

Duurzame energiestromen

Elektrotechniek

Ing. R.E.M. Groenewegen

Uitgeverij Vertoog
Zuidbaan 540
2841 MD Moordrecht
Tel: 0182-551900
www.vertoog.nl



Eerste druk, 2026
ISBN: 978-94-6374-421-8

Auteur: Ing. R.E.M. Groenewegen
Vormgeving: K. Janse

© Vertoog, Moordrecht, Nederland



Dit werk en al zijn delen inbegrepen, is auteursrechtelijk beschermd. Ieder gebruik buiten de beperkte mogelijkheden die de auteurswet toelaat, is zonder toestemming van de uitgever ontoelaatbaar, illegaal en dus strafbaar.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 het besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het opnemen van gedeelte(n) uit deze uitgaven in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by print, photo-print, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Inhoud

I.	INTRODUCTIE	7
1.	Voorwoord	8
2.	Duurzaamheid	10
2.1	Wat is duurzaamheid met elektrische energie?	11
2.2	Netcongestie	13
2.3	Duurzaamheidsmogelijkheden	15
II.	PV-INSTALLATIES	21
3.	Werking van PV-panelen	22
3.1	Inleiding	23
3.2	Soorten zonnepanelen	24
3.3	Opbouw van PV-paneel	25
3.4	Opbrengst PV-paneel	26
3.5	Gevoeligheid van zonnepaneel	29
3.6	Effect van schaduw of vuil	29
4.	Plaatsing van PV-panelen	32
4.1	Vergunning	33
4.2	Eigendom van de PV-installatie	33
5.	Arbomaatregelen	36
5.1	Risico's	37
5.2	Hijzen	37
5.3	Tillen	39
5.4	Valgevaar	39
5.5	Elektrocutie	40
6.	Rendementsberekeningen	42
6.1	Positie van PV-panelen	43
6.2	Opbrengst	48
6.3	Terugverdientijd	48
7.	Advies over plaatsing	52
7.1	Landscape of portrait	53
7.2	Zonnepanelen op een schuin dak	55
7.3	Zonnepanelen op een plat dak	56
8.	Montage	64
8.1	Voorkomen beschadiging PV-panelen	65
8.2	Montage op schuin dak	65
8.3	Montage op plat dak	69
9.	Tusselopdrachten over hoofdstuk 3 t/m 8	74
10.	Definities PV-installaties	78
10.1	Onderdelen van een PV-installatie	79
10.2	Systeem	80
10.3	Leidingen	81
10.4	Specificaties	81

11.	Installatie DC-zijde	86
11.1	Kabels aan DC-zijde	87
11.2	Doorverbindingen tussen panelen	89
11.3	Optimizers	91
11.4	Strengkabels leggen	94
11.5	Niet te vroeg stekkeren!	95
11.6	Aarding van het draagframe	95
11.7	Leidingdoorvoer door dak	95
12.	De PV-omvormer	98
12.1	Functie omvormer	99
12.2	Werking van de omvormer	100
12.3	Ingebouwde beveiligingen	102
12.4	Keuze van de omvormer	103
12.5	Ventilatie	104
12.6	Aansluiting DC-zijde	104
12.7	Overspanningsafleider aan DC-zijde	104
13.	Installatie AC-zijde	112
13.1	Aansluiting op de groepenkast	114
13.2	Aansluiting op aparte kleine verdeler	117
14.	Grote PV-installaties	122
14.1	Kabeltrace	124
14.2	Kabelberekeningen	125
15.	Oplevering en documentatie	130
15.1	Oplevering	131
15.2	Noodsituatie	132
15.3	Documentatie	132
15.4	Levensduur	132
16.	Veilig werken aan PV-installaties	136
16.1	Spanningsloos maken van een streng	137
16.2	Spanningsloos maken van een omvormer	139
17.	Onderhoud en inspectie	142
17.1	Normen	143
17.2	Visuele inspectie	143
17.3	Metingen	147
17.4	Meting na ingebruikname	153
17.5	Meten met een PV-installatietester	154
17.6	Metingen aan complexe of grote installatie	157
17.7	Schoonmaken van PV-panelen	158
	Opdracht 1: PV-installatie op woonhuis met schuin dak	162
	Opdracht 2: PV-installatie op bedrijfspand met plat dak	166
	Eindopdracht 3: Inspectie PV-installatie	172

III.	BATTERIJ-ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN	177
18.	Batterij-energieopslagsysteem: BEOS	178
18.1	Batterij, accu of cel	179
18.2	Cellen	180
19.	De batterij en de opslag van energie	184
19.1	De batterijcel nader bekeken	185
19.2	Energie in een batterij	186
20.	Samenstel van een BEOS	192
21.	Waarom een BEOS?	198
21.1	Onderdelen van een batterijopslagsysteem	199
21.2	Waarom een batterijopslag gebruiken?	200
21.3	De (te) krappe netaansluiting	202
21.4	Aanpak van peak shaving	203
22.	Eisen PGS 37-1	212
22.1	Risicobeoordeling volgens PGS 37-1	213
23.	De elektrische installatie	222
23.1	De plaatsing van de omvormer en de batterijen	223
23.2	De beveiliging van de AC-kabel in de groepenkast	224
23.3	De AC-kabel van groepenkast naar omvormer	225
23.4	Schakelen en scheiden van de AC-kabel en DC-kabel bij de omvormer	225
23.5	De DC-kabel van omvormer naar batterij	225
23.6	De aarding van omvormer en batterij	225
23.7	Kleine thuisbatterij voor consumenten	226
IV.	LAADPALEN	229
24.	Introductie in elektrische voertuigen	230
25.	Globale opbouw van een elektrische auto	234
25.1	Het elektrisch rijsysteem	235
25.2	Het accupakket	236
25.3	Soorten accu's	237
25.4	Accu-capaciteit	238
25.5	Het accu-oelstelsel	239
25.6	Het laadsysteem	239
25.7	Laadaansluiting	239
26.	Laadpaal	242
26.1	Gelijkspanning of wisselspanning?	243
26.2	Techniek in de laadpaal	244
26.3	Laadaansluiting auto	244
26.4	Aansluiten laadpaal	245
26.5	Groep bijbouwen voor laadpaal	246
26.6	Nieuwe groep plaatsen	246

INKIJKEXEMPLAAR

DEEL I.

INTRODUCTIE

HOOFDSTUK 1.

Voorwoord

INRIKEXEMPLAAR

Voorwoord

Veel elektrotechnici hebben te maken met duurzaamheid in elektrische installaties. Relatief eenvoudige installaties worden hier een stuk complexer van.

Wij hopen met dit boek de lastige materie rondom duurzaamheidsoplossingen inzichtelijk te maken.

Het boek bestaat uit vier delen die te herkennen zijn aan het tabs aan de zijkant van de pagina's. Deze delen zijn:

- Introductie
- PV-installaties
- Batterijenergie-opslagsystemen
- Laadpalen

Moordrecht, augustus 2025

INKLUKEXEMPLAAR

HOOFDSTUK 2.

Duurzaamheid

INRIKEXEMPLAAR

2

In dit hoofdstuk leer je ...

- Wat het begrip duurzaamheid betekent en welke rol elektrische energie daarin speelt
- Waardoor netcongestie ontstaat en welke gevolgen dat heeft voor bedrijven en woningen
- Welke vier stappen genomen kunnen worden om duurzamer met elektriciteit om te gaan
- Hoe een energiemanagementsysteem werkt en welke informatie het gebruikt om slimme keuzes te maken

2.1 Wat is duurzaamheid met elektrische energie?

Het woord *duurzaamheid* wordt in allerlei situaties gebruikt. Maar wat betekent het eigenlijk? Als we het woord 'duurzaam' gaan ontleden, bestaat het uit twee delen: duur en zaam.

- duur komt van op de lange duur, op de lange termijn
- zaam komt van de geschiktheid om iets te doen of te ondergaan

Samengevoegd betekent duurzaam: iets doen om te zorgen dat de wereld op de lange termijn behouden blijft voor de dan levende generaties.

Duurzaamheid heeft op allerlei onderwerpen betrekking. Onder andere uitstoot van chemische processen, woningbouw, voedselzekerheid, afval, ondernemerschap, energievoorziening. In dit lesboek gaat het alleen over het onderwerp elektrische energie.

Duurzaamheid is geen modeverschijnsel, maar een steeds belangrijker deel van ons bestaan. Het is dan ook noodzakelijk om van duurzaamheid de nodige kennis te hebben. Dat maakt het mogelijk om de voordelen en mogelijkheden van duurzaamheid te herkennen en te gebruiken. Duurzaam werken en leven is niet alleen gezond, we kunnen er zelfs geld mee verdienen!



Elektriciteitscentrale

Elektrische energie komt al tientallen jaren van elektriciteitscentrales die worden gestookt met kolen, olie, gas of kernenergie. Pas veel later kwam daar de schone energieopwekking bij: windmolens en zonnepanelen.

