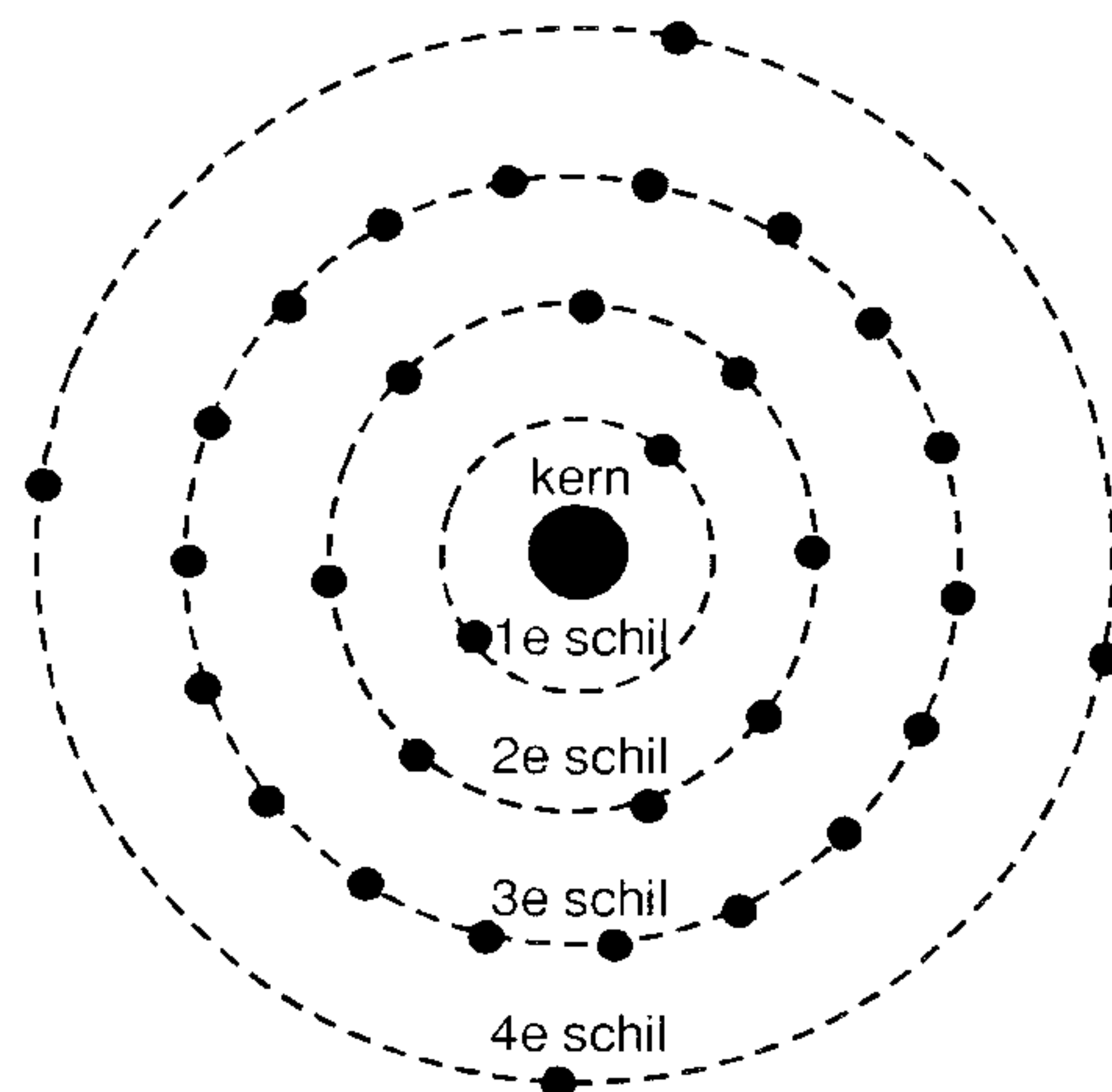


8. HALFGELEIDERS

8.1 Halfgeleidermaterialen

Inleiding

In het stuk over elektriciteit en de bouw van atomen en moleculen hebben we een onderscheid gemaakt tussen geleidende en niet-geleidende stoffen, ofwel geleiders en isolatoren. De geleidende eigenschappen van een element worden grotendeels bepaald door het aantal elektronen in de buitenste elektronenschil. Als dit aantal zo klein is, dat een volle buitenste schil het eenvoudigst te verkrijgen is door het afstaan van elektronen, dan is het materiaal geleidend. In alle andere gevallen, inclusief praktisch alle moleculen, is sprake van een slechte geleider (isolator). Er is echter een kleine groep van elementen, waarbij de buitenste schil halfvol is, d.w.z. het aantal elektronen in de buitenste schil bedraagt 4 (figuur 8.1-1).



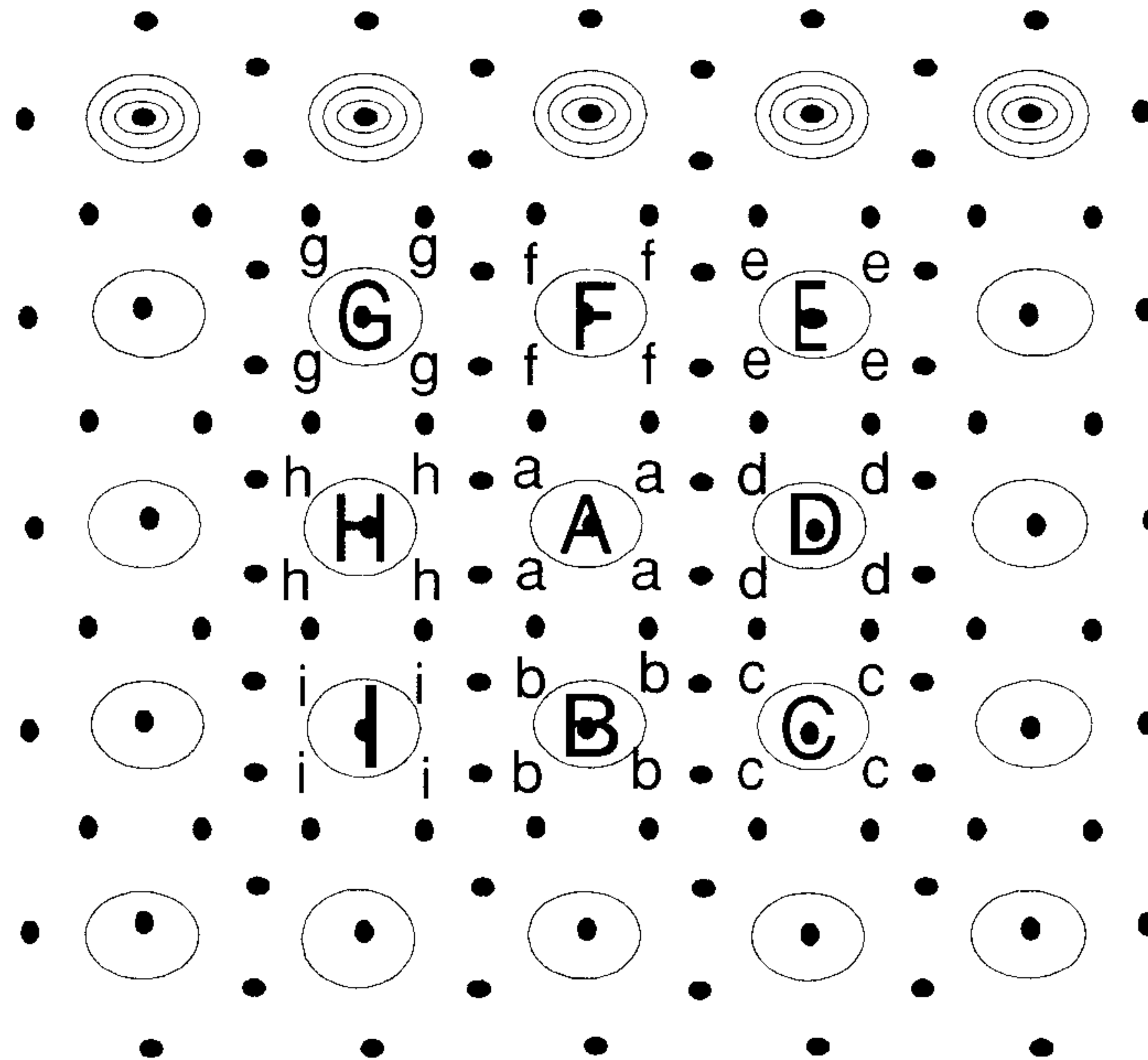
Figuur 8.1-1. Germanium atoom

Ogenschijnlijk strookt dit niet met de formule $2N^2$ voor het aantal elektronen in de 3^e en volgende schillen. Ook als het nummer van de buitenste schil 3 of hoger is en deze schil pas echt vol is met 18, 32 of meer elektronen, dan is er met 8 elektronen in de buitenste schil een stabiele situatie. Stoffen waarvoor dit geldt zijn onder andere koolstof (C), silicium (Si) en germanium (Ge).

Koolstof komt voor in 2 vormen die bepaald worden door een verschil in bouw van hun kristalrooster. De eerste vorm is grafiet, dat zacht is en vrij goed geleidt. De andere vorm is diamant, het hardste mineraal dat we kennen. Diamant is een slechte geleider. Zuiver kristallijn silicium heeft ook slechte geleidende eigenschappen. Germanium geleidt wat minder slecht, maar kan toch niet als een echte geleider worden beschouwd.

Het kristalrooster van diamant, silicium en germanium is opgebouwd als aangegeven in figuur 8.1-2. Deze figuur geeft een 2-dimensionale schematisering. In werkelijkheid is het rooster 3-dimensionaal opgebouwd. De voorstelling volgens figuur 8.1-2 is voor ons doel voldoende. Elk atoom

in het kristalrooster heeft 4 elektronen in de buitenste schil. Twee aangrenzende atomen hebben steeds twee elektronen gemeenschappelijk, van elk atoom een. Aangezien elk atoom 4 burens heeft, lijkt het of het omgeven is door 8 buitenelektronen in plaats van 4. Zo'n kristal zou dus kunnen worden opgevat als één groot molecuul.



Figuur 8.1-2. Germanium kristalrooster. De rondjes stellen voor de atoomkernen met de geheel gevulde elektronenschillen. De kleine puntjes de elektronen van de buitenste schil.

Verplaatsing van lading in de kristalstructuur

Het ligt voor de hand dat in een structuur als hiervoor omschreven de beweeglijkheid van elektronen en dus het geleidingsvermogen gering is. Het is echter mogelijk dat een elektron losraakt van zijn plaats en bij een ander atoom terechtkomt. Dit kan onder meer gebeuren onder invloed van een sterk elektrisch veld. Er is dan bij een atoom een elektron te veel en bij een ander atoom is een gat ontstaan. Zowel elektron als gat blijken zich goed door het kristalrooster te kunnen verplaatsen. Het elektron, omdat het atoom met een elektron teveel dit gemakkelijk overdoet aan een van zijn burens en het gat omdat een atoom met een elektron tekort gemakkelijk een elektron van een van zijn burens overneemt, waarmee het gat dus bij een naast liggend atoom terechtgekomen is. Deze vorm van geleiding, springen van atoom naar atoom, is nogal temperatuurafhankelijk. Warmte uit zich namelijk in materie door beweging van atomen en/of moleculen. In een vast kristalrooster verplaatsen die deeltjes zich weliswaar niet, maar ze zijn wel in trilling. Hoe sterker de trilling, des te gemakkelijker kan een elektron loslaten en aan de wandel gaan. De groep stoffen met dit type geleiding noemt men *halfgeleiders*. De meeste normale geleiders vertonen bij stijgende temperatuur juist het omgekeerde verschijnsel: het geleidingsvermogen neemt enigszins af bij stijgende temperatuur (de weerstand neemt dus toe).

Verontreinigingen

Het hierboven beschreven verschijnsel van halfgeleiding, dus een geringe geleiding als gevolg van het van atoom naar atoom kunnen springen van gaten en elektronen kan kunstmatig worden versterkt. Daartoe moet het kristal licht worden verontreinigd door bijmenging van een element met 3 of met 5 elektronen in de buitenste schil. In het kristalrooster komt dan in de plaats van een atoom met 4 elektronen een met 3 of 5 stuks (bijvoorbeeld indium (In) of aluminium (Al) met 3, respectievelijk arseen, (As) met 5 elektronen). Waar bijvoorbeeld een indiumatoom de plaats inneemt van een siliciumatoom in het kristalrooster, is op grond van de regelmaat van de kristalstructuur een elektron te weinig. Anders gezegd: er is een gat. De elektrische neutraliteit van het geheel is echter niet verstoord.

Het gat blijkt zich tamelijk probleemloos door het kristalrooster te kunnen verplaatsen. Datzelfde verhaal gaat op wanneer arsenicum wordt toegevoegd. Doordat arsenicum 5 elektronen in zijn buitenste schil heeft, is er nu een elektron dat zich kan verplaatsen. In de halfgeleidertechniek spreekt men bij wijze van verzamelnaam voor zulke mobiele elektronen en gaten wel van *ladingdragers*, een naam die voor zichzelf spreekt. Germanium of silicium met een gatenproducerende verontreiniging noemt men P-germanium of P-silicium, verzamelnaam P-materiaal. Bij elektronenproducerende verontreiniging spreekt men van N-germanium resp. N-silicium, verzamelnaam N-materiaal. Men moet zich de benodigde verontreinigingen niet al te groot voorstellen: het gaat om het vervangen van niet veel meer dan 1 op de 100-miljoen atomen! Dit betekent dat het silicium of germanium, waarvan men uitgaat, voor het aanbrengen van de verontreinigingen extreem zuiver moet zijn. Deze zuiverheidseis heeft in de begintijd van de halfgeleidertechniek voor de nodige problemen gezorgd, vooral bij de toepassing van silicium.

8.2 Dioden

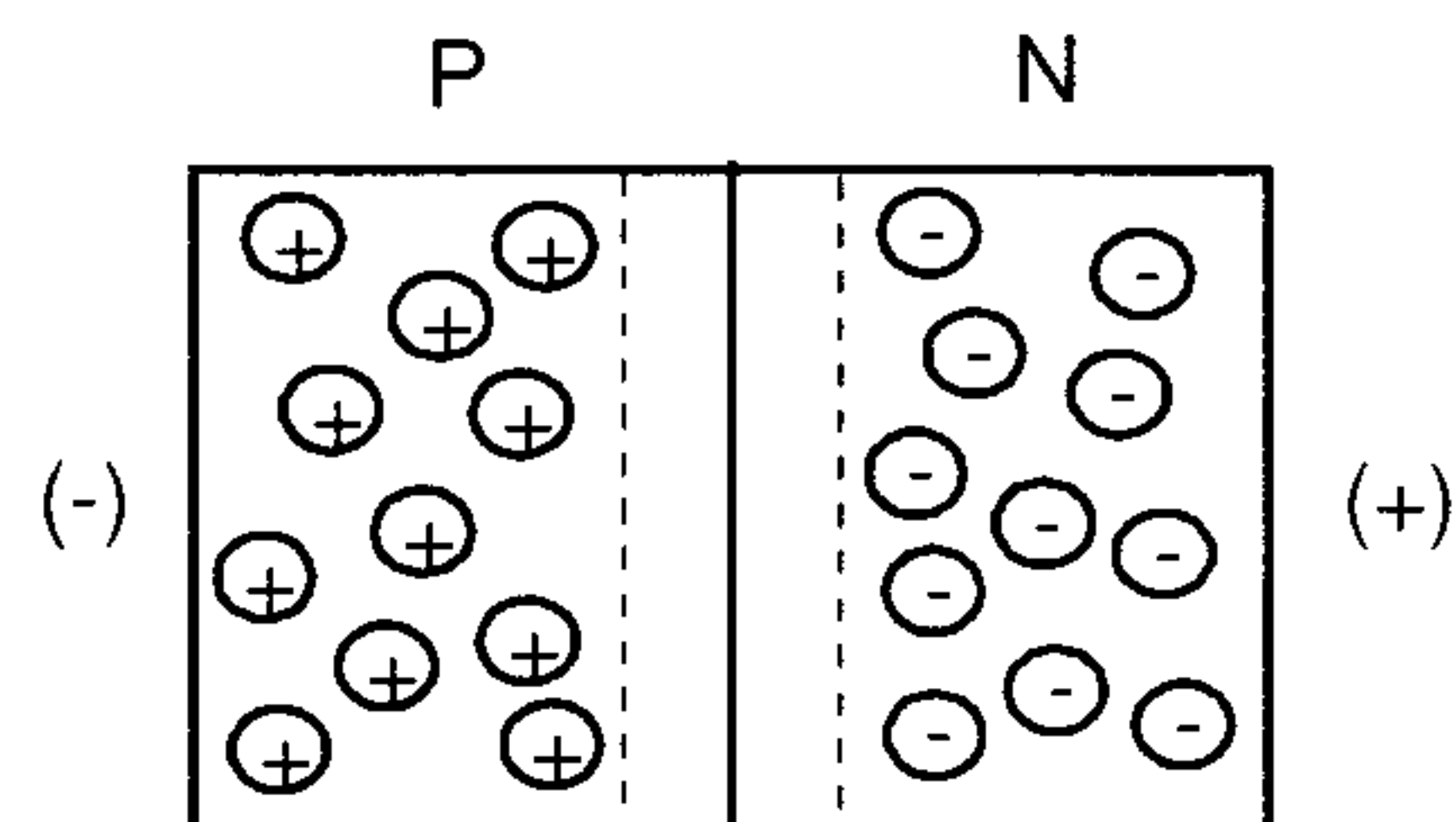
Inleiding

Wanneer we een stukje materiaal bezien, dat voor de helft P- en voor de andere helft N-verontreinigingen bevat, dan constateren we dat de ladingdragers in het kristalrooster van het P-materiaal gaten zijn, die in het N-materiaal elektronen. Het grensvlak tussen P- en N-materiaal wordt *junctie* genoemd. Dit betekent *overgang*. Het is het vlak waar P- en N-materiaal met elkaar zijn verbonden.

De PN-overgang

De beweeglijke elektronen in het N-materiaal oefenen een zekere aantrekkingskracht uit op de eveneens beweeglijke gaten in het P-materiaal en omgekeerd. Er verplaatsen zich daardoor ladingdragers naar de PN-overgang of junctie. Elektronen zullen zich in het P-materiaal begeven en gaten opvullen. Men kan ook zeggen, dat gaten het N-materiaal binnen gaan en elektronen neutraliseren. Het eerste is echter beter voor te stellen. Men noemt dit proces *recombinatie*. Het gevolg van deze recombinatie is, dat het

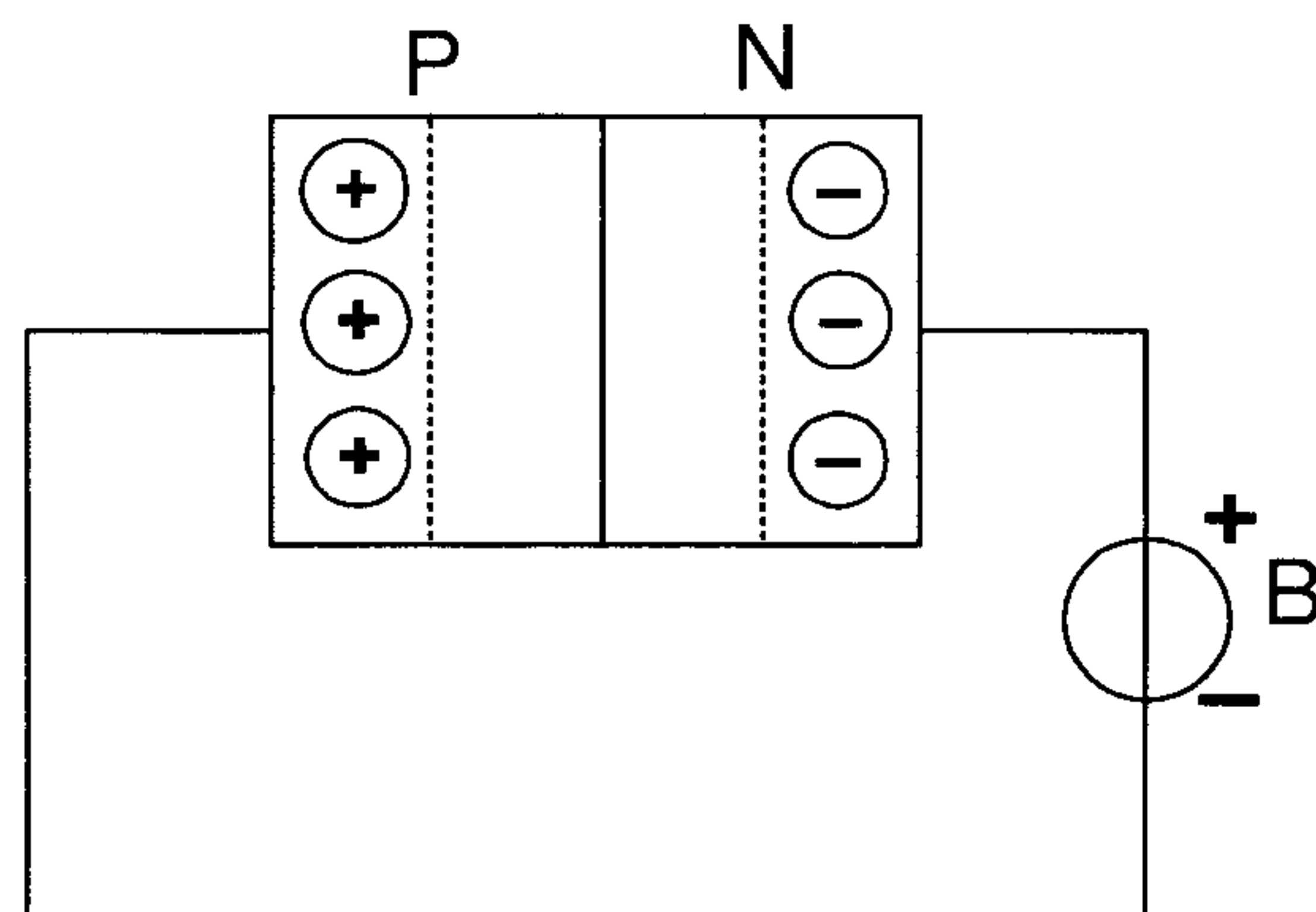
aanvankelijk elektrisch neutrale P-materiaal negatief geladen wordt t.o.v. het N-materiaal. Dit laatste wordt positief ten opzichte van het P-materiaal. Daardoor zullen ladingdragers van de PN-junctie worden afgestoten. De negatief geladen P-helft stoot de elektronen in de N-helft af en de positief geladen N-helft stoot de gaten in de P-helft af. Als gevolg hiervan ontstaat bij de PN-junctie een gebied zonder ladingdragers. Men noemt dit wel de uitputtingszone (zie figuur 8.2-1).



Figuur 8.2-1. PN-overgang met uitputtingszone. Deze is het gevolg van recombinatie van gaten (+) en elektronen (-) die de ladingdragers in het P- resp het N-gebied vormen. Het P-gebied is negatief t.o.v. het N-gebied.

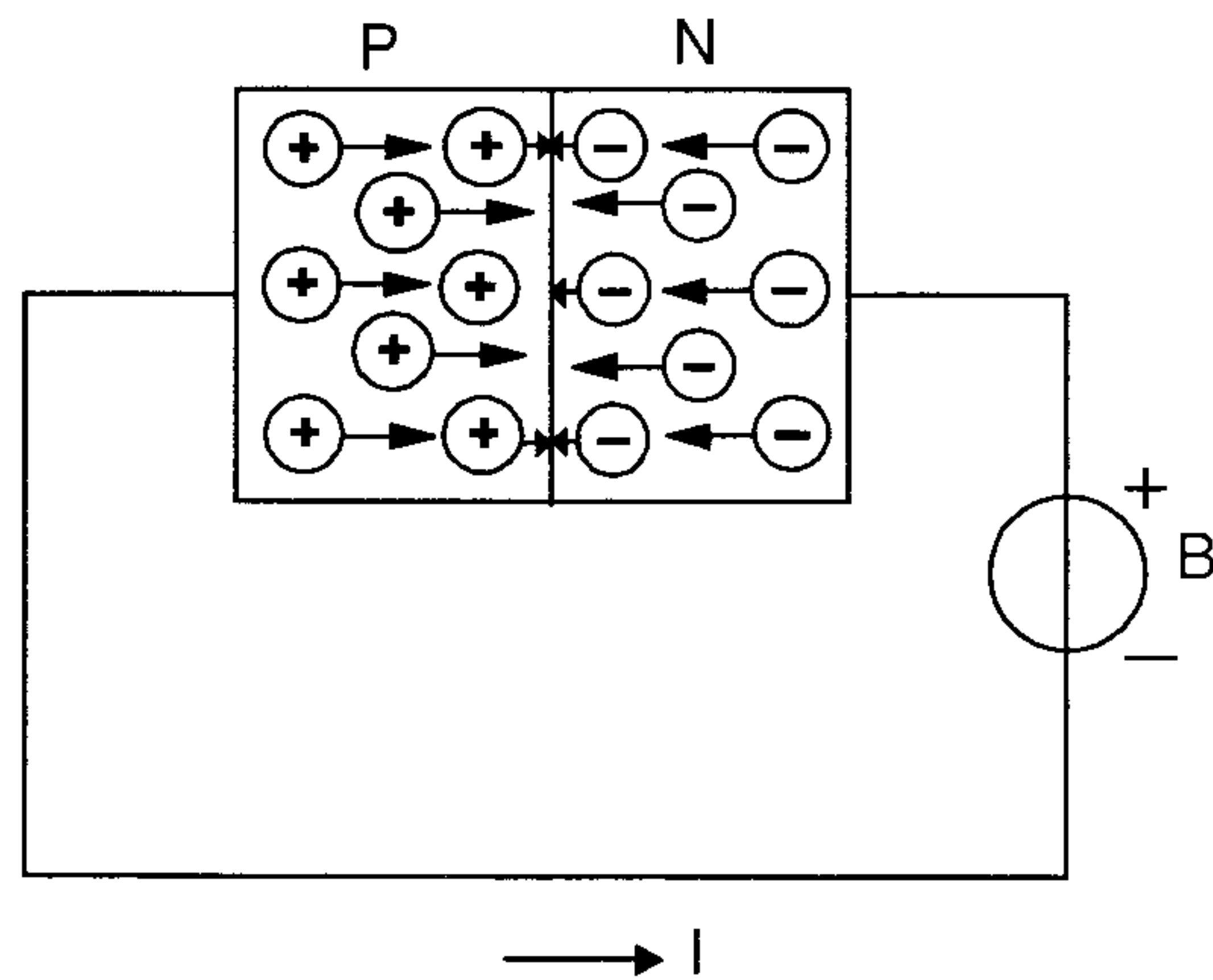
Spanning op een PN-overgang

Sluiten we nu een spanning aan met de '+' aan het N-materiaal en de '-' aan het P- materiaal, dan zal de uitputtingszone breder worden. Als gevolg van de aanwezigheid van de uitputtingszone zal (vrijwel) geen geleiding optreden (figuur 8.2-2).



Figuur 8.2-2. Verbreding van de uitputtingszone onder invloed van de spanningsbron B (P aan '-', N aan '+'). Hoe hoger de spanning, des te breder is de uitputtingszone.

Keren we de spanning om, dan zal bij toenemende spanning de uitputtingszone steeds dunner worden, totdat deze verdwijnt. Dan kunnen ladingdragers de grenslaag passeren en treedt geleiding op (figuur 8.2-3). De spanning, welke nodig is om de grenslaag juist te laten verdwijnen, bedraagt bij Germanium (Ge) ongeveer 0,2 V en bij Silicium (Si) ongeveer 0,6 V. Bij geleiding blijft die spanning over de halfgeleider staan.

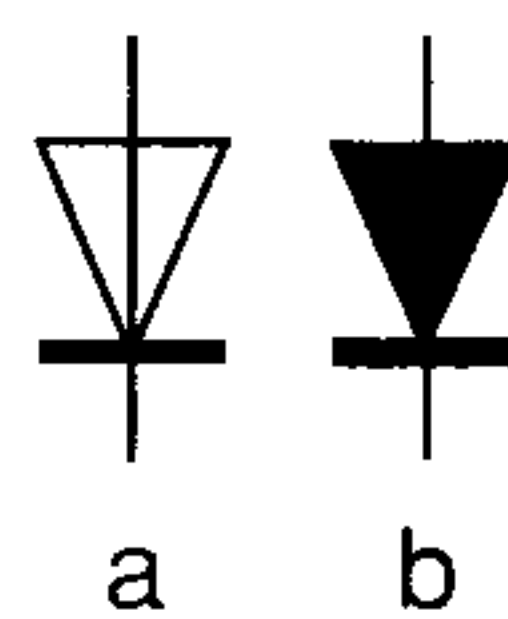


Figuur 8.2-3. Bij omkeren van de spanning (t.o.v. figuur 8.2-1) treedt geleiding op. De ladingdragers in zowel het P- als N-materiaal bewegen zich in de richting van de junctie.

De geleiding heeft geen gevolgen voor de aanwezige hoeveelheid ladingdragers in het kristalrooster. Om deze bewering te staven, beschouwen we het P-materiaal. Bij de junctie komen elektronen het materiaal binnen, waardoor ze een gat opvullen. Daar verdwijnen dus gaten. Aan de andere kant van het P-materiaal stromen elektronen weg, de aansluitdraad in. Daar ontstaan dus gaten, die weer worden gevuld met elektronen welke komen uit de junctie. Het is alsof de gaten zich naar de junctie verplaatsen. Hieruit blijkt, dat verplaatsing van elektronen in een richting neerkomt op verplaatsing van gaten in tegengestelde richting. Probeer zelf eens, deze redenering voor het N-materiaal op te zetten.

Halfgeleiding

We hebben nu een ding dat stroom slechts in een richting geleidt. Zo'n ding heet een diode, wat eigenlijk 'tweeweg' betekent. Een diode heeft dan ook twee aansluitingen, een aan het P-materiaal en een aan het N-materiaal). Men spreekt in plaats van P- of N-aansluiting vrijwel steeds over anode, respectievelijk kathode. De anode is de P-kant, de kathode de N-kant. Het schemasymbool voor een diode staat in figuur 8.2-4a, het in de meeste schema's gebruikte symbool in figuur 8.2-4b.



Figuur 8.2-4a. Genormaliseerd schemasymbool voor een halfgeleider diode.

Figuur 8.2-4b. Veel gebruikt schemasymbool. In beide gevallen is de 'pijl' de anode ('+'-aansluiting bij aansluiting in de doorlaatrichting) en de dwarsstreep de kathode. De 'pijl' wijst dus in de richting van de stroom bij aansluiting in doorlaatrichting.

8.3 Eigenschappen van halfgeleiderdioden

Lekstroom

In het voorgaande hebben we gezien dat een halfgeleiderdiode bij aansluiting in doorlaatrichting geleidt, zij het dat daarvoor een minimale spanning van ca 0,2 V vereist is bij Ge- en ca 0,6 V bij Si-dioden. Deze spanning is nodig om de uitputtingszone bij de PN-junctie teniet te doen. Bij aansluiting in sperrichting blijft echter altijd een geringe lekstroom vloeien. Deze lekstroom is sterk afhankelijk van de uitvoering van de diode, de aangelegde spanning en vooral van de temperatuur. Voor dioden, bedoeld voor kleine stromen, is de lekstroom kleiner dan voor dioden, die in voorwaartse richting grote stroomsterkten moeten kunnen verwerken en voor Si-dioden ruwweg 100 maal zo laag als voor vergelijkbare Ge-dioden. Ze neemt zeer sterk toe bij verhoging van de temperatuur.

Voor een kleine Si-signaaldiode, bijvoorbeeld van het type 1N4148, wordt 25 nA bij 20 V en 25° C opgegeven, oplopend tot 3 mA bij 100° en 50 mA bij 150° C. De bruikbaarheid van Si-halfgeleiders eindigt bij een temperatuur van circa 150° C, die van Ge-halfgeleiders bij zo'n 80° C.

Diodecapaciteit

In sperrichting aangesloten dioden vormen een (kleine) condensator. Het dielektricum wordt gevormd door de uitputtingszone, de platen door het P- en N-materiaal, waarin ladingdragers voorkomen. De grootte van de diodecapaciteit is afhankelijk van de aangelegde spanning. Dit komt omdat de dikte van de uitputtingszone en daarmee de plaatafstand afhangt van die spanning. Al eerder hebben we gezien, dat de capaciteit van een condensator omgekeerd evenredig is met de plaatafstand. Een grotere spanning in sperrichting over de diode verbreedt de uitputtingszone. De diodecapaciteit neemt dus af met toenemende spanning over de diode. De capaciteit van een PN-junctie kan vooral bij hogere frequenties onaangename gevolgen hebben in versterkerschakelingen. Hierover en over het tegengaan van die gevolgen zal echter in verdere hoofdstukken nog het nodige worden gezegd.

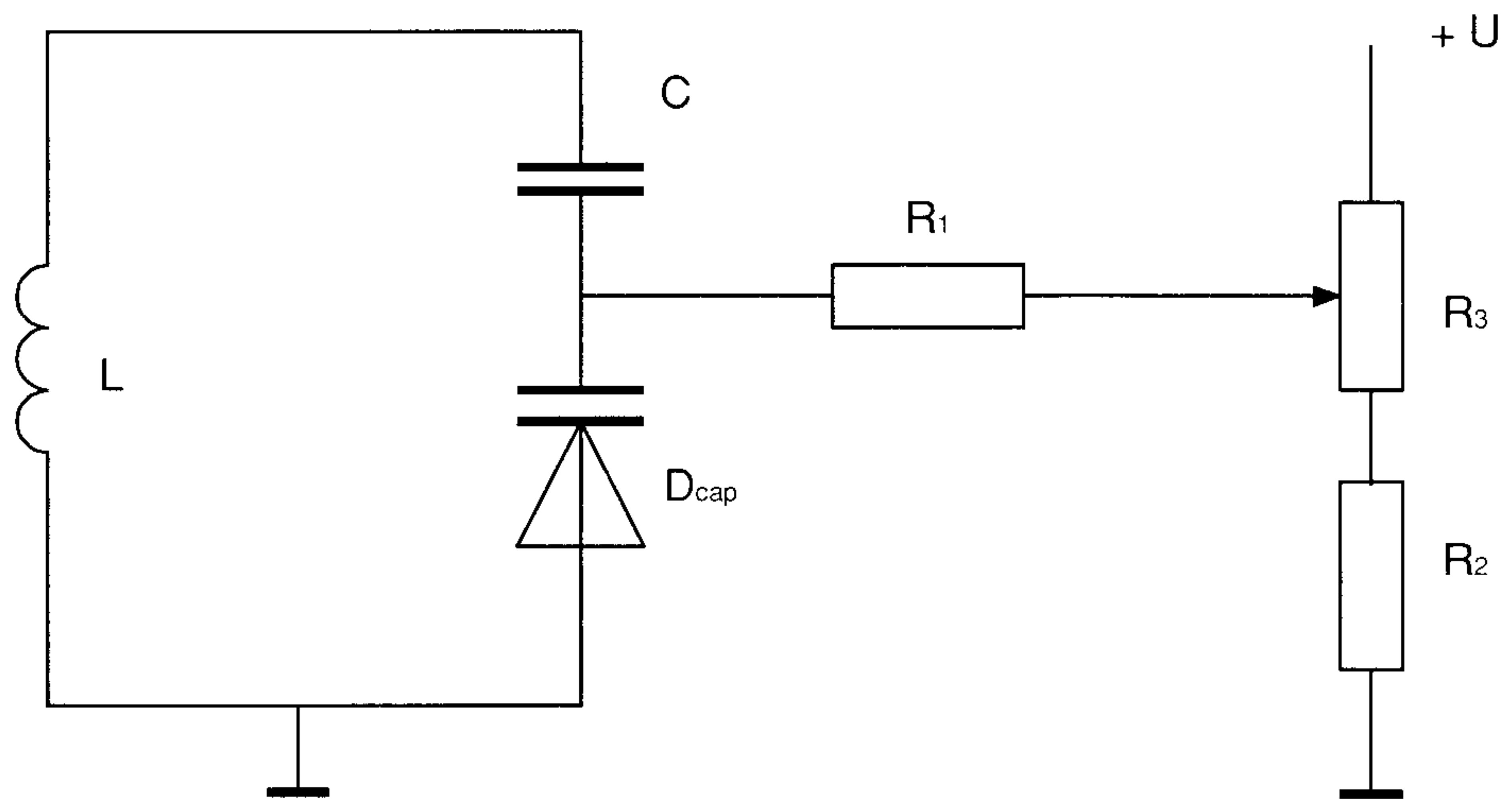
Lawine- en Zener-effect

Bij aansluiting van een diode in sperrichting zal de dikte van de uitputtingslaag bij toenemende spanning groter worden. Tegelijkertijd echter neemt ook de sterkte van het elektrisch veld in de grenslaag toe. De schaarse elektronen, die de grenslaag passeren en de lekstroom vormen, zullen daardoor een steeds hogere snelheid krijgen. Bij een bepaalde spanning wordt de snelheid zo groot, dat een elektron bij botsing met atomen uit het kristalrooster een of meer bijbehorende elektronen los stoot uit hun atoomverband, die op hun beurt weer nieuwe elektronen vrijmaken. Zo ontstaat een lawine-effect (in het Engels *avalanche breakdown* geheten), waardoor de diode plotseling geleidend wordt, ondanks het feit dat hij in sperrichting was aangesloten. Het is ook mogelijk dat het elektrisch veld zelf zo sterk is, dat het elektronen los trekt uit hun atoomverband. Ook hierbij treedt sterke geleiding op. Dit effect heet Zener-effect (Zener-breakdown). Deze effecten treden vaak gecombineerd op.

8.4 Bijzondere dioden en hun toepassingen

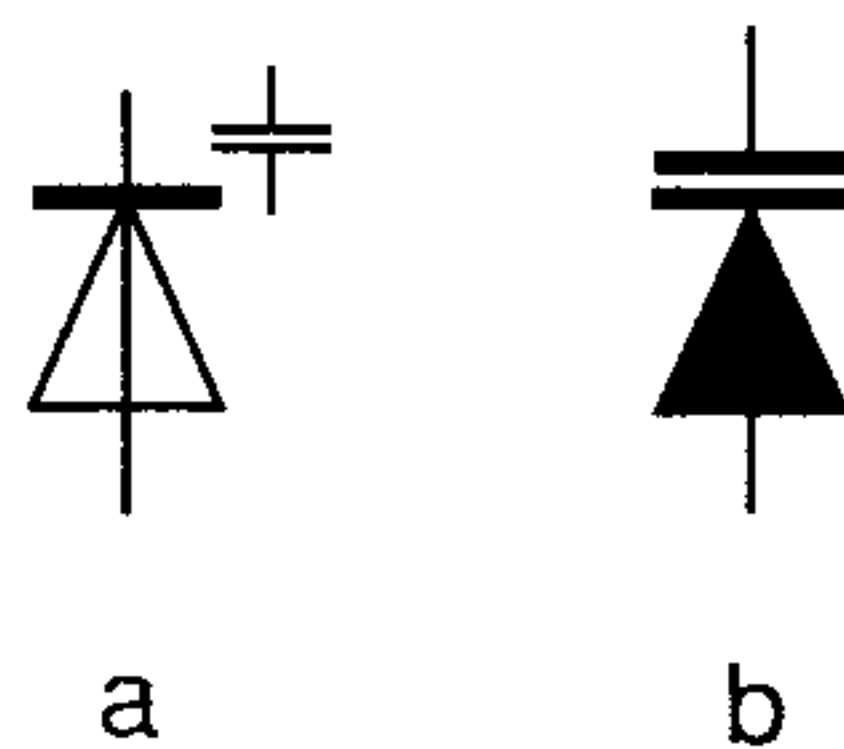
Varicaps

Capaciteitsdioden worden ook wel varicapdioden of varicaps genoemd. Ze worden vooral toegepast in kringen als spanningsgestuurde condensator. Zowel voor hoofdafstemming als voor de elektronisch geregelde afstemcorrectie kunnen varicaps gebruikt worden. Figuur 8.2-5 geeft een praktische schakeling van een kring met varicap-afstemming.

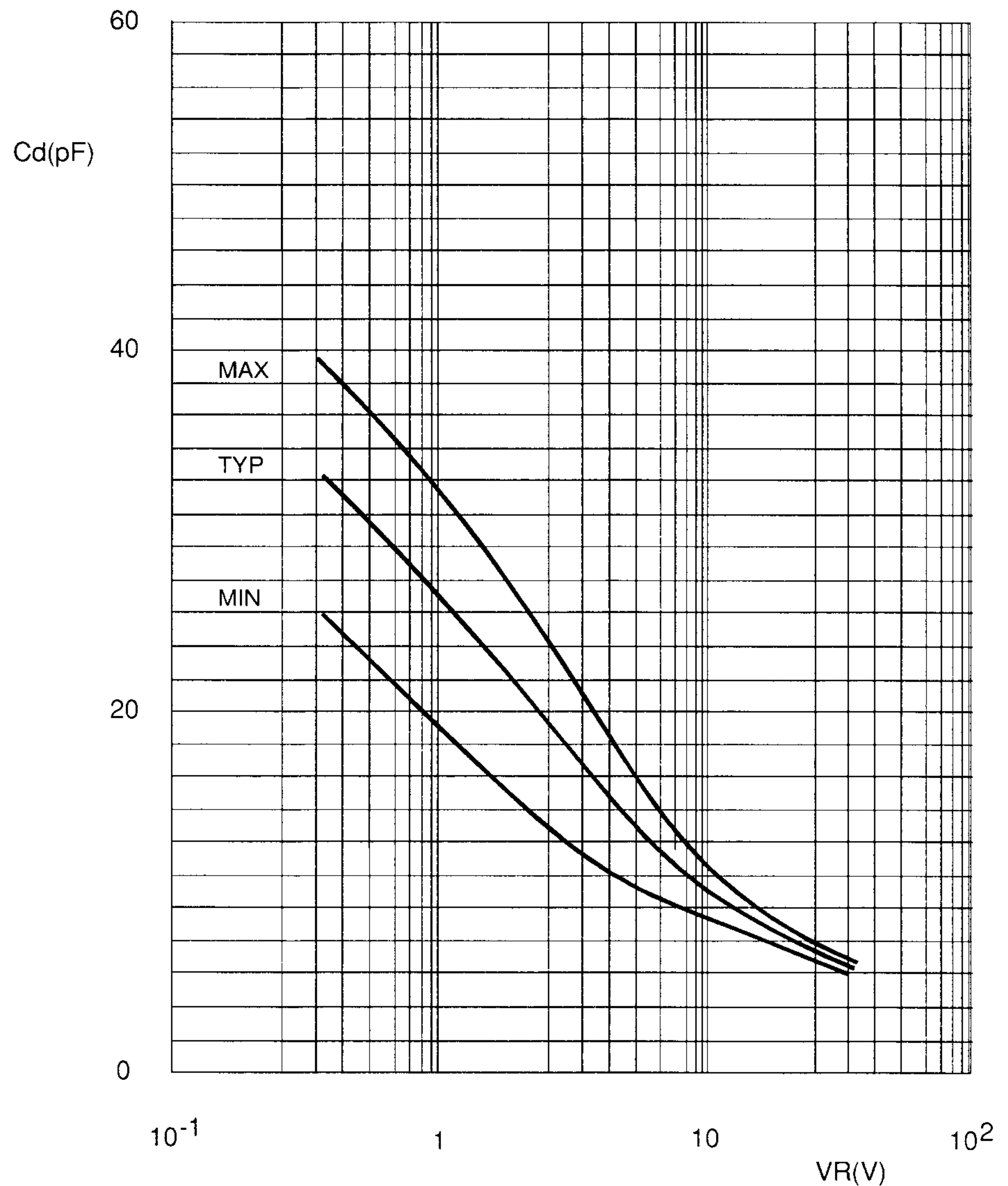


Figuur 8.2-5. Afstemming met potentiometer en capaciteitsdiode.

In figuur 8.2-7 is een grafische weergave van het verband tussen capaciteit (C_d) en de aangelegde spanning (V_r) voor de diode BB106. Merk op, dat de spannings-as logaritmisches is, d.w.z. de afstand op de as is evenredig met de logaritme van de spanning. De *max* en *min* stippelijnen geven het gebied aan, waarbinnen de capaciteit voor individuele exemplaren van het type BB106 moet liggen. Dit is net zoiets als tolerantie bij bijv. weerstanden. In de praktijk ligt de waarde vrijwel steeds ruim binnen deze grenzen. Het genormaliseerde schemasymbool voor een capaciteitsdiode staat in figuur 8.2-6a. Het schemasymbool in figuur 8.2-6b wordt in de praktijk vaker gebruikt.



Figuur 8.2-6. (a) Genormaliseerd schemasymbool voor een capaciteitsdiode
(b) Het meest gebruikt schemasymbool voor een capaciteitsdiode.

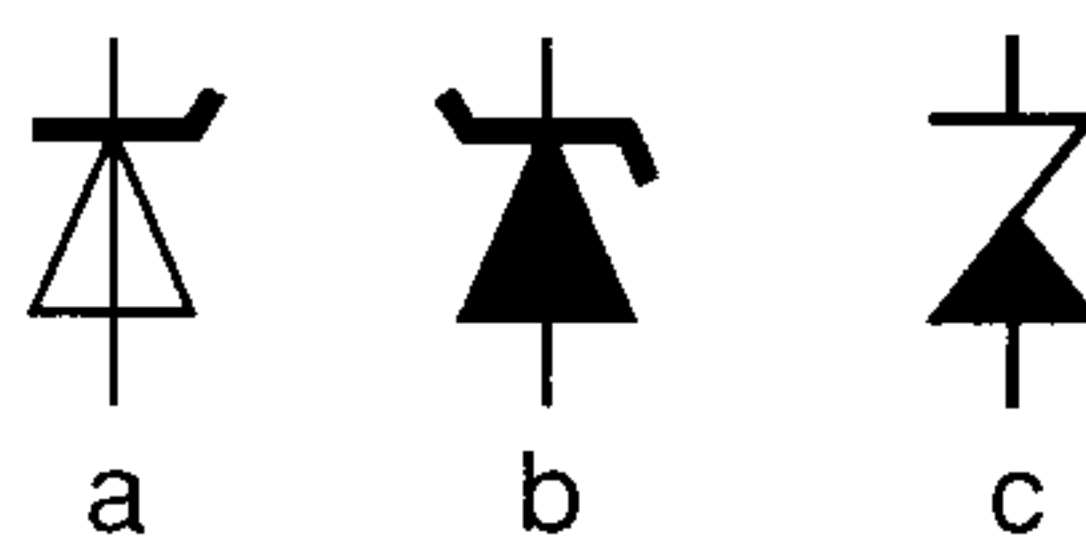


Figuur 8.2-7. Capaciteit tegen diodespanning bij BB106

Zenerdioden

Dioden die worden gebruikt vanwege het zenereffect heten Zenerdioden. Het interessante van een Zenerdiode is, dat de spanning waarbij geleiding in sperrichting optreedt, over de diode blijft staan, zolang de geleiding voortduurt. Zo'n diode kan daardoor dienst doen als spanningsstabilisator. De spanning over de diode is weinig afhankelijk van de grootte van de stroom. Wel moeten we ervoor zorgen dat de stroom door de diode niet te groot wordt, omdat anders te grote verwarming optreedt. Dit kan bijvoorbeeld door de Zenerdiode in serie te schakelen met een weerstand van voldoende grootte. Zenerdioden worden voor een groot aantal spanningen en stromen gemaakt. Het genormaliseerde schemasymbool staat in figuur 8.2-8a, enkele andere veel gebruikte symbolen in de figuren 8.2-8b en 8.2-8c.

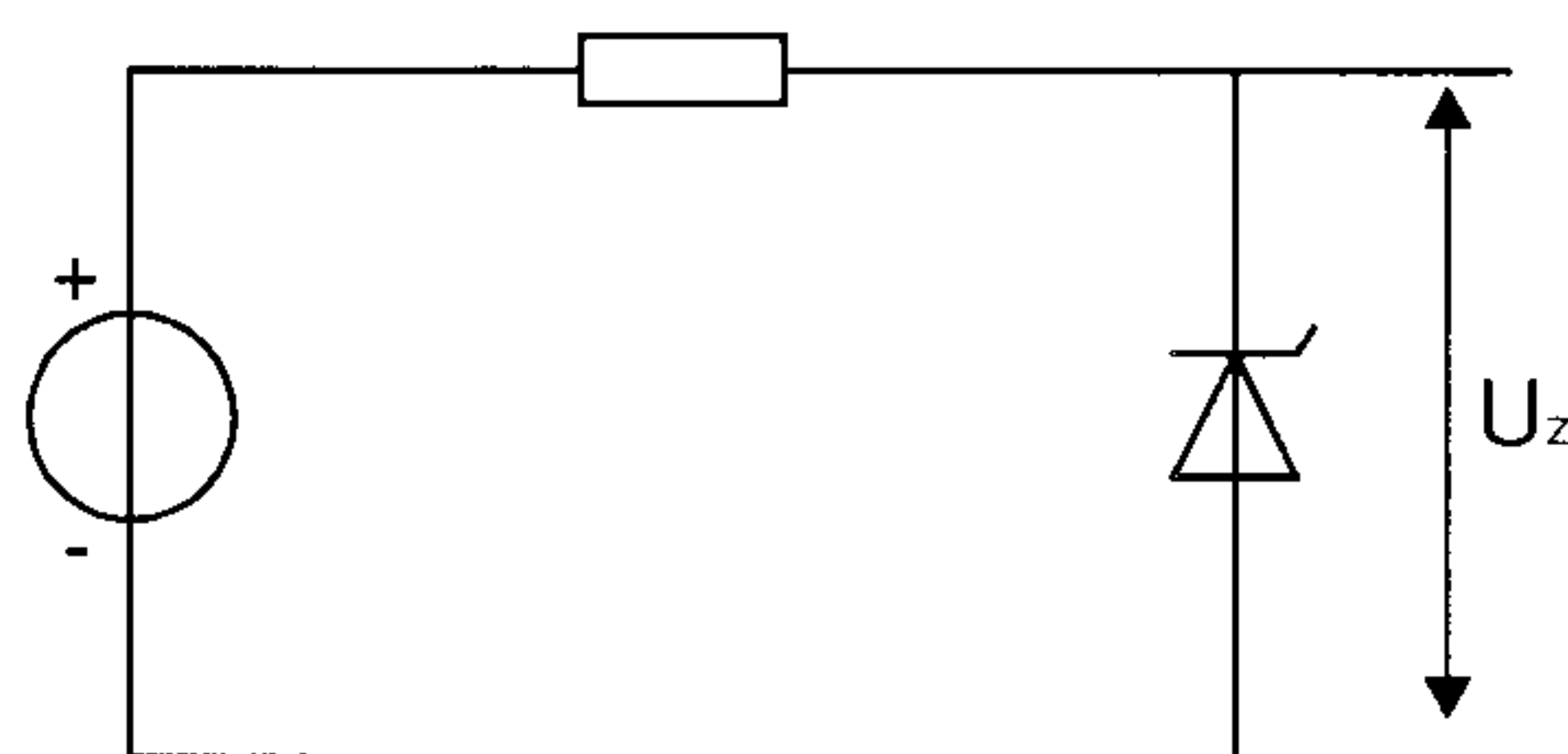
Een zeer eenvoudige schakeling voor spanningsstabilisatie met een zenerdiode staat in figuur 8.2-9.



Figuur 8.2-8. (a) Genormaliseerd schemasymbool voor een Zenerdiode. (b)/(c) veel gebruikte schemasymbolen voor Zenerdioden. De dioden zijn getekend met de kathode boven.

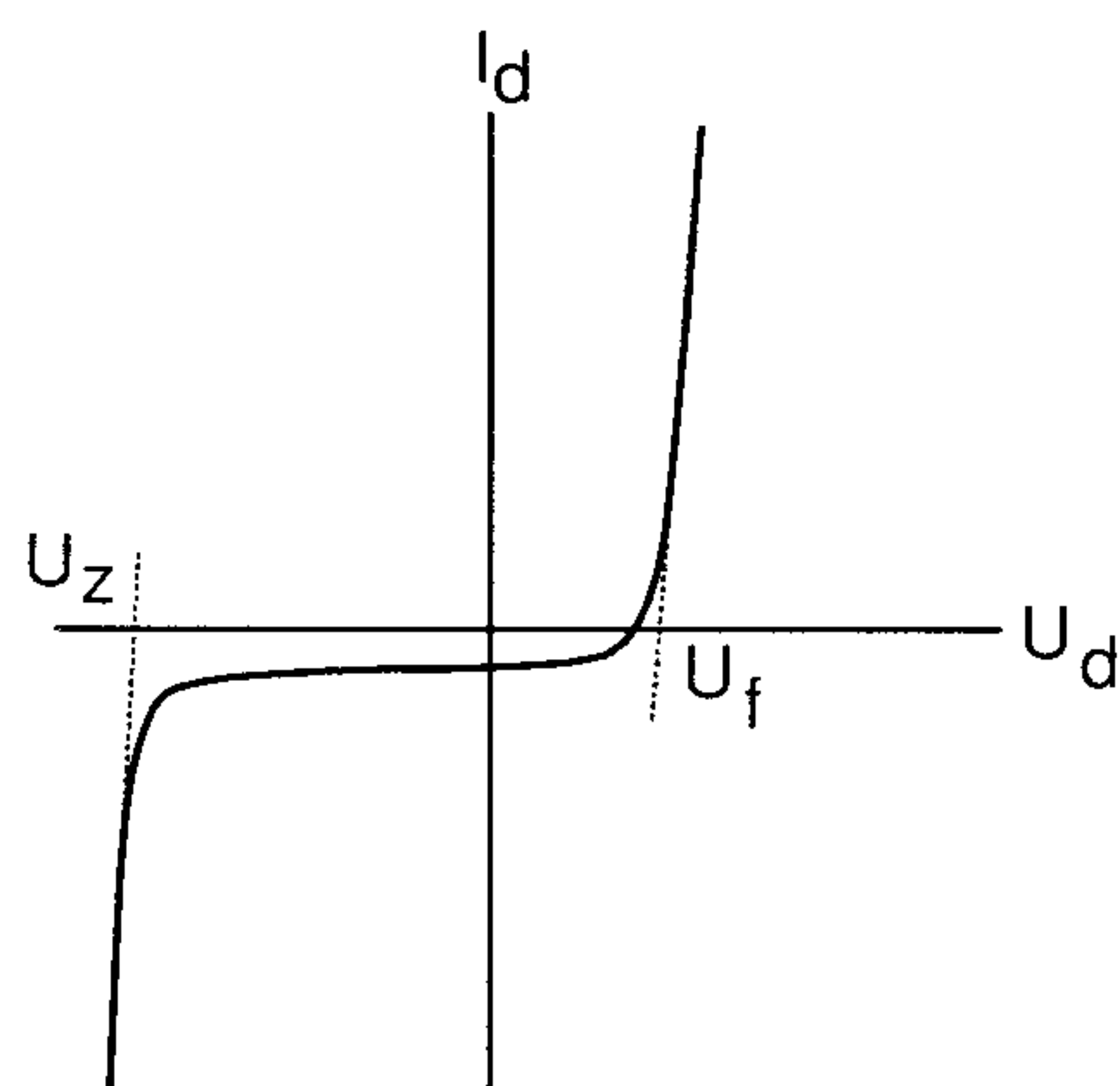
Het door de diode gedissipeerde vermogen is uit te rekenen door de diodestroom te vermenigvuldigen met de diodespanning:

$$P = I_d \cdot U_d$$



Figuur 8.2-9. Eenvoudige stabilisator schakeling met een zenerdiode. De spanning van de bron moet hoger zijn dan U_z .

Dit geldt voor zowel zenerdioden als voor de in doorlaatrichting aangesloten dioden. We kunnen het verband tussen stroom en spanning bij een halfgeleiderdiode grafisch weergeven (figuur 8.2-10).



Figuur 8.2-10. Doorlaatkarakteristiek van een halfgeleiderdiode. U_f is de spanning, waarbij de diode geleidt in doorlaatrichting (0,6V bij Si, 0,2 V bij Ge). U_z is de spanning, waarbij lawine- resp. Zener-effect begint op te treden. De stroomsterkte is op de verticale as uitgezet.

Uit de grafiek van figuur 8.2-10 blijkt dat de spanning over de, in doorlaatrichting geschakelde, diode enigszins met de stroomsterkte

toeneemt, evenals de spanning, wanneer de diode in het Zener-gebied komt. Binnen het bestek van deze cursus hoeft hiermee echter geen rekening te worden gehouden.

We zullen enige bijzondere dioden en hun toepassing in het kort de revue laten passeren. Zener- en capaciteitsdioden zijn in het voorgaande reeds behandeld.

LED

(*Light Emitting Diode*) Straalt bij stroomdoorgang in doorlaatrichting licht uit. Halfgeleidermateriaal: Galliumarsenide (GaAs), Galliumfosfide (GaP), of een mengsel van beide. Voorwaartse spanning: ca 1,5 V. Wordt toegepast vanwege de lichtemitterende eigenschappen in displays, signaleringen en in combinatie met fotodioden of -transistoren voor het zonder galvanische verbinding overbrengen van signalen in digitale systemen (o.a. Opto-couplers).

Fotodiode

De eigenschappen van een PN-junctie zijn afhankelijk van opvallend licht. Zoals bekend, laat een in sperrichting aangesloten diode een kleine lekstroom door. Deze lekstroom wordt veroorzaakt doordat elektronen in het uitputtingsgebied aan weerszijden van de junctie af en toe onder invloed van energie uit hun atoomverband loslaten. Bij een diode met lichtdichte omhulling is die energie warmte. Bij een licht doorlatende omhulling kan ook opvallend licht voor die energie zorgen. De lekstroom neemt dan toe bij opvallend licht.

Varactor dioden

Speciaal soort capaciteitsdiode, veelal voor grotere vermogens. Bij aanleggen van een wisselspanning zal de diode in de ene halve periode geleiden, in de andere niet. Bij de overgang van de geleidende in de niet-geleidende periode moeten eerst de ladingdragers uit het junctie-gebied worden verwijderd. Bij een flinke diodecapaciteit duurt dat even (enkele nanoseconden). Gedurende die tijd blijft de diode geleiden. Daarna treden de spereigenschappen zeer plotseling op, zodat een scherpe afsnijding van de stroom ontstaat, welke aanleiding geeft tot de vorming van harmonischen van de frequentie van de aangelegde spanning. Toepassing: frequentievermenigvuldigers voor zeer hoge frequenties en in speciale ruisarme (parametrische) versterkers voor het microgolf gebied.

Gunn-diode

Deze diode bestaat in feite uit 3 lagen zonder echte PN-overgang. Het materiaal is Gallium Arsenide (GaAs). Toepassing: opwekking en versterking van microgolfsignalen.

Impatt-dioden

Bevat wel een PN-overgang plus nog een zwaar verontreinigde N-laag, dus in feite ook 3 lagen. Materiaal: Si of GaAs. Toepassing: vergelijkbaar met Gunn-diode.

PIN-diode

Bevat op de plaats van de PN-overgang een laagje zuiver Si. Het resultaat is een trage werking, waardoor bij hogere frequenties het ding niet meer als diode werkt. Deze grens ligt bij moderne typen ergens in de buurt van 1 tot 2 MHz. Boven die grens werkt de diode als een zuivere Ohmse weerstand, waarvan de grootte alleen afhangt van een, in voorwaartse richting lopende, gelijkstroom. Door die stroom regelbaar te maken, hebben we een stroomgestuurde weerstand voor HF. Toepassingen: verzwakkers voor HF, omschakelen van zenden op ontvangen en omgekeerd bijv. van antennes, bandschakelaars in TV-afstemeenheden.

Vacuumdioden

De dioden met elektronenbuizen (wordt later besproken) zijn veelal vervangen door halfgeleider dioden. De werking berust op het eenrichting verkeer van elektronen in het zogenaamde vacuum, net als bij de halfgeleiders op de PN-overgang. Het resultaat is echter hetzelfde en bij de verdere behandeling maken we geen onderscheid meer tussen deze twee soorten dioden.

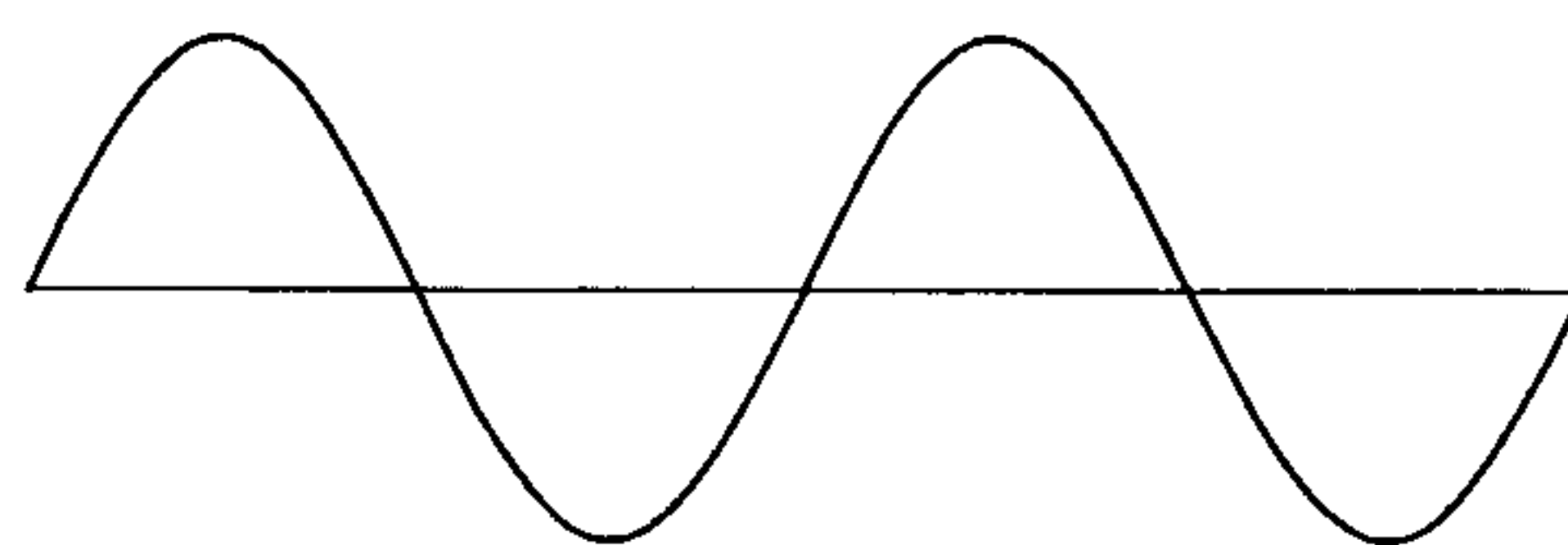
8.5 Voedingsschakelingen met dioden

Inleiding

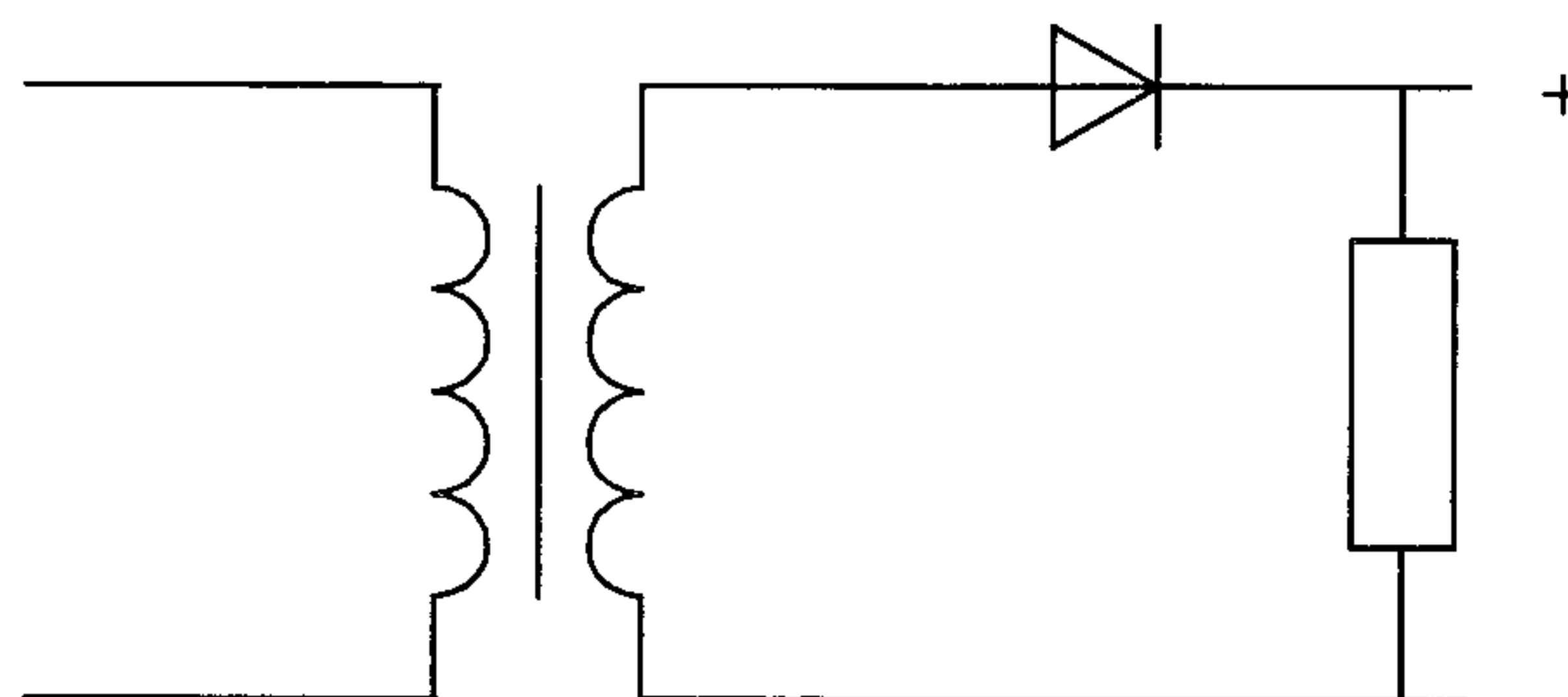
Wanneer een elektronisch apparaat zijn voeding uit het lichtnet betreft, dan zal de door dat net geleverde wisselstroom moeten worden omgezet in gelijkstroom. Aangezien een diode de stroom maar in een richting doorlaat, is deze hiervoor bij uitstek geschikt. De ongewenste halve periode wordt namelijk niet doorgelaten.

Gelijkrichters

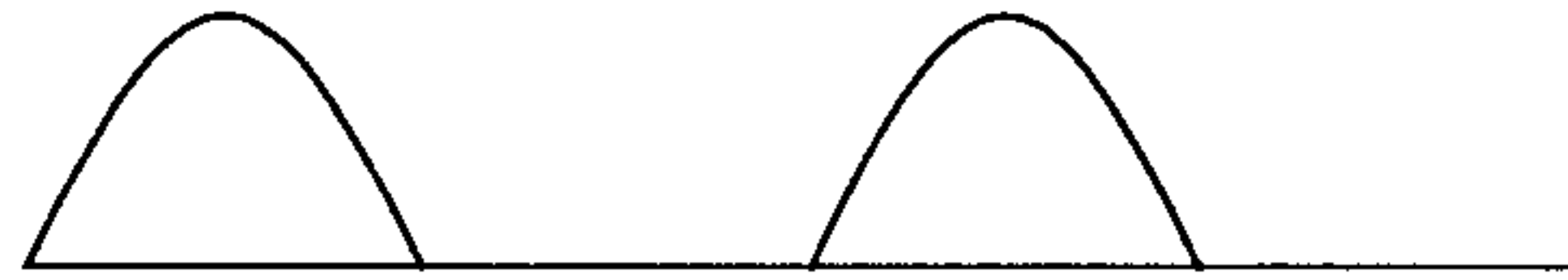
In figuur 8.3-1a is het verloop in de tijd van een wisselstroom of -spanning weergegeven.



Figuur 8.3-1a



Figuur 8.3-1b

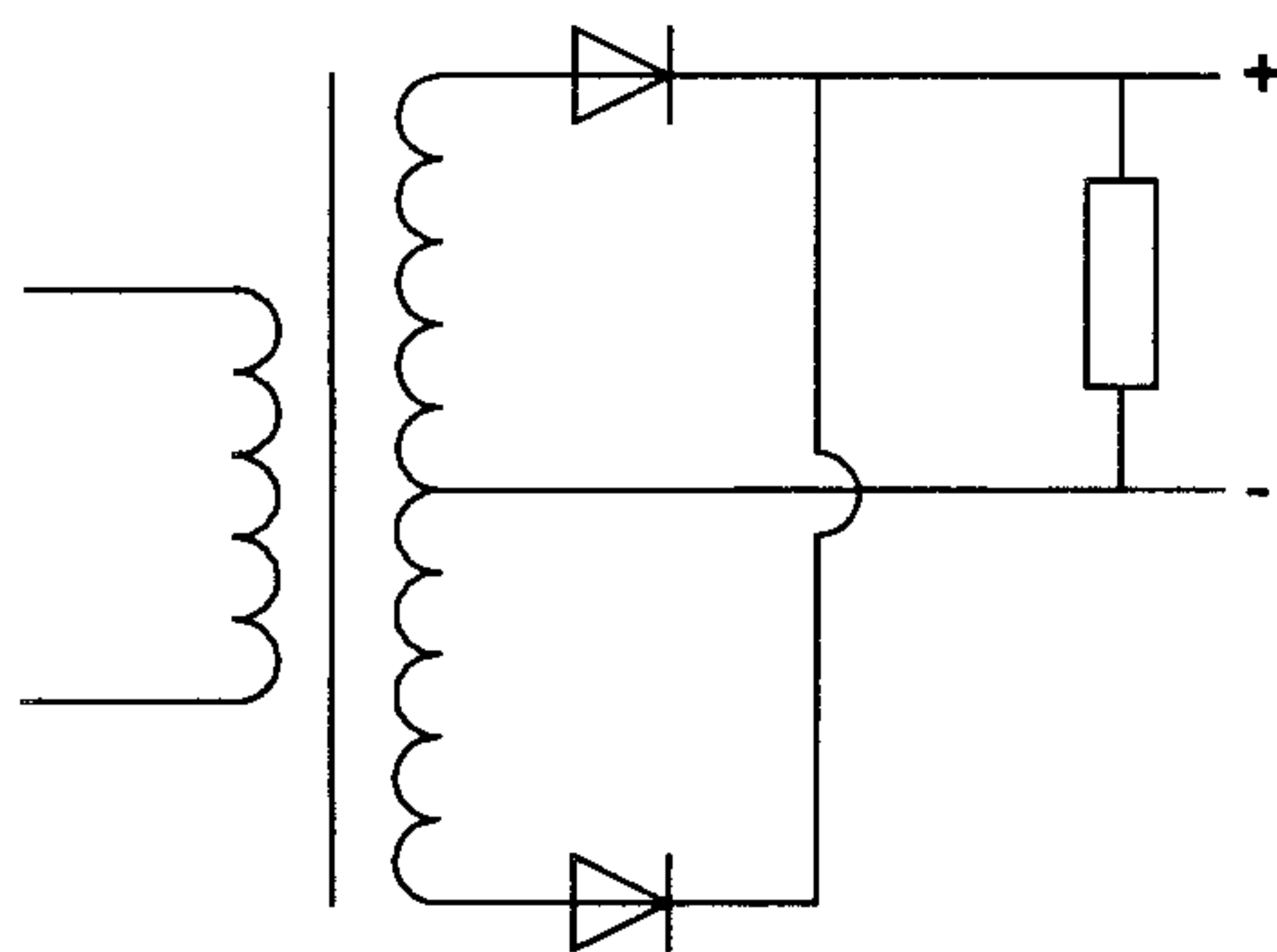


Figuur 8.3-1c

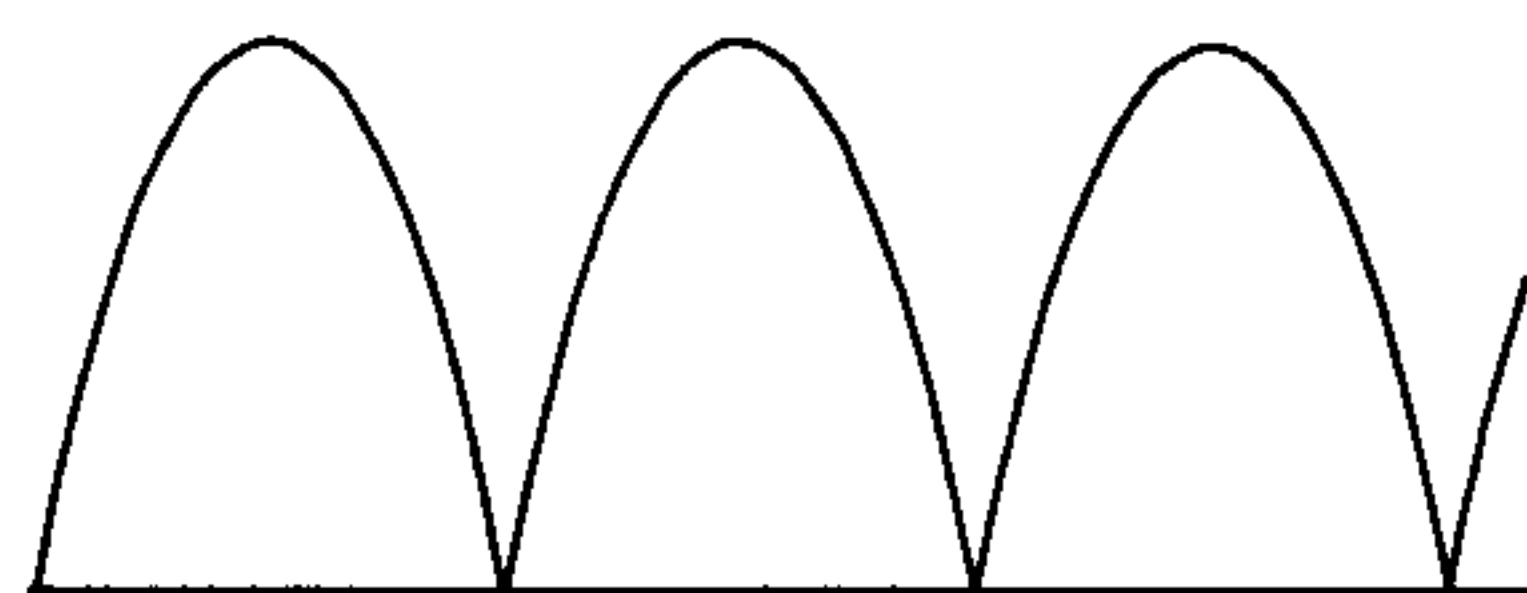
Figuur 8.3-1b toont het schema van een transformator met diode. De spanning over de secundaire van de trafo verloopt volgens figuur 8.3-1a. De diode zal echter maar een helft van een volle periode doorlaten, gedurende de andere halve periode spert hij. Het verloop van de spanning aan de rechterkant van de diode is getekend in figuur 8.3-1c. Deze spanning verandert nog steeds in sterkte, maar niet meer van richting. We spreken van een intermitterende gelijkspanning. We spreken bij deze vorm van gelijkrichting van enkelfasige gelijkrichting omdat per periode maar een halve periode (één fase) wordt benut. De gelijkrichter voert stroom gedurende de tijd dat de spanning rechts ervan zoveel lager is dan de door de transformator aan de diode aangeboden spanning, dat de diode geleidt.

