Inventarisatie innovatieve PV-technologieën

Eerste, tweede en derde generatie zonnestroomtechnologieën in vogelvlucht

Stichting Zonne-energie Wageningen
Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO - KNAW)
QING Sustainable

augustus 2014

Inhoudsopgave

Voorwoord **3**

Samenvatting **4**

1. Achtergrond **5**

2. PV-generaties **6**

2.1 1e Generatie 6
2.2 2e Generatie 6
2.3 Roll-to-roll 7
2.4 3e Generatie 7
2.5 Multi-junctie 8
2.6 Tracking 8
2.7 Concentrators 8
2.8 Current matching 8

3. Uitleg technieken **9**

3.1 G1: Monokristallijn Silicium 9
3.2 G1: Polykristallijn Silicium 9
3.3 G2: Amorf Silicium 10
3.4 G2: CIGS 10
3.5 G2: CdTe 11
3.6 G2: Dunne film GaAs 11
3.7 G2: Dunne film Silicium 12
3.8 G2: Micromorf 13
3.9 G2: Dye-sensitized 13
3.10 G2: Organisch 14
3.11 G2: CZTS 14
3.12 G2: Quantum Dot 15

4. Bevindingen **16**

4.1 Record celrendement 16
4.2 Productie celrendement 17
4.3 Efficiëntieverbetering 17
4.4 Producenten 17
4.5 Betrouwbaarheid 17
4.6 Schaarste van grondstoffen 17
4.7 Toxiciteit 18
4.8 Energie terugverdientijd 18

5. Toepassing voor pilot project NIOO **20**

Bijlage 1. Geïnterviewde personen **21**

Bijlage 2. Werking zonnecel **22**

Bijlage 3. Best research cell efficiencies (NREL) **23**

Voorwoord

Deze inventarisatie van innovatieve PV-technologieën brengt twaalf technologieën, verspreid over drie generaties, in kaart.

Aanleiding voor deze inventarisatie vormt het onderzoek van het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW) en Stichting Zonne-energie Wageningen naar de mogelijkheden voor een innovatief zonnestroomsysteem op het gebouw van het NIOO-KNAW in Wageningen. Het onderzoek naar hiervoor geschikte PV-technologieën is uitgevoerd door QING Sustainable.

Met deze publicatie willen wij de in het onderzoek opgedane kennis inzichtelijk maken voor iedereen die geïnteresseerd is in fotovoltaïsche zonne-energie. Zo hopen wij een bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van zonnestroom en de verduurzaming van de energievoorziening in Nederland.

Met zonnige groeten,

Rogier Coenraads, projectleider Stichting Zonne-energie Wageningen

Louise Vet, directeur Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW)

Wageningen, augustus 2014

Stichting Zonne-energie Wageningen
Postbus 1
6700 AA Wageningen
www.zonne-energie-wageningen.nl

Samenvatting

Op het gebied van photovoltaische (PV) cellen vinden veel verschillende ontwikkelingen plaats. Vaak is het lastig in te schatten wat de waarde van de diverse technieken is. In dit rapport worden de verschillende technieken met elkaar vergeleken. Hiermee wordt een handvat geboden aan partijen die overwegen een innovatieve PV-technologie te plaatsen.

Er is een lijst gemaakt van bestaande technieken. Deze technieken zijn ingedeeld naar drie generaties, en zijn vervolgens beoordeeld op verschillende criteria. Deze criteria zijn: innovativiteit, beschikbaarheid, betrouwbaarheid, gebruik van grondstoffen en giftigheid van gebruikte grondstoffen.

De toepassing van een innovatieve PV-technologie in een pilot project bij het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO - KNAW) is als uitgansgpunt genomen. Hieruit zijn drie 2^{e} generatie technieken naar voren gekomen: **dunne film GaAs, dunne film Si** en **micromorf**. Deze kunnen direct toegepast worden. Voor toepassingen in de toekomst kan ook **dye-sensitized** of **organisch** worden overwogen.

QING Sustainable

Martin Ruiter
Laurens-Jan Soer
Pieter Broekema

1. Achtergrond

In opdracht van Stichting Zonne-energie Wageningen en het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO - KNAW) heeft QING een inventarisatie uitgevoerd van inspirerende en vernieuwende PV-technologieën. Van de technologieën is inzichtelijk gemaakt wat hun voor- en nadelen zijn, en hun toekomstperspectief.

Doel van deze inventarisatie is enerzijds om te identificeren welke vernieuwende technologie geschikt is voor toepassing in een PV-pilot project op het dak van het Nederlands Instituut voor Ecologie in Wageningen. Anderzijds is het doel om informatie over bestaande en nieuwe PV-technologieën publiekelijk beschikbaar te maken door middel van deze publicatie.

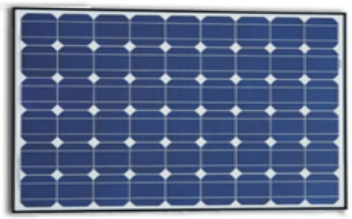
2. PV-generaties

Zonnecellen zijn op te delen in drie generaties. In dit hoofdstuk wordt het onderscheid tussen deze generaties uitgelegd. Daarnaast worden technieken die vaak geassocieerd worden met deze specifieke generaties uitgelegd.

De opdeling in drie generaties wordt vaak gemaakt voor zonnecellen, maar hier bestaat geen strikte definitie voor. De gebruikte indeling kan dus elders op een andere manier gebruikt worden, al wordt meestal een vergelijkbare indeling gebruikt. Sommige zonnecellen zijn in meerdere generaties in te delen. De keuze van indeling is in dit geval een keuze van de auteurs geweest.

2.1 1e Generatie

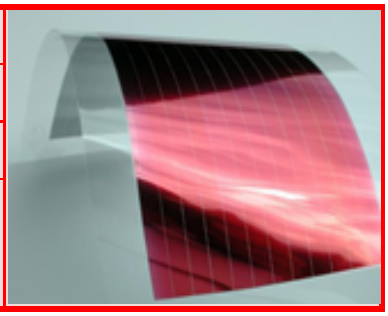
In deze categorie vallen zonnecellen zoals de meeste mensen een zonnecel kennen. Dit zijn relatief zware cellen gebaseerd op silicium. Momenteel worden veel van deze cellen onder kostprijs verkocht. Er is veel aanbod, waardoor verschillende producenten in zwaar weer verkeren.

