



# Inhoudsopgave

7	Halfgeleiding en halfgeleiderdioden .....	2
7.1	Wat leer je in dit hoofdstuk.....	2
7.2	Halfgeleidermateriaal.....	2
7.2.1	Inleiding.....	2
7.2.2	Kristalstructuur .....	3
7.2.3	Geleiding in de kristalstructuur .....	3
7.2.4	P- en N-materiaal; PN-overgang.....	4
7.2.5	De halfgeleiderdiode .....	6
7.3	Enkele eigenschappen en toepassingen van dioden.....	6
7.3.1	Lekstroom en werktemperatuur.....	6
7.3.2	Toepassingen.....	6
7.4	Gelijkrichting met dioden.....	7
7.4.1	Van wisselstroom/-spanning naar gelijkstroom/-spanning .....	7
7.4.2	Enkelzijdige gelijkrichting.....	8
7.4.3	De sperspanning van de gelijkrichtdiode.....	10
7.4.4	Tweezijdige of dubbelzijdige gelijkrichting.....	10
7.4.5	Afvlakfilters .....	13
7.5	Capaciteitsdioden .....	13
7.6	Zenerdioden .....	14
7.7	Licht emitterende dioden (LED's) .....	16
7.8	Dissipatie door een halfgeleiderdiode .....	16

## 7 Halfgeleiding en halfgeleiderdioden

### 7.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

We gaan terug naar de atomen. Daarmee maakten we kennis in Hoofdstuk 3. Het gaat nu vooral om elementen die vier elektronen in hun buitenste schil hebben. Kristallen van zulke atomen geleiden op een enkele uitzondering na niet, maar als je ze ietsje verontreinigt met bepaalde elementen, blijken ze bijzondere geleidingseigenschappen te krijgen die we *halfgeleiding* noemen.

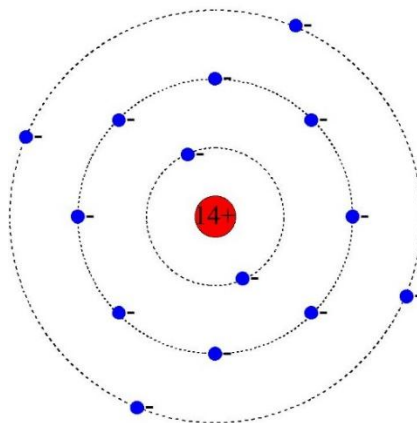
In dit hoofdstuk beperken we ons tot dioden. Die kennen we al een beetje van Hoofdstuk 4. Daar zagen we dat ze stroom maar in één richting geleiden. In dit hoofdstuk blijkt dat dit meestal, maar niet altijd waar is. Dioden die in sperrichting toch geleiden en daarbij bijzondere eigenschappen hebben, worden in de elektronica veel gebruikt. Dat geldt ook voor lichtgevende dioden en dioden die zich als variabele condensator kunnen gedragen.

### 7.2 Halfgeleidermateriaal

#### 7.2.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 lasen we over geleiders en isolatoren. Geleiders zijn elementen met weinig elektronen in hun buitenste elektronenschil. Andere elementen en verreweg de meeste moleculaire stoffen zijn isolatoren.

Enkele elementen nemen een tussenpositie in. Ze hebben vier elektronen in hun buitenste schil. Een voorbeeld is silicium, symbool Si (Figuur 7.2-1). Ook germanium (Ge) en koolstof (C) horen bij deze groep elementen.

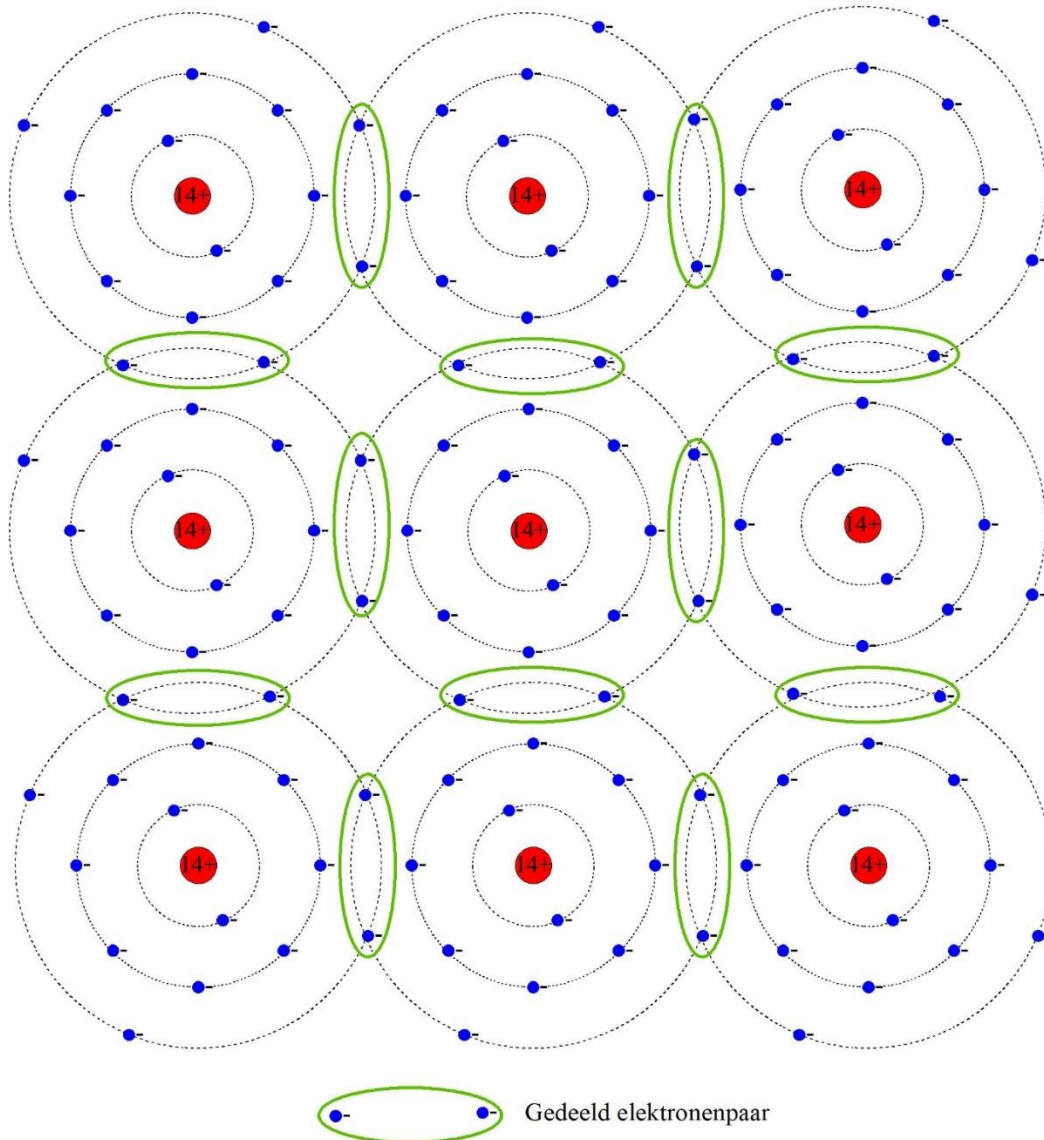


Figuur 7.2-1. Tweedimensionale afbeelding van een atoom van silicium (Si)

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. Zuiver silicium is een isolator. Zuiver germanium ook, al isoleert het minder goed. Koolstof is de uitzondering. Als grafiet geleidt het, als diamant niet.

## 7.2.2 Kristalstructuur

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 een vergelijkbare opbouw.



*Figuur 7.2-2. Kristalrooster van silicium, tweedimensionaal afgebeeld. Gedeelde elektronenparen van twee atomen zijn groen omrand. Het middelste atoom in de figuur heeft zo een complete elektronenschil van 8.*

## 7.2.3 Geleiding in de kristalstructuur

Onder invloed van een voldoende sterk elektrisch veld kunnen elektronen zich van atoom naar atoom verplaatsen. Dat noemt men halfgeleiding. De weerstand van halfgeleiders neemt bij stijgende temperatuur af. Bij gewone geleiders neemt die juist toe.

De halfgeleiding wordt bevorderd als het kristalrooster licht wordt verstoord door opnemen van een element met 5 of 3 elektronen in de buitenste schil in het kristalrooster.

De concentratie van de *verontreiniging* ligt in de orde van 1 op 100 miljoen atomen. Bij verontreiniging met een element met vijf elektronen in de buitenste schil, zoals fosfor (P), is er per verontreinigend atoom 1 elektron over. Dat elektron is mobiel en veroorzaakt zo geleiding. Bij verontreiniging met atomen met 3 elektronen in de buitenste schil, zoals borium (B), ontstaat een *gat* dat net zo mobiel is als een overtollig elektron. De verzamelnaam voor beide is *ladingdrager*.

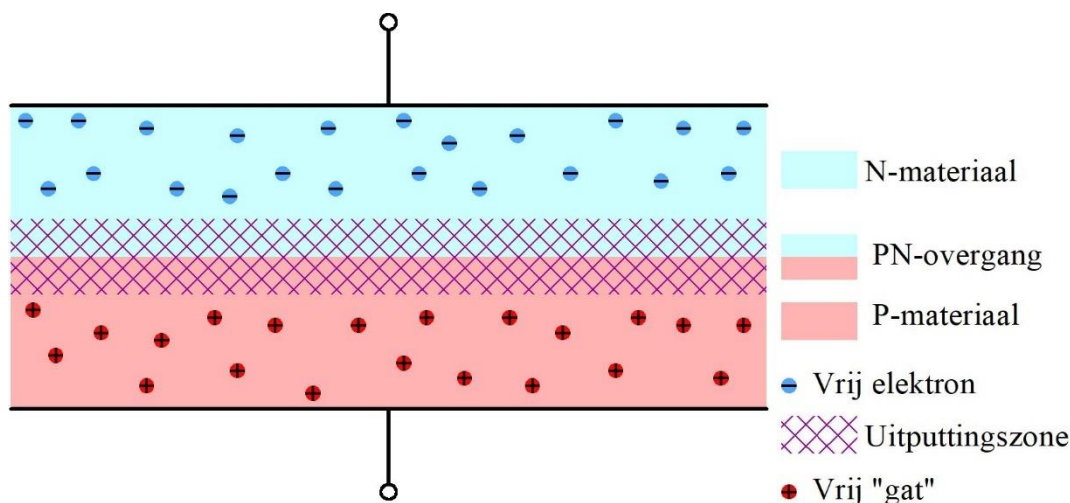
De verontreinigingen zijn elektrisch neutraal. Daardoor blijft het halfgeleiderkristal als geheel ook elektrisch neutraal.

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

Halfgeleidermateriaal met een verontreiniging of *dotering* van een element met 3 elektronen in de buitenste schil heet *P-materiaal*. Als het om Si gaat, 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*.

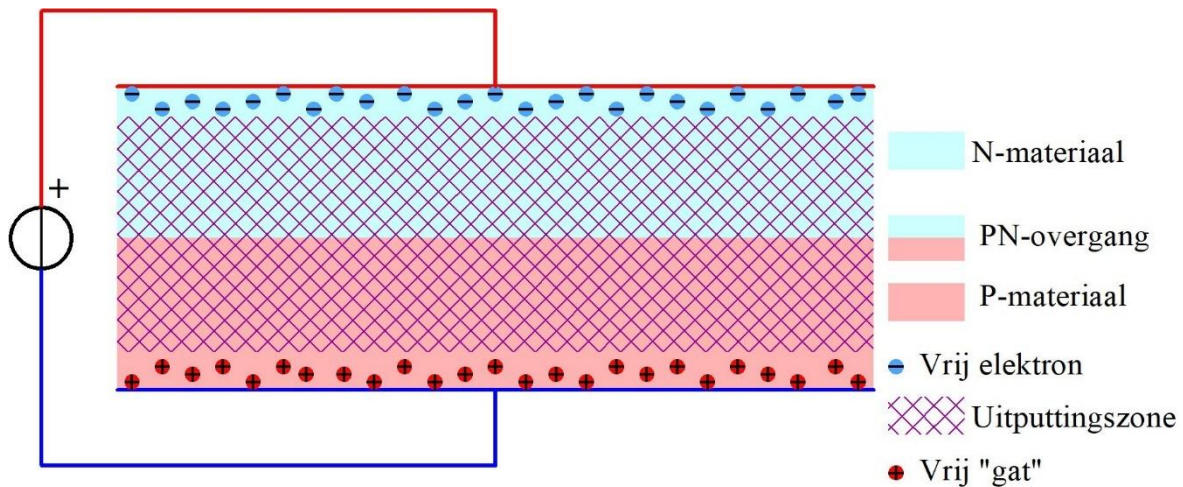
Als in een stukje Si-kristal N-silicium grenst aan P-silicium, is er een PN-overgang of *junctie*. Mobiele elektronen in het N-deel en mobiele gaten in het P-deel trekken elkaar aan. Elektron en gat neutraliseren elkaar. Dat heet *recombineren*. Recombinatie bezorgt het P-materiaal door verlies van gaten een licht negatieve lading. Het N-materiaal wordt door verlies van elektronen licht positief.

