



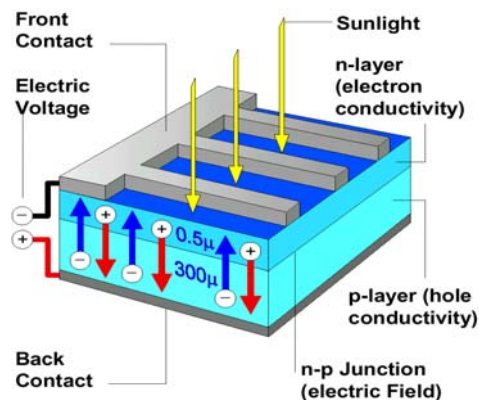
## FOTOVOLTAÏSCHE ZONNE-ENERGIE WERKING EN TECHNOLOGIEËN

De term “fotovoltaïsch” duidt op het fysische proces waardoor lichtenergie wordt omgezet in elektriciteit door de energieoverdracht van fotonen naar elektronen in een materiaal. Het fotovoltaïsche beginsel werd ontdekt door de Franse natuurkundige A. Becquerel in 1839 en beschreven door Albert Einstein in 1905 (die hiervoor in 1921 de Nobelprijs voor de Natuurkunde kreeg).

Het voorvoegsel “foto” komt van het Griekse “phos” en betekent licht. “Volt” komt van het patroniem van Alessandro Volta (1745-1827), een natuurkundige die belangrijke bijdragen heeft geleverd in het onderzoek van elektriciteit. Letterlijk betekent fotovoltaïsch (FV) dus “lichtgevende elektriciteit”.

### 1. WERKING

De basis van de fotovoltaïsche omzetting is de fotovoltaïsche cel, ook zonnecel genoemd. Het is een halfgeleider die lichtenergie afkomstig van de zon – een onuitputtelijke energiebron – omzet in elektrische energie. Het principe is gebaseerd op de eigenschappen van halfgeleiders, waarvan men vele toepassingen vindt in de elektronica: diodes, transistoren en geïntegreerde schakelingen.

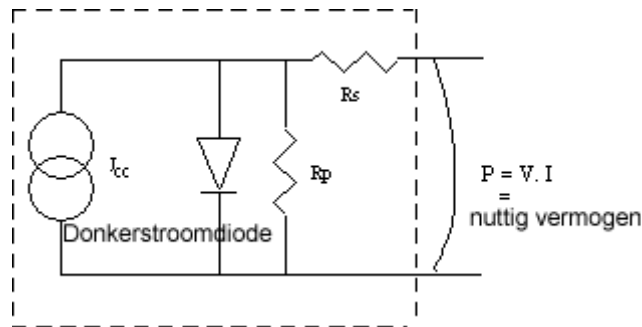


Figuur 1 : Dwarsdoorsnede van een fotovoltaïsche cel

Het fotovoltaïsche effect doet zich voor wanneer een foton wordt geabsorbeerd door een materiaal dat is samengesteld uit gedoteerde n-type (negatief) en p-type (positief) halfgeleiders, pn-overgang genoemd. Als gevolg van de dotering is er in het materiaal een permanent elektrisch veld aanwezig (zoals een magneet een permanent magnetisch veld heeft). Tijdens de wisselwerking van een invallend foton (lichtdeeltje) met de elektronen van het materiaal, draagt het foton zijn energie  $h\nu$  over op het elektron dat is vrijgekomen uit zijn valentieband en wordt het dus blootgesteld aan het intrinsieke elektrische veld. Onder invloed van dit veld migreert het elektron naar de bovenzijde. Het gat dat aldus ontstaat, evolueert in de tegenovergestelde richting. Door elektroden te plaatsen op de boven- en onderzijde, kunnen de elektronen worden aangetrokken en kan deze spanningsbron worden aangewend om elektrische stroom op te wekken.



