



Elektronica componenten

Inhoudstafel



Halfgeleiders	6
1.1 Een beetje chemie	6
1.1.1 Vierwaardig silicium	6
1.1.2 Energie-inhoud van een elektron	6
1.1.3 Valentieband - geleidingsband - verboden zone	7
1.2 Kristalrooster van silicium	8
1.2.1 Elektrische geleidbaarheid	8
1.2.2 Zuiver silicium	8
1.2.3 Kristalrooster van zuiver silicium	9
1.2.4 Vorming van elektron/gat-paren	9
1.3 P-silicium en N-silicium	10
1.3.1 Doperen van halfgeleiders	10
1.3.2 Doperen met 5-waardige elementen	10
1.3.3 N-silicium	11
1.3.4 Meerderheids- en minderheidsladingdragers	11
1.3.5 Doperen met 3-waardige elementen	12
1.3.6 P-silicium	12
1.4 PN-junctie	13
1.4.1 Recombinatie	13
1.4.2 Negatief P-silicium	13
1.4.3 Positief N-silicium	14
1.4.4 Keerlaag	14
1.5 Polaristatie	15
1.5.1 Polarisation in doorlaat	15
1.5.2 Siliciumkristal als geleider	15
1.5.3 Polarisation in sper	16
1.5.4 Siliciumkristal als isolator	16
1.5.5 Doorslag van de PN-junctie	16
Junctiedioden	17
2.1 Schemasymbool en package	17
2.1.1 Schemasymbool	17
2.1.2 Anode en kathode	18
2.1.3 Package	18
2.2 Halfgeleidergedrag	19
2.2.1 Polarisation in doorlaat	19
2.2.2 Polarisation in sper	20
2.2.3 Lekstroom en doorslagspanning	21

2.3	Doorlaatkarakteristiek	21
2.3.1	U_F/I_F -karakteristiek	21
2.3.2	Praktische ontwerprichtlijn	22
2.4	Toepassingen	23
2.4.1	AC/DC-omzetter	23
2.4.2	Digitale poort	23
2.4.3	Vrijloopdiode	24
2.4.4	Signaalbegrenzer	25
2.5	Oefeningen	26
2.5.1	Reeks 1	26
2.5.2	Reeks 2	27

Zenerdioden	28
3.1 Schemasymbool en package	28
3.1.1 Schemasymbool	28
3.1.2 Package	28
3.2 Zenerkarakteristiek	29
3.2.1 U_R/I_R -karakteristiek	29
3.2.2 Constante zenerspanning	30
3.3 Zenerstabilisatie	31
3.3.1 Principe	31
3.3.2 Zener-referentiespanning	31
3.3.3 DC-instelling en ruststroom	32
3.3.4 Datasheet 1N7xx	34
3.3.5 Belaste zener	35
3.3.6 Grafische controle van het instelpunt	37
3.3.7 Stabilisatiemechanisme	39
3.3.8 Effect bij wisselende belasting	41
3.4 Oefeningen	44
3.4.1 Reeks 1	44
3.4.2 Reeks 2	45
3.4.3 Reeks 3	47

Light emitting diode	49
4.1 Toepassingsgebied	49
4.1.1 Definitie	49
4.1.2 Bebruik bij displays en interfaces	49
4.2 Werking	50
4.2.1 Fotonen-energie	50
4.2.2 Infra-rood en zichtbaar licht	50
4.2.3 Kleur van het uitgezonden licht	51
4.2.4 Intensiteit van het uitgezonden licht	52
4.3 Schemasymbool en package	52
4.3.1 Schemasymbool	52
4.3.2 Package	53
4.4 Karakteristieken	53
4.4.1 Voorwaartse polarisatie	53

4.4.2	Beperkte perspanning	54
4.5	Ledlampen	55
4.5.1	Hoge helderheids-LED's	55
4.5.2	Voordelen	56
4.6	Aansturing	56
4.6.1	Nut van voorschakelweerstand	56
4.6.2	Aansturing bij DC	56
4.6.3	Aansturing bij AC	57
4.6.4	PWM-sturing	58
4.7	Oefeningen	59

Bipolaire junctietransistoren	61
5.1 Inleiding	61
5.1.1 Het einde van de elektronenbuis	61
5.1.2 De puntcontacttransistor	62
5.2 De bipolaire junctietransistor	63
5.2.1 Van germanium naar silicium	63
5.2.2 PNP en NPN	63
5.2.3 Schemasymbolen	64
5.2.4 Het transistoreffect	65
5.2.5 Vereenvoudigd transistormodel	65
5.2.6 Halfgeleidergedrag	67
5.2.7 Packages	67
5.2.9 Oefeningen	70
5.3 Transistor als schakelaar	72
5.3.1 Van microwatts naar watts	72
5.3.2 BJT als elektronische schakelaar	75
5.3.3 Satureren van een transistor	76
5.3.4 Sperren van een transistor	76
5.3.5 Praktische waarden	77
5.3.6 Werkingsgebied van een transistor	78
5.3.7 In- en uitschakelen van kleine vermogens	79
5.3.8 In- en uitschakelen van inductieve belastingen	81
5.4 Transistor als versterker	82
5.4.1 Versterker versus schakelaar	82
5.4.2 DC-instelling	83
5.4.3 De common emitter versterker	85
5.4.4 Dimensioneren van de instelweerstand	86
5.4.5 Versterken van AC-spanningen	89
5.4.6 Spanningsversterkingsfactor	92
5.4.7 Koppelcondensatoren	92

Veldeffecttransistoren	95
6.1 Inleiding	95
6.1.1 Principe	95
6.1.2 Bipolaire vs. unipolaire transistoren	95
6.1.3 Hoge ingangsimpedantie	97
6.1.4 FET's als vervanger voor BJT's	97

6.2	FET-types	98
6.2.1	N-kanaaltype en P-kanaaltype	98
6.2.2	Klemmen van een FET	98
6.2.3	MOSFET's	99
6.2.4	Junctie-FET's	100
6.3	Typische FET-toepassingen	101
6.3.1	Hoog impedante buffer	101
6.3.2	Digitale stuelelektronica	101
6.3.3	Analoge vermogensschakelaar	102
Thyristoren		104
7.1	Eénrichtingsthyristoren	104
7.1.1	Toepassingsgebied	104
7.1.2	Schemasymbool	104
7.1.3	Packages	105
7.1.4	Principe van een SCR	105
7.1.5	Schakelgedrag bij open gate	107
7.1.6	Schakelgedrag bij aangestuurde gate	109
7.1.7	Ontsteken en doven van een SCR	110
7.1.8	Type gatesturing	111
7.1.9	SCR op DC-regime	112
7.1.10	SCR op AC-regime	114
7.2	Tweerichtingsthyristoren	116
7.2.1	Triac-thyristoren	116
7.2.2	Schemasymbool	116
7.2.3	Ontsteken en doven van een TRIAC	117
7.2.4	Principe van een AC-controller	118
7.2.5	Toepassingsgebied	119
7.2.6	DIAC-triggerdiode	120
Operationele versterkers		123
8.1	Inleiding	123
8.1.1	Naamgeving	123
8.1.2	Toepassingsgebied	123
8.1.3	Package & schemasymbool	124
8.2	De ideale OpAmp	125
8.2.1	Open-lus-versterking	125
8.2.2	Eigenschappen van een ideale OpAmp	125
8.3	OpAmp als schakelaar	126
8.3.1	Comparatorschakelingen	126
8.3.2	Nuldoorgangdetector	127
8.4	OpAmp als versterker	130
8.4.1	Feedback en stabiliteit	130
8.4.2	Inverterende versterker	132
8.4.3	Niet-inverterende versterker	135

Leerplandoelen Elektromechanica | 2016-024

- 110 Technisch tekenen: schema's lezen
- 111 Technisch tekenen: schema's interpreteren
- 112 Technisch tekenen: schema's ontwerpen
- 113 Technisch tekenen: schema's tekenen met CAD
- 178 Basiscomponenten: technologie van de actieve componenten
- 180 Basiscomponenten: werking operationele versterker omschrijven
- 181 Basiscomponenten: werking van de actieve componenten uitmeten
- 183 Basiscomponenten: technologie van de vermogencomponenten
- 184 Basiscomponenten: integreren van de vermogencomponenten
- 185 Basiscomponenten: werking vermogencomponenten uitmeten

Leerplandoelen ICT&Engineering | 00-2017-005

- 003 Elektrische schema's: tekenen, lezen en interpreteren
- 004 Elektrische schema's: symbolen herkennen en gebruiken
- 005 Elektrische schema's: tekenen met CAD
- 026 Componenten: eigenschappen toelichten
- 027 Componenten: gebruik van datasheets
- 028 Componenten: vermogendissipatie
- 029 Componenten: eenvoudige schakelingen toepassen
- 030 Componenten: uitmeten en controleren op defecten
- 031 Componenten: werking proefondervindelijk vaststellen

1 Elektronica componenten

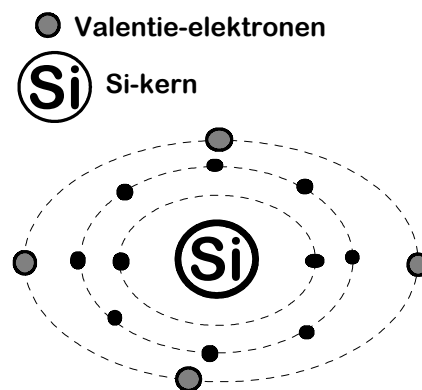
Halfgeleiders



1.1 Een beetje chemie

1.1.1 Vierwaardig silicium

Silicium (Si) is het basismateriaal om halfgeleidercomponenten te maken. Laten we deze, op planeet Aarde veel voorkomende stof, eens van dichtbij bekijken. Trouwens, silicium is niks anders dan gewoon zand! Het siliciumatoom bestaat uit een siliciumkern die een positieve lading draagt. Op de verschillende schillen zitten de 14 elektronen die Si rijk is, mooi verdeeld volgens de 'regel van Pauli'. Voor ons zijn de buitenste elektronen de belangrijkste. Zij zijn de valentie-elektronen. Silicium bevat er 4 en daarom zegt men dat Si een **4-waardig** materiaal is.



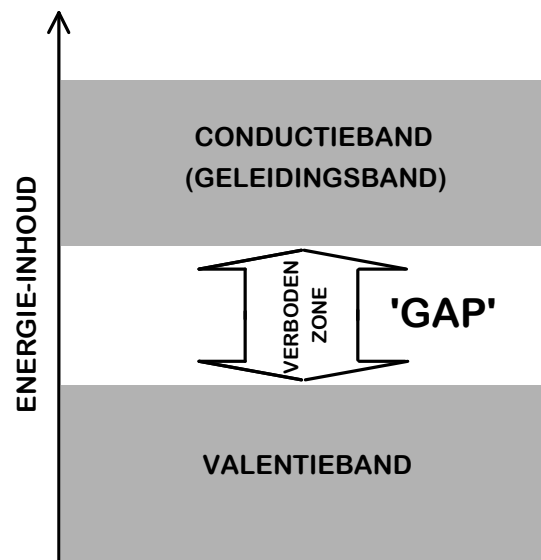
△ Fig.1.1 | Atoommodel van een Si-atoom
Bron: W. Van Wichelen

1.1.2 Energie-inhoud van een elektron

De elektronen vliegen vrolijk rond hun Si-kern en hebben also twee verschillende **energie-inhoud**. Uit de fysica weten we dat er potentiële en kinetische energie bestaat. Vertaald naar ons Si-atoompje hebben we het dan respectievelijk over de afstand van het elektron tot de kern en de omtreksnelheid.

1.1.3 Valentieband - geleidingsband - verboden zone

Valentie-elektronen bevinden zich in een zogenaamde **valentie-band**. In eenvoudige taal wil dit zeggen dat elektronen die zich ophouden in dit gebied geen constante energie bezitten. Ze zitten dus niet altijd op dezelfde plaats t.o.v. de kern en hun eigen snelheid (trilling) varieert ook. Kortom, hun energiewaarde schommelt voortdurend. Wanneer energie aan een atoom wordt toegevoerd (door warmte, een elektrisch potentiaal,...), trekken de valentie-elektronen zich los van de kern. Ze komen dan in de conductieband of **geleidingsband** terecht.



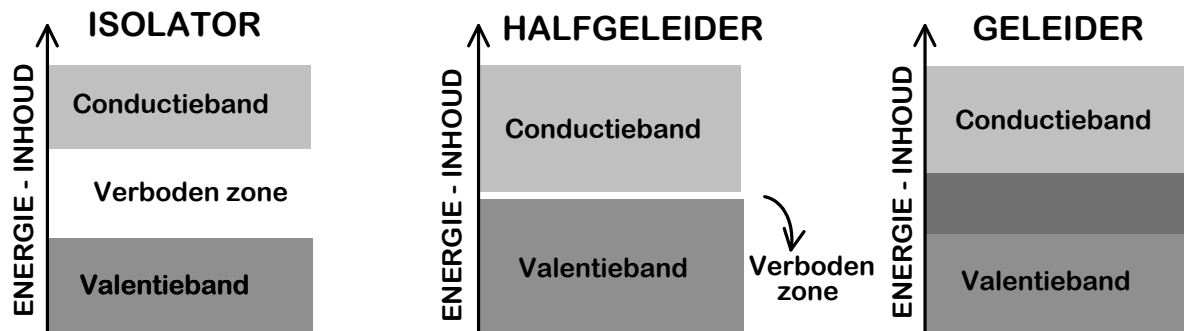
△ Fig.1.2 | Energietoestand waarin een valentie-elektron zich kan bevinden.
Bron: W. Van Wichelen

Ofwel bevindt een elektron zich in de valentieband ofwel bevindt het zich in de geleidingsband. Het is ondenkbaar dat een elektron zich ophoudt in een soort tussengebied. Daarom spreken we ook wel van een **verboden zone**.

1.2 Kristalrooster van silicium

1.2.1 Elektrische geleidbaarheid

Nu zijn we op een punt gekomen dat we alle fysische materialen kunnen indelen met als criterium hun **elektrische geleidbaarheid**:



△ Fig.1.3 | Indeling van fysische stoffen volgens hun elektrische geleidbaarheid.
Bron: W. Van Wichelen

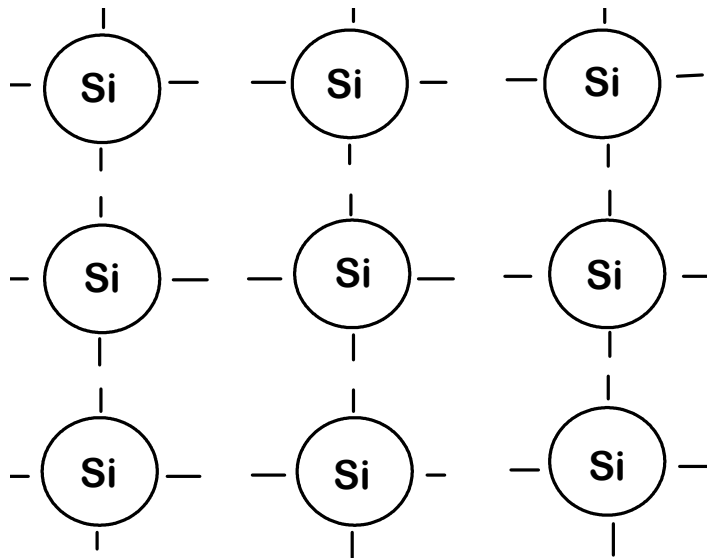
- Bij de **geleiders** overlapt de conductieband de valentieband. Er is dus geen verboden zone. De valentie-elektronen hebben geen energie van buitenaf nodig om van de valentieband naar de conductieband over te gaan. In normale omstandigheden geleiden deze materialen elektrische stroom.
- Bij de **halfgeleiders** is de verboden zone erg smal: ze is met een beetje toevoer van energie overbrugbaar.
- **Isolatoren** hebben een zeer brede verboden zone: alleen in extreme omstandigheden is deze overbrugbaar en wordt de isolator een geleider!

1.2.2 Zuiver silicium

We spreken over **zuiver silicium** wanneer er slechts één (1) vreemd atoom op 1000 000 000 000 Si-atomen te bespeuren valt in de roosterstructuur van ons Si-kristal. In mensentaal, één op duizend miljard!

1.2.3 Kristalrooster van zuiver silicium

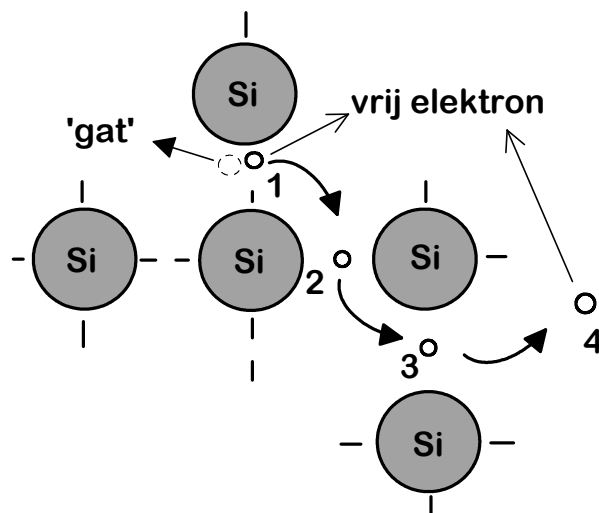
Materialen met een **kristalstructuur** zijn zeer vast. Denk bijvoorbeeld aan diamant. Diamant is niets anders dan zuivere koolstof, en evenals silicium 4-waardig. Je voelt wel aan dat het zeer moeilijk is om een atoom uit een kristalrooster los te krijgen. Immers, hoe zuiverder het Si-kristal, hoe vaster het rooster.



△ Fig.1.4 De kristalstructuur van zuiver 4-waardig silicium.
Bron: W. Van Wichelen

1.2.4 Vorming van elektron/gat-paren

Soms gebeurt het dat er toch een elektron geneigd is om zich los te maken uit deze vaste structuur. Het vrije elektron verdringt zich nu in de plaats van een ander, dat op zijn beurt gaat ronddwalen. Men spreekt dan van een 'elektron op de dool'. Op deze manier ontstaan er leemtes in de structuur: **gaten**. Doordat deze gaten onmiddellijk weer opgevuld worden door elektronen verplaatsen deze gaten zich als het ware. Dolkende elektronen resulteren in mobiele gaten: hiermee is het ontstaan van **elektron/gat-paren** uitgelegd. Merk op dat deze gatenstroom dezelfde zin heeft als de **conventionele stroomzin** uit de elektriciteit. De ronddolende elektronen vormen uiteraard de **elektronenstroom**.



△ Fig.1.5 Het ontstaan van elektron/gat-paren.
 Bij 1 maakt een elektron zich om één of andere bizarre reden los uit de kristalstructuur.
 Dit elektron laat een gat achter, en verdringt een ander elektron uit de structuur.
 Bij 2 begint het spelletje van voren af aan.
 Er ontwikkelt zich een elektronen- en gatenstroom.
 Bron: W. Van Wichelen

1.3 P-silicium en N-silicium

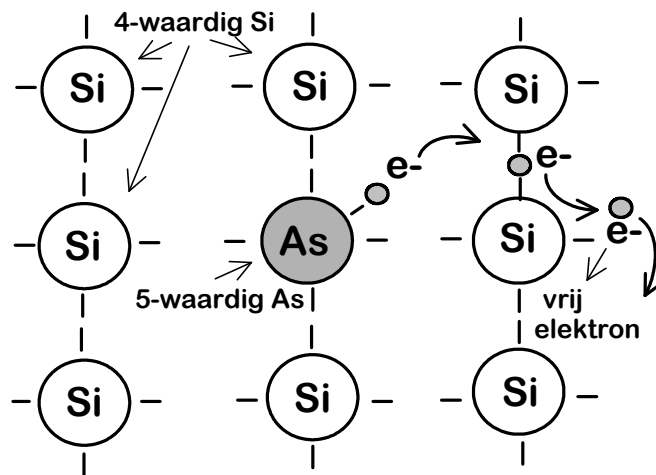
1.3.1 Doperen van halfgeleiders

Eerder hadden we het over die bizarre reden waarom een elektron zich wil lostrekken uit de vaste roosterstructuur van het Si-kristal. Wel, wanneer we zuiver Si verontreinigen met 3-waardige of 5-waardige materialen ontstaat dat chemisch spelletje van die bewuste elektron/gat-paren. De graad van onzuiverheden is ongeveer 1 op 1 000 000 à 100 000 000. In de elektronica-industrie spreekt men over het **doperen** van silicium om via deze onzuiverheden de gewenste effecten te bekomen.

1.3.2 Doperen met 5-waardige elementen

We kunnen N-Si maken door zuiver Si te verontreinigen (doperen) met bijvoorbeeld fosfor (P) en arsenicum (As). P en As zijn beide **5-waardige** elementen. Voor elk vreemd **ion** is er één vrij elektron.

Een atoom dat één of meerdere elektron(en) mist wordt een ion genoemd. Stel dat we doperen met arsenicum. Welnu, dat As-atoom voelt zich behagelijk in zijn muurvaste positie binnen de kristalstructuur van Si: 4 van de 5 valentie-elektronen vinden een plaats in het rooster. Si is immers 4-waardig, dus is er slechts plaats voor 4. Het overblijvende 5^e valentie-elektron verdringt een Si-elektron van z'n plaats. We weten nu dat er daardoor vrije elektronen ontstaan.



△ Fig.1.6 | Het ontstaan van N-Si door donorendoping.
Bron: W. Van Wichelen

1.3.3 N-silicium

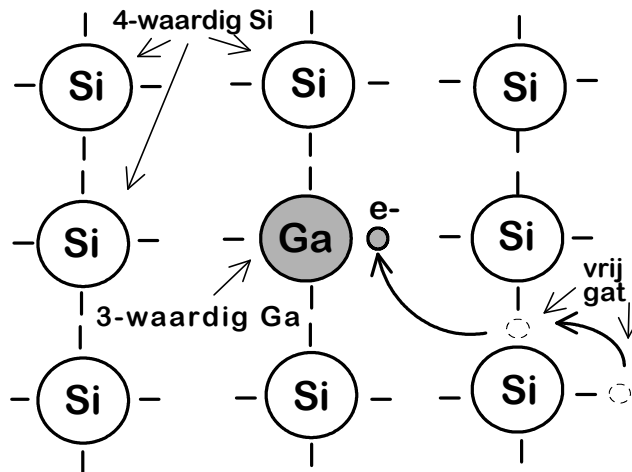
Doordat As een elektron verliest verkrijgt het een positieve lading: een positief arsenicum-ion nestelt zich nu in de Si-kristalstructuur. Simpel gesteld kunnen we zeggen dat er per doping met As een vrij elektron ontstaat. Deze vrije elektronen zijn negatief geladen: zij vormen de **meerderheidsladingdragers**. Arsenicum is een elektronendonor: elke As-doping levert één vrij elektron. In dit geval spreken we van **donorendoping**.

1.3.4 Meerderheids- en minderheidsladingdragers

De meerderheidsladingdragers zijn de negatieve vrije elektronen, zo bekomen we dus **negatief silicium** (N-Si). Ons chemisch verhaaltje is wel nog niet volledig: de spontane vorming van elektron/gat-paren blijft intussen onverminderd doorgaan. Echter, de gaten die door dit proces afgeleverd worden zijn serieus in de minderheid: deze gaten zijn de **minderheidsladingdragers**.

1.3.5 Doperen met 3-waardige elementen

We doperen ons zuiver Si-kristal nu met bijvoorbeeld **3-waardig** galium (Ga). We zouden evengoed andere 3-waardige elementen kunnen gebruiken zoals indium (In), boor (Bo) of aluminium (Al).



△ Fig.1.7 | Het ontstaan van P-Si door acceptorendopering.
Bron: W. Van Wichelen

Het galumatoom wil een vaste positie verkrijgen binnen de kristalstructuur. Het probeert dit door een elektron van een naburig 4-waardig Si-atoom los te weken. Het Ga-atoom kan nu natuurlijk niet meer neutraal geladen zijn: een negatief Ga-ion verstoort nu de roosterstructuur van Si. Doordat er een elektron werd onttrokken van een Si-atoom ontstond er een gat dat op zijn beurt weer wordt opgevuld door een ander losgeweekt Si-elektron. Met een beetje verbeelding zie je nu dat het gat zich nu verplaatst. Men spreekt van een 'mobiel vrij gat'.

1.3.6 P-silicium

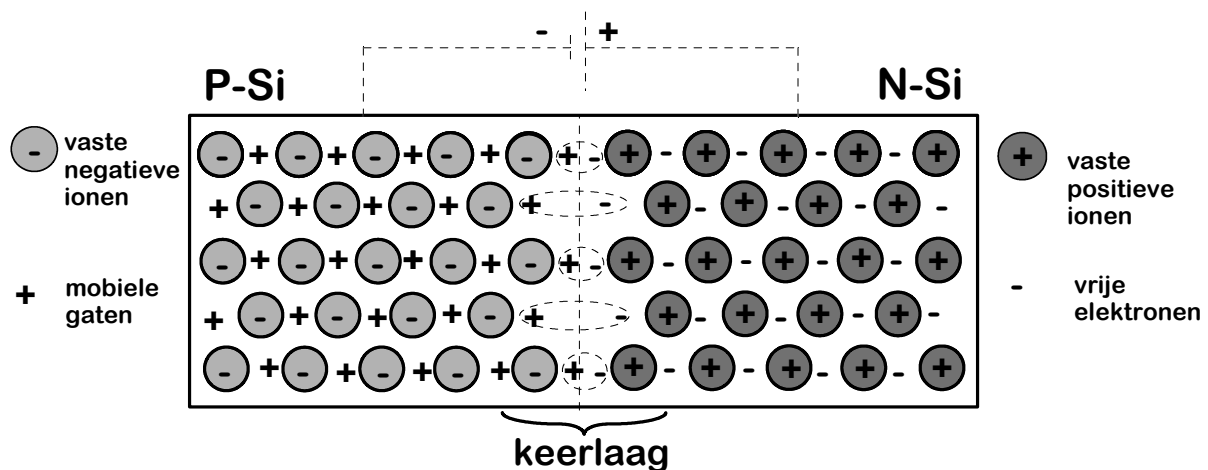
Elke Ga-verontreiniging resulteert dus in het ontstaan van een mobiel vrij gat. Vrije positieve gaten vormen nu de meerderheids-ladingdragers. Bij dit soort van doperingsproces spreken we van doperen met **elektron-acceptoren**. Door spontane vorming van elektron/gat-paren zitten er ook negatieve vrije elektronen rond te wandelen in onze roosterstructuur. Dit is een sporadisch proces: zij zijn in dit verhaal de minderheidsladingdragers. De meerderheidsladingdragers zijn positieve gaten en hierdoor verkrijgen we **positief silicium** (P-Si).

1.4 PN-junctie

In de eerste helft van de 20^{ste} eeuw kwam men op het lumineuze idee die P-materialen en N-materialen uit voorgaande paragraafjes met elkaar te laten reageren. Wat zou er gebeuren wanneer we een blokje P-Si vastplakken aan een blokje N-Si? Dezelfde vraag, maar nu een beetje technischer gesteld: wat gebeurt er in de **junctie** van een P-materiaal met een N-materiaal? Klaar voor het laatste stukje chemie?

1.4.1 Recombinatie

In het grensgebied **recombineren** vrije gaten uit het blokje P-Si met de vrije elektronen uit het blokje N-Si. Tegengestelde ladingen trekken elkaar nu eenmaal aan: dat is de natuur! In het P-Si ontstaat er bij een junctie met N-Si een negatieve lading.



△ Fig.1.8 | Junctie van P-Si en N-Si.
Bron: W. Van Wichelen

1.4.2 Negatief P-silicium

Door het recombineren van de mobiele gaten (meerderheidsladingdragers) blijven de negatieve Si-ionen verlaten en verweesd achter... De positieve lading van de gaten compenseert nu niet meer, gevolg: de lading van ons P-materiaal wordt lichtjes **negatief**.

1.4.3 Positief N-silicium

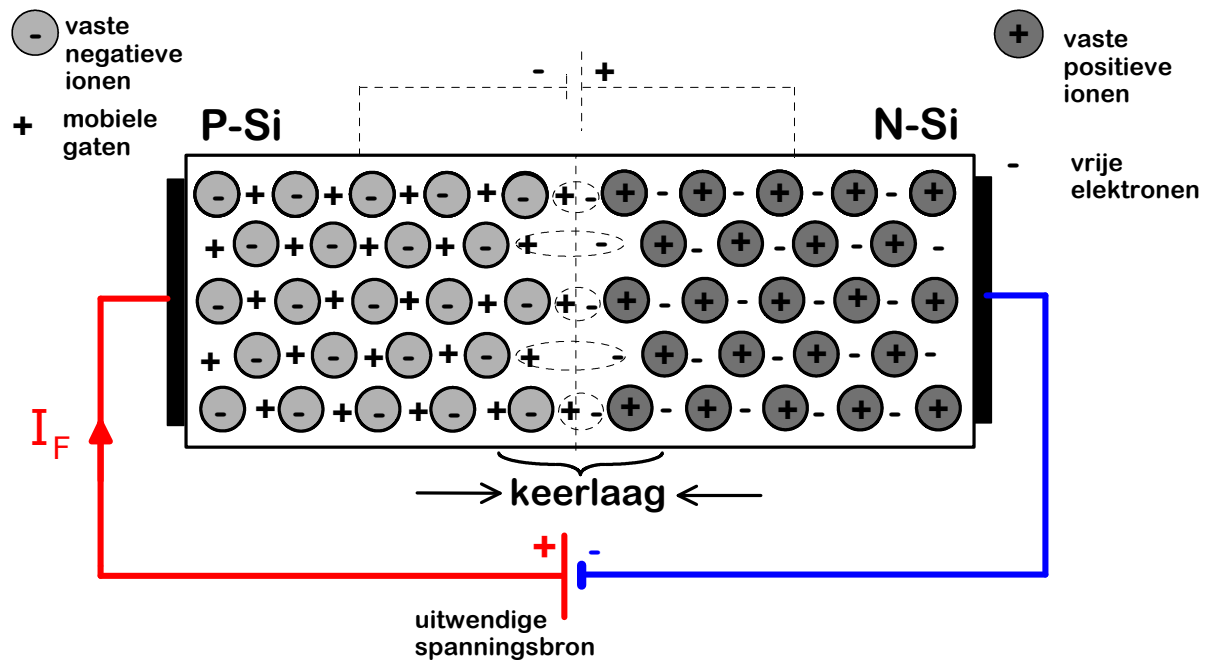
In het blokje N-Si onstaat bij junctie met een blokje P-Si een **positieve** lading. De Si-ionen zitten weerom vast en door de recombinatie wordt hun lading niet meer gecompenseerd. De negatieve vrije elektronen migreren immers naar de positieve gaten in de recombinatiezone.

1.4.4 Keerlaag

Uit figuur 1.8 blijkt dat de recombinatiezone qua lading neutraal is. Maar kan dat recombineren zomaar ongelimiteerd door blijven gaan? Een soort evenwicht wordt bereikt doordat de positieve ionen in N-Si de positieve gaten in P-Si afstoten en de negatieve ionen in P-Si de negatieve elektronen uit N-Si afstoten. Dit is dan de zogenaamde **potentiaalbarrière**. Deze barrière verhindert verdere recombinatie. Er is nu een soort bron ontstaan met een zeker potentiaal verschil. In de technische literatuur wordt de neutrale recombinatiezone ook wel **keerlaag** of **uitputtingsgebied** genoemd. De dikte van deze keerlaag bedraagt enkele micrometers. De dikte ervan is afhankelijk van de graad van dopering: hoe meer verontreiniging door vreemde elementen, hoe dunner de keerlaag. De barrière wordt dan immers vlugger gevormd.

1.5 Polaristatie

1.5.1 Polarisatie in doorlaat



△ Fig.1.9 | Voorwaarts gepolariseerde PN-junctie.
Bron: W. Van Wichelen

Laten we alles nog eens op een rijtje zetten:

- In een **P**-materiaal zijn de meerderheidsladingdragers **positief**.
- In een **N**-materiaal zijn de meerderheidsladingdragers **negatief**.

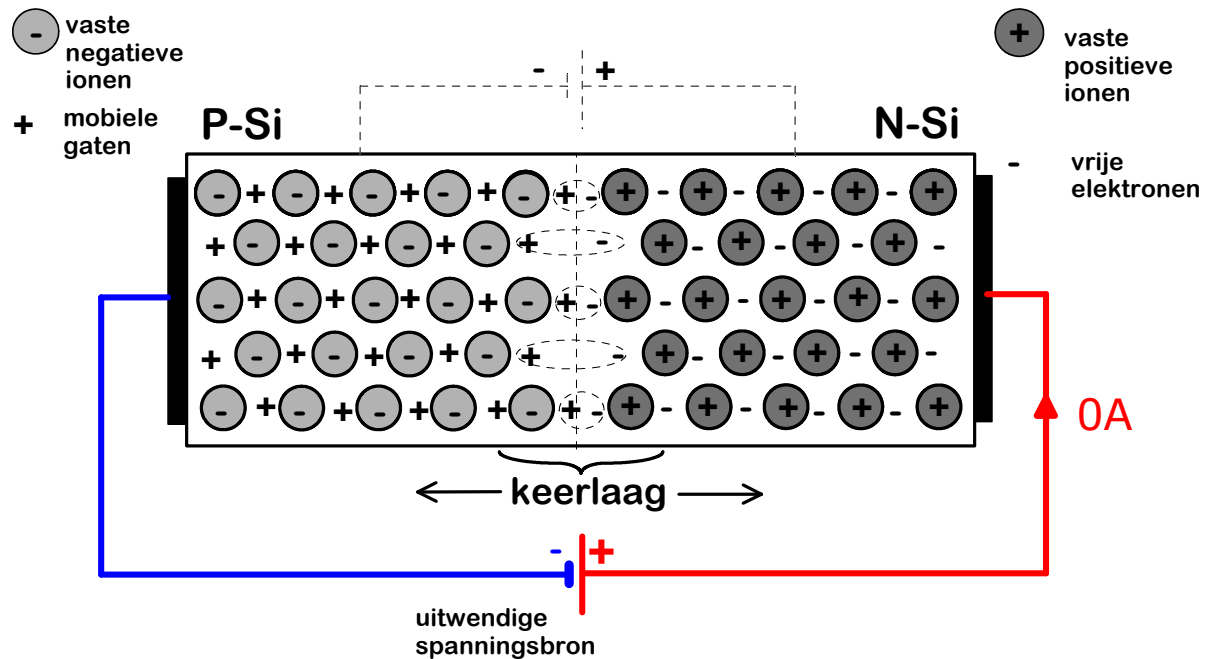
De **uitwendige spanningsbron** werkt de potentiaalbarrière tegen. Hierdoor zijn er terug recombinaties mogelijk en zullen er ladingsverschuivingen plaats vinden. De plusklem van de uitwendige bron levert constant de vrije gaten en de minklem de elektronen. Het recombinatieproces kan dus eeuwig blijven doorgaan, zolang het uitwendig potentiaalverschil aanwezig is.

1.5.2 Siliciumkristal als geleider

Niets bemoeilijkt de gatenstroom. Ze vloeien dwars doorheen het kristal omdat ze worden aangetrokken door de minklem van de uitwendige bron. Het Si-kristal gedraagt zich nu als een **geleider**! Deze gatenstroom I_F komt overeen met de conventionele stroomzin uit de elektriciteit en wordt de **voorwaartse polarisatiestroom** genoemd.

1.5.3 Polarisatie in sper

We wisselen de plusklem en de minklem van de uitwendige spanningsbron om. Deze situatie wordt getoond in figuur 1.10. De minklem trekt de mobiele gaten uit P-Si aan. De plusklem trekt op haar beurt de vrije elektronen aan uit N-Si. P-Si wordt dus **negatiever** en N-Si wordt dus **positiever**.



△ Fig.1.10 | Reverse gepolariseerde PN-junctie.
Bron: W. Van Wichelen

1.5.4 Siliciumkristal als isolator

De uitwendige bron versterkt dus de inwendige potentiaalbarrière. Op een bepaald moment stoppen de recombinaties: de barrière is nu op haar stevigst. Het Si-kristal gedraagt zich nu als een **isolator**!

1.5.5 Doorslag van de PN-junctie

Wanneer we de uitwendige bronspanning zodanig hoog opvoeren dat de inwendige potentiaalbarrière van het kristal het begeeft, dan bekommen we weerom een geleider. Dit fenomeen heet **doorslag** en kan in elke isolator optreden.

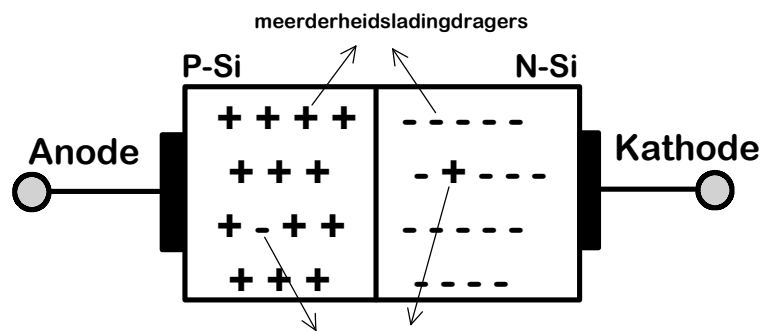
2

Elektronica componenten
Junctiedioden

2.1 Schemasymbool en package

2.1.1 Schemasymbool

Fysisch



Symbool



Praktisch



△ Fig.2.1 Verschillende voorstellingen van de siliciumdiode: als PN-junctie (boven), als schemasymbool (midden) en in zijn praktische gedaante (onder).
Bron: W. Van Wichelen

2.1.2 Anode en kathode

In essentie is een kristaldiode niets anders dan een PN-junctie. Een diode bezit twee aansluitingen: de **anode** en de **kathode**. Deze benamingen stammen nog af uit de buizentijd^[1]. Omwille van het gemak heeft men de terminologie van toen gewoon overgenomen.

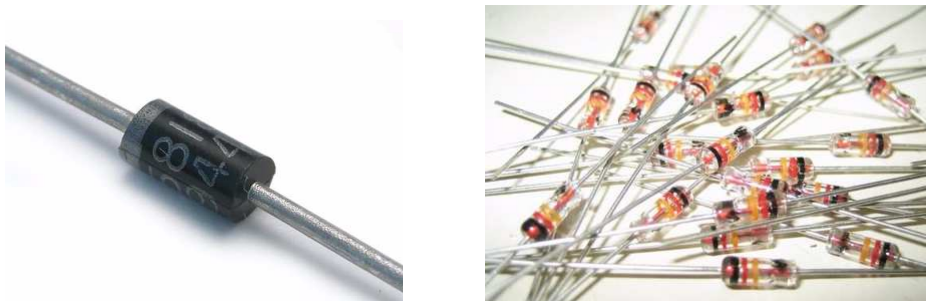
Let op!

