio en produceert een DC-spanning (de spanning $u_C(t)$ over de condensator) tussen 10 V en 14 V. De rimpel bedraagt $1V_{pp}$ (dus 1 V piek tot piek). Andere schakelingen in het toestel vereisen een gestabiliseerde voeding van 5,6 V. Daartoe beschikken we over een 0,4 W zenerdiode met een r_d die nooit groter wordt dan $2\ \Omega$. Dit laatste weliswaar met de voorwaarde dat I_Z altijd minstens 10 % van I_{Zmax} bedraagt.

Gevraagd:

- 1) Schets de opstelling (schema) en stel de zenerdiode zodanig in dat de uitgangsspanning $u_O(t) \cong U_O$ (de 5,6 V spanning) maximaal belast mag worden. Bepaal de maximale uitgangsstroom.
- 2) Bepaal de maximale spanningsvariatie aan de uitgang (ΔU_O), de stabilisatiefactor S en de maximale rimpel op $u_O(t)$. Dit laatste indien de uitgang niet belast is. Welk besluit trek je hieruit?
- 3) Welke wijzigingen zou u aanbrengen als $u_O(t)$ tot 75 mA moet kunnen leveren? En welke wijzigingen als er zelfs 1 A geleverd moet kunnen worden? (In dit laatste geval zal men bijna zeker een transistorschakeling gebruiken in de plaats van een zenerdiode met zeer groot vermogen.)

Oplossing:

We laten het over aan de studenten zelf om deze tweede oefening op te lossen. Wel schetsen we hieronder de oplossingsmethode.

- 1) De opstelling is feitelijk de opstelling van Figuur 3.8. Er wordt een zenerdiode van 5,6 V gebruikt. De zenerdiode kan 0,4 W dissiperen zodat de maximaal toelaatbare zenerdiodestroom berekend kan worden. Meteen kent men ook de minimale stroom welke de diode nodig heeft om te blijven zeneren. De minimale R_Z kan bepaald worden door te eisen dat er in het geval van een belastingsweerstand $R = \infty$ en een $U_C = 14\text{ V}$ niet te veel vermogen in de zenerdiode gedissipeerd wordt. Neem als R_Z uiteraard een weerstand uit de E12-reeks. De maximale uitgangsstroom (en dus de minimale R) laat nog net voldoende stroom door de zenerdiode vloeien zodat deze blijft zeneren. Dit kritieke punt, waarbij de zenerdiode net nog blijft zeneren, wordt het eerst bekomen op het ogenblik dat $U_C = 10\text{ V}$.

- 2) Indien er een rimpel van $1 V_{pp}$ aanwezig is op de condensatorspanning, dan is er een rimpel van $1 V_{pp}$ op de spanning over R_Z . We veronderstellen namelijk in eerste instantie dat de zenerspanning een constante is. De spanningsvariatie over R_Z impliceert een stroomvariatie door R_Z . Aangezien de zenerspanning nagenoeg constant is, is ook de belastingsstroom nagenoeg constant. De variatie ΔI_Z van de zenerdiodesroom is bijgevolg gelijk aan de stroomvariatie door R_Z . Aangezien $r_d = \Delta U_Z / \Delta I_Z$, kan ΔU_Z berekend worden. De stabilisatiefactor $S = \Delta U_C / \Delta U_Z$. Deze stabilisatiefactor S is flink groter dan de eenheid. De spanningsrimpel aan de uitgang is dan ook flink kleiner dan de spanningsrimpel over de condensator.
- 3) Wanneer een grotere belastingsstroom gewenst is, kan er een zenerdiode gebruikt worden die meer vermogen kan dissiperen. Ga na hoeveel vermogen de zenerdiode moet kunnen dissiperen opdat een stroom van 75 mA door de belastingsweerstand haalbaar zou zijn. Indien een stroom van bijvoorbeeld 1 A door de belastingsweerstand nodig is, dan kan het nuttig zijn om na de zenerdiode een bipolaire transistor in GCS te schakelen. Hiervoor verwijzen we echter naar de uitleg gegeven in Hoofdstuk 8 en in Hoofdstuk 9. Inderdaad, de transistor in GCS zorgt voor een voldoende grote stroomversterking zodat de 1 A door de belastingsweerstand R kan vloeien. Dit zonder dat de mogelijkheid in rekening gebracht moet worden dat er 1 A door de zenerdiode kan vloeien indien de belastingsweerstand weggenomen wordt. Zoek zelf (bijvoorbeeld via het internet) de datasheets op van de transistoren met typenummers BC547, BD135 en TIP3055. Is het mogelijk te werken met één van die drie types? Ga van elk type na waarom hij wel of niet bruikbaar is.

5: Speciale zenerdiodes

We besluiten dit hoofdstuk in verband met zenerdiodes met de beschrijving van twee speciale types zenerdiodes. Eerst bespreken we de BGSR en daarna de transorb.

5.1: De BGSR

Een “bandgap-spanningsreferentie” (BGSR) is een elektronische schakeling die zich gedraagt als een zenerdiode met een zeer lage lekstroom, een zeer scherp geknikte grafiek (I_Z als functie van U_Z), een zeer geringe r_d (bijvoorbeeld kleiner dan $0,25 \Omega$) en een zeer geringe temperatuurscoëfficiënt (bijvoorbeeld kleiner dan $20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$).

