

Berekening en verklaring van de kostprijsontwikkeling van zonnepanelen door middel van learning curves.



(Getty images, g.d.)

Bacheloropdracht Bedrijfskunde
Auteur: Frank Garlich (s0185124)
Begeleiders: Dr. Ir. T. De Schryver & Ir. B. Kijl
Faculteit: Management & Governance
Universiteit Twente

Management Summary

Aanleiding:

De laatste jaren wordt er in de media veel geschreven over zonnepanelen. De Duitse overheid heeft de afgelopen tien jaar groots ingezet op zonne-energie, mede om de Europese CO2 doellijnen te behalen voor 2020 en 2050. De afgelopen twee jaar heeft de industrie te maken met een dalende vraag mede veroorzaakt door de financiële crisis. De Chinese overheid doet er alles aan om fabrikanten overeind te houden en maakt zich volgens Europese en Amerikaanse fabrikanten schuldig aan het dumpen van panelen op de wereldmarkt, wat heeft geleid tot importheffingen in Amerika en mogelijk in de toekomst ook in Europa.

Europese landen zullen keuzes moeten maken hoe zij de Europese Co2 doelen van 2020 en 2050 willen bereiken, zonnepanelen zijn hierbij één van de weinige opties naast windenergie, biomassa en biobrandstof. Het is hierdoor interessant om de historische prijsontwikkeling van zonnepanelen te onderzoeken om zo een beter beeld te krijgen van de mogelijkheden voor de toekomst.

Analyse:

In dit onderzoek is gebruikt gemaakt van de learning curve theorie die stelt dat de kostprijs van een product met een vast percentage daalt naar mate er meer van geproduceerd wordt. Hier blijkt bij zonnepanelen sprake van te zijn; sinds 1982 duurt het gemiddeld 29 maanden om het wereldwijd geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen te verdubbelen, de prijs daalde in deze periode van 29 maanden met gemiddeld 23.6% (de learning rate). Om meer inzicht te krijgen in de oorzaken achter de geobserveerde prijsdaling zijn de vijf grootste marktspelers geanalyseerd van wie er zich vier in China bevinden. Deze marktspelers bereikten kostendalingen mede door minder Silicium te gebruiken, efficiëntere panelen te ontwikkelen, