



# Inhoudsopgave

7	Halfgeleiding, halfgeleiderdioden en enkele toepassingen.....	3
7.1	Wat leer je in dit hoofdstuk.....	3
7.2	Halfgeleidermateriaal.....	3
7.2.1	Inleiding.....	3
7.2.2	Kristalstructuur .....	4
7.2.3	Verplaatsing van lading in de kristalstructuur .....	5
7.2.4	P- en N-materiaal; PN-overgang.....	6
7.2.5	De halfgeleiderdiode .....	9
7.3	Enkele eigenschappen en toepassingen van dioden.....	9
7.3.1	Inleiding.....	9
7.3.2	Lekstroom en werkt temperatuur.....	10
7.3.3	Gelijkrichting en dissipatie .....	10
7.3.4	Diodecapaciteit .....	11
7.3.5	Zenerdioden .....	11
7.3.6	Licht emitterende dioden (LED's).....	11
7.3.7	Schemasymbolen.....	12
7.4	Gelijkrichting met dioden.....	13
7.4.1	Van wisselstroom/-spanning naar gelijkstroom/-spanning .....	13
7.4.2	Enkelzijdige gelijkrichting.....	14
7.4.3	De minimale sperspanning van de gelijkrichtdiode.....	16
7.4.4	Tweezijdige (dubbelzijdige, dubbelfasige) gelijkrichting .....	17
7.4.5	Afvlakfilters .....	19
7.5	Capaciteitsdioden .....	19
7.6	Zenerdioden .....	21
7.7	Verschillende soorten dioden op een plaatje.....	25
7.8	Opgaven .....	27
7.8.1	Opgave 7-1.....	27
7.8.2	Opgave 7-2.....	28
7.8.3	Opgave 7-3.....	29
7.8.4	Opgave 7-4.....	30



7.8.5	Opgave 7-5.....	31
7.8.6	Opgave 7-6.....	32
7.8.7	Opgave 7-7.....	33
7.9	Uitwerkingen van de opgaven.....	34
7.9.1	Uitwerking van Opgave 7-1 .....	34
7.9.2	Uitwerking van Opgave 7-2 .....	35
7.9.3	Uitwerking van Opgave 7-3 .....	36
7.9.4	Uitwerking van Opgave 7-4 .....	37
7.9.5	Uitwerking van Opgave 7-5 .....	38
7.9.6	Uitwerking van Opgave 7-6 .....	39
7.9.7	Uitwerking van Opgave 7-7 .....	40



## 7 Halfgeleiding, halfgeleiderdioden en enkele toepassingen

### 7.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

We gaan terug naar de bouw van atomen, waarmee we in Hoofdstuk 3 al kennis hebben gemaakt. Het gaat nu vooral om elementen die vier elektronen in hun buitenste schil hebben. Kristallen van zulke atomen geleiden niet, maar als je ze iets verontreinigt met bepaalde elementen, blijken ze bijzondere geleidingseigenschappen te krijgen. Die zijn samen te vatten onder de term *halfgeleiding*. Daarvan wordt in de elektronica op listige wijze gebruik gemaakt bij dioden en transistoren.

In dit hoofdstuk beperken we ons tot dioden. Daarmee hebben we in Hoofdstuk 4 al oppervlakkig kennis gemaakt. We zagen dat ze stroom maar in één richting geleiden. We zullen in dit hoofdstuk zien dat dit grotendeels, maar niet altijd waar is. Dioden die in sperrichting toch geleiden en daarbij bijzondere eigenschappen hebben, behoren tot de vaste trukendoos van de elektronicus en de zelfbouwende zendamateur. Bij die trukendoos horen ook lichtgevende dioden en dioden die zich als variabele condensator kunnen gedragen. We beginnen aan de meer kleurrijke kanten van de elektronica.

### 7.2 Halfgeleidermateriaal

#### 7.2.1 Inleiding

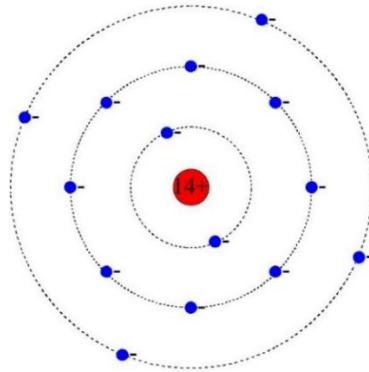
In hoofdstuk 3 hebben we kennis gemaakt met geleiders en isolatoren. Geleiders hebben weinig elektronen in hun buitenste elektronenschil. Die elektronen kunnen van atoom naar atoom naar atoom springen. Dat is geleiding, zagen we in Hoofdstuk 3. De buitenste elektronenschil is bij geleiders dus eigenlijk een los-vast geval. Elementen met meer elektronen in de buitenste schil en moleculaire stoffen waarin de samenstellende elementen samen een stabiele gemeenschappelijke buitenste elektronenschil maken, zijn isolatoren.

Enkele elementen hebben met vier elektronen in hun buitenste schil een tussenpositie. Ze vormen kristallen waarin de atomen verbonden zijn doordat ze de elektronen van hun buitenste schil delen en zo een gezamenlijke stabiele buitenste schil van 8 elektronen vormen. Het gaat in volgorde van toenemende atoomgrootte om koolstof (symbool C), silicium (symbool Si) en germanium (symbool Ge).

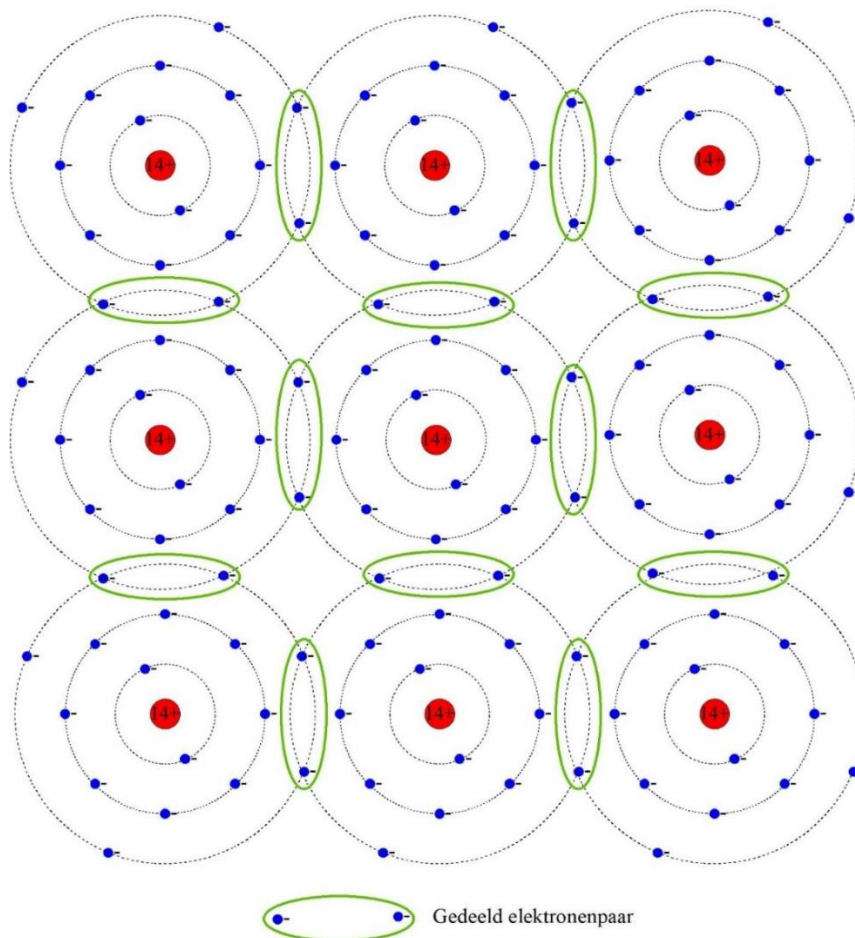
Koolstof bestaat in twee kristallijne vormen: grafiet en diamant. Grafiet wordt onder meer gebruikt in potloodstiften en koolborstels in elektromotoren. Het is een zacht mineraal en een vrij goede geleider. Diamant is het hardste mineraal dat we kennen en een isolator. Ook zuiver silicium is een isolator. Zuiver germanium ook, al isoleert het minder goed dan silicium.

## 7.2.2 Kristalstructuur

Figuur 7.2-1 toont een Si-atoom in twee dimensies. Een Si-kristal bestaat uit Si-atomen die met hun buren een gezamenlijke buitenste elektronenschil maken, waarin in totaal 8 elektronen zitten (Figuur 7.2-2). Diamant en Ge hebben eenzelfde opbouw. Grafiet, dat wel geleidt, zit net iets anders in elkaar.



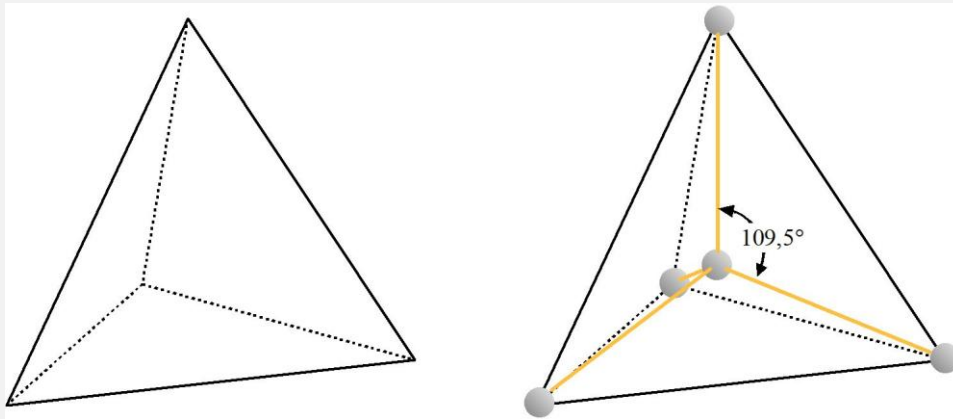
Figuur 7.2-1. Tweedimensionale afbeelding van een atoom van silicium (Si)



Figuur 7.2-2. Kristalrooster van silicium, tweedimensionaal afgebeeld. Gedeelde elektronenparen zijn groen omrand. Het middelste atoom heeft samen met de buren een complete elektronenschil van 8 stuks.

***Voor de liefhebbers, géén examenstof!***

In een siliciumkristal zijn de atomen in werkelijkheid gerangschikt in tetraëders. Een tetraëder is een driedimensionale figuur, opgebouwd uit vier driehoekige zijvlakken. De goed-Nederlandse term is dan ook *viervlak*. Een regelmatig viervlak is opgebouwd uit vier gelijkzijdige driehoeken (Figuur 7.2-3 links).



*Figuur 7.2-3. Regelmatig viervlak (links) en de manier waarop siliciumatomen in een viervlakstructuur zijn gerangschikt (rechts).*

Eén atoom dat we hier het *centrale atoom* noemen (geen officiële term), zit in het zwaartepunt van het viervlak, de andere vier op de hoekpunten. De verbindingslijnen tussen het centrale atoom en de andere vier hebben onderlinge hoeken van  $109,5^\circ$ . Elk atoom op een hoekpunt is op zijn beurt het centrale atoom in een ander viervlak. En zo gaat dat in een 100% zuiver kristal door tot in alle uithoeken.

Door hun vier buitenste elektronen te delen, bootsen siliciumatomen in een kristalrooster als het ware een stabiele buitenste schil van 8 elektronen na. Hoewel een derde schil eigenlijk 18 elektronen zou moeten tellen, is 8 stuks ook een stabiele situatie. Een siliciumkristal kun je daarom als een heel groot molecuul beschouwen. Er is daarin voor elektronen eigenlijk geen aanleiding om van het ene naar het andere atoom te springen.

### 7.2.3 Verplaatsing van lading in de kristalstructuur

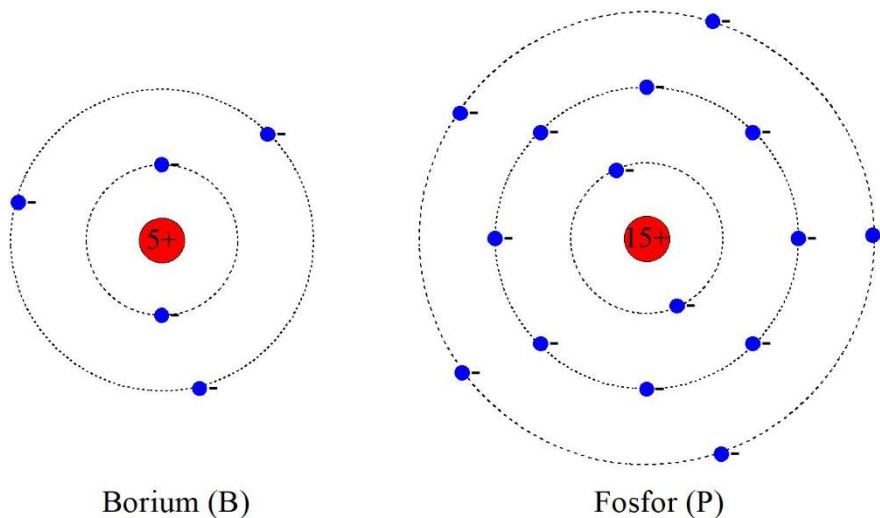
Hoe krijg je verplaatsing van lading, ofwel geleiding in een kristalstructuur die uit zichzelf niet geleidt? Onder invloed van een voldoende sterk elektrisch veld kunnen elektronen losraken en van atoom naar atoom springen. Dat noemt men halfgeleiding. In tegenstelling tot de weerstand in metalen die bij hogere temperaturen toeneemt (PTC, zie hoofdstuk 3), neemt de weerstand van halfgeleiders bij hogere temperatuur juist af (NTC, zie hoofdstuk 3).

Die halfgeleiding kunnen we bevorderen door het kristalrooster een beetje te verstoren. Dat kan door een stof met 5 of 3 elektronen in de buitenste schil op te nemen in het kristalrooster. Maak je van die doelbewust aangebrachte *verontreiniging* geen al te grote voorstelling. Denk aan een orde van grootte van 1 op 100 miljoen atomen. Dat verklaart meteen de witte allesomhullende pakken van mensen in een halfgeleiderfabriek: ongecontroleerde verontreiniging is absoluut uit den boze!

Bij opname van een element met vijf elektronen in de buitenste schil is er per verontreinigend atoom 1 elektron dat niet in het systeem past. Zo'n 'verweesd' elektron blijkt zich vrij gemakkelijk door het kristalrooster te kunnen verplaatsen.

Een tegengestelde verstoring bestaat uit het toevoegen van atomen met 3 elektronen in de buitenste schil. Dan heeft het rooster op een aantal plaatsen een elektron te weinig. Dat noemen we meestal een *gat*. Gaten blijken zich net zo gemakkelijk te kunnen verplaatsen als 'verweesde' elektronen.

Voorbeelden van verontreinigende stoffen zijn borium (symbool B) met een buitenste schil van 3 elektronen) en fosfor (symbool P) met een buitenste schil van 5 elektronen (Figuur 7.2-4).



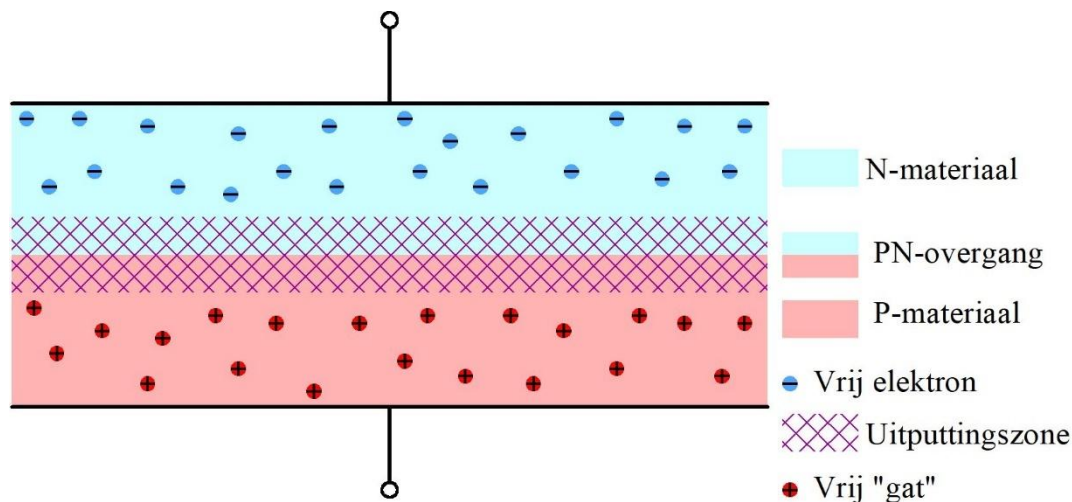
Figuur 7.2-4. Boriumatoom (links) en fosforatoom (rechts) in 2-D.

Doordat de verontreinigingen elektrisch neutraal zijn, is het halfgeleiderkristal ook met verontreinigingen ook elektrisch neutraal.

#### 7.2.4 P- en N-materiaal; PN-overgang

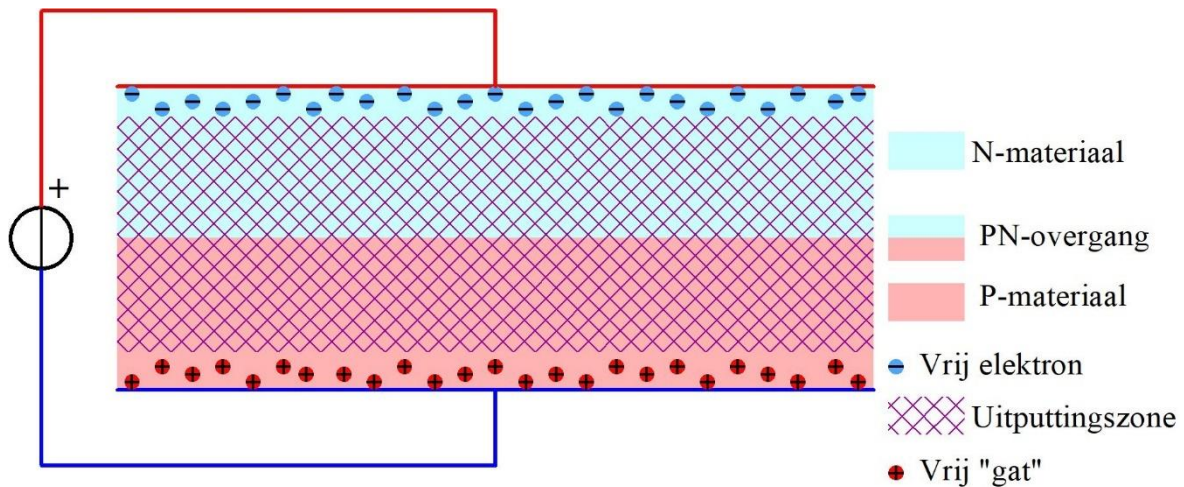
Halfgeleidermateriaal met een *doting* (een deftig woord voor kunstmatige verontreiniging) van een element met 3 elektronen in de buitenste schil zoals B, dus met *gaten*, heet *P-materiaal*. Als het materiaal Si is, wordt het meestal *P-silicium* genoemd. Materiaal met een dotering van een element met 5 elektronen in de buitenste schil heet *N-materiaal* en in het geval van Si, *N-silicium*.

Daar hebben we pas iets aan als een deel van een Si-kristal P-silicium is en een aangrenzend deel N-silicium. De grens is een zogenoemde PN-overgang of PN-*junctie*. Langs de junctie ontstaat een zone zonder ladingdragers, de *uitputtingszone*. De oorzaak is dat elektronen en gaten elkaar aantrekken. Op de PN-junctie komen ze elkaar tegen. Elektron en gat neutraliseren elkaar. Dat heet *recombinatie*. Als het N-materiaal zo elektronen kwijtraakt, wordt het positief geladen. Tegelijkertijd krijgt het P-materiaal op dezelfde manier elektronen extra en daarmee een negatieve lading. Daardoor stoot het N-materiaal gaten af en het P-materiaal elektronen. Langs de junctie ontstaat zo een zone zonder vrije ladingdragers, de *uitputtingszone* (Figuur 7.2-5).



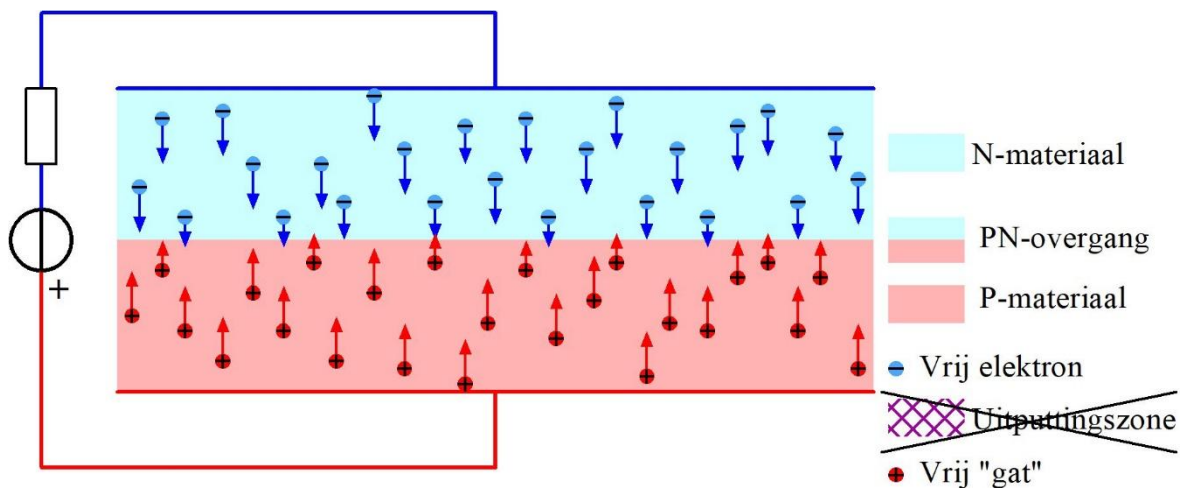
Figuur 7.2-5. Neutrale PN-overgang met uitputtingszone.

De uitputtingszone blokkeert de stroomdoorgang, omdat daar geen *ladingsdragers* -dat is de verzamelnaam voor gaten en elektronen- zijn. Sluiten we over de PN-overgang een spanningsbron aan met de + aan het N-deel en de – aan het P-deel, dan komen de ladingdragers nog verder van de junctie te liggen (Figuur 7.2-6).



Figuur 7.2-6. PN-overgang met de N-kant aan de + en de P-kant aan de – van de spanningsbron. De uitputtingszone is daardoor breder dan in Figuur 7.2-5.

Sluiten we de bron van Figuur 7.2-6 omgekeerd aan, dan trekken we de ladingsdragers naar de PN-overgang en er ontstaat een stroom (Figuur 7.2-7).



Figuur 7.2-7. PN-overgang met de N-kant aan de – en de P-kant aan de +. Er ontstaat geleiding over de junctie. Gaten en elektronen recombineren op de overgang en vanuit de bron worden nieuwe elektronen aangevoerd naar het N-materiaal en afgevoerd uit het P-materiaal. Elektronen afvoeren is hetzelfde als gaten aanvoeren. Daarom staan de rode en de blauwe pijlen in tegengestelde richting.

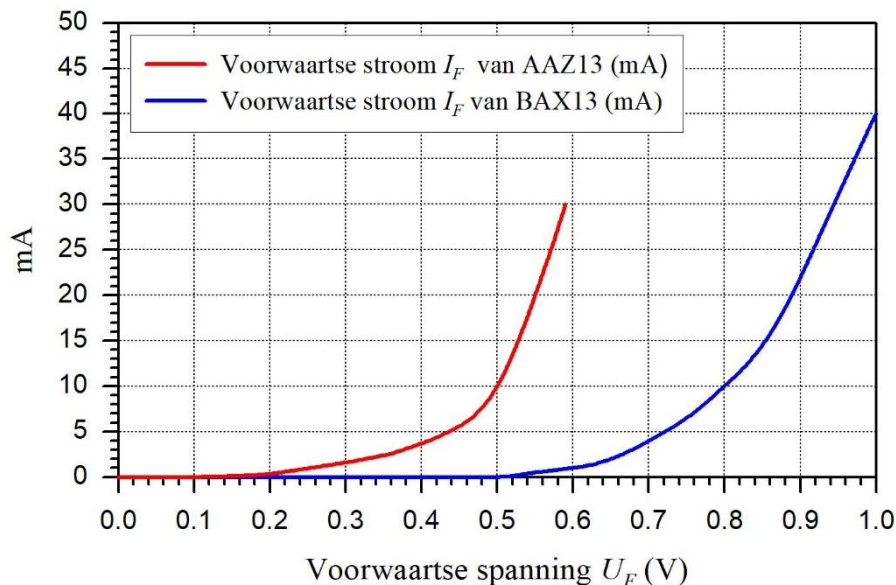
De spanningsbron stuurt elektronen het N-materiaal in. Die recombineren op de overgang met gaten van het P-materiaal. Uit het P-materiaal worden elektronen afgevoerd. Dat is hetzelfde als aanvoer van gaten. Er loopt op die manier een stroom elektronen door de PN-overgang. Die lopen van – naar +. De technische stroomrichting is ook in dit geval van + naar –.

### 7.2.5 De halfgeleiderdiode

Figuur 7.2-5 tot en met Figuur 7.2-7 tonen een ding met een PN-junctie dat stroom maar in één richting geleidt: de *diode*. Die richting heet meestal de *voorwaartse richting* of *doorlaatricting*. Het tegengestelde van de *voorwaartse richting* is de *sperrichting*. Beide namen spreken voor zich.

Toen in Hoofdstuk 4 de diode in deze cursus zijn intrede deed als *vonkblusdiode*, zijn we niet op de werking ingegaan. Nu doen we dat wel. Diode betekent ‘tweeweg’ naar de twee delen waaruit hij bestaat en de bijbehorende twee aansluitingen. De P-aansluiting heet *anode* (dat betekent ‘weg omhoog’). De N-aansluiting heet *kathode* (‘weg omlaag’). De doorlaatricting (technische stroomrichting) is van anode naar kathode. **Daarvoor hebben we het ezelsbruggetje KNAP: Kathode Negatief, Anode Positief.**

Voordat een halfgeleiderdiode geleidt, moet er eerst een kleine spanning in de geleidingsrichting overheen staan. Die is nodig om de uitputtingszone teniet te doen. Bij siliciumdioden is dat ongeveer 0,6 V tot 0,7 V; bij germanium (symbool Ge) ongeveer 0,2 V. Die spanning wordt *drempelspanning* genoemd. Spanning in de doorlaatricting wordt ook wel *voorwaartse spanning* genoemd. De bijbehorende stroom heet *voorwaartse stroom*. Figuur 7.2-8 toont een doorlaatgrafiek voor een Ge- en één voor een Si-diode.



Figuur 7.2-8. Voorwaartse stroom tegen voorwaartse spanning voor de germaniumdiode AAZ13 en de siliciumdiode BAX13 (gegevens: Philips databoek).

## 7.3 Enkele eigenschappen en toepassingen van dioden.

### 7.3.1 Inleiding

In deze paragraaf komt een aantal eigenschappen van dioden aan de orde. De eigenschappen die voor het examen van belang zijn, bespreken we hier kort. In volgende

paragrafen gaan we er uitvoeriger op in. Enkele soorten dioden die voor het examen niet hoeven te worden gekend, noemen we in het kadertje aan het eind van deze paragraaf.

### 7.3.2 Lekstroom en werktemperatuur

We zagen dat een halfgeleiderdiode normaal gesproken maar in één richting stroom doorlaat. Een diode is zo vergelijkbaar met een ventiel. De geleiding in doorlaatrichting begint echter pas als de drempelspanning van ruwweg 0,2 V bij een Ge-diode en 0,6 V bij een Si-diode wordt overschreden. Als we de vergelijking met het ventiel doortrekken, dan is de drempelspanning te vergelijken met de extra druk die nodig is om een ventiel met ventielslangetje te openen als de band wordt opgepompt.

Bij aansluiting in sperrichting blijft een klein lekstroompje vloeien. De grootte ervan hangt sterk af van de uitvoering van de diode, de aangelegde spanning en vooral van de temperatuur. De lekstroom neemt sterk toe bij verhoging van de temperatuur. Bij dioden die bedoeld zijn voor kleine stromen is de lekstroom in het algemeen kleiner dan bij dioden voor grote stromen. Voor Si-dioden is de lekstroom ruwweg 100x zo klein als voor vergelijkbare Ge-dioden.

Als voorbeeld nemen we de Si-diode 1N4148 die voor kleine stromen is bedoeld. Bij een spanning van 20 V in sperrichting wordt door de fabrikant een lekstroom van 25 nA bij een diodetemperatuur van 25°C opgegeven. Die loopt op tot 3 mA bij 100° en tot 50 mA bij 150 °C. Die laatste temperatuur is ongeveer de temperatuur waarbij de bruikbaarheid van siliciumhalfgeleiders ophoudt. Voor Ge is dat al het geval bij ongeveer 80 °C.

### 7.3.3 Gelijkrichting en dissipatie

Afgezien van de lekstroom en bijzondere geleiding in sperrichting die later aan de orde komt, geleidt een diode maar in één richting. Een diode is daardoor in staat, van wisselstroom een vorm van gelijkstroom te maken. Dat noemen we *gelijkrichting*. Die komt in 7.4 aan de orde.

Bij een voorwaartse stroom leidt de drempelspanning tot een klein spanningsverlies over de junctie. Ook heeft een diode altijd een beetje weerstand. In dioden voor kleine stromen, zoals die van de stroom-spanningsgrafieken in Figuur 7.2-8, is het weerstanddeel groter dan in dioden voor grote stromen. Als we de spanning over de diode  $U_D$  noemen en de voorwaartse stroom  $I_F$  ( $F$  van *Forward*), dan geldt voor de dissipatie  $P$  in alle gevallen

$$P = I_F U_D \quad (7.3-1)$$

Als we de weerstand verwaarlozen, dan is  $U_D$  is bij benadering de drempelspanning. Dan geldt voor een Si-diode

$$P \approx I_F \cdot 0,6V \quad (7.3-2)$$

En voor een Ge-diode

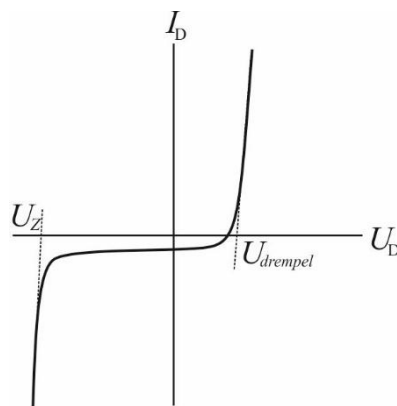
$$P \approx I_F \cdot 0,2V \quad (7.3-3)$$

### 7.3.4 Diodecapaciteit

De uitputtingszone van een PN-overgang geleidt niet. Dat wisten we al. Ze kan daardoor een diëlektricum zijn. Een diode die in sperrichting is aangesloten, kun je dus zien als een (kleine) condensator. In hoofdstuk 4 zagen we dat de capaciteit van een gewone condensator onder meer afhangt van de plaatafstand. In een gesperde diode is de 'plaatafstand' de dikte van de uitputtingszone. Die wordt bepaald door de spanning tussen anode en kathode, zoals we in 7.2 zagen. De diode is daarmee een condensator geworden, waarvan we de capaciteit met een spanning kunnen sturen. Dergelijke dioden staan bekend onder de naam *capaciteitsdiode* of *varicap*, een samentrekking van de woorden *variabel* en *capaciteit*. Over de toepassing hebben we het verderop in dit hoofdstuk.

### 7.3.5 Zenerdioden

Als de spanning over een diode in sperrichting groot genoeg wordt, zal er toch een stroom gaan lopen. De oorzaak is het sterker geworden elektrische veld in de uitputtingslaag. Verschillende processen kunnen ertoe leiden dat dan elektronen losraken van hun atoom en 'op stap' gaan. Zonder maatregelen betekent dat het einde van de diode. Als we zorgen dat de stroom niet te groot wordt, blijft de diode heel en blijft de spanning waarbij de stroom op gang kwam, over de diode staan. Daarvoor geschikte dioden heten *zenerdioden*. Ze worden gebruikt om vaste spanningen te maken. We wijden er verderop in dit hoofdstuk een afzonderlijke paragraaf aan. Figuur 7.3-1 toont een licht geschematiseerde grafiek van het gedrag van een zenerdiode.



Figuur 7.3-1. Doorlaatkarakteristiek van een zenerdiode met diodespanning  $U_D$  en diodestroom  $I_D$ , drempelspanning  $U_{drempel}$  en zenerspanning  $U_Z$ . Op de horizontale as is  $U_D$  in doorlaatrichting rechts van het snijpunt met de verticale as, links daarvan in sperrichting.

### 7.3.6 Licht emitterende dioden (LED's)

LED's zijn alom bekend. Het zijn bijzondere dioden. Ze bestaan niet uit germanium of silicium, maar meestal uit kristallen met gallium, arseen en andere elementen. Bij hun PN-overgang ontstaat bij recombinatie van een elektron en een gat een foton (lichtdeeltje). Afhankelijk van de lichtkleur is de drempelspanning ongeveer 1,7 V (rood)

tot 2,8 à 4,6 V (verschillende soorten LED's die blauw licht uitstralen). Wanneer ze als signaallampje worden gebruikt, moet er vrijwel altijd een weerstand mee in serie worden geschakeld om de stroom binnen de perken te houden. LED's worden ook veel gebruikt in displays en tegenwoordig ook voor verlichtingsdoeleinden. Meer informatie vind je bijvoorbeeld op <https://nl.wikipedia.org/wiki/Led>.

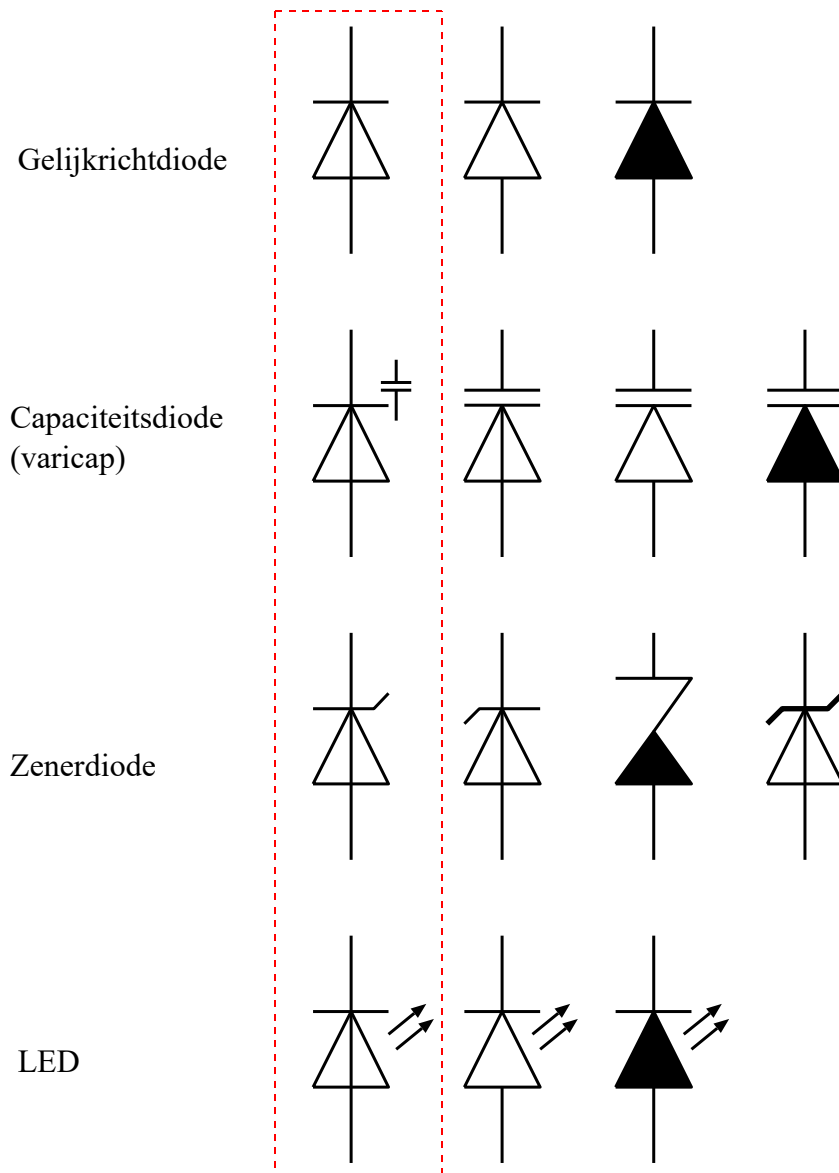
#### Voor de liefhebbers. Géén examenstof!

Behalve gelijkrichtdioden, varicaps en zenerdioden en LED's kennen we onder meer

- **Tunneldioden**; een type diode waarbij over een bepaald traject de stroom bij toenemende spanning afneemt; toepassing bij zeer hoge frequenties; zelden door amateurs. Zie bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/Tunneldiode>.
- **Gunn-dioden**, net als de tunneldiode bekend uit microgolftoepassingen maar anders van opbouw. Zie bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/Gunn-diode>.
- **PIN-dioden**; kunnen dienen als schakelaar tussen zenden en ontvangen, maar ook als sterkteregelaar van HF-signalen (vergelijkbaar met een potmeter en LF-signalen). Zie bijvoorbeeld [https://en.wikipedia.org/wiki/PIN diode](https://en.wikipedia.org/wiki/PIN_diode).
- **Fotodioden**; reageren op licht dat op de PN-junctie valt. Zie bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/Fotodiode>.

### 7.3.7 Schemasymbolen

Figuur 7.3-2 toont genormaliseerde (gestandaardiseerde) schemasymbolen plus een aantal niet genormaliseerde maar wel vrij algemeen gebruikte symbolen.



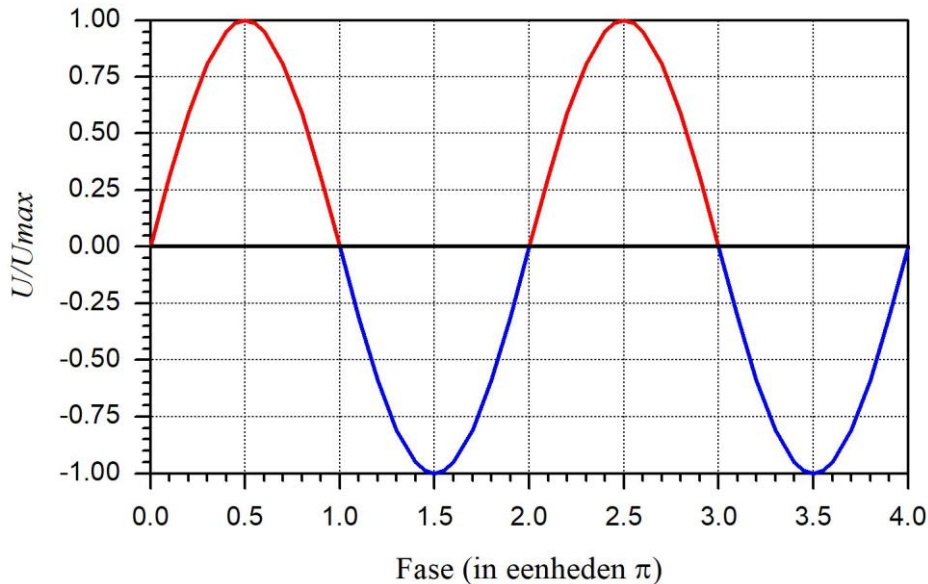
Figuur 7.3-2. Genormaliseerde en andere schemasymbolen voor verschillende dioden. Genormaliseerde symbolen staan links, binnen de rode streepjeslijn. De andere op dezelfde rij zijn veel gebruikte symbolen voor dezelfde soort diode. De doorlaatrichting is steeds van onder naar boven: anode onder, kathode boven.

## 7.4 Gelijkrichting met dioden

### 7.4.1 Van wisselstroom/-spanning naar gelijkstroom/-spanning

Doordat een diode maar in één richting stroom doorlaat, kunnen dioden worden gebruikt om van wisselstroom gelijkstroom te maken. Dat proces heet *gelijkrichting*. Ons lichtnet levert wisselspanning (230 V, 50 Hz). Vrijwel alle elektronische apparatuur, inclusief zenders en ontvangers werkt op gelijkstroom. Als we het lichtnet als energiebron willen gebruiken, is gelijkrichting onmisbaar. Daarvan moet een zendamateur dan ook iets weten. We gaan voor het gemak uit van ideale dioden met een drempelspanning van 0V en  $0 \Omega$  weerstand in voorwaartse richting. In werkelijkheid bestaan die niet, maar om te

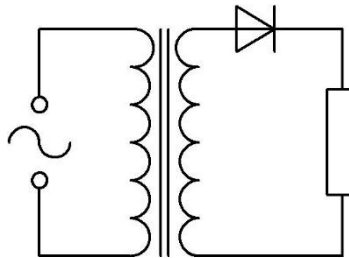
begrijpen wat er gebeurt, zijn drempelspanning en weerstand niet nodig. We beginnen met een sinusvormige wisselspanning (Figuur 7.4-1).



Figuur 7.4-1. Sinusvormige wisselspanning; positieve halve perioden *rood*, negatieve halve perioden *blauw*.

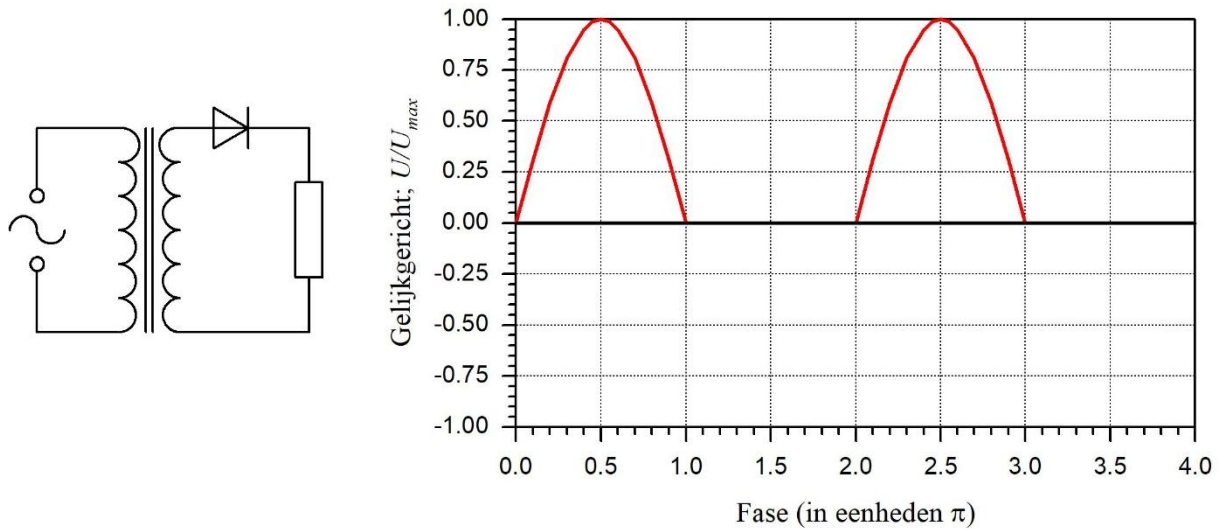
### 7.4.2 Enkelzijdige gelijkrichting

De wisselspanning kan van een transformator worden afgenomen, waarna een diode steeds één halve periode doorlaat en de andere tegenhoudt. Dat is de simpelste gelijkrichtschakeling (Figuur 7.4-2).



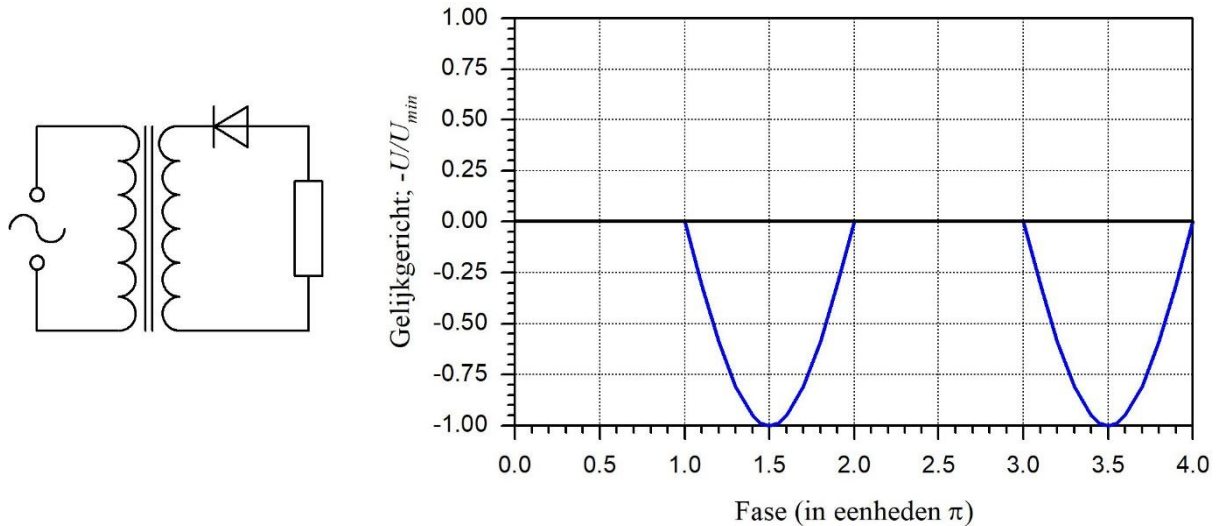
Figuur 7.4-2. Enkelzijdige gelijkrichting met één enkele diode. De weerstand staat symbool voor de schakeling die door de gelijkgerichte spanning wordt gevoed.

Deze vorm van gelijkrichting noemen we *enkelzijdig* of *enkelfasig*, omdat steeds maar één helft van een periode wordt doorgelaten. Het resultaat van dit soort gelijkrichting zien we in Figuur 7.4-3.



Figuur 7.4-3. Spanning over de weerstand na enkelzijdige gelijkrichting. Links de schakeling van Figuur 7.4-2, rechts het resultaat. Ook hier staat de weerstand symbool voor de schakeling die door de gelijkgerichte spanning wordt gevoed.

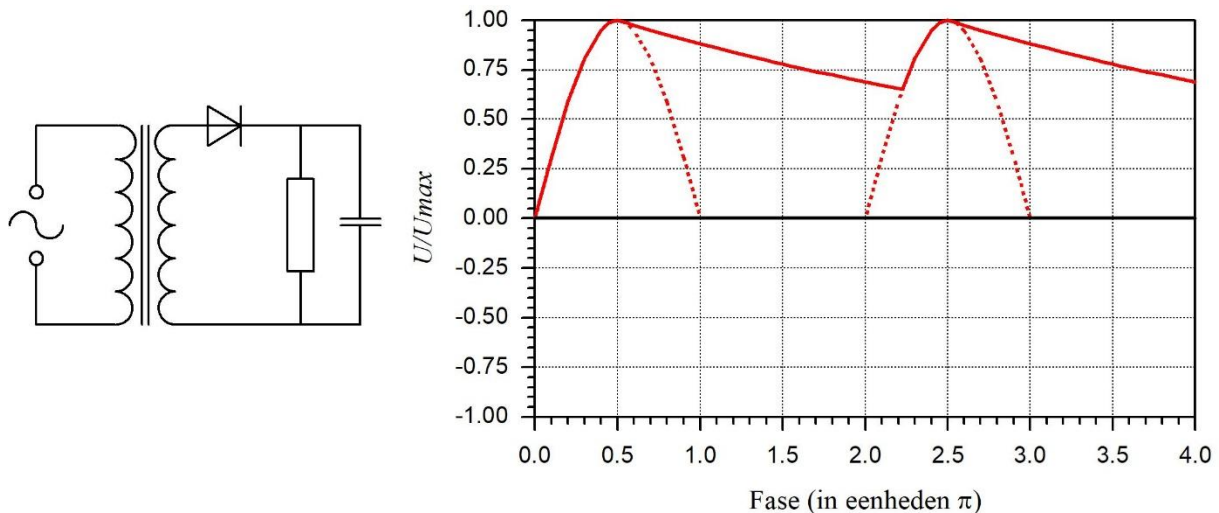
Als de diode in de schakeling van Figuur 7.4-2 wordt omgekeerd, dan worden de negatieve halve perioden doorgelaten en krijgen we het beeld van Figuur 7.4-3 op zijn kop en  $180^\circ = \pi$  opgeschoven (Figuur 7.4-4).



Figuur 7.4-4. Spanning over de weerstand na enkelzijdige gelijkrichting met de diode omgekeerd ten opzichte van Figuur 7.4-3.

We zien in Figuur 7.4-3 en Figuur 7.4-4 een onzuivere wisselspanning met een gelijkspanningsdeel dat precies groot genoeg is om de spanning in Figuur 7.4-3 niet negatief en in Figuur 7.4-4 niet positief te laten worden. In beginsel maakt het niet uit, welke van de twee wordt gebruikt. In de praktijk is het meestal de positieve halve periode.

Zouden we de spanning in deze vorm gebruiken om een zender of ontvanger van gelijkstroom te voorzien, dan zou de 50 Hz van het lichtnet bij de ontvanger als een zware bromtoon uit de luidspreker komen. Bij een zender zou die bromtoon mee worden uitgezonden. Dat is natuurlijk niet de bedoeling. Toevoeging van een condensator (Figuur 7.4-5) geeft verbetering, maar is bijna nooit afdoende. Het verloop van de spanning doet al wat meer aan een gelijkspanning denken. Dat komt doordat de condensator in de tijd tussen de gelijkgerichte halve perioden als ladingreservoir fungeert.



Figuur 7.4-5. Spanning over de weerstand na enkelzijdige gelijkrichting en afvlakking door een condensator. Links de schakeling, rechts het resultaat. Getrokken lijn: het spanningsverloop in deze schakeling. Gestippeld: het spanningsverloop zonder condensator, zoals afgebeeld in Figuur 7.4-3.

Hoe groter de condensator, des te vlakker wordt het verloop van de gelijkspanning. Die condensator heet niet voor niets *afvlakcondensator*. Hoe kleiner het stroomverbruik van de aangesloten schakeling, des te effectiever wordt de afvlakking. Hier gebeurt praktisch hetzelfde als bij de ontlading van een condensator via een weerstand. Dat proces kennen we van hoofdstuk 4. Bij stromen van enige betekenis en condensatoren van enigszins gangbare grootte is deze oplossing weinig effectief. In de sub-paragrafen 7.4.4 en 7.4.5 bespreken we effectievere manieren om zo goed mogelijk van de rimpel op de gelijkgerichte spanning af te komen. Maar eerst nog iets om niet over het hoofd te zien:

### 7.4.3 De minimale sperspanning van de gelijkrichtdiode

Een sperrende gelijkrichtdiode moet bestand zijn tegen een spanning die minstens gelijk is aan 2x de maximale waarde van de wisselspanning. Uit Hoofdstuk 5 weten we dat voor een sinusvormige zuivere wisselspanning geldt

$$U_{max} = U_{eff} \sqrt{2} \quad (7.4-1)$$

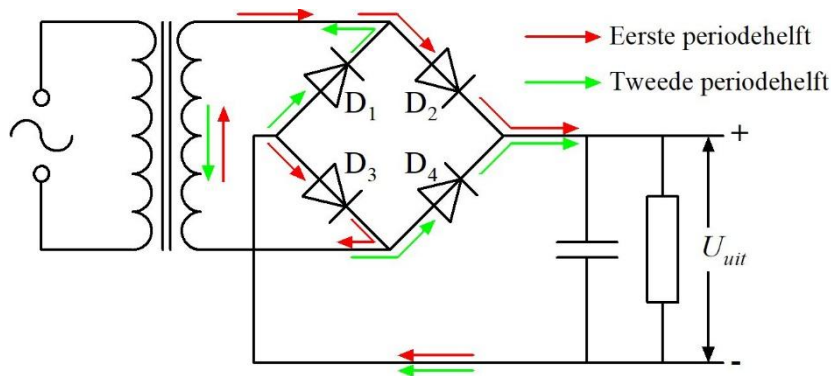
Op het maximum van de doorgelaten halve periode staat de spanning  $U_{max}$  over de condensator. Wie een gelijkrichtschakeling ontwerpt, moet erop bedacht zijn dat het stroomverbruik van de aanhangende schakeling af en toe klein of zelfs 0 is. In het laatste

geval blijft  $U_{max}$  tussen twee positieve halve perioden (vrijwel) in stand. De lijn tussen de halve perioden in Figuur 7.4-5 loopt dan praktisch horizontaal bij een spanning van nagenoeg  $U_{max}$ . In die tijd loopt aan de anode van de diode de negatieve halve periode. Die bereikt een laagste waarde van  $-U_{eff}\sqrt{2}$ . Het verschil is dan  $2U_{eff}\sqrt{2} = 2U_{max}$ .

De minimale veilige sperspanning van de diode is dus **twee keer de maximale spanning**.  $\sqrt{2}$  is ongeveer 1,414. In de praktijk gaan we veiligheidshalve uit van 1,5 of iets meer. Een diode die een effectieve spanning van 100 V moet gelijkrichten, moet dus bestand zijn tegen minstens 300 V. Eén voor 230 V moet tegen meer dan 690 V (zeg maar 700 V) kunnen. Voor de onervaren ontwerper kan dit een gemene ‘instinker’ zijn.

#### 7.4.4 Tweezijdige (dubbelzijdige, dubbelfasige) gelijkrichting

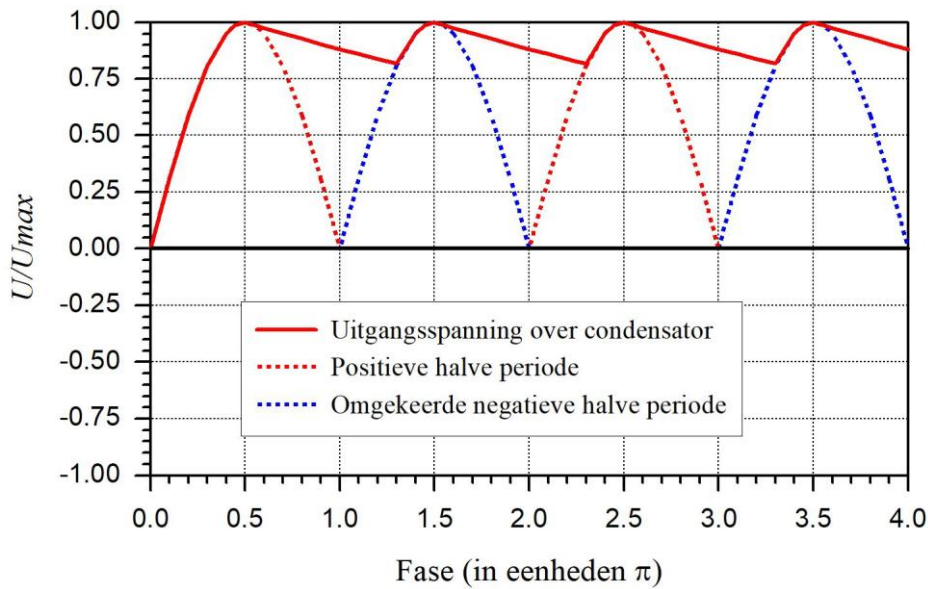
We zagen dat de schakeling van Figuur 7.4-5 zelden zal voldoen als gevolg van een flinke rimpel van 50 Hz op de gelijkspanning. Een eerste stap in de goede richting is het betrekken van de tweede niet doorgelaten periodehelft bij de gelijkrichting. Dat kan onder meer met een zogenoemde bruggelijkrichter. Die omvat vier dioden in plaats van één (Figuur 7.4-6).



*Figuur 7.4-6. Tweezijdige gelijkrichting vanuit een enkele secundaire wikkeling door middel van een bruggelijkrichter die bestaat uit de dioden  $D_1$  tot en met  $D_4$ . De pijlen geven de technische stroomrichting; de rode voor de positieve periodehelft, de groene voor de negatieve.*

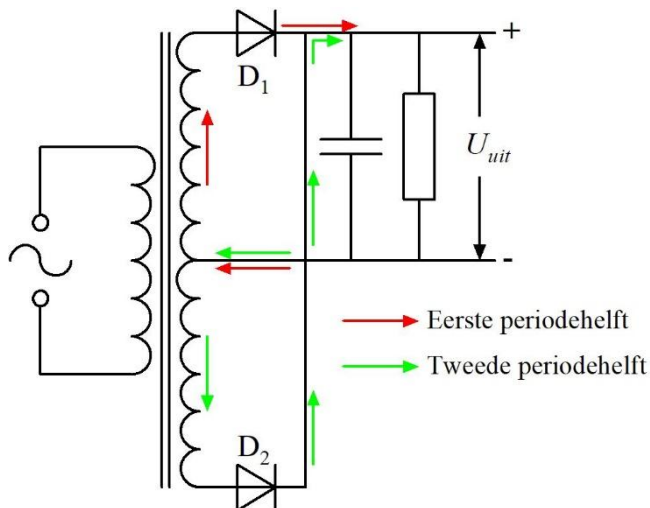
In de positieve halve periode volgt de stroom de rode pijlen. De stroom passeert  $D_2$  naar de te voeden schakeling en komt terug via  $D_3$ .  $D_1$  en  $D_4$  sperren.

In de negatieve halve periode volgt de stroom de groene pijlen. De stroom passeert nu  $D_4$  en komt terug via  $D_1$ . Nu sperren  $D_2$  en  $D_3$ . Het resultaat zien we in Figuur 7.4-7. De negatieve halve periode wordt nu niet tegengehouden, maar op de kop gezet.



Figuur 7.4-7. Tweezijdig gelijkgerichte sinusvormige wisselspanning met afvlakking door middel van een condensator (getrokken curve). De gestippelde curve geeft de vorm van de gelijkgerichte spanning zonder afvlakking. Het rode deel komt van de positieve halve perioden, het blauwe deel van de negatieve. De grafiek start met de allereerste periode. Daarom begint de getrokken lijn bij  $U/U_{max}=0$ .

Een tweede manier van tweezijdige gelijkrichting met twee in plaats van vier dioden zien we in Figuur 7.4-8. Dan moet de secundaire van de trafo een middenaftakking hebben.



Figuur 7.4-8 Tweezijdige gelijkrichting met twee dioden. De secundaire van de trafo heeft een middenaftakking die aan de 0 V ligt. De uiteinden zijn om beurten positief (en negatief).

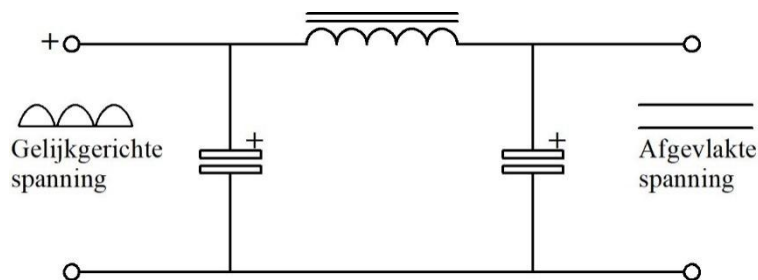
Is de bovenste aansluiting van de secundaire positief is ten opzichte van de middenaftakking, dan is de onderste aansluiting negatief. Is de bovenste aansluiting negatief, dan is de onderste positief. Zo voert òf  $D_1$  òf  $D_2$  stroom en spert de andere diode.

Aan hun kathodekant zijn ze verbonden. Zo levert deze schakeling (met condensator) dezelfde spanningsvorm als die van Figuur 7.4-6. Figuur 7.4-7 geldt hier dus ook.

### 7.4.5 Afvlakfilters

We hebben in Figuur 7.4-5 en Figuur 7.4-7 gezien dat een enkele condensator onvoldoende is om van een gelijkgerichte spanning een nette vlakke gelijkspanning te maken als er tegelijkertijd een stroom aan de gelijkrichtschakeling wordt onttrokken. Zolang de condensator tussen twee halve perioden niet vanuit het gelijkrichtsysteem wordt bijgeladen, daalt de spanning als gevolg van het stroomverbruik van de gevoede schakeling. Dat leidt tot een 'hobbelige' gelijkspanning, zoals in beide figuren is weergegeven.

Afvlakfilters bestaan meestal uit twee condensatoren en een smoorspoel, zoals in Figuur 7.4-9. Voor gelijkgerichte netspanning met de lage frequentie van 50 Hz worden elektrolytische condensatoren (elco's) gebruikt. Daarmee kan een hoge capaciteit worden gerealiseerd, maar door hun traagheid zijn ze ongeschikt voor HF-toepassingen. De smoorspoel heeft een ijzerkern voor een hoge zelfinductie. Voor dit soort kernen geldt hetzelfde als voor elco's: alleen geschikt voor laagfrequente toepassingen.



Figuur 7.4-9. Afvlakfilter van twee elektrolytische condensatoren (elco's) en een smoorspoel.

De linker condensator in Figuur 7.4-9 doet hetzelfde als de condensatoren in Figuur 7.4-5, Figuur 7.4-7 en Figuur 7.4-8.

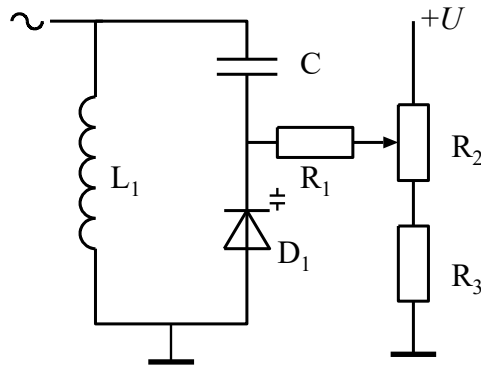
De smoorspoel werkt veranderingen in de stroom tegen. De rechter condensator in Figuur 7.4-9 krijgt dan een min of meer constante aanvoer van stroom en werkt de spanningsrimpel grotendeels weg.

Dit is de klassieke afvlakschakeling zoals die vooral in veel oudere elektronica te vinden is. Tegenwoordig hebben we daar in de vorm van elektronische spanningsstabilisatoren andere en betere middelen voor. Een voorproefje daarvan krijgen we bij de *zenerdioden* in paragraaf 7.6.