Dubbelfasige gelijkrichting

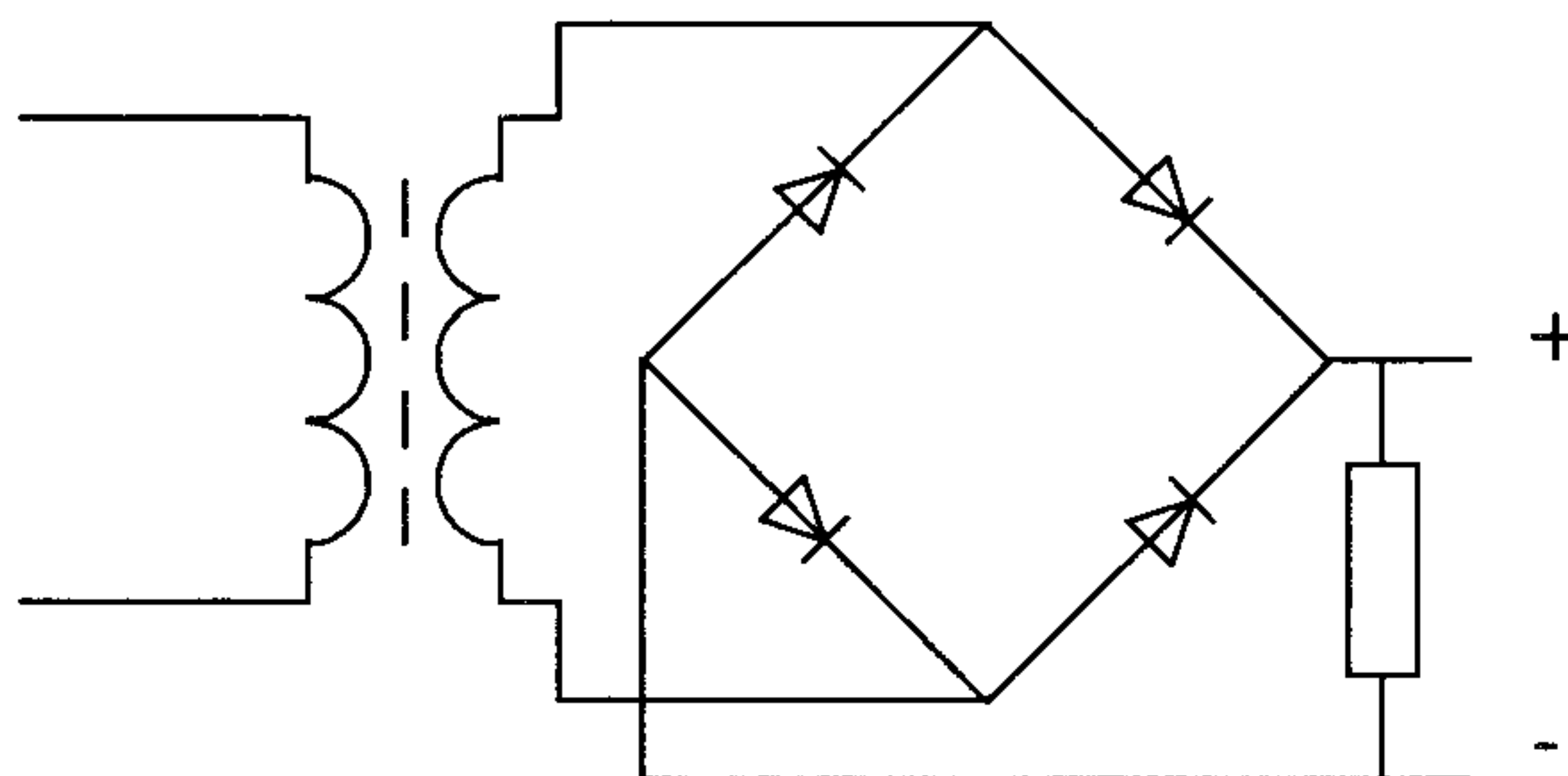
De schakeling van figuur 8.3-1b is niet een erg fraaie schakeling, omdat een halve periode van de wisselspanning wordt afgesneden. Wanneer van de ontstane intermitterende gelijkspanning een nette gelijkspanning moet worden gemaakt, dan moet steeds een halve periode worden overbrugd, zonder dat de gelijkrichter vermogen levert. Beter is het gebruik te maken van zogenaamde *dubbelfasige gelijkrichting*. Een schakeling daarvoor wordt in figuur 8.3-2a gegeven. De trafo is uitgevoerd met een 2 maal zo grote secundaire wikkeling als die van figuur 8.3-1b. Deze wikkeling heeft bovendien een middenaftakking, zodat er eigenlijk twee wikkelingen zijn die per stuk even groot zijn als die van figuur 8.3-1b. Nu geleidt in de ene halve periode de bovenste diode, in de andere halve periode de onderste diode. In dit geval wordt de volle periode van de wisselspanning benut. De in de schakeling van figuur 8.3-1b niet doorgelaten halve periode wordt hier als het ware omgeklapt. De nu ontstane gelijkspanning heet pulserend. De te overbruggen gedeelten zijn nu veel korter geworden. Het verloop van de ontstane pulserende gelijkspanning is afgebeeld in figuur 8.3-2b.



Figuur 8.3-2a



Figuur 8.3-2b



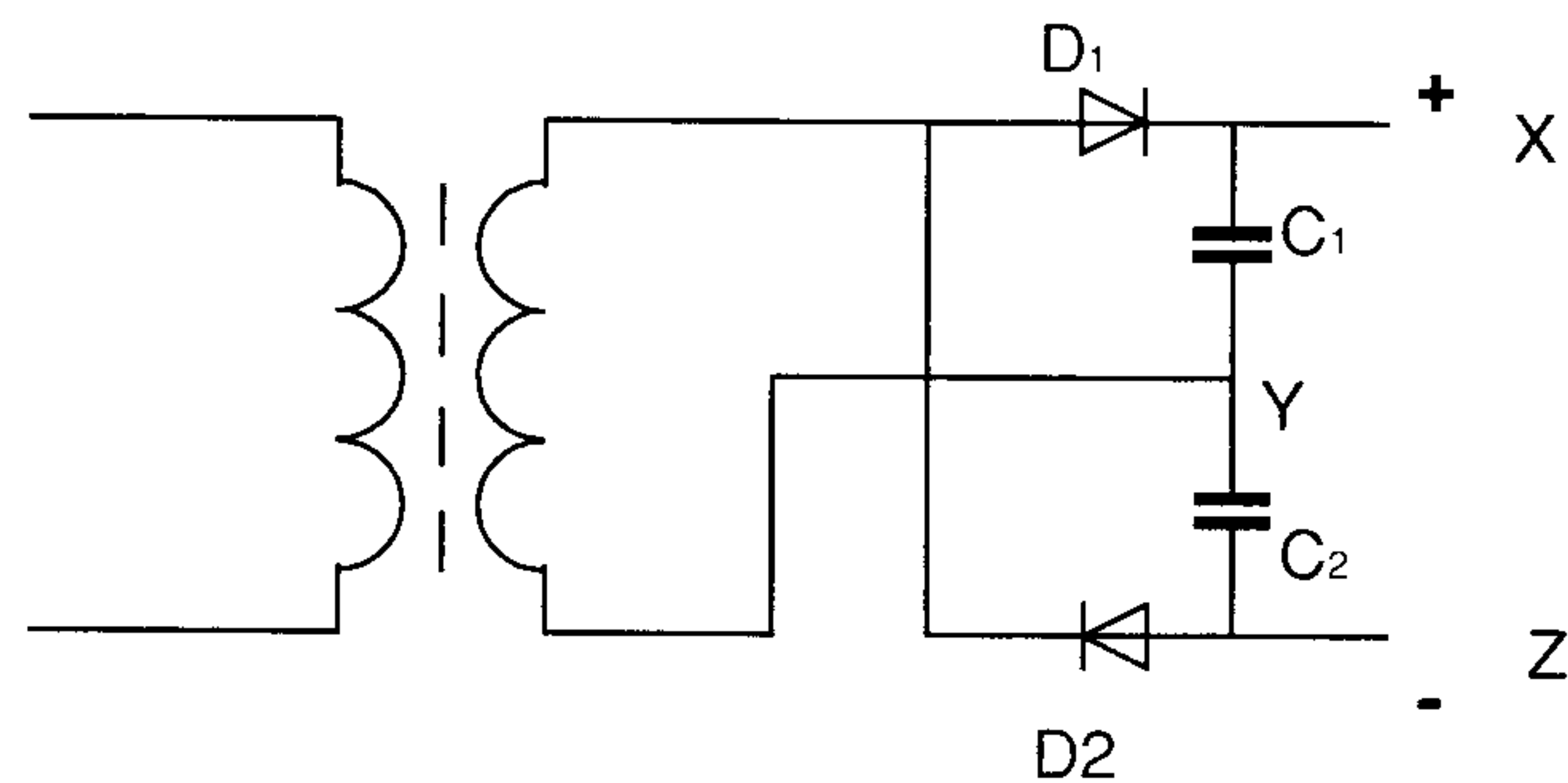
Figuur 8.3-3

Bruggelijkrichters

Wanneer we slechts beschikken over een enkele wikkeling, dan kunnen we toch dubbelfasige gelijkrichting verkrijgen. Deze schakeling is aangegeven in figuur 8.3-3. Hier wordt gebruik gemaakt van een z.g. brugschakeling met 4 dioden. Wanneer een uiteinde van de secundaire van de trafo '+' is, wordt hij verbonden met de '+' aansluiting van de diodebrug en geïsoleerd van de '-'. Bij omgekeerde polariteit gebeurt het tegengestelde. Bij goed aansluiten van de brug is er steeds een diode welke stroom doorlaat naar de '+' uitgang, terwijl de andere diode zorgt voor de stroom van de '-' uitgang naar de andere transformatoraansluiting. Gedurende de volgende halve periode zijn de andere twee dioden aan de beurt om stroom door te laten. Het voordeel van deze schakeling is, dat de trafo geen dubbele secundaire wikkeling met middenaftakking hoeft te hebben, maar dat kan worden volstaan met een even eenvoudige trafo als in figuur 8.3-1b. Voor dit type schakeling worden kant en klare zogenoemde brugcellen in de handel gebracht met 4 dioden in één omhulling.

Spanningsverdubbeling

Een enkelfasige gelijkrichtschakeling kan door uitbreiding met een extra diode een dubbele spanning leveren. De anders afgesneden halve periode wordt gebruikt om in serie gezet te worden met de normaal doorgelaten halve periode. Zie figuur 8.3-4.



Figuur 8.3-4

Tussen punt X en Y staat de normale gelijkgerichte spanning. C_1 zorgt voor ladingopslag. Hetzelfde geldt voor de punten Y en Z. Omdat de diode D_2 vergeleken met D_1 andersom geschakeld is, is de spanning op punt Z negatief ten opzichte van punt Y. De spanning tussen de punten X en Z zal derhalve het dubbele bedragen van de door de schakeling van figuur 8.3-1 aan secundaire zijde geleverde topspanning. De transformator wordt nu gedurende de volle wisselstroomperiode belast. De ene halve periode via D_1 , de andere halve periode via D_2 .

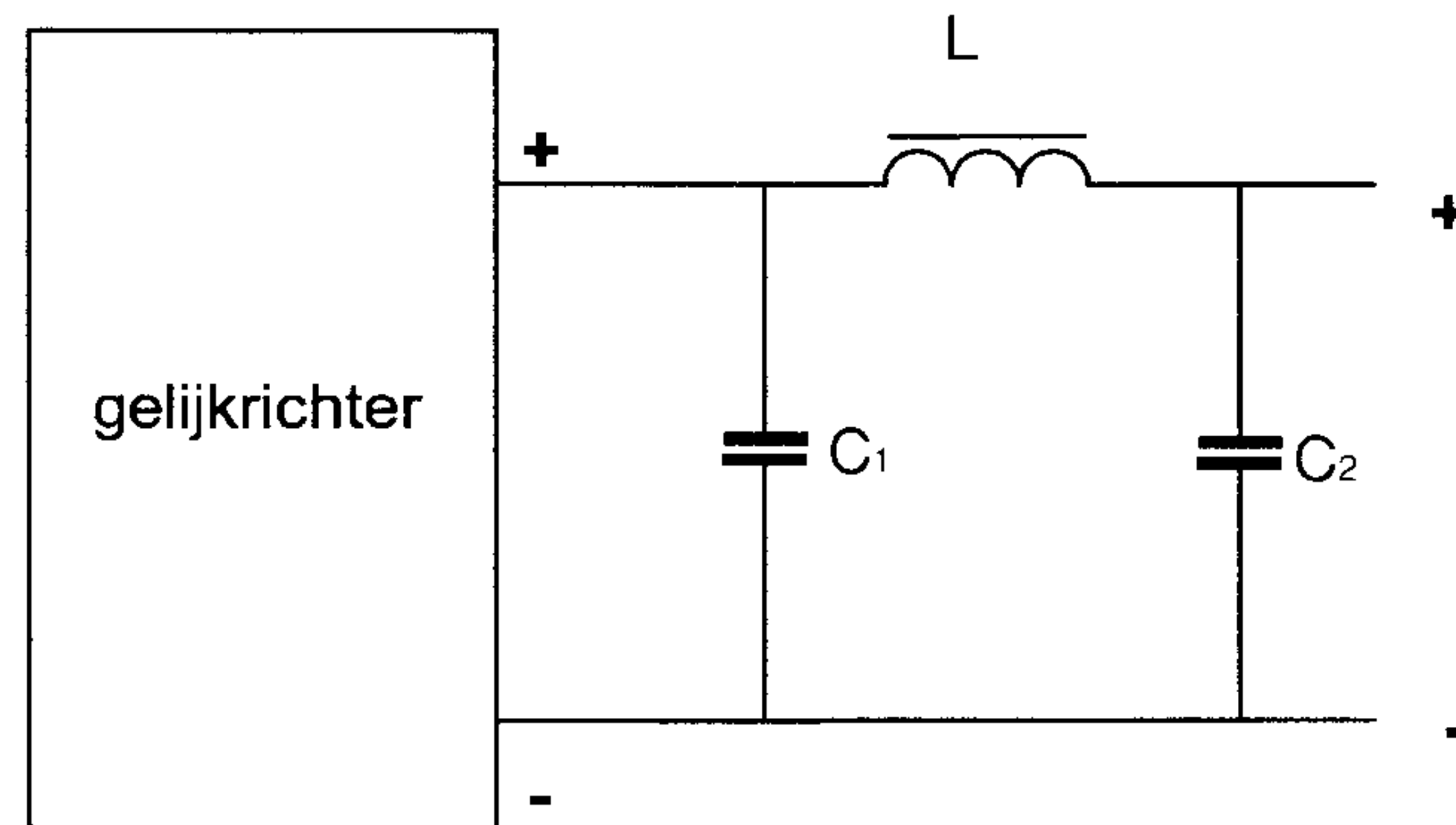
8.6 Afvlaksystemen

De dubbelfasig gelijkgerichte stroom is nog niet geschikt voor een versterker. Er treedt een geweldige brom op. Daarom wordt een afvlakfilter gebruikt. Hierbij worden condensatoren en spoelen of weerstanden gebruikt. Een gelijkspanning zoals die wordt geleverd door een gelijkrichtschakeling bestaat eigenlijk uit de som van een echte, vlak verlopende gelijkspanning en een (niet-sinusvormige) wisselspanning. Een afvlakfilter heeft ten doel het wisselspanningsdeel zo goed mogelijk kwijt te raken en alleen de echte gelijkspanning over te houden. Dit afvlakfilter is een laagdoorlaatfilter dat we kennen in de vorm van T- of Pi-filter. Dit is op twee manieren mogelijk.

Methode 1: een filter met grote condensatoren en een smoorspoel of tenminste een weerstand.

Methode 2: een grote condensator, gevolgd door een elektronische spanningsstabilisator.