Marktaandeel:	90%	
Kosten:	1€/W	
Celrendement:	15-20%	
Technieken:	Monokristallijn Si, Polykristallijn Si	

Voordelen	Nadelen
• Volwassen technieken, mede door research uit de halfgeleiderindustrie	• Zware cellen, eisen aan constructie
• Stabiele componenten, die niet zeldzaam of giftig zijn	• Weinig efficientieslagen meer te maken

2.2 2e Generatie

Dit zijn dunne, flexibele zonnecellen. Ze halen doorgaans relatief lage celrendementen, maar hebben ook een lage kostprijs. De eerste commerciële toepassingen beginnen beschikbaar te komen.

Marktaandeel:	10%	
Kosten:	1€/W, in potentie veel goedkoper	
Celrendement:	5-20%	
Technieken:	amorf Si, CIGS, CdTe, dunne film GaAs, micromorf, dye-sensitized, organisch, CZTS en quantum dot	

Voordelen	Nadelen
• Lage productiekosten	• Lage celrendementen
• Veel potentie voor de toekomst	• Weinig op productieschaal beschikbaar
• Flexibel / buigbaar	

2.3 Roll-to-roll

Voor enkele technieken uit de tweede generatie wordt verwacht dat ze op te schalen zijn tot een roll-to-roll productieproces. Deze techniek is vergelijkbaar met de wijze waarop kranten geproduceerd worden.

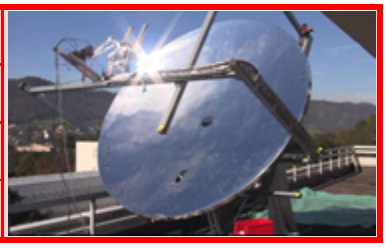
Er wordt een grote rol plastic folie gebruikt die als substraat ingezet wordt. Deze wordt afgerold, en gedurende verschillende productiestappen wordt telkens een andere laag opgebracht. Een manier hiervoor is printen. Inherent aan deze techniek is dat de zonnecel flexibel zal zijn, aangezien het plastic substraat tijdens het proces ook gebogen wordt.

Aan het einde van het productieproces komt een rol zonnecellen uit, die alleen nog op maat geknipt hoeft te worden. Het grote voordeel van deze techniek is dat productiekosten erg laag zijn.

2.4 3e Generatie

Deze cellen kunnen de 34%-efficiëntie limiet (zie Bijlage 2: Werking zonnecel) doorbreken door gebruik te maken van meerdere bandgaps. De meeste van deze cellen verkeren nog in research fase. Momenteel worden ze voornamelijk toegepast voor de ruimtevaart.

Het record celrendement staat momenteel op 44%, voor een triple-junctie GaInP/GaInAs/Ge cel. Dit is een complexe cel, waarbij current matching (0) nog een probleem is. Om economisch rendabel te worden zijn concentrators/trackers (0 en 0) nodig bij dit soort devices.

Marktaandeel:	0%	
Kosten:	100€/W, in potentie veel goedkoper	
Celrendement:	20-70%	
Technieken:	Diverse experimentele technieken	

Voordelen	Nadelen
• Zeer hoge celrendementen haalbaar	• Erg duur, waardoor tracking en concentrator devices nodig zijn
	• Ver van toepassingen op productieschaal

2.5 Multi-junctie

De meeste zonnecellen maken gebruik van één bandgap. (zie Bijlage 1 - Werking zonnecel). Derde generatie zonnecellen maken gebruik van meerdere bandgaps, waardoor theoretisch veel hogere efficienties gehaald kunnen worden.

Dit zijn de multi-junctie cellen. Er zijn verschillende terminologieën die naar dit fenomeen refereren. Een *tandem* cell is synoniem voor multi-junctie. Een *heterojunctie* is een multi-junctie cell met twee verschillende bandgaps. Een *hybride* cel is een speciale vorm van een heterojunctie cel.

In de praktijk worden niet meer dan 3 of 4 lagen gebruikt. Dit komt omdat de devices steeds complexer worden. Een bekend probleem is 'current matching'. De stroom door verschillende lagen moet even groot zijn, anders vindt ophoping van lading in de cel plaats. Dit betekent dat elke laag evenveel elektronen moet pompen. In de praktijk wordt dat bewerkstelligd door het celrendement van andere lagen terug te brengen tot de minst efficiënte laag.

Micromorfe cellen maken gebruik van een dubbele band-gap, om deze reden kunnen ze onder derde generatie worden ingedeeld. Echter vanwege hun dunne-film karakter en commerciële beschikbaarheid zijn ze onder tweede generatie gegroepeerd.

2.6 Tracking

Omdat producten uit deze categorie zo duur zijn, is het vaak kosten efficiënt om tracking en concentrator toepassingen te gebruiken. Een tracking systeem volgt de zon gedurende de dag. Er bestaan 1- en 2-assige tracking systemen. Een twee-assige kan ook de hoek aanpassen afhankelijk van het seizoen en de hoogte van de zon. Een tracking systeem kan een efficiëntieverbetering geven van 35-40%. Dit systeem heeft baat bij direct zonlicht. Bij wolken wordt het licht diffuus, en wordt niet al het licht op de cel geprojecteerd. Hierdoor zal op plekken met veel wolken (o.a. Nederland) een lagere efficiëntie verkregen worden.

2.7 Concentrators

Een concentrator maakt gebruik van spiegels om van een groter oppervlak het zonlicht te concentreren op de zonnecel. Op deze manier zijn er minder cellen nodig om dezelfde efficiëntie te halen. Nadeel van dit soort opstellingen is dat ze vaak meer ruimte kosten en zwaar zijn. Ook voor concentrator installaties geldt dat ze baat hebben bij direct zonlicht.

2.8 Current matching

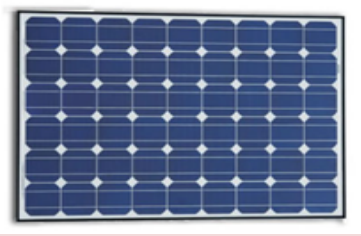
Bij gebruik van meerdere lagen, is het belangrijk dat de stroom van elektronen door elke laag even groot is. Als dit niet zo is, zal ergens een ophoping van elektronen plaatsvinden wat een goede werking van de cel verhindert. Dit is een probleem wat complexer wordt met meer lagen.