De eerste windmolens werden vanaf ongeveer 1980 neergezet, eerst nog verspreid over het land. Al snel werd duidelijk dat de bebouwing, bomen en andere begroeiing op het land een sterke rem is op de windsterkte. Het is veel efficiënter om een windmolen op groot wateroppervlak neer te zetten. Maar dat geeft ook weer allerlei technische problemen. Hoe sla je dan heipalen? Hoe bouw je de windmolen op? Hoe kom je bij zo'n windmolen voor onderhoud? Die problemen werden in de jaren daarna opgelost. In 1996 kwam het eerste windmolenpark in het IJsselmeer en in 2006 het eerste windmolenpark op de Noordzee.

De zonnepanelen die elektriciteit opwekken, werden in 1954 uitgevonden. De eerste toepassing was in de ruimtevaart. Pas veel later werden de zonnepanelen zo goedkoop dat ze ook voor gewone toepassingen gebruikt werden. In 1989 werd het eerste woonhuis in Nederland van stroom voorzien door eigen zonnepanelen. De panelen waren in het begin nog erg duur en het was dan ook voornamelijk een speeltje voor rijke idealisten. De prijs zakte erg snel, omdat vooral in andere landen er steeds meer zonnepanelen gebruikt werden. De fabrieken werden steeds groter en de prijs zakte fors. In 2011 werd in Nederland het eerste zonnepark in bedrijf genomen. Dat was in Ouddorp in Zuid-Holland. Daarna zijn er steeds meer grote zonneparken bijgekomen. Inmiddels worden vrijwel alle nieuwbouwhuizen met zonnepanelen geleverd en hebben ook de meeste bestaande woningen zonnepanelen op het dak liggen.



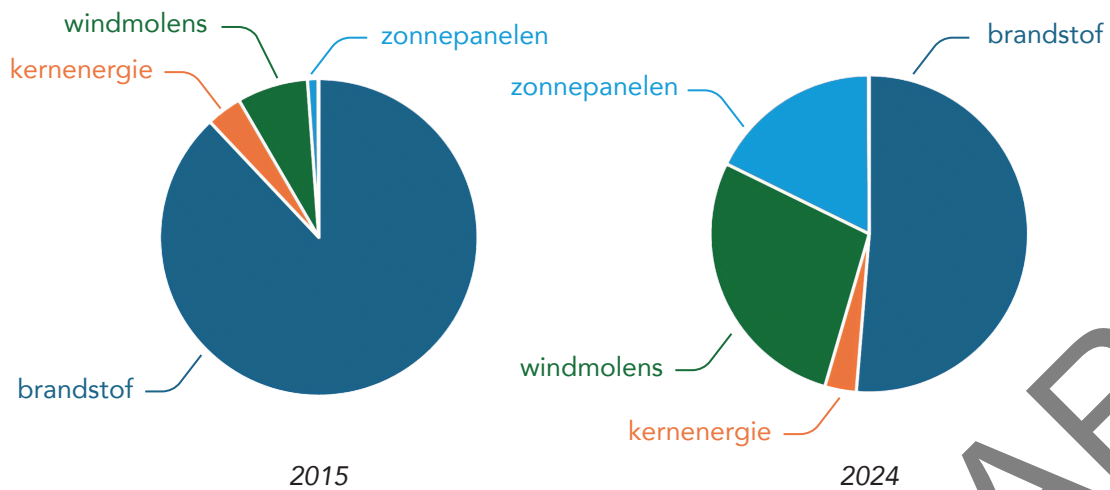
Zonnepark

Hebben die windmolens en zonneparken nu echt invloed op de elektriciteitsproductie in Nederland? Jazeker, deze alternatieve elektriciteitsopwekking is soms al groot genoeg om op bepaalde uren of zelfs dagen het hele elektriciteitsgebruik van Nederland te dekken. Theoretisch zijn dan geen gewone elektriciteitscentrales meer nodig voor de elektriciteitsopwekking. Het nadeel is dat je een elektriciteitscentrale niet gemakkelijk voor een paar uurtjes kunt uitschakelen. Het opstarten van een grote elektriciteitscentrale kan best een uur tot wel acht uur duren. Dat heeft vooral te maken met het gelijkmatig opwarmen van het hele systeem, om te voorkomen dat er scheuren in de procesleidingen en in het stoomvat ontstaan. Een gasgestookte centrale is sneller op te starten dan een centrale die wordt gestookt op biomassa.

Er is nog een tweede reden om grote centrales in bedrijf te houden. De massa van de rotor van de generator is nodig om de netfrequentie stabiel te houden. De massa van de rotor werkt als een vliegwiel. Kleine veranderingen in de opwekking of gebruik leiden dan niet meteen tot een verandering van de netfrequentie. Dit verschijnsel wordt *inertie* genoemd.

Vergelijken we twee jaren met een tussentijd van 10 jaar, dan is een duidelijk verschil te zien in energiebronnen. Over een geheel jaar genomen is het gebruik verdeeld zoals in onderstaande diagrammen te zien is.

Productie	105000	120000
brandstof	92000	61000
kernenergie	3800	3800
windmolens	7550	33000
zonnepanelen	1109	21000
waterkracht	88	88
	104547	118888



2.2 Netcongestie

De nieuwe vorm van elektriciteitsopwekking en het sterk gestegen elektriciteitsgebruik brengen ook nieuwe problemen met zich mee. Die problemen zijn bekend onder de naam *netcongestie*. Netcongestie is geen eenvoudig probleem en er bestaan dan ook geen eenvoudige, snelle oplossingen voor.

Congestie betekent ophoping, verstopping of overbelasting. Netcongestie betekent dus dat het elektriciteitsnet overbelast is, of dat er door de al aanwezige belasting niets meer bij kan (volbelast).

Er zijn diverse factoren die ertoe hebben geleid dat ons elektriciteitsnet volbelast is. Ten eerste is ons elektriciteitsgebruik door de jaren heen steeds gegroeid. Het begon al met steeds meer elektrische apparatuur, zoals een wasdroger en een vaatwasser. Vervolgens kwamen de dubbele oven, elektrisch koken, de laadpaal en de warmtepomp erbij. Daarbovenop kwam de trend om op elk dak zonnepanelen te leggen. Het ene moment gebruiken we meer elektriciteit dan ooit tevoren, maar op een ander moment leveren we maximaal vermogen terug. Bij het terugleveren is het probleem dat alle huizen in de straat op hetzelfde moment dat maximale vermogen willen terugleveren. Op zulke grote vermogens zijn de kabels in de straat en de transformator in de buurt niet berekend.



De kabels en transformator zijn berekend op gemiddeld 1,5 kW tot 2 kW per huis. Als iedereen in de straat zonnepanelen heeft, kan het vermogen best oplopen naar 2 kW tot 5 kW per huis. Voor een deel is dat op te lossen door transformatoren van hoger vermogen te plaatsen, maar er zullen ook meer transformatorhuisjes geplaatst moeten worden en meer kabels gelegd moeten worden. Het plaatsen van transformatorhuisjes geeft regelmatig problemen omdat bewoners bezwaar maken tegen de bouwvergunning voor een transformatorhuisje, of omdat er gewoon geen ruimte voor te vinden is. Voor een transformatorhuisje is gemiddeld 20 m² tot 30 m² aan ruimte nodig voor het huisje zelf en voor het invoeren van de kabels eromheen.

Voor de vervanging van kabels moet veel werk worden verzet

Een tweede probleem is dat in ons middenspanningsnet in het verleden dikke kabels en dunne kabels gelegd zijn. De dikke kabels zijn gelegd naar plaatsen met een hoog elektriciteitsgebruik en de dunne kabels naar plaatsen met een lager elektriciteitsgebruik. De windmolens en zonneparken worden juist geplaatst op afgelegen gebieden. Dat zijn gebieden waar voorheen het elektriciteitsgebruik heel laag was. Voor dat windmolenpark of die windmolen zijn de aanwezige kabels dus veel te dun. Daarvoor moet dan vaak over zeer grote afstanden het net worden verzwaaard. 'Verzwaren' betekent dikkere kabels leggen en meer transformatorstations plaatsen.



Windmolenpark op zee

Een derde probleem zit op het hoogspanningsniveau. Lang geleden had elke provincie zijn eigen elektriciteitscentrales. Globaal genomen werd in elke provincie even veel elektriciteit opgewekt als er gebruikt werd. Die elektriciteit werd via het provinciale transportnet (150 kV of 110 kV) van de centrales naar de gebruikers gebracht. Om te zorgen dat de provincies niet in de problemen kwamen bij een storing of onderhoud van een centrale, werden de provincies gekoppeld met een landelijk koppelnet (380 kV of 220 kV).