Methode 1 is zeer gebruikelijk in de buizentechniek, hoewel ook methode 2 (soms zelfs gecombineerd met methode 1) wordt gebruikt in systemen met buizen waarbij aan de graad van afvlakking en/of de nauwkeurigheid van de spanning, hoge eisen worden gesteld. Om een aantal redenen geeft men in de halfgeleidertechniek de voorkeur aan methode 2. Niettemin behandelen we eerst methode 1. We beschouwen figuur 8.3-5:

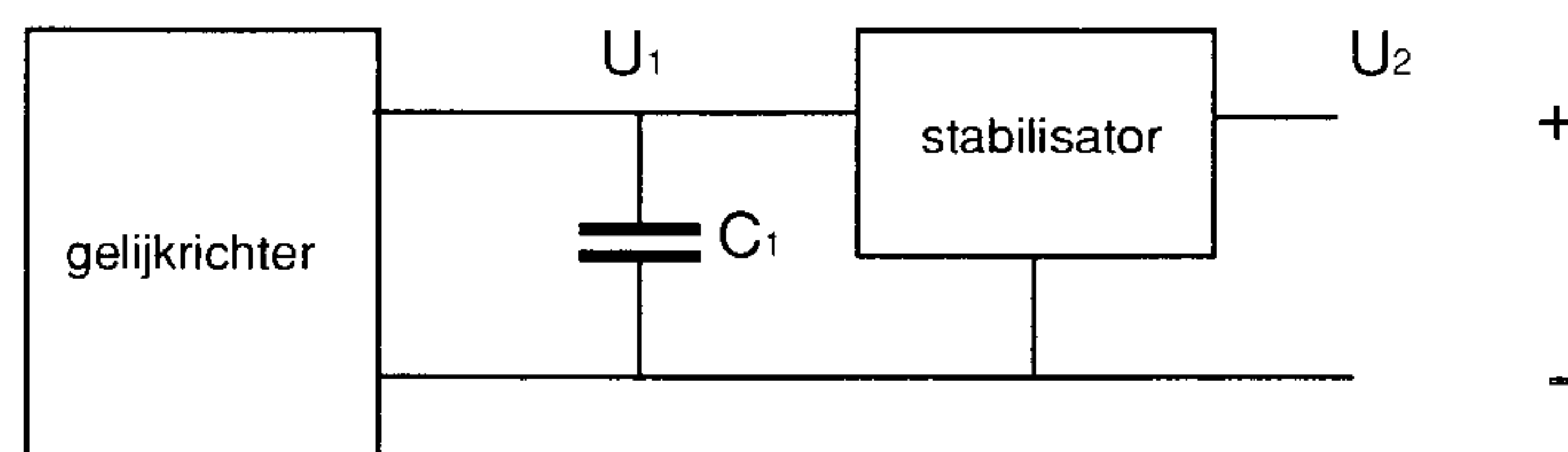


Figuur 8.3-5

De reservoircondensator C_1 wordt door de gelijkrichtschakeling opgeladen tot de maximale waarde van de spanning. De zelfinductie L vormt een zekere barrière voor het wisselstroomdeel, dat al voor een gedeelte door C_1 wordt afgevoerd. C_2 dient als tweede condensator die zoveel mogelijk van het nog door L doorgelaten restant wisselstroom moet afvoeren. Hier blijkt het belang van dubbelfasige gelijkrichting: bij een netfrequentie van 50 Hz is bij dubbelfasige gelijkrichting de wisselspanningcomponent van de gelijkgerichte spanning 100 Hz terwijl dit bij enkelfasige gelijkrichting 50 Hz is. Met hetzelfde filter wordt dus bij dubbelfasige gelijkrichting een veel betere afvlakking bereikt dan bij enkelfasige omdat de reactantie van de condensatoren 2 maal zo klein en van de zelfinductie 2 maal zo groot is.

Men kan het ook anders beredeneren. Bij dubbelfasige gelijkrichting is de periode, gedurende welke de condensatoren de met het filter verbonden schakeling moeten voeden, veel korter dan bij enkelfasige gelijkrichting, zodat hun spanning minder daalt. Voor de zelfinductie geldt dat de stroom zonder voeding uit de gelijkrichter korter op gang gehouden moet worden, voordat er weer voeding optreedt, zodat ook de effectiviteit van L groter is. In een praktische schakeling voor een stroom van zo'n 100 mA ligt de waarde van de condensatoren tussen 4 en 50 μF terwijl bij grotere stroom (meerdere A) de capaciteit wel tot 10.000 μF kan oplopen. De waarde van L ligt tussen 300 mH en 50 H. Bij lage C-waarden hoort een hoge L-waarde en omgekeerd.

Voor het behandelen van methode 2 beschouwen we figuur 8.3-6. L en C_2 uit figuur 8.3-5 zijn hier vervangen door een elektronische stabilisatieschakeling.



Figuur 8.3-6

Hoe zo'n schakeling werkt is hier nog niet van belang. Hij is in elk geval ingewikkelder dan de schakeling met de Zener-diode in het vorige hoofdstuk (hoewel er wel een Zener-diode wordt toegepast). De stabilisator levert een praktisch konstante spanning (U_2 in de figuur), zolang de spanning U_1 op de condensator C_1 maar minimaal enkele volts hoger is dan U_2 . Dit spanningsverschil is nodig om de schakeling naar behoren te laten werken.

C_1 moet dus zo groot zijn, dat tussen de toppen van de door de gelijkrichter geleverde spanning de waarde van U_1 bij een gegeven stroomafname niet zakt onder de grens van U_2 vermeerderd met het noodzakelijke spanningsverschil over de stabilisator.

Voorbeeld

De gelijkrichter levert een piekspanning (amplitude) van 25 V. De stabilisator levert 15 V en heeft zelf minimaal 3 V nodig om goed te kunnen werken. U_1 mag dus niet lager worden dan 18 V. Anders gezegd: tussen twee toppen van de gelijkgerichte spanning mag U_1 niet meer dan 7 V dalen. Stel dat die tijdsperiode 10 ms is. $1/100$ s komt overeen met 100 Hz. De stroom is 1 A. U_1 mag dus in 10 ms bij 1 A hoogstens 7 V dalen. Dit betekent een daalsnelheid van 7 V per 10 ms, of 700 V per seconde. 1 A is 1 Coulomb per seconde (definitie van Ampère). Nu weten we, dat $Q = C \cdot U$ (verband tussen capaciteit, lading en spanning van een condensator). Dus $Q = 1$ en $U = 700$, zodat $C = 1 : 700$ F ofwel 1400 μF . In de praktijk nemen we dan nog een veiligheidsmarge in acht en monteren bijv. 2200 μF (dit is een gebruikelijke handelswaarde).

Bij enkelfasige gelijkrichting hadden we voor C ten minste 2800 μF i.p.v. 1400 μF moeten nemen (ga dit na!). De bij methode 2 geleverde spanning is niet alleen praktisch vrij van wisselspanning, maar is ook vrijwel onafhankelijk van de netspanning, zolang die maar hoog genoeg is om de spanning op de reservoircondensator boven het vereiste minimum te houden. Dit is een reden om deze condensator ruim te bemeten. Hierdoor stijgt de effectieve waarde van U_1 (waarom?). De dissipatie van de stabilisatieschakeling zal daardoor ook stijgen. Immers, deze is gelijk aan $(U_1 - U_2) \cdot I$, want het door de gelijkrichter geleverde vermogen is $U_1 \cdot I$ en het aan de uitgang van de stabilisator beschikbare vermogen is $U_2 \cdot I$. Het verschil tussen beide wordt in de stabilisator gedissipeerd. Het stroomverbruik van de stabilisator zelf is meestal verwaarloosbaar.

De bij methode 1 geleverde spanning is bij een goed filter eveneens praktisch vrij van wisselspanning, maar niet onafhankelijk van de netspanning. De dissipatie van het filter is in theorie afwezig, in de praktijk echter als gevolg van de niet-ideale eigenschappen (weerstand van de draad) van met name de smoorspoel wel aanwezig. De smoorspoel vormt een van de belangrijkste redenen om methode 1 bij halfgeleidersystemen niet toe te passen. Dit komt doordat bij halfgeleidersystemen veel lagere spanningen en daardoor meestal veel hogere stromen optreden dan bij buizenschakelingen. De smoorspoel zou dan geschikt moeten zijn voor deze grote stromen, wat hem zeer groot, onhandig en duur zou maken. Voor het toepassen van

methode 2 in de buizentechniek zijn echter weer dure buizen nodig, zodat deze methode daar niet zo gauw toegepast wordt, tenzij er hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid van de spanning.

Hoge spanningen

We moeten er op letten dat de sperspanning van de diode ten minste twee maal de piekspanning van de transformator kan verdragen, omdat er aan de ene zijde een negatieve spanning wordt ontwikkeld door de transformator terwijl aan de andere zijde nog een gelijkspanning staat door de opgeladen condensator. Bij de condensatoren letten we op de maximaal optredende spanning waarvoor de condensator geschikt is. De maximaal optredende spanning is meestal de piekspanning welke de transformator kan leveren. Voorkomende condensatorwaarden zijn circa 4 μF bij hoge spanningen (5000 V) tot 10.000 μF (10 mF) bij laagspanning (12 V o.i.d.). Bij spoelen dienen we te letten op de draaddikte, i.v.m. de toegelaten stroomsterkte en de isolatie voor de toe te passen spanning. Voorkomende zelfinductiewaarden voor afvlakfilters zijn 300 mH tot 50 H.

Hogere frequenties (harmonischen)

De gelijkgerichte stroom kan worden beschouwd als een gelijkstroom, waarop enkele wisselstromen met hogere frequenties de zogenaamde *harmonischen* voorkomen. Het filter heeft nauwelijks weerstand voor de gelijkstroomcomponent terwijl de wisselstroom meer wordt onderdrukt naarmate de frequentie hoger is.

Condensatoringang

Wanneer direct na de gelijkrichter een condensator wordt geschakeld, dan spreken we van condensatoringang van het afvlakfilter. Deze condensator vangt in principe de energie uit de gelijkrichter direct op en wordt dan ook *reservoircondensator* genoemd.

Smoorspoelingang

Bij schakelingen in de vorm van een T-filter, in elk geval zonder reservoir condensator, spreken we van smoorspoel- of choke-ingang. De piekstroom gedurende de oplaadcyclus zal veel minder hoog zijn, geremd door de smorende werking van de spoel. Deze schakeling wordt toegepast, wanneer een betere regulatie gewenst is omdat de smoorspoel grote stromen voorkomt. De uiteindelijke gebruiksspanning is iets lager dan bij condensatoringang (waarom?).

Onbelaste spanning

Wanneer de voeding niet wordt belast dan worden de condensatoren opgeladen tot de volle piekspanning van de voedingstransformator. Daaruit volgt dat in een onbelast voedingsapparaat de spanning van de condensatoren kan oplopen tot de piekspanning van de transformator. We moeten er goed erg in hebben dat de V-meter de effectieve waarde van wisselspanning aanwijst. De amplitude of piekspanning is ca 1,4 zo hoog.

Een 12,6 V wikkeling levert door een onbelaste gelijkrichter circa 17,5 V! Vooral in voedingen voor een hogere spanning kan na af- of uitschakelen

van de belasting gedurende lange tijd een gevaarlijke spanning op de condensator achterblijven. Vaak wordt een ontladweerstand, in vaktaal *Bleeder*, over de uitgang geschakeld.

Inwendig spanningsverlies

Transformatorwikkelingen, dioden en andere componenten hebben allemaal weerstand en dus zal er bij stroomdoorgang spanningsverlies optreden. De transformatorspanning is constant. Door stroomvariaties zal het inwendige spanningsverlies niet constant zijn. Later worden oplossingen hiervoor besproken.

Stabilisatie d.m.v. neonbuizen

De neonbuis kunnen we qua functie vergelijken met een zenerdiode, maar dan voor hogere spanningen. Ze worden wel toegepast voor het stabiliseren van de schermroosterspanning van een tetrode of penthode. Zo'n buis heeft twee elektroden en is gevuld met neongas onder lage druk (ca 1 mm kwikdruk). Andere edelgassen (zoals argon) worden ook gebruikt.

Als de spanning een bepaalde waarde overschrijdt ontstaat in de buis een gasontlading. De grootte van de spanning over de buis is dan vrijwel niet afhankelijk van de stroom. Dit betekent dat de R_i van de buis zeer klein is. We moeten er daarom altijd een weerstand mee in serie schakelen (vergelijk figuur 8.2-9). Stabilisatiebuizen worden gemaakt voor spanningen van ca 75 tot 150 V. Als men een hogere spanning wenst worden er meerdere in serie geschakeld.

Uitvoeringsvormen

Halfgeleiderdioden worden uitgevoerd met een omhulling die tot doel heeft om:

- verontreiniging van het minuscule stukje halfgeleider-materiaal te voorkomen;
- de aansluitdraden goed te verankeren;
- bij dioden voor grotere vermogens, een goede warmteafvoer mogelijk te maken.

De omhulling is meestal van glas of kunststof. Bij dioden, bedoeld voor toepassingen, waarbij een flinke warmte-ontwikkeling kan optreden, is daaromheen nog weer een metaalomhulling toegepast met de mogelijkheid van bevestiging op een koellichaam. Daardoor kan het warmte afvoerend oppervlak aanzienlijk worden vergroot. Soms wordt warmtegeleidende pasta of Berylliumoxide toegepast om de warmte over te dragen aan een koellichaam. Berylliumoxide is een goede elektrische isolator en geleidt warmte zeer goed. Het is echter een zeer gevaarlijk materiaal, want bij breuk kan er zeer giftig poeder of splinters vrijkomen.

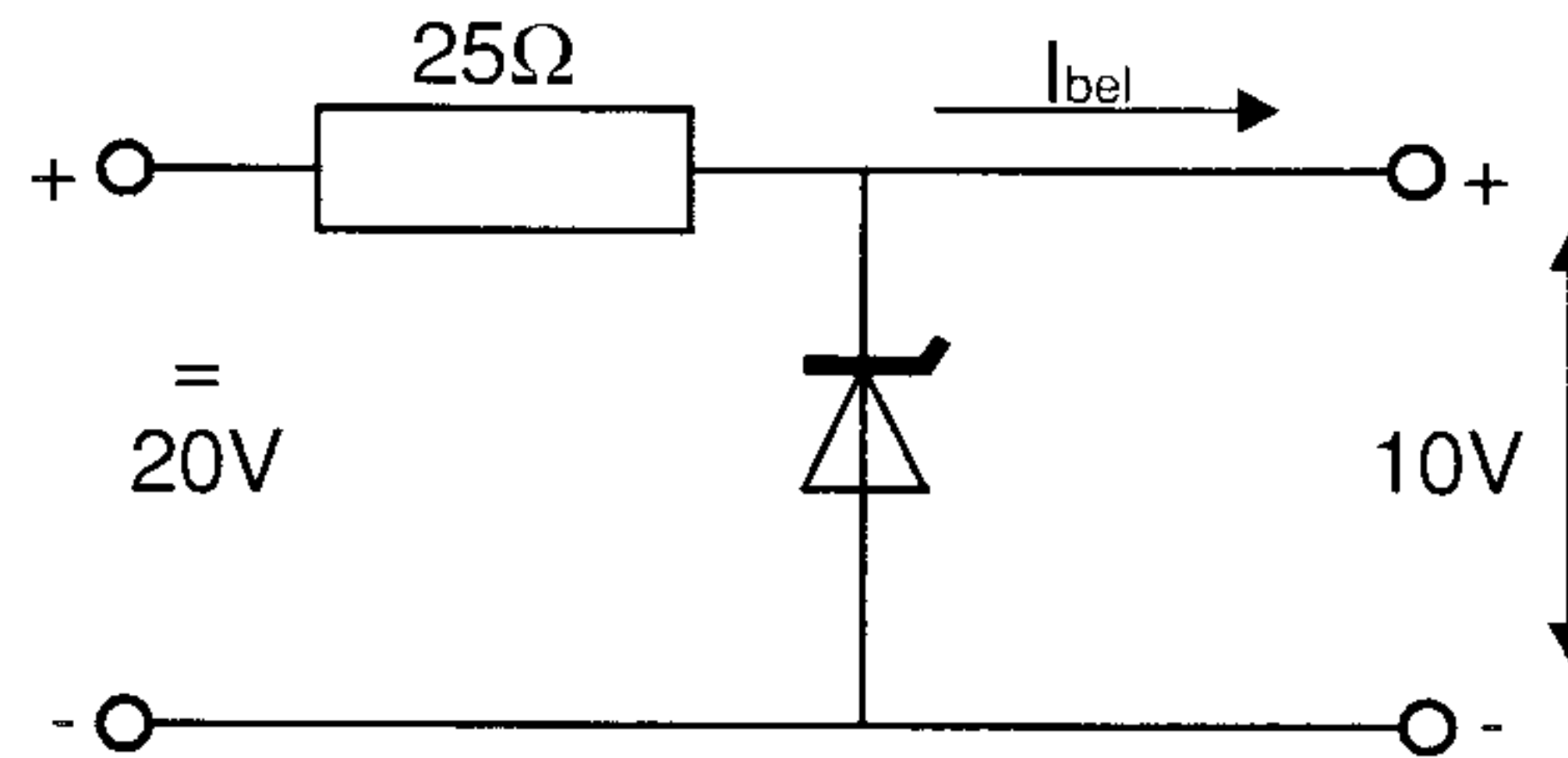
8.7 Vragen

Vraag 1

De belastingsstroom I_{bel} varieert van 100 tot 300 mA.

