

Hoofdstuk 1: De diode

1: Algemeenheden en terminologie

1.1: Halfgeleidermateriaal

Halfgeleiders zijn materialen met een elektrische geleidbaarheid die tussen deze van de echte geleiders en deze van de isolatoren varieert. De halfgeleidertheorie bewijst onder meer zijn nut bij de fabricage van diodes, bipolaire transistoren, FET's, MOSFET's, diacs, triacs, GTO's ... In deze cursus zullen we ons beperken tot de studie van diodes en bipolaire transistoren. De halfgeleidertheorie zelf zal uitgebreid behandeld worden in de cursus fysica van Dr. J. Vanderhaeghen. Meer informatie kunt u eveneens vinden op het internet via de websites <http://khbo.be/fysica/links.html> en <http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/index.html> . Wij richten ons vooral op de praktische eigenschappen en toepassingen van de halfgeleiders. We besteden minder of geen aandacht aan hun interne structuur en theoretische werking.

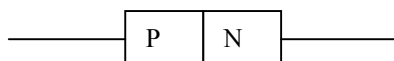
In de elektronica gebruikt men tegenwoordig vooral silicium (Si, atoomgetal 14) als halfgeleidend element. Vroeger gebruikte men hoofdzakelijk germanium (Ge, atoomgetal 32). Merk op dat zowel Si als Ge vier elektronen bezitten op hun buitenste schil. Met intrinsiek Si of Ge bedoelt men gewoon zéér zuiver Si of Ge.

N-materiaal is intrinsiek Si of Ge dat moedwillig verontreinigd of gedopeerd werd met een element met 5 elektronen op de buitenste schil. Men gebruikt bijvoorbeeld fosfor (P), arsenicum (As) of antimoon (Sb) en noemt deze verontreinigingen vaak “donors”.

P-materiaal is intrinsiek Si of Ge dat moedwillig verontreinigd of gedopeerd werd met een element met 3 elektronen op de buitenste schil. Men gebruikt bijvoorbeeld boor (B), aluminium (Al), gallium (Ga) of indium (In) en noemt deze verontreinigingen vaak “acceptors”.

In beide gevallen is de verontreinigings- of dopatiegraad zeer klein: typisch 1 op 10^6 tot 10^8 bij Si (dit betekent dat er slechts 1 vreemd atoom aanwezig is per 10^6 tot 10^8 Si-atomen). De concentratie van ongewenste verontreinigingen moet vanzelfsprekend nog kleiner zijn zodat men inderdaad moet uitgaan van zéér zuiver Si (of Ge).

1.2: De diode



Figuur 1.1: PN-junctie

De samenvoeging van een stukje P-materiaal met een stukje N-materiaal doet een PN-overgang of m.a.w. een PN-junctie ontstaan. Bij een dergelijke PN-junctie is er een smal overgangsgebied (bvb. 1 μm of smaller) tussen een P-zone en een N-zone. In de toegepaste elektronica wordt een dergelijke PN-structuur een diode genoemd. Een diode heeft een anode en een kathode en heeft aldus twee aansluitdraadjes. De symbolische voorstelling van een diode is hier weergegeven.



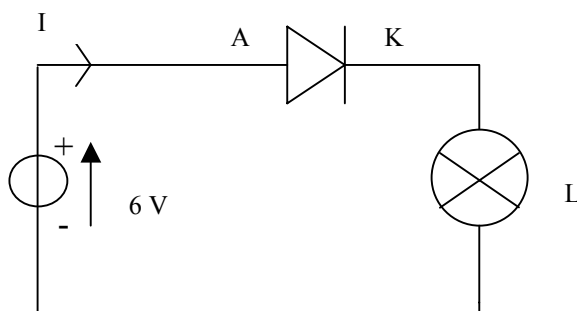
Figuur 1.2: De diode

De anode-aansluiting (A) is aan de P-zone en de kathode-aansluiting (K) is aan de N-zone.

In de handel zijn vele types diodes te koop. De specifieke kenmerken voor een bepaalde diode worden door de fabrikant verstrekt in de datasheets. Achter aan de cursus zijn een aantal datasheets (van diverse fabrikanten) afgedrukt. Daar vindt u onder meer de datasheets voor de veel gebruikte diodes 1N4001 tot en met 1N4007. Ook daar kunt u de zonet vermelde symbolische voorstelling terugvinden.

1.3: De hoofdeigenschap van een diode

De hoofdeigenschap van een PN-junctie of diode is dat zij de elektrische stroom goed kan geleiden (doorlaten) in de richting van A naar K, doch niet (of nagenoeg niet) in de richting van K naar A (let op de pijl die in het diode-symbool verweven zit). De onderstaande schakelingen illustreren deze hoofdeigenschap overduidelijk.

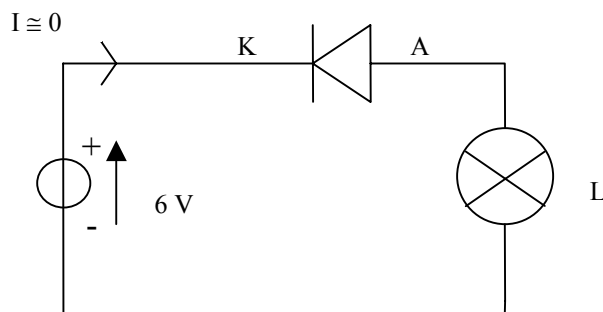


Figuur 1.3: Diode in doorlaat gepolariseerd

De schakeling bestaat uit een batterij welke een gelijkspanning van 6 V levert, een diode en een gloeilamp L. (bvb. een fietslampje van 6 V en 0,1 A)

In de bovenstaande figuur is de diode in doorlaat gepolariseerd: A is positief ten opzichte van K zodat er stroomgeleiding is van A naar K. Men zegt dat de diode voorwaarts (“forward”) gepolariseerd is. De diodestroom vloeit ook door de lamp zodat deze oplicht.

Indien de diode anders gepolariseerd is, krijgen we de volgende situatie:



Figuur 1.4: Diode invers gepolariseerd

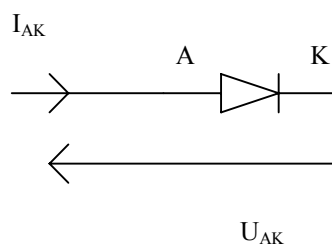
In de bovenstaande figuur is de diode in sperrichting gepolariseerd: A is negatief ten opzichte van K zodat er geen stroomgeleiding is van K naar A. Men zegt dat de diode invers (“reverse”) gepolariseerd is. Er vloeit dan ook geen diodestroom door de lamp zodat deze niet oplicht.

Merk bij de twee bovenstaande figuren op dat het niet de diode is die de stroom doet vloeien. Het is de batterij die bepaalt welke potentiële stroomzin er kan vloeien (namelijk van + naar -). De polariteit van de diode bepaalt dan of deze stroom ook effectief vloeit of niet.

Een diode is goed te vergelijken met een vloeistofklep die zich opent bij de ene stroomzin, doch de tegenovergestelde stroomzin verhindert (denk aan een éénrichtingsklep of terugslagklep).

2: Verband tussen de diodestroom en de diodespanning

Voor de precieze betekenis van de diodestroom I_{AK} en de diodespanning U_{AK} verwijzen we naar de eerste kandidatuur en de onderstaande figuur.



Figuur 1.5: Diodestroom en diodespanning

In de huidige paragraaf zullen we aandacht besteden aan het verband tussen I_{AK} en U_{AK} . Het verband tussen I_{AK} en U_{AK} zullen we zowel bestuderen met behulp van een formule als met behulp van een grafische voorstelling. Dit verband zal de eerder vermelde hoofdeigenschap van de diode duidelijk maken.

2.1: De ideale diode (PN-junctie)

Bij ideale diodes (PN-juncties) geldt onderstaand verband tussen I_{AK} en U_{AK} : (deze formule wordt bewezen in de cursus halfgeleiderfysica van Dr. J. Vanderhaeghen)

$$I_{AK} = I_S \left(e^{q U_{AK} / k T_j} - 1 \right)$$

Hierbij is:

I_{AK} : de door de junctie vloeiende stroom (eenheid: A)

U_{AK} : de over de junctie staande spanning (eenheid: V)

T_j : de junctietemperatuur (eenheid: K)

q : de lading van het elektron ($= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

k : de constante van Boltzmann ($= 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

I_S : de verzadigingssperstroom (eenheid A)

Bij het bekijken van de bovenstaande formule blijkt dat $I_{AK} \cong -I_S$ indien U_{AK} voldoende negatief is. Bijgevolg is I_S de sperstroom (stroom van K naar A, negatieve I_{AK}) die door de junctie loopt bij voldoende grote sperspanning (zoals verder blijkt is hiervoor een sperspanning van 1 V ruimschoots voldoende).

De sperstroom I_S is uiterst klein, (bijvoorbeeld $I_S = 10^{-11}$ A = 10 pA) bij kamertemperatuur ($T_j \cong 300$ K). Zoals later zal blijken, stijgt deze I_S fors bij toenemende T_j .

Bij kamertemperatuur ($T_j \cong 300$ K) wordt $(k T_j / q) = 0,026$ V zodat geldt dat:

$$I_{AK} = I_S \left(e^{U_{AK} / 0,026} - 1 \right)$$

Als bovendien $U_{AK} \gg 0,026$ V dan geldt tenslotte bij benadering dat:

$$I_{AK} = I_S e^{U_{AK} / 0,026}$$

2.2: Geleide oefening

Bereken de junctiestroom I_{AK} voor diverse waarden van U_{AK} . Voor U_{AK} -spanningen tussen 0 V en 1V kunt u rekenen met tussenstappen van 0,1 V. Tussen 0,2 V en 0,7 V kunt u eventueel tussenstappen van 0,05 V nemen. Bereken ook I_{AK} voor negatieve U_{AK} waarden.

Vergelijk uw berekende waarden met de onderstaande tabel.

Stroom door theoretische PN-junctie:

U_{AK} (V)	I_{AK} (A)
-100	-1,00E-11
-10	-1,00E-11
-1	-1,00E-11
0	0,00E+00
0,1	4,58E-10
0,2	2,19E-08
0,25	1,50E-07
0,3	1,03E-06
0,35	7,02E-06
0,4	4,80E-05
0,45	3,29E-04
0,5	2,25E-03
0,55	1,54E-02
0,6	1,05E-01
0,65	7,20E-01
0,7	4,93E+00
0,8	2,31E+02
0,9	1,08E+04
1	5,05E+05

Erg kleine stromen
(negatief)

Nul

Erg kleine stromen

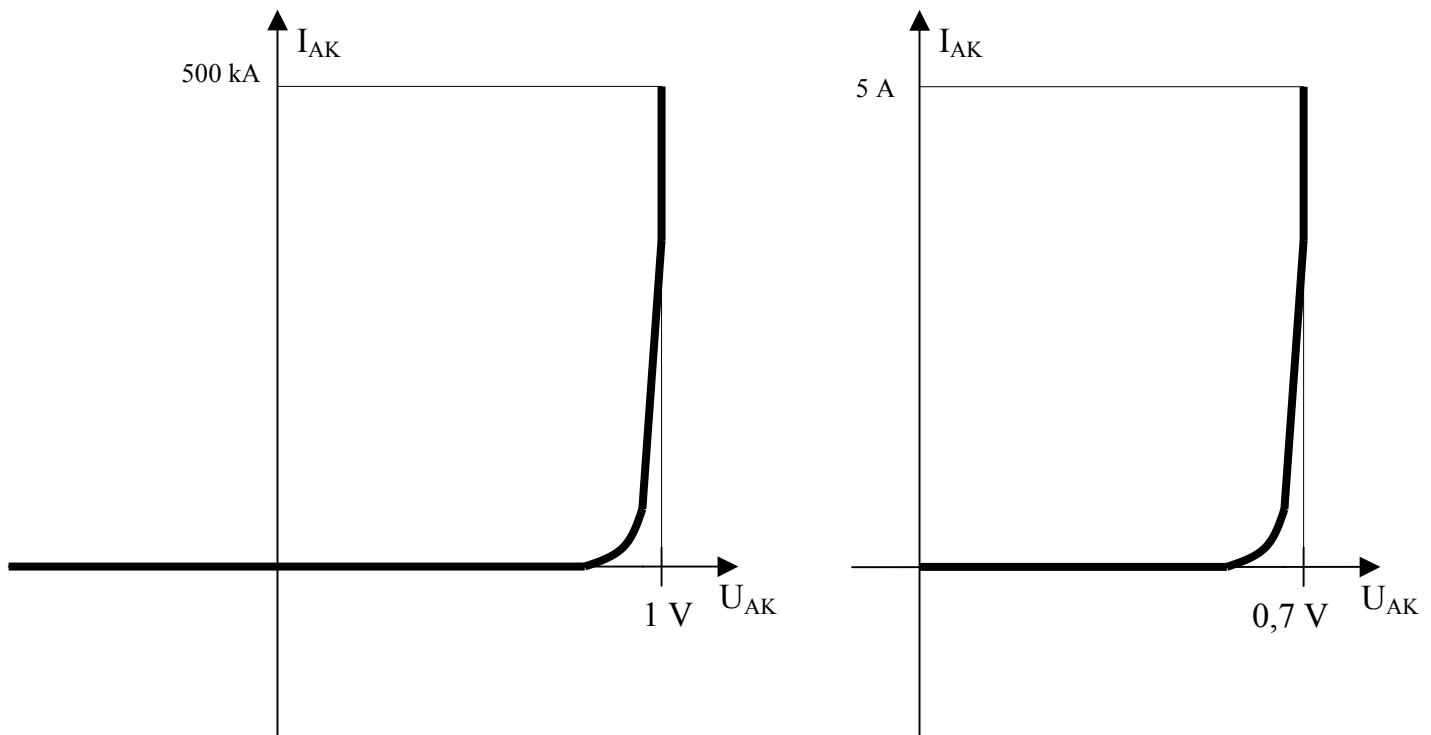
Praktische
stroomwaarden

Erg grote stromen

Zet nu uw bekomen resultaten uit in een grafiek. Een ruwe schets van wat u moet bekomen vindt u in Figuur 1.6.

Interpreteer de bekomen grafiek. De grafiek zal u onder meer de betekenis van de verzadigingssperstroom illustreren.

Vergelijk later de nu bekomen grafiek (welke hoort bij de theoretische PN-junctie) in Figuur 1.6 met de praktisch opgemeten grafieken uit de volgende paragraaf.



Figuur 1.6: Spanning-stroom-karakteristieken van ideale PN-junctie.

2.3: Praktische Si- en Ge-diodes

De reële diode-grafiek (verband tussen U_{AK} en I_{AK}) wijkt af van deze van de theoretische junctie in Figuur 1.6.

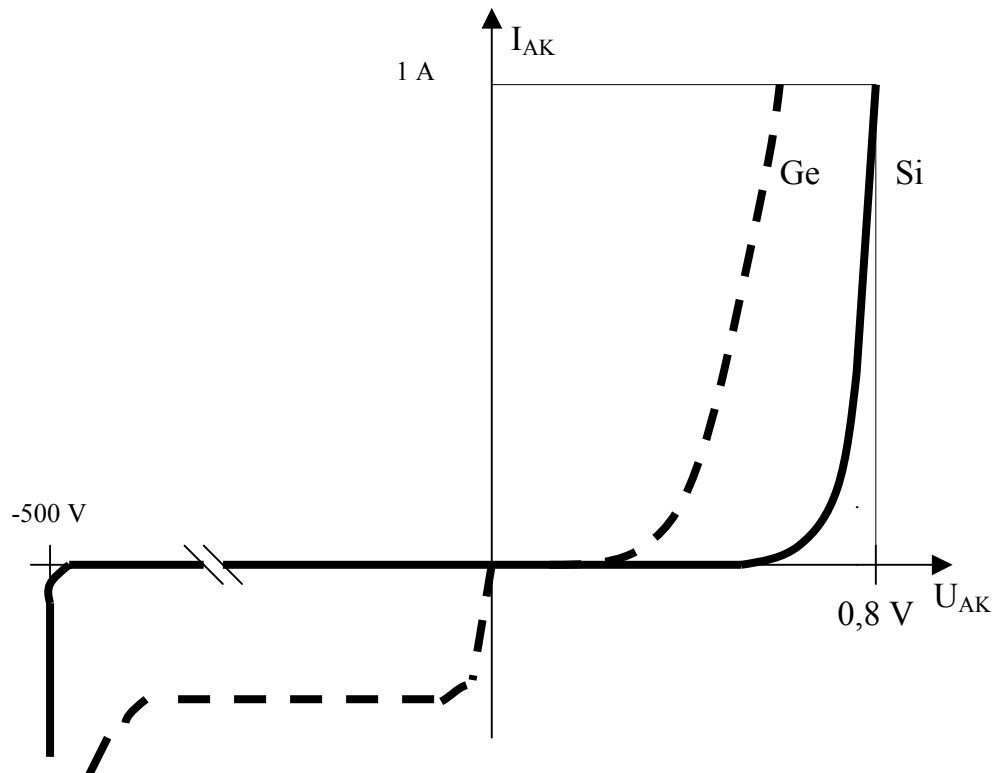
Deze afwijkingen zijn onder meer te wijten aan

- de ongewenste onzuiverheden in het werkelijke halfgeleidermateriaal
- de elektrische weerstand van de N- en P-zones en hun aansluitingen
- het zener-effect en het lawine-effect (zie later).

Inderdaad, praktische diodes hebben typisch een grafiek zoals hieronder weergegeven in Figuur 1.7. In het eerste kwadrant vindt u de doorlaatkarakteristiek en in het derde kwadrant vindt u de sperkarakteristiek. De karakteristiek van de Si-diode is in volle lijn getekend en de karakteristiek van de Ge-diode is in streeplijn getekend.

Houd wel in uw gedachten dat Figuur 1.7 niet op schaal getekend is. Zo is in doorlaat slechts een spanningsbereik van U_{AK} voorzien van 0 V tot 0,8 V, terwijl er in sper een spanningsbereik getekend is van 0 V tot -500 V.

Ook de stroom-as is niet op schaal getekend. In voorwaartse richting is een stroombereik van I_{AK} voorzien van 0 A tot 1 A, terwijl er in sper een veel kleiner stroombereik getekend is. Inderdaad de verzadigingssperstroom bij de Si-diode is van de grootte orde $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$. Bij de Ge-diode is de verzadigingssperstroom van de grootte orde $1 \text{ }\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$. Dus bij een Ge-diode is de verzadigingssperstroom merkkelijk groter dan bij een Si-diode.



Figuur 1.7: Spanning-stroom-karakteristiek van Si- en Ge-diode.

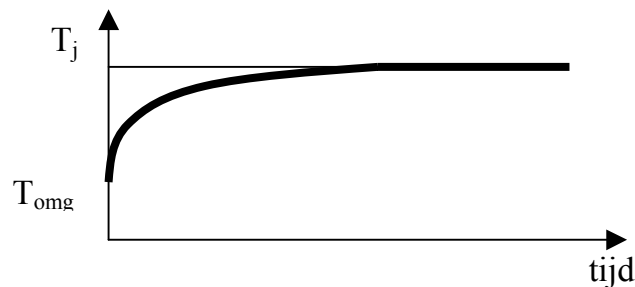
2.4: Statische en dynamische karakteristieken

Bij het opmeten van de spanning-stroom-karakteristiek van een diode is het nodig onderscheid te maken tussen statische en dynamische karakteristieken.

Indien een stroom I_{AK} gedurende een zekere tijd door de diode stroomt, zal er een warmte-ontwikkeling in de diode plaats vinden zodat de junctietemperatuur T_j stijgt. Indien een voldoende grote I_{AK} voldoende lang door de diode vloeit, kan T_j tot ver boven de omgevingstemperatuur T_{omg} (vaak ook genoteerd als T_{amb}) komen.

De evolutie van de junctietemperatuur T_j als functie van de tijd is geschetst in Figuur 1.8. Hierbij valt op dat in het begin de temperatuur T_j vrij snel stijgt doch dat nadien verzadiging optreedt. Dit betekent dat na voldoende lange tijd T_j een regimewaarde bereikt.

Wel moet opgelet worden dat I_{AK} niet te groot is, want hierdoor zou T_j te hoog worden wat tot beschadiging van het halfgeleidermateriaal zou leiden.



Figuur 1.8: Evolutie van de junctietemperatuur

Indien bij elke meting van de spanning-stroom-karakteristiek gewacht wordt totdat de junctietemperatuur zijn regimewaarde bereikt heeft, dan bekomt met de zogenaamde statische grafieken. Dit betekent dat bij het opmeten van de grafieken T_{omg} constant is, doch de junctietemperatuur T_j is geen constante. Inderdaad, als U_{AK} en I_{AK} groter zijn, dan is de T_j die zich in regime instelt ook groter.

Men kan I_{AK} ook zeer snel (bvb. binnen 1 ms) van 0 tot de maximale waarde (hier 1 A) opvoeren zodat T_j nagenoeg constant blijft. Ten gevolge van de thermische traagheid kan T_j niet noemenswaardig stijgen in deze zeer korte tijd. In dit geval bekomt men de zogenaamde dynamische grafiek. De opname moet voldoende snel gebeuren wat de hulp vereist van een snel meetapparaat zoals een geheugen-oscilloscoop of een snelle XY-recorder.

De dynamische diodegrafiek verschilt lichtjes van de statische diodegrafiek. Voorlopig verwaarlozen wij deze verschillen. De invloed van de temperatuur op de diodegrafiek wordt later afzonderlijk behandeld.

3: Bespreking van de diodekarakteristiek

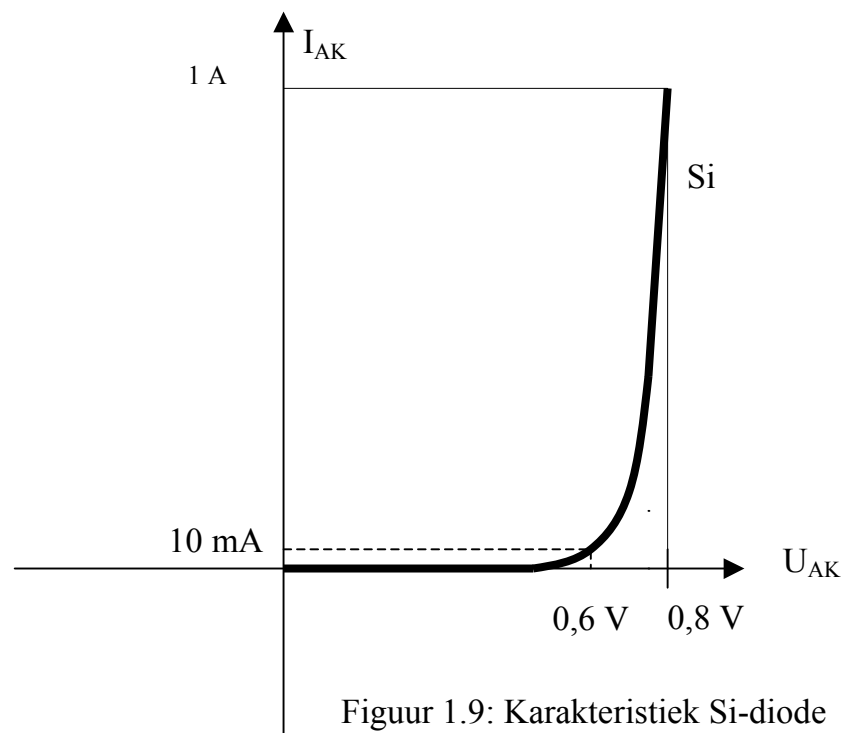
Zowel de grafieken als de formules tonen duidelijk dat de diode inderdaad alleen goed kan geleiden (grote I_{AK} -waarden) als U_{AK} en I_{AK} positief zijn (diode in voorwaartse polarisatie: A positief t.o.v. K, stroomrichting van A naar K). Dit is zichtbaar in het eerste kwadrant van de spanning-stroom-karakteristiek.

Bij negatieve U_{AK} (diode in inverse polarisatie: A negatief t.o.v. K) blijft de diodesroom zéér gering en geleidt de diode nagenoeg niet. De situatie is anders indien de doorslagspanning (bvb. -500 V) overschreden wordt, dan is er wel een grote inverse stroom. Dit is zichtbaar in het derde kwadrant van de spanning-stroom-karakteristiek.

Na een onderscheid gemaakt te hebben tussen het eerste en het derde kwadrant, bekijken we nu het eerste kwadrant in detail. De bespreking van het derde kwadrant volgt dan later.

3.1: Diode bij voorwaartse polarisatie

De diode begint slechts goed te geleiden (grote I_{AK} -waarden) als de diodespanning U_{AK} voldoende groot is. Dit is duidelijk zichtbaar op de onderstaande statische grafiek van een praktische Si-diode bij kamertemperatuur (voorwaarts gepolariseerd).



Figuur 1.9: Karakteristiek Si-diode

In dat verband definieert men in de toegepaste elektronica de break-point-voltage (ook vaak threshold-, offset-, of cut-in-voltage genoemd). Deze break-point-voltage wordt kortweg genoteerd als BPV. De BPV is de diodespanning U_{AK} waarbij de diodestroom I_{AK} één procent van de maximaal toegelaten waarde bedraagt.

In het bovenstaande voorbeeld is de BPV = 0,6 V. Dit is de U_{AK} die nodig is om een I_{AK} gelijk aan 10 mA te doen vloeien (1% van 1 A).

Praktisch kan men de BPV ook beschouwen als de minimaal benodigde diodespanning U_{AK} om de diode goed in geleiding te brengen (I_{AK} loopt namelijk stijl op in functie van U_{AK} wanneer $U_{AK} > \text{BPV}$).

Voor Si-diodes bedraagt de BPV ongeveer 600 mV. Ge-diodes hebben een duidelijk lagere BPV van ongeveer 200 mV.

Onder de BPV ($U_{AK} < BPV$) geleidt de diode zeer weinig (diodestroom kleiner dan 1% van de maximum toegelaten waarde) waardoor het in veel praktische toepassingen mogelijk is de diode te benaderen door een onderbreking of “open schakelaar”. Dit betekent dat men rekent alsof de diodestroom gelijk is aan nul zodat de diode elektrisch gezien een onderbreking is.

Boven de BPV ($U_{AK} > BPV$) stijgt de diodestroom zeer snel bij toenemende diodespanning. Denk hierbij aan de exponentieel stijgende grafiek en de bijhorende formule bij de ideale PN-junctie en de vorm van Figuur 1.9 bij de praktische diode.

De spanning over de diode moet, ook bij de grootste toegelaten diodestromen, steeds kleiner dan 1 V blijven (zie grafiek). De weerstand van de diode is dan relatief gering. In ons voorbeeld is deze weerstand slechts $0,8 \Omega$. Inderdaad, bij $U_{AK} = 0,8 \text{ V}$ vloeit de maximale diodestroom gelijk aan 1 A (ga dit zelf na: $R = U_{AK} / I_{AK}$).

Omdat voor voldoende grote I_{AK} de weerstand R van de diode zo klein is, benadert men de diode door een doorverbinding of “gesloten schakelaar”.

3.2: Belangrijke opmerkingen

Vooraleer tot de bespreking van de invers gepolariseerde diode over te stappen, sommen we eerst nog een aantal relevante opmerkingen op in verband met de voorwaarts gepolariseerde diode.

Als de diode voorwaarts (“Forward”) gepolariseerd is, dan noteert men de diodespanning vaak als U_F i.p.v. U_{AK} . De diodestroom noteert men als I_F i.p.v. I_{AK} (index F voor Forward).

Bij een praktische diode mag een bepaalde I_F - (en dus U_F -) waarde niet overschreden worden. De diode neemt inderdaad een vermogen $P = U_F I_F$ op. Dit vermogen wordt bijna volledig in warmte omgezet. De diode- of junctie-temperatuur (T_j) stijgt hierdoor. Om de warmteontwikkeling te beperken, moeten I_F en U_F beperkt worden omdat Si-structuren defect raken boven 150°C tot 200°C . Ge-structuren raken beschadigd boven 90°C tot 125°C (inwendige temperaturen). Bij een 1N4007 bedraagt de maximaal toegelaten I_F (I_{Fmax}) 1 A. Dit kunt u verifiëren in datasheets welke opgenomen zijn in deze cursus.