Zodra het elektriciteitsgebruik in een provincie steeg, werd er in die provincie ook een centrale bijgebouwd. Vanaf circa 1980 gaf het in sommige provincies problemen om aan genoeg koelwater te komen. De rivieren mogen door het koelwater niet te veel worden opgewarmd, omdat die opwarming ziektes in het rivierwater kan veroorzaken. Daarom werden bij sommige centrales koeltorens gebouwd, maar die zijn erg duur om te bouwen en in onderhoud en verlagen het rendement van de elektriciteitscentrale. Nieuwere centrales werden daarom aan de kust gebouwd. Aan de kust is altijd genoeg koelwater. Het probleem is dan dat het landelijk koppelnet ineens veel meer energie moet gaan transporteren. Toen er ook nog eens windmolenparken werden gebouwd op zee, werd dat probleem nog groter. Tennet, de beheerder van de transportnetten en de koppelnetten, doet zijn best om hoogspanningsverbindingen bij te bouwen en hoogspanningsstations bij te bouwen. Maar ook hier wordt vaak bezwaar gemaakt tegen een bouwvergunning voor hoogspanningsmasten en hoogspanningsstations en lukt het niet altijd om geschikte stukken grond te vinden voor een hoogspanningsstation. Voor een hoogspanningsstation is meestal een stuk grond nodig ter grootte van tientallen voetbalvelden, al zijn sommige kleiner (Tilburg: 4 voetbalvelden) en sommige veel groter (Eemshaven: 120 voetbalvelden).



Openlucht hoogspanningsstation

De gevolgen van netcongestie kunnen zijn:

- Nieuwe panden krijgen (de komende jaren) geen elektriciteitsaansluiting
- Nieuwe woonwijken kunnen (voorlopig) niet worden gebouwd omdat er geen aansluiting kan worden gemaakt
- Bedrijven die meer stroom willen gaan gebruiken, krijgen (voorlopig) geen zwaardere aansluiting
- Bedrijven die al een aansluiting hebben, mogen soms wel energie afnemen, maar geen energie aan het net leveren. Dat is dan in het contract met het netwerkbedrijf geregeld.
- Doordat het net op sommige plaatsen overbelast is, is de kans op onverwachte stroomuitval hoger dan voorheen. Het is zelfs mogelijk dat het netwerkbedrijf bepaalde hoogspanningsstations moet uitschakelen, als het verbruik of de teruglevering te hoog wordt. Daardoor wordt dan een woonwijk of een deel daarvan uitgeschakeld.

De oplossing van netcongestie?

De oplossing is een combinatie van aparte oplossingen. Er moet sowieso meer aan hoogspanningsverbindingen, hoogspanningsstations en transformatorhuisjes worden gebouwd. Veel kabels moeten worden verzwaard. Maar ook het gebruik moet beter worden afgevlakt, zodat er minder hoge pieken in het gebruik zitten. Dat kan op verschillende manieren:

- Met contracten waarin de stroom het ene uur duurder is dan het andere uur
- Met technische oplossingen, zoals batterijen
- Door het gedrag van de gebruikers aan te passen. Als gebruikers adviezen opvolgen, zoals niet de auto laden of de vaatwasser aanzetten tussen 16 uur en 21 uur, dan worden de piekmomenten afgevlakt

2.3 Duurzaamheidsmogelijkheden

Dit lesboek gaat over de bebouwde omgeving. In dit lesboek gaat het dan ook over de maatregelen die qua elektrotechnische duurzaamheid in een pand genomen kunnen worden. De focus zal hierbij liggen op schone opwekking met zonnepanelen en met opslag van energie in batterijen.

Welke mogelijkheden heeft een woning of een kantoorpand om duurzamer met elektriciteit om te gaan en problemen met netcongestie te ontwijken? Er zijn vier standaard stappen die genomen kunnen worden:

- Verminder het elektriciteitsgebruik
- Plaats zonnepanelen om een deel van de elektriciteitsbehoefte zelf op te wekken
- Gebruik elektriciteitsopslag om pieken in het elektriciteitsgebruik te kunnen afvlakken
- Gebruik een energiemanagementsysteem om slimme keuzes te kunnen maken met de beschikbare hoeveelheid energie

Verminder het elektriciteitsgebruik

Het energiegebruik kan worden beperkt door apparatuur toe te passen die minder energie gebruikt of door alternatieven te vinden voor het energiegebruik. Zo kan oude verlichting worden vervangen door energiezuinige verlichting en kunnen oude elektromotoren worden vervangen door energiezuinige exemplaren. Ook kan in plaats van ruimteverwarming worden gekozen voor plaatselijke verwarming. Denk hierbij aan infraroodpanelen of stoelverwarming.

Een alternatief voor elektrische energie is bijvoorbeeld het toepassen van lichtkoepels in een dak, zodat de verlichting minder vaak of minder fel hoeft te branden.

Zonnepanelen plaatsen

Zonnepanelen leveren na plaatsing feitelijk gratis elektriciteit. Het nadeel is dat de zonnepanelen dat voornamelijk in de warme maanden van het jaar doen. In de winter leveren de panelen nauwelijks energie. Heeft een bedrijf een grote energiebehoefte in de zomer (denk aan een ijsjesfabriek of een kantoor met veel airco's), dan zijn zonnepanelen een zeer goede aanvulling. Heeft een bedrijf vooral energiebehoefte in de winter, dan dragen de zonnepanelen veel minder bij aan het energiesysteem.



PV-panelen op bedrijfspand

Elektriciteitsopslag

Om het energiegebruik af te vlakken, kan energie worden opgeslagen in batterijen. Dat maakt het mogelijk om overdag meer energie te gebruiken dan de netaansluiting toestaat, door de extra benodigde energie uit batterijen te halen die 's nachts zijn opgeladen. Ook kan in de batterijen energie van zonnepanelen worden opgeslagen die dan op een later tijdstip kan worden gebruikt.

Geven batterijsystemen een hogere kans op een woningbrand? Volgens Duits onderzoek (RWTH Aken, 2024) is de kans dat er in een woning brand uitbreekt als volgt:

- Woonhuis zonder PV, zonder thuisbatterij 0,280 % per jaar
- Woonhuis met PV en thuisbatterij 0,286 % per jaar
- Woonhuis met PV, thuisbatterij en elektrische auto 0,31 % per jaar
- Woonhuis met diesel- of benzineauto 0,36 % per jaar

Een kans van 0,28 % betekent dat elk jaar in één huis op de 360 huizen brand uitbreekt. In Nederland is de kans op brand een stuk kleiner, onder andere omdat wij veel minder verwarmen met olie.

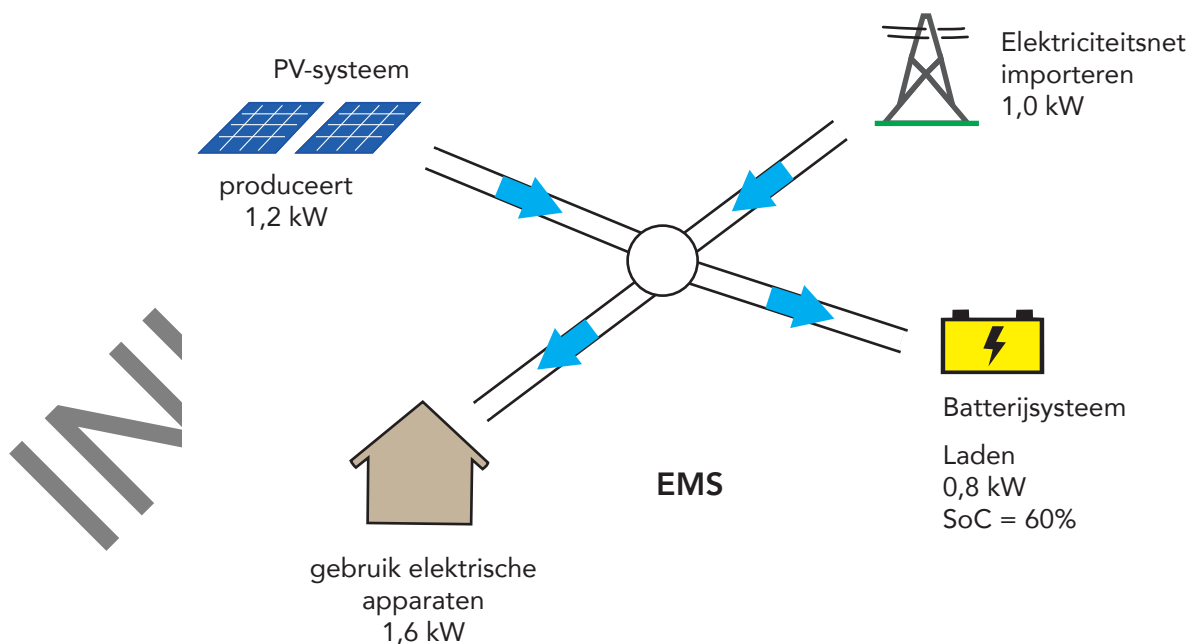
Een thuisbatterij verhoogt de kans op brand nauwelijks, maar als er brand uitbreekt is die wel veel gevaarlijker. De brand is veel intenser en er komen gevaarlijke dampen uit een brandende thuisbatterij.