3. Uitleg technieken

De verschillende generaties zonnecellen zijn verder onder te verdelen in specifieke technologieën. Er zijn talloze combinaties en varianten op zonnecellen mogelijk. Er bestaan talloze initiatieven in onderzoeksstadium, die niet allemaal in een van de beschreven categorieën in te delen zijn. In onderstaande indeling is getracht een zo compleet mogelijke indeling te maken van innovatieve en veelbelovende technieken. Derde generatie technieken zijn niet meegenomen in dit overzicht, aangezien deze door het concentrator-karakter vaak geen toepassing voor op daken hebben. Daarnaast zijn er meestal geen commerciële toepassingen.

3.1 G1: Monokristallijn Silicium

Monokristallijn Silicium is samen met polykristallijn silicium het meest voorkomende type zonnecel. Samen beslaan ze zo'n 90% van de zonnecellen markt. Ze zijn bewezen betrouwbaar en relatief goedkoop. Er zijn echter weinig innovaties meer te verwachten bij deze zonnecellen. De enige kostenbesparing die nog gemaakt kan worden is door opschaling van productie.

Record celrendement:	28%	
Product celrendement:	19%	
Producenten:	Suntech, Yingli Solar, Trina Solar, Sharp, SunPower, Hanwha SolarOne	

Voordelen	Nadelen
• Goedkoop	• Zwaar; eisen aan constructie
• Betrouwbaar	• Weinig efficientieslagen meer te maken

3.2 G1: Polykristallijn Silicium

Polykristallijne zonnecellen lijken erg veel op monokristallijne zonnecellen. In het productieproces worden echter concessies gedaan aan de zuiverheid van het silicium. Hierdoor ontstaan meerdere kristallen binnen een zonnecel. Dit bespaart aanzienlijk in de benodigde energie in het productieproces, echter verlaagt het de efficiëntie van de zonnecel. Daarnaast wordt de onregelmatige vorm door velen als esthetisch minder aantrekkelijk ervaren.

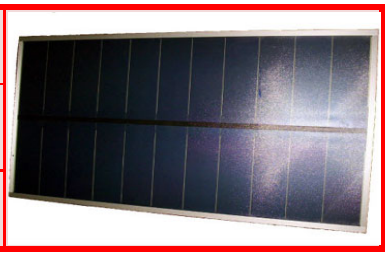
Record celrendement:	21%	
Product celrendement:	16%	
Producenten:	Suntech, Yingli Solar, Trina Solar, Sharp, Hanwha SolarOne, REC	

Voordelen	Nadelen
• Goedkoop	• Zwaar; eisen aan constructie
• Betrouwbaar	• Weinig efficientieslagen meer te maken

3.3 G2: Amorf Silicium

Amorf silicium haalt veel lagere celrendementen dan kristallijn silicium. Hiervoor krijgt het relatief lage productiekosten terug. Daarnaast is het een techniek die flexibel toe te passen is. Hierdoor is het geschikt voor lage energietoepassingen, bijvoorbeeld rekenmachines.

Er zijn weinig ontwikkelingen en het marktaandeel neemt af. Amorf silicium wordt gezien als een techniek waar geen innovaties meer te verwachten zijn. Relatief veel bedrijven in a-Si zijn failliet gegaan de afgelopen jaren.

Record celrendement:	13%	
Product celrendement:	7%	
Producenten:	Sungen	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Geen ontwikkelingen; dode technologie

3.4 G2: CIGS

CIGS is samen met CdTe en a-Si de enige techniek die commercieel breed beschikbaar is naast de gebruikelijke mono- en polykristallijne silicium-toepassingen. De afkorting staat voor de elementen waar de cel uit is opgebouwd: Koper (C), Indium (I), Gallium (G) en Selenium (S). Soms wordt de techniek ook wel CIS genoemd.

Het productieproces wordt als lastig beheersbaar gezien. De afgelopen jaren heeft de techniek een grote groei in marktaandeel gezien. Verwacht wordt dat deze groei naar de toekomst zich door zal zetten. Er worden echter wel schaarse metalen in dit type cel gebruikt, wat in de toekomst mogelijk beperkingen met zich mee zal brengen.

In de afgelopen jaren zijn er veel producenten in CIGS failliet gegaan, hiervan heeft Hanergy er een aantal over genomen.

Record celrendement:	20%	
Product celrendement:	13%	
Producenten:	Hanergy, Solar Frontier	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Indium en Selenide zeldzaam
• Groeiende markt	

3.5 G2: CdTe

Cadmium-Tellurium cellen zijn commercieel goed beschikbaar, en hun marktaandeel stijgt. Deze dunnefilm technologie wordt vaak als directe concurrent van CIGS gezien. Het productieproces is makkelijker beheersbaar, echter wordt het giftige Cadmium gebruikt, en het zeldzame Tellurium. Ze behalen relatief hoge efficienties bij hogere temperaturen ten opzichte van andere cellen.

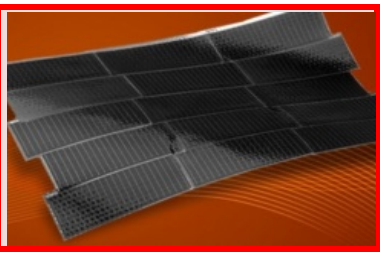
Record celrendement:	19%	
Product celrendement:	11%	
Producenten:	First Solar	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Cadmium is giftig
	• Tellurium is zeldzaam

3.6 G2: Dunne film GaAs

Gallium Arsenide (GaAs) is een bekend product uit de chip-industrie en wordt soms als alternatief voor Si gebruikt. Sommige elektrische eigenschappen zijn superieur aan Si, maar het is veel duurder. Nieuw aan deze techniek is dat het als dunne film wordt toegepast, waardoor hele dunne lagen GaAs worden geproduceerd, waardoor veel minder materiaal nodig is. De gebruikte techniek hiervoor heet ‘epitaxial liftoff’.

Arsenide is een giftig element, echter in gebonden vorm als GaAs zou het geen gezondheidsproblemen op moeten leveren. Ook door het gebruik van een dunne laag zal het gezondheidsrisico beperkt worden.