Daardoor stoot N-materiaal gaten af en P-materiaal elektronen. Beide soorten ladingdragers blijven dan ook uit de buurt van junctie. Langs de junctie ligt een gebied zonder ladingdragers. Deze *uitputtingszone* (Figuur 7.2-3) blokkeert de stroomdoorgang.



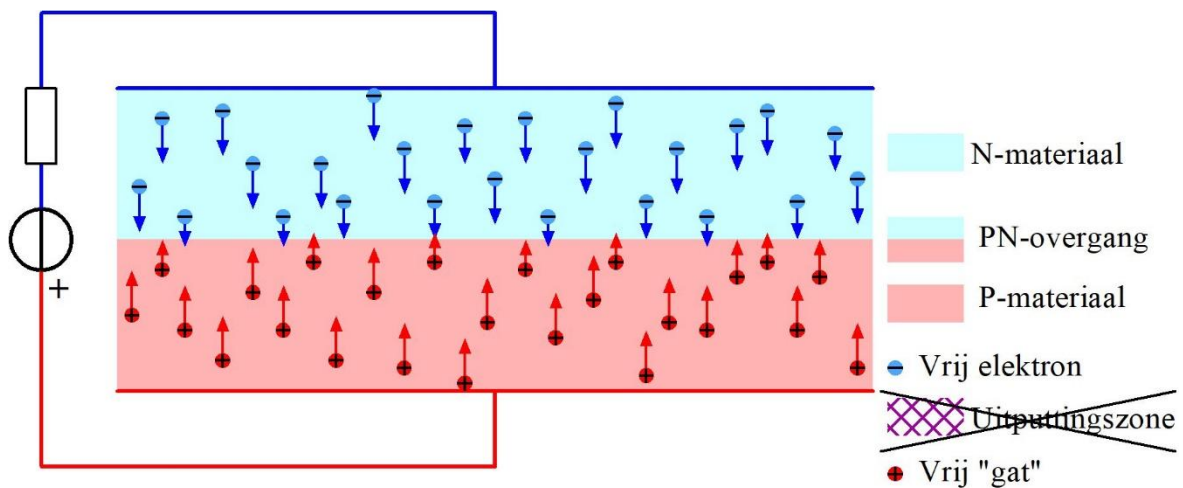
Figuur 7.2-3. Neutrale PN-overgang met uitputtingszone.

Als we over de PN-overgang een spanningsbron aansluiten met de + aan het N-materiaal en de – aan het P-materiaal, dan komen de ladingdragers nog verder van de overgang te liggen (Figuur 7.2-4). Ook dan is er van stroomdoorgang geen sprake.



Figuur 7.2-4. 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 7.2-4.

Sluiten we de bron van Figuur 7.2-4 omgekeerd aan, dan worden landingsdragers naar de PN-overgang getrokken en ontstaat een stroom (Figuur 7.2-5).



Figuur 7.2-5. PN-overgang met de N-kant aan de – en de P-kant aan de +. Over de overgang ontstaat geleiding. Gat 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.

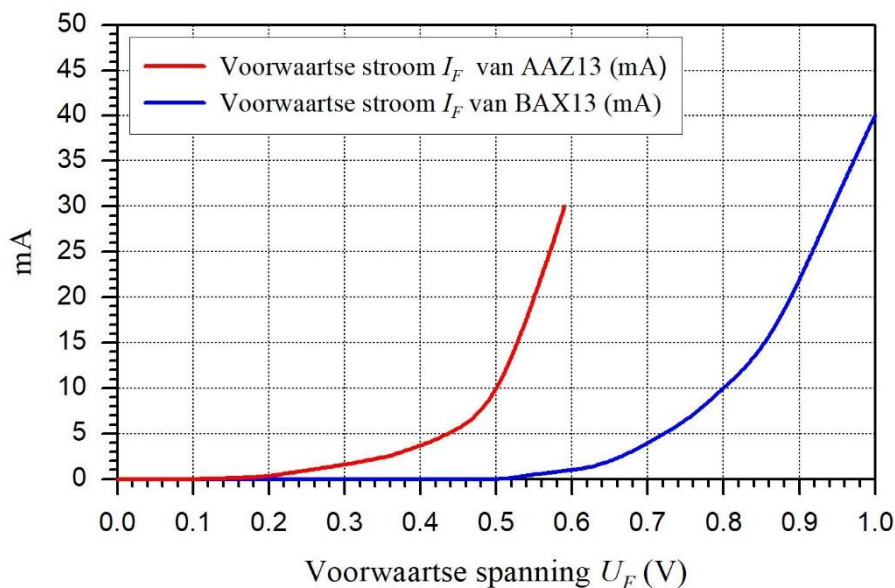
De ladingdragers recombineren op de overgang. Elektronen trekken het N-materiaal in en uit het P-materiaal worden evenveel elektronen afgevoerd. Een elektron dat uit het P-materiaal wordt afgevoerd is hetzelfde als een gat dat het P-materiaal ingaat.

Zo zit een halfgeleiderdiode in elkaar: halfgeleidermateriaal met één PN-junctie. Stroom gaat er maar in één richting doorheen.

## 7.2.5 De halfgeleiderdiode

De P-aansluiting heet *anode*, de N-aansluiting *kathode*. De doorlaatrichting (technische stroomrichting) is van anode naar kathode. **Onthoud het ezelsbruggetje KNAP: Kathode Negatief, Anode Positief.**

Een halfgeleiderdiode geleidt als er geen uitputtingszone is. Daarvoor moet de anode een beetje positief worden gemaakt ten opzichte van de kathode. Bij siliciumdioden is dat ongeveer 0,6-0,7 V; bij germanium (symbool Ge) ongeveer 0,2 V. Die spanning heet *drempelspanning*. Spanning in de doorlaatrichting heet *voorwaartse spanning* ( $U_F$ ). De stroom in die richting heet *voorwaartse stroom* ( $I_F$ ). Figuur 7.2-6 toont een doorlaatgrafiek voor zowel een Ge- als een Si-diode.



Figuur 7.2-6. 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 Lekstroom en werktemperatuur

Bij aansluiting van een diode in sperrichting blijft een klein lekstroompje vloeien. De grootte hangt af van het materiaal van de diode, de spanning en vooral de temperatuur. Voor Si-dioden is de lekstroom grofweg 100x zo klein als voor Ge-dioden. De lekstroom neemt sterk toe bij oplopende junctietemperatuur. Bij ongeveer 80 °C is de lekstroom zo groot dat Ge als halfgeleidermateriaal niet meer bruikbaar is; in Si is dat bij circa 150 °C.

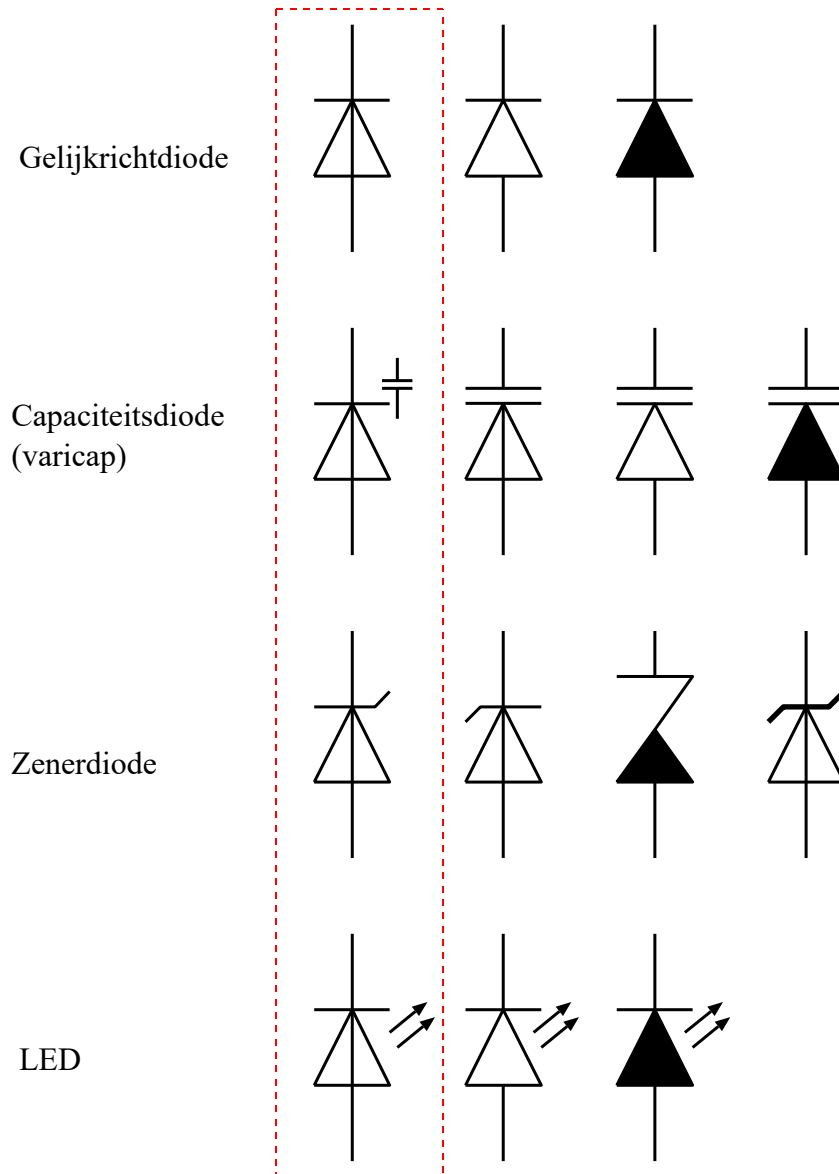
### 7.3.2 Toepassingen

We zullen hierna vier soorten dioden en hun toepassingen bespreken. Dat zijn

- Gelijkrichting
- De diode als als spanninggestuurde condensator (capaciteitsdiode of varicap)

- Zenerdioden: spanningsstabilisatie met een in sperrichting geschakelde diode
- De diode als lichtgevend element (LED)

De bijbehorende schemasymbolen staan in Figuur 7.3-1.



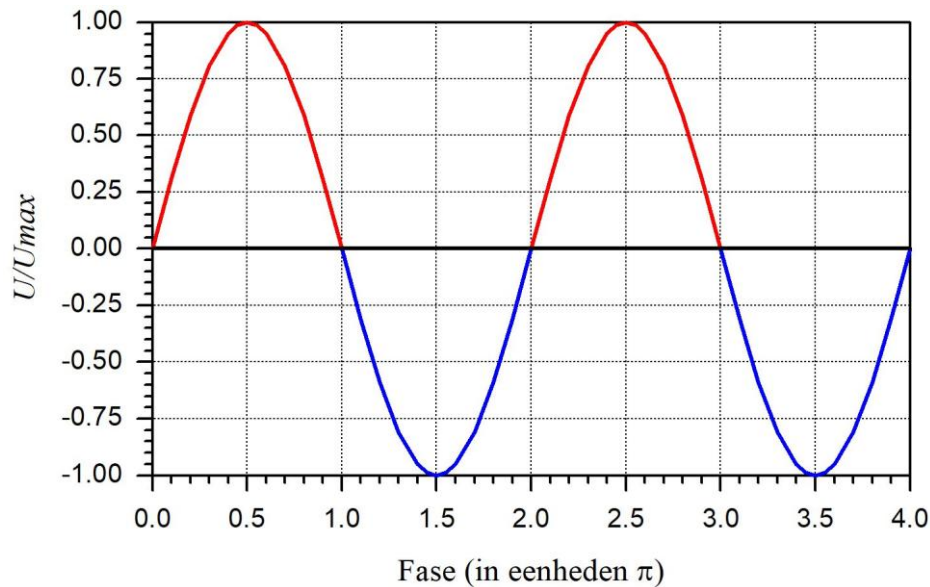
Figuur 7.3-1. Genormaliseerde en andere schemasymbolen voor verschillende dioden. Genormaliseerde symbolen links, binnen de rode streepjeslijn. De andere zijn veel gebruikte symbolen voor hetzelfde soort diode. De doorlaatrichting is in de figuur van onder naar boven: anode onder, kathode boven.