Het streepje op het lichaam van de component wijst altijd de **kathode** aan.

De aanduiding '1N4007' is het **typenummer** van de component. Je vindt de aansluitgegevens en de typische eigenschappen terug in zogenaamde **datasheets**^[2].

2.1.3 Package

Letterlijk vertaald: 'verpakking'. In de Nederlandse taal spreken we van de **behuizing** van een component. Diodes vind je in alle maten en gewichten. Afhankelijk van de toepassing (application) maak je een keuze uit een ruim assortiment.



△ Fig.2.2 Typische verschijningsvormen van een diode: een gelijkrichterdiode voor algemene toepassingen (links) en signaldiodes voor kleine vermogens (rechts).
Bron: World Wide Web

[1] De eerste elektronenbuizen zagen het levenslicht rond 1904. Ze bleven nog dapper present tot het einde van de jaren 1960. Nadien werden ze systematisch vervangen door 'vaste stof' (solid state) elektronica.

[2] In deze cursus bezigen we de Engelstalige term.
In het Nederlands spreken we van 'gegevensbladen'.



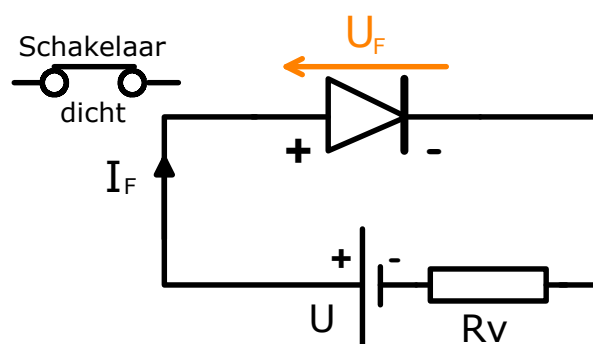
△ Fig.2.3 Een voorbeeld van behuizingen van diodes die zeer grote vermogens kunnen doorschakelen. Door deze typische vorm is het mogelijk de component te bevestigen aan een koelprofiel om een goede warmte-afvoer mogelijk te maken.
Bron: World Wide Web

2.2 Halfgeleidergedrag

Laboproef 1

Onderzoek het halfgeleidergedrag van de gelijkrichterdiode 1N4001. Plaats een gloeilampje in serie en polariseer de diode op de twee mogelijke manieren. Wanneer brandt het lampje?

2.2.1 Polarisatie in doorlaat

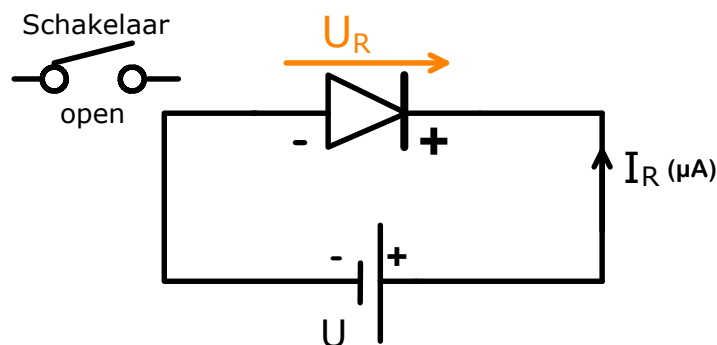


△ Fig.2.4 Een diode in doorlaat gepolariseerd (forward biased) gedraagt zich min of meer als een gesloten schakelaar. De stroom die door de component vloeit is I_F .
Bron: W. Van Wichelen

Let op!

Wanneer we m.b.v. een uitwendige spanningsbron de **anode positiever** maken dan de **kathode**, dan zal de diode **geleiden**.

Als we de diode nu idealiseren dan kunnen we zeggen dat de halfgeleider zich nu gedraagt als een **gesloten** schakelaar. Echter, een 'diode-in-doorlaat' is geen ideale schakelaar. De halfgeleider bezit een zekere weerstand. Bijgevolg zal er een zekere spanningsval U_F (V_F)^[3] over de diode staan. Voorschakelweerstand R_V beperkt de stroom I_F . Te grote stromen kunnen voor onze arme diode immers fataal zijn! De index 'F' staat voor 'forward biased'^[4] (voorwaartse polarisatie).

2.2.2 Polarisatie in sper

△ Fig.2.5 Een diode in sper gepolariseerd (reverse biased) gedraagt zich min of meer als een open schakelaar. De minuscule kleine stroom die nu door de component vloeit is de lekstroom I_R .
Bron: W. Van Wichelen

Let op!

Polariseren we de **anode** nu **negatiever** dan de **kathode**, dan zal de diode **sperren**.

Wanneer we de diode weerom idealiseren kunnen we deze situatie vergelijken met een **open** schakelaar.

[3] In Amerikaanse technische literatuur duidt men spanningen aan met een hoofdletter 'V' in plaats van de 'U' die wij in Europa gewoon zijn. In de cursus maken we gebruik van beide gewoonten...

[4] 'Biasing': een elektronische component op een bepaalde manier polariseren (instellen) zodat hij optimaal kan werken.

2.2.3 Lekstroom en doorslagspanning

Nochtans zullen we met een zeer nauwkeurige ampèremeter een minuscule klein stroompje kunnen meten: de **lekstroom** ' I_R '. De index 'R' staat voor 'reverse biased' (inverse polarisatie). Let echter op met de grootte van de spanning van de uitwendige spanningsbron. We kunnen deze sperspanning U_R namelijk niet tot in het oneindige blijven opdrijven. Op een bepaald ogenblik zal de diode '**doorslaan**'. Deze doorslag gebeurt bij een sperspanning gelijk aan V_{BR} : de 'break down voltage'.

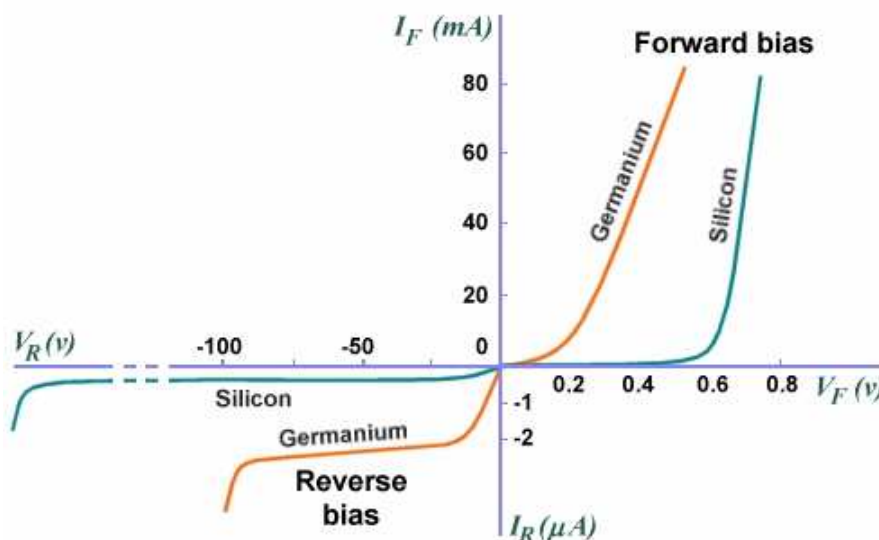
2.3 Doorlaatkarakteristiek

Laboproef 2

Neem de U_F/I_F -karakteristiek op van de gelijkrichterdiode 1N400x (x=1...7). Duid hierop de kniespanning (U_k) aan. Bereken tevens de dynamische weerstand van de diode in het lineair gebied.

2.3.1 U_F/I_F -karakteristiek

Figuur 2.6 toont de U_F/I_F -karakteristiek van een silicium-diode (Si) en een germanium-diode (Ge). De kniespanning van Ge-dioden is ongeveer 0,2V. De kniespanning van Si-dioden is ongeveer 0,7V. Voorbij deze kniespanning gedragen dioden zich zoals een ohmse weerstand: het spanning/stroom-verloop is dan lineair.



△ Fig.2.6 U_F/I_F -karakteristiek van een germanium-diode en een silicium-diode. Bron: world wide web

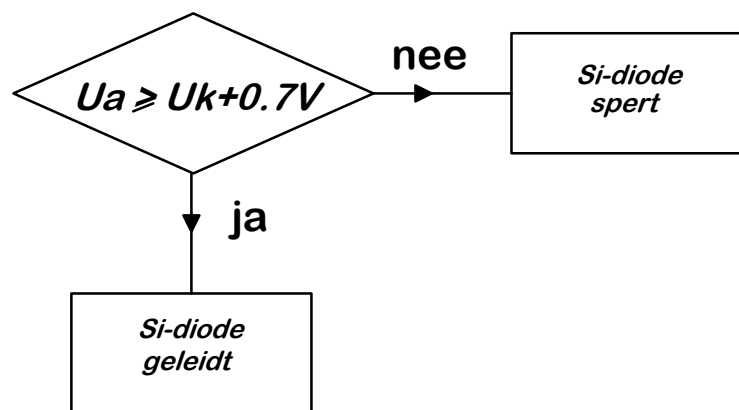
2.3.2 Praktische ontwerprichtlijn

In deze cursus maken we volgende afspraak:

Vuistregel

De spanning die ik meet over een silicium-diode in **door-
laat** (forward biased) bedraagt **0,7** volt.

Elektronici maken dikwijls gebruik van zulke ontwerprichtlijnen. In het Engels spreekt men van zogenaamde 'design rules of thumb' en meestal leiden deze eenvoudige vuistregels tot goed ontworpen elektronische schakelingen. Figuur 2.7 toont een stroomdiagram (flow-chart) waarmee we het halfgeleidergedrag kunnen nagaan van elke silicium-diode.

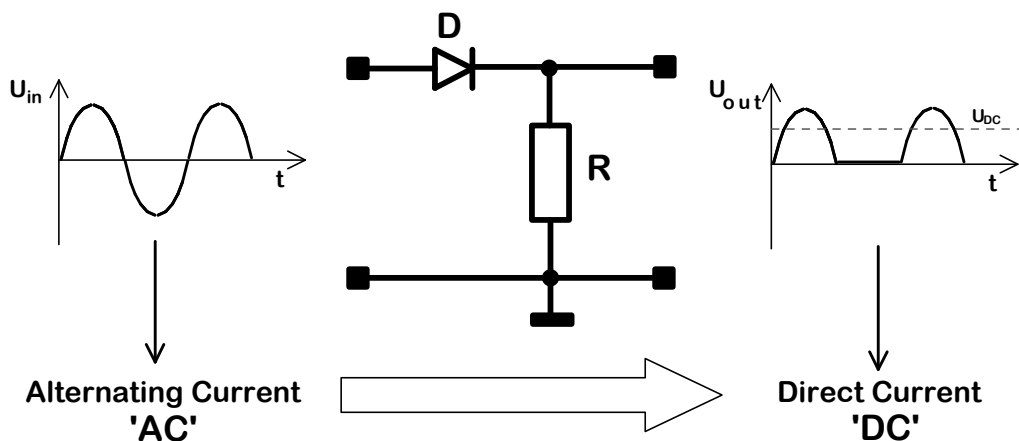


△ Fig.2.7 Flow-chart van het halfgeleidergedrag van silicium-dioden.
Bron: W. Van Wichelen

2.4 Toepassingen

2.4.1 AC/DC-omzetter

De voornaamste toepassing van een diode vinden we terug bij de '**gelijkrichters**'. Deze diodenetwerken zetten wisselstroomenergie om naar gelijkstroomenergie. Een AC-spanning wordt aldus omgevormd naar een DC-spanning. Enkel de positieve helften worden doorgegeven naar de uitgang. In een apart dossier zullen we deze toepassing uitvoeriger behandelen.

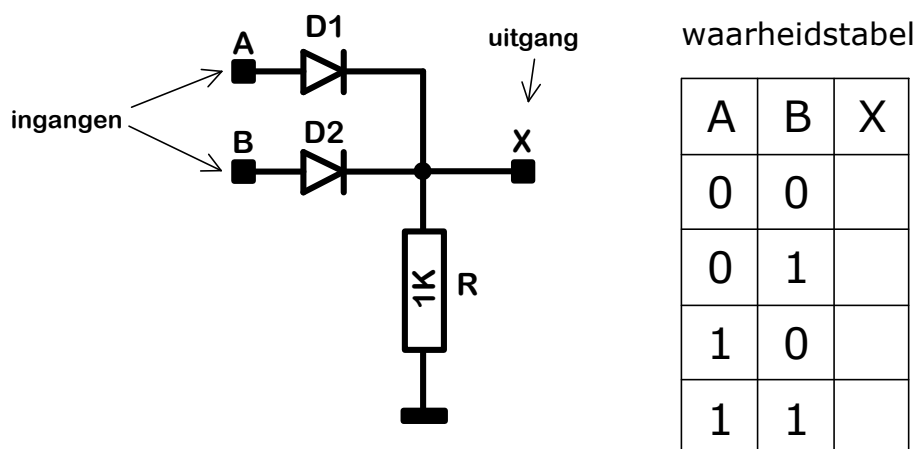


△ Fig.2.8 | Diode als gelijkrichter van AC-spanning.
Bron: W. Van Wichelen

2.4.2 Digitale poort

De wereld van de digitale techniek kent slechts twee niveau's: 'hoog' en 'laag'. Hoog komt overeen met een '1' en laag komt overeen met '0'. Verder spreken we af dat een één overeen komt met een spanningsniveau van meer dan +2,5V. Niveau's onder deze +2,5V beschouwen we als logisch nul. Een 'goede' logische 1 bezit een spanningsniveau van +5V en een 'goede' logische 0 bezit een spanningsniveau van 0V.

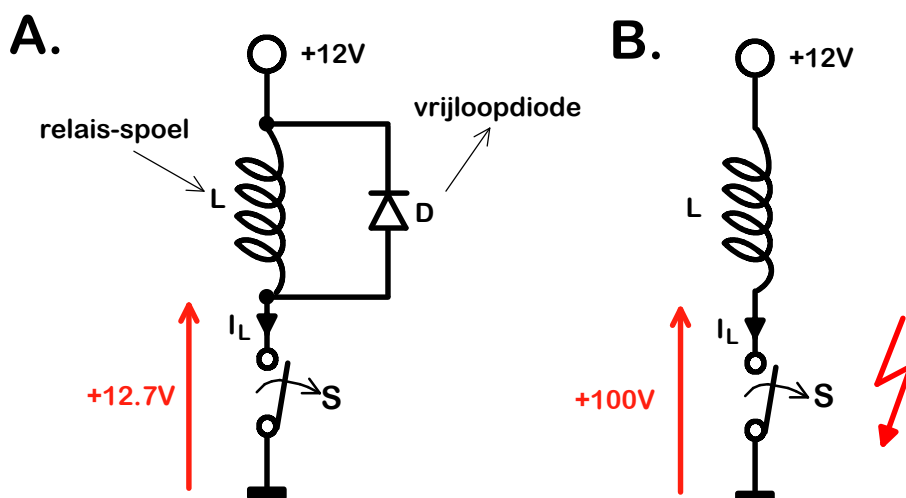
Figuur 2.9 toont een diode-netwerk dat zich gedraagt als een digitale OF-poort (OR-gate). Probeer zelf eens de waarheidstabel op te stellen!



△ Fig.2.9 | Diode als digitale OF-poort.
Bron: W. Van Wichelen

2.4.3 Vrijloopdiode

Bij het **uit**-schakelen van sterk **inductieve** belastingen kunnen we vaststellen dat er vonken ontstaan over de contacten de schakelaar. Deze vonkvorming beperkt de levensduur van de schakelcontacten en dienen bijgevolg zoveel mogelijk onderdrukt te worden. De vonken zijn een rechtstreeks gevolg van de zeer hoge zelfinductiespanning afkomstig van de spoel in de schakeling. Plaatsen we een diode op de juiste manier parallel, dan kunnen we uitschakelen zonder deze hinderlijke vonkvorming.

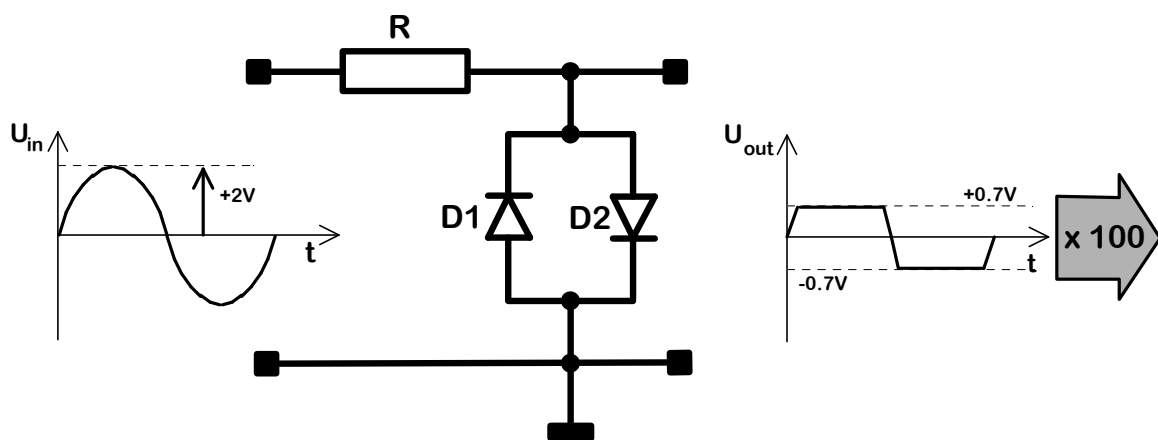


△ Fig.2.10 | Nut van een vrijloopdiode.
Bron: W. Van Wichelen

Wanneer we in situatie B (fig.2.10) de schakelaar S openen, zullen we een hoge inductiespanning opwekken. Een spoel heeft immers de neiging de regimestroom te onderhouden. De schakelaar opent (zeer grote weerstand); de spoel probeert haar regimestroom te onderhouden; deze stroom (I_L) doet over een zeer grote weerstand een zeer hoge spanning ontstaan; aan het bovenste contact van S heerst bv. +100V en het onderste contact ligt aan massa (0V). Gevolg: nadelige vonkvorming. In situatie A zorgt de diode er voor dat deze geïnduceerde hoge spanning afgeleid wordt naar de plusklem van de voeding. De spanning over de contacten kan nu maximaal 0,7V hoger zijn dan de gebruikte voedingspanning. De vonkvorming over de contacten van S is nu verdwenen!

2.4.4 Signaalbegrenzer

Een 'limiter' vind je dikwijls terug aan de ingang van mengpanelen. Een ingangssignaal met een te grote amplitude kan serieuze vervorming (oversturing) veroorzaken in de audio-versterkers. Om dit te voorkomen wordt de schakeling van figuur 2.11 aan de ingang van zulke versterkers geplaatst. Het ingangssignaal wordt begrensd met een maximale amplitude van 0,7V.