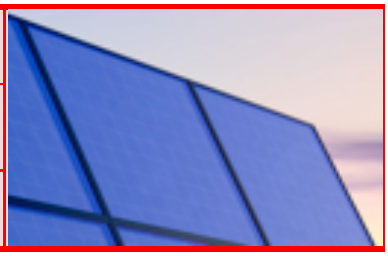
Record celrendement:	37%	
Product celrendement:	24%	
Producenten:	Alta devices	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Arsenide is giftig
• Hoge efficientie	
• Commercieel innovatieve producten beschikbaar (Alta devices)	

3.7 G2: Dunne film Silicium

Dunne film silicium cellen maken gebruik van een vergelijkbare techniek als dunne film GaAs cellen, alleen op basis van silicium. Hiermee worden hoge efficienties gehaald, echter nog niet zo hoog als GaAs. In potentie is het een techniek met lage productiekosten, aangezien er slechts silicium wordt gebruikt.

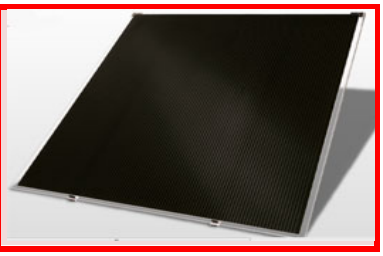
De techniek wordt ontwikkeld door Solexel en is nog niet commercieel beschikbaar.

Record celrendement:	20%	
Product celrendement:	n/a	
Producenten:	Solexel	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Nog niet commercieel beschikbaar
• Relatief hoge efficientie	
• In potentie goedkoop	

3.8 G2: Micromorf

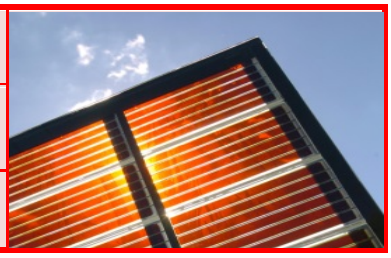
Micromorf is een hybride cel van twee voorgenoemde technieken: microkristallijn Si en amorf Si. Beide hebben een eigen bandgap, waarmee deze heterojunctie cel in theorie hoge efficiënties mogelijk maakt. De techniek wordt als dunne film toegepast, en heeft geen problemen met toxiciteit of schaarste van grondstoffen aangezien ze puur op silicium is gebaseerd.

Record celrendement:	12%	
Product celrendement:	9%	
Producenten:	Solexel, Sharp, Tel Solar, Invetux, Hyet Solar	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Geen
• Silicium is ongelimiteerd beschikbaar	
• Niet giftig	
• Commercieel beschikbaar	

3.9 G2: Dye-sensitized

Dye-sensitized solar cells (DSSC) zijn dunne film zonnecellen die gebaseerd zijn op een techniek die vergelijkbaar is met de manier waarop planten zonlicht gebruiken voor energie. De dye vormt de actieve laag, en is vloeibaar. De techniek is geschikt voor roll-to-roll technieken. Momenteel zijn er nog technische uitdagingen om stabiele cellen te maken. Ze kunnen tevens toegepast worden voor doorzichtige doeleinden. Volgens de meest recente NREL ligt het record celrendement op 11%, echter is er onlangs een artikel gepubliceerd die spreekt over een record-efficiëntie van 15%.

Record celrendement:	11% (15%)	
Product celrendement:	11%	
Producenten:	Dyesol, Sony	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Nog niet stabiel
• Roll-to-roll technologie; goedkoop en opschaalbaar	• Gebruik van zeldzame metalen nog niet geëlimineerd
• Doorzichtig toepasbaar	

3.10 G2: Organisch

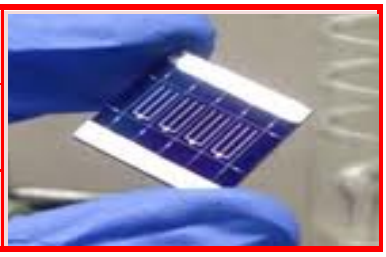
Organische zonnecellen (OPV) bezitten een gesynthetiseerd organisch polymeer. Ze zijn geschikt voor Roll-to-roll technologie. De grootste producent (Konarka) is in 2012 failliet verklaard.

Record celrendement:	11%	
Product celrendement:	n/a	
Producenten:	Konarka, Heliatek, Solarmer	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Nog niet stabiel/betrouwbaar
• Roll-to-roll technologie; goedkoop en opschaalbaar	
• Verschillende startups	

3.11 G2: CZTS

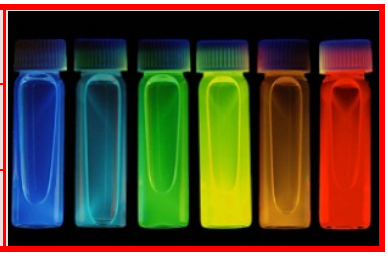
CZTS (Koper Zink Tin Sulfide) is een variant op CIGS. In deze technologie zijn de zeldzame metalen gesubstitueerd door elementen die wel ruim verkrijgbaar zijn. De ontwikkeling van de technologie wordt geleid door IBM. De technologie bevindt zich nog in onderzoeksstadium en is nog niet markt-rijp.

Record celrendement:	11%	
Product celrendement:	n/a	
Producenten:	IBM	

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Nog in onderzoeksstadium
• Geen zeldzame materialen	

3.12 G2: Quantum Dot

Quantum dot cellen zijn een nieuwe technologie die zich nog in onderzoeksfase bevindt. In quantum dot cellen is de band-gap geen materiaal-eigenschap, maar een ontwerp-eigenschap. Dit biedt mogelijkheden om theoretisch hoge efficienties te halen.

Record celrendement:	7%	
Product celrendement:	n/a	
Producenten:		

Voordelen	Nadelen
• Dunne film; weinig materiaal nodig	• Nog in onderzoeksstadium
• Geen zeldzame materialen	

4. Bevindingen

In Figuur 1 staat het resultaat van de beschreven analyse. De blauwe kolommen geven algemene informatie over de technieken. De vijf kolommen daarna geven potentiele selectiecriteria. Hierbij stelt groen een positief advies voor, en rood een negatief advies.