## 7.4 Gelijkrichting met dioden

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

Een diode geleidt stroom maar in één richting. Daardoor kunnen dioden van wisselstroom gelijkstroom maken. Dat heet *gelijkrichting*. Het lichtnet levert wisselspanning (230 V, 50 Hz). Vrijwel alle elektronische apparatuur, inclusief zenders en ontvangers werkt op

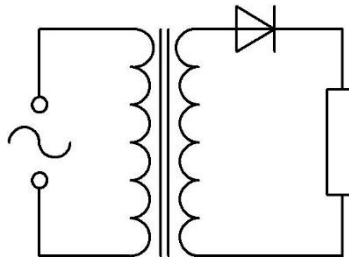
gelijkstroom. Bij gebruik van het lichtnet als energiebron is gelijkrichting onmisbaar. Het lichtnet levert een vrijwel sinusvormige zuivere wisselspanning (Figuur 7.4-1). Van een periode is één helft positief, de andere negatief.



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

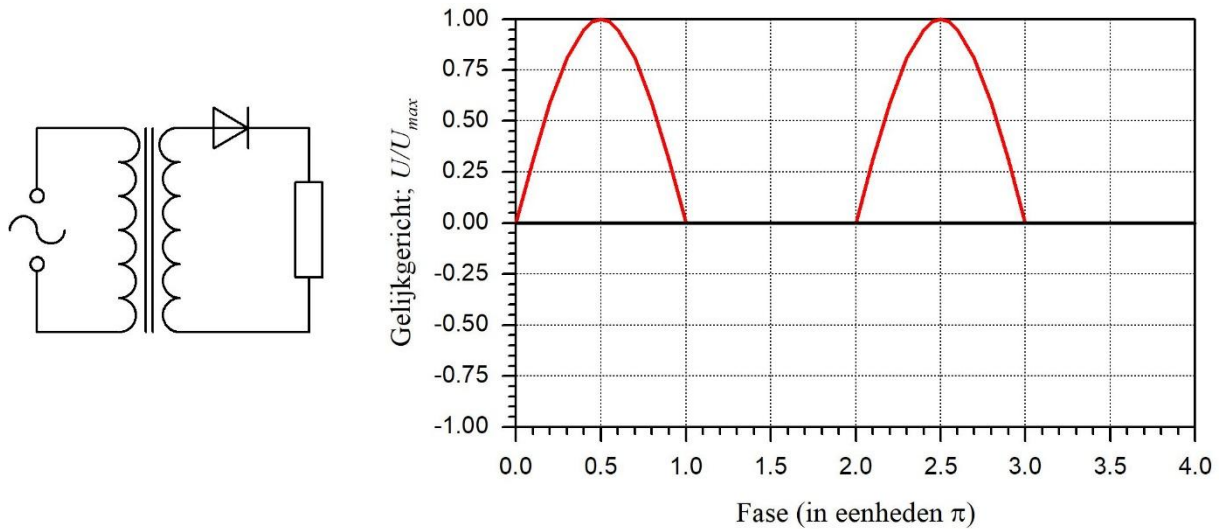
### 7.4.2 Enkelzijdige gelijkrichting

Een diode laat een halve periode door en houdt de tegengestelde periode tegen. Dat is de eenvoudigst mogelijke gelijkrichtschakeling (Figuur 7.4-2).



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

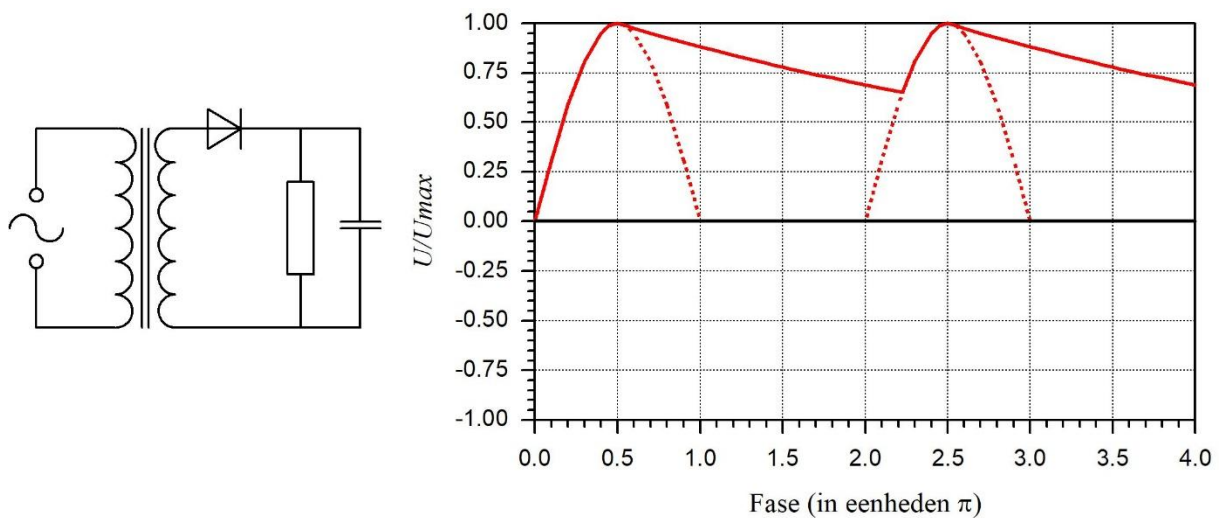
Deze vorm van gelijkrichting noemen we *enkelzijdig*, omdat steeds maar één helft van een periode wordt doorgelaten. Het resultaat ervan zien we in Figuur 7.4-3.



*Figuur 7.4-3. Spanning over de weerstand na enkelzijdige gelijkrichting. Links de schakeling, rechts wat er uitkomt. Ook hier staat de weerstand voor de schakeling die door de gelijkgerichte spanning wordt gevoed.*

Bij omkering van de diode in de schakeling van Figuur 7.4-2 keert ook het beeld van de gelijkgerichte spanning om. Die wordt negatief in plaats van positief. Zet in gedachten de grafiek van Figuur 7.4-3 op zijn kop en je hebt het beeld ervan. De gemiddelde waarde (gelijkspanningswaarde) van de halve sinusperiode is gelijk aan  $2U_{max}/\pi$ . Omdat er geen gelijkgerichte tweede helft is, is de totale gemiddelde waarde de helft:  $U_{max}/\pi$ .

De spanning in Figuur 7.4-3 is een onzuivere wisselspanning met een gelijkstroomdeel dat de gemiddelde spanning net niet negatief laat worden. Het wisselspanningsdeel leidt in een zender, ontvanger of versterker tot een zware bromtoon van 50 Hz die de apparatuur in feite onbruikbaar maakt. Van die wisselspanning moeten we dus zien af te komen.