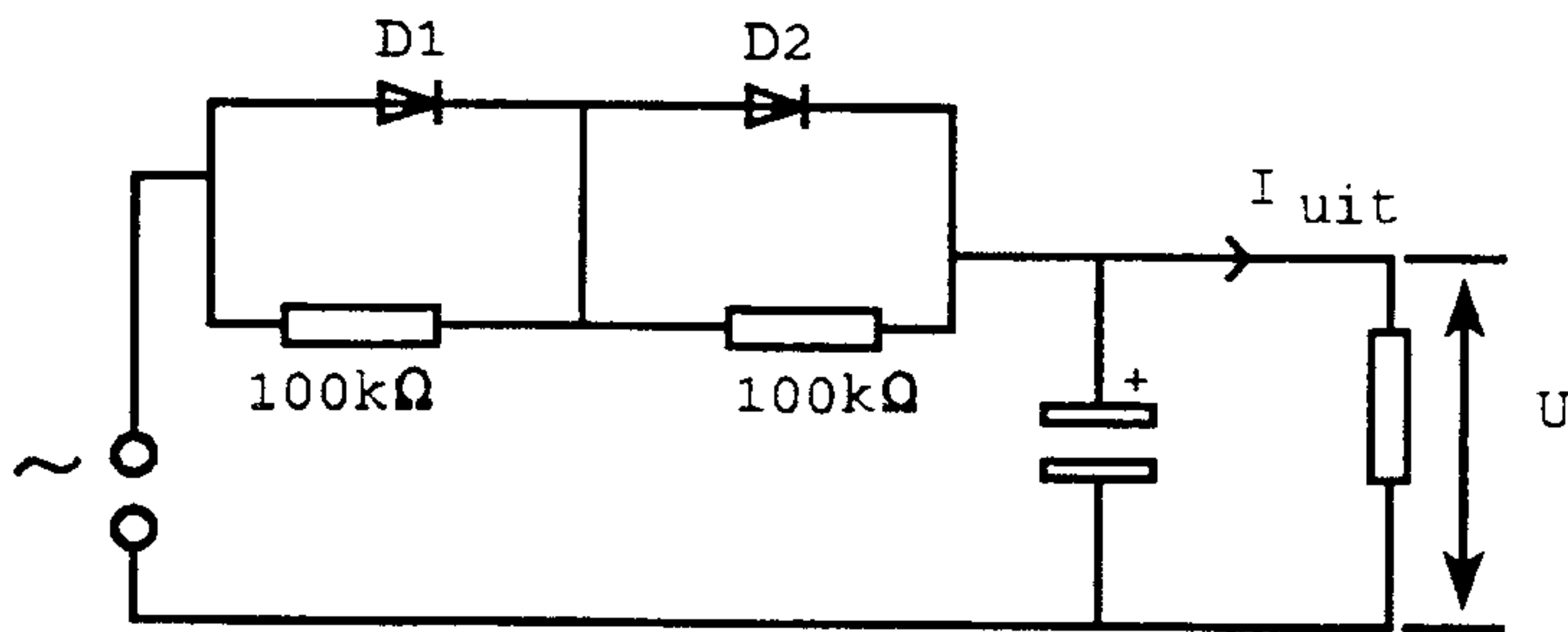
Het maximaal gedissipeerde vermogen door de zenerdiode is:

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



Vraag 2

De dioden zijn gelijk.



Maximum waarde:

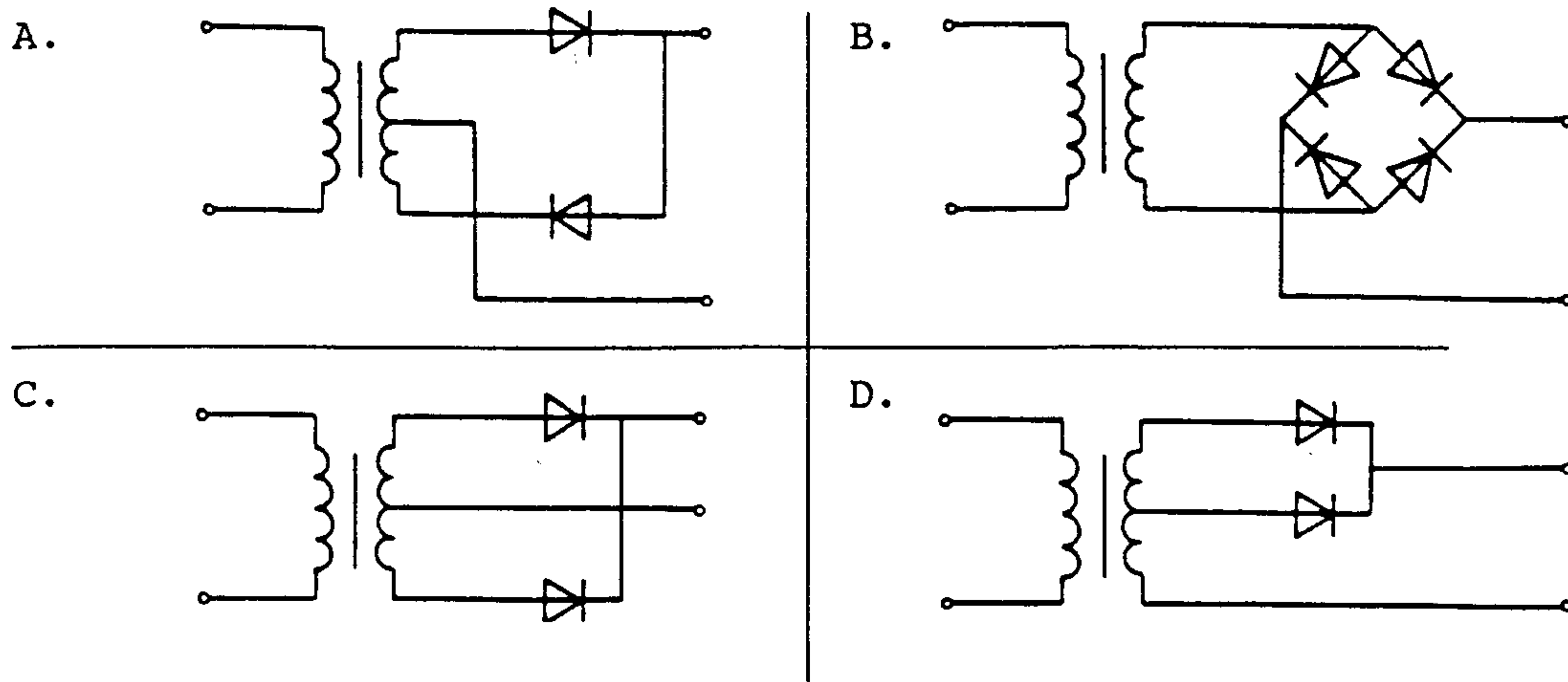
	D1	D2
U_{sper}	300V	300V
I_{gem}	2A	2A

Kies uit de alternatieven de combinatie van de hoogste U_{uit} en de grootste I_{uit} die de schakeling kan leveren:

	U_{uit}	I_{uit}
A.	400V	4A
B.	400V	2A
C.	200V	4A
D.	200V	2A

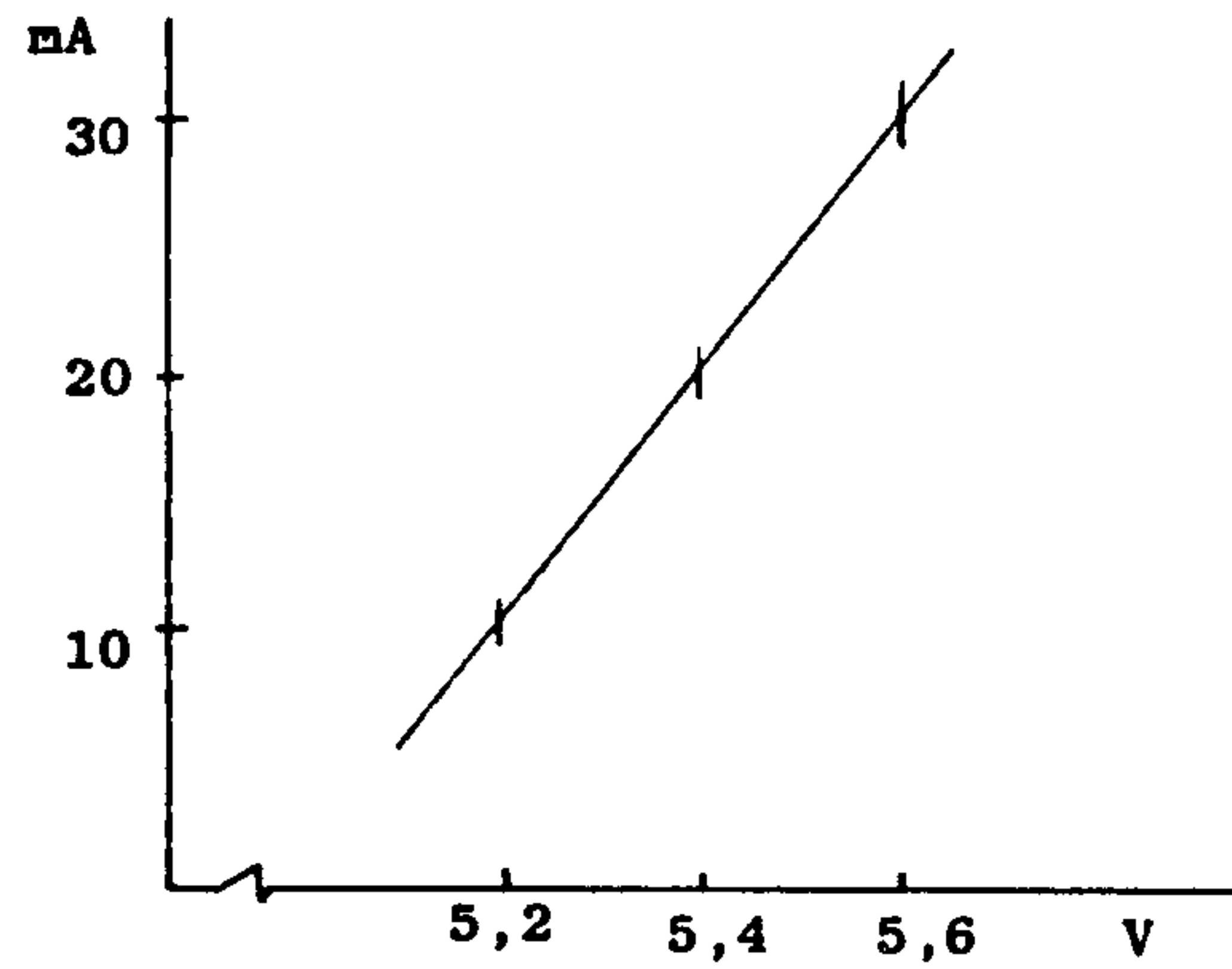
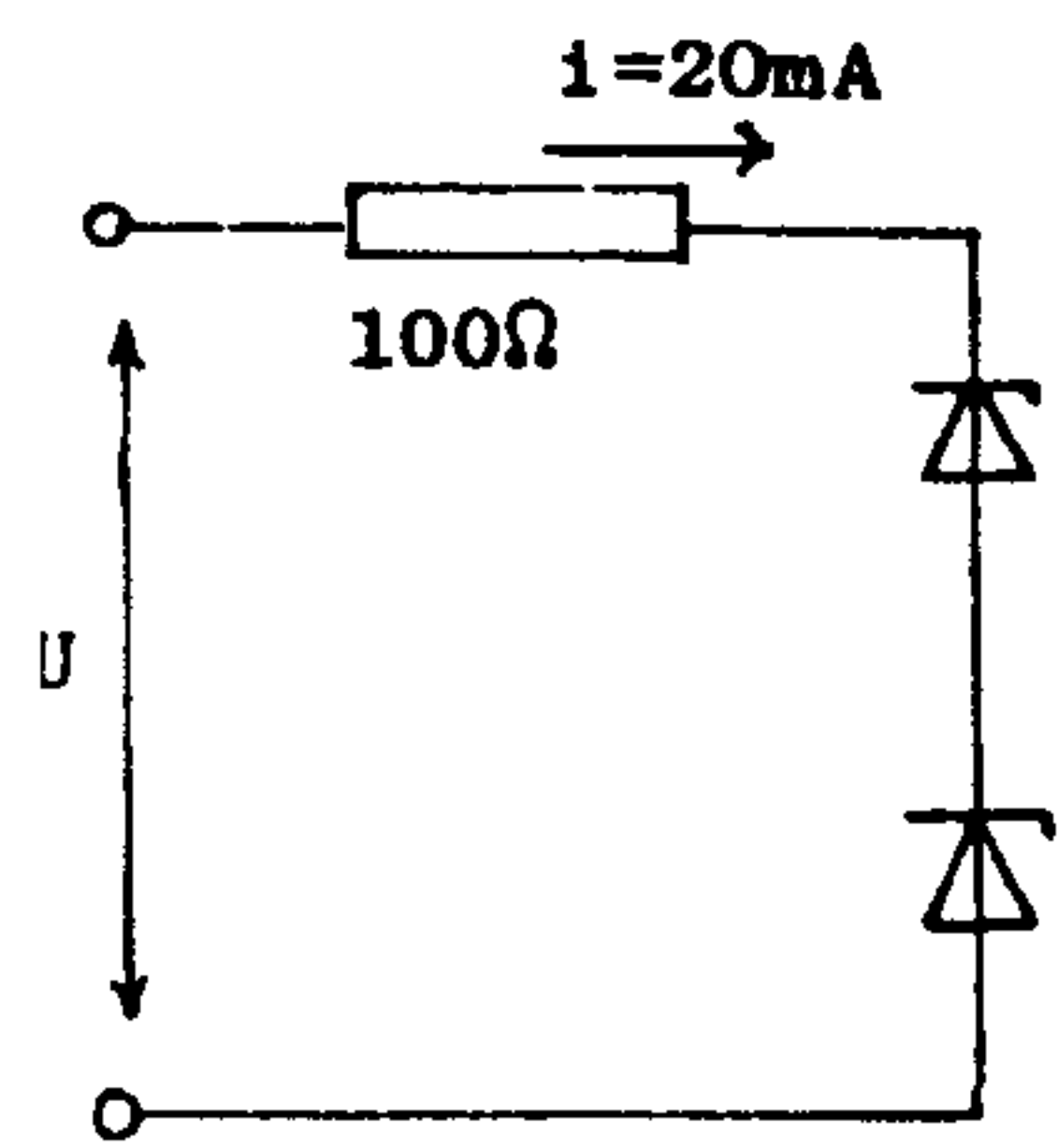
Vraag 3

Welke schakeling kan gebruikt worden als dubbelzijdige gelijkrichter ?



Vraag 4

Van de zenerdiode is de karakteristiek gegeven.



Hoe groot is U ?

- A. 10,8 V
- B. 8,8 V
- C. 12,8 V
- D. 4 V