	Techniek	Record celrendement	Productie celrendement	Efficientie-verbetering	Producenten	Energie terugvendientijd	Betrouwbaarheid	Schaarste	Toxiciteit
1e generatie	Monokristallijn Si	28%	19%	Geen	Suntech, Yingli Solar, Trina Solar, Sharp, SunPower, Hanwha SolarOne	1,5 - 5,5 jaar	Goed	-	-
	Polykristallijn Si	20.4%	15%	Geen	Suntech, Yingli Solar, Trina Solar, Sharp, Hanwha SolarOne, REC	1,5 - 5,5 jaar	Goed	-	-
2e generatie	Amorf Si	13%	n/a	Weinig	Sungen	2,5 – 9,4 jaar	Goed	-	-
	CIGS	29%	12%	Geen	Hanergy, Solar Frontier	< 2,5 jaar	Slecht	Indium, Selenium	-
	CdTe	19%	11%	Weinig	First Solar	1,5 - 2,3 jaar	Goed	Tellurium	Cadmium
	Dunne film GaAs	37%	24%	Veel	Alta devices	< 2,5 jaar	Onbekend	-	Arsenide
	Dunne film Si	20%	n/a	Veel	Solexel	< 2,5 jaar	Onbekend	-	-
	Micromorf	12%	9%	Veel	Sharp, Tel Solar, Inventux, HyET	< 2,5 jaar	Onbekend	-	-
	Dye-Sensitized	15.7%	10%	Veel	Dyesol, Sony, e.a.	< 2,5 jaar	Slecht	Platinum, Ruthenium	-
	Organisch	11%	n/a	Veel	Konarka, Heliatek	< 2,5 jaar	Slecht	-	-
	CZTS	11%	n/a	Veel	IBM	< 2,5 jaar	Onbekend	-	-
	Quantum Dot	7%	n/a	Veel	Geen	< 2,5 jaar	Onbekend	-	-
3e	Niet commercieel beschikbaar			Veel	Geen	Onbekend	Onbekend	Divers	Divers

Figuur 1: Overzicht van technieken, selectiecriteria en resultaat

4.1 Record celrendement

Record celrendementen (zie Bijlage 3: Best research cell efficiencies (NREL)) worden getoetst door het NREL (National Renewable Energy Laboratory). Deze is als uitgangspunt genomen om te toetsen of er recentelijk veel efficiëntieslagen zijn gemaakt voor een bepaalde techniek.

Voor de verschillende technieken is gekeken hoeveel producenten er beschikbaar zijn. Daarbij is ook gelet op het karakter van de onderneming – is het een startup of een grotere producent.

4.2 Productie celrendement

Productie celrendementen zijn een inschatting van wat voor rendement zonnecellen op de markt beschikbaar zijn. Deze is gebaseerd op informatie van fabrikanten.

4.3 Efficiëntieverbetering

Als vanuit de NREL grafiek blijkt dat er grote efficientieslagen gehaald zijn in de afgelopen jaren, dan wordt er vanuit gegaan dat er veel ontwikkelingen zijn voor deze technologie. Dit duidt op veel innovatie binnen de genoemde techniek.

4.4 Producenten

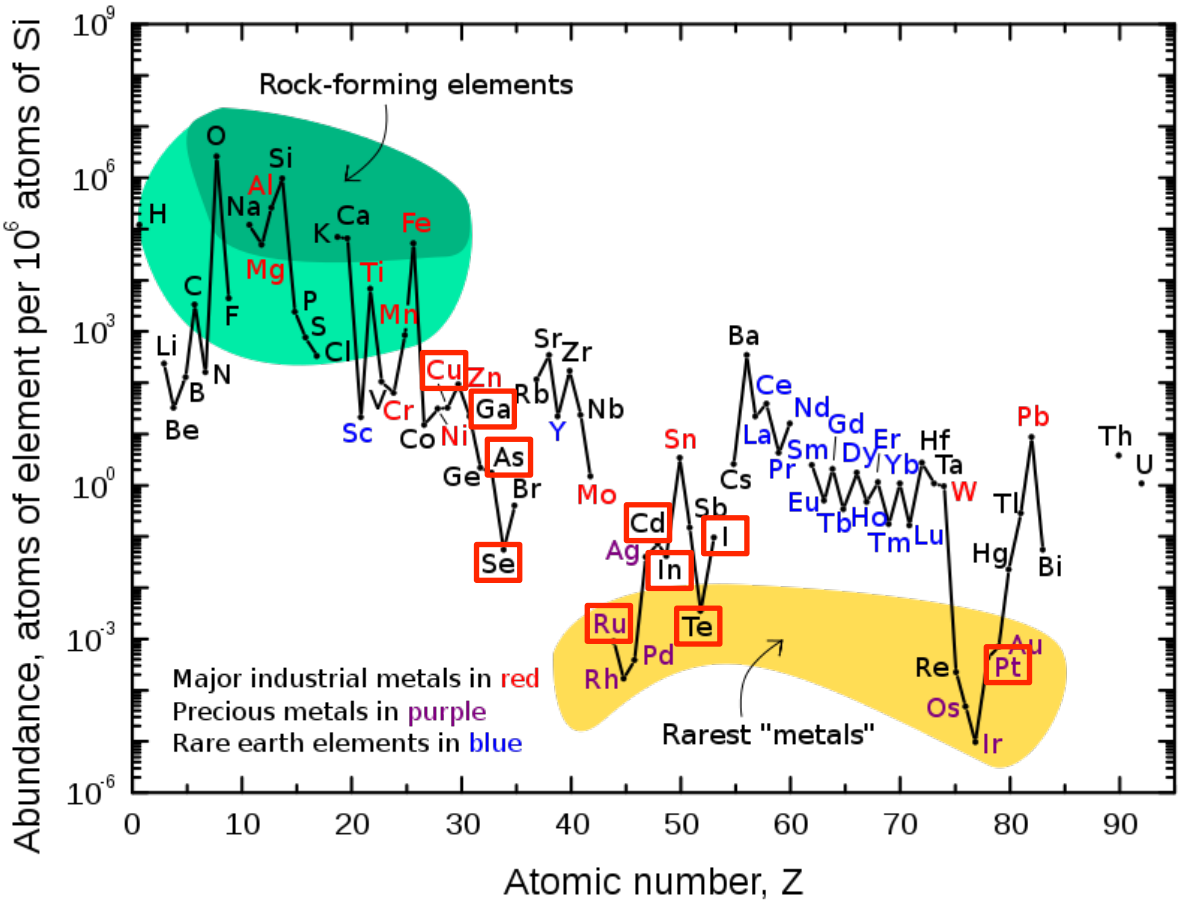
Als er een of meerdere startups zijn die de techniek ontwikkelen, is het aannemelijk dat er een product geleverd kan worden. Tevens ondersteunt dit scenario de innovativiteit van het product. Als voor een bepaalde techniek veel grotere producenten beschikbaar zijn (bijvoorbeeld voor traditionele Si zonnecellen), kan er een product geleverd worden. Echter zijn dit doorgaans geen innovatieve producten. Om deze reden zijn technieken met veel producenten als rood gemarkeerd.