*Figuur 7.4-4. 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.*

Toevoeging van een condensator geeft verbetering, maar is zelden afdoende. Figuur 7.4-4 toont het spanningsverloop met condensator. De condensator fungeert tussen de bij de gelijkrichting overgebleven halve perioden als reservoir. Hoe groter de condensator en/of de weerstand, des te vlakker wordt het verloop van de gelijkspanning. Hoe kleiner de condensator en/of de weerstand, des te minder effectief is de afvlakking. De verklaring kennen we uit Hoofdstuk 4: de tijdconstante  $RC$  van weerstand en condensator bepaalt de helling van de dalende lijn.

### 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 spanning. Uit Hoofdstuk 5 weten we dat voor een sinusvormige zuivere wisselspanning geldt

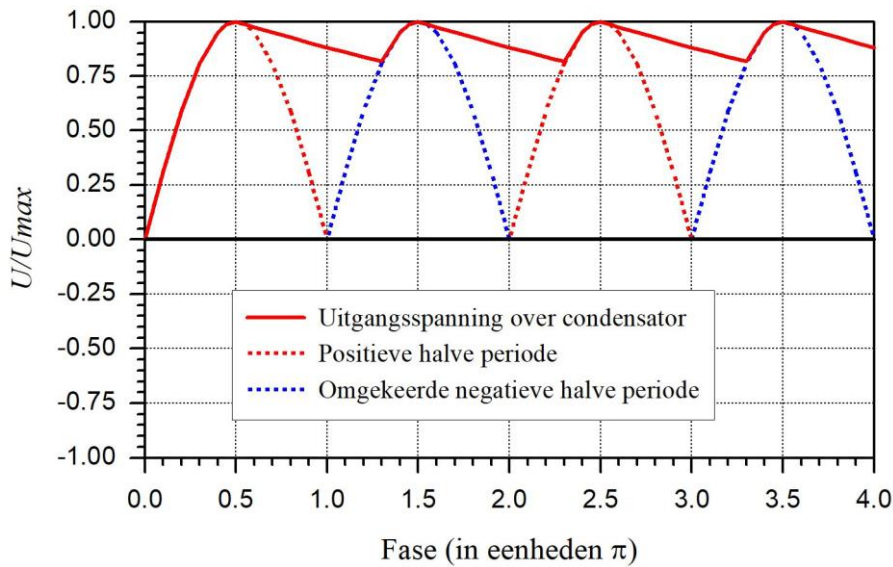
$$U_{max} = U_{eff}\sqrt{2} \quad (7.4-1)$$

De spanning  $U_{max}$  staat over de condensator op het maximum van de doorgelaten halve periode. 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 7.4-4 loopt dan praktisch horizontaal bij een spanning van  $U_{max}$ . 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 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 minstens 690 V (zeg maar 700 V) kunnen.

### 7.4.4 Tweezijdige of dubbelzijdige gelijkrichting

Als de schakeling van Figuur 7.4-4 wordt belast, blijft een flinke rimpel op de gelijkspanning staan. Als de niet doorgelaten halve periode niet wordt tegengehouden, maar wordt omgekeerd, ontstaat Figuur 7.4-5.

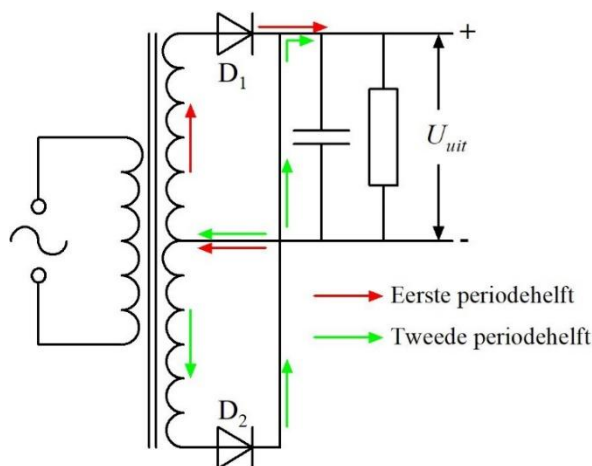


Figuur 7.4-5. Tweezijdig gelijkgerichte sinusvormige wisselspanning met afvlakking door middel van een condensator (getrokken curve). De gestippelde curve geeft de vorm van de gelijkgerichte spanning zonder afvlakking. Het rode deel komt van de positieve halve periodes, het blauwe deel van de negatieve. De grafiek start met de allereerste periode. Daarom begint de getrokken lijn bij  $U/U_{max}=0$ .

Deze vorm van gelijkrichting heet *tweezijdig*, *tweefasig*, *dubbelfasig* of *dubbelzijdig*. Zo is in elk geval een deel van het probleem opgelost, want de tijd tussen de toppen van de gelijkgerichte halve periodes wordt gehalveerd. D. Er zijn twee manieren voor. De eerste:

### Twee secundaire wikkelingen in plaats van één

De secundaire wikkeling is uitgevoerd met een middenaftakking. Die verdeelt de secundaire wikkeling in twee gelijke delen (Figuur 7.4-6).



Figuur 7.4-6. Tweezijdige gelijkrichting met een transformatorwikkeling met middenaftakking. De pijlen geven de technische stroomrichting; de rode voor de ene periodehelft, de groene voor de andere.

De minaansluiting is de middenaftakking. De spanningen op het aansluitpunt van de trafo bij  $D_1$  is in tegenfase met de spanning bij  $D_2$ . Is de momentele spanning bij  $D_1$  positief en groter dan de spanning over de condensator, dan geleidt  $D_1$  (we verwaarlozen de drempelspanning). De stroom volgt de rode pijlen.  $D_2$  spert, want die 'ziet' aan zijn anode een negatieve spanning.

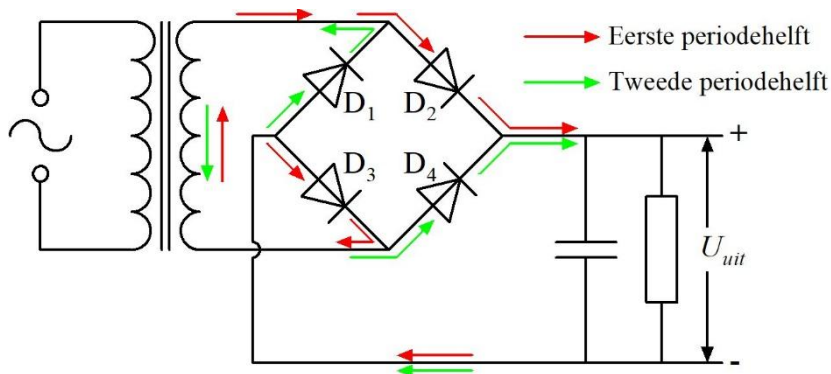
Bij de volgende halve periode is het andersom;  $D_1$  spert en  $D_2$  geleidt, zodra de spanning op zijn anode hoger is dan die over de condensator. De stroom volgt nu de groene pijlen. Het resultaat zien we in Figuur 7.4-5. Het resultaat wordt er duidelijk beter van, maar genoeg is het niet. In subparagraaf 7.4.5 over afvlakfilters gaan we daar verder op in.