Bij de meeste Si-diodes (uitzondering: zie volgende item) bereikt U_F ongeveer 0,8 V tot 0,9 V bij de maximaal toegelaten diodestroom I_{Fmax} . Dit is trouwens zichtbaar op de eerder gegeven diodegrafiek. Meestal wordt de diode niet gebruikt bij I_{Fmax} maar slechts bij merkelijk lagere I_F -waarden. Dit betekent dat U_F meestal beperkt blijft tot 0,8 V of zelfs minder. Reeds vanaf zeer kleine I_F -waarden (vanaf 1% van I_{Fmax}) staat reeds ongeveer 0,6 V (de BPV) over de diode. Bij vrijwel alle gebruikelijke I_F -waarden (diodestromen van 1% tot ongeveer 70% van I_{Fmax}) zal de diodespanning U_F

tussen de 0,6 V en de 0,8 V gelegen zijn. Er wordt dan ook slechts een fout van hoogstens 0,1 V gemaakt (in veel praktische schakelingen is dit een verwaarloosbare fout) als we de volgende vuistregel hanteren:

Bij de gebruikelijke (voorwaartse) diodestromen staat over een geleidende Si-diode een spanning (U_{AK} of U_F) van ongeveer 0,7 V.

Bij de gebruikelijk (voorwaartse) diodestromen staat over een geleidende Ge-diode een spanning (U_{AK} of U_F) van ongeveer 0,3 V.

Een uitzondering op wat zonet vermeld is, vormen de zeer “zware” diodes. Dit zijn diodes die speciaal ontworpen zijn om (mits koeling m.b.v. koelplaten) zeer hoge voorwaartse stromen te kunnen verwerken. Bij deze zeer zware diodes kan I_{Fmax} enkele tientallen tot enkele honderden Ampères groot zijn. Bij deze hoge stromen kan U_F oplopen tot 1 à 1,5 V, of zelfs nog meer. Hierbij is het duidelijk dat de vuistregel van hierboven ($U_F \cong 0,7$ V bij geleidende Si-diodes) hier niet meer geldig is.

3.3: Diode bij inverse polarisatie

Bij inverse “reverse” polarisatie zijn U_{AK} en I_{AK} negatief (dus A is negatief ten opzichte van K en de stroom loopt van K naar A). De stroom I_{AK} is hier wel zéér klein. Zo vloeit er bij een diodespanning van $U_{AK} = -200$ V (Si-diode) bijvoorbeeld een stroom $I_{AK} = -5$ nA = $-5 \cdot 10^{-9}$ A.

In plaats van te stellen dat de diodespanning $U_{AK} = -200$ V, zegt men vaak dat de inverse diodespanning $U_R = 200$ V. (U_R : inverse diodespanning met de index R van “reverse”)

In plaats van te stellen dat de diodestroom $I_{AK} = -5$ nA, zegt men vaak dat de inverse diodestroom $I_R = 5$ nA. (I_R : inverse diodestroom met de index R van “reverse”)

Bij het bekijken van het verloop van I_R in functie van U_R op de grafiek blijkt dat:

Indien men de inverse diodespanning U_R langzaam opdrijft vanaf nul (oorsprong van de grafiek), dan stijgt de inverse diodestroom I_R eerst mee met de toenemende U_R . Zeer spoedig (reeds vanaf geringe U_R -waarden) stagneert deze I_R -toename. De quasi horizontaal verlopende grafiek toont inderdaad dat I_R haast onafhankelijk wordt van U_R (slechts zeer geringe toename van I_R bij nochtans fors stijgende U_R). Men zegt dat I_R zich stabiliseert op zijn zogenaamde verzadigingswaarde I_S . Merk wel op dat ten gevolge van de ongewenste onzuiverheden in het halfgeleidermateriaal de I_S -waarde van de reële diodes merkkelijk hoger is dan deze van de theoretische juncties (bvb. 10^{-8} A i.p.v. 10^{-11} A).

Bij iedere diode loopt er dus ondanks de sperpolarisatie toch een zeer kleine stroom door de diode. Daar deze stroom meestal hoogstens enkele nA bedraagt bij Si-diodes

en hoogstens enkele μA bij Ge-diodes, is hij in vele praktische schakelingen verwaarloosbaar klein (zeker bij Si-diodes).

In vele praktische schakelingen benadert men de diode dan ook als een onderbreking of een “open schakelaar”. Men rekent alsof de diodestroom nul is en dus alsof de diode elektrisch gezien een onderbreking is (zoals dit het geval was bij een voorwaarts gepolariseerde diode met een $U_F = U_{AK} < \text{BPV}$).

Blijven wij U_R verder opdrijven, dan bereiken we een zekere kritische waarde, de doorslagspanning. Vanaf deze doorslagspanning U_D , neemt I_R plots zeer sterk toe als U_R verder stijgt. Men zegt dat de diode “doorslaat”. In de eerder afgedrukte Figuur 1.7 bedraagt U_D ongeveer 500 V. Het is duidelijk dat de grafiek in de omgeving van U_D overgaat van een horizontaal naar een quasi-vertikaal verloop. Tussen de beide grafiekdelen bevindt zich de overgangsknik die scherp (hoekig) is voor Si-diodes en meer “afgerond” bij Ge-diodes.

We herhalen het, in het doorslaggebied neemt I_R zeer sterk toe bij zeer geringe U_R -toenames. De grafiek verloopt daar dus quasi-vertikaal. Voor zeer uiteenlopende I_R -waarden blijft U_R nagenoeg constant. Deze bijzondere eigenschap zal toegepast worden bij de zogenaamde zenerdiodes. De verklaring van het hierboven beschreven doorslagverschijnsel volgt verderop in de cursus.

Wij merken nog op dat de doorslag geen enkele beschadiging van de diode tot gevolg heeft als men de diodestroom I_R hierbij beperkt (eventueel door inschakeling van een externe weerstand) tot voldoende kleine waarden. Voor een meer volledige uitleg verwijzen we opnieuw naar de bespreking van de zenerdiodes.

Bij de al eerder vermelde Si-diode 1N4007 bedraagt de doorslagspanning minstens 1000 V. Verifieer dit op de datasheets welke achteraan opgenomen zijn in deze cursus. Men zegt dat de 1N4007 een 1 A / 1000 V-diode is. Dit betekent dat door deze diode in doorlaat stromen I_F tot 1 A mogen vloeien ($I_{F\text{max}} = 1 \text{ A}$), terwijl er in sper spanningen U_R tot 1000 V over deze diode mogen staan zonder dat deze doorslaat.

De hierboven getekende diodegrafieken (en hun bespreking) gelden in principe slechts bij kamertemperatuur. Bij andere temperaturen krijgen diodes afwijkende grafieken en andere karakteristieke spanningen en stromen (ander BPV, andere I_S , andere I_R , andere U_D ...). De soms zeer belangrijke temperatuursinvloed wordt later in deze cursus afzonderlijk behandeld.

3.4: Diodespecificaties

Vaak geven de fabrikanten (in de datasheets) een aantal specificaties op die onontbeerlijk zijn bij de keuze van een gepaste diode. Het nut van deze specificaties zal pas verder in de cursus duidelijk worden. We sommen ze echter nu al op.

In verband met de voorwaartse stromen vermelden we:

I_{FM} : De maximaal toegelaten waarde van de constante voorwaartse gelijkstroom.

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

I_{FSM} : De maximaal toegelaten waarde van een eenmalige voorwaartse piekstroom.

Verder zijn er ook:

$I_{F(AV)max}$: De maximaal toegelaten gemiddelde waarde van de voorwaartse stroom genomen over een ganse periode (20 ms).

$I_{F(RMS)max}$: De maximaal toegelaten effectieve waarde van de voorwaartse stroom.

In verband met de inverse spanningen vermelden we:

V_{RWM} : De maximaal toegelaten waarde van de periodieke inverse spanning.

V_{RRM} : De maximaal toegelaten waarde van een herhalende inverse piekspanning.

V_{RSM} : De maximaal toegelaten waarde van een eenmalige inverse piekspanning.

Het is niet echt nodig al deze afkortingen van buiten te kennen. De voetletters hebben namelijk allen hun logische betekenis. Zo staat (zoals al eerder vermeld) de voetletter F voor forward = doorlaat. De voetletter R staat voor reverse = invers (als eerste voetletter).

De voetletters AV staan voor average = gemiddeld. De voetletters RMS staan voor root mean square = effectieve waarde.

De voetletter R staat voor repetitive = herhalend (als tweede voetletter). De voetletter W staat voor working = periodiek sinusregime. De voetletter S staat voor surge = hoge golf = eenmaal optredende piek.

De voetletter M staat voor maximum = hoogst toegelaten waarde.

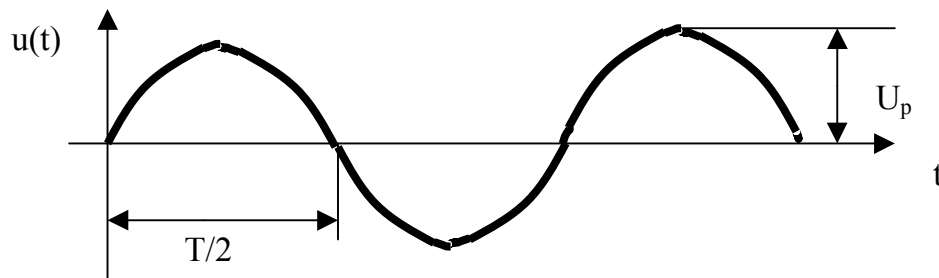
4: Superponeren van een AC-signaal op een DC-signaal

In de huidige paragraaf zullen we wat meer uitleg verstrekken bij de noodzaak van het superponeren van een AC-signaal boven op een DC-signaal. Dit zal trouwens ook in de verdere paragrafen van dit hoofdstuk en in de verdere hoofdstukken van deze cursus duidelijker worden.