4.5 Betrouwbaarheid

Voor de meeste innovatieve technieken geldt dat de cellen zich niet bewezen hebben op gebied van betrouwbaarheid. Van huidige zonnecellen wordt verwacht dat ze >10 jaar mee gaan. Van enkele technieken (organisch en dye sensitized) is bekend dat ze te maken hebben met een zeer korte levensduur. De research bij deze cellen is er dan ook op gericht om die te vergroten. Van cellen waarbij er geen bekende problemen zijn op gebied van betrouwbaarheid is er vanuit gegaan dat deze op orde is. De praktijk zou echter anders uit kunnen wijzen.

4.6 Schaarste van grondstoffen

Van CdTe en CIGS zonnecellen is bekend dat ze niet onbeperkt opgeschaald kunnen worden in verband met schaarste van de gebruikte grondstoffen. Voor CdTe betreft dat Tellurium en voor CIGS Indium en Selenium. Als reactie hierop wordt de techniek CZTS ontwikkeld, die vergelijkbaar is met CIGS, maar de zeldzame grondstoffen probeert te elimineren.



Figuur 2: Schaarste van grondstoffen, rood omlijnde elementen worden gebruikt voor zonnecellen

In Figuur 2 wordt aangegeven hoeveel metalen voorkomen op aarde. Hoe lager het element in de grafiek staat (y-as), des te zeldzamer deze is. Uiteraard is het ook relevant hoeveel materiaal nodig is om een zonnecel te maken, en hoe intensief het is om dit metaal te winnen; dit is echter niet meegenomen in de beschouwing.

Omlijnde elementen in de figuur worden gebruikt voor zonnecellen. Voor dye-sensitized zonnecellen wordt gekeken of de gebruikte metalen Platinum en Ruthenium geëlimineerd kunnen worden. In derde generatie zonnecellen worden ook veel zeldzame metalen gebruikt.

4.7 Toxiciteit

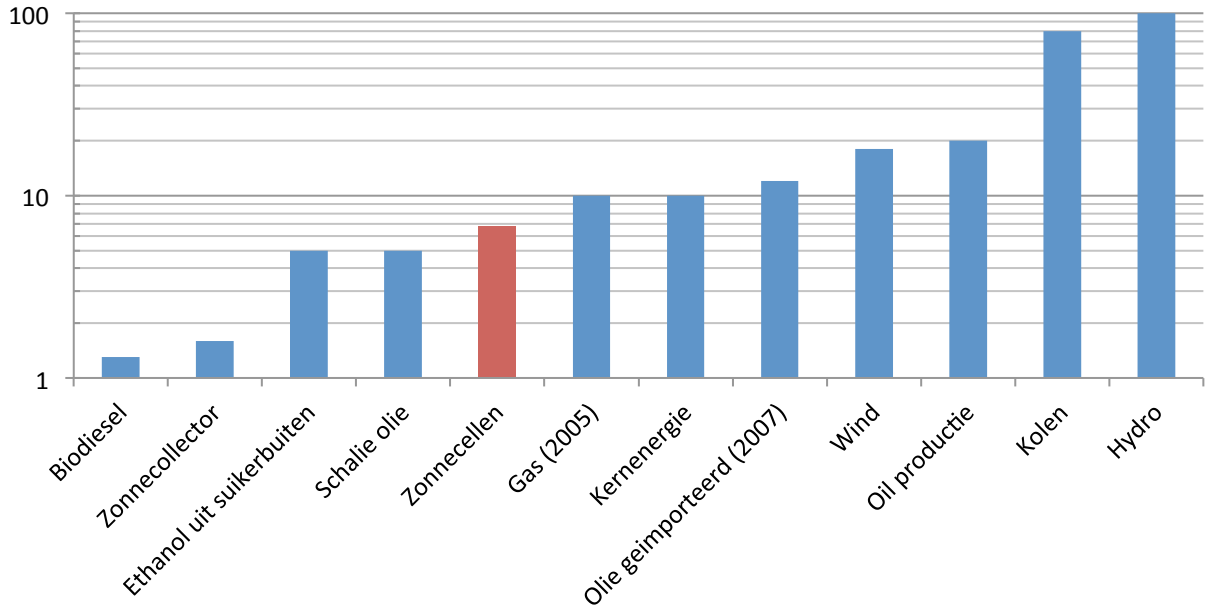
Van een aantal elementen die gebruikt worden in zonnecellen is bekend dat ze giftig zijn. Dit is meegenomen in de analyse.

4.8 Energie terugverdientijd

Bij de productie van zonnecellen wordt energie verbruikt. Het is interessant om te kijken hoe lang een zonnecel in bedrijf moet zijn om de geïnvesteerde energie terug te verdienen. In het Engels wordt hiervoor

de term EROEI gebruikt: Energy Returned on Energy Invested. Hier komt een verhouding uit, waarmee verschillende energiebronnen met elkaar vergeleken kunnen worden.
Er bestaat geen vaste standaard om de EROEI te berekenen, en dit blijkt in de praktijk ook erg lastig. De berekening is erg afhankelijk van aannames. Zo heeft een zonnepaneel in Zuid-Europa bijvoorbeeld een veel snellere terugverdientijd dan in Nederland.