Figuur 2: Het invallende foton creëert een elektron/gat-paar



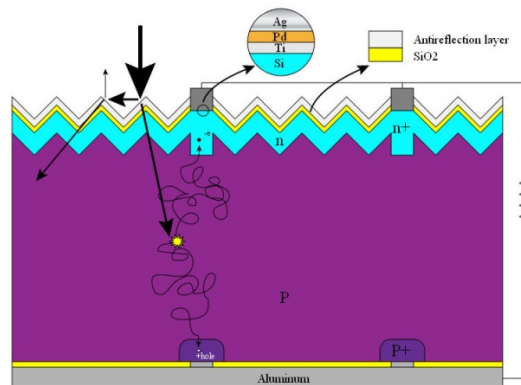
Figuur 3 : Model van een fotovoltaïsche cel: equivalent schema van een diode (van links naar rechts: stroomgenerator, diode, parallelle weerstand  $R_p$  en serie weerstand  $R_s$ )

## 2. FOTOVOLTAÏSCHE CEL

Om het fotovoltaïsche beginsel in de praktijk toe te passen, gebruikt men materialen die de twee basisprocessen optimaliseren:

1. absorptie van het invallende licht
2. aantrekking van elektronen aan de oppervlakte

Fotovoltaïsche cellen zijn vervaardigd uit halfgeleidende materialen, die elektriciteit kunnen geleiden of overbrengen. Meer dan 90% van de huidige zonnecellen zijn gemaakt van de halfgeleider kristallijn silicium. Eén zijde van de cel is **n**-gedoteerd (met bijvoorbeeld fosfor); de andere zijde is **p**-gedoteerd (met bijvoorbeeld boor). Langs beide zijden worden metalen elektroden geplaatst, die de elektronen aantrekken en aldus ontstaat een elektrisch circuit.



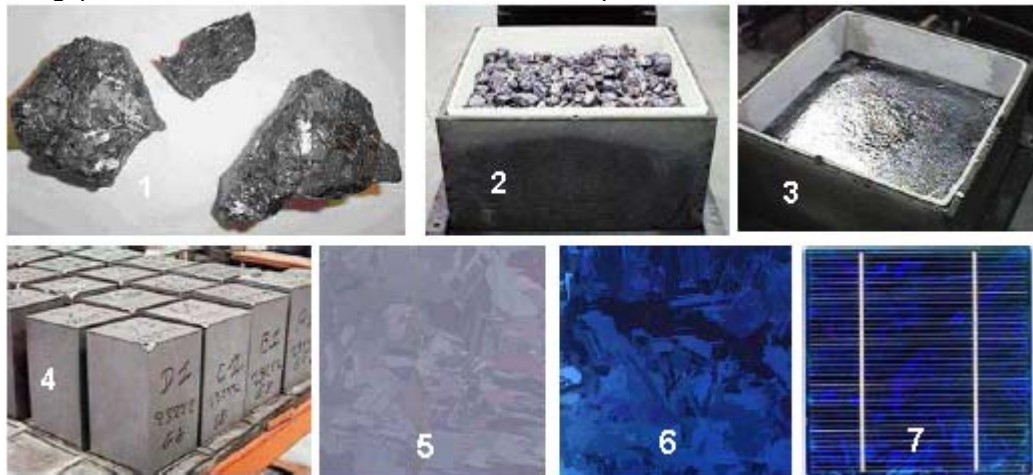
Figuur 4: Schematische doorsnede van een fotovoltaïsche siliciumcel

Om een optimale lichtinval te bekomen, is de bovenkant van de cel behandeld met een reflectiewerende laag. Langs de boven- en onderzijde trekken elektroden de elektronen aan. De technologieën voor fotovoltaïsche cellen verschillen op het vlak van de gebruikte materialen en het productieproces.