Energiemanagement

Om de energie uit het elektriciteitsnet, uit zonnepanelen en uit batterijen te kunnen verdelen, is een *energiemanagementsysteem* nodig. Dit systeem werkt op basis van informatie en geprogrammeerde regels. De informatie kan bijvoorbeeld zijn:

- De ladingstoestand van batterijen
- De uit het elektriciteitsnet opgenomen stroom
- De gebruikte stroom in de installatie
- Weersvoorspellingen van internet
- Actuele stroomprijzen

Met die informatie wordt bestuurd hoeveel energie uit het net wordt gehaald, of de batterijen worden geladen of juist ontladen en of grote apparatuur tijdelijk wordt uitgeschakeld.



Het energiemanagementsysteem houdt de energiestromen in de gaten en kan deze ook besturen.

Vragen

1. Waarom kan het een probleem zijn om in het centrum van een stad en transformatorhuisje te plaatsen?

.....

.....

.....

2. Welke organisatie beheert de transportnetten en de koppelnetten?

- ☐ Congestie
- ☐ Inertie
- ☐ Techniek Nederland
- ☐ Tennet

3. Een eigenaar van een kantoorpand wil het energieverbruik verlagen. Noem twee voorbeelden van oplossingen daarvoor.

.....

.....

.....

4. Waarom kan een grote elektriciteitscentrale niet snel worden opgestart?

.....

.....

.....

5. Wat betekent het woord congestie?

- ☐ Overbelasting
- ☐ Koeling
- ☐ Vermogensverlies
- ☐ Kostenverhoging

6. Waarom levert een windmolen op zee veel meer energie dan een windmolen op land die hetzelfde vermogen heeft?

.....

.....

.....

7. Wat betekent het woord 'duurzaam'?

.....

.....

.....

8. Op welk gemiddeld vermogen is een huisaansluiting berekend?

.....

.....

.....

9. Wat levert voor Nederland meer energie op: Acht uur lang geen wind, maar wel veel zon of juist acht uur lang nauwelijks zon, maar wel veel wind?
- ☐ Acht uur lang zon is het beste
 - ☐ Acht uur lang wind is het beste
 - ☐ Dat maakt niet uit, het levert beide ongeveer evenveel op
10. Hoe zijn pieken in het elektriciteitsgebruik te voorkomen met een technische oplossing?
-
-
-
11. Wanneer is het eerste zonnepark in Nederland in gebruik genomen?
- ☐ 1948
 - ☐ 1980
 - ☐ 2011
 - ☐ 2020
12. Waarom worden nieuwe elektriciteitscentrales vrijwel altijd aan de kust gebouwd?
-
-
-
13. Wat doet inertie met de netfrequentie?
-
-
-
14. Geef drie voorbeelden van informatie die het energiemanagementsysteem nodig heeft om de energiestromen te kunnen sturen.
-
-
-
15. Hoeveel ruimte is nodig voor een transformatorhuisje?
- ☐ Ca 12 m²
 - ☐ 20 m² tot 30 m²
 - ☐ Minimaal 4 voetbalvelden

16. Welke vier stappen kan een eigenaar van een kantoorpand nemen om duurzamer met elektriciteit om te gaan en problemen met netcongestie te ontwijken?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

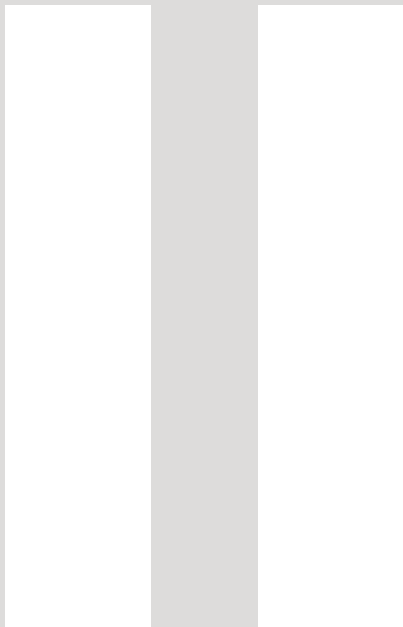
.....

Begrippenlijst hoofdstuk 2

duurzaamheid	iets doen om te zorgen dat de wereld op de lange termijn behouden blijft voor de dan levende generaties
energiemanagementsysteem	systeem dat de energiestromen meet en bestuurt
inertie	stabiliteit van de netfrequentie door de massa van de rotor van de generatoren
netcongestie	overbelasting van het elektriciteitsnet

DEEL II.

PV-INSTALLATIES



HOOFDSTUK 3.

Werking van PV-panelen

INRIKEXEMPLAAR

3

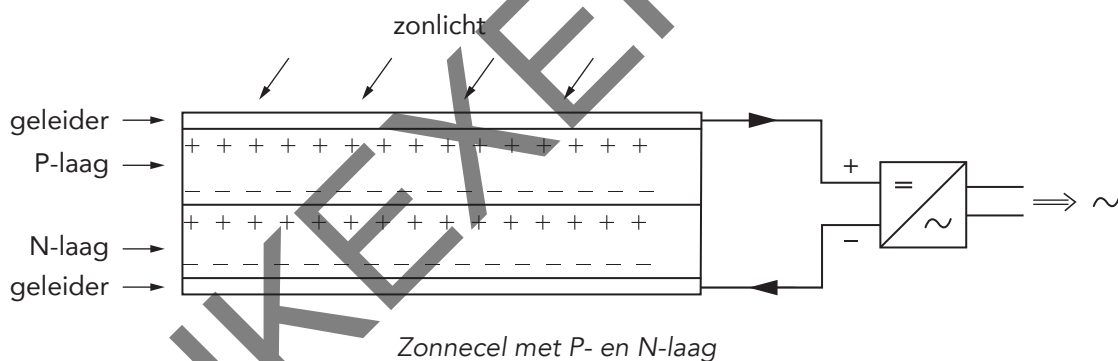
In dit hoofdstuk leer je ...

- Hoe een zonnecel werkt en waarom er een PN-overgang nodig is om stroom op te wekken
- De drie soorten zonnepanelen (monokristallijn, polykristallijn en amorf) met hun voor- en nadelen
- Hoe de opbrengst van een PV-paneel afhangt van lichtsterkte en oppervlaktetemperatuur
- Wat het Maximum Power Point is en hoe de spanning-stroom-curve van een paneel eruitziet
- Wat het effect is van schaduw of vuil op de werking van een PV-paneel en hoe bypassdiodes reageren

3.1 Inleiding

Langzaam komen er steeds meer huizen en andere panden met zonnepanelen voor het zelf opwekken van elektriciteit. Er zijn verschillende soorten zonnepanelen. In dit hoofdstuk worden de zonnepanelen behandeld die zonlicht rechtstreeks omzetten in elektriciteit.

De systemen die zonlicht rechtstreeks omzetten in elektriciteit worden officieel fotovoltaïsche systemen (PV-systemen) genoemd. Het woord 'photo' betekent 'licht' en 'voltaïsch' betekent 'elektriciteit'. In plaats van 'photo-voltaïsch' wordt ook wel de term 'foto-voltaïsch' gebruikt. Er zijn ook zonnepanelen die zonlicht direct of indirect omzetten in warm water (PT-systemen). Dit worden zonnecollectoren genoemd.



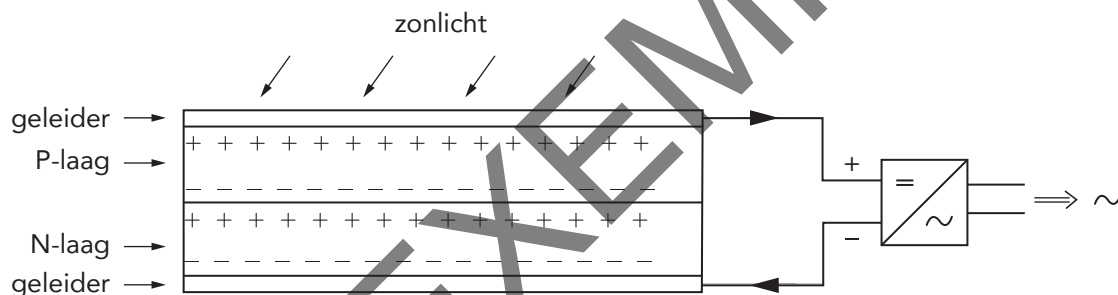
3.2 Soorten zonnepanelen

Om een zonnecel te maken, wordt silicium gesmolten en behandeld. Als het dan voorzichtig afkoelt, vormt zich een groot kristal van siliciumatomen. Wat is nu een kristal van siliciumatomen?

Een atoom dat in de buitenste schil 'losse elektronen' heeft, kan deze elektronen afstaan of van een ander atoom elektronen aantrekken. Zolang de buitenste schil niet geheel gevuld is, zijn er elektronen beschikbaar voor elektronentransport. Deze beschikbare elektronen worden vrije elektronen genoemd. Een groep vrije elektronen die één kant op beweegt, wordt een 'elektrische stroom' genoemd.