## 7.5 Capaciteitsdioden

Zoals we inmiddels weten, heten capaciteitsdioden ook wel varicaps. Ze worden meestal gebruikt voor het veranderen van de resonantiefrequentie (*verstemmen*) van LC-kringen (zie Hoofdstuk 5). Ze worden in sperrichting aangesloten, anders is er geen diëlektricum

en dus ook geen capaciteit van betekenis. Figuur 7.5-1 toont een parallelle LC-kring met capaciteitsdiode en een spanningsregelaar in de vorm van een potentiometer.



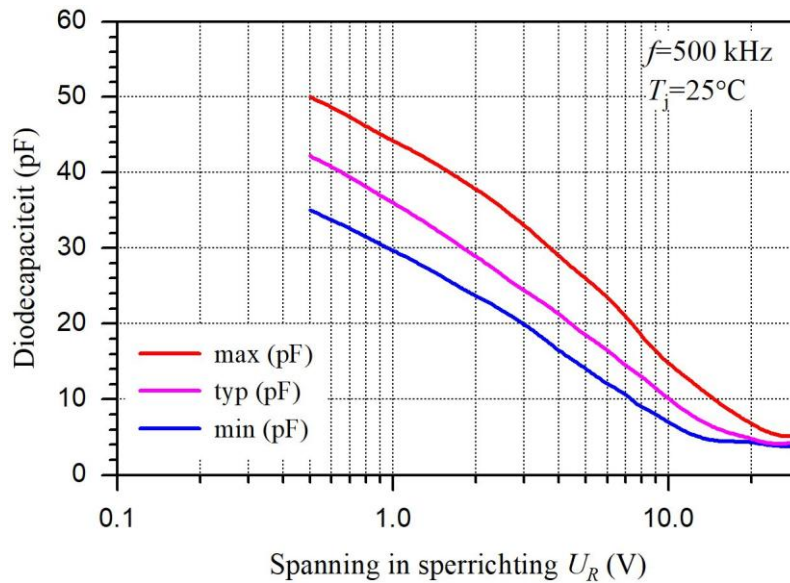
Figuur 7.5-1. LC-parallelkring met potentiometer en capaciteitsdiode.

De regelspanning voor de diode ( $D_1$ ) komt vanuit het systeem  $R_1$  tot en met  $R_3$ .  $R_2$  is de potentiometer waarmee de spanning kan worden veranderd.  $R_3$  zorgt ervoor dat de regelspanning niet 0 kan worden en  $R_1$  voorkomt een directe verbinding met de positieve spanning  $U$ . Dit laatste is belangrijk, omdat een directe verbinding met  $U$  laagohmig is en daardoor de  $Q$  van de kring bederft.  $R_1$  zal daarom een vrij hoge waarde hebben, bijvoorbeeld 100 k. De condensator  $C$  voorkomt dat de regelspanning via de spoel  $L$  wegvloeit. De capaciteit  $C$  is meestal flink hoger dan de hoogste capaciteit van diode  $D_1$ , zodat het regelbereik zo hoog mogelijk is. Als een beperkt regelbereik van  $D_1$  juist de bedoeling is, kan dat ofwel door  $C$  klein te nemen, ofwel door  $R_2$  veel kleiner dan  $R_3$  te kiezen ofwel door tussen potentiometer  $R_2$  en de spanning  $U$  nog een weerstand op te nemen.

**Let op!** In het stukje tekst hierboven zijn symbolen voor onderdelen recht op geschreven en het symbool voor de waarde *cursief*. Een onderdeel is een ding (recht op), de waarde een grootheid (cursief).

Verwacht van capaciteitsdioden geen heel grote capaciteiten. Vaak zitten ze met hun maximum ergens in de buurt van 50 pF; sommige typen komen wat hoger, andere lager.

Figuur 7.5-2 geeft een voorbeeld van het verband tussen diodecapaciteit en de spanning in sperrichting over de diode BB106.

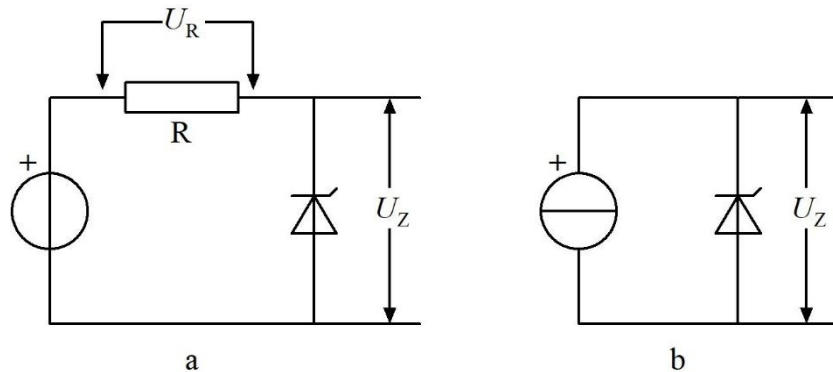


Figuur 7.5-2. Spannings-capaciteitskarakteristieken van de capaciteitsdiode BB106 voor een frequentie  $f$  van 500 kHz bij een junctietemperatuur  $T_j$  van 25°C. De drie curven geven de variatie in waarde weer: er is voor elke spanning een maximale, minimale en "typische", zeg maar gemiddelde waarde. De 'R' in  $U_R$  is van 'reverse' (tegengesteld): spanning tegen de doorlaatrichting in ofwel in sperrichting. Data: Philips handboek.

Figuur 7.5-2 laat zien dat er een flinke marge ligt tussen de uiterste waarden van deze capaciteitsdiode. Bij andere typen is dat ook zo. Vervanging van een afstemdiode kan dus opnieuw afregelen van een schakeling betekenen, maar meestal ligt de waarde van een vervangende diode ruim binnen de in de grafiek aangegeven grenswaarden.

## 7.6 Zenerdioden

Zenerdioden worden in sperrichting aangesloten. Niet om te sperren, maar juist om op een gecontroleerde manier stroom door te laten. De spanning die nodig is om de diode in sperrichting in geleiding te brengen, blijft daarbij over de diode staan. De controlerende schakeling kan heel simpel bestaan uit een weerstand in serie met de diode. De weerstand kan worden vervangen door een stroombron. Stroombronnen zijn met behulp van transistoren redelijk te benaderen. Transistoren en hun werking komen in het volgende hoofdstuk aan de orde. Figuur 7.6-1 toont van beide schakelingen een voorbeeld.



Figuur 7.6-1. Schakelingen om een Zenerspanning te krijgen zonder de Zenerdiode aan een te grote stroom bloot te stellen. In schakeling a wordt daarvoor een spanningsbron met serieweerstand gebruikt, in schakeling b een stroombron in plaats van een spanningsbron

Hoe zit het nu met de spanningen en de stromen in Figuur 7.6-1? Voor beide schakelingen geldt de tweede wet van Kirchhoff: de som van de spanningen is 0. Als we in schakeling a de spanning van de bron  $U_{\text{bron}}$  noemen, dan geldt dus:

$$U_{\text{bron}} + U_R + U_Z = 0 \quad (7.6-1)$$

En dus ook

$$U_{\text{bron}} = -(U_R + U_Z) \quad (7.6-2)$$

Meestal maken we ons niet druk over het minteken, omdat het betrekking heeft op de richting van de spanningen. De stroom  $I$  door de schakeling is dan te berekenen volgens

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{\text{bron}} - U_Z}{R} \quad (7.6-3)$$

Stel, de bronspanning is 10 V en de zenerspanning 6,8 V, dan blijft er voor  $U_R$  3,2 V over. Als bijvoorbeeld  $R=1 \text{ k}\Omega$ , dan is  $I=3,2 \text{ mA}$ .

We kunnen dan het in de diode gedissipeerde vermogen  $P_{\text{diode}}$  berekenen als  $U_Z \cdot I = 6,8 \text{ V} \cdot 3,2 \text{ mA} \approx 20 \text{ mW}$ . Bedenk dat V.mA een waarde in mW en niet in W oplevert! Dat vermogen kan praktisch elke zenerdiode onder normale omstandigheden aan.

We hebben het nog niet gehad over schakeling b. Die is eenvoudiger als het op berekenen aankomt. De spanning over de stroombron past zich aan de schakeling aan en is gelijk aan  $U_Z$ . De stroom mag niet zo groot zijn dat de zenerdiode sneuvelt. Die informatie vind je in databoeken of op Internet. Gewoon het type googelen (zie ook paragraaf 7.7).

Zenerdioden worden gebruikt als leverancier van referentiespanningen, bijvoorbeeld in gestabiliseerde voedingen. Ze kunnen ook worden gebruikt om een spanning met de zenerspanning te verlagen. Ze worden dan in serie met de voedingsleiding opgenomen. Er gebeurt hetzelfde als in Figuur 7.6-1, schakeling a. Of de zenerdiode vóór of na de

weerstand wordt opgenomen, maakt voor de spanning over de weerstand niets uit (2<sup>e</sup> wet van Kirchhoff!). De spanning over de weerstand is steeds de bronspanning min  $U_Z$ .

### Voor de liefhebbers. Géén examenstof!

#### Zener- en lawine-effect

Wat gebeurt er nu precies in een zenerdiode? We zagen hiervoor dat bij een halfgeleiderdiode de dikte van de uitputtingszone met toenemende spanning in de sperrichting groter wordt. Er gebeurt nog iets: in de uitputtingszone wordt het elektrisch veld sterker naarmate de spanning toeneemt.

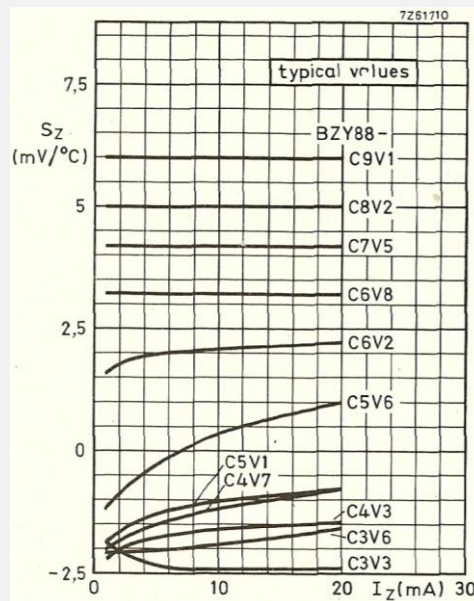
In relatief sterk verontreinigd halfgeleidermateriaal zal de sterkte van het elektrisch veld bij een zekere spanning voldoende zijn om elektronen los te trekken uit hun atoomverband. Dit effect heet het *Zener-effect* naar de Amerikaanse natuurkundige Clarence Zener die het in 1934 voor het eerst beschreef. Het Zener-effect speelt vooral een rol bij lage zenerspanningen.

In minder sterk verontreinigd materiaal gebeurt wat anders. De weinige elektronen die de grenslaag passeren -en die zijn er altijd wel- zullen er dan bij toenemende spanning met steeds hogere snelheid doorheen schieten. Bij een bepaalde spanning wordt die snelheid zo groot dat een elektron bij botsing met atomen in het kristalrooster elektronen uit hun buitenste schil losstoot. Dan zijn er twee elektronen die weer nieuwe elektronen losmaken, en zo verder. Zo ontstaat een *lawine-effect*, vergelijkbaar met een sneeuwlawine op een berghelling. In het Engels heet dit verschijnsel *avalanche breakdown*. *Avalanche* betekent lawine; het woord *breakdown* spreekt voor zich. Als gevolg van dit lawine- of avalanche-effect wordt de diode plotseling geleidend.

In zenerdioden voor lage spanningen overheerst het eigenlijke Zener-effect. In dioden voor hogere spanningen die we ook Zenerdioden noemen, overheerst het lawine-effect. De overgang van Zener- naar lawine-effect ligt rond 5 V. Gemakshalve spreken we bij alle spanningen over Zenerdioden. De hoofdletter Z (immers: genoemd naar een persoon) wordt niet consequent gebruikt; je komt in elektronica-teksten zowel Zenerdioden met hoofdletter als zenerdioden met kleine letter tegen.