## VERSCHILLENDE TECHNOLOGIEËN VOOR FOTOVOLTAÏSCHE CELLEN

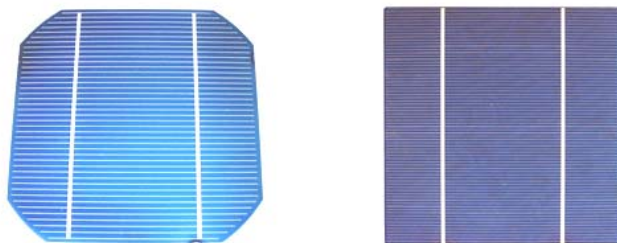
### Eerste generatie: kristallijn silicium (mono en poly)

Deze generatie zonnecellen is gebaseerd op wafers (dunne plakken) monokristallijn silicium. Wafers worden gezaagd uit siliciumblokken. Deze blokken zijn het resultaat van een zuiveringsproces, dat een 99.99999% zuiver silicium oplevert.



*Figuur 5 : Productieproces van zonnecellen: (1) siliciumerts – (2) raffinage (zuiveringsproces) – (3) gesmolten silicium in de vorm van blokken (4) na stolling – (5) wafers verkregen door het zagen van de blokken– (6) fysisch-chemische behandeling van het oppervlak en (7) afgewerkte cel met elektroden*

Volgens de structuur onderscheiden we twee types kristallijne cellen: mono- en polykristallijn. Ze zijn het resultaat van verschillende zuiverings- en stollingsmethoden (Czochralski-methode (Cz) en Siemensmethode). Deze zuiveringsprocessen worden meestal uitgevoerd door verschillende industrietakken en maken gebruik van andere toeleveringsketens.



*Figuur 6: Monokristallijne cel en polykristallijne cel*

Men herkent monokristallijne cellen aan de afgeronde hoeken en het egale uitzicht. Polykristallijne cellen hebben een iriserend uitzicht door de ongelijke oriëntatie van de kristalkernen ten opzichte van het oppervlak.

In de gangbare commerciële zonnepanelen bedraagt de efficiëntie van de omzetting van lichtenergie in elektriciteit 12% à 14% (polykristallijn) tot 13% à 19% (monokristallijn).

## Tweede generatie: CdTe, CIS/ CIGS, amorf en microkristallijn silicium

Het principe van deze generatie zonnecellen is een opeenstapeling van dunne lagen (*thin film*) halfgeleidende materialen. Deze materialen worden op een substraat gelegd volgens methoden zoals PE-CVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*). De dikte van de laag varieert van enkele nanometer tot enkele tientallen micrometer. Oorspronkelijk waren dit dure technologieën die voorbehouden waren voor ruimtevaarttoepassingen (de cellen wegen zeer weinig in verhouding tot hun wattpiekvermogen) en concentratietechnologieën. De toename van de productievolumes had een prijsdaling tot gevolg, waardoor deze technologieën konden concurreren met de kristallijne technologie van de eerste generatie.

Op industriële schaal worden volgende dunnelaagtechnologieën geëxploiteerd (massaproductie):

CdTe : Cadmiumtelluride

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

Dunnefilm silicium: amorf ( $\alpha$ Si) en microkristallijn silicium

Voor deze technologieën bedraagt de efficiëntie van de omzetting van lichtenergie in elektriciteit respectievelijk 6% ( $\alpha$ Si) en 5 à 11% (CdTe). (Dit is de efficiëntie van de individuele cellen; die van de panelen valt iets lager uit als gevolg van de ruimte tussen de cellen.)

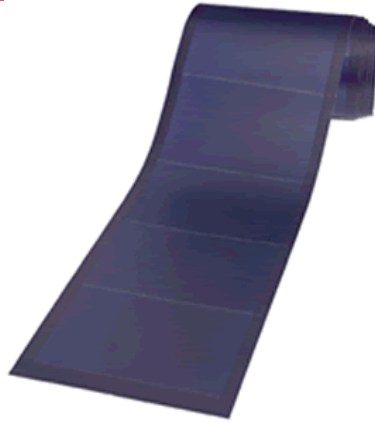
Er dient te worden opgemerkt dat cadmiumtelluride (CdTe) een erg giftige legering is van zware metalen, die – net als lood en kwik – in de voedselketen kan voorkomen. De Europese Unie heeft het gebruik ervan in elektrische apparaten verboden, maar voor FV-cellen werd een uitzondering gemaakt.



