

# ELEKTRICITEIT VAN DE ZON

## Een verhaal over zonnepanelen. Deel 1

Henk Bos



AquaSolar

### Inleiding

Voor alle schepen geldt dat de energievoorziening een probleem is. Zolang we voor de wal liggen is het meestal geen probleem. Bijna altijd is het mogelijk een walstroom aansluiting te vinden en daar tegen een voordelig tarief de benodigde energie te betrekken. Aan de reis wordt het moeilijker. Velen kiezen ervoor om op gas te koken terwijl anderen er voor kiezen om elektrisch te koken. Elektrisch koken is zeer duur. Aan de wal is het al meer dan 3 keer zo duur. Aan de reis is het nog veel duurder.

Een paar voorbeelden: thuis kost een kWh 0,22 € in een jachthaven 0,30 à 0,70 € Een via een generator aan boord opgewekte kWh kost 1,50 à 2,50 €

Een alternatief is door zon(licht) opgewekte energie. Niet goedkoop (circa 0,45 € gerekend over 30 jaar) maar het levert wel iets op wat niet in geld is uit te drukken nl. vrijheid. In dit verhaal zullen we de zon-daglicht panelen maar zonnepanelen noemen. Wij hebben ze nu acht jaar in gebruik en hebben er veel rust en plezier van.

Als ik aan mijn vrouw vraag wat is je vrijheid waard krijg ik stevast het antwoord: Dat is niet te betalen!

Er komt nog een verschijnsel bij kijken. De mens is geneigd om de prijs te vergeten en elke dag plezier te beleven aan een goed werkende investering.

De panelen worden zowel op ons schip als op onze camper gebruikt en er is niks mooier dan 's morgens vroeg bij het wakker worden te constateren dat de accu's al weer bijna vol zijn. De gegevens per paneel per type zijn nogal verschillend, daarom leert u in dit verhaal het rendement van een zonnepaneel te bepalen en uit te rekenen welk zonnepaneel op de lange duur de goedkoopste is. Daarmee heeft u instrumenten in handen om een bewuste keuze te maken tussen de verschillende aanbiedingen.

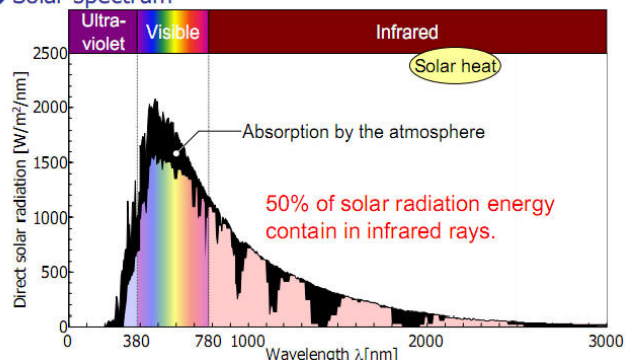
### Inhoud van het hele verhaal

- \* Toepassing en gebruik
- \* Werking
- \* Soorten zonnepanelen
- \* Vermogen en Gemiddeld Dag Verbruik
- \* Gemiddelde Dag Opbrengst
- \* Installatie en regeling
- \* Montage en bevestiging
- \* Welke accu
- \* Stroom meten, kabels en bedrading, verbindingstechniek
- \* Montage voorbeelden

### Toepassing en gebruik

Zonne-energie komt van de zon in de vorm van warmte en licht. Dit is 99,9 % van alle bruikbare energie op aarde. De hoeveelheid energie die de aarde bereikt, is ca. 9000 maal groter dan de energiebehoefte van alle 6,5 miljard aardbewoners samen. De energie bereikt de aarde als licht en warmtestraling, een mengsel van elektromagnetische straling van verschillende golflengten, voor 99% liggend tussen 300 en 3000 nm.

#### ◆ Solar spectrum



De golflengten van zichtbaar licht vallen tussen 390 en 780 nm. De golflengten spelen een grote rol in de gevoeligheid en het rendement van de panelen.

De zonne-energie wordt op twee manieren gebruikt:

\* De meest gebruikte toepassing is thermische zonne-energie waarbij zonlicht wordt omgezet in warmte. Dit gebeurt door zonneboilers (oftewel zonnecollectoren, -panelen). Deze methode wordt in dit verhaal niet behandeld.

\* Een andere manier om gebruik te maken van zonlicht is door middel van zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen (ook wel PV-cellen genoemd).

Fotovoltaïsche cellen zetten het licht direct om in elektriciteit: zonnestroom.

Er wordt wereldwijd 150 megawatt per jaar aan zonnepanelen verkocht, gelijk aan het oppervlak van zo'n driehonderd voetbalvelden. De stroomproductie daarvan is vergelijkbaar met die van een mini-kolencentrale. Twintig jaar geleden werd er nog maar vijf megawatt aan zonnepanelen geproduceerd. Ondanks de nog geringe productiecapaciteit wereldwijd is de industrietak goed voor een omzet van een miljard dollar.

De aanschaf van zonnepanelen is duur. Voor kleine systemen liggen de prijzen voor een compleet geïnstalleerd systeem op ca. €5,50 tot €7,60 per Wattpiek vermogen. De terugverdientijd is circa 15 à 30 jaar wat resulteert in een prijs van 0,45 € per kWh bij continue gebruik. Dit is voor wonen aan boord een mooie oplossing. We noemen dit een autonome installatie. Autonome toepassingen komen veel in afgelegen gebieden voor of op plaatsen waar geen openbare elektriciteitsvoorziening is.



Voorbeelden zijn vaartuigen, campers, tuinhuisjes, drinkbakken voor koeien, verkeersinstallaties met oa. wegenwachtpalen, waarschuwborden en boeien. De belangrijkste componenten van autonome systemen zijn de zonnepanelen, accu's en een regelunit. Overdag wordt elektriciteit geproduceerd die wordt verbruikt door elektrische apparatuur en/of in de accu's wordt opgeslagen. Als de zon niet schijnt is de productie veel lager maar kan er gewoon energie gebruikt worden, want de energie voor de apparatuur wordt dan uit de accu's betrokken. De hoeveelheid opgewekte energie hangt af van de gekozen installatie.



Net-gekoppelde toepassingen komen typisch in de bebouwde omgeving tot zijn recht. Panelen op het dak produceren gelijkstroom die door een ingenieus stukje elektronica, de omvormer of inverter genoemd, wordt omgezet in 230V wisselstroom. De inverter is gekoppeld aan de normale elektrische installatie van de woning. De opgewekte stroom wordt gebruikt door allerlei apparaten. Als er zo veel zon is dat de panelen meer stroom produceren dan er door de apparaten in het huis wordt verbruikt, vloeit het teveel aan stroom via de elektriciteitsmeter terug het openbare net in. 's Nachts produceren de zonnepanelen geen elektriciteit en wordt het gehele stroomverbruik van de woning gehaald uit het openbare elektriciteitsnet.

#### **Voordelen zonnepanelen**

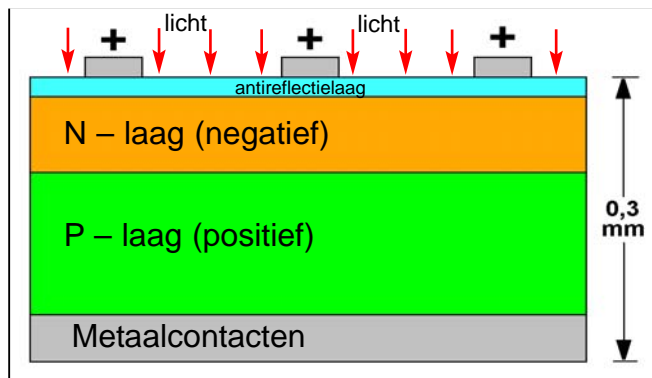
- \* Na installatie wordt er direct elektriciteit opgewekt.
- \* Goed voor een duurzaam milieu. Minder vervuilende CO2 uitstoot.
- \* U bent minder afhankelijk van walstroom en de prijsontwikkeling op de energiemarkt.
- \* Zonnepanelen vereisen bijna geen onderhoud. De regen spoelt ze immers schoon! Af en toe controleren op hardnekkig vuil is voldoende.
- \* De installatie is duurzaam terwijl er door het ontbreken van slijtage gevoelige delen geen kosten zijn te verwachten.
- \* Werkt veilig en automatisch.
- \* Werkt geruisloos en geen stank.
- \* Ook in Nederland voldoende opbrengst.
- \* Geen wijzigingen in de bestaande installatie nodig.

#### **Nadelen**

- \* Het grootste probleem is nog steeds de prijs van deze energievorm. Denk je ook na over het rendement van je investering als je een nieuwe auto koopt?
- \* Het opwekken van elektriciteit met zon is ongeveer tien keer zo duur dan met kolen of gas.
- \* Veel zonnepanelen nodig om een groter vermogen te realiseren.
- \* Bij autonome installaties periodiek vervangen van de accu's. De tijdsinterval is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de installatie (regelaar) en de kwaliteit en soort van de gebruikte accu's.
- \* Glas is kwetsbaar.
- \* Sommigen vinden zonnepanelen niet mooi. De vraag is hier of je een schip hebt om te gebruiken en als deel van je leven of voor de ogen van een ander.
- \* Het relatief lage rendement: Dat is inderdaad relatief, bomen doen het veel slechter, gemakkelijk een factor 10 minder efficiënte omzetting van zonlicht in een bruikbare vorm van energie.