### Voor de liefhebbers. Géén examenstof! (vervolg)

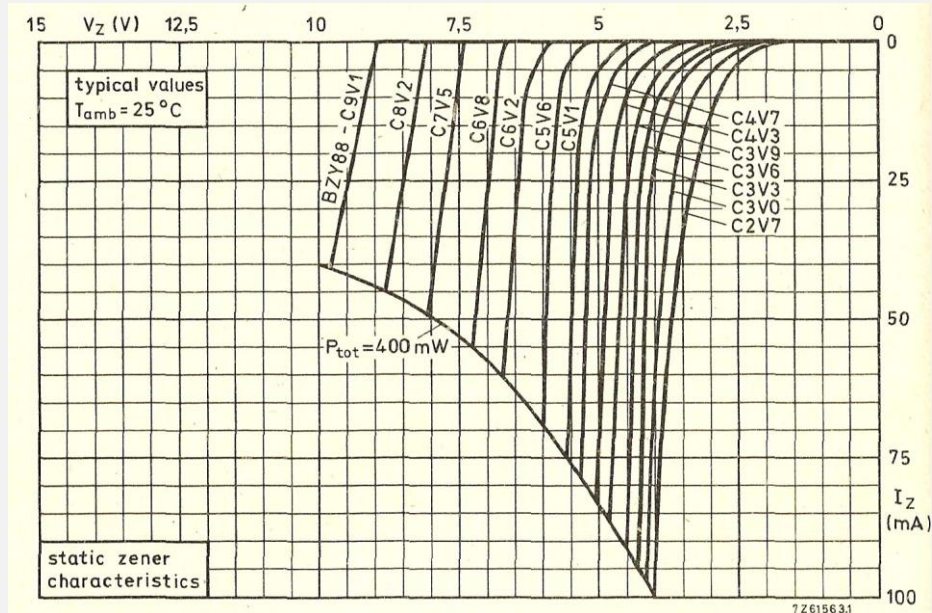
Het temperatuureffect bij zener- en avalanche-dioden is tegengesteld. Zolang het zener-effect overheerst, is de temperatuurcoëfficiënt negatief, dat wil zeggen dat de zenerspanning bij toenemende junctietemperatuur afneemt. Bij het avalanche-effect is de temperatuurcoëfficiënt positief: hoe warmer de diode, des te hoger de breakdown-spanning (Figuur 7.6-2).



Figuur 7.6-2. Temperatuureffect bij zenerdioden van het type BZY88. De temperatuurcoëfficiënt  $S_z$  staat in  $\text{mV}$  per graad  $^\circ\text{C}$  op de verticale as. Op de horizontale as de stroom  $I_z$ . Aanduidingen als C9V1 rechts van de curven geven de zenerspanning aan. C9V1 betekent 9,1V. (Grafiek: databoek Philips).

### Voor de liefhebbers. Géén examenstof! (vervolg)

De overgang van sperren naar geleiden is bij het avalanche-effect abrupt, bij het zener-effect meer geleidelijk. Dat zien we in Figuur 7.2-3.



Figuur 7.6-3. Doorlaatcurven van zenerdioden van de reeks BZY88. Bij zenerdioden voor de lagere spanningen is de overgang vloeiend (zener-effect), bij de hogere waarden meer abrupt (avalanche-effect). De grafieken worden aan de onderkant begrensd door de maximaal toegestane dissipatie van 400 mW, (Grafiek: databoek Philips).

## 7.7 Verschillende soorten dioden op een plaatje

Foto 7.7-1 toont een aantal verschillende dioden en bruggelijkrichters. Wat vooral opvalt, is dat bij de meeste dioden niet zomaar uit de vorm is op te maken met wat voor diode je te maken hebt. Veel types, zeker die voor kleine spanningen en stromen zijn zo klein, dat je óf heel scherpe ogen óf een loep nodig hebt om het typenummer te lezen. Een uitzondering is de oude OA7, nummer 1 linksboven in het plaatje, maar die dateert nog uit de jaren '50 van de vorige eeuw, toen miniaturisering nog geen grote rol speelde. De twee brugschakelingen op het plaatje kenmerken zich natuurlijk door vier in plaats van twee aansluitingen.

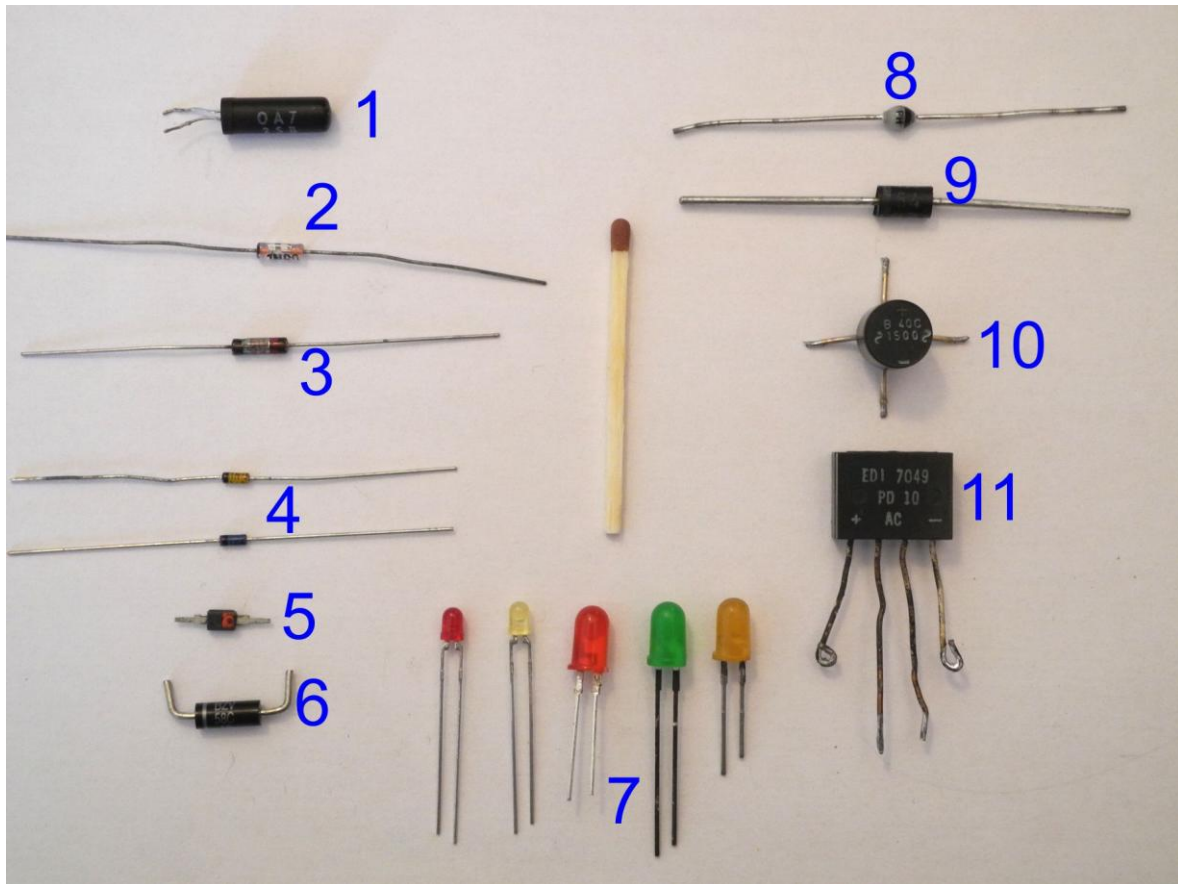
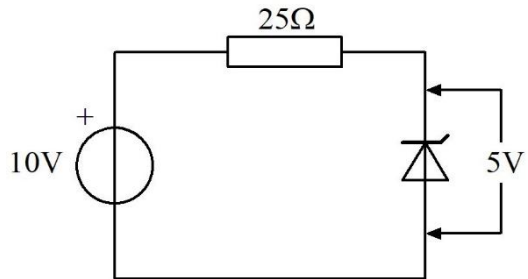


Foto 7.7-1. Verschillende soorten dioden. 1. Germaniumdiode OA7 uit de jaren 1950-60. 2. Germaniumdiode 1N60 voor vrij hoge frequenties. 3. Germaniumdiode AA119. 4. Si-dioden 1N4148 van twee verschillende fabrikanten, De kleur zegt duidelijk niet alles. 5. Capaciteitsdiode BB106. 6. Zenerdiode BZV58. 7. LEDs van verschillende kleur en grootte. Het langste pootje is de anode. 8. Si-gelijkrichtdiode BY527. 9. Si-gelijkrichtdiode 1N5402. 10. Brugschakeling voor maximaal 40 V en 1,5 A; geen typeaanduiding. De wisselstroomaansluitingen zitten links en rechts en zijn aangegeven met een golfje. 11. Brugschakeling PD10 voor wat groter vermogen. Wisselstroomaansluitingen: de middelste twee, aangeduid met AC (alternating current). De lucifer is opgenomen om een idee te krijgen van de afmetingen.

Wie meer wil weten over de dioden op de foto, vindt ze gemakkelijk op Internet. Bij de brugschakeling PD10 (nr. 11 in de figuur) is het handig om aan de zoekterm het woord *rectifier* (gelijkrichter) toe te voegen. Er zijn op Internet namelijk nogal veel dingen die PD10 heten. De typenummers die met 1N beginnen, zijn Amerikaans. Europese typen beginnen vrijwel altijd met een letter (meestal A voor Ge en B voor Si).

## 7.8 Opgaven

### 7.8.1 Opgave 7-1

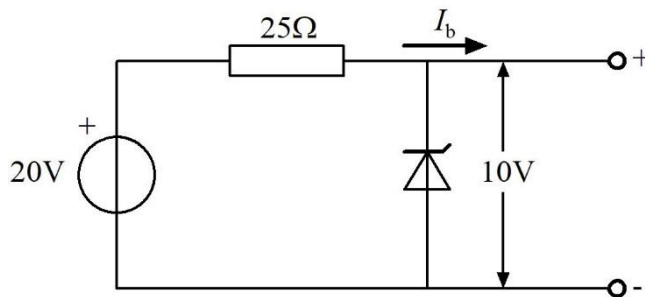


De dissipatie in de weerstand bedraagt

- A. 1 W
- B. 2 W
- C. 3 W
- D. 4 W

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking




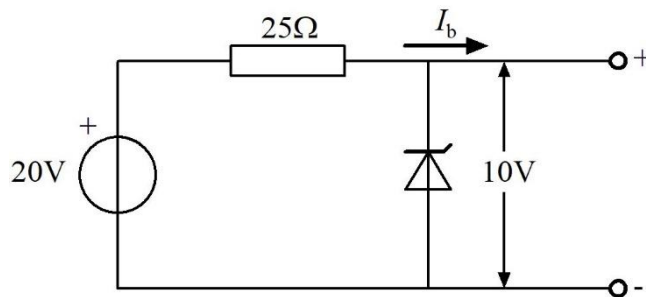
**7.8.2 Opgave 7-2**

De belastingsstroom  $I_b$  varieert van 100 tot 300 mA

De stroom door de zenerdiode varieert tussen


- A. 200 en 400 mA
- B. 500 en 700 mA
- C. 100 en 300 mA
- D. Is steeds 800 mA

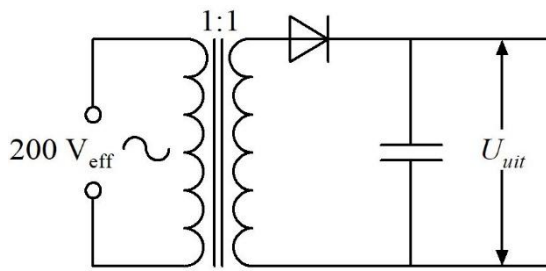
Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

**7.8.3 Opgave 7-3**

De belastingsstroom  $I_b$  varieert van 100 tot 300 mA. Het hoogst gedissipeerde vermogen in de zenerdiode bedraagt

- A. 1 W
- B. 3 W
- C. 4 W
- D. 8 W

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

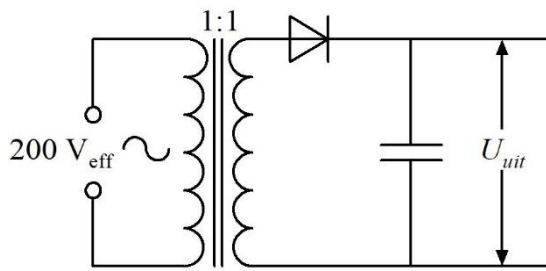
**7.8.4 Opgave 7-4**

De spanning  $U_{uit}$  bedraagt bij onbelaste schakeling ongeveer

- A. 200 V
- B. 390 V
- C. 280 V
- D. 600 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



**7.8.5 Opgave 7-5**

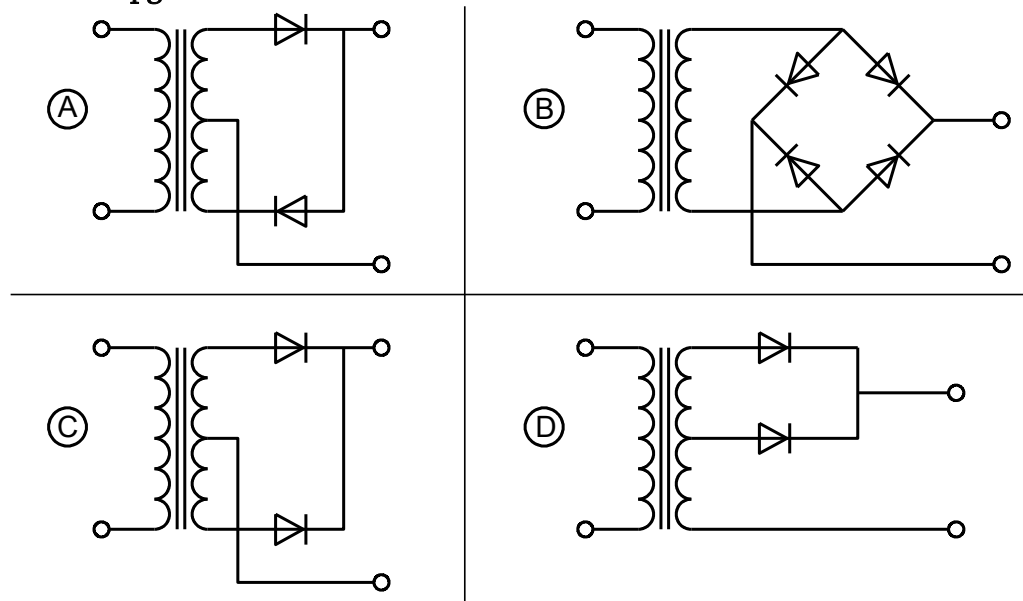
De minimaal benodigde sperspanning van de diode in de schakeling bedraagt

- A. 200 V
- B. 300 V
- C. 400 V
- D. 600 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking




## 7.8.6 Opgave 7-6



Welke schakeling is te gebruiken voor tweezijdige gelijkrichting?