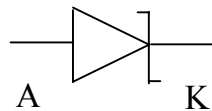
Meer uitleg over de interne bouw en de interne werking van de BGSR vindt u onder meer in het boek ‘Design with operational amplifiers and analog integrated circuits’ van S. Franco.

De BGSR is dus te beschouwen als een soort “super”-zenerdiode. De elektronische schakeling is volledig ingebouwd in een minuscule, hermetisch gesloten behuizing. Ze

heeft slechts twee externe aansluitdraadjes, die volledig overeenstemmen met de anode en de kathode van een zenerdiode.

Qua toepassingen en qua berekeningen is alles hetzelfde als bij een klassieke zenerdiode. Wel zal de uitgangsspanning stabielere zijn (en de eventuele rimpel beter onderdrukt) dan bij een gewone zenerdiode.

De symbolische voorstelling van een BGSR is als volgt:



Figuur 3.11: De bandgap-spanningsreferentie

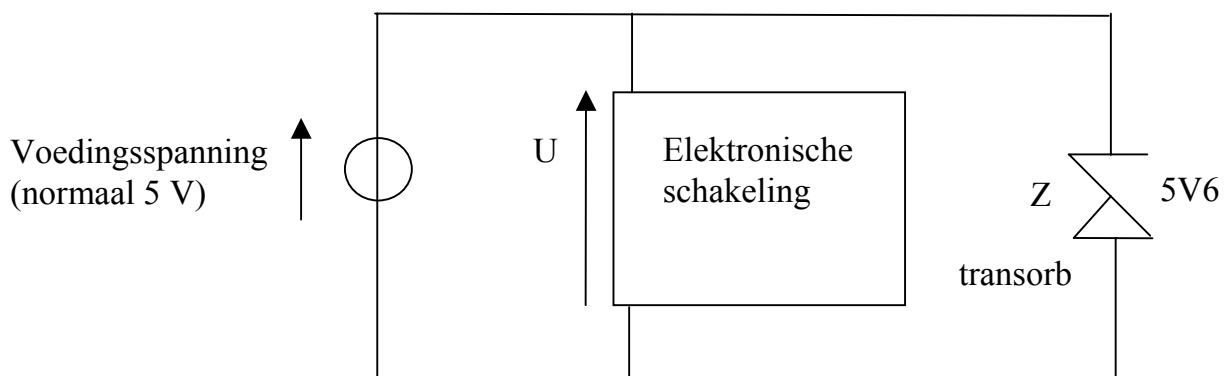
De maximale stroom bedraagt bijvoorbeeld 15 mA en de stroom die minimaal nodig is om een stabiele spanning te bekomen is bijvoorbeeld slechts 50 μA . Dit is dus kleiner dan 1 % van de maximale stroom.

Bij een BGSR zijn er net zoals bij een gewone zenerdiode meerdere nominale spanningswaarden verkrijgbaar.

5.2: De transorb

Een transorb is een zenerdiode die bestand is tegen zeer grote stroompieken. Bij een overdreven inwendige temperatuur wordt er gegarandeerd een kortsluiting gevormd (en geen onderbreking zoals bijvoorbeeld bij een smeltveiligheid). Het is wel zo dat bij langdurige en extreem grote stroomsterkten eventueel toch een open keten gevormd kan worden (bijvoorbeeld bij stromen boven de 100 A).

Een transorb wordt gebruikt om dure schakelingen of onderdelen van schakelingen te beveiligen tegen potentiële overspanningen.



Figuur 3.12: Beveiliging elektronische schakeling

In normale omstandigheden is $U = 5\text{ V}$ en is de stroom door de transorb ongeveer nul. Het geheel werkt nagenoeg alsof de transorb Z niet aanwezig is.

Stel echter dat we de elektronische schakeling per vergissing aan een te hoge voedingsspanning (bijvoorbeeld 12 V i.p.v. 5 V) zouden leggen, of stel dat de regeltransistor van de gestabiliseerde 5 V voeding zou doorslaan, of stel dat de voeding of de schakeling getroffen zou worden door een secundaire blikseminslag of ESD (“electrostatic discharge”). Wat gebeurt er dan?

Zonder transorb zouden de bovenstaande “storingen” de spanning U ver boven de normale 5 V brengen. Hierdoor kan de elektronische schakeling (bijvoorbeeld een uitbreidingskaart in een computer) definitief defect geraken.

Met een transorb zal de spanning U echter niet ver boven $5,6\text{ V}$ stijgen ten gevolge van de zenerwerking van precies deze transorb. Bij kortere storingen (of langdurige storingen met kleine stroom door de transorb), waarbij de inwendige temperatuur van de transorb beneden de 150 °C blijft, keren zowel de elektronische schakeling als de transorb terug naar hun normale werking zodra de storing verdwenen is.

Indien de storing gedurende een te lange tijd een te grote stroom door de transorb veroorzaakt, zal de inwendige temperatuur van de transorb te hoog oplopen. Hierdoor vormt de transorb een kortsluiting wat de elektronische schakeling beveiligd. Nadat de storing verdwenen is moet de transorb wel vervangen worden vooraleer de schakeling terug normaal werkt.

Indien de storing zorgt voor een erg grote stroom (bijvoorbeeld boven de 100 A) gedurende een lange tijd, dan zal de transorb uiteindelijk de schakeling niet langer kunnen beveiligen. De transorb vormt dan uiteindelijk toch een open keten zodat zijn beschermende werking verdwenen is.