Voor kristallijne (eerste generatie) zonnepanelen lopen de schattingen voor een EROEI uiteen van 5.5:1 tot 19:1[1]. Dit betekent dat een dergelijke zonnepaneel 5,5 tot 19 keer zoveel energie produceert tijdens zijn levensduur, dan dat de productie gekost heeft. Bij een levensduur van 30 jaar geeft dit een energieterugverdientijd van 1,5 tot 5,5 jaar. Figuur 2 geeft een beeld van de EROEI van verschillende energiebronnen.



Figuur 3: EROEI van verschillende energiebronnen[2]

Voor dunne film PV-systemen wordt veel minder energie gebruikt in het productieproces. Om deze reden is een veel hogere EROEI te verwachten, en dus een lagere energie terugverdientijd. Voor CdTe worden terugverdientijden van 1,5 tot 2,3 jaar gerapporteerd.[3] In dit rapport gaan we ervan uit dat alle dunne-film technologieën een terugverdientijd hebben van minder dan 2,5 jaar, oftewel een EROEI van minimaal 12 uitgaande van een levensduur van 30 jaar . Een uitzondering hierop vormt a-Si, schattingen van de terugverdientijd hierop lopen uiteen van 2,5 tot 9,4 jaar.

[1] EROEI of crystalline silicon photovoltaics – variations under different assumptions regarding manufacturing energy inputs and energy output – Johan Lundin, Uppsala Universitet
[2] Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. (2010). "Year in review EROI or energy return on (energy) invested". Annals of the New York Academy of Sciences 1185: 102–118
3 “Global Energy Modelling - A Biophysical Approach”, PhD Thesis Michael Dale, Stanford University

5. Toepassing voor pilot project NIOO

Het NIOO wil op korte termijn een pilot plaatsen van zonnecellen. Ze stelt de volgende eisen aan een zonneceltechniek:

- Innovatief
- (Test)producten beschikbaar

Om kwantificeerbaar te maken hoe innovatief een techniek is, is gekeken naar de ontwikkelingen van efficiëntie-records. Als er veel slagen worden gemaakt, is het aannemelijk dat er veel research wordt gedaan naar deze techniek. Een techniek wordt gezien als uitontwikkeld als er de afgelopen 5 jaar *geen* verbeteringen zijn geweest in de efficiëntie.

Het blijkt dat vijf technieken uit de tweede generatie technieken aan deze criteria voldoen: (zie Figuur 1)

- Micromorf silicium
- Dunne film GaAs
- Dunne film Si
- Organisch
- Dye Sensitized

Dye-sensitized en **organische** zonnecellen hebben nog verschillende technische uitdagingen, en vormen interessante kandidaten voor de middellange termijn. Op dit moment hebben beide nog last van betrouwbaarheidsproblemen. Daarbij zijn dye-sensitized zonnecellen nog afhankelijk van zeldzame metalen. De ontwikkeling bij deze cellen gaat hard, maar zijn momenteel nog erg experimenteel. Het grote voordeel van beide technieken is dat ze zich lenen voor roll-to-roll productie. Binnen nu en een aantal jaar zouden deze technieken kunnen doorbreken en hebben de potentie een revolutionair product te worden.

Van **micromorfe** en **dunne film GaAs** zonnecellen worden de eerste producten momenteel in de markt gezet. Deze innovatieve producten zijn direct beschikbaar.

Van **dunne film Si** zonnecellen is slechts een producent beschikbaar. Hiervan is niet goed bekend of deze kan leveren. Als dit mogelijk is, vormt dit een hele goede kandidaat.

Bijlage 1. Geïnterviewde personen

Interviewees	Achtergrond
• Dr. René van Swaaij	• TU Delft – PV material and devices • Dunne film silicium technologieën
• Prof. dr. ir. Rene Janssen	• TU Eindhoven – Department of Applied Physics • Organische zonnecellen
• M.Sc. Megan Tsai	• Energy master Stanford University, werkzaam bij Solexel • Stages bij diverse zonnecel producenten
• Bas Vet	• DNV KEMA, consultant New Energy Technologies • Deelnemer Nationaal Actieplan Zonnestroom
• Edward Hamers	• Hyet Solar, producent micromorfe zonnecellen
• Peter Penning	• Suncycle, ontwikkelaar hybride zonnecel

Bijlage 2. Werking zonnecel

De meeste zonnecellen maken gebruik van een specifiek materiaal dat licht van een specifieke frequentie absorbeert. Dit wordt ook wel de band-gap genoemd. Voor silicium ligt deze bandgap op 1.1eV. Dit betekent dat licht met minder energie (hogere golflengte) niet geabsorbeerd kan worden. Licht met meer energie (lagere golflengte) kan wel geabsorbeerd worden, maar de energie boven de 1.1eV gaat verloren.

In Figuur 3 is het spectrum van zonlicht weergegeven. Het groene vlak geeft aan welke energie effectief omgezet kan worden door een silicium zonnecel. De rest gaat verloren in de vorm van warmte. Door deze beperking is er een efficiëntielimiet aan zonnecellen. Deze wordt de Shockley-Queisser limiet genoemd. Bij zonlicht is de hoogste efficiëntie haalbaar bij een bandgap van 1,34eV, hierbij ligt de maximaal haalbare efficientie op 34%. Bij een silicium zonnecel van 1.1eV ligt de maximaal haalbare efficiëntie op 29%.

Bij gebruik van meerdere materialen, en daarmee meerdere bandgaps kan in theorie een hogere efficiëntie gehaald worden. Van dit fenomeen wordt gebruik gemaakt in derde generatie zonnecellen.