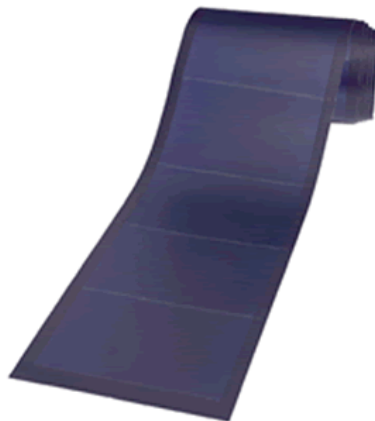
Figuur 7 : Glas-glas panelen van cadmiumtelluride, efficiëntie van 9 tot 11%



Figuur 8 : CIGS-gevel in Wales, efficiëntie van 8,5%



*Figuur 9 : Soepele fotovoltaïsche module van amorfe aSi met een driedubbele pn-overgang, efficiëntie van 6,5% (foto Unisolar)*



*Figuur 10 : Zonnepaneel met een gecombineerde micokristallijn-amorf technologie, efficiëntie van 8,5% (foto Phoenix Solar)*

### **Foto-elektrochemische technologieën (Dye Sensitised Cell en Organic PV)**

Bij organische fotovoltaïsche cellen bestaat minstens de actieve laag uit organische moleculen. We onderscheiden voornamelijk twee types:

- moleculaire organische fotovoltaïsche cellen
- polymere organische fotovoltaïsche cellen

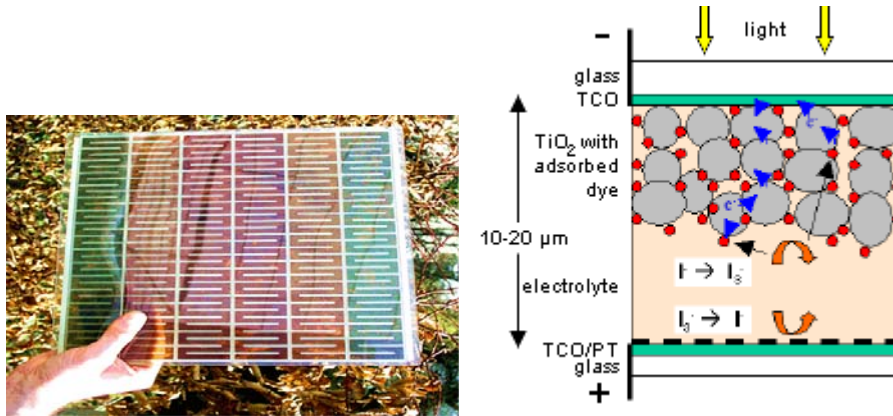
Deze technologieën werden ontwikkeld in de jaren 1990 met als doel de productiekost van elektriciteit te drukken. De kostprijs van organische fotovoltaïsche cellen is laag, omdat er gebruik wordt gemaakt van goedkope organische halfgeleiders en een vereenvoudigd productieproces. Voorts bestaat de mogelijkheid om de cellen op een continue manier te produceren (*roll-to-roll*), waardoor de kostprijs van zonnepanelen drastisch kan worden teruggeschroefd.