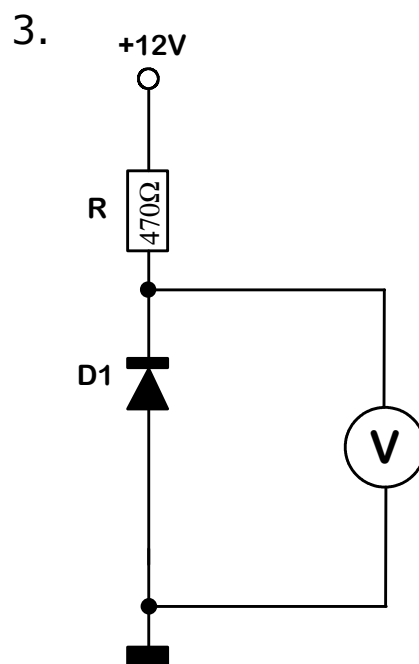
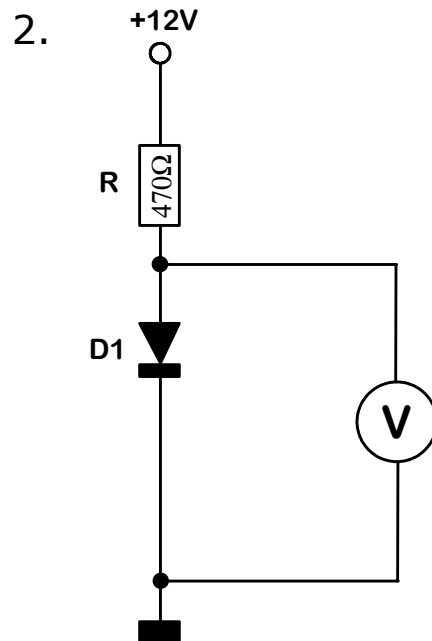
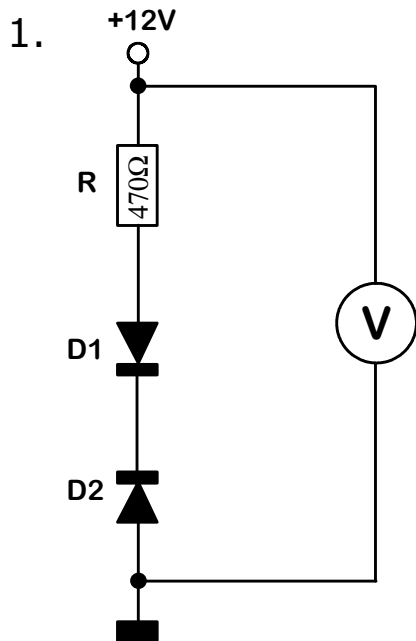


△ Fig.2.11 Anti-parallelschakeling van 2 dioden bij limiter-schakelingen.
Bron: W. Van Wichelen

2.5 Oefeningen

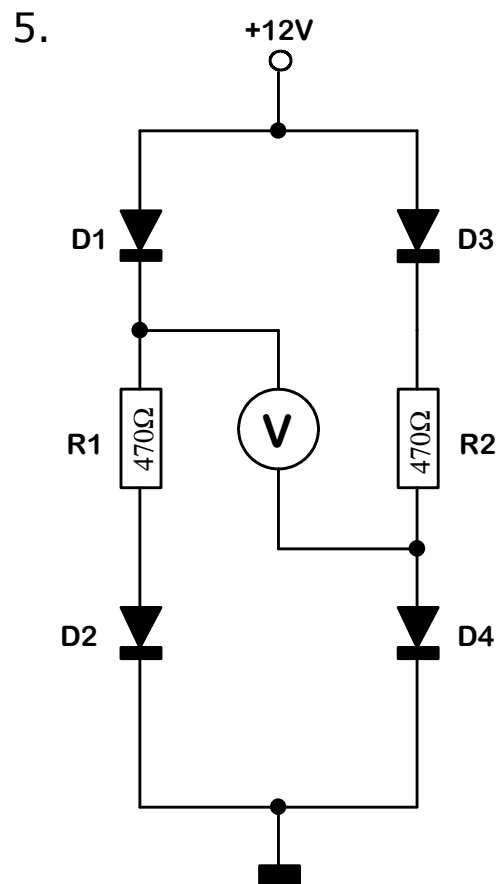
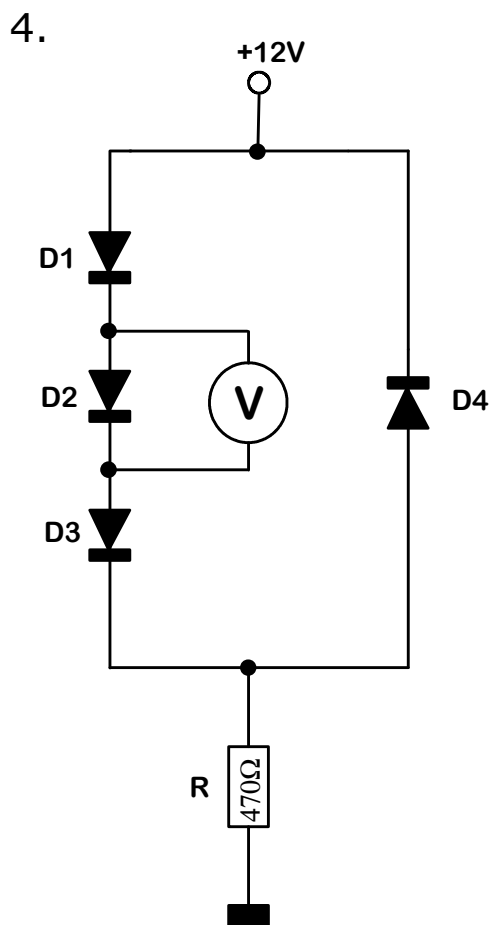
2.5.1 Reeks 1

Bepaal in elk diodenetwerk de waarde die de voltmeter aangeeft!

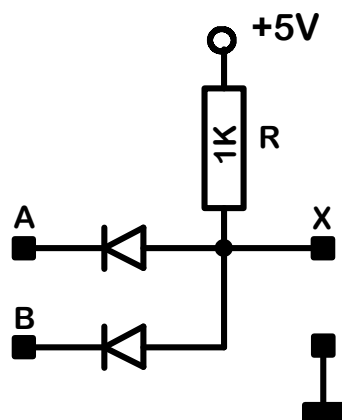


2.5.2 Reeks 2

1. Bepaal in elk diodenetwerk de waarde die de voltmeter aangeeft!



2. Vul de waarheidstabel in!



waarheidstabel

A	B	X
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

3 | Elektronica componenten

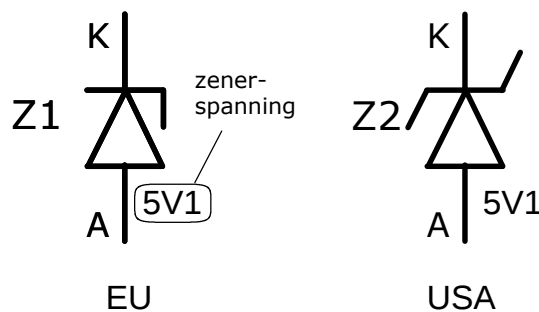
Zenerdioden



3.1 Schemasymbool en package

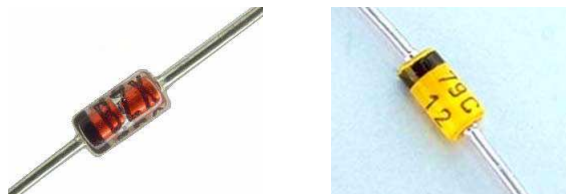
3.1.1 Schemasymbool

Op het eerste zicht lijkt er geen verschil te bestaan tussen een zenerdiode en een gewone diode. Beiden bezitten een kathode en een anode. Bij een zener wordt echter steeds een zogenaamde **zener spanning** opgegeven. We coderen een zenerdiode met 'Z' in plaats van een 'D'.



△ Fig.3.1 | Schemasymbolen van een zenerdiode.
Bron: W. Van Wichelen

3.1.2 Package



△ Fig.3.2 | Typische verschijningsvormen van een zenerdiode.
In Europa: BZX-reeks; in de VS: 1N7xx-reeks.
Het streepje wijst de kathode aan.
Bron: world wide web

3.2 Zenerkarakteristiek

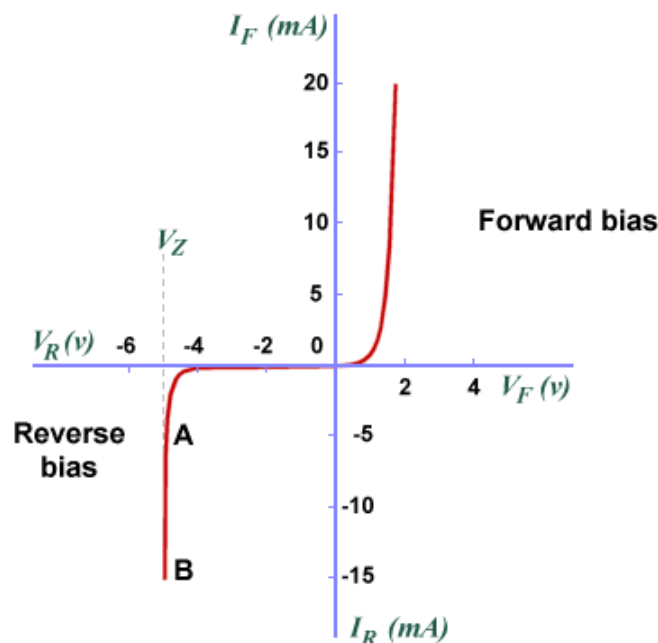
3.2.1 U_R/I_R -karakteristiek

Het **zenereffect** is genoemd naar de ontdekker Clarence Melvin Zener^[5]. Het verschijnsel treedt op in een sterk gedopeerde PN-overgang die gepolariseerd is in de sperrichting (reverse bias). Bij een voldoende hoge spanning vindt er toch geleiding plaats door de aanwezigheid van vrije ladingsdragers.

Laboproef 3

Neem de U_F/I_F -karakteristiek en de U_R/I_R -karakteristiek op van de zenerdiode BZX79Cx₁Vx₂. (bv. x₁=6; x₂=2).
Eerst polariseer je de component in doorlaat.
Vervolgens polariseer je de component in sper.

Wanneer we een zenerdiode in doorlaat polariseren, dan gedraagt de component zich als een gewone diode. De zenerdiode dankt zijn bestaan aan het plots geleiden bij polarisatie in **sper** bij de zogenaamde **zenerspanning** (V_Z).



△ Fig.3.3 | Typische zenerkarakteristiek.
Bron: world wide web

[5] Clarence Melvin Zener (1905-1993): Amerikaans theoretisch natuurkundige. Was van origine wiskundige, maar publiceerde over o.a. supergeleiding, metaalkunde en geometrisch programmeren.

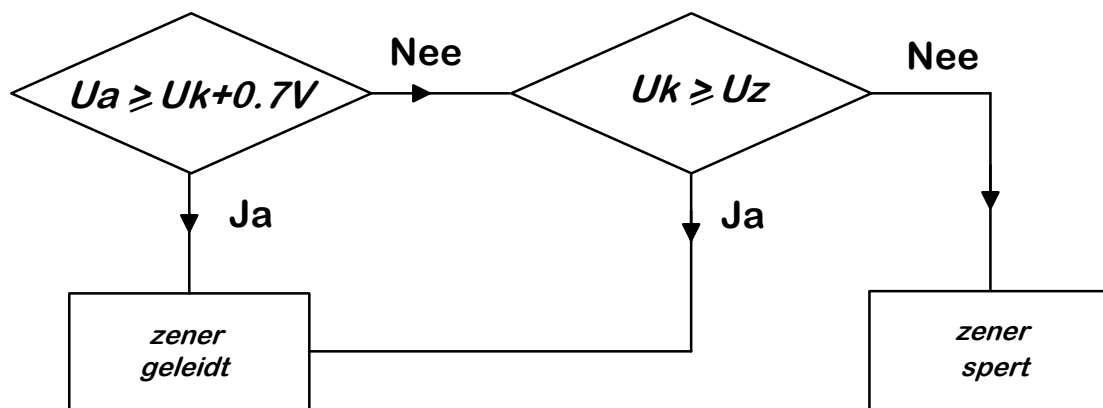
Vergelijken we de U_R/I_R -karakteristiek van een gewone diode met deze van een zenerdiode, dan bemerken we dat bij een zenerdiode het fenomeen van **doorslag** veel vroeger optreedt. Belangrijk hierbij is dat deze doorslag niet leidt tot beschadiging van de halfgeleider. Polariseren we zulke dioden in *sper* dan stellen we ze in als zener. In plaats van doorslagspanning spreken we nu van de 'zener spanning': U_z . In doorlaat is de karakteristiek identiek aan die van een gewone Si-diode.

3.2.2 Constante zenerspanning

Vuistregel

- Polariseren we de zener in **doorlaat**, dan staat over de component de kniespanning U_k van 0,7V.
- Polariseren we de zener in **sper**, dan staat over de component de zenerspanning U_z .

Wanneer we de zenerkarakteristiek wat grondiger bekijken valt ons op dat de kathode/anode-spanning niet betekenisvol toeneemt bij een 'forse' stroomtoename. De spanning over de zener is met wat goede wil **constant** te noemen. De flow-chart van fig.3.4. beschrijft het karakteristieke halfgeleidergedrag.

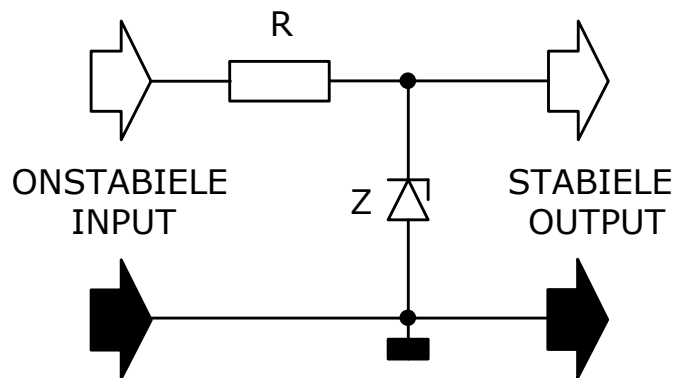


△ Fig.3.4 | Flow-cart van de zenerdiode.
Bron: W. Van Wichelen

3.3 Zenerstabilisatie

3.3.1 Principe

Het principe van **zenerstabilisatie** is eenvoudig: een onstabiele ingangsspanning wordt omgevormd naar een **stabiele** uitgangsspanning. Figuur 3.5 toont het prinsipeschema.



△ Fig.3.5 | Prinsipeschema van zenerstabilisatie.
Bron: W. Van Wichelen

Laboproef 4

Onderzoek het stabilisatiegedrag van zener BZX79C5V1. De nominale voedingsspanning bedraagt 10V en de rimpel is $5V_{\text{ptp}}$. Bepaal de procentuele rimpel over de zenerdiode en vergelijk deze waarde met de procentuele rimpel van de onstabiele voedingsspanning. De ruststroom stel je in op 15mA.

3.3.2 Zener-referentiespanning

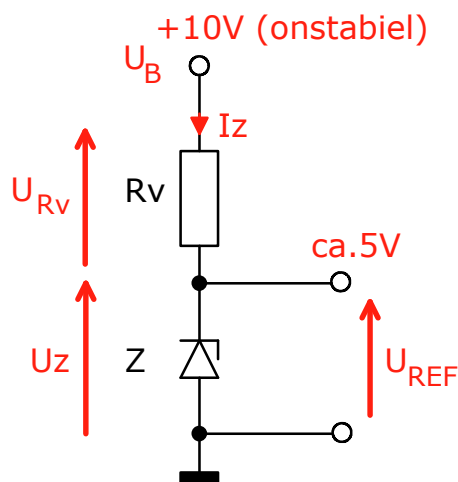
Stel dat we beschikken over een DC-voedingsspanning met een zekere rimpel. We wensen nu een zo vlak mogelijke spanning over een zekere belasting. Anders gezegd: we willen de rimpelspanning verkleinen. Wanneer we geen grote stromen dienen te leveren (in de grootte-orde van enkele mA's), dan kunnen we gebruik maken van de eenvoudige zenerconfiguratie van figuur 3.5. De spanning over een zenerdiode is nagenoeg constant wanneer deze goed ingesteld staat. We kunnen deze zenerspanning dan beschouwen als een **referentie**.

3.3.3 DC-instelling en ruststroom

We kunnen de waarde van de voorschakelweerstand bepalen met de hulp van een nieuwe vuistregel. Deze extra weerstand laat ons toe de zenerdiode correct in te stellen. We bedoelen hiermee dat we door de halfgeleidercomponent een geschikte ruststroom laten vloeien zodat er over deze component een comfortabele spanning staat. De zener bevindt zich dan op een ideaal punt op zijn U_Z/I_Z -karakteristiek. We zeggen nu dat hij ingesteld staat op zijn rustpunt. Het punt op de grafiek waar we deze ruststroom (bias-stroom) en rustspanning (bias-spanning) kunnen aflezen, wordt het **DC-instelpunt (Q)**^[6] (quiescent-point) genoemd.

Vuistregel

Stel de **ruststroom** I_{Zrust} in op de waarde van de **teststroom** (I_{ZT}) opgegeven in de datasheets.



△ Fig.3.6 | DC-instelling van een onbelaste zener.
Bron: W. Van Wichelen

Voorbeeld

Hoe bepaal je nu de voorschakelweerstand R_v ?
We gaan er in eerste instantie van uit dat we de zener niet belasten. Dit is de situatie voorgesteld in figuur 3.6.

GEGEVENS

- Onstabiele bronspanning: $U_B = 10V$ (gemiddeld)
- Referentiespanning $U_{REF} = ca. 0.5V$

[6] 'Biasing': het instellen van elektronische componenten op hun rustpunt. In plaats van 'quiescent-point' gebruikt men ook wel de term 'operation-point'.

STAP 1

Zoek een geschikte zener in de datasheet van figuur 3.7. Zener 1N751A bezit een zenerspanning van $V_Z = 5,1V$ bij een teststroom $I_{ZT} = 20mA = I_{Zrust}$.

STAP 2

Bepaal de deelspanning U_{RV} over de voorschakelweerstand.

$$\begin{aligned} U_{RV} &= U_B - U_Z \\ U_{RV} &= 10V - 5,1V \\ &= 4,9V \end{aligned}$$

STAP 3

Bepaal de theoretische waarde van R_V .

$$\begin{aligned} R_V &= \frac{U_{RV}}{I_{Zrust}} \\ R_V &= \frac{4900mV}{20mA} \\ &= 245\Omega \end{aligned}$$

STAP 4

Kies een praktische waarde uit de E12-reeks.

$$220\Omega < R_V < 270\Omega$$

We kiezen 270Ω zodat de stroom (en bijgevolg ook de spanning) iets minder is.

De kleurcode is rood-violet-bruin-goud.

STAP 5

Bepaal het minimale dissipatievermogen P_{RV} .

$$\begin{aligned} P_{RV} &= U_{RV} \times I_{Zrust} \\ &= 4,9V \times 20mA \\ &= 98mW \end{aligned}$$

We kiezen een weerstand van 1/4 watt (250mW).

3.3.4 Datasheet 1N7xx

1N746 THRU 1N759

ZENER DIODES

FEATURES

- ♦ Silicon Planar Power Zener Diodes
- ♦ Standard Zener voltage tolerance is $\pm 5\%$ for "A" suffix. Other tolerances are available upon request.