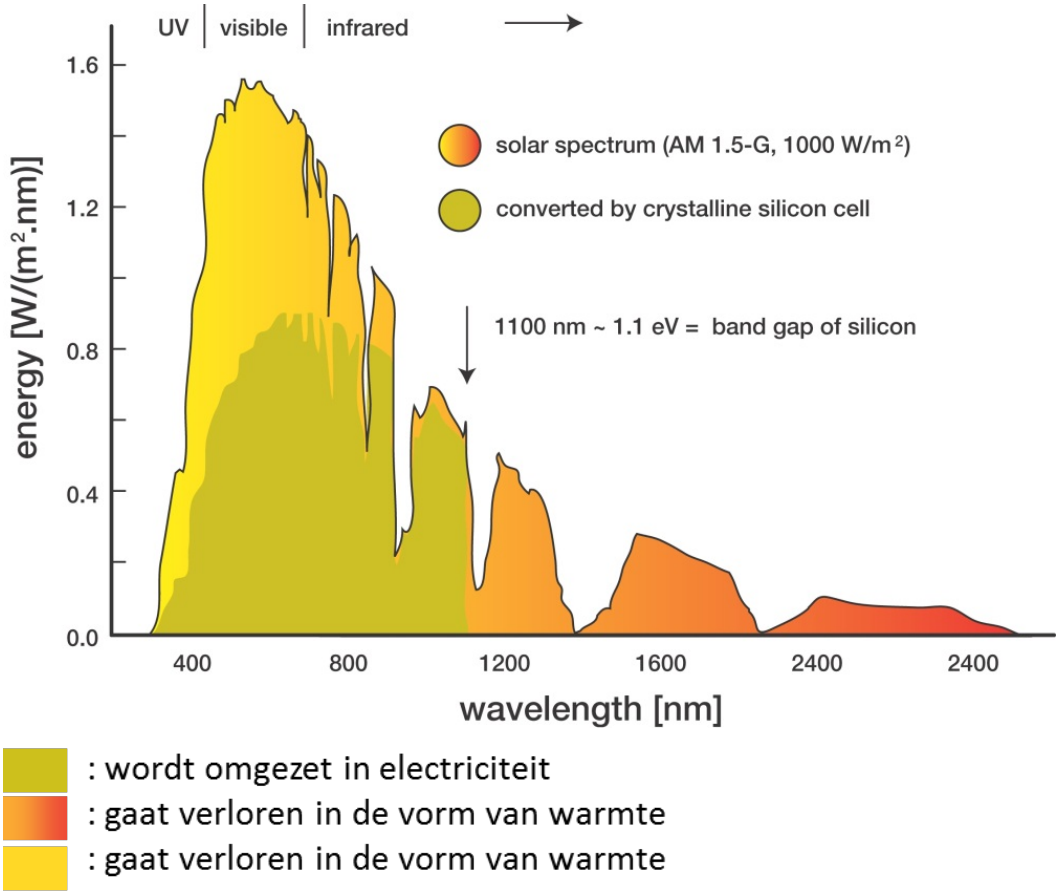
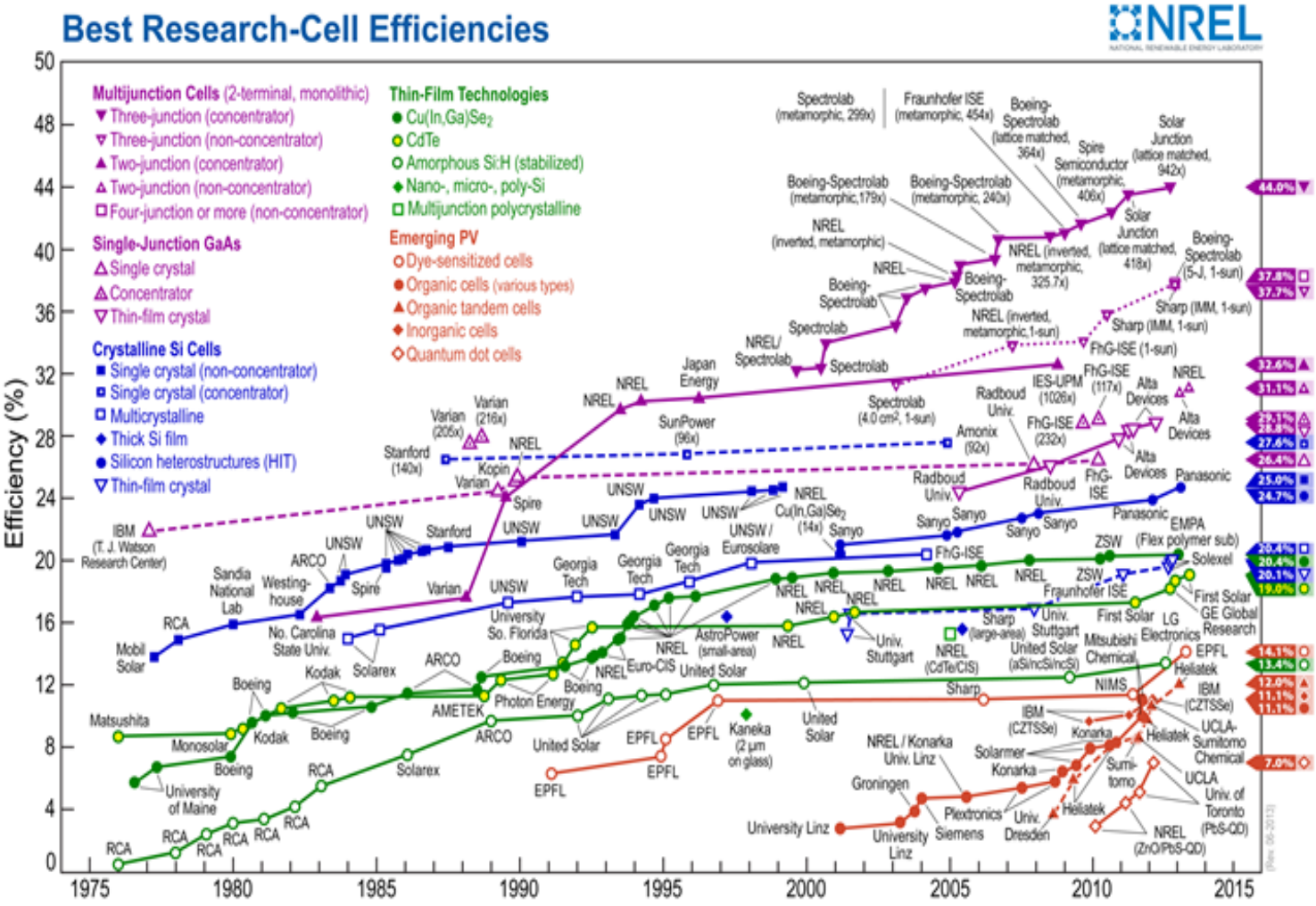


Fig. 3 Het zonlichtspectrum en daarin weergegeven de aandelen die omgezet worden in licht of warmte

Bijlage 3. Best research cell efficiencies (NREL)