## Werking zonnecel

Een zonnepaneel bestaat uit meerdere aaneengesloten zonnecellen (zogenaamde 'fotovoltaïsche cellen'). Zonnecellen zetten zonlicht rechtstreeks om in elektrische energie, dit wordt ook wel het fotovoltaïsche proces genoemd (dit proces werd in 1839 ontdekt door Edmond Becquerel). Als er licht op zonnecellen valt, absorberen deze cellen fotonen (de lichtdeeltjes uit zonnestraling). Dit zorgt ervoor dat er negatief geladen elektronen in het zonnepaneel losgemaakt worden die zich vervolgens verplaatsen en een positief geladen 'gat' overlaten.

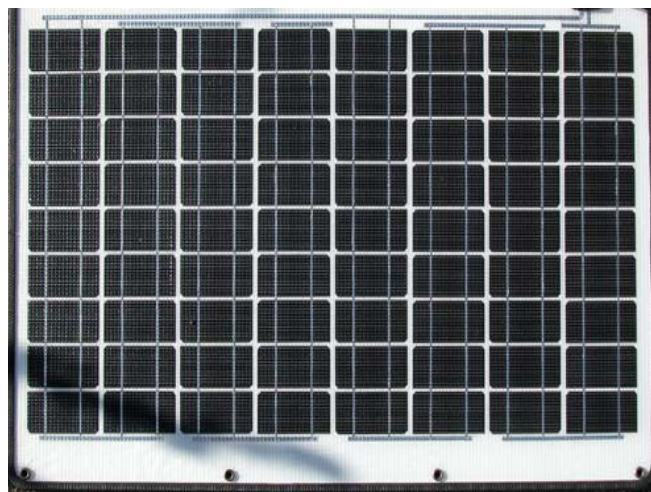


De meeste zonnecellen worden gemaakt van silicium. Een silicium-atoom heeft vier elektronen in zijn buitenste schil. De elektronen dragen bij aan de stevigheid van de kristalstructuur, maar raken zelf gemakkelijk los als er bijvoorbeeld zonlicht op valt. Omdat silicium nauwelijks stroom geleidt, wordt er een halfgeleider van gemaakt door er andere stoffen aan toe te voegen. Aan de bovenkant is dit meestal fosfor en aan de onderkant meestal borium. Fosfor heeft één elektron meer dan silicium. Dit elektron is niet nodig om de bindingen in stand te houden en heeft hierdoor meer vrijheid om zich te verplaatsen. Borium heeft één elektron minder dan silicium waardoor de elektronen in de fosforkant (de negatief geladen N-laag) naar de boriumkant (de positief geladen P-laag) bewegen. Onder invloed van zonlicht krijgt de P-laag dus een negatieve lading (door een tekort aan elektronen) en de N-laag een positieve lading (door een overschot aan elektronen). Zonlicht veroorzaakt dus een elektrisch spanningsverschil tussen de P-laag en de N-laag. Als de beide lagen uitwendig met een metaaldraad verbonden worden gaat er een stroom lopen. De stroom die verkregen wordt door zonnecellen is gelijkstroom. Het fotovoltaïsch proces voltrekt zich net zo lang als er licht op de cel valt. Omdat er in dit proces geen materiaal verbruikt wordt zijn zonnecellen duurzaam.

Niet al het licht kan worden omgezet in elektriciteit, aangezien zonnecellen voornamelijk zichtbaar licht gebruiken. Bij het omzettingproces van lichtenergie (fotonen) naar elektriciteit (elektronen) wordt veel energie verloren en/of omgezet in warmte. De kleur van de zonnecel is meestal blauw of zwart, omdat de cellen voorzien zijn van een antireflectie laag. Dit verbetert de absorptie van het zonlicht en resulteert in een hoger rendement. Het theoretische omzettingsrendement ligt daarom rond de 20 tot 30 procent. Dit lijkt weinig, maar in vergelijking met het omzettingsrendement van bijvoorbeeld biobrandstoffen blijken zonnecellen stukken efficiënter te

zijn. Zo ligt het rendement van het blad van een suikerrietplant (een grondstof voor biobrandstoffen) slechts rond de 6 procent, de benodigde energie voor het bewerken van het land en de extractie van de suiker nog niet meegerekend. Zonnecellen daarentegen worden momenteel geproduceerd met een rendement van 12 tot 20 procent en naar verwachting zal dit de komende jaren zelfs hoger worden. De meest efficiënte, maar zeer dure zonnecellen hebben in een laboratoriumomgeving een rendement bereikt van 30 procent.

## Een zonnepaneel



\* Een zonnepaneel bestaat uit een aantal aan elkaar gekoppelde zonnecellen.

\* Bij kristallijn (zowel mono-kristallijn als poly-kristallijn) silicium is 36 een heilig getal. Er zijn 36 cellen nodig om een 12V-accu te laden. Meestal 4 x 9, soms 6 x 6. Voor 24V systemen zijn er grotere panelen met 60, 72 en zelfs 180 cellen.

## Effecten van serie- en parallelschakeling

Zowel bij parallelle ketens als bij serieschakeling is het maximum vermogen van de samenstelling kleiner dan de som van de individuele maximum vermogens. Het verschil is circa 1,5 % wordt mismatchverlies genoemd.

## Rendement bepalen

De maximale opbrengst wordt bepaald onder standaard omstandigheden (standard test conditions ofwel STC):

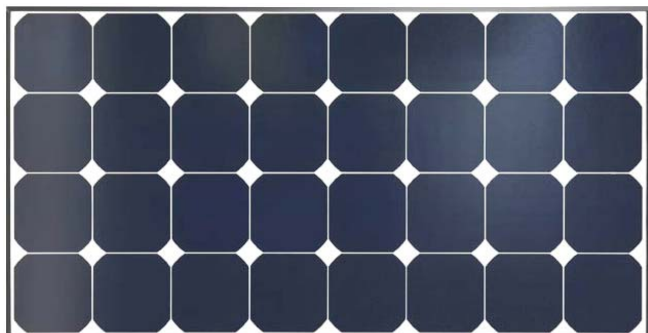
De temperatuur van het zonnecel oppervlak is 25 °C en een bestralingssterkte van 1000 W/m<sup>2</sup> met een luchtmassa van 1.5 (AM1.5). Dit komt overeen met een bestralingssterkte gemeten op een heldere dag invallend op een zon-gerichte 37°-gekatelde oppervlakte. Met de zon in een hoek van 41.81° boven de horizon. Dit komt ongeveer overeen met de zon op z'n hoogte stand op een zonnige dag in de lente of in de herfst.

Met een ideale zonnepaneel van 1m<sup>2</sup> en een opbrengst van 1000 W zou het rendement 100% zijn.

Onder deze omstandigheden geeft een zonnecel met 12% rendement en een oppervlakte van 1m<sup>2</sup> ongeveer 1.2 watt vermogen.

In de praktijk zijn de panelen kleiner daarom reken ik met een oppervlak van 1dm<sup>2</sup>.

## Een rekenvoorbeeld.



We nemen een zonnepaneel van AquaSolar en wel de SPR-90 (ASP90) van Sunpower.  $1 \text{ m}^2 = 100 \text{ dm}^2$ .  
Per  $\text{dm}^2$  levert de zon  $1000 / 100 = 10 \text{ W}$  ( $1 \% = 0,1 \text{ W}/\text{dm}^2$ ).  
Het oppervlak van het zonnepaneel is  
 $10,37 \times 5,27 = 54,65 \text{ dm}^2$ .  
Het maximale vermogen is  $100 \text{ Wp}$ .  
Het geleverde vermogen per  $\text{dm}^2$  is  
 $100 \text{ Wp} / 54,65 \text{ dm}^2 = 1,82 \text{ Wp}$  per  $\text{dm}^2$ . Dit komt neer op  
een rendement van  $1,82 / 0,1 = 18,2 \%$ .

Het uiteindelijke rendement van een installatie is afhankelijk van het materiaal van de zonnecellen, de opstelling, type regelaar, de leeftijd van de accu en de aangeboden hoeveelheid licht waarvan vooral de kleur belangrijk is. De weerstand in het laadcircuit heeft grote invloed op het praktische rendement.

### Prijs per Wp

Op een soortgelijke manier is de prijs per maximaal te leveren Wp te bepalen. De methode is niet helemaal compleet daar de veroudering wordt weggelaten.



## AQUA SOLAR VOF

### Lieuwe Dijkstra

Bedrijvenpark 't Ges  
Zwolsmanweg 14  
8606 KC Sneek

[www.aquasolar.nl](http://www.aquasolar.nl)

Hetzelfde zonnepaneel van AquaSolar en wel de SPR-90 (ASP90) van Sunpower kost €620,00 in het voorjaar van 2010. Per Wp is dit  $620 / 100 = €6,20$ . Het paneel gaat 30 jaar mee zodat een Wp €0,20 kost gedurende zijn levensduur. In de praktijk gaat dit type paneel langer mee zodat een Wp uiteindelijk minder kost. Op deze manier is er een vergelijk te maken tussen de panelen. De te verwachten levensduur staat bij de type's panelen vermeld. De prijzen zijn berekend via een catalogus van Frankana-Freiko. Deze firma heeft bijna alle soorten zonnepanelen zodat de prijs verhouding tussen de verschillende type's zonnepanelen goed te zien en te berekenen is.