In de huidige paragraaf zullen we ook behandelen op welke manier dit superponeren praktisch gerealiseerd wordt.

4.1: Definitie en eigenschappen

Beschouw een AC-spanning $u(t)$. Stel bijvoorbeeld $u(t) = U_p \sin(\omega t)$ waarbij U_p de amplitude is van de spanning en ω de pulsatie. Hierbij is $\omega = 2\pi f$ en $f = 1/T$ waarbij T de periode voorstelt.



Figuur 1.10: Zuivere sinus

Het is duidelijk dat AC-signalen op sommige tijdstippen positief zijn en op andere tijdstippen negatief zijn. Men noemt daarom dergelijke AC-signalen bipolair. Ze bestrijken namelijk de beide polariteiten (+ en -).

We zullen elders zien dat de meeste elektronische onderdelen geen bipolaire signalen kunnen verwerken. Ze werken alleen met unipolaire signalen, dus signalen die altijd een zelfde polariteit hebben.

Microfoons, radio-antennes, CD-spelers, ... produceren zuivere AC-signalen. Deze AC-signalen moet men meestal vooraf omzetten naar een unipolair signaal vooraleer veel elektronische componenten ze kunnen verwerken. Dit omzetten naar een unipolair signaal gebeurt door simpelweg een voldoende groot DC-signaal op te tellen bij het AC-signaal. Men zegt dat men het AC-signaal superponeert op het DC-signaal.

Een dergelijke opstelling of superponering levert een samengesteld signaal of somsignaal (SS) op. Dit somsignaal bevat het volledige oorspronkelijke AC-signaal maar is toch unipolair.

Teken bij wijze van oefening:

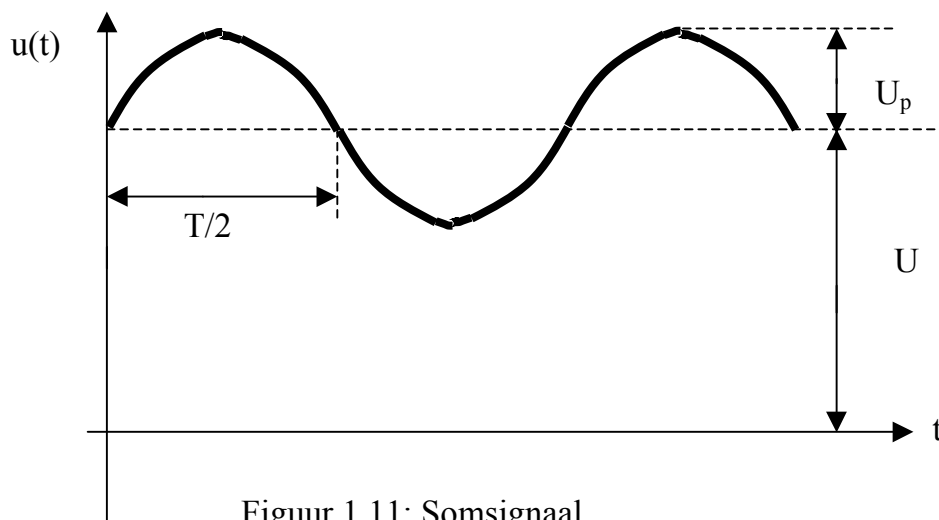
- Een sinusoïdale AC-spanning $u(t)$ met een amplitude U_p gelijk aan 0,1 V en een frequentie van 1000 Hz zodat $u(t) = U_p \sin(\omega t) = 0,1 \sin(2\pi 1000 t)$.
- Een DC-spanning U van 0,7 V waarop we de AC-spanning zullen superponeren.

Teken nu de somspanning SS.

Op de bekomen figuur zult u duidelijk zien dat het oorspronkelijke signaal bipolair is waardoor het meestal niet rechtstreeks te verwerken is. Het signaal SS bevat in wezen dezelfde sinusspanning als het oorspronkelijke AC-signaal. Het is echter wel unipolair zodat het elektronisch te verwerken is (indien $U > U_p$).

Het somsignaal SS varieert duidelijk sinusoïdaal rondom de gemiddelde waarde (vaak ook rustwaarde of instelwaarde genoemd) van 0,7 V. De grenswaarden zijn $U - U_p$ (hier 0,6 V) en $U + U_p$ (hier 0,8 V).

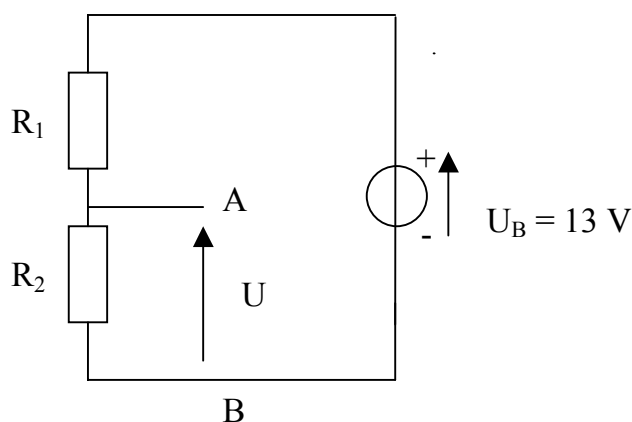
Men zegt dat het somsignaal bestaat uit twee componenten. Dit is enerzijds de AC-component en anderzijds de DC-component.



Figuur 1.11: Somsignaal

4.2: Praktische realisatie

Eerst wordt de gewenste DC-spanning bekomen met behulp van een spanningsdeler.



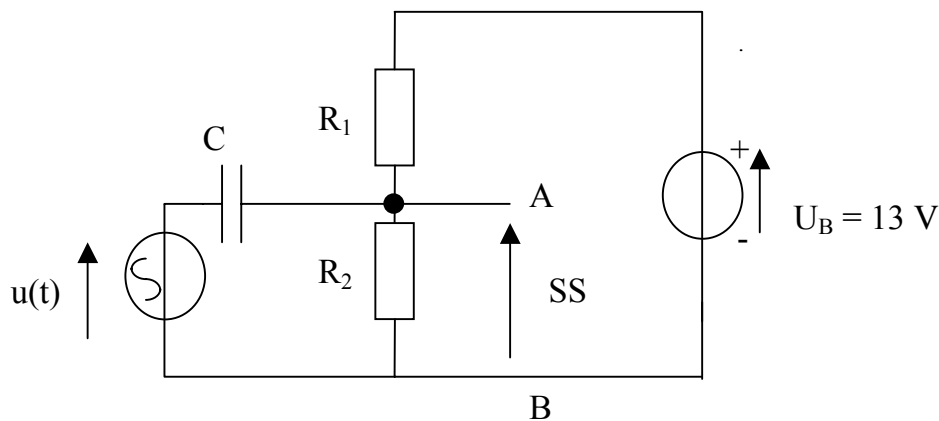
Figuur 1.12: Bekomen gewenste DC-signaal

Inderdaad, de spanning $U = U_B R_2 / (R_1 + R_2)$ zodat $U < U_B$. In het huidige voorbeeld wensen we een $U = 5 \text{ V}$ te bekomen via een $U_B = 13 \text{ V}$. We kiezen verder R_1 en R_2

zodanig dat er een stroom van 1mA door vloeit. Dit betekent dat een goede keuze erin bestaat $R_1 = 8 \text{ k}\Omega$ en $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ te nemen.

Stel dat we in een versterker een AC-spanning $u(t)$ met een amplitude $U_p = 3 \text{ V}$ en een frequentie $f = 1000 \text{ Hz}$ moeten superponeren op een DC-spanning van $U = 5 \text{ V}$. De versterker werkt op een autobatterij met een spanning $U_B = 13 \text{ V}$ (DC). Het AC-signaal is bijvoorbeeld afkomstig van een CD-speler. In de praktijk is het zeer gemakkelijk om het somsignaal $SS = U + u(t)$ te bekomen.

Teneinde de AC-spanning $u(t)$ te superponeren op de DC-spanning U , volstaat het de AC-spanning via een voldoende grote condensator C te koppelen zoals op de onderstaande figuur weergegeven is.



Figuur 1.13: Superponeren signalen

De bovenstaande schakeling bevat twee spanningsbronnen. Steunende op het superpositietheorema geldt dat SS tussen A en B een DC-spanning is met een AC-component erop gesuperponeerd.

Indien alleen de eerste bron d.w.z. de gelijkspanningsbron ingeschakeld is en de tweede bron d.w.z. de wisselspanningsbron geëlimineerd is, dan geldt dat de spanning $U_{AB1} = 5 \text{ V} = U$ (DC). De eerste bron is een gelijkspanningsbron en voor gelijkspanning is een condensator een open keten. Bij het bepalen van de spanning U_{AB1} vervallen bijgevolg zowel de condensator C als de wisselspanningsbron. Dit betekent dat enkel U_B , R_1 en R_2 in rekening gebracht moeten worden zodat de figuur zich herleidt tot Figuur 1.12.

Indien alleen de tweede bron d.w.z. de wisselspanningsbron ingeschakeld is en de eerste bron d.w.z. de gelijkspanningsbron geëlimineerd is, dan vinden we dat $U_{AB2}(t) = u(t)$. De tweede bron is een wisselspanningsbron en voor voldoende grote C -waarde is de condensator een doorverbinding. Dit betekent dat $U_{AB2}(t) = u(t)$ ongeacht de waarden van U_B , R_1 en R_2 .

Met beide bronnen ingeschakeld (de werkelijke situatie) geldt volgens het superpositieprincipe dat $U_{AB}(t) = U_{AB1} + U_{AB2}(t) = 5 \text{ V} + u(t)$. Dit is dus het gewenste somsignaal SS.

Cruciaal bij de voorgaande beredenering (zie cursus eerste kandidatuur) is het feit dat een condensator C voor sinussignalen een impedantie $X_C = 1/2\pi fC$ vertoont. Als we C voldoende groot kiezen, dan wordt de impedantie $X_C \cong 0 \Omega$ zodat we de condensator als een doorverbinding voor AC-signalen kunnen beschouwen.

Volstaat in ons voorbeeld met $f = 1000 \text{ Hz}$ een C-waarde van $2200 \mu\text{F}$? Bewijs.

4.3: Statische en dynamische weerstand van een element

Stel dat we een somsignaal $SS(t) = U + U_p \sin \omega t$ (dus een DC-component U en een AC-component $U_p \sin \omega t$) aanleggen aan een elektronisch onderdeel D met een zuiver reële impedantie. Door het aanleggen van de voornoemde spanning kan nu een bepaalde stroom door het onderdeel lopen. Ten opzichte van het somsignaal vertoont het onderdeel D dus een zekere elektrische weerstand (denk aan de wet van Ohm). Deze weerstandswaarde kan totaal anders zijn voor de AC-component dan voor de DC-component van het somsignaal.

De weerstand die het onderdeel vertoont voor de AC-component van het signaal, noemt men de dynamische weerstand of de weerstand voor AC-signalen (of kortweg AC-weerstand). Deze weerstand wordt genoteerd als R_d .

De weerstand die het onderdeel vertoont voor de DC-component van het signaal, noemt men de statische weerstand of de weerstand voor DC-signalen (of kortweg DC-weerstand). Deze weerstand wordt genoteerd als R_D .

Hoe bepalen we nu deze dynamische weerstand R_d ? We leggen een zeker somsignaal aan het onderdeel D. Stel dat het aangelegde somsignaal varieert over een bedrag $\Delta U = U_p$ vanuit de instelwaarde U. De stroom door het element zal nu ook variëren. Deze variatie vanuit de ruststroom I heeft een grootte ΔI . Dit betekent dat $\Delta I = I_p$ de amplitude is van de AC-stroomcomponent.

Wanneer het element lineair is of wanneer de spannings- en stroomvariaties voldoende klein zijn om het element in het instelpunt (U,I) als lineair te kunnen beschouwen, dan zullen de spannings- en stroomvariaties dezelfde golfvorm hebben (ze zijn bijvoorbeeld beiden sinusoïdaal of driehoeksvormig ...).

Bij een spanningsvariatie met grootte bedrag $\Delta U = U_p$ ontstaat er door D een stroomvariatie met grootte $\Delta I = I_p$. Dus een AC-spanningscomponent met amplitude ΔU veroorzaakt een AC-stroomcomponent met amplitude ΔI .

Nu is de dynamische weerstand R_d gedefinieerd als $R_d = \Delta U / \Delta I$.

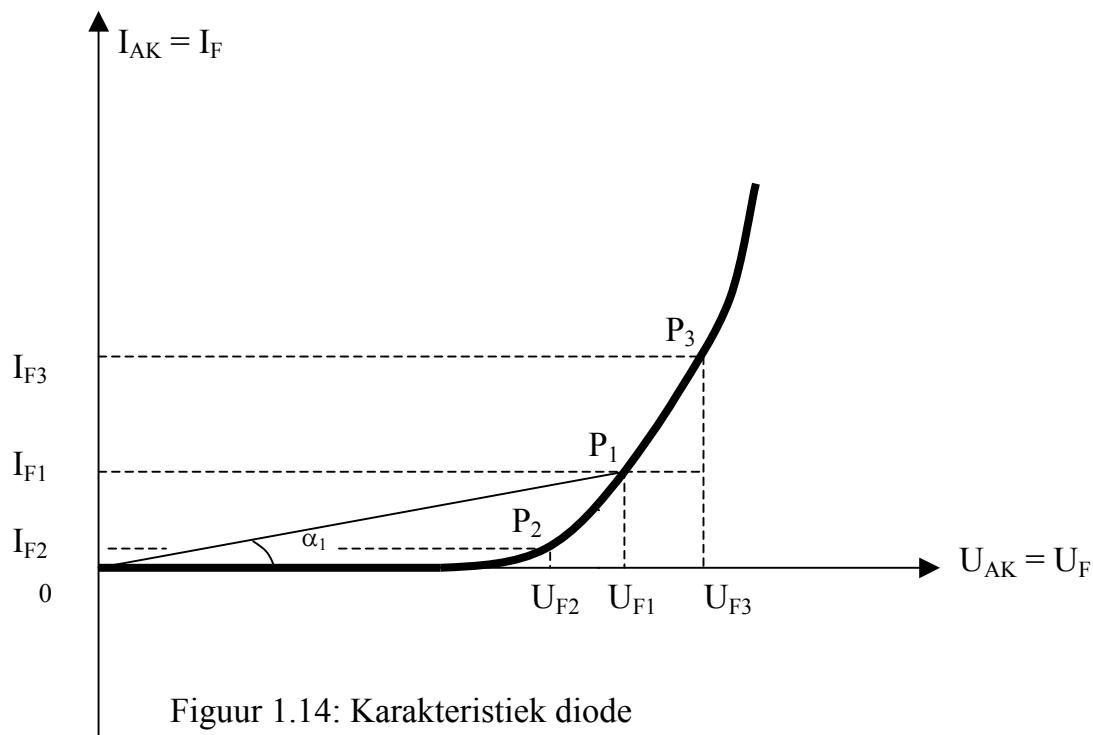
Bij het aangelegde somsignaal, hoort er een DC-instelspanning U . Bij het aanleggen van deze U , ontstaat de instelstroom I (dit is de DC-stroom van waaruit er eventueel stroomvariaties vertrekken). Bij de gelijkspanning U hoort de gelijkstroom I .

Nu is de statische weerstand $R_D = U/I$.

5: Diodeweerstand bij voorwaarts gepolariseerde diode

Na in de voorgaande paragraaf algemene uitleg verstrekt te hebben in verband met de begrippen statische en dynamische weerstand, zullen we in de huidige paragraaf de statische en de dynamische weerstand van de voorwaarts gepolariseerde diode bestuderen.

Beschouw een voorwaarts gepolariseerde diode met gegeven diodekarakteristiek:



Figuur 1.14: Karakteristiek diode

5.1: De statische weerstand

Bij het aanleggen van een gelijkspanning U_{F1} loopt er een gelijkstroom I_{F1} door de diode (of omgekeerd indien een I_{F1} door de diode gestuurd wordt, staat er een spanning U_{F1} over). Dit betekent dat de diode ingesteld is in het werkpunt (of rustpunt, instelpunt, DC-punt, statisch punt, ...) P_1 van de grafiek.

In het werkpunt P_1 (dus bij diodespanning U_{F1} en diodestroom I_{F1}) vertoont de diode een statische weerstand (= weerstand voor DC-signalen) R_{D1} .

Deze statische weerstand $R_{D1} = U_{F1}/I_{F1} = 1/\text{tg}\alpha_1$.

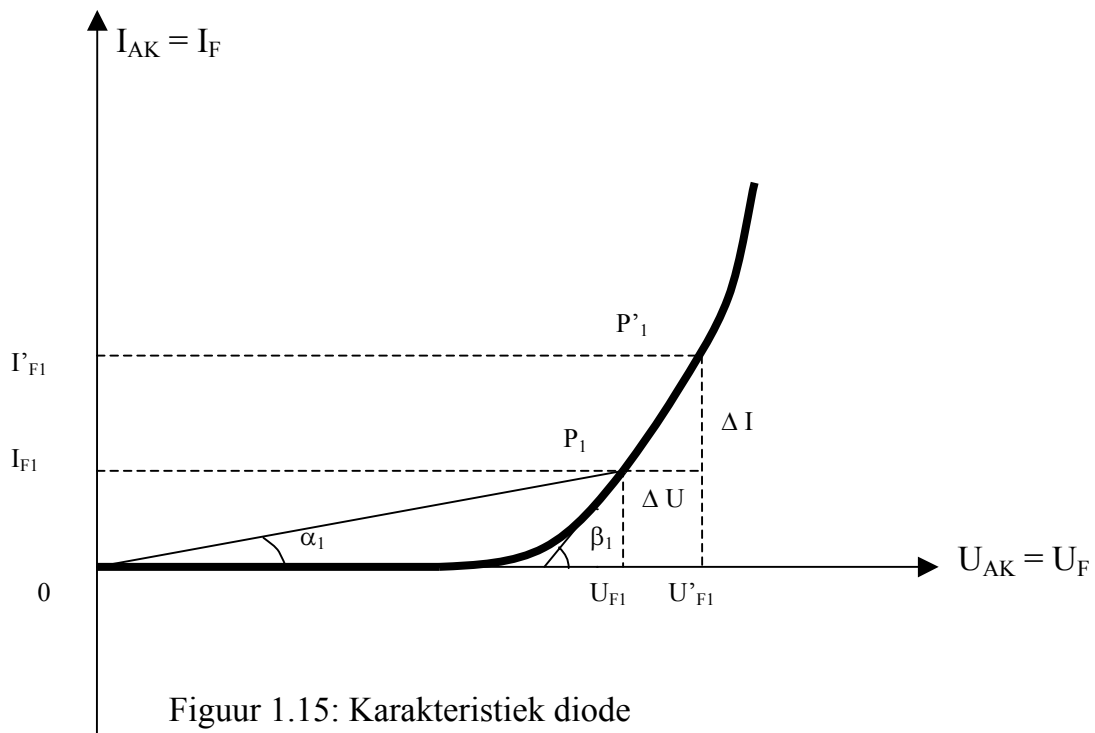
Hierbij is (zie Figuur 1.14) α_1 de hoek tussen de rechte OP_1 en de horizontale.