*Figuur 11 : Rugzak met een ingewerkte module gebaseerd op de organische DSC-technologie*



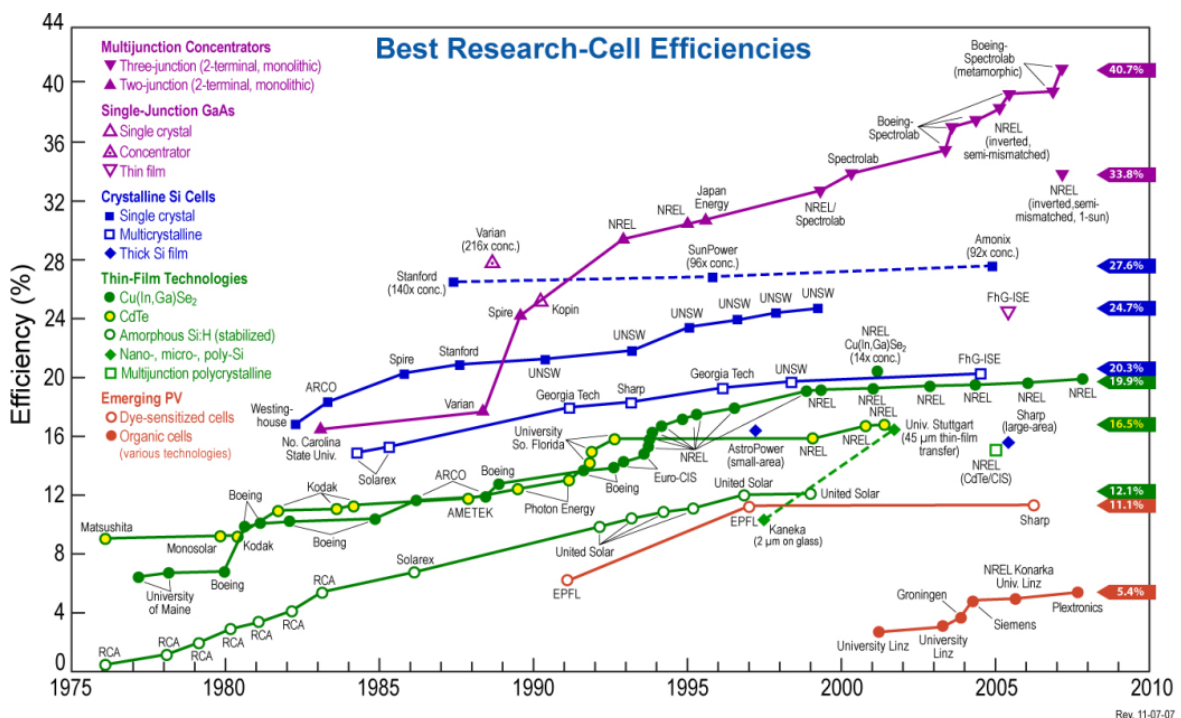
In de praktijk worden deze technologieën vandaag de dag uitsluitend aangewend in commerciële toepassingen in consumentenelektronica (laders voor gsm, walkman, mp3-speler), omdat hier de verwachte levensduur van de zonnecel en het product zelf ongeveer gelijk zijn (2 jaar). Als er in de toekomst kan worden gewerkt aan de verlenging van de levensduur of de verlaging van de productiekosten, zal deze technologie vast een breder toepassingsgebied vinden.



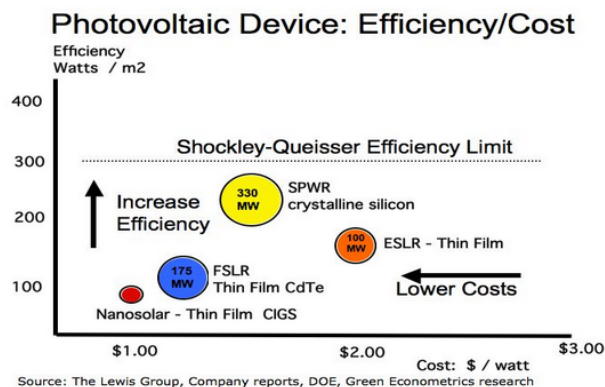
Figuur 12: Dye Sensitized Cell – doorsnede met toelichting

Deze technologie bevindt zich nog in een experimenteel stadium en de hoogste efficiëntie die in laboratoriumonderzoek werd bereikt, bedraagt 4 à 5%. Voor ze kan worden gecommmercialiseerd, moet er dus eerst vooruitgang worden geboekt op het vlak van efficiëntie en inkapseltechniek.