<http://www.frankana.de/opencms/index.html>

## Soorten zonnepanelen

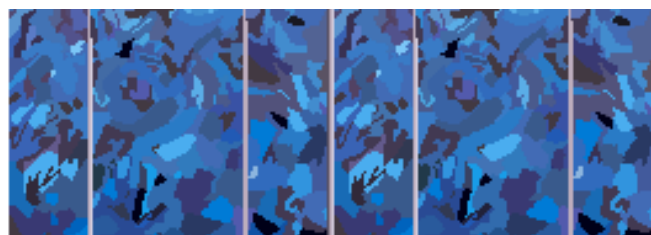
Er zijn vier verkrijgbare hoofdsoorten te onderscheiden.

### 1 Amorfe met opdamptechniek.



Laagje is circa 1 duizendste mm dik. Deze panelen zijn buigbaar. Levensduur 4 tot 9 jaar. Bij toepassing in een rekenmachine wordt een te groot amorfe zonnepaneeltje aangebracht waarbij de grootte afgestemd is op de te verwachten levensduur van de calculator. Amorfe cellen zijn zwart-achtig bruin of goudkleurig. Veel bedrijven werken nog aan amorfe silicium, met een onregelmatige structuur, als alternatief materiaal. Dit is in dunne lagen aan te brengen. Siemens doet daar geen onderzoek meer aan. Amorfe cellen hebben nog steeds een te laag rendement, ze zetten maar 5 à 9 procent van het invallende zonlicht daadwerkelijk om in elektriciteit; de rest gaat verloren in de vorm van warmte. Amorfe panelen zijn zo'n 20% goedkoper in de aanschaf dan kristallijne panelen. De prijs/prestatie per Wp is dus zeer concurrerend te noemen. Bedenk wel dat amorfe panelen tweemaal meer ruimte in beslag nemen en een veel kortere levensduur hebben. Amorfe zonnecellen kunnen ook op een folie aangebracht worden; hierdoor is het mogelijk flexibele zonnepanelen te maken. Rendement tot 9%. De opbrengst is circa  $0,5 \text{ Wp}/\text{dm}^2$ .

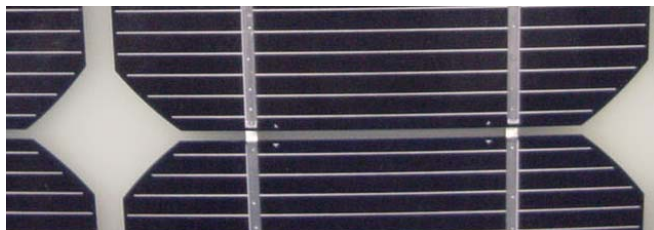
### 2 Polykristallijn. Giettechniek.



Vierkant met mozaïek (ijsbloemen) oppervlak. De vervaardiging van polykristallijne cellen is voordeliger. Daarbij wordt vloeibaar silicium (restanten van de chip productie) in blokken gegoten, die daarna in schijven gezaagd worden. Bij de stolling van het materiaal vormen zich kristalstructuren van verschillende grootte, waarbij aan de grensvlakken defecten optreden. Door deze kristaldefecten is het rendement van de zonnecel lager als de monokristallijn. Levensduur circa 20 jaar. Rendement 14 à 16 %. De opbrengst is circa  $1,1 \text{ Wp}/\text{dm}^2$ . Sommige versies zijn beperkt buigbaar tot 3%. Dit type kost €5,85 per Wp.

### 3 Monokristallijn.

Komt oorspronkelijk uit de chip productie. De hoeveelheid afval is in feite de beperkende factor bij de productie van zonnecellen. 30 Procent van de kosten van een zonnecel is terug te voeren op materiaalkosten.

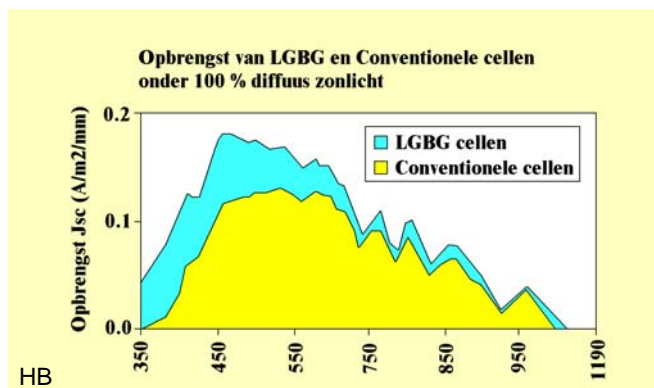


Zou de industrietak zelf silicium moeten gaan zuiveren, dan is de zonneceltechnologie nooit rendabel te maken. Voor de fabricage van monokristallijne siliciumcellen wordt zeer zuiver halfgeleidermateriaal gebruikt: uit een siliciumsmelt worden staven getrokken die uit één groot kristal (een monokristal) bestaan. Deze worden aansluitend in dunne plakjes van 0,4 mm gezaagd. Deze productiewijze garandeert relatief hoge celrendementen tot 16 %. Niet overloopbaar en niet buigbaar. De opbrengst is 1,34 Wp/dm<sup>2</sup>. Dit type kost €7,43 per Wp.

### Gelaserde monokristallijn.

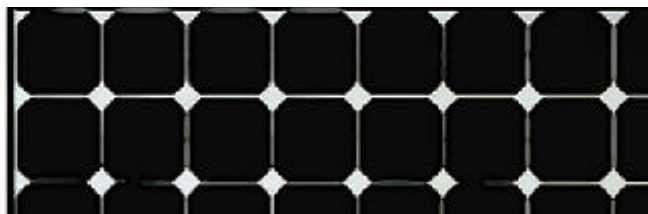


Deze 'Laser High Tech' cellen leveren een rendement van maar liefst 17 à 18%. Vergeleken met de standaard HR monokristallijne cellen betekent dit een opbrengst van meer dan 15%. Vergeleken met de polykristallijne cellen geeft dit nog grotere verschillen per oppervlakte. In de praktijk blijkt dat de laser cellen veel lichtgevoeliger zijn bij bewolkt weer dan de standaard cellen.

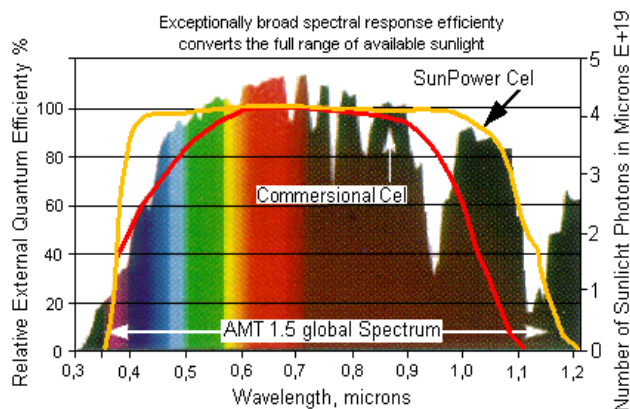


In de grafiek is te zien dat bij de Laser cel bij weinig licht (bewolkt) de opbrengst veel hoger is dan van de conventionele cellen. De fabrikant geeft een vermogensgarantie van 25 jaar (de verwachte levensduur is meer dan 25 jaar). De opbrengst is 1,42 Wp/dm<sup>2</sup>. Dit type kost €7,32 per Wp.

### Monokristallijn met een speciale coating



Met een speciale coating (nanotechnologie) en de contacten aan de achterkant is dit ideaal voor veel toepassingen in autonome systemen, dankzij de hoge laadstroom en het geringe oppervlak van dit zonnepaneel. De monokristallijne silicium cellen combineren een hogere spanning per cel met een zeer goede laag-spannings/temperatuur coëfficiënt. Dit zorgt voor een uitstekende lading van de accu, ook bij hogere temperaturen.



### AquaSolar

Een zeer hoge gevoeligheid bij minder heldere dagen alsmede een breed-spectrum lichtgevoeligheid zorgen ervoor dat de opbrengst van dit zonnepaneel onder alle weersomstandigheden het hele jaar optimaal is. Module rendement 17,4 %. Celrendement 20 à 21,5 %. De opbrengst is circa 1,73 Wp/dm<sup>2</sup>. Dit type kost €7,68 per Wp.

### 4 Monokristallijn MT-CIS technologie

Met CIS (Copper-Indium-Diselenid) dunne film techniek is het mogelijk om lange cellen te maken. Deze zijn in de lengte geplaatst in tegenstelling van de vierkante gewone cellen.



De materiaalwinst is enorm. Een zonnepaneel, gemaakt van CIS, is niet dikker dan vier micrometer, terwijl cellen van monokristallijn silicium minstens vijftig tot honderd maal dikker zijn. Voor de productie van één megawatt zonnepanelen van monokristallijn silicium is 14 ton silicium nodig en maar 25 kilo voor CIS.