Indien het instelpunt bijvoorbeeld overeen stemt met een spanning $U_{F1} = 0,7 \text{ V}$ en een stroom $I_{F1} = 0,01 \text{ A} = 10 \text{ mA}$, dan is $R_{D1} = U_{F1}/I_{F1} = 70 \Omega$.

Het is belangrijk op te merken dat de diodeweerstand R_D geen constante is. R_D is afhankelijk van het toegepaste werkpunt P (m.a.w. van de toegepaste diodespanning U_F en diodestroom I_F). Inderdaad, in werkpunt P_2 (diodespanning U_{F2} en diodestroom I_{F2}) zal de diodeweerstand R_{D2} veel groter zijn dan R_{D1} . In werkpunt P_3 is R_{D3} dan weer kleiner dan R_{D1} . Verklaar dit duidelijk en ga na hoe α en $1/\text{tg}\alpha$ evolueren bij een verandering van P. Meer specifiek, vergelijk $1/\text{tg}\alpha_1$, $1/\text{tg}\alpha_2$ en $1/\text{tg}\alpha_3$. Hierbij zijn respectievelijk α_1 , α_2 en α_3 de hoeken tussen de rechten OP_1 , OP_2 , OP_3 en de horizontale.

Het besluit is dat de statische weerstand R_D steeds groter wordt naarmate P dichter bij de oorsprong ligt. R_D daalt daarentegen zeer snel als U_F de BPV overschrijdt. Bij een grote I_F heeft R_D een lage waarde.

5.2: De dynamische weerstand



Figuur 1.15: Karakteristiek diode

R_d wordt de “weerstand voor de AC-signalen” genoemd. Natuurlijk moeten de AC-signalen gesuperponeerd zijn op de gepaste DC-waarden. Deze voorwaarde wordt

zelden of nooit expliciet herhaald, men gaat er automatisch van uit dat de voornoemde superponering aanwezig is. De term superponeren is uitgelegd in Paragraaf 4 van het huidige hoofdstuk.

We beschouwen de diode in het werkpunt P_1 (diodespanning U_{F1} en diodestroom I_{F1}) zoals hierboven aangegeven in Figuur 1.15. Stel nu dat een AC-spanning met amplitude (piekwaarde of grootte) ΔU gesuperponeerd wordt op de aangelegde DC-spanning U_{F1} . De diodespanning U_F varieert dan vanuit de rustwaarde U_{F1} tot de eindwaarde $U_{F1} + \Delta U = U'_{F1}$ (de variatie is positief verondersteld). Door de spanningsvariatie met grootte ΔU (van U_{F1} tot U'_{F1}) varieert de diodestroom I_F nu van de DC-rustwaarde I_{F1} tot de eindwaarde I'_{F1} . Dit betekent dat er een variatie in de diodestroom met grootte ΔI ontstaat.

Als gevolg van de spanningsvariatie ΔU (of AC-spanningscomponent met amplitude ΔU) ontstaat een stroomvariatie met grootte ΔI (of AC-stroomcomponent met amplitude ΔI). Voor de op U_{F1} en I_{F1} gesuperponeerde AC-signalen vertoont de diode een “AC-weerstand” R_{d1} .

Deze dynamische weerstand $R_{d1} = \Delta U / \Delta I = 1 / \text{tg} \beta_1$.

De hoek β_1 is aangeduid op Figuur 1.15. Het is de hoek tussen de raaklijn van de diodekarakteristiek in het punt P_1 en de horizontale.

Hierbij vertrekken ΔU en ΔI vanuit de rustwaarden U_{F1} en I_{F1} . Stel bijvoorbeeld dat $U_{F1} = 0,7 \text{ V}$ en dat $I_{F1} = 0,01 \text{ A} = 10 \text{ mA}$. Indien verder een $\Delta U = 0,025 \text{ V}$ aanleiding geeft tot een $\Delta I = 8 \text{ mA}$ dan is $R_{d1} = \Delta U / \Delta I \cong 3,12 \Omega$.

5.3: Opmerkingen in verband met de dynamische weerstand

Herinnert u dat de statische weerstand geen constante was, deze was afhankelijk van het werkpunt. Welnu, een zelfde opmerking is geldig voor de dynamische weerstand. De dynamische weerstand R_d is geen constante. De dynamische weerstand R_d is afhankelijk van het werkpunt P .

Ga zelf na dat een zelfde ΔU een steeds grotere ΔI veroorzaakt naarmate P verder van de oorsprong gelegen is. Bij een werkpunt verder van de oorsprong gelegen neemt de hoek β toe. Dit betekent dat R_d lager is indien de DC-instelstroom I_F hoger is.

Tijdens de hiervoor beschouwde variaties van U_{F1} naar U'_{F1} en van I_{F1} naar I'_{F1} wordt een stukje diodekarakteristiek doorlopen van P_1 naar P'_1 . Dit stukje diodekarakteristiek is duidelijk geen rechte (geen lineair verloop). Dit laatste heeft als gevolg dat de stroomvariaties niet perfect gelijkvormig zijn met de spanningsvariaties. Er treedt vervorming op. Indien bijvoorbeeld de spanningsvariatie zuiver sinusoidaal is, dan zal de stroomvariatie van de zuivere sinus afwijken.

De hierboven beschreven vervorming hangt samen met het feit dat R_d verandert tijdens de beschouwde variaties (alle werkpunten tussen P_1 en P'_1 worden doorlopen).

Voortaan zullen we dan ook eisen dat de toegepaste spannings- en stroomvariaties zeer klein zijn.

Dus ΔU is veel kleiner dan U_{F1} en ΔI is veel kleiner dan I_{F1} . Dit betekent dat slechts een klein deeltje van de totale diodekarakteristiek doorlopen wordt en dat deze kleine stukjes als een quasi-rechte beschouwd kunnen worden.

Dit laatste betekent meteen dat Figuur 1.15 absoluut niet op schaal getekend is en dus in zekere zin misleidend is. Het feit dat ΔU en ΔI in voorgaande figuren relatief groot getekend zijn is enkel gebeurd omwille van de duidelijkheid van de figuur. Dit is dus geen fysische realiteit.

Dit alles betekent dat R_d de diodeweerstand is voor kleine, op een geschikte DC gesuperponeerde, AC-waarde. Meestal worden de voorgenoemde eisen niet expliciet vermeld. Men veronderstelt automatisch dat deze voldaan zijn. R_d wordt kortweg de “diodeweerstand voor AC-signalen genoemd”.

5.4: Berekening van de dynamische weerstand

We weten ondertussen reeds dat $R_d = \Delta U / \Delta I$ waarbij die variaties ΔU en ΔI voldoende klein zijn. In het limietgeval betekent dit dat de variaties naar nul naderen.

Er geldt dan ook dat $R_{dl} = \Delta U / \Delta I = dU_F / dI_F = dU_{AK} / dI_{AK}$.

In Paragraaf 2.1 hebben we de relatie tussen de diodestroom I_{AK} en de diodespanning U_{AK} gezien. Aangezien we I_{AK} uitgedrukt hebben in functie van U_{AK} en niet omgekeerd is het eenvoudiger om $1/R_{dl} = dI_{AK} / dU_{AK}$ te berekenen.

Bij een ideale PN-junctie (op kamertemperatuur en $U_{AK} \gg 0,026$ V) geldt met een goede benadering dat

$$I_{AK} = I_S e^{U_{AK} / 0,026}$$

Dit heeft tot gevolg dat $1/R_d = dI_{AK} / dU_{AK} = I_{AK} / 0,026$. In deze uitdrukking is R_d uitgedrukt in Ω , I_{AK} in A en die 0,026 is eigenlijk 0,026 V.

In plaats van te schrijven $R_d = 0,026 / I_{AK}$ met I_{AK} uitgedrukt in A, gebruikt men ook vaak de uitdrukking

$$R_d = \frac{26}{I_{AK}} = \frac{26}{I_F}$$

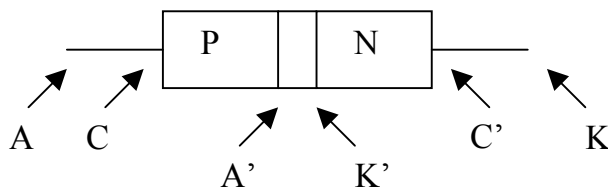
In dit laatste geval is de instelstroom $I_{AK} = I_F$ uitgedrukt in mA en niet in A. Vergeet niet dat de formule enkel geldig is indien $T_j \cong 300K$ en $U_F \gg 0,026V$.

Uit de bovenstaande formules blijkt duidelijk dat R_d daalt naarmate de ingestelde diodestroom I_F stijgt. Dit resultaat, welke we nu via formules bekomen hebben, bevestigt trouwens onze eerdere waarnemingen uit Paragraaf 5.3.

Vergeet tenslotte niet dat de statische weerstand R_D en de dynamische weerstand R_d niet enkel een verschillende betekenis hebben doch dat ze ook totaal verschillend zijn in waarde. Een rekenvoorbeeld kan dit illustreren. Bij een DC-instelstroom $I_F = 1 \text{ mA}$ wordt R_d gelijk aan 26Ω . Dit terwijl in hetzelfde werkpunt ($I_F = 1 \text{ mA}$ en $U_F \cong 0,6V$) de statische weerstand $R_D = 0,6V/0,001A = 600\Omega$ bedraagt.