## EVOLUTIE VAN DE RENDEMENTEN VAN VERSCHILLENDE TYPES ZONNECELLEN



Figuur 13: Resultaten van laboratoriumonderzoek naar de evolutie van het rendement van verschillende types zonnecellen



Figuur 14 : Verdeling van de verschillende technologieën volgens prijs en rendement (2007)

Figuren 13 en 14 tonen de evolutie van het rendement van de verschillende types zonnecellen. De grafische voorstellingen tonen de resultaten die in een laboratorium konden worden bereikt voor de beste cellen. De verschillende kleuren komen telkens overeen met een bepaalde technologie. Het rendement van commerciële cellen is uiteraard lager, omdat de productieomstandigheden – anders dan in een laboratorium – worden bepaald door industriële standaarden en technieken.

Figuur 14 geeft de Shockley-Queisser limiet (SQL), dit is de maximale theoretische efficiëntie (rendement) van een zonnecel met pn-overgang.

De afkortingen SPWR, ESLR en FSLR staan voor de namen van de respectieve producenten: *Sunpower*, *Evergreen Solar* en *First Solar inc.* De afkorting CIGS komt van *Copper Indium Gallium Selenium*, een legering die wordt gebruikt door de producent *Nanosolar* (zie figuur) voornamelijk voor de productie van zonnecellen met dunnefilm polykristallijn. De cijfers in de gekleurde cirkels geven (bij benadering) het vermogen van elke technologie.

Men kan stellen dat de “typische” efficiëntie van de verschillende technologieën als volgt zijn:

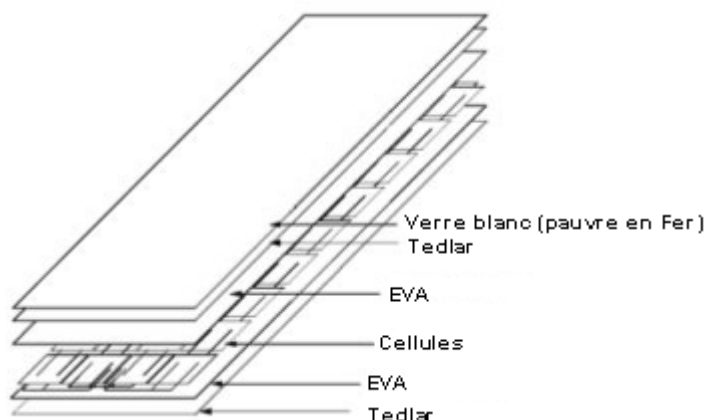
	Amorf Silicium	Cadmium teluride	Cl(G)S	Amorf silicium/ microkristallijn	Mono-kristallijn	Poly-cristallijn
Efficiëntie van de cel bij STC*	5 – 7 %	8 – 11 %	7 – 11 %	8 %	16 – 19 %	14 – 15 %
Efficiëntie van de module bij STC*					13 – 15 %	12 – 14 %
Benodigde oppervlakte om 1 kWp te produceren	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	~ 7 m <sup>2</sup>	~ 8 m <sup>2</sup>

\*STC : standaard testcondities 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, spectrum AM 1,5

Figuur 15 : Typische efficiëntie van de verschillende commerciële fotovoltaïsche technologieën (bron: *Photon International Modules Survey 2009*)

### 3. FOTOVOLTAÏSCHE PANELEN

Kristallijne cellen op zich bieden niet de mogelijkheid om op een efficiënte en duurzame wijze fotovoltaïsche energie op te wekken. De cellen hebben inderdaad een beperkt vermogen (in de grootteorde van 3 W) en zijn uiterst broos en gevoelig aan externe invloeden (corrosie). Om fotovoltaïsche energie op grote schaal te kunnen toepassen, worden de cellen met elkaar in serie verbonden om de spanning te verhogen en in parallel om de stroom te verhogen. Daarna worden ze met behulp van een polymeer (ethyleenvinylacetaat - EVA) ingekapseld tussen een glazen blad en een Tedlar (Polyvinylfluoride - PVF - CH<sub>2</sub>CHF-n-) blad.