De cellen produceren minder energie dan de cellen uit silicium maar zijn goedkoper te maken. Door het grotere oppervlak van de cellen zijn ze minder gevoelig voor schaduw. Daardoor is het mogelijk om per dag relatief meer energie te produceren. Aan boord is er vaak een risico van schaduw zoals de giek of een schoorsteen.

Bij gelijke opbrengst is de CIS module circa 20 procent groter en iets zwaarder. De opbrengst garantie geldt voor 20 jaar. De opbrengst is 1.1 Wp per dm<sup>2</sup>. Rendement 10 à 12 %.

Het maximale rendement is 13 % (Shell). Dit type kost €8,11 per Wp.

### Opmerking

Polykristallijne panelen hebben een marktaandeel van 50 %. De monokristallijne panelen hebben een marktaandeel van 30 % en de amorfe panelen 10 %. Drie van de celtechnologieën maken gebruik van silicium. Alhoewel zonnecellen op basis van amorf silicium een lager rendement hebben, zijn ze door een goedkoper productieproces per eenheid vermogen ongeveer even duur als de polykristallijn en monokristallijn zonnecellen. Amorfe zonnecellen kunnen ook op een folie aangebracht worden; hierdoor is het mogelijk flexibele zonnepanelen te maken.

### Spectrale respons

De spectrale respons van multikristallijn en amorfe modules loopt sterk uiteen. Kristallijn silicium is gevoelig in het golflengtegebied tussen 350 en 1200 nm, amorf silicium is gevoelig in het gebied tussen 350 en 800 nm. De elektrische opbrengst van zonnepanelen is dus niet alleen afhankelijk van de zonnestraling maar ook afhankelijk van het aangeboden lichtspectrum.

### Conclusie

De duurzaamheid van de verschillende soorten zonnecellen is verschillend evenals de prijs. Verkopers geven andere waarden dan de fabrikant. Daarom Googelen!

\* Een monokristallijn silicium zonnecel is het duurst in aanschaf maar heeft het hoogste rendement en gaat 30 jaar mee. Kost circa €0,24 per Wp per jaar.

\* Een multikristallijn silicium zonnecel is wel goedkoper maar heeft ook een lager rendement en gaat 20 jaar mee. Kost circa €0,30 per Wp per jaar.

\* Een amorf silicium zonnecel is weer goedkoper maar het gaat korter dan 15 jaar mee en heeft een lager rendement. Kost circa €0,72 per Wp per jaar.

\* CIS panelen zullen in de toekomst meer en meer worden aangeboden. De levensduur er van zal naar verwachting oplopen naar 10 jaar. Kost circa €0,81 per Wp per jaar.

Opmerking: De prijzen zijn afkomstig van 1 leverancier om een vergelijk te kunnen maken.

### Beloopbare panelen

De tot nu toe getoonde panelen zijn gemonteerd in een aluminium frame. Door bij montage ruimte vrij te houden aan de onderkant is het mogelijk om de onderkant koel te houden door ventilatie.

Beloopbare panelen worden meestal gelijmd waardoor de onderkant niet gekoeld kan worden. Om toch voldoende spanning te kunnen leveren voor het laden van bv een accu worden deze panelen uitgevoerd met 40 cellen ipv de gebruikelijke 36.

Op campers zijn deze typen ook gewild door hun geringe bouwhoogte. De panelen mogen maximaal 3 cm op een meter gebogen worden.

In het deel 2 wordt de opbrengst behandeld.



JB

# ELEKTRICITEIT VAN DE ZON

## Een verhaal over zonnepanelen. Deel 2 de regelaar.

Henk Bos

### Inleiding

In deel 1 hebben we gekeken wat er op de markt is en hoe we het rendement en de kostprijs per Wp gedurende de levensduur berekenen. Goedkoop blijkt vaak duurkoop te zijn. In dit deel gaan we bekijken wat we aan panelen nodig hebben voor een autonoom systeem door het verbruik te compenseren met de opbrengst.

### Vermogen en gemiddeld dag verbruik (GDV)

#### Gemiddeld dagverbruik (GDV)

Alle elektrische installaties aan boord van een camper of schip gebruiken energie. Het gemiddelde ervan, bij voorkeur over een langere tijd vastgesteld, vormt de basis van de installatie.

Het energieverbruik kan worden vastgesteld door het daggebruik van de aanwezige elektrische verbruikers bij elkaar op te tellen. Bij voorkeur meet ik de gebruikers stuk voor stuk met een ampère meter zodat we de stroomsterkte weten. Samen met de gebruikte spanning vormt dit het gebruikte vermogen. Want Vermogen (U) = Spanning (V) x Stroomsterkte (I). De tijdsduur ervan bepaalt de hoeveelheid energie in kWh. De tijdsduur x de stroomsterkte bepaald de energie in Ah (k).

| Een reken voorbeeld: | uur        | Ah       |
|----------------------|------------|----------|
| Navtex               | 24         | 1,4      |
| GPS                  | 24         | 2,62     |
| GSM                  | 4          | 1,12     |
| Marifoon             | 24         | 9,12     |
| Stuurautomaat        | 24         | 12,00    |
| Scanner              | 6          | 0,68     |
| Radio                | 6          | 1,95     |
| Kajuit verlichting   | 8          | 6,00     |
| 3 kleuren licht      | 10         | 18,00    |
| Totaal               | per 24 uur | 52,95 Ah |

We weten nu dat we in deze situatie afgerond 53 Ah energie nodig hebben. Daarvoor is een semitractie accu nodig van minimaal 2 keer 53 = 106 Ah. Het liefst een grotere accu. Door een grotere accu wordt de levensduur van de accu aanmerkelijk verlengd. Daarover later meer bij het hoofdstuk accu's.

De vereniging van Kustzeilers heeft een flink aantal zeilers gevraagd een enquête in te vullen en daarin aan te geven welke elektrische apparatuur zij noodzakelijk en wenselijk achten aan boord van een zeiljacht. Hierbij is een enorme hoeveelheid ervaring in de weegschaal gelegd. Zowel aan zeemijlen, als aan verschillende typen jachten. Omdat de elektrische uitrusting sterk afhankelijk is van het vaargebied en de grootte van een jacht, hebben ze zes normjachten gedefinieerd:



|   |          |
|---|----------|
| 1. Binnen Klein<br>een klein jacht voor binnenwateren | 6,4 Ah   |
| 2. Binnen Groot<br>een groot jacht voor binnenwateren | 35,8 Ah  |
| 3. Kust Klein<br>een klein jacht voor kustwateren     | 70,8 Ah  |
| 4. Kust Groot<br>een groot jacht voor kustwateren     | 95,6 Ah  |
| 5. Oceaan Klein<br>een klein jacht voor de oceaan     | 131,8 Ah |
| 6. Oceaan Groot<br>een groot jacht voor de oceaan     | 257,8 Ah |

Voor elk jacht is ingevuld welke apparaten noodzakelijk en wenselijk worden gevonden voor de veiligheid, de communicatie, de navigatie en het comfort. Men kan daarvoor kiezen uit een lijst van ca. 50 apparaten. Het dagelijks energie verbruik van de grotere schepen valt niet te dekken met zonnepanelen. Daarom gaan we maar eens kijken naar de opbrengst per dag.

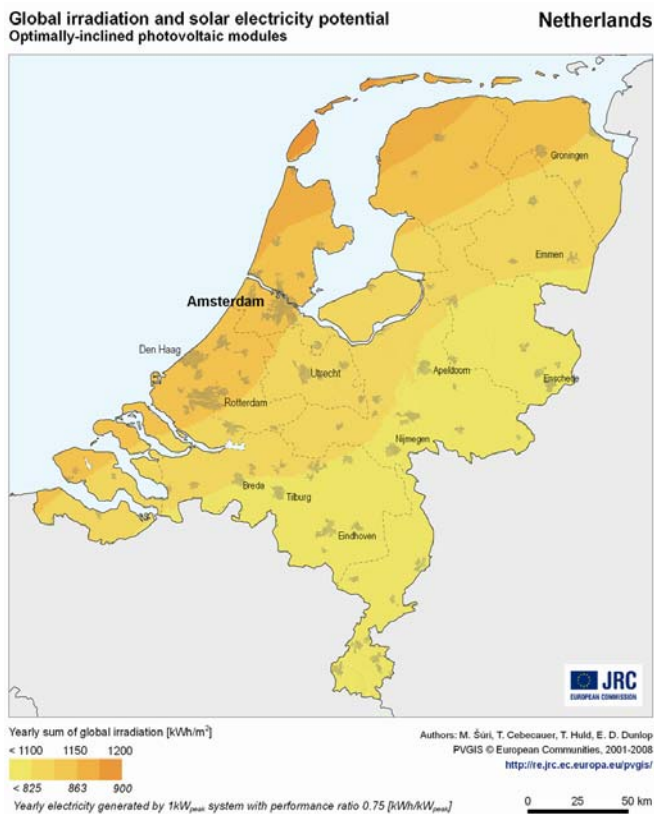
### Gemiddelde Dag Opbrengst (GDO) en van GDV naar GDO