De buitenste schil is geheel gevuld als deze acht elektronen bevat. Siliciumatomen hebben in de buitenste schil vier elektronen. Zodra de atomen netjes in een kristalstructuur liggen, kunnen de omliggende atomen elkaars elektronen gebruiken. Daardoor 'voelt het aan' alsof de buitenste schil geheel gevuld is. Het silicium heeft in die structuur geen vrije elektronen meer en kan dus geen stroom geleiden.

Om te zorgen voor stroomgeleiding wordt de ene kant van het silicium behandeld met een P-materiaal en de andere kant met een N-materiaal. Er ontstaat dan een PN-overgang met vrije elektronen. Die vrije elektronen kunnen door het invallende licht worden losgemaakt.



Elk zonnepaneel is opgebouwd uit meerdere zonnecellen, maar altijd van één soort per paneel. Er zijn globaal genomen drie soorten zonnecellen:

- Monokristallijne cellen
- Polykristallijne cellen
- Amorfe cellen

Bij het maken van een siliciumkristal is het mogelijk om zeer zorgvuldig een hele staaf silicium op te bouwen uit één kristal. Deze staaf wordt na afkoeling in plakjes gezaagd. Deze plakjes heten wafers (streek uit: weefers). Elke wafer is één groot kristal van silicium. Elke wafer is een zonnecel. Deze cellen worden naast elkaar gelegd in een zonnepaneel. De zonnecellen heten *monokristallijne* cellen. Let op: mono betekent één. Monokristallijne panelen zijn te herkennen aan de egaal donkerblauwe kleur.



Het is een stuk makkelijker en dus ook goedkoper om een staaf silicium te maken die bestaat uit allemaal stukjes van siliciumkristallen. Op één wafer zitten dan meerdere kristallen. Deze zonnecellen heten *polykristallijne* cellen. Let op: poly betekent 'veel'. Polykristallijne cellen zijn iets goedkoper dan monokristallijne cellen, maar leveren ook wel iets minder elektrische energie op bij eenzelfde oppervlakte. Polykristallijne panelen zijn te herkennen aan de blauwe kleur of grijze kleur met een soort schervenpatroon. Het lijkt wel alsof de kristallen kapot gevallen zijn in meerdere stukken.

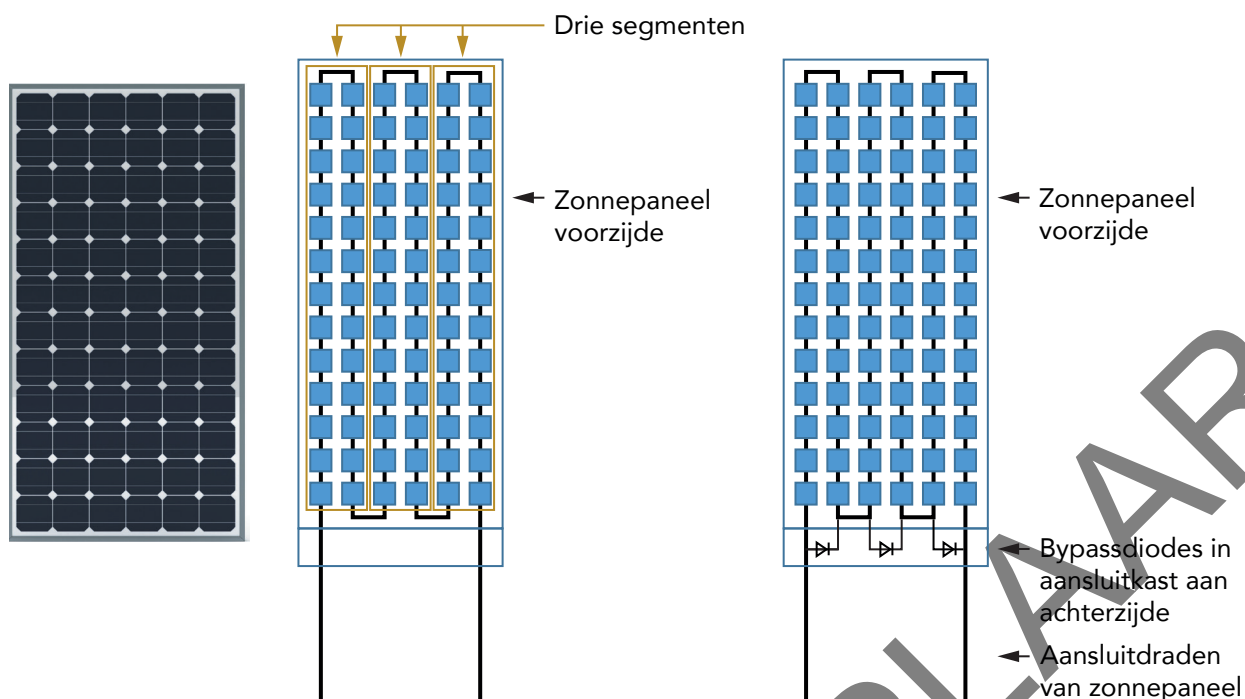


Voor flexibele zonnepanelen wordt een ander proces gebruikt. De siliciumatomen liggen hier niet netjes in een kristalstructuur, maar schijnbaar kriskras door elkaar. Dit wordt *amorf* genoemd. *Amorf* betekent: vormloos, zonder vaste structuur. Bij deze manier heeft niet elk siliciumatoom vier elektronen die 'geleend' kunnen worden. Daardoor ontstaan wel vrije elektronen. Deze zijn merkbaar als 'defecten' in de zonnecel. Dit wordt opgelost door bij de productie waterstof toe te voegen aan het mengsel. Dit waterstof hecht zich aan de atomen die onvoldoende elektronen kunnen lenen. Hierdoor is de buitenste schil toch weer goed gevuld. De opbrengst van amorfe cellen is veel lager dan van de monokristallijne cellen en de polykristallijne cellen. Een groot voordeel is wel dat de amorfe zonnepanelen op allerlei vormen aan te brengen zijn.

Daarnaast zijn er nog specifieke zonnecellen, maar die worden nog niet veel toegepast of worden alleen toegepast voor specifieke doeleinden.

3.3 Opbouw van PV-paneel

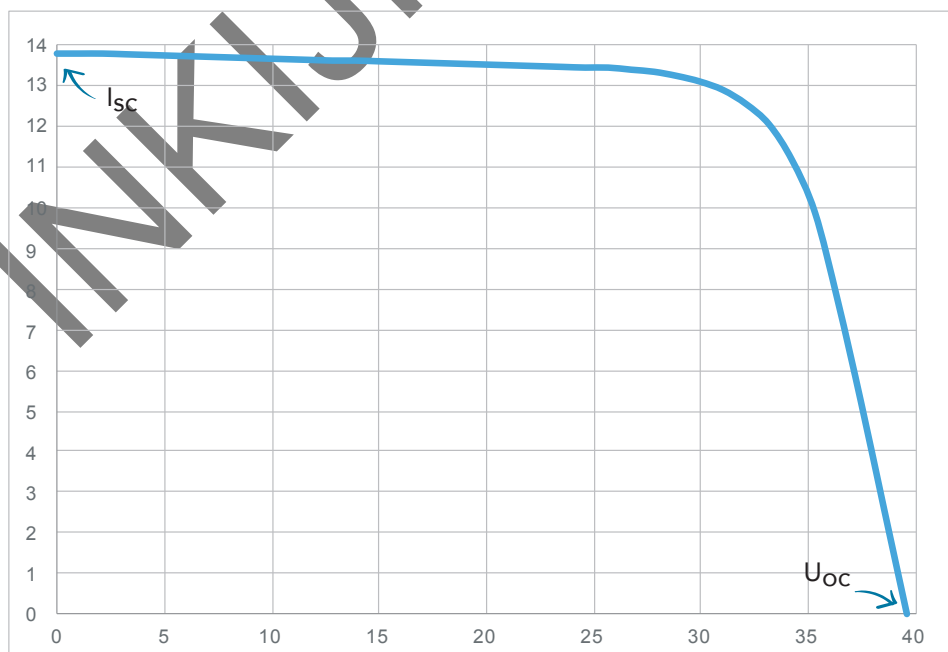
Elk PV-paneel is opgebouwd uit zonnecellen. Die zonnecellen liggen in zes rijen van elk 12 zonnecellen naast elkaar. Die zes rijen vormen samen drie segmenten. De drie segmenten zijn aan de onderzijde van het paneel aan elkaar gekoppeld en voorzien van diodes. Deze diodes worden *bypassdiodes* of 'omloopdiodes' genoemd. Deze bypassdiodes zitten aan de achterzijde van het PV-paneel in de aansluitdoos weggewerkt. Deze aansluitdoos is volgegoten met hars. De bypassdiodes kunnen daardoor niet vervangen worden.