De gemiddelde waarde van de gelijkgerichte maar nog niet afgevlakte spanning is gelijk aan  $\frac{2U_{max}}{\pi}$ .

Behalve de schakeling van Figuur 7.4-6 hebben we nog een manier:

### De brugschakeling

In de brugschakeling zijn vier dioden nodig. De extra wikkeling van Figuur 7.4-6 is echter overbodig. De trafo van Figuur 7.4-4 is genoeg. Figuur 7.4-7 toont de schakeling. Die keert de negatieve halve periode om.



Figuur 7.4-7. 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 eerste periodehelft, de groene voor de tweede.

In de eerste (we nemen aan: **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 tweede (**negatieve**) **halve periode** volgt de stroom de groene pijlen. De stroom passeert nu  $D_1$  en komt terug via  $D_4$ . Nu sperren  $D_2$  en  $D_3$ .

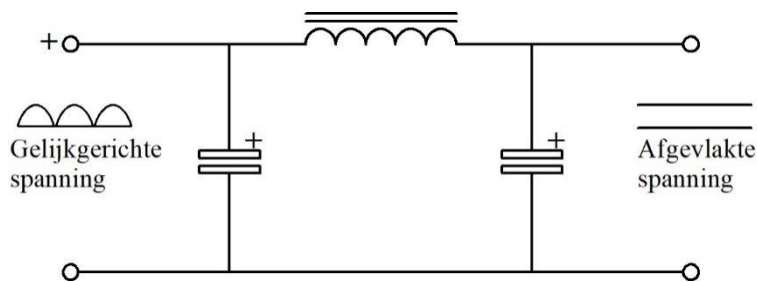
Bruggelijkrichters zijn te koop in één behuizing, maar je kunt ook zonder bezwaar vier afzonderlijke dioden gebruiken. Wel letten op de juiste montagerichting!

Ook bij tweezijdige gelijkrichting geldt dat de dioden in sperrichting minstens 3x de effectieve waarde van de wisselspanning moeten kunnen verdragen. Controleer maar!

### 7.4.5 Afvlakfilters

We hebben gezien dat een enkele condensator zoals in Figuur 7.4-4 en Figuur 7.4-5 meestal niet genoeg is om van een gelijkgerichte spanning een vlakke gelijkspanning te maken. Die blijft “hobbelig”. Een vlakkere gelijkspanning krijg je met een *afvlakfilter*.

Klassieke afvlakfilters bestaan meestal uit twee condensatoren en een smoorspoel, zoals in Figuur 7.4-8. Voor gelijkgerichte netspanning worden in verband met de lage frequentie van 50 Hz elektrolytische condensatoren (elco's) gebruikt. Daarmee kan een hoge capaciteit worden gerealiseerd die voor dit soort lage frequenties nodig is. De smoorspoel heeft een ijzerkern voor een hoge zelfinductie, óók met het oog op de lage frequentie.



Figuur 7.4-8. Afvlakfilter van twee elektrolytische condensatoren (elco's) en een smoorspoel.

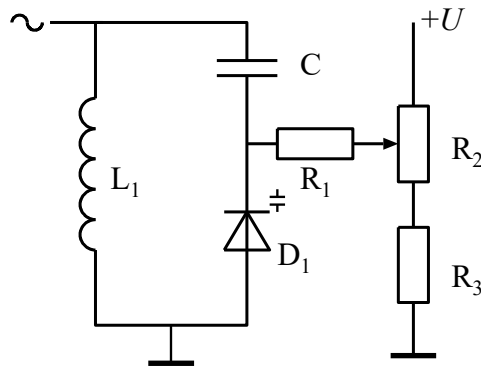
De linker condensator in Figuur 7.4-8 doet hetzelfde als de condensatoren die in Figuur 7.4-4, Figuur 7.4-5 en Figuur 7.4-7 zijn getekend. De smoorspoel werkt veranderingen in de stroom tegen. De rechter condensator in Figuur 7.4-8 krijgt dan een min of meer constante aanvoer van stroom en werkt de laatste rimpels grotendeels weg.

Tegenwoordig zijn daar in de vorm van elektronische spanningsstabilisatoren ook andere middelen voor. Een voorproefje daarvan krijgen we bij de *zenerdioden*. Maar eerst:

## 7.5 Capaciteitsdioden

Als een diode in sperrichting is aangesloten, is er een uitputtingszone aan weerskanten van de junctie. Omdat die nagenoeg niet geleidt, is het ook een diëlektricum. Dat ruikt naar condensator. Een condensator heeft twee elektroden of platen. Een diode heeft twee elektroden, anode en kathode. De capaciteit van een condensator hangt onder meer af 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.

Een in sperrichting geschakelde diode is daarom te zien als een condensator waarvan de spanning de capaciteit stuurt. De naam van zo'n diode is *capaciteitsdiode* of *varicap*. Sommige dioden zijn speciaal gemaakt voor dit doel. Ze worden meestal gebruikt voor het veranderen van de resonantiefrequentie (*verstemmen*) van LC-kringen (Hoofdstuk 5). 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  $D_1$ .

De regelspanning voor de diode ( $D_1$ ) komt vanuit het systeem  $R_1$ ,  $R_2$  en  $R_3$ .  $R_2$  is de potentiometer waarmee de spanning over de diode wordt ingesteld.  $R_3$  zorgt ervoor dat de regelspanning niet 0 kan worden en  $R_1$  voorkomt een directe verbinding met de positieve spanning  $U$ . Dit laatste is nodig, omdat een directe verbinding met  $U$  laagohmig is en dan de  $Q$  van de kring bederft.  $R_1$  zal daarom een hoge waarde hebben, bijvoorbeeld 100 k $\Omega$ . De condensator  $C$  voorkomt dat de regelspanning via de spoel  $L$  wegvloeit. De capaciteit van  $C$  is meestal flink hoger dan de hoogste capaciteit van diode  $D_1$ , zodat het regelbereik zo groot mogelijk is. Als een beperkt regelbereik van  $D_1$  juist de bedoeling is, dan is dat te bereiken door 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.

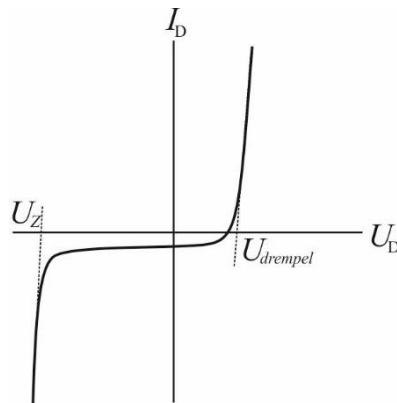
**Let op!** In het stukje tekst hierboven zijn symbolen voor onderdelen recht op geschreven en het symbool voor de waarde *cursief*. Een onderdeel is een ding (recht op), de waarde een grootheid (*cursief*).

Verwacht van capaciteitsdioden geen heel hoge capaciteitswaarden. Vaak zitten ze met hun maximum ergens rond 50 pF; sommige typen komen wat hoger, sommige lager.

## 7.6 Zenerdioden

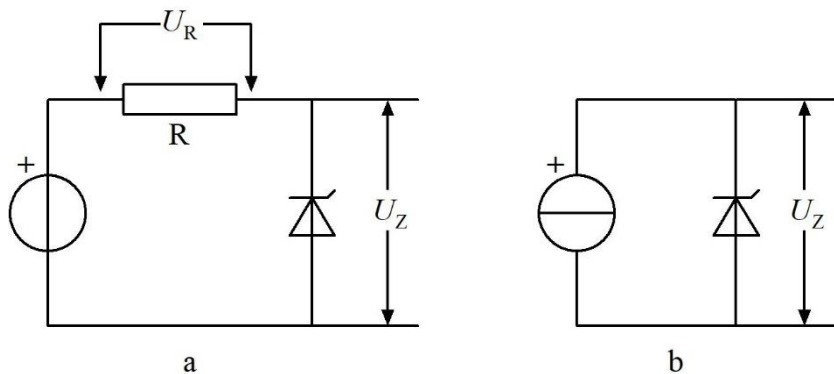
Zenerdioden worden in sperrichting aangesloten. Als de spanning over de diode groot genoeg wordt, zal er toch een stroom gaan lopen. De oorzaak is toenemende sterkte van het elektrisch veld in de uitputtingszone. Als de stroom niet te groot wordt, blijft de diode heel. De spanning waarbij de stroom op gang kwam, blijft over de diode staan. Daarvoor geschikt gemaakte dioden heten *zenerdioden*. Ze worden gebruikt om vaste spanningen te maken.

Figuur 7.6-1 toont een licht geschematiseerde grafiek van het gedrag van een zenerdiode.



Figuur 7.6-1. Doorlaatkarakteristiek van een zenerdiode met diodespanning  $U_D$ , diodestroom  $I_D$ , drempelspanning  $U_{drempel}$  en zenerspanning  $U_Z$ . Op de horizontale as is  $U_D$  rechts van het snijpunt met de verticale as in doorlaatrichting, links in sperrichting.

De stroom door de diode kan worden beperkt met een serieweerstand. Het kan ook met een stroombron in plaats van een spanningsbron met weerstand. De bronstroom moet laag genoeg zijn om de diode heel te houden. Een stroombron is met een transistorschakeling goed te benaderen. Figuur 7.6-2 toont van beide schakelingen een voorbeeld.



Figuur 7.6-2. Schakelingen om een zenerspanning te krijgen zonder de zenerdiode aan een te grote stroom bloot te stellen. In schakeling a wordt daarvoor een weerstand gebruikt, in schakeling b een stroombron.

Hoe zit het nu met de spanningen en de stromen in Figuur 7.6-2? Zoals altijd geldt de tweede wet van Kirchhoff: de som van de spanningen is 0. Als we in schakeling a de spanning van de bron  $U_{bron}$  noemen, dan geldt:

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

En dus ook

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

Meestal maken we ons niet druk over het minteken, omdat het betrekking heeft op de polariteit van de spanningen. De stroom  $I$  door de onbelaste 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 hebben het nog niet gehad over schakeling b. Die is een stuk 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 alleen niet zo groot zijn dat de zenerdiode het begeeft. Informatie over toelaatbare zenerstroom vind je in databoeken of op Internet.

Zenerdioden worden gebruikt als leverancier van referentiespanningen, bijvoorbeeld in gestabiliseerde voedingen. Ze kunnen ook worden gebruikt om een spanning met de grootte van de zenerspanning te verlagen. Ze worden dan in serie met de voedingsleiding opgenomen. Er gebeurt hetzelfde als in Figuur 7.6-2, 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!). Die is steeds gelijk aan de bronspanning min  $U_Z$ .

## 7.7 Licht emitterende dioden (LED's)

LED's zijn tegenwoordig alom bekend. Het zijn bijzondere dioden in de zin dat ze niet uit germanium of silicium bestaan, maar meestal uit kristallen van gallium en arseen en vaak nog andere elementen. Ze hebben een PN-overgang waarop bij recombinatie van een elektron en een gat een foton (lichtdeeltje) ontstaat. 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 (ongeveer 5-10 mA) binnen de perken te houden. LED's worden ook veel gebruikt in displays. Meer informatie vind je bijvoorbeeld op <https://nl.wikipedia.org/wiki/Led>.

## 7.8 Dissipatie door een halfgeleiderdiode

Voor alle halfgeleiderdioden geldt dat de dissipatie gelijk is aan de stroom  $I_D$  door de diode maal de spanning  $U_D$  over de diode. De Wet van O

Bij in voorwaartse richting geschakelde dioden is  $U_D$  bij benadering gelijk aan de drempelspanning. Tabel 7.8-1 geeft enkele waarden.

Tabel 7.8-1 Dioden en hun drempelspanning

Soort diode	Drempelspanning $U_D$ (V)
Germanium (Ge)	$\approx 0,2$
Silicium (Si)	$\approx 0,6$
LED	1,7-4,6 V



In alle gevallen geldt voor de dissipatie  $P$  (in W)

$$P = U_D I_D \quad (7.8-1)$$

Een capaciteitsdiode staat bij normaal gebruik gesperd en voert dan dus geen stroom.  
Geen stroom betekent geen dissipatie.

Bij een zenerdiode die geleidt, staat over de diode de zenerspanning  $U_z$ . Voor  $P$  van een zenerdiode geldt de variant op vergelijking (7.8-1):

$$P = U_z I_D \quad (7.8-2)$$