#### Energie aanbod van de zon

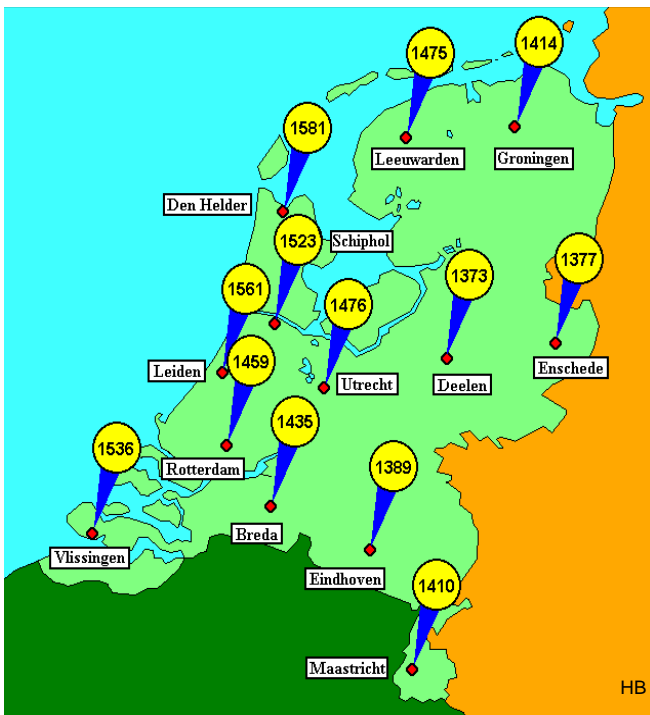
Een kwart van het aanbod wordt door de dampkring teruggekaatst. Van de helft van de overgebleven straling bereikt 40 % het aardoppervlak en 60 % wordt door wolken diffuus verstrooid. De zon schijnt alleen overdag. De zonne-energie wisselt met de seizoenen. Verder is het energie aanbod afhankelijk van het klimaat en lokale weersinvloeden.

## Opbrengst

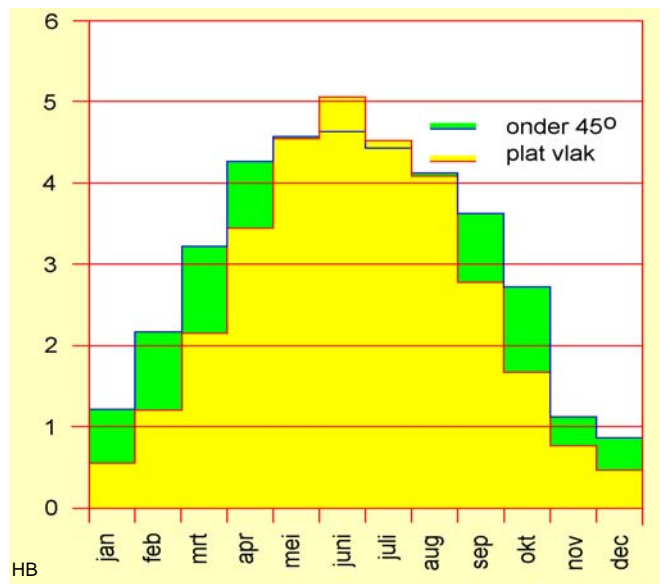
De opbrengst van een zonnepaneel is afhankelijk van een aantal factoren:



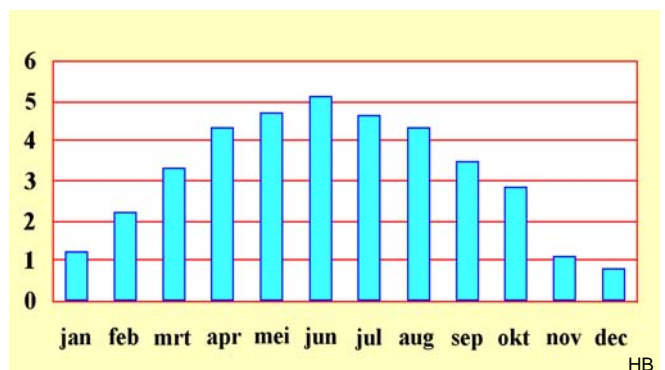
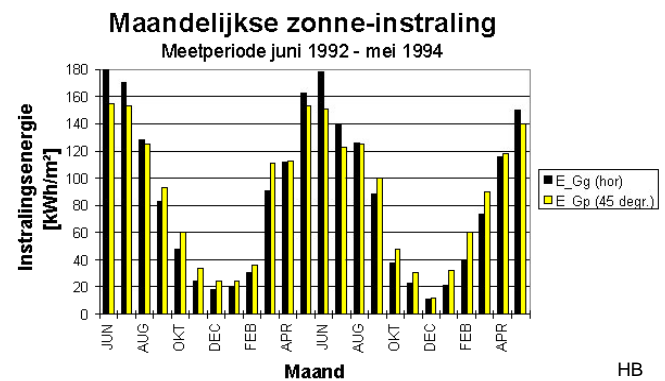
De jaarlijkse **instraling** in Nederland is ongeveer 1000 kWh/m<sup>2</sup>, in droge woestijngebieden 2000 tot 2500 kWh/m<sup>2</sup>; dit verschil wordt niet zozeer veroorzaakt door verschillen in de zomermaanden maar te meer door de lage instraling in Nederland gedurende de wintermaanden. De instraling in de zomermaanden is ongeveer zeven keer zo groot als in de winter maanden.



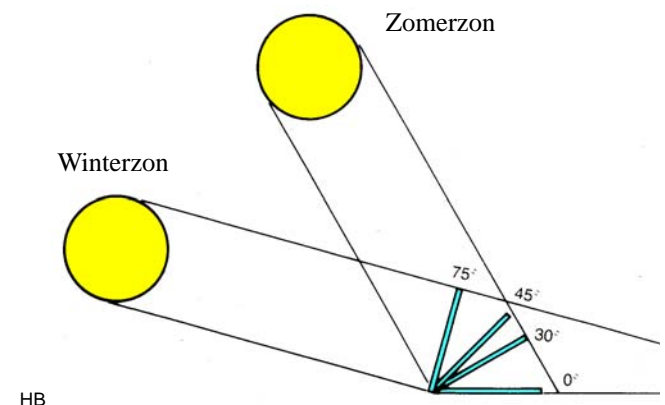
Gemiddeld aantal uren zon in Nederland



Gemiddeld dagaanbod van zonne energie in Nederland op een plat vlak en onder een hoek van 45°

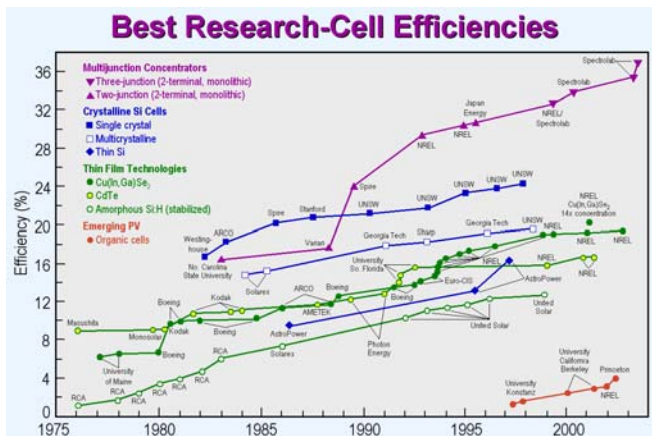


Gemiddeld aantal uren zon per dag in Nederland



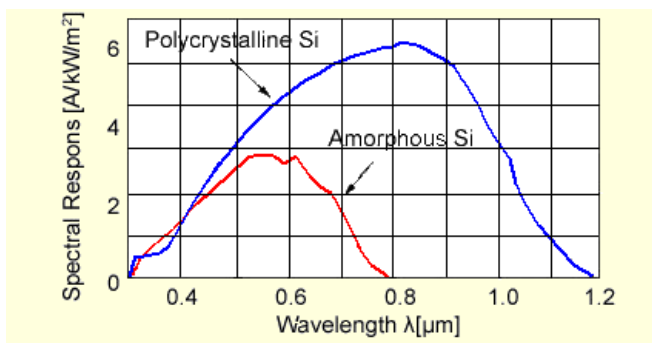


In de wintermaanden halen we de 4 uur niet en in de zomermaanden hebben we (soms) meer dan 4 uur. Daarbij komt nog dat de zon 's winters lager staat zodat de instralings hoek niet constant is.



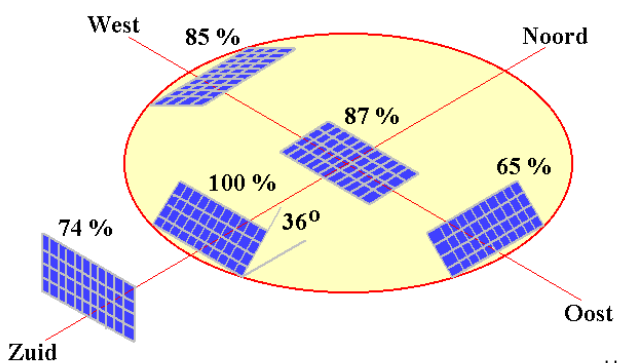
Het rendement van zonnepanelen is instralings afhankelijk. Bij lage instralingen is het rendement aanzienlijk lager dan 1000 W/m<sup>2</sup>. In werkelijkheid hebben we niet te maken met het celrendement onder STC-condities, maar met een gemiddeld celrendement. Het gemiddelde celrendement ligt als gevolg van lage instralingen op jaarbasis circa 4,5% lager dan het celrendement onder STC-condities (los van het temperatureffect).

**Bewolkt**



Spectral response of PV modules, measured in December 1988. Ook als het bewolkt is, werkt een zonnecel. Wolken houden slechts een deel van het zonlicht tegen - de rest van de stralen worden verspreid. De panelen met een breed spectrum zijn hierbij sterk in het voordeel daar deze niet zo gevoelig zijn voor de directe instraling maar het daglicht gebruiken om energie te genereren.

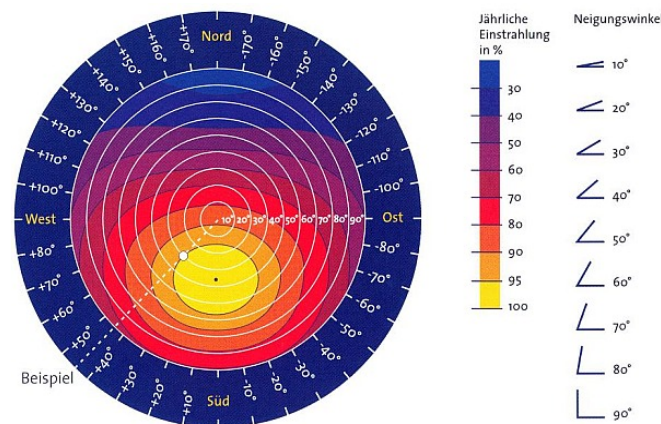
**Zijwaartse hoek**



HB

Is optimaal wanneer het paneel stationair gericht is op 5° ten westen van het zuiden. Bij oriëntaties tussen zuidoost en zuidwest is er slechts 5% verlies op jaarbasis. Met een meedraaiend paneel, wanneer het zonlicht er loodrecht op blijft vallen, stijgt uiteraard de productie.

**Opwaartse hellingshoek van invallend zonlicht.**



Een zonnepaneel op de noorderbreedte van Nederland levert de hoogste opbrengst wanneer het een hellingshoek van 35° (tot 36°) heeft. Bij hellingshoeken tussen 20° en 60° is de jaaropbrengst slechts 5 % lager.

**Het achterliggende systeem:** bij een autonoom systeem speelt de grootte van het opslagsysteem een belangrijke rol. Wanneer dit vol is kan er namelijk geen energie meer bij. Het paneel werkt dan voor niks.

**Rekenen**

Door het piekvermogen te vermenigvuldigen met het gemiddelde aantal uren zon per dag krijgen we dagopbrengst. In mei tot augustus is hebben we gemiddeld 4 uren zon zodat bij een paneel met 50 Wp een energie opbrengst heeft van 4 x 50 = 200 Wh per dag. Bij veel panelen wordt de dagopbrengst gegeven. Als u deze deelt door Wp komt u ook uit op het getal 4.

Bereken uw zonnepaneel installatie: <http://www.miracle-moon.nl/shop/bereken-uw-zonnepaneel-installatie.php5>

Hiermee kunnen we bepalen of het vermogen van het paneel toereikend is voor het gewenste gebruik.

Het energieverbruik uit het voorbeeld GDV van 52,95 Ah kan ongeveer gedekt worden door 2 panelen BP 585-F met een opbrengst van 85 Wp x 4 uur / 12Volt = 28 Ah per dag per paneel.

In Nederland levert een netgekoppeld zonnepaneel 90 tot 110 kWh elektriciteit op per vierkante meter zonnepaneel, per jaar. Voor een autonoom systeem met hetzelfde vermogen ligt die opbrengst lager, ongeveer 40 kWh/m<sup>2</sup>. Dat komt omdat autonome systemen uitschakelen als de accu vol is. Wanneer een netgekoppeld systeem meer elektriciteit opwekt dan er nodig is, dan levert het systeem dat aan het elektriciteitsnet.

## Prijskaartje

Een netgekoppeld systeem kost ongeveer 425 euro per honderd watt-piek (Wp) vermogen. Dat komt neer op 28 eurocent per kWh elektriciteit.

Een zonnestelsysteem met accu is altijd duurder dan een netgekoppeld systeem, vanwege de extra kosten voor een accu. Voor een autonoom systeem bent u per 100 Wp ongeveer 800 euro kwijt. Bij een opbrengst van veertig kWh per jaar, komt dat neer op ongeveer een euro per kWh.

De kosten van elektriciteit uit zonne-energie zijn dus hoger dan conventionele (ook wel grijze) stroom. In 2010 kost een kWh conventionele stroom 24 eurocent. Die van netgekoppelde zonnepanelen ongeveer 28 eurocent. Zonlicht zelf kost natuurlijk niets, maar aanschaf en onderhoud vragen wel een investering. Deel alle kosten over de opbrengst (in kWh) tijdens de 25 werkzame jaren van zonnepanelen, en daar rolt de kWh-prijs uit.

Bij het bedrag van 28 eurocent is rekening gehouden met de gemiddelde aankoop prijs van 4,25 euro per watt-piek, en onderhoudskosten (1 procent van de aanschaf per jaar).

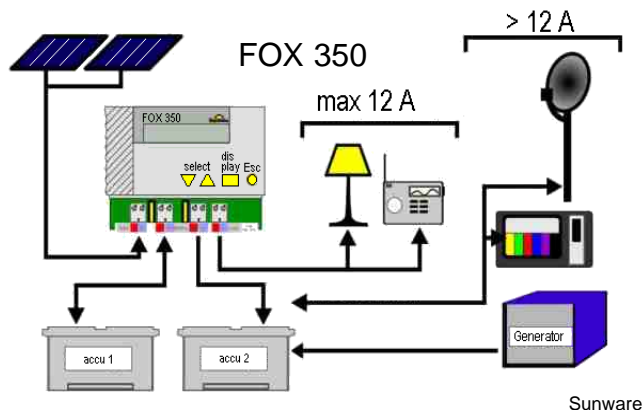
Wegens onvoorspelbaarheid zijn eventuele prijsstijgingen van elektriciteit niet meegerekend, net zo min als eventuele spaarrente die de aanschaf prijs zou opleveren, als het geld 25 jaar op de bank zou staan. Stijging van de elektriciteitsprijs leidt tot verlaging van de kWh-prijs, omdat u de panelen dan sneller terugverdiend.

Als de spaarrente wordt meegeteld, stijgt de terugverdiendtijd van de panelen - en daarmee de kWh-prijs.

## De toekomst

Door ontwikkelingen op de huizenmarkt (in China moet elk nieuw huis voorzien worden van een PV[PV staat voor Photo Voltaic = fofofofof] systeem) verwachten veel analisten dat het tekort aan silicium zal blijven. Silicium is nodig voor het maken van silicium photovoltaïsche zonnecellen, die nu nog de markt domineren.

Veel fabrikanten stappen daarom over op de dunne film zonnecellen. Deze cellen zijn flinterdun waardoor veel minder materiaal nodig is. Het nadeel is dat ze een stuk minder efficiënt zonlicht omzetten dan photovoltaïsche zonnecellen. De meeste fabrikanten maken hun dunnefilm zonnecel van een legering van Koper Indium Gallium diSelenide (CIGS).



Sunware

*Dit systeem hebben we zowel op de boot als in de camper. De panelen gaan als we varen op de boot en als we met de camper weg gaan op de camper. Minimaal blijft er een paneel van 25 Wp achter om de accu's op peil te houden. De regelaars zijn permanent aangebracht.*

Het is uitermate belangrijk om een goede regelaar te kiezen die afgestemd is op het soort accu's die gebruikt worden. Zo mag bij gel-accu's de laadspanning niet boven de 14,2 V uitkomen daar dan het gevaar bestaat dat de druk in de accu te hoog wordt en er gas geventileerd wordt waardoor op den duur de accu droog "kookt".

## Functies van de regelaar

- \* Spanningsbewaking
- \* Laadstroombewaking
- \* Gecontroleerd gassen (zuur zakt naar de bodem)
- \* Temperatuurbewaking
- \* Ondergrens accu spanning bewaking door afschakelen van de gebruikers
- \* Aanpassing van de laadkarakteristiek aan de combinatie zonnepaneel en de accu

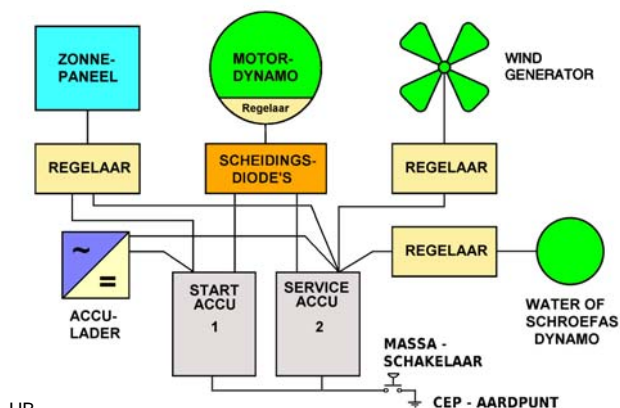
## Spanningsbewaking

Kleine panelen kunnen soms rechtstreeks op een accu worden aangesloten. Bij grotere bestaat de kans dat de spanning te hoog wordt voor de accu en er gassing optreedt waardoor water verdwijnt en de accu binnen de kortste keren rijp is voor de milieustraat.