5.5: De dynamische weerstand bij een praktische diode

Het is nodig om te beseffen dat $R_d = 26/I_F$ alleen de dynamische weerstand van een ideale PN-junctie geeft. Dit is de zeer dunne grenszone tussen het N-materiaal en het P-materiaal waar de eigenlijke diodewerking plaatsvindt (tussen de punten A' en K').



Figuur 1.16: De praktische diode

Dit betekent dat $R_d = 26/I_F$ de weerstand tussen A' en K' geeft en niet de weerstand tussen de werkelijke aansluitpunten A en K.

Tussen A' en A en tussen K' en K treden extra weerstanden op. Dit zijn de weerstanden van het P-materiaal en het N-materiaal (tussen A' en C en ook tussen K' en C'), de weerstanden tussen de aansluitdraadjes en het halfgeleidermateriaal en tenslotte nog de weerstanden van de aansluitdraadjes (tussen C' en K en tussen C en A) zelf.

De totale vervangingsweerstand van alle hier opgesomde extra-weerstanden noteren we als R_S . Dit betekent dat de totale dynamische weerstand van de praktische diode (tussen de punten A en K) gelijk is aan $R_S + 26/I_F$.

“Zware” diodes (dus diodes met een hoge I_{Fmax}) hebben overal een ruime doorsnede (waarom is dat nodig?) en hebben bijgevolg een lage R_S (0,1 Ω of nog minder).

Bij “kleinsignaal”-diodes (met kleine I_{Fmax} van bijvoorbeeld 200mA) ligt R_S vaak rond de 1 Ω . Voor kleine instelstromen (hoogstens enkele mA) blijft $26/I_F$ veel groter dan R_S zodat R_S verwaarloosd kan worden. R_S is echter helemaal niet meer verwaarloosbaar bij grote instelstromen.

Controleer dit zelf door een kleinsignaaldiode in beschouwing te nemen met een weerstand $R_S = 1 \Omega$ en deze in te stellen op stroomwaarden $I_F = 1 \text{ mA}$, 2 mA, 5 mA en 26 mA.

We komen tot de conclusie dat voor kleine I_F -waarden ($I_F \ll I_{Fmax}$ van de diode) $R_S \ll 26/I_F$. In dat geval geldt bij benadering dat de dynamische weerstand van de praktische diode ongeveer gelijk is aan $26/I_F$ (waarbij dus I_F uitgedrukt is in mA).

6: Equivalent AC-schema van een voorwaarts gepolariseerde diode

Teneinde het berekenen en simuleren van elektronische schema's te vereenvoudigen of mogelijk te maken worden halfgeleiderelementen zoals diodes vaak vervangen door een equivalent schema.

In de huidige paragraaf zullen we nagaan hoe het AC-gedrag van een voorwaarts gepolariseerde diode benaderd kan worden door een equivalent schema die opgebouwd is uit weerstanden, zelfinducties en capaciteiten.

Hoewel een dergelijk equivalent schema slechts een benadering is van de realiteit laten ze meestal toe voldoende nauwkeurige resultaten te bekomen.

6.1: Onderdelen van het AC-schema

In functie van wat we in Paragraaf 5.5 zagen, bestaat het AC-schema van een diode uit de serieschakeling van R_S en $26/I_F$.

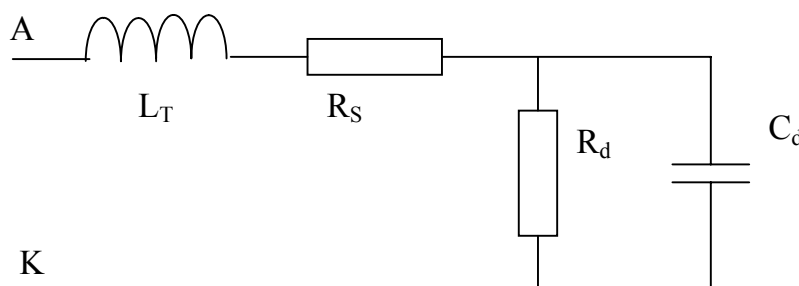
Bij het hernemen van de Figuur 1.16, blijkt dat de elementen tussen A' en A (en ook tussen K' en K) niet enkel een weerstand hebben. Er is namelijk ook een zelfinductie aanwezig. Het is inderdaad zo dat zelfs een recht stuk geleider een zekere (geringe) zelfinductie L vertoont. Hoewel deze L onder meer afhangt van de doorsnede van de geleider, is de grootte-orde 10 nH per cm draadlengte. Voor de gebruikelijke lengtes van de diode-aansluitdraadjes (enkele mm tot enkele cm) zal de totale zelfinductie L_T tussen vijf en enkele tientallen nH bedragen.

Volledigheidshalve moet het equivalent schema dan ook aangevuld worden met een zelfinductie L_T in serie met R_S (in een zuivere serieschakeling speelt de volgorde van de getekende elementen geen rol).

De halfgeleiderfysica toont dat een voorwaarts gepolariseerde junctie ten slotte ook nog een capaciteit C_d (de zogenaamde diffusiecapaciteit of junctiecapaciteit) vertoont. Deze junctiecapaciteit staat tussen A' en K' . Dit betekent dat C_d parallel staat met R_d . Met andere woorden, het equivalent schema moet voorzien worden van een condensator C_d die parallel staat met $R_d = 26/I_F$.

Deze C_d is afhankelijk van de ingestelde U_F en I_F maar zal voor de meeste kleinsignaal-diodes tussen enkele tientallen en enkele honderden pF gelegen zijn (neem C_d bijvoorbeeld 200 pF).

Voor voldoende kleine AC-signalen die op een DC-instelwaarde gesuperponeerd zijn, gedraagt een voorwaarts gepolariseerde diode zich tussen haar praktische aansluitpunten A (anode) en K (kathode) identiek aan het onderstaand netwerk.

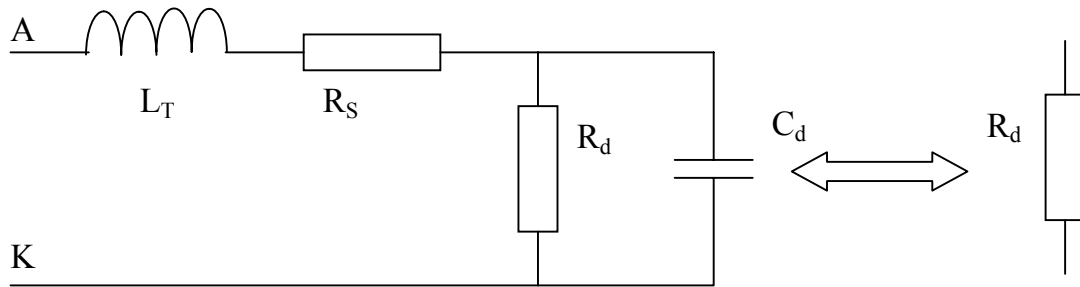


Figuur 1.17: Equivalent schema van de diode

Dit netwerk met R_d , R_S , L_T en C_d noemt men het “equivalent AC-schema” van de voorwaarts gepolariseerde diode. Voor voornoemde AC-signalen vertoont de diode een impedantie Z_{AK} die de vervangingsimpedantie is vanuit A en K gezien. Hoe een dergelijke vervangingsimpedantie berekend kan worden is behandeld in de eerste kandidatuur en kan onder meer geraadpleegd worden het boek Wisselstroomtheorie van M.A.J. op 't Roodt.

6.2: Vereenvoudigd equivalent schema

Het is belangrijk om op te merken dat het bovenstaande vervangingsschema van Figuur 1.17 kan vereenvoudigd worden indien de frequentie van het aangelegde AC-signaal voldoende klein is. Inderdaad, tot aan frequenties van hoogstens 20 kHz (zoals in principe in alle elektronische audio-toestellen het geval is) kan dit schema zover vereenvoudigd worden totdat uitsluitend de dynamische weerstand R_d overblijft. Dit is weergegeven in Figuur 1.18.



Figuur 1.18: Vereenvoudigd equivalent schema

Inderdaad, de impedantie van L_T ($= 20 \text{ nH}$) (notatie: X_{LT}) bedraagt hoogstens $2,5 \text{ m}\Omega$ en de impedantie van C_d ($= 200 \text{ pF}$) (notatie: X_{Cd}) bedraagt minstens $39 \text{ k}\Omega$.

Controleer zelf die waarden indien u weet dat $X_{LT} = 2\pi f L_T$ en $X_{Cd} = 1/2\pi f C_d$. In de parallelschakeling van R_d met C_d kan C_d geschrapt worden want $X_{Cd} \gg R_d$. In de dan nog overblijvende serieschakeling van L_T , R_S en R_d kunnen achtereenvolgens R_S en L_T geschrapt worden omdat hun impedanties veel kleiner zijn dan R_d .

Dit alles betekent dat voor kleine, laagfrequente AC-signalen (welke gesuperponeerd zijn op een DC) de voorwaarts gepolariseerde diode zich tussen A en K als een weerstand R_d gedraagt. Let er wel op dat deze weerstandswaarde R_d afhangt van de door de diode gestuurde DC-instelstroom.

Dit betekent dat een diode bruikbaar is als een regelbare weerstand voor kleine AC-signalen. Inderdaad, regelen we I_F van bijvoorbeeld $1 \text{ }\mu\text{A}$ tot 1 mA dan verandert de diodeweerstand van $26 \text{ k}\Omega$ tot $26 \text{ }\Omega$. Verklaar dit.