- A. Schakeling A
- B. Schakeling B
- C. Schakeling C
- D. Schakeling D

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

### 7.8.7 Opgave 7-7

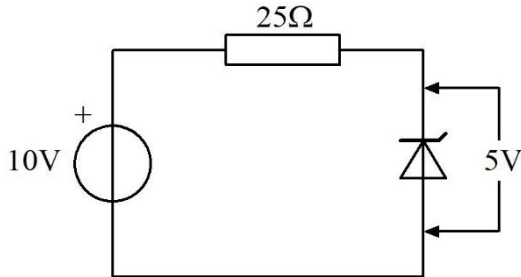
Een werkende capaciteitsdiode (varicap)

- A. Staat geschakeld in sperrichting en de capaciteit wordt kleiner met toenemende spanning
- B. Staat geschakeld in sperrichting en de capaciteit wordt groter met toenemende spanning
- C. Staat geschakeld in doorlaatrichting en de capaciteit wordt kleiner met toenemende spanning
- D. Staat geschakeld in doorlaatrichting en de capaciteit wordt groter met toenemende spanning

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

## 7.9 Uitwerkingen van de opgaven

### 7.9.1 Uitwerking van Opgave 7-1



De dissipatie in de weerstand bedraagt

- A. 1 W
- B. 2 W
- C. 3 W
- D. 4 W

#### Uitwerking

Voor de dissipatie in de weerstand van 25 ohm moeten we de spanning over de weerstand kennen. Die volgt uit de bronspanning en de zenerspanning. De bron geeft 10 V; over de zenerdiode staat 5 V. Dan blijft er  $10\text{ V} - 5\text{ V} = 5\text{ V}$  over voor de spanning  $U$  over de weerstand  $R$  van 25 ohm. De dissipatie in de weerstand is gelijk aan het opgenomen vermogen  $P$ . Voor  $P$  geldt:  $P = U^2/R = 5^2/25\text{ W} = 1\text{ W}$ .

Antwoord A dus.

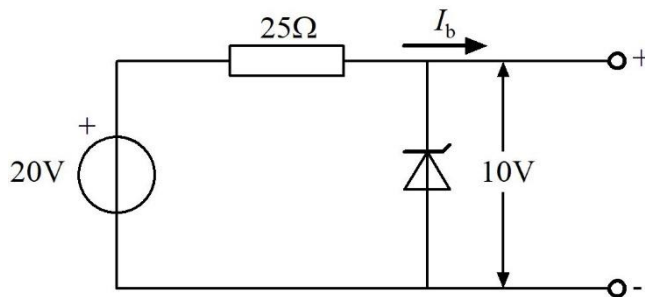


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.2 Uitwerking van Opgave 7-2



De belastingsstroom  $I_b$  varieert van 100 tot 300 mA

De stroom door de zenerdiode varieert tussen

- A. 200 en 400 mA
- B. 500 en 700 mA
- C. **100 en 300 mA**
- D. Is steeds 800 mA

#### Uitwerking

We beginnen met de stroom door de weerstand. Daarvoor hebben we de spanning over de weerstand nodig. Die is gelijk aan de bronspanning van 20 V min 10 V over de zener, is 10 V. De stroom door de weerstand  $I = U/R = 10/25 \text{ A} = 400 \text{ mA}$ . Als de belastingsstroom varieert van 100 tot 300 mA, blijft er bij 100 mA een stroom van 300 mA voor de zenerdiode over en bij een belastingsstroom van 300 mA resteert 100 mA voor de zener. Dat komt neer op antwoord C. Een geval van eerlijk delen.

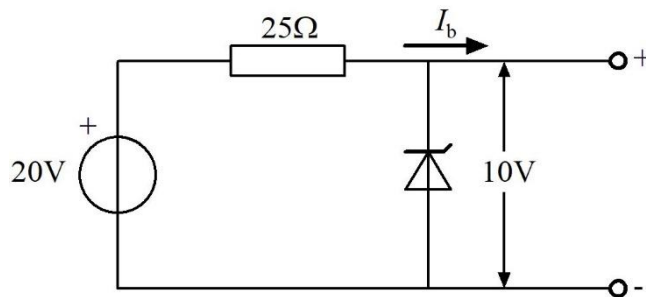


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.3 Uitwerking van Opgave 7-3



De belastingsstroom  $I_b$  varieert van 100 tot 300 mA. Het hoogst gedissipeerde vermogen in de zenerdiode bedraagt

- A. 1 W
- B. 3 W**
- C. 4 W
- D. 8 W

#### Uitwerking

Het gedissipeerde vermogen in de zenerdiode bedraagt de stroom door de diode maal de zenerspanning. In Opgave 2 vonden we voor de grootste zenerstroom 300 mA. 300 mA maal 10 V is 3 W. Dat betekent antwoord B.

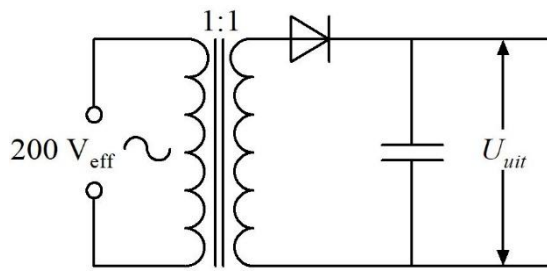


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.4 Uitwerking van Opgave 7-4



De spanning  $U_{uit}$  bedraagt bij onbelaste schakeling ongeveer

- A. 200 V
- B. 390 V
- C. **280 V**
- D. 600 V

#### Uitwerking

Als de schakeling onbelast is, is  $U_{uit} = U_{max} = U_{eff} * \sqrt{2} \approx 1,4 * U_{eff}$ . De transformatieverhouding is 1:1, zodat de gelijkspanning op der uitgang ongeveer  $200 * 1,4 = 280$  V bedraagt. Dat is antwoord C.

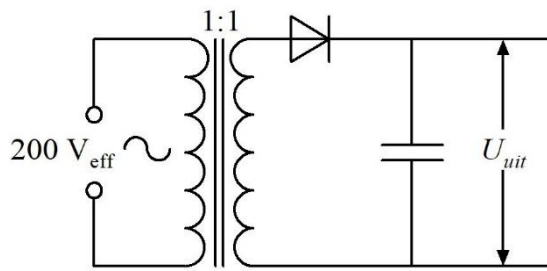


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.5 Uitwerking van Opgave 7-5



De minimaal benodigde sperspanning van de diode in de schakeling bedraagt

- A. 200 V
- B. 300 V
- C. 400 V
- D. 600 V

#### Uitwerking

De minimale sperspanning van de diode bedraagt  $3 \cdot 200\text{V} = 600\text{V}$ , want de diode moet  $2x U_{max}$  kunnen weerstaan. In theorie is dat  $2,8x$  de effectieve secundaire spanning en om veiligheidsredenen wordt  $3x$  of nog meer aangehouden. Dat betekent dat antwoord D goed is.



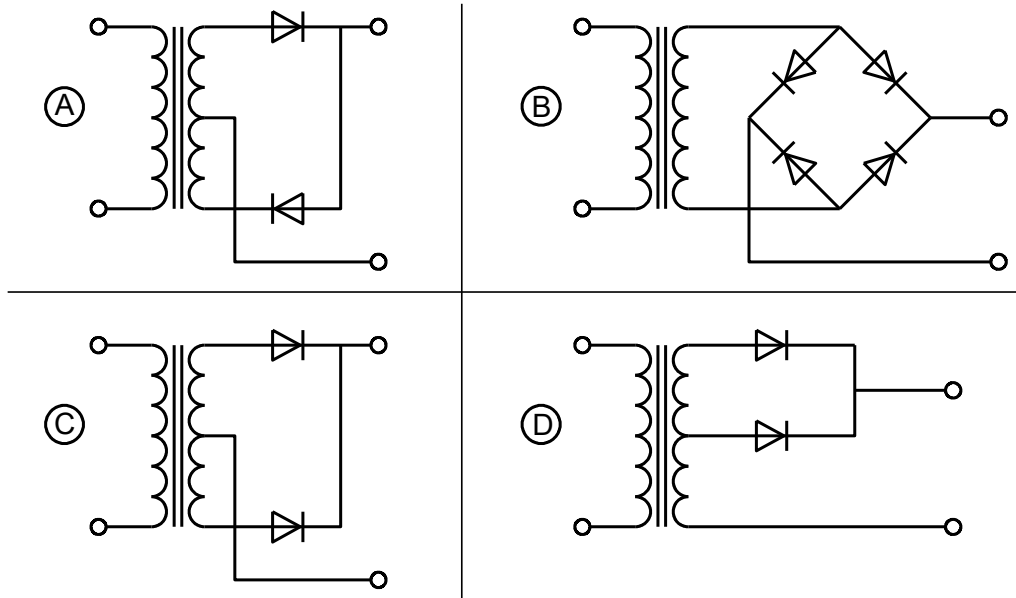
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.6 Uitwerking van Opgave 7-6

Welke schakeling is te gebruiken voor tweezijdige gelijkrichting?



Welke schakeling is te gebruiken voor tweezijdige gelijkrichting?

- A. Schakeling A
- B. Schakeling B
- C. Schakeling C**
- D. Schakeling D

#### Uitwerking

We lopen ze alle vier langs.

Schakeling A vormt een kortsluiting over de secundaire voor de positieve halve periode. Afgekeurd.

Schakeling B lijkt in orde, maar kijk eens goed naar de doorlaatrichting van de dioden. Ze maken twee pluspolen. Dat helpt dus niet. Ook afgekeurd.

Schakeling C lijkt op een ordentelijke tweezijdige gelijkrichter. Die houden we erin.

Schakeling D is een rare. Die richt enkelzijdig gelijk vanaf de bovenste en de middelste transformatoraansluiting. Een wat vreemde enkelzijdige gelijkrichter, maar zeker geen tweezijdige. Afgekeurd dus.

Resteert antwoord C.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 7.9.7 Uitwerking van Opgave 7-7

Een werkende capaciteitsdiode (varicap)

- A. Staat geschakeld in sperrichting en de capaciteit wordt kleiner met toenemende spanning
- B. Staat geschakeld in sperrichting en de capaciteit wordt groter met toenemende spanning
- C. Staat geschakeld in doorlaatrichting en de capaciteit wordt kleiner met toenemende spanning
- D. Staat geschakeld in doorlaatrichting en de capaciteit wordt groter met toenemende spanning

#### Uitwerking

Een capaciteitsdiode staat in elk geval in sperrichting, anders is er geen diëlektricum. Daarmee vervallen de antwoorden C en D.

Met toenemende spanning wordt de uitputtingszone dikker en daarmee ook de afstand tussen de nog geleidende delen van de P- en de N-zone. Dan neemt de capaciteit af met toenemende spanning. Antwoord A.



Terug naar de opgave