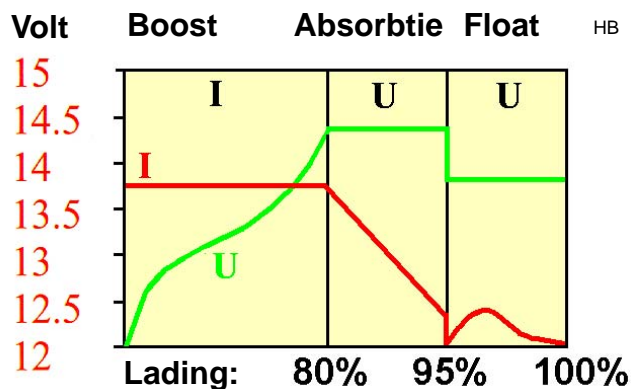
Om de laadspanning optimaal aan te passen aan de accu en om terugstromen van energie in de nacht te voorkomen worden regelaars toegepast.

## De regelaar

### Plaats van de regelaar in het systeem



HB



Goede regelaars gebruiken minimaal een 3 traps laadsysteem. Daarbij wordt in de 1e trap geladen met een grote stroomsterkte. Tijdens dit laden wordt door de regelaar gekeken naar het stijgen van de spanning per tijdseenheid. Hieruit wordt bepaald hoe lang er in de 2e trap

| Type accu  | Absorptie tijd bij 20 gr. C na 50% DOD   | Float spanning bij 20 gr C  |
|--|--|---|
| Semi tractie met 1,6% antimoon   | 5 uur 2,50 V /cel (15,0 V)<br>7 uur 2,45 V /cel (14,7 V)<br>10 uur 2,40 V /cel (14,4 V)<br>12 uur 2,33 V /cel (14,0 V) | 2,33 V / cel (14 V)<br>en na een paar dagen dalend tot<br>2,17 V / cel (13 V) |
| Carbon fibre 1,6% antimoon   | 4 uur 2,50 V /cel (15,0 V)<br>6 uur 2,45 V /cel (14,7 V)<br>8 uur 2,40 V /cel (14,4 V)<br>10 uur 2,33 V /cel (14,0 V)  | 2,33 V / cel (14 V)<br>en na een paar dagen dalend tot<br>2,17 V / cel (13 V) |
| Sonnenschein Dryfit A600 Calcium VRLA gel                                    | 4 uur 2,34 V /cel (14,05 V)<br>Nooit boven 14,1 Volt!  | 2,25 V / cel (13,5 V)   |
| GNB Absolyte VRLA-AGM<br>Positieve plaat Antimoon<br>Negatieve plaat Calcium | 4 uur 2,35V /cel (14,1 V)<br>Nooit boven 14,1 Volt!  | 2,25 V / cel (13,5 V)   |

met een constante spanning geladen moet worden om de accu voor 95 % vol te krijgen. Dit kan 4 tot 12 uur duren! In de 3e trap wordt de spanning op een veilige waarde gehouden om de accu geheel geladen te krijgen.

Een accu die gedeeltelijk ontladen blijft staan gaat sulfateren waardoor de capaciteit afneemt en de inwendige weerstand van de accu hoger wordt waardoor in de 1e trap te weinig energie in de accu gebracht kan worden.

Het is zeer handig om hier eens aan te meten op het moment dat de accu's nieuw geplaatst worden. Bepaal de ladingstoestand in % en meet stroom en de tijd op die nodig is om 14,4 Volt te bereiken. Bij gel-accu's mag het maximaal 14,2 Volt zijn. Noteer deze waardes in het machinekamerboek. Herhaal dit elk jaar. U zult zien dat de laadtijd tot 14,4 Volt steeds korter wordt waaruit geconstateerd kan worden dat de accu capaciteit terug loopt.

#### Relatie laadspanning en tijd

Het gebruik van een regelaar biedt tevens de gelegenheid om naast de zonnepanelen meerdere energie leveranciers op de accu's aan te sluiten zoals een generator en/of acculader.

#### Laadstroombewaking

Bij het bereiken van de maximale laadspanning gaan de meeste regelaars over tot het pulsformig voeden van de accu. De laadstroom wordt geschakeld tussen de 100% en 0%. Dit noemen we de 2e trap. Al schakelend wordt de laadspanning op bv. 14,1 Volt gehouden bij een FOX 350.

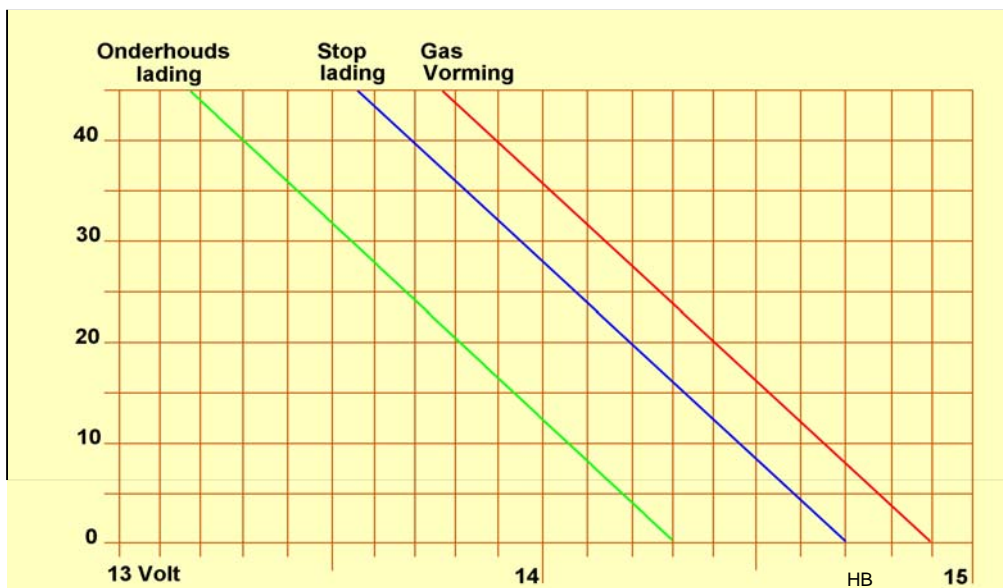
#### Gecontroleerd gassen

Als een accu lang stil staat zakt het zwaardere zuur naar de bodem van de accu waardoor de vloeistof in de accu niet meer homogeen van samenstelling is (stratificatie). Dit is nadelig voor de accu. Door de laadspanning iets te verhogen ontstaan er kleine gasballetjes in het zuur

waardoor de vloeistof weer goed gemengd wordt. Bij de Fox is dit maximaal 20 minuten bij 14,4 Volt. Daarna wordt de laadspanning teruggeregeld tot 14,1 Volt. Een laadgrensspanning van 14,1 volt is een goed compromis tussen snel en efficiënt laden en weinig gassing van de accu.

#### Temperatuurbewaking

Een koude accu mag met een hogere stroom worden geladen.



Relatie accutemperatuur en laadspanning

Tussen + 10 ° C en + 50 ° C moet de laadspanning dalen met 30 mV per °C. In dit gebied is de uitgangsspanning direct afhankelijk van de temperatuur sensor, die de accutemperatuur meet.

Boven de 40 ° C neemt de laadspanning snel af.

Bij 50 ° C mag de lader alleen nog werken als gelijkrichter met een uitgangsspanning van 12,6 Volt.

### Aanpassing van de laadkarakteristiek

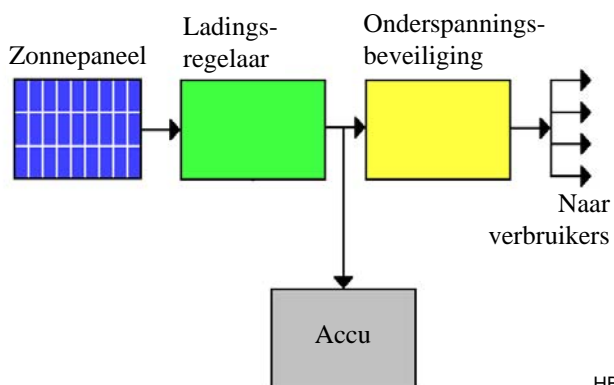
De laadspanning (acculader, zonnepaneel, dynamo, noodgenerator enz) moet afgestemd zijn op het soort accu.

Daarvoor gelden de volgende maximale spanningen:

- \* Antimoon-accu - 14,4 V
- \* Calcium accu - 14,4 tot 14,8 temperatuur - geregeld (ivm CEMF = omgekeerd evenredige electro- afhankelijke kracht)
- \* Gel accu - 14,1 V of lager, temperatuur geregeld
- \* Optima Yellotop – 1 uur 17 Volt! Dit is een te hoge spanning voor de meeste lampjes en andere apparatuur.

In auto's worden daarom spanningsstabilisatoren aangebracht om een en ander heel te houden. In de praktijk komt het er op neer dat een maximale laadspanning van 14,4 Volt wordt toegepast en de lading dus niet optimaal is.

### Principe van de regelaar



HB

### Soorten regelaars

We kunnen in de huidige techniek een onderscheid maken in Maximum Power Point (MPP) of Power Point Tracking (PPT) ook wel Maximum Power Point Tracking (MPPT) regelaar genoemd en de shunt regelaar. Ze hebben naar gelang de toepassing voor- en nadelen.

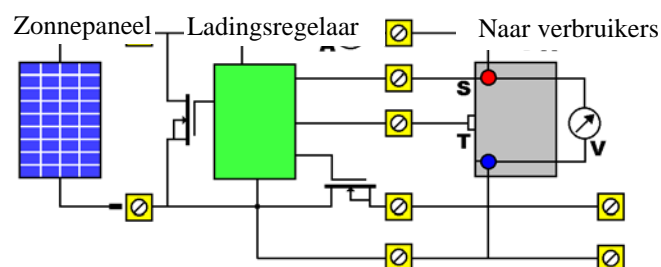
### MPPT regelaar

Een MPPT-regelaar (Maximum Power Point Tracking) bepaalt het optimale werkpunt zodat het maximale vermogen uit het paneel wordt gehaald en zet dit om naar de lagere accuspanning. In feite zal deze regelaar dus meer stroom aan de accu leveren dan bij een standaard regelaar. Het meeste voordeel wordt bereikt bij lage accuspanning. Als de accu voller raakt neemt het voordeel af. Het grote nadeel van de vroegere MPPT regelaars was afgezien van de prijs het hoge eigen stroom verbruik en een relatief laag rendement. Gelukkig zijn de huidige regelaars verder ontwikkeld en door gebruik van hoogwaardige onderdelen zijn de verliezen minder geworden. Ondanks het hogere rendement zijn 30 à 40 % meer lading onder realistische omstandigheden alleen theoretisch en kunnen in de praktijk niet waargemaakt worden. In een

vergelijkingstest tussen shunt en MPPT regelaars uitgevoerd door het Fraunhofer instituut blijkt dat een opbrengst verbetering van 5% realistisch is.

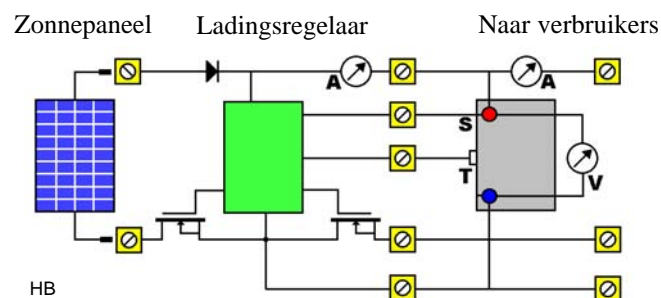
MPPT regelaars leveren meer stroom zolang de accu relatief leeg is. Relatief leeg houdt in dat dit levensduur verkortend is voor de accu. Alleen dan kan de laadspanning zakken om meer stroom te leveren. Het vermogen dat een paneel afgeeft is nu eenmaal afhankelijk van de formule  $Watt = Spanning \text{ maal } Stroom$ . Zodra de spanning van de accu stijgt zal volgens de formule de laadstroom verminderen.. Hoe voller de accu wordt des te meer gaat een MPPT regelaar zich gedragen als een conventionele regelaar. Ook een MPPT regelaar krijgt de accu niet voller dan een conventionele regelaar. Het toepassen van een MPPT regelaar heeft alleen nut als er veelvuldig bij veel zon een (gedeeltelijk) ontladen accu geladen moet worden. Alleen geschikt als er overdag veel energie uit de accu's gehaald wordt door bv een kompressor koelkast. Een MPPT regelaar is minder interessant als de energie vooral in de avonden wordt afgenomen door bv reisverslagen te maken op een of meer laptops en het gelijktijdig luisteren naar de radio. Het is voor 's avonds interessanter om dan muziek te luisteren op de laptop en een kleine platte luidspreker. Dit gebruikt zeer weinig energie!

### Serie of shunt regelaar



HB Shuntregelaar met temperatuurvoeler en diep-ontladingsbeveiliging

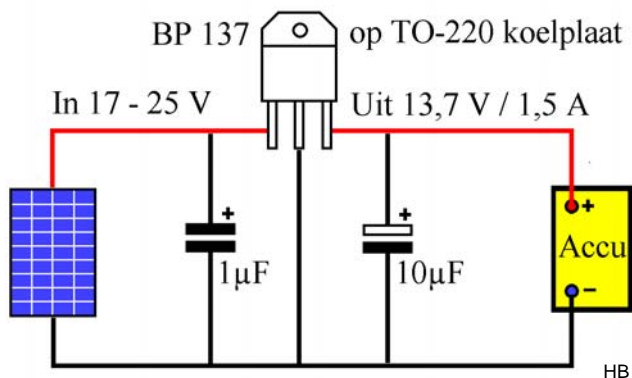
In het geval van een shunt regelaar wordt het paneel, wanneer de accu-spanning boven een bepaalde waarde komt (bv. 14.2 volt) door een shunt schakelaar (meestal een mosfet) kortgesloten. Dit is niet schadelijk voor het zonnepaneel, echter het geeft een bijkomende opwarming van de cellen en bijgevolg een lichte daling van het rendement. Het voordeel is dat je bij lagere spanningen (weinig zonlicht) geen bijkomend verlies hebt. Dit kortsluiten gebeurt pulserend zodat de gemiddelde spanning op die 14.2 volt komt en een deel van de tijd met een bepaalde stroom.



HB Serieregelaar met temperatuurvoeler en diep-ontladingsbeveiliging

Een serie regelaar heeft wel verlies. Hier staat het schakelend element (ook vaak een mosfet) namelijk in serie met de stroomkring. Bij te hoge spanning onderbreekt of koppelt die het paneel los van de accu en gaat vervolgens ook pulserend werken om zo een "gemiddelde" spanning van ca 14,2 volt te handhaven. Er is geen opwarming door het vloeien van de kortsluitstroom door het paneel. Er is wel een klein bijkomend verlies door het niet perfecte gedrag van het schakelend element.

### Een kleine zelfbouw regelaar



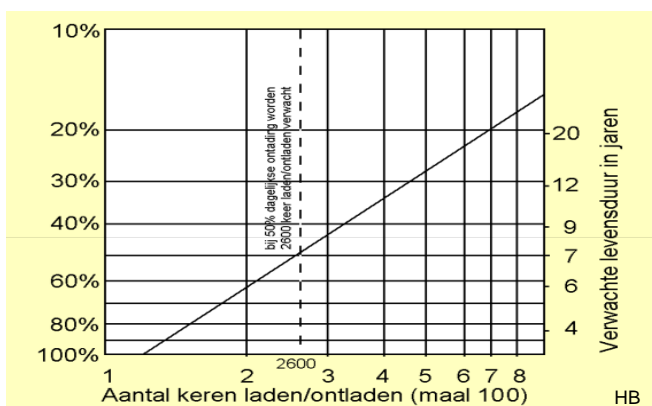
Dit systeem kan o.a. toegepast worden voor kleine systemen zoals een actieve corrosie bescherming en bij gebruik van een koperen anode als bescherming tegen aangroei.

### Onze eisen aan een regelaar

- \* Spanningsbewaking.
- \* Laadstroombewaking.
- \* Gecontroleerd gassen (zuur zakt naar de bodem).
- \* Temperatuurbewaking.
- \* Ondergrens accuspanning bewaking door afschakelen van de gebruiker(s).
- \* Aanpassing van de laadkarakteristiek aan de combinatie zonnepaneel en de aanwezige accu.
- \* Twee uitgangen: voor de start- en de service accu.
- \* Een display om een en ander te kunnen volgen.

### Overwegingen

Daar we prijs stellen op een lange levensduur van de accu's worden deze niet verder ontladen dan 40 %.



Uit de tabel is te constateren dat bij 40 % ontlading de accu ongeveer 3300 keer geladen en ontladen kan worden. Dit klopt wel. Aan boord hebben we een accu die z'n elfde jaar ingaat! Dit houdt in dat een MPPT regelaar geen enkele zin heeft en is er gekozen voor een conventionele regelaar.

We gebruiken geen gelaccu's maar gewone onderhoudsarme calciumaccu's. Ook als we boot of camper in de zomer voor 4 maanden alleen laten worden dit type accu's door de regelaar in een prima conditie gehouden.



De claxon links onder kan bij zwaar weer op zee over de buzzer van de motoralarmen geschakeld worden. Zo kun je ook tijdens storm horen of er iets met de motor is.

Na flink zoeken en vergelijken hebben we gekozen voor de Sunware FOX 350 opbouw regelaar bij Aqua Solar. zie: <http://www.sunware.de/index.php?id=74&L=1>



De regelaar is flink aan de prijs (169 Euro) maar doet wat hij moet doen namelijk zorgen dat de accu's vol zijn en ik heb er geen werk aan.