MECHANICAL DATA

Case: DO-35 Glass Case
Weight: approx. 0.13 g

MAXIMUM RATINGS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

	SYMBOL	VALUE	UNIT
Zener Current (see Table "Characteristics")			
Power Dissipation at $T_L = 75^\circ\text{C}$	P_{tot}	500 ⁽¹⁾	mW

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

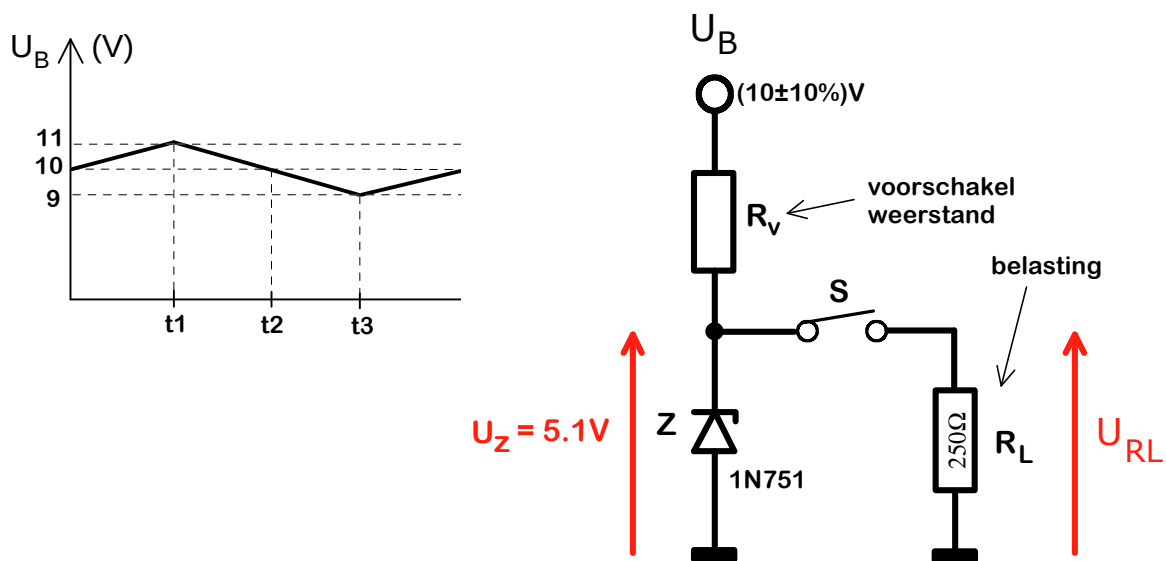
Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Type Number	Nominal Zener Voltage $V_Z @ I_{ZT}^{(3)}$ (Volts)	Test Current I_{ZT} (mA)	Maximum Zener Impedance $Z_{ZT} @ I_{ZT}^{(1)}$ (Ω)	Maximum Regulator Current $I_{ZM}^{(2)}$ (mA)	Maximum Reverse Leakage Current	
					$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_R @ V_R = 1\text{V}$ (μA)	$T_A = 150^\circ\text{C}$ $I_R @ V_R = 1\text{V}$ (μA)
1N746A	3.3	20	28	110	10	30
1N747A	3.6	20	24	100	10	30
1N748A	3.9	20	23	95	10	30
1N749A	4.3	20	22	85	2	30
1N750A	4.7	20	19	75	2	30
1N751A	5.1	20	17	70	1	20
1N752A	5.6	20	11	65	1	20
1N753A	6.2	20	7	60	0.1	20
1N754A	6.8	20	5	55	0.1	20
1N755A	7.5	20	6	50	0.1	20
1N756A	8.2	20	8	45	0.1	20
1N757A	9.1	20	10	40	0.1	20
1N758A	10	20	17	35	0.1	20
1N759A	12	20	30	30	0.1	20

△ Fig.3.7 | Datasheet zenerdioden 1N7xx-reeks.
Bron: General Semiconductor

3.3.5 Belaste zener

De bedoeling is duidelijk: over een belasting R_L ^[7] wens ik een zo stabiel mogelijke spanning van plusminus 5V. De belasting bezit een weerstandswaarde van 250Ω en zal dus bij benadering 20mA onttrekken uit de schakeling van figuur 3.8 als schakelaar S sluit. (Reken na!) Eerder kozen we reeds zener 1N751A om deze klus te klaren. We gaan ook gebruik maken van zijn karakteristiek die wat verderop staat afgebeeld. Opnieuw stellen we ons de vraag: welke voorschakelweerstand moet ik voor deze situatie kiezen?



△ Fig.3.8 | Belaste zener: belasting uitgeschakeld.
Bron: W. Van Wichelen

Voorbeeld

GEGEVENS

- De onstabiele bronspanning: $9V < U_B < 11V$
- De referentiespanning: $U_{REF} = ca. 5V$
- Wanneer we S sluiten belasten we de zener met 250Ω
- Stroom door belasting: $I_L = 20mA$ (wet van Ohm)

STAP 1

We stellen de ruststroom I_{Zrust} in op 20mA (zie eerder)
De spanningsval over R_v bepaalden we reeds: $U_{Rv} = 4,9V$
Wat is de stroom door R_v wanneer we S sluiten (fig.3.9)?

$$\begin{aligned} I_{Rv} &= I_{Zrust} + I_L \\ &= 20mA + 20mA = 40mA \end{aligned}$$

[7] De index 'L' staat voor het Engelse 'load': 'last' in de Nederlandse taal.

STAP 2

We kennen de totaalstroom door R_V en bepalen via de wet van Ohm zijn theoretische waarde:

$$R_V = \frac{U_{R_V}}{I_{R_V}} = \frac{4900mV}{40mA} = 122,5\Omega$$

STAP 3

We kiezen een praktische waarde voor R_V uit de E-12-reeks: $R_V = 120\Omega$

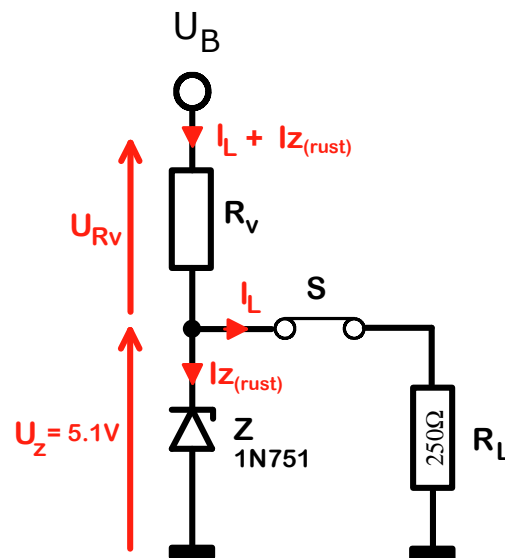
Kleurcode: bruin-rood-bruin-goud

STAP 4

Minimale dissipatievermogen:

$$\begin{aligned} P_{R_V} &= U_{R_V} \times I_{R_V} \\ &= 4.9V \times 40mA \\ &= 196mW \end{aligned}$$

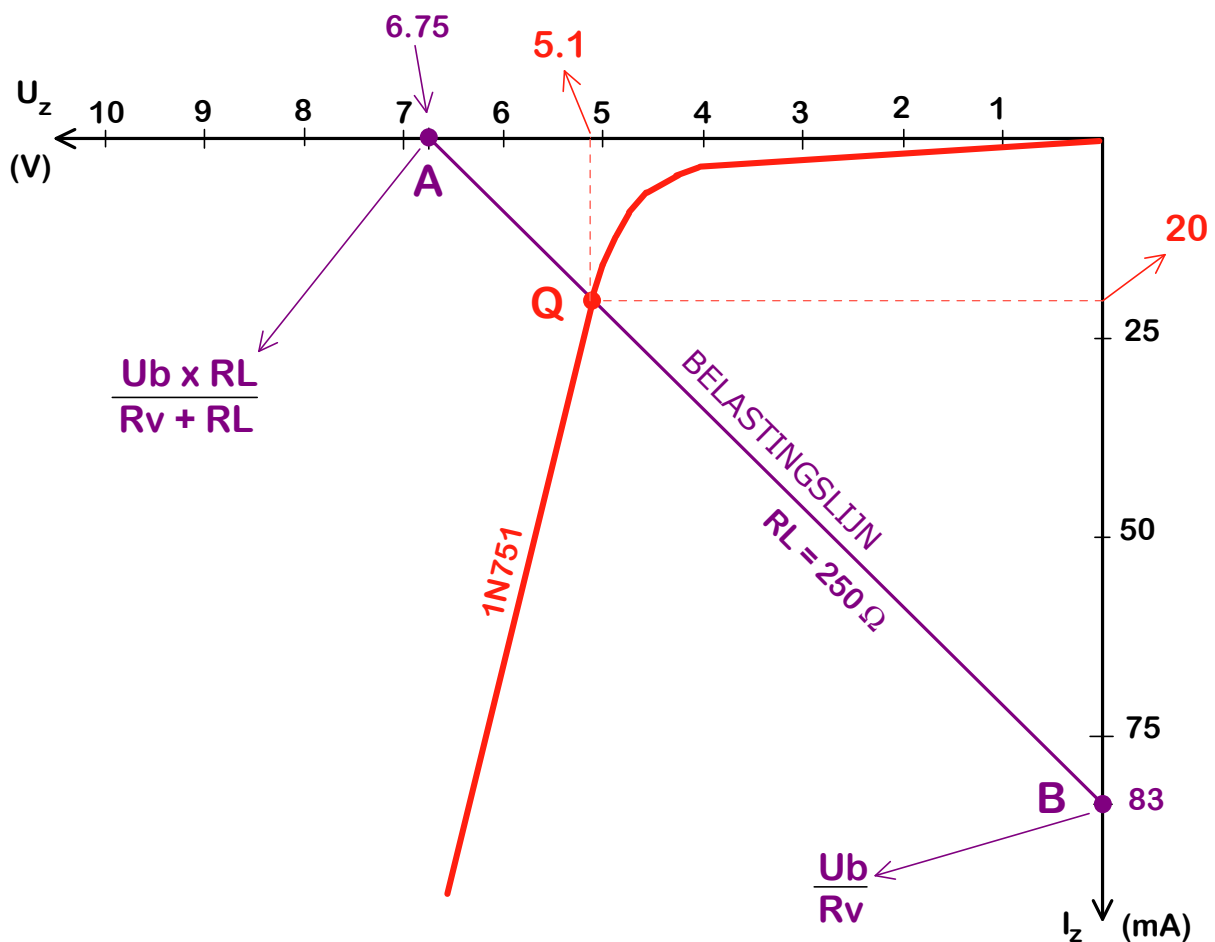
Een koolweerstand van 1/4 watt (250mW) voldoet prima!



△ Fig.3.9 | Belaste zener: belasting ingeschakeld.
Bron: W. Van Wichelen

3.3.6 Grafische controle van het instelpunt

Dus, met een voorschakelweerstand van 120Ω zou dit handeltje perfect moeten functioneren! Stel nu dat ik een zeer sceptische leerling ben die dit hele zaakje niet vertrouwt. Kunnen we die leerling nu overtuigen dat er wel degelijk om en bij de 5V staat over de belasting? Ja, natuurlijk. Er bestaat een manier om **grafisch** het instelpunt Q te bepalen. Je moet dan wel beschikken over de U_Z/I_Z -karakteristiek (fig.3.10) van de toegepaste zener. Laten we dus eens controleren of er daadwerkelijk een spanning van 5V over de belastingsweerstand staat en alzo hopen dat het wantrouwen van onze sceptische leerling ongegrond was...



△ Fig.3.10 Grafische controle van het instelpunt Q.
Belasting is 250Ω
Bron: W. Van Wichelen

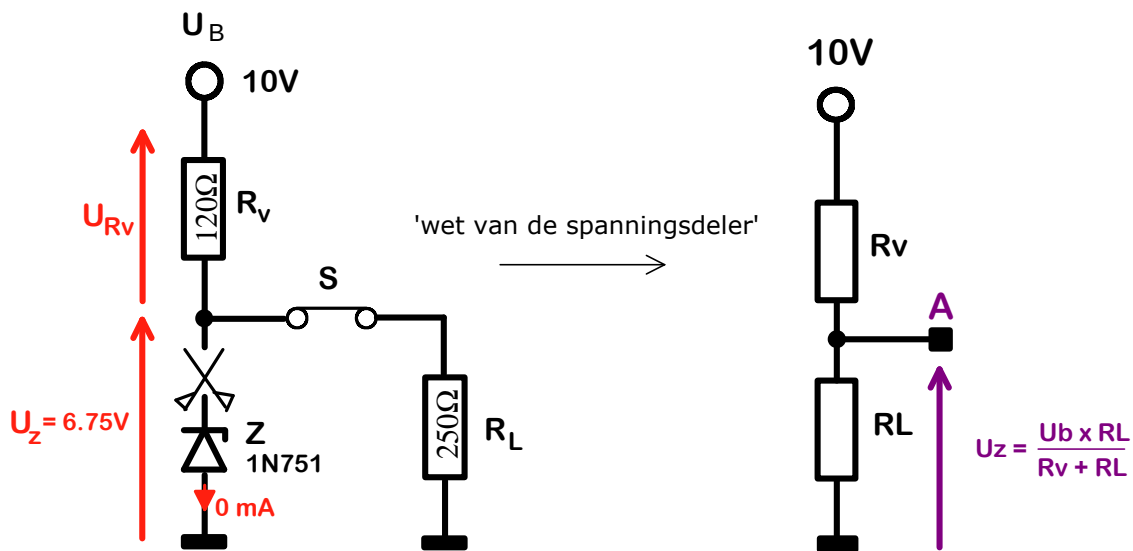
Hoe gaan we nu te werk? Het komt er kort gezegd op neer dat we een **belastingslijn** (lijnstuk AB) moet construeren bovenop de zenerkarakteristiek van figuur 3.10. Alle mogelijke instelpunten bevinden zich nu op deze belastingslijn. Het snijpunt met de zenergrafiek is dan het enige echte instelpunt Q!

Voorbeeld

BEPALEN PUNT A

We bepalen het snijpunt met de U_Z -as door de stroom door de zener I_Z gelijk te stellen aan nul. Daartoe knippen we één van de klemmen van de zener los, en bijgevolg kan er geen stroom meer doorheen vloeien. (Zie figuur 3.11.) We berekenen de spanning op punt A via de fameuze spanningsdeler-wet:

$$\begin{aligned} U_{Z(A)} &= \frac{U_B \times R_L}{R_V + R_L} \\ &= \frac{10V \times 250\Omega}{120\Omega + 250\Omega} \\ &= 6,75V \end{aligned}$$

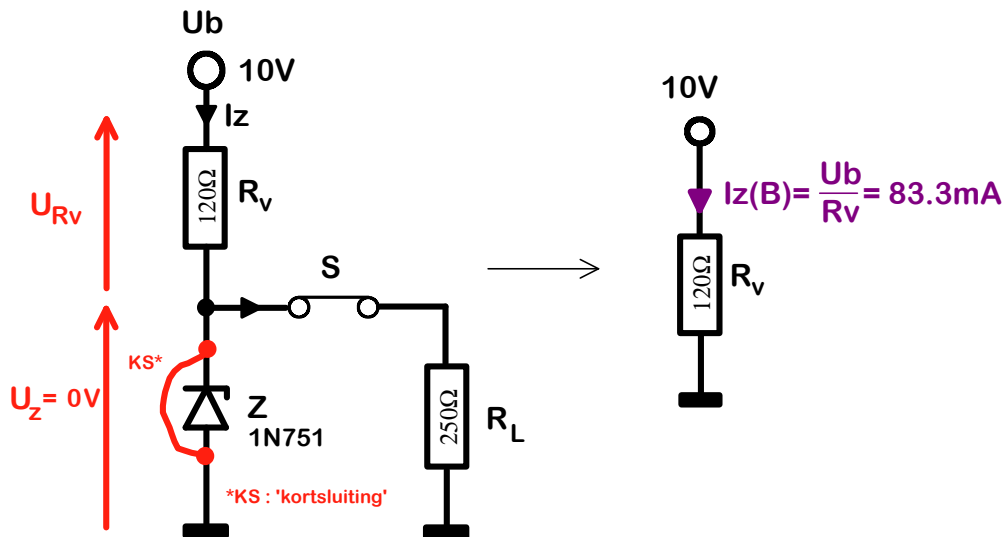


△ Fig.3.11 Constructie van de belastingslijn.
Bepaling van punt A.
Bron: W. Van Wichelen

BEPALEN PUNT B

We bepalen het snijpunt met de I_Z -as door de spanning over de zener U_Z gelijk te stellen aan nul. Daartoe sluiten we de zener kort (fig.3.12). Over een kortsluiting staat immers altijd 0V! Stroom kiest altijd de gemakkelijkste weg: I_Z kiest resoluut voor de kortsluiting. Deze kortsluitstroom wordt enkel beperkt door R_V . We berekenen deze stroom (punt B) via de wet van Ohm:

$$\begin{aligned} I_{Z(B)} &= \frac{U_B}{R_V} \\ &= \frac{10000mV}{120\Omega} = 83,3mA \end{aligned}$$



△ Fig.3.12 Constructie van de belastingslijn.
Bepaling van punt B.
Bron: W. Van Wichelen

Het zener-instelpunt kan zich enkel op de belastingslijn bewegen. Tevens voldoen zener spanning en zener stroom aan alle punten van de zener karakteristiek. Om te kunnen beantwoorden aan deze twee voorwaarden vinden we het rustpunt Q door het **snijpunt** van de karakteristiek met de belastingslijn te zoeken (fig.3.10). We lezen af dat onze zener zich instelt bij: $I_{Z(rust)} = 20\text{mA}$ en $U_{Z(rust)} = 5,1\text{V}$.

We kunnen concluderen dat de sceptische leerling zijn wantrouwen ongegrond was. Over de belastingsweerstand van 250Ω staat mooi de vooropgestelde 5V !