*Figuur 16 : Samenstelling van een fotovoltaïsche module met kristallijn silicium*

De afmetingen van de meest courante panelen bedragen 1.580 x 808 mm en ze bevatten 72 cellen met een totaal vermogen van 200 Wp. Er bestaan panelen van andere groottes, gaande van 1 cel (100 mm x 100 mm) tot modellen voor integratie in een gevel van 2.631 x 1.645 (117 kg voor 580 Wp). Nieuw op de markt zijn de panelen van 300 Wp en meer.

In een standaardpaneel zijn de cellen gescheiden in segmenten van telkens ongeveer 18 cellen, die worden beschermd door een diode. Indien een van de cellen in de schaduw komt te liggen, schakelt de diode uit om zo de cellen in het betreffende deel van het paneel te beschermen.



*Figuur 17 : Verschillende types van fotovoltaïsche modules*

Voor het op de markt komt, wordt elk paneel getest in genormaliseerde omstandigheden, Standard Test Conditions (STC) genaamd: straling = 1 000 W/m<sup>2</sup>, t° cellen = 25°, Air Mass<sup>1</sup> = 1,5

<sup>1</sup> Air Mass : optische luchtmassa. Wanneer het rechtstreekse zonlicht door de atmosfeer gaat, wordt het afgezwakt door het effect van absorptie en diffusie door gasmoleculen en atmosferische deeltjes. De mate van afzwakking van de zonnestraling (uitdoving) is afhankelijk van het aantal aanwezige deeltjes en moleculen en eveneens van de lengte van het traject dat de fotonen moeten afleggen voor ze op de FV-cel vallen (dit traject is langer bij zonsopgang dan op de middag). Een optische luchtmassa (AM) van 1 veroorzaakt de uitdoving van de buitenaardse straling die verticaal door de atmosfeer gaat tot op zeeniveau, bij een atmosferische druk van 1 013 mbar. Een AM van 1,5 komt overeen met een zon die in een hoek van 41,8° staat.



#### 4. RECYCLAGE VAN PANELEN

Op het einde van hun levensduur (25 à 30 jaar) zijn de panelen recycleerbaar. Het glas, het aluminium kader, het silicium van de cellen en het koper van de connectoren kunnen worden gerecycleerd. Door recycling wordt de energiekost van de volgende panelen beperkt, want een deel van het extractie- en raffinageproces is niet meer nodig.

De Europese fotovoltaïsche industrie heeft het initiatief *pv cycle* ([www.pvcycle.org](http://www.pvcycle.org)) in het leven geroepen, dat gratis fotovoltaïsche panelen op het einde van hun levensduur recycleert.

#### 5. DE OMVORMER

De omvormer is een fundamenteel onderdeel van een fotovoltaïsche installatie. Dit systeem van vermogenselektronica zet elektrische gelijkstroomenergie, die afkomstig is van de fotovoltaïsche modules, om in elektrische wisselstroomenergie die onmiddellijk en ter plaatse kan worden aangewend of die op het net kan worden geïnjecteerd. Een omvormer moet worden uitgerust met een automatische onderbreker op de verbinding met het net (ontkoppeling/beveiliging): wanneer de spanning van het net terug- of wegvalt, moet de omvormer zichzelf onmiddellijk loskoppelen om een instroom te vermijden (beveiliging). Bovendien moet de omvormer worden uitgerust met een beveiligingsmechanisme tegen uitstroom van gelijkstroom naar het net.

Om veiligheidsredenen moet de geïnstalleerde omvormer voldoen aan de DIN norm VDE 0126 aangepast aan de Belgische context<sup>2</sup>.

Er bestaan verschillende types omvormer afhankelijk van de beoogde toepassing:

Autonome toepassingen (niet verbonden met het net): deze omvormers wekken een signaal op van 220 V amplitude en 50 Hz frequentie waarmee een wisselstroomnet wordt gecreëerd. Zo'n omvormer kan worden verbonden met een belastingsregelaar en batterijen om de energie op te slaan voor verbruik tijdens de nacht.

Toepassingen verbonden met het net: we onderscheiden verschillende types omvormers die met het net worden verbonden:

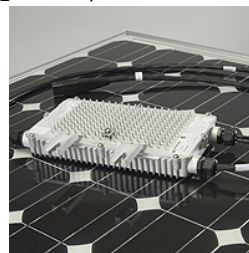
1. Centrale omvormer: deze omvormer zit in een industriële kast en levert een driefasen wisselstroomvermogen van 50 à 500 kVA (1 VA = 1 W als de  $\cos \phi$  gelijk is aan 1, wat het geval is voor deze omvormer. Vaak gebruikt men de eenheid VA voor het wisselstroomgedeelte van het circuit om verwarring te vermijden tussen Wattpiek en "reële" Watt). Dit type omvormer wordt meestal geïnstalleerd in het kader van grote projecten (vanaf 60 kWp) in speciaal daarvoor uitgeruste lokalen. (Figuur 18)



Figuur 18 : Voorbeelden van centrale omvormers (Siemens) van 100 tot 420 kW (ac)

<sup>2</sup> Zie de paragraaf over de reglementering in de tekst van de DIN norm VDE 0126

2. Stringomvormer (stringomvormer): deze omvormer wordt gevoed door verschillende strings en ontwikkelt een vermogen van 0,7 à 11 kVA in een- of driefasenstroom. Deze omvormers die soms buiten staan opgesteld, bestaan in versies met en zonder geïntegreerde transformator. De modellen zonder transformator hebben een hogere omzettingsefficiëntie; de beste modellen bereiken 98% tegenover 96% voor de modellen met transformator. (Figuur 19)



Figuur 19 : Stringomvormer (SMA) zonder transformator Figuur 20: micro-omvormer (Enphase)

3. Module-omvormer: dit type omvormer wordt in de schakelkast rechtstreeks aangesloten op een module. De modules die hiermee zijn uitgerust, zijn op het wisselstroomniveau in parallel geschakeld. Met dit type omvormer bestaat er geen risico op een mismatch tussen modules met uiteenlopende eigenschappen. Aangezien er geen modulestring meer is, beperkt het schaduwprobleem zich bovendien enkel tot de overschaduwde modules. (Figuur 20)

De keuze van een omvormer zal afhangen van diverse overwegingen:

- Omvang van het project (individueel systeem van 1 kWp of een installatie van verscheidene tientallen kWp) en aanbevelingen van de distributienetbeheerder.
- Combineerbaarheid van panelen en omvormer, zowel in termen van spanningsbereik als in termen van compatibiliteit (bijvoorbeeld: vele producenten van amorfe panelen geven de voorkeur aan het gebruik van omvormers met een transformator om te voorkomen dat er gelijkstroom op het net zou worden geïnjecteerd)
- Financieel: er dienen situaties te worden afgewogen, zoals die waarbij een omvormer enerzijds bij de aankoop wel goedkoop is, maar anderzijds tijdens het gebruik niet efficiënt blijkt te zijn.
- Het Europese rendement van de omvormer: een omvormer werkt niet het hele jaar door op volle kracht; de notie “Europees rendement” houdt rekening met de frequentie en de variatie in de zonnestraling, waardoor men twee types omvormer gemakkelijker kan vergelijken.
- Schaduw op de zonnepanelen

De eindgebruiker heeft er alle baat bij zich de werking van de omvormer eigen te maken en onder andere het afleesscherm te leren interpreteren, omdat dat alle productiegegevens en eventuele pannes en storingen weergeeft.