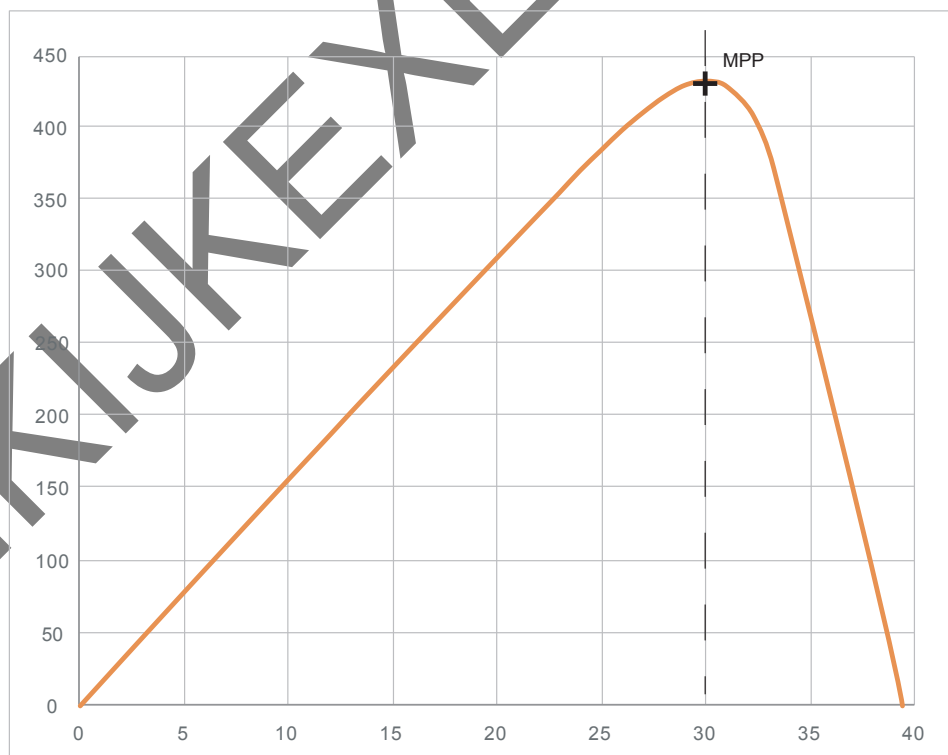
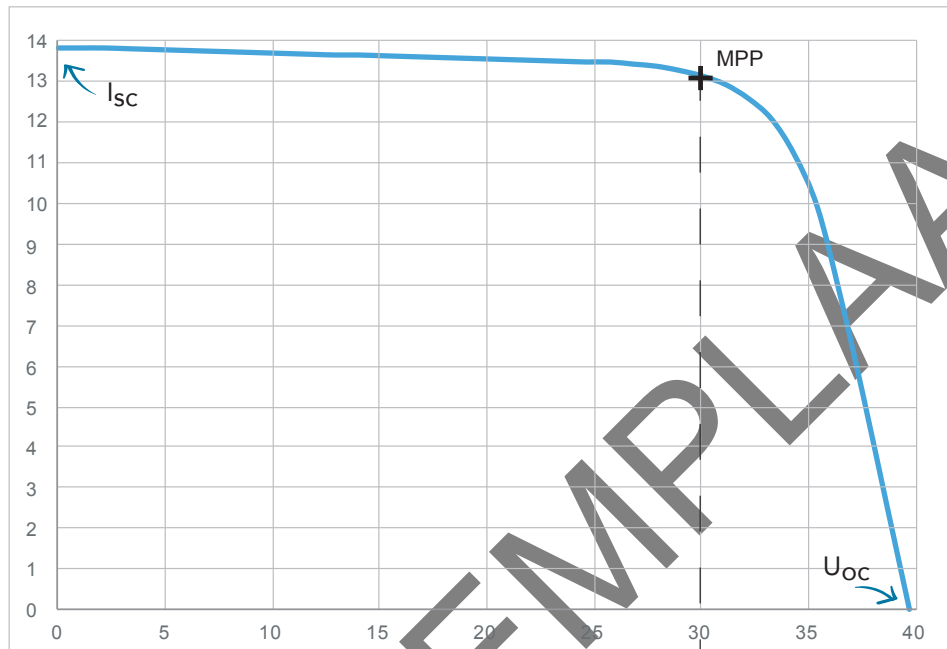
Als een enkele zonnecel niet goed functioneert, kan de bypassdiode ervoor zorgen dat dit segment overgeslagen wordt. De andere twee segmenten van hetzelfde zonnepaneel en de andere zonnepanelen waarmee dit paneel in serie staat, kunnen dan energie blijven leveren.

3.4 Opbrengst PV-paneel

Als er genoeg licht op een zonnepaneel valt, gaat deze spanning leveren. Bij volle zon is de hoeveelheid zonnestraling iets meer dan 1000 W per vierkante meter (1000 W/m²). De spanning en stroom staan in onderstaande grafiek. Duidelijk te zien is dat het PV-paneel over een groot deel van de curve een constante stroom levert. Als er geen stroom loopt, is er de spanning U_{OC} . De letters 'OC' staan voor 'open circuit'. Dit is de bronspanning van het zonnepaneel. Bij een kortsluiting is de stroom maximaal, maar de spanning nul. In de curve is dit het punt I_{SC} . De letters 'SC' staan voor 'short circuit' (kortsluiting).



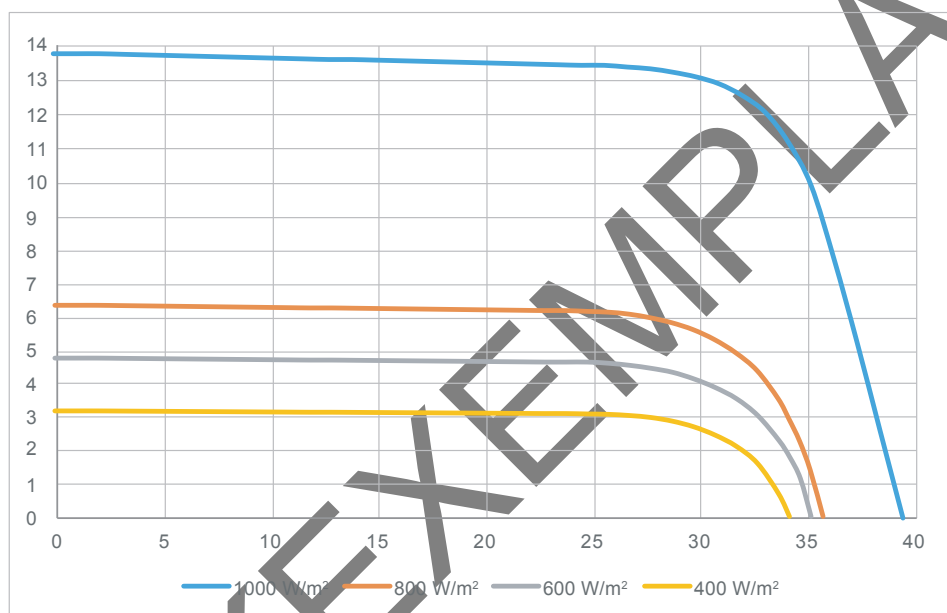
Op het punt U_{OC} is het vermogen dat het PV-paneel afgeeft nul. Want: $P = U \cdot I$. Als U of I gelijk is aan nul, dan is $P = 0$. Op het punt U_{OC} is de spanning maximaal, maar de stroom nul. Daardoor is het vermogen nul. Op het punt I_{SC} is de stroom maximaal, maar de spanning nul. Daardoor is het vermogen ook nul. Voor elk punt van de curve is het vermogen te berekenen. Hieronder zijn de twee curves van spanning-stroom en spanning-vermogen onder elkaar gezet. De plek waar het vermogen maximaal is, wordt het MPP genoemd. MPP staat voor Maximum Power Point (punt van maximaal vermogen).





De regelaar die zorgt voor het omzetten van de energie van het zonnepaneel naar het elektriciteitsnet moet met dit MPP rekening houden.

De opbrengst van een PV-paneel hangt vooral af van de hoeveelheid licht die op het paneel valt. In de grafiek hieronder is te zien dat de stroomsterkte van het paneel sterk wijzigt met de lichtinval. In deze grafiek zijn spanning en stroom weergegeven bij een vermogen van 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² en 1000 W/m².



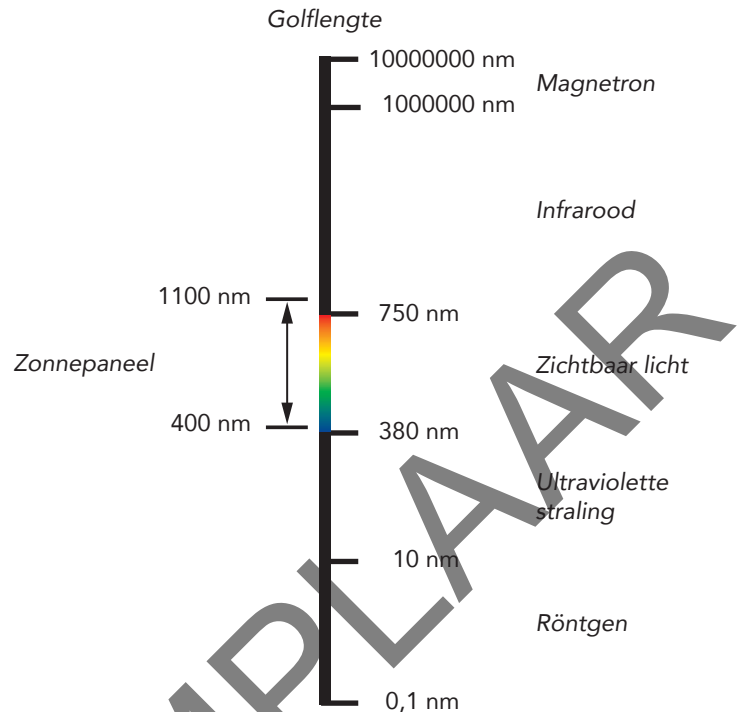
Het vermogen dat een PV-paneel afgeeft, is temperatuurafhankelijk. Een PV-paneel geeft het hoogste vermogen af bij een lage oppervlaktetemperatuur. Het vermogen van een PV-paneel is bepaald onder standaard testcondities. Hierbij is de oppervlaktetemperatuur 25 °C. Per 15 °C temperatuurstijging neemt het vermogen van het PV-paneel ongeveer 6,3 % af. Bij een temperatuurstijging van 45 °C is de oppervlaktetemperatuur 70 °C. De temperatuurstijging van 45 °C is 3 x 15 °C. Het vermogensverlies is dan 3 x 6,3 % = 19 %. Als het PV-paneel bij een oppervlaktetemperatuur van 25 °C een vermogen van 1000 W zou leveren, is dat bij een oppervlaktetemperatuur van 70 °C verminderd tot 810 W.

Bij een oppervlaktetemperatuur van 10 °C is de opbrengst juist 6,3 % hoger. Het paneel van 1000 W geeft dan bij gelijke lichtsterkte een vermogen van 1150 W af.

Het vermogensverschil is te klein om in een koelsysteem te investeren. Er kan wel een ventilator worden geplaatst, maar die kost constant energie en geeft maar een verwaarloosbare verlaging van de oppervlaktetemperatuur.

3.5 Gevoeligheid van zonnepaneel

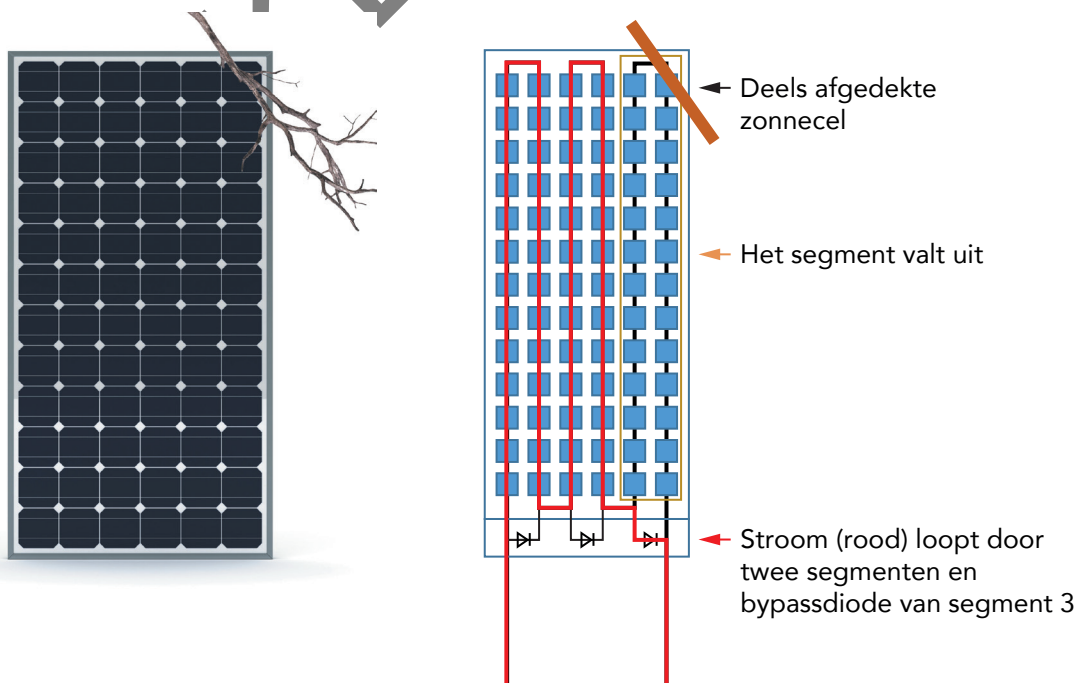
Een zonnepaneel heeft meestal zonnecellen van silicium. Silicium kan energie absorberen uit licht met een golflengte van 400 nm tot 1100 nm. Dat betekent dat al het zichtbare licht in elektriciteit kan worden omgezet en dat ook een klein stukje van het infrarode licht benut wordt. Het grootste deel van het infrarode licht heeft een te lange golflengte en kan door het silicium niet in elektriciteit worden omgezet. Dit deel van het infrarood zorgt wel voor opwarming van het zonnepaneel. Helaas gaat het rendement van het zonnepaneel achteruit als de temperatuur van het paneel stijgt.



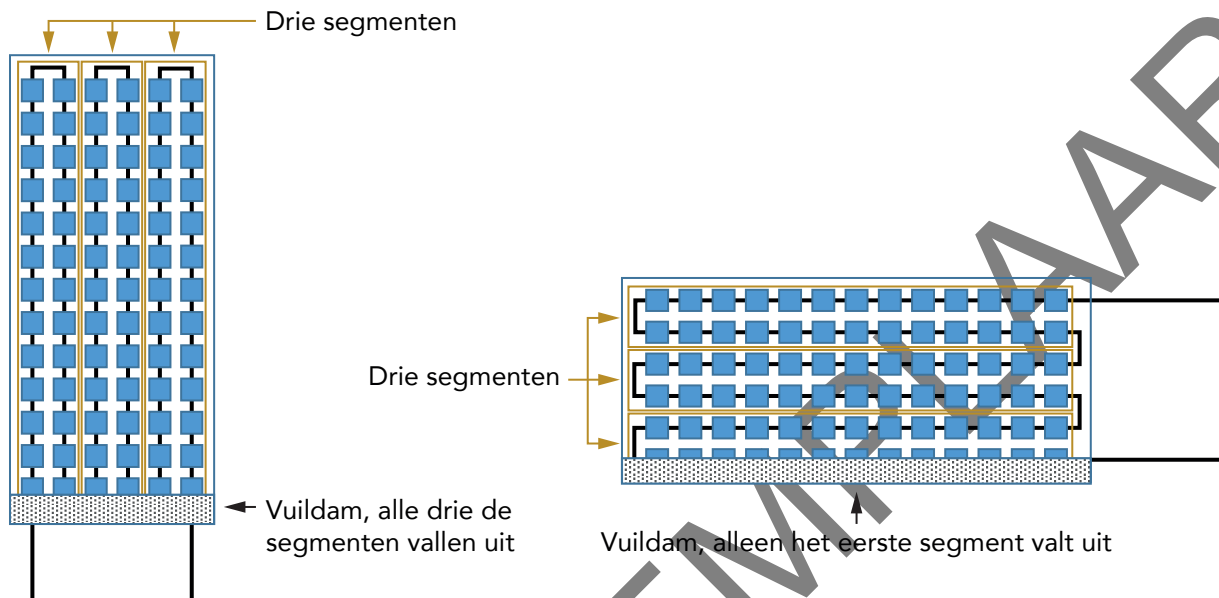
Een zonnepaneel is vooral gevoelig voor de energie in het zichtbare licht

3.6 Effect van schaduw of vuil

Bij schaduw op een deel klein van een zonnecel zal de zonnecel die wordt afgedekt geheel warm worden. Dit is geen probleem, maar het is wel goed waarneembaar met een thermografiecamera. Het segment waarin deze zonnecel zit, zal hierdoor worden beïnvloed. Het kan zijn dat het hele segment uitvalt en dat de stroom van de twee andere segmenten via de bypassdiode van het uitgevallen segment loopt. Van het vermogen dat het hele zonnepaneel kan leveren, is een derde verloren gegaan.



Bij zonnepanelen met een kleine opstaande rand aan de onderkant blijft er aan de onderzijde wel eens een rand vuil achter, een zogenaamde vuildam. Deze vuildam begint met een beetje viezigheid. Aan deze viezigheid hecht zich ander vuil en ontstaat algengroei. De vuilrand wordt daardoor steeds breder. Als een zonnepaneel horizontaal geplaatst is, zal de vuildam één segment afdekken. Het paneel functioneert nog maar voor 2/3-deel. Als het PV-paneel verticaal geplaatst is, zal de vuildam tegelijk alle drie de segmenten afdekken. Het paneel levert dan vrijwel geen energie meer.



Vragen

1. Hoe heet een zonnepaneel dat de warmte van de zon direct omzet in warm water?

.....

.....

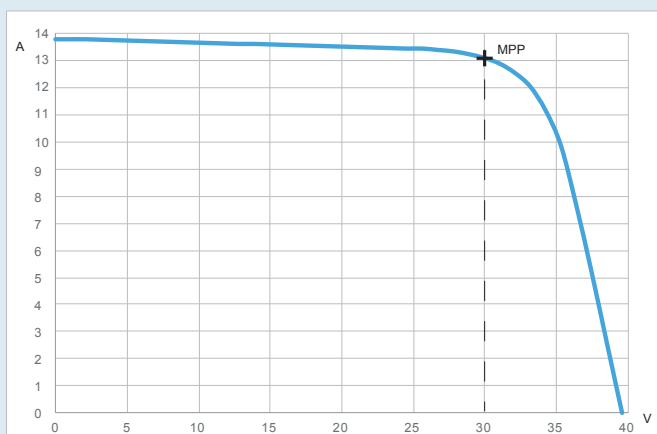
2. Waar komen de letters PV vandaan?

.....

.....

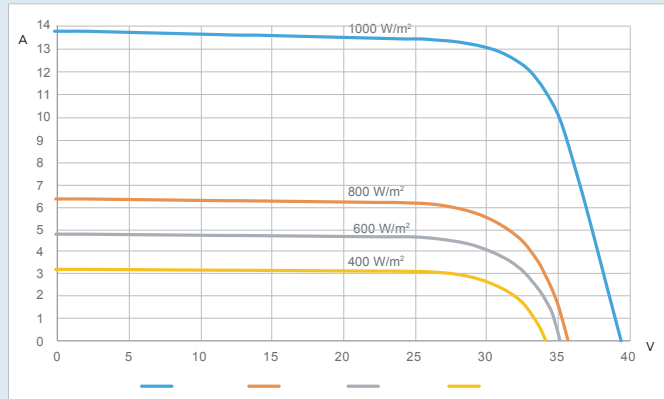
3. Wat is de spanning die dit paneel afgeeft als er geen stroom loopt?

- ☐ 37 V
- ☐ 30 V
- ☐ 7,2 A
- ☐ 0 V



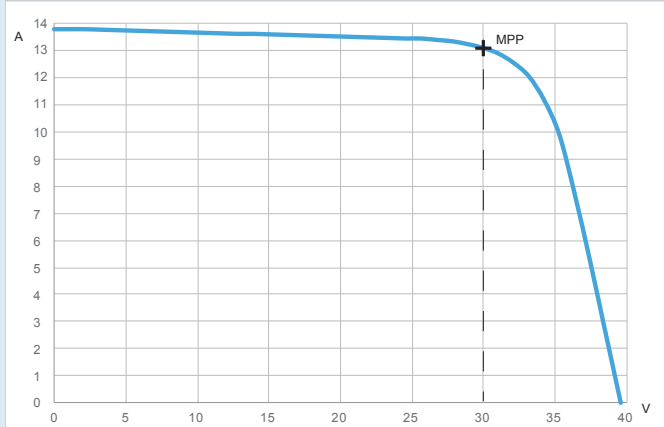
4. Wat is de stroom die dit paneel afgeeft bij kortsluiting en een ingestraald vermogen van 800 W/m^2 ?

☐ 8 A
☐ 6,4 A
☐ 4,9 A
☐ 3,2 A



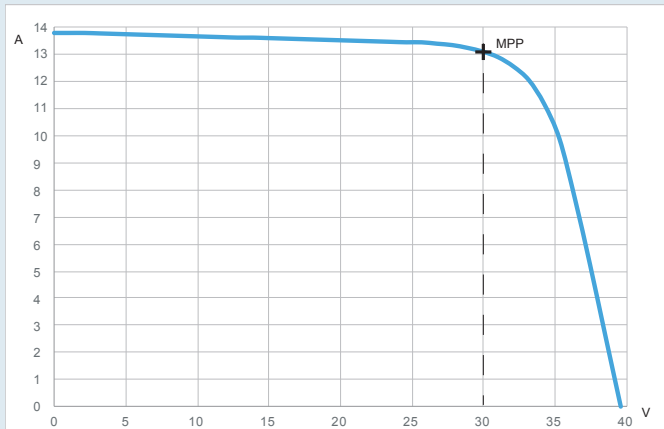
5. Stel dat er vier panelen in serie staan. Wat is de spanning die deze serieschakeling afgeeft als er geen stroom loopt?

☐ 0 V
☐ 37 V
☐ 148 V



6. Stel dat er vier panelen in serie staan. Wat is de stroom die deze serieschakeling afgeeft als er aan de uiteinden van de serieschakeling een kortsluiting gemaakt wordt?

☐ 0 A
☐ 8 A
☐ 32 A



Begrippenlijst hoofdstuk 3

amorf	ongestructureerde opbouw van moleculen in een zonnepaneel
bypassdiodes	diode die zorgt dat een deel van een zonnepaneel kan worden overgeslagen
I_{sc}	kortsluitstroom van een zonnepaneel
monokristallijn	structuur waarbij steeds een cel naast een andere ligt
MPP	Maximum Power Point
polykristallijn	cel die uit meerdere kristallen bestaan
U_{oc}	de open spanning van een zonnepaneel
zonnepanelen	paneel dat zonlicht omzet in elektriciteit

HOOFDSTUK 4.

Plaatsing van PV-panelen

INLIKKEEXEMPLAAR

4

In dit hoofdstuk leer je ...

- Onder welke voorwaarden PV-panelen vergunningsvrij geplaatst mogen worden
- Wanneer een omgevingsvergunning bij de gemeente aangevraagd moet worden
- Wie juridisch eigenaar is van een PV-installatie bij een huiseigenaar en bij een huurder

4.1 Vergunning

De overheid wil het gebruik van zonnepanelen stimuleren en heeft daarom makkelijke regels gemaakt voor de plaatsing van zonnepanelen. Gaat het om een pand dat valt onder de monumenten, dan moet met de gemeente worden overlegd of een vergunning nodig is. Voor 'gewone' panden is de vergunning niet nodig op de volgende voorwaarden:

- De zonnepanelen worden op een schuin of plat dak geplaatst.
- Bij een schuin dak worden de zonnepanelen in of op het dak gemonteerd met dezelfde hellingshoek als het dak.
- Bij een plat dak worden de zonnepanelen zo gemonteerd dat ze vanaf de grond moeilijk te zien zijn. Daarvoor moet de buitenste rand van het dak vrij blijven.
- Er mogen geen losse schakelkasten e.d. op het dak worden gemonteerd, tenzij die in het paneel verwerkt zijn.

Als de eigenaar van het pand zich aan deze regels houdt, is de plaatsing vergunningsvrij. In andere gevallen is een omgevingsvergunning nodig. Die moet bij de gemeente worden aangevraagd.



Deze plaatsing is vergunningvrij

4.2 Eigendom van de PV-installatie

Het lijkt logisch dat degene die de PV-installatie betaald heeft, automatisch ook de eigenaar is. Toch is dat niet altijd zo!

Voor een huiseigenaar ligt de situatie eenvoudig: de PV-installatie is deel van het huis, dus deel van zijn eigendom.

Voor een huurder die een PV-installatie aanschaft, ligt dat anders. Zolang de PV-panelen in dozen in het huis staan, zijn ze eigendom van de huurder. Zodra de PV-installatie gemonteerd is, is deze één geworden met het huis en in principe eigendom van de huiseigenaar. Dat is alleen te voorkomen door met de eigenaar van het huis overeen te komen (en dus zo op papier zetten!) dat de PV-panelen van de huurder zijn. De huurder heeft bij het einde van de huurperiode dan de volgende opties:

- de PV-installatie bij einde huur weghalen. De huurder moet het dak dan wel weer deugdelijk achterlaten. De PV-installatie kan naar een volgend huis worden meegenomen of worden verkocht.
- de PV-installatie verkopen aan de huiseigenaar.
- de PV-installatie overdragen aan de volgende huurder.



Vragen

1. Is bij plaatsing van PV-panelen tegen een zijmuur van een woonhuis een vergunning van de gemeente nodig?
 - ☐ Ja
 - ☐ Nee
 - ☐ Alleen als het een huis betreft dat onder monumentenzorg valt
2. Is bij plaatsing van PV-panelen op een plat dak van een woonhuis een vergunning van de gemeente nodig?
 - ☐ Ja
 - ☐ Nee (als de panelen maar niet zichtbaar zijn)
 - ☐ Ja, als het een huis betreft met een houten dakconstructie
3. De huurder van een woonhuis plaatst zelf PV-panelen op zijn dak. Deze zijn daarna officieel eigendom van:
 - ☐ de gemeente
 - ☐ de verhuurder
 - ☐ de huurder

Begrippenlijst hoofdstuk 4

omgevingsvergunning	vergunning van de gemeente voor o.a. het aanpassen van een woning
vergunningsvrij	situatie waarin geen vergunning nodig is