3.3.7 Stabilisatiemechanisme

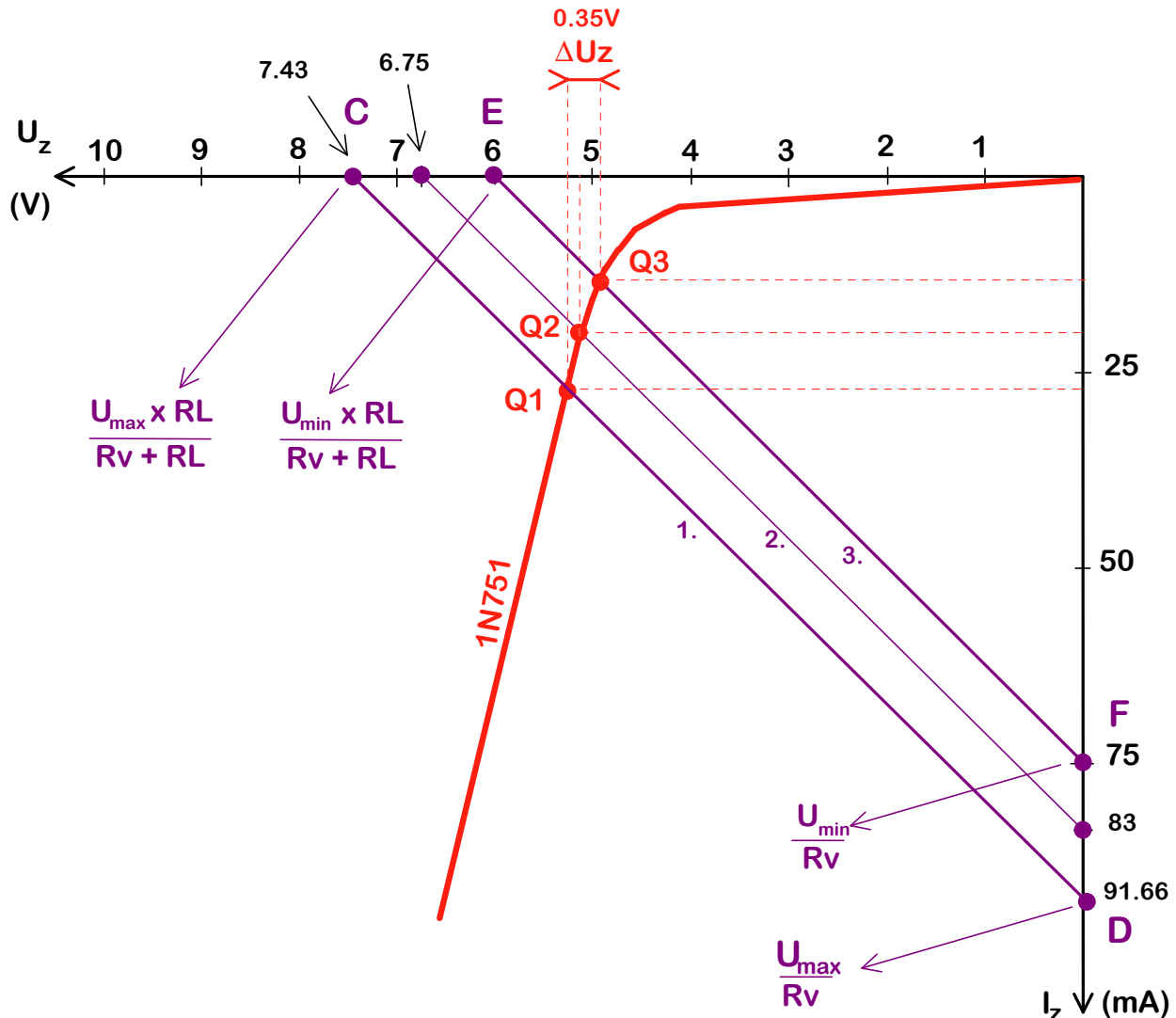
Eerder stipten we aan dat zenerdioden vooral ingezet worden als spanningsstabiliserend element. Hoe zit het nu eigenlijk met die stabilisatiewerking? De bronspanning U_B is niet erg stabiel: ze schommelt tussen $U_{MAX} = 11\text{V}$ en $U_{MIN} = 9\text{V}$. De rimpelspanning ΔU_B is dan $2V_{ptp}$.^[8] Laten we dit nu procentueel bekijken:

$$\begin{aligned}\Delta U_B \% &= \frac{\Delta U_{B(ptp)}}{U_{B(nom)}} \times 100\% \\ &= \frac{2V}{10V} \times 100\% = 20\%\end{aligned}$$

Hoe groot is nu de procentuele rimpel over R_L ?

[8] De index 'ptp' staat voor het Engelse 'peak to peak'. In Nederlandstalige vakliteratuur kom je soms de index 'ttt' tegen wat dan staat voor 'top tot top'.

Vooraleer we de rimpelspanning ΔU_Z kunnen aflezen dienen we eerst twee bijkomende belastingslijnen (1,3) te tekenen. Figuur 3.13 toont hoe je aan de snijpunten C, D, E en F komt. Teken de belastingslijnen door de juiste punten met een lijn te verbinden en bepaal vervolgens de nieuwe instelpunten Q_1 en Q_3 .



△ Fig.3.13 Constructie van de bijkomende belastingslijnen. Bepaling van de punten C, D, E en F. Bron: W. Van Wichelen

BEPALEN RIMPELSPANNING ΔU_Z

$$\Delta U_Z = U_{Z(Q1)} - U_{Z(Q3)} = 5,25V - 4,9V = 0,35V_{\text{ptp}}$$

BEPALEN PROCENTUELE RIMPELSPANNING $\Delta U_{Z\%}$

$$\begin{aligned} \Delta U_{Z\%} &= [\Delta U_{Z(\text{ptp})} / U_{Z(\text{nom})}] \times 100\% \\ &= [0,35V_{\text{ptp}} / 5,1V] \times 100\% = \mathbf{6,8\%} \end{aligned}$$

Conclusie

Een zenerdiode is een **stabiliserend** element: een voedingsspanning met een rimpel van 20% werd immers omgezet in een spanning over de belasting waarvan de rimpel verminderd is tot slechts 6,8%. De spanning over de belasting is bijgevolg gestabiliseerd.

We kunnen deze spanning dus beschouwen als een stabiele **referentiespanning**. Vele elektronische circuits worden via zenerdioden op deze eenvoudige manier voorzien van zulke referentiespanningen.

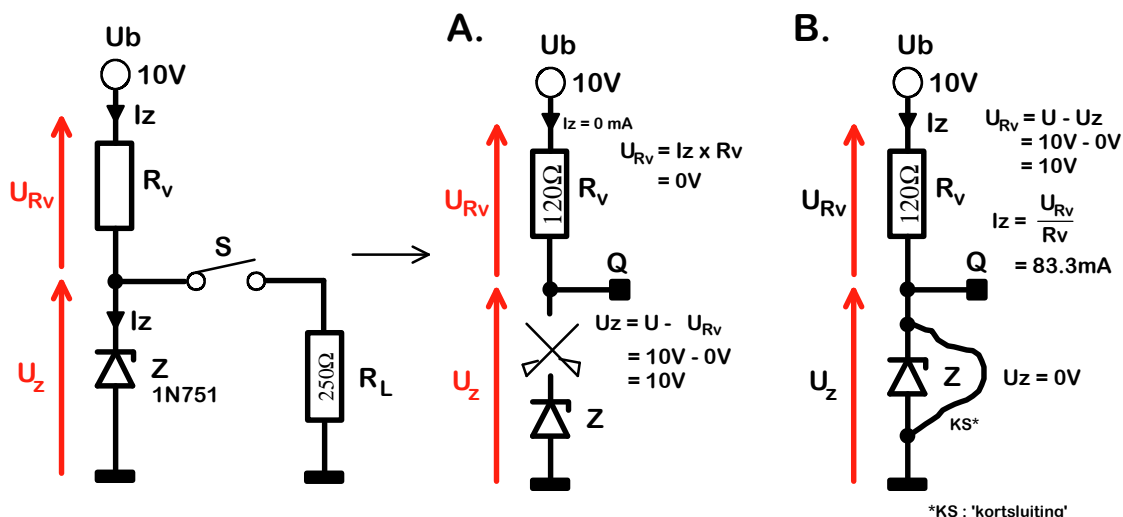
3.3.8 Effect bij wisselende belasting

Hoe gedraagt de schakeling zich nu bij wisselende belasting? We onderzoeken 3 situaties :

1. de zener wordt niet belast
2. de zener wordt belast met 250Ω
3. de zener wordt belast met 120Ω

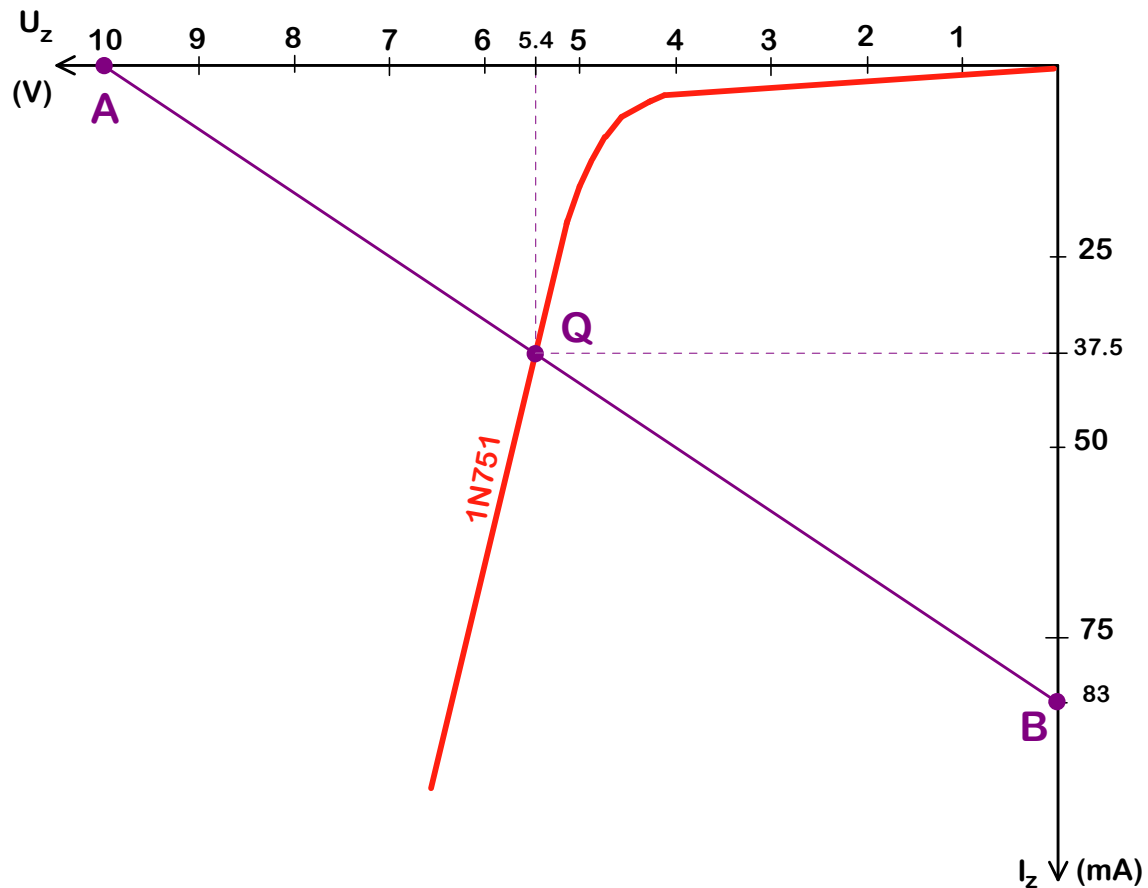
Voor elke situatie bepalen we het rustpunt Q.

1. ZENER WORDT NIET BELAST



△ Fig.3.14 | Situatie bij nullast.
Bron: W. Van Wichelen

We openen schakelaar S zodat de zener opereert bij **nullast**. De belasting wordt nu immers afgekoppeld. In situatie A bepalen we het snijpunt met de U_Z -as: het punt 'A'. In situatie B bepalen we het snijpunt met de I_Z -as en dit levert ons punt B. We bepalen (op de onderhand wel al bekende manier) het rustpunt Q:



△ Fig.3.15 | Constructie van de belastingslijn bij nullast.
Bron: W. Van Wichelen

We bemerken in figuur 3.15 dat het rustpunt via de belastingslijn opgeschoven is naar links. De zenerspanning en de zenerstroom zijn blijkbaar toegenomen. Het vermogen P_Z dat de zener nu te verwerken krijgt in het nieuwe rustpunt bedraagt:

$$P_{Z(\text{onbelast})} = 37,5\text{mA} \times 5,4\text{V} = \mathbf{202,5\text{mW}}$$

Laten we even de vermogensdissipatie^[9] berekenen wanneer we de zener belasten met 250Ω (zie figuur 3.10):

$$P_{Z(RL=250\Omega)} = 20\text{mA} \times 5,1\text{V} = \mathbf{102\text{mW}}$$

[9] Vermogensdissipatie: de mate waarin de elektronische component de stroom omzet naar onproductieve warmte als gevolg van het gekende joule-effect.

Conclusie

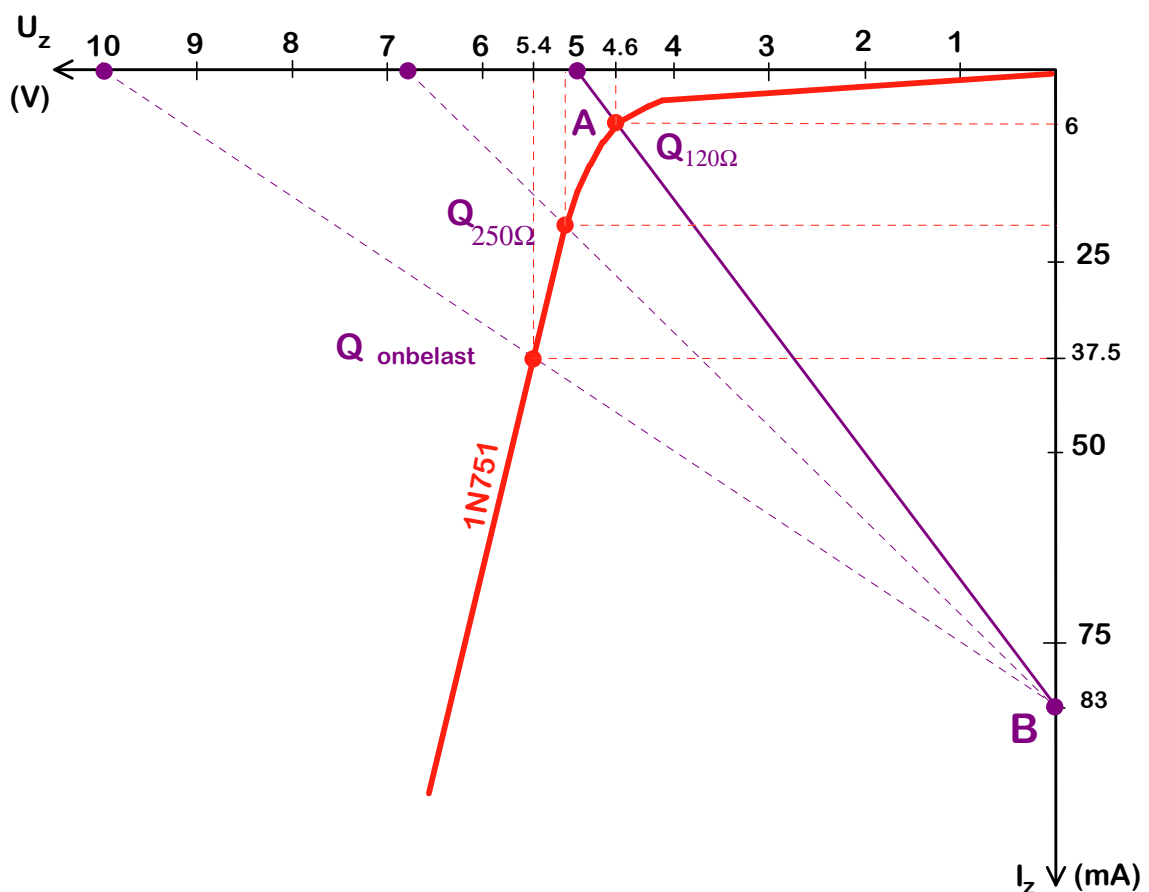
Het zenervermogen is praktisch verdubbeld wanneer we de schakelaar openen! In de praktijk zullen we dus moeten oppassen dat het vermogen dat de zener te verwerken krijgt niet de maximum waarde overschrijdt. De fabrikant geeft een maximum op van 500mW, dus we zitten nog veilig. Een zenerdiode houdt er dus van belast te worden. *Vind je deze 500mW terug in de datasheets?*

2. ZENER WORDT BELAST MET 250Ω

Deze situatie is eerder al uitvoerig uit de doeken gedaan!

3. ZENER WORDT BELAST MET 120Ω

Op de ons vertrouwde manier vinden we twee nieuwe snijpunten met de assen. We lezen het nieuwe instelpunt af op de grafiek van figuur 3.16:



△ Fig.3.16 Constructie van de belastingslijn bij $R_L = 120\Omega$.
Bron: W. Van Wichelen

We kunnen nu een meer algemeen besluit trekken. Bij toenemende belasting zien we dat de belastingslijn opschuift naar rechtsboven. Het instelpunt Q verschuift mee via de karakteristiek richting oorsprong. Hoe meer we de zener belasten, hoe minder vermogen er moet gedissipeerd worden. We mogen echter niet overdrijven. Vanaf een bepaalde belastingssituatie begint de zenerspanning serieus af te nemen en kunnen we niet meer spreken van een stabiele referentiespanning van 5V. De belastingsweerstand mag dus niet te klein zijn: de waarde ervan is begrensd.

Conclusie

In praktijk kunnen we het besproken stabilisatiecircuit enkel gebruiken voor **beperkte** vermogens. De belastingsstroom mag dus niet te groot zijn.

Vuistregel

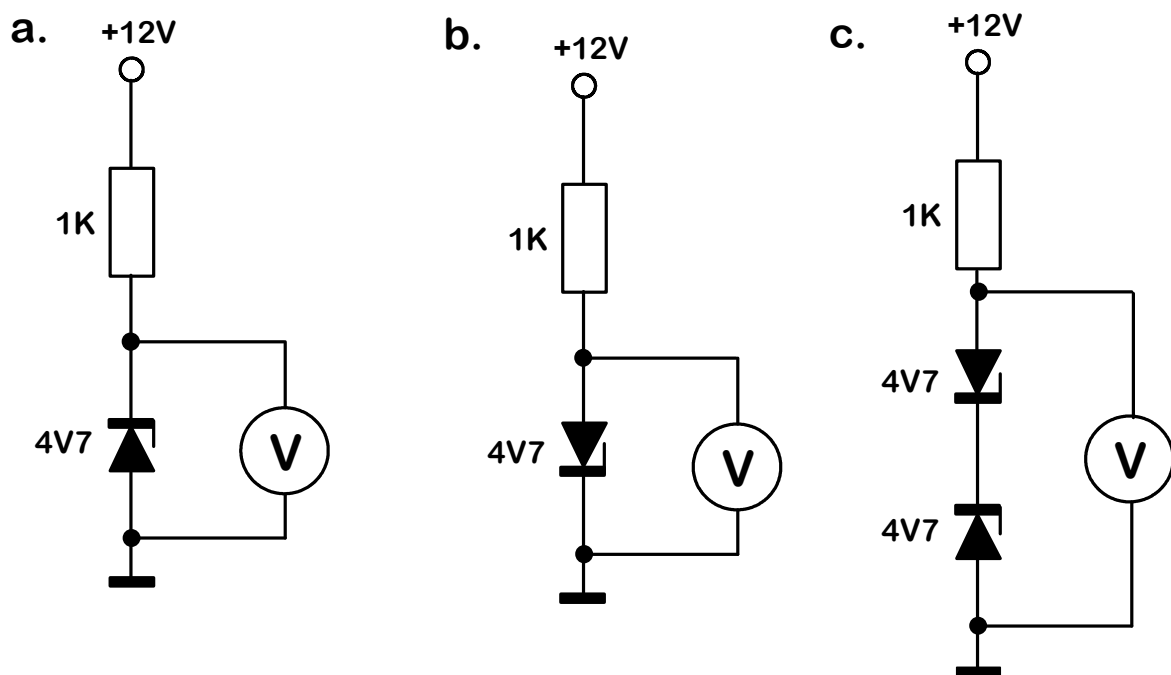
Bij het ontwerpen van een eenvoudige zenerstabilisatie houden we ons het best aan volgende afspraak:

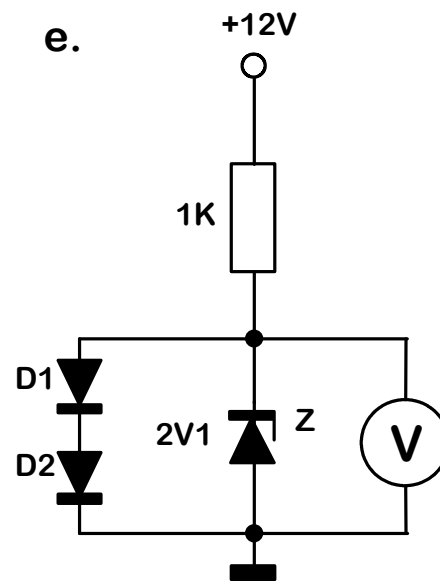
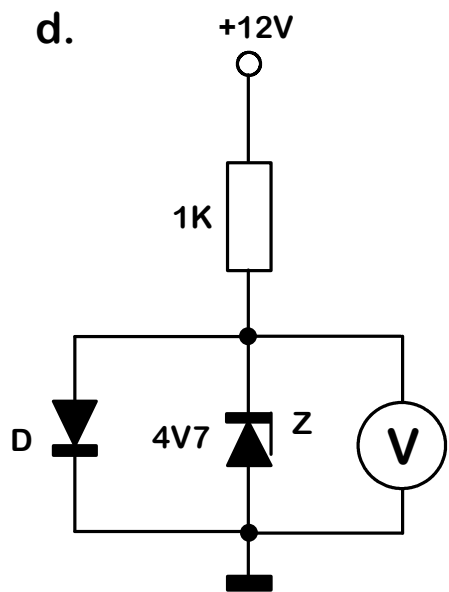
$$I_{L(max)} \leq I_{Z(rust)}$$

3.4 Oefeningen

3.4.1 Reeks 1

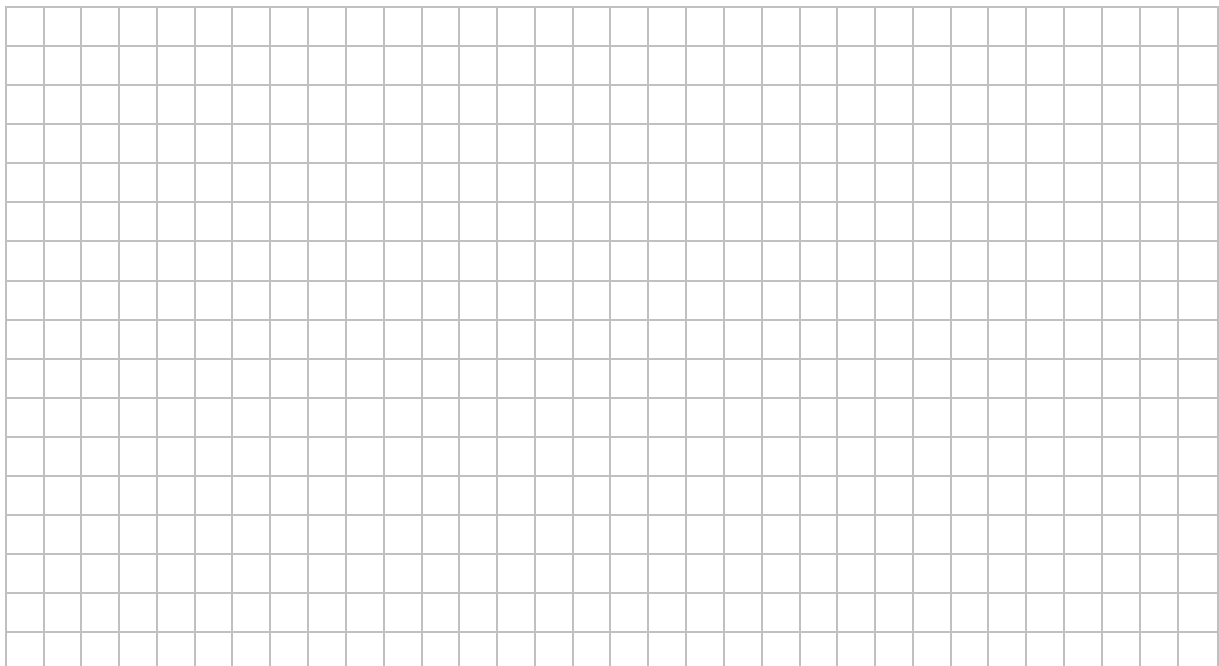
Bepaal telkens de meteruitslag van de voltmeter!



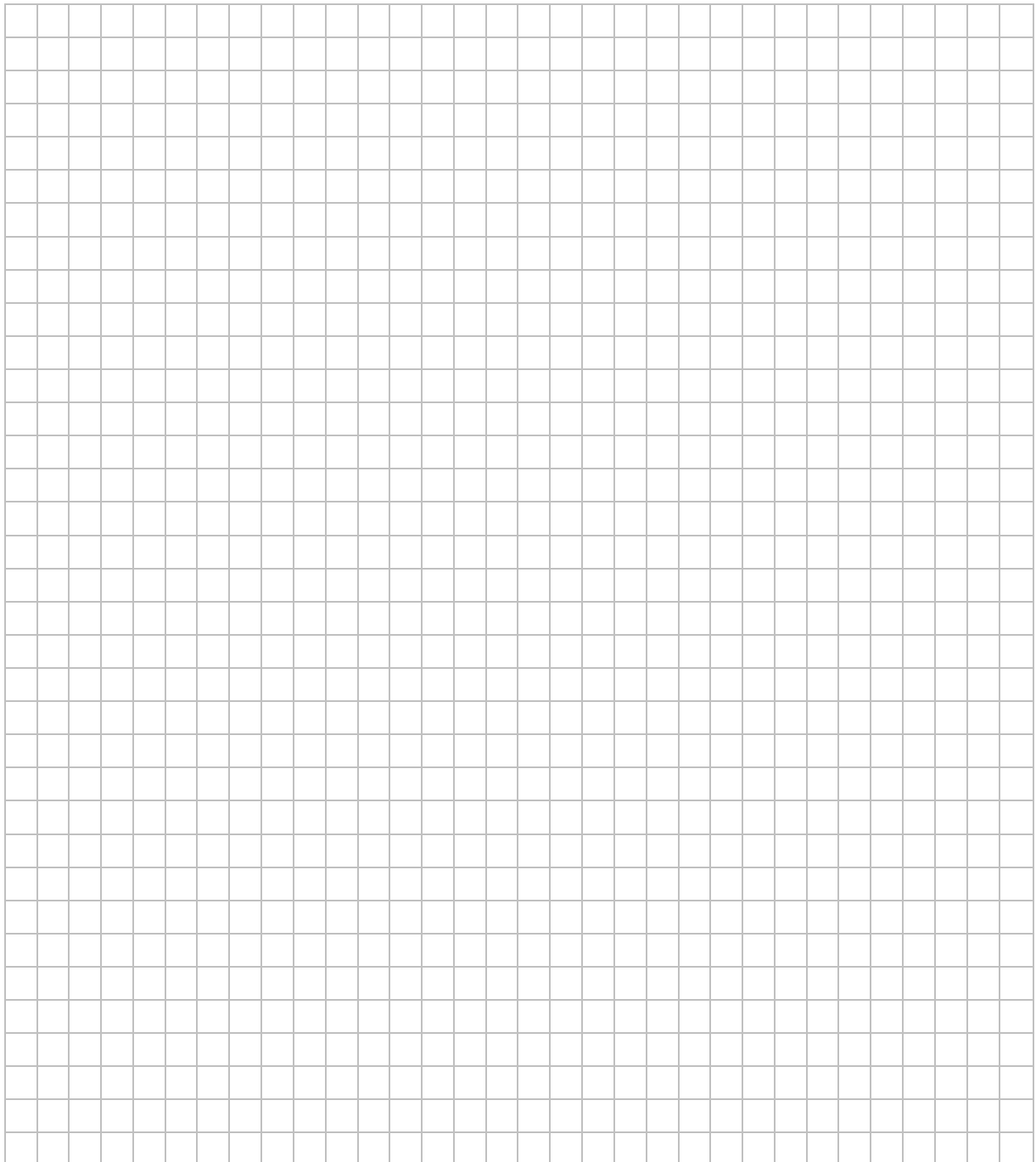


3.4.2 Reeks 2

1. Ik beschik over een zenerdiode met een zenerspanning van 5,1V. De voedingsspanning is 12V. Voorzie een ruststroom van 20mA.
 - a. Teken het schema;
 - b. Bereken de voorschakelweerstand;
 - c. Kies een waarde uit de E12-reeks;
 - d. Bepaal de kleurencode;
 - e. Bepaal de vermogendissipatie in de zener;
 - f. Bepaal de vermogendissipatie in de voorschakelweerstand.



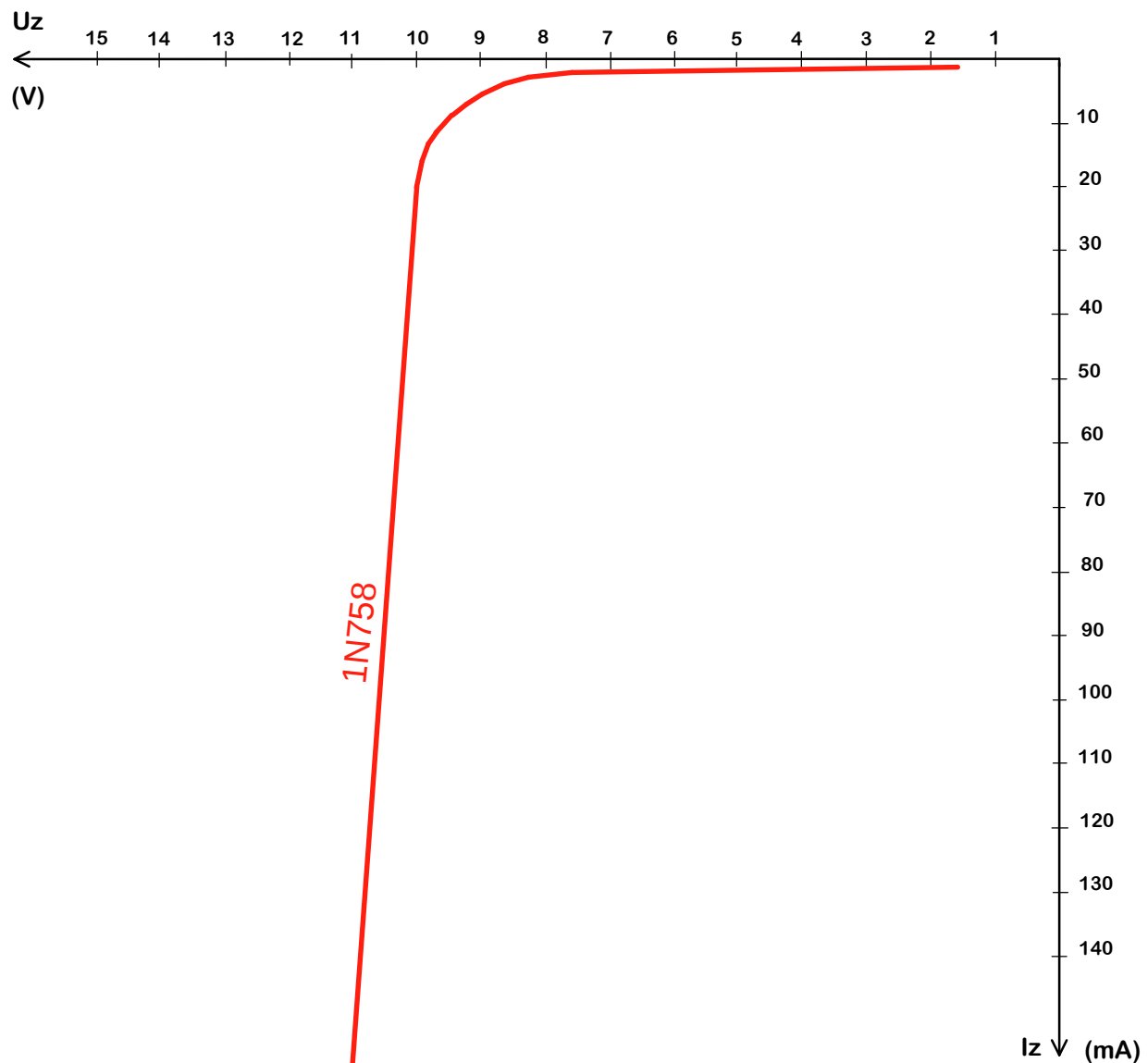
2. Ik wil een referentiespanning maken van 10V.
De voedingsspanning is 24V. Voorzie een ruststroom van 15mA.
- Teken het schema;
 - Kies een zener uit de BZX-reeks m.b.v. 'datasheets';
 - Bereken de voorschakelweerstand;
 - Kies een waarde uit de E12-reeks;
 - Bepaal de kleurencode;
 - Bepaal de vermogendissipatie in de zener (P_Z);
 - Zoek het maximaal dissipeerbaar vermogen ($P_{Z(MAX)}$) op;
 - Bepaal de vermogendissipatie in de voorschakelweerstand (P_{RV}).

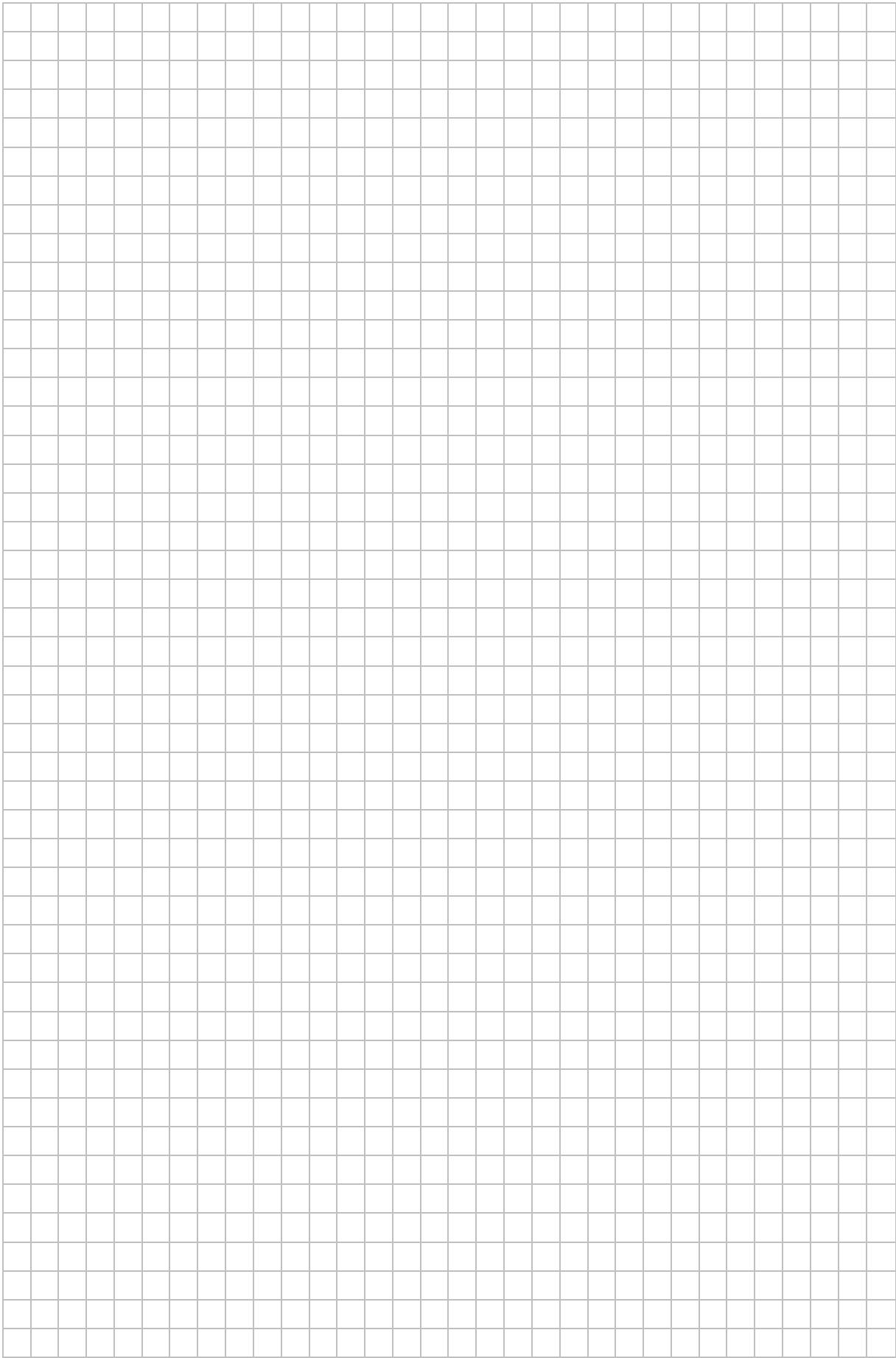


3.4.3 Reeks 3

Over een belastingsweerstand van $1\text{k}\Omega$ wens ik een referentiespanning van 10V . De gemiddelde voedingsspanning is 15V_{nom} . De rimpel bedraagt 3V_{ptp} . Maak gebruik van de datasheet van figuur 3.7. en de onderstaande zenerkarakteristiek.

- Bepaal tevens de rimpel (%) van de voedingsspanning.
- Bepaal de rimpelspanning (%) over de belasting.
- Bepaal het instelpunt van de zener bij het maximaal dissipeerbaar vermogen. Construeer hiervoor een *dissipatiehyperbool*.
- Bepaal het instelpunt wanneer de belasting wegvalt (bij nominale voedingsspanning)
- Bepaal het instelpunt bij de maximale en minimale voedingsspanning. (belasting is $1\text{k}\Omega$)





4 | Elektronica componenten

Light emitting diode



4.1 Toepassingsgebied

4.1.1 Definitie

Sommige dioden bezitten de mogelijkheid om elektrische energie om te zetten in lichtenergie. De **led**, voluit '**Light Emitting Diode**' ofwel: 'licht uitzendende diode', vormt een elektrische stroom om naar **zichtbaar** licht of **infra-rood** licht.

Definitie

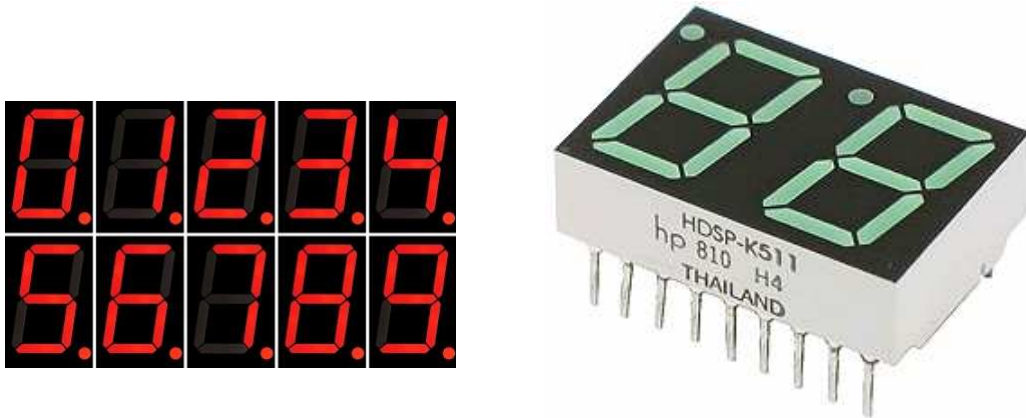
Een **led** is een elektronische halfgeleidercomponent die licht uitzendt als er een elektrische stroom in de **doorlaat-richting** doorheen wordt gestuurd.

4.1.2 Gebruik bij displays en interfaces

Vroeger (rond 1980) werden leds voornamelijk toegepast bij uitlezingen en signalisatie. Typische toepassingen waren het **7 segments display** en een **rode led** als controlelampje. Nu worden leds ook ingezet als **lichtbron**. Ze vormen vandaag een volwaardig alternatief voor klassieke gloeilampen en halogeenspots. Om kwetsbare stuelelektronica galvanisch te scheiden van randapparatuur maakt men dikwijls gebruik van **opto-couplers**. Een optische koppeling bestaat in principe uit een **infrarood-led** en een lichtgevoelige schakelcomponent (fototransistor).



△ Fig.4.1 | Typische led-package.
Bron: World Wide Web



△ Fig.4.2 | 7-segmentsdisplay.
Bron: World Wide Web

4.2 Werking

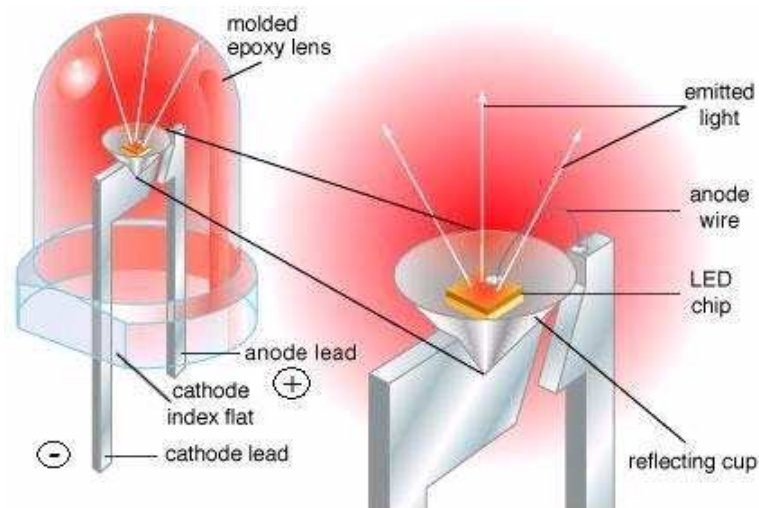
4.2.1 Fotonen-energie

Wanneer een elektron terugkeert van de geleidingsband naar de valentieband verliest het energie. Dit gebeurt nadat het elektron eerst energie heeft ontvangen door een oorzaak van buitenaf, bv. een elektrische potentiaal. Alles in de natuur streeft immers naar een zo laag mogelijke energie-inhoud. Bij **siliciumdiodes** (Si) gebeurt deze energie-afgave in de vorm van **warmte**.

Bij **gallium-arsenidediodes** (Ga-As) komt deze energie vrij in de vorm van **fotonen** (licht). De lichtintensiteit is evenredig met de mate van recombineren binnen de keerlaag van de PN-junctie. Of anders gesteld: hoe groter de diode-stroom hoe meer fotonen er worden vrijgegeven.

4.2.2 Infra-rood en zichtbaar licht

De Ga-As diode zendt licht uit met een bepaalde golflengte. Deze golflengte zit dicht bij de **infrarood band** en bijgevolg kunnen we dit licht niet met mensenogen zien. Om zichtbaar licht te kunnen produceren worden de Ga-As-junctie gedopeerd met galliumfosfide (Ga-P).



△ Fig.4.3 | Constructie van een led.
Bron: World Wide Web

4.2.3 Kleur van het uitgezonden licht

De kleur van het opgewekte licht is afhankelijk van de manier van **doperen** met vreemde materialen. De aard van dopering bepaalt immers de breedte van de **verboden zone** tussen de valentieband en de geleidingsband en alzo ook de **golflengte** van het uitgezonden licht. Tegenwoordig zijn er rode, gele, groene, oranje, blauwe en recent zelfs witte leds op de markt te verkrijgen.

halfgeleider materiaal	golflengte (nm)	kleur	$V_F @ 20 \text{ mA}$
GaAs Gallium Arsenide	850 - 940	infrarood	1,2 V
GaAsP Gallium Arsenide Fosfide	630 - 660	rood	1,8 V
AlGaAsP Allimnium Gallium Asenide Fosfide	605 - 620	amber	2 V
AlGaAsP Allimnium Gallium Asenide Fosfide	585 - 595	geel	2,2 V
AlGaP Alliminium Gallium Fosfide	550 - 570	groen	3,5 V
SiC Silicium Carbide	430 - 505	blauw	3,6 V
GaInN Gallium Indium Nitride	450	wit	4 V

△ Fig.4.4 | Tabel met de verschillende soorten leds.
Bij elke kleur hoort een typische 'forward voltage drop'.
Bron: World Wide Web

4.2.4 Intensiteit van het uitgezonden licht

Door de halfgeleiderconstructie van een led wordt het uitgezonden licht al enigszins gebundeld. Deze bundeling wordt doelbewust vergroot door het kristal in een **reflector** te monteren om een grotere lichtintensiteit te bereiken. De lichtsterkte wordt uitgedrukt in '**mcd**' (**millicandela**) en varieert van 1,6mcd tot meer dan 25.000mcd. Een led van 25.000mcd met openingshoek van 20° straalt een hoeveelheid licht uit van ca. 2,4 lumen. Een klassieke gloeilamp van 100W haalt ca. 1200 lumen. Om een 100W gloeilamp te vervangen zijn dus 500 leds nodig.

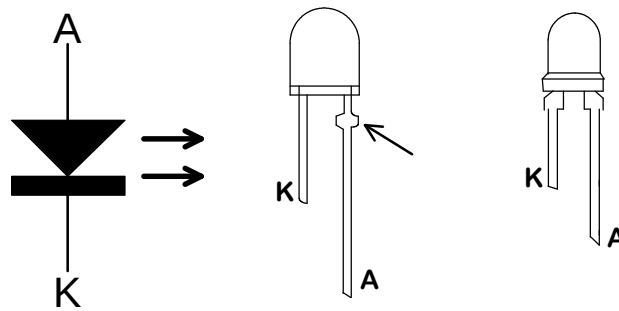


△ Fig.4.5 | Hoge helderheidsled.
Bron: World Wide Web

4.3 Schemasymbool en package

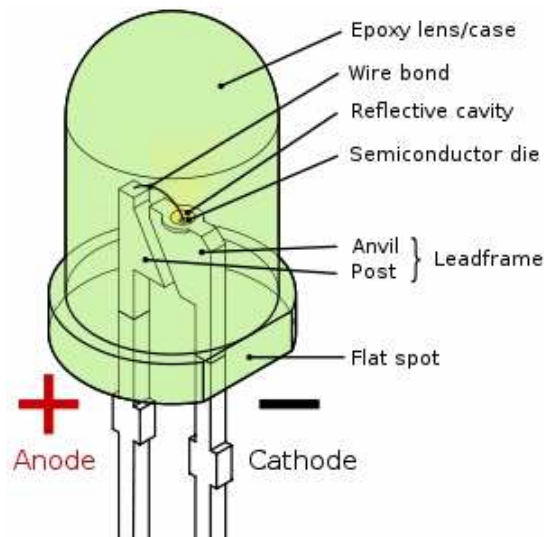
4.3.1 Schemasymbool

Er zijn een paar herkenningpunten om de anode en de kathode van elkaar te onderscheiden. De langste aansluitklem is de anode. De afgeplatte kant van de plastic behuizing is de kathode. Het grootste onderdeel in de led is steeds verbonden met de negatieve aansluiting.



△ Fig.4.6 | Schemasymbool van een led (links).
De pijltjes wijzen op het uitstralen van licht.
Bron: W. Van Wichelen

4.3.2 Package

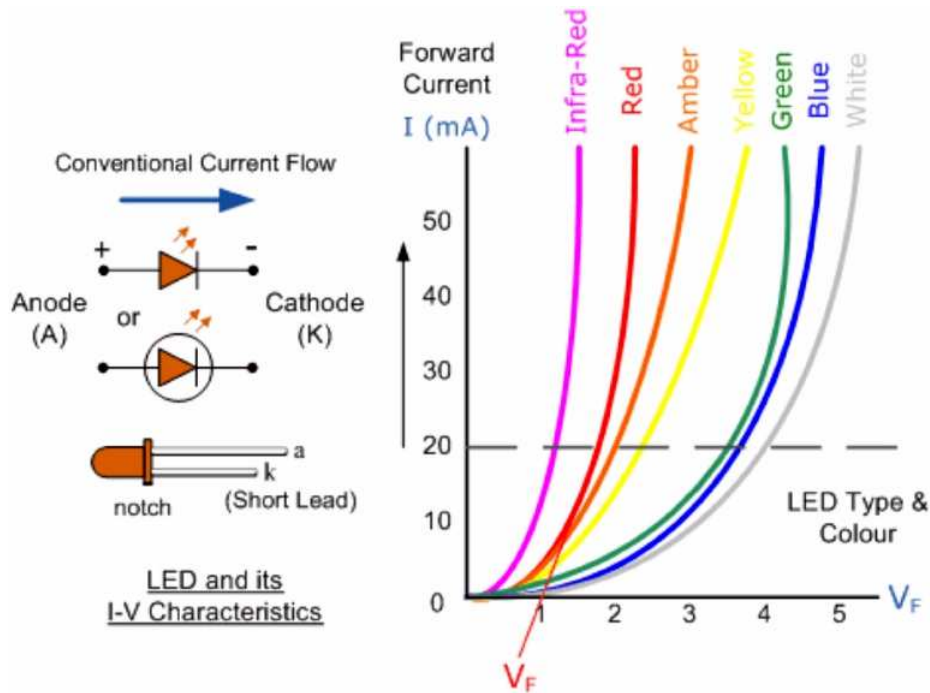


△ Fig.4.7 | Constructie en package van een led.
Bron: World Wide Web

4.4 Karakteristieken

4.4.1 Voorwaartse polarisatie

Wanneer we de anode hoger polariseren dan de kathode en we meten de voorwaartse stroom, dan kunnen we de doorlaatkarakteristiek opnemen. De U_F/I_F -karakteristiek van een led lijkt erg op die van een 'gewone' signaaldiode. Alleen is de kniespanning - afhankelijk van de kleur - gelegen tussen 0,5V en 3V. Figuur 4.8 toont typische doorlaatkarakteristieken van leds voor de verschillende kleuren.



△ Fig.4.8 | Doorlaatcurves van de verschillende led-typen.
Bron: World Wide Web

4.4.2 Beperkte sperspanning

De **doorslagspanning** (U_{BR}) is betrekkelijk laag, meestal tussen de 4V en de 10V. Vergelijk dit met de 'break down voltage' van meer dan 50V bij gewone signaaldiodes en een $U_{BR} = 1000V$ bij gelijkrichterdiodes!

Let op!

- **Doorlaatspanning** van een led:
 $1,2V < U_F < 4V$
- Maximale **sperspanning** van een led:
 $10V > U_{BR} > 4V$

4.5 Ledlampen

4.5.1 Hoge helderheids-LED's

Leds hebben in eerste instantie schaalverlichtingslampjes en controlelampjes vervangen. Door een ontwikkeling die rond het jaar 2000 plaatsvond, kunnen nu ook leds worden geproduceerd met een zeer hoge helderheid, zogenaamde **hoge helderheids-leds**. Hierdoor zijn deze halfgeleiders nu gestaag in opmars om gloeilampen, bijvoorbeeld in verkeerslichten en waarschuwingslichten bij overwegen, te vervangen. Bij residentiële installaties worden halogeenvlampen steeds meer vervangen door deze nieuwe technologie. De eerste exemplaren vielen wat tegen wat de lichtkleur betrof. Het uitgestraalde licht werd eerder als 'koud' ervaren. Tegenwoordig is dit euvel opgelost en stralen ledlampen een even warm wit licht uit als de klassieke gloeilampen.



△ Fig.4.9 | Voorbeelden van ledlampen. Alle fittingen zijn beschikbaar. Gloeilampen met typische edisonfitting kunnen zonder meer vervangen worden.
Bron: World Wide Web

4.5.2 Voordelen

Doordat ledlampen zuinig met elektrische energie omspringen zijn ze een milieuvriendelijk alternatief. We zetten de voornaamste voordelen in vergelijking met de klassieke gloeilamp op een rijtje:

Voordelen

- veel langere **levensduur**
- grote **schokbestendigheid**
- veel geringere **energiebehoefte**
- veel minder **warmte-ontwikkeling**

4.6 Aansturing

4.6.1 Nut van voorschakelweerstand

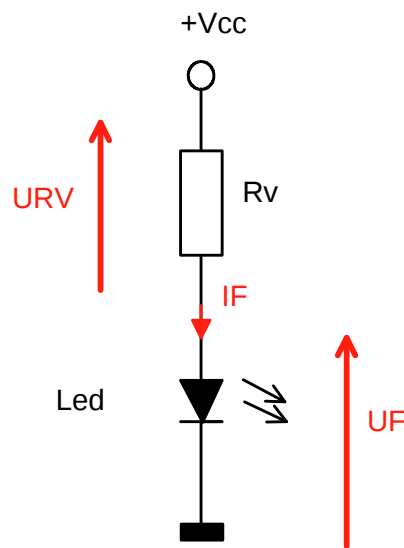
Leds en andere halfgeleiderdiodes zijn interessante componenten omdat er een nagenoeg **constante spanningsval** over de aansluitingen optreedt. Dit is niet het geval bij ohmse weerstanden. Een IR-led gedraagt zich bijvoorbeeld als een superieure zenerdiode van $\pm 1,1\text{V}$. Een led mag daarom nooit zonder meer op een spanningsbron worden aangesloten. Er moet altijd een **stroombegrenzer** aanwezig zijn. Meestal voldoet een eenvoudige **voorschakelweerstand** R_V in serie.

4.6.2 Aansturing bij DC

Om de waarde van R_V te kunnen berekenen in het schema van figuur 4.10 gaan we de hulp inroepen van meneer Ohm. We hebben immers de stroom doorheen R_V en de spanning over R_V nodig om de wet van Ohm te kunnen toepassen. De stroom doorheen R_V is dezelfde als de doorlaatstroom I_F doorheen de led. De spanning over R_V is de voedingsspanning $+V_{CC}$ verminderd met de doorlaatspanning U_F . Dus we kunnen R_V als volgt bepalen:

BEPALEN VOORSCHAKELWEERSTAND (DC-REGIME)

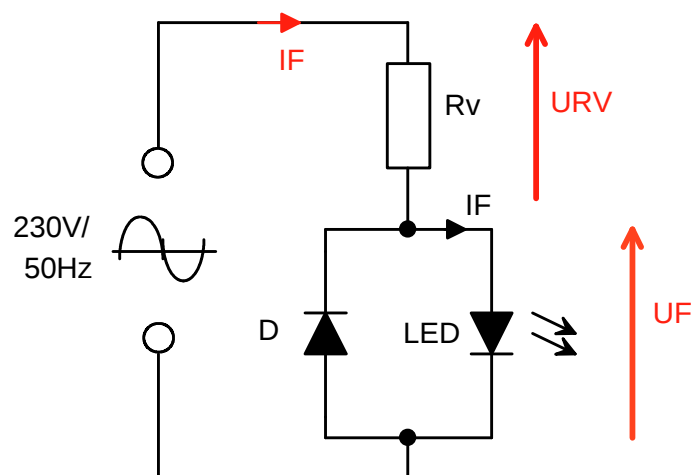
$$R_V = \frac{V_{CC} - U_F}{I_F}$$



△ Fig.4.10 | Bepalen van de voorschakelweerstand op DC-regime.
Bron: W. Van Wichelen

4.6.3 Aansturing bij AC

Een led is - zoals al eerder gezegd - een diode, en dioden laten de stroom maar in één richting door. Prima, dan kun je de serieschakeling van led plus weerstand dus gewoon op een wisselspanning aansluiten, toch? In de ene richting geleidt de led en licht hij op, en in de andere richting wordt de stroom simpelweg niet doorgelaten. Helaas, zo eenvoudig is het niet. Een led is eigenlijk een erg kwetsbare diode: niet alleen is de stroom in de doorlaatrichting meestal beperkt tot enkele tientallen milli-ampères, maar ook mag de spanning in de sperrichting bij voorkeur niet meer dan een paar volt bedragen.



△ Fig.4.11 | Bepalen van de voorschakelweerstand op AC-regime.
Bron: W. Van Wichelen

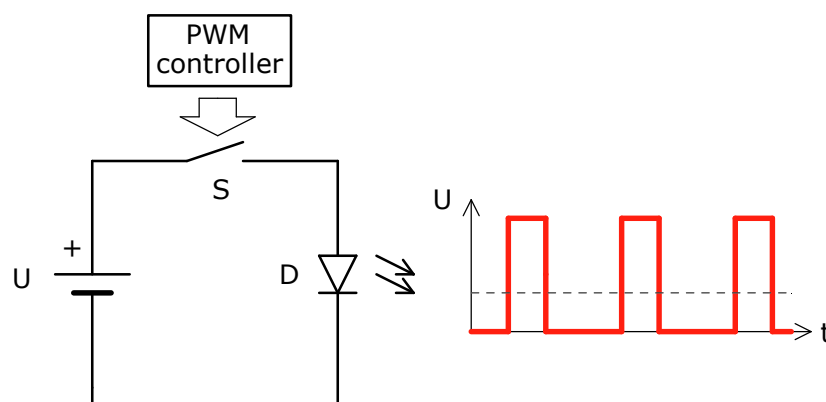
De schakeling van figuur 4.11 heeft het nadeel dat de led de helft van de tijd niet oplicht, namelijk gedurende de negatieve fase van de wisselspanning. Om de led te beschermen tegen te hoge inverse spanningen, plaatsen we er een gelijkrichterdiode parallel over. Let hierbij op de juiste polariteit. De inverse sperspanning wordt hierdoor begrensd tot ca. 0,7V. Overigens kan diode D ook worden vervangen door een extra led. Omdat de led alleen geleidt tijdens de positieve fase wordt de effectieve stroom gehalveerd. De lichtopbrengst zal ook merkbaar lager zijn. Doorheen de voorschakelweerstand vloeit nu een wisselstroom terwijl er door de led een enkelzijdig gelijkgerichte stroom vloeit. Hoewel de stroom 50 maal per seconde gedurende 10ms onderbroken wordt, zal de led - voor het menselijk oog - een flikkervrij licht uitstralen. Wanneer we de spanningsvallen over de led en gelijkrichterdiode verwaarlozen mogen we schrijven:

BEPALEN VOORSCHAKELWEERSTAND (AC-REGIME)

$$R_v = \frac{V_{net(eff)}}{2 \times I_{F(gem)}}$$

4.6.4 PWM-sturing

Om leds te dimmen maken we gebruik van **PWM-stroomsturing**. 'PWM' staat voor 'pulse width modulation' of pulsbreedtemodulatie. Deze sturing steunt op het feit dat een led hoge piekstromen kan verdragen als de effectieve stroom maar de nominale waarde heeft. Deze manier van aansturen is efficiënter dan de aansturing m.b.v. een voorschakelweerstand. Er treden immers minder joule-verliezen (warmte) op. Figuur 4.12 toont het principe. De schakelaar is dikwijls een schakeltransistor.



△ Fig.4.12 | Principe van PWM-sturing.
Bron: W. Van Wichelen

Laboproef 5

Neem van een blauwe led eerst de I_F/U_F -karakteristiek op en bepaal de nominale spanning en stroom waarbij de led de nominale lichtsterkte uitstraalt. Stel daarna de blauwe led in via de juiste voorschakelweerstand R_V . Doe dit voor 3 verschillende bronspanningen.

4.7 Oefeningen

1. Bereken de voorschakelweerstand voor een rode led.
We maken gebruik van een batterij van +9 V.
Rode led: $I_F=10\text{mA}$ @ $U_F=1,7\text{V}$



2. Bereken in onderstaand schema de weerstanden R_1 en R_2 .
 Wat is het nut van deze schakeling?
 Waarom staat D_3 in deze schakeling?
 Groene led: $I_F=20\text{mA}$ @ $U_F=2,3\text{V}$
 Rode led: $I_F=10\text{mA}$ @ $U_F=1,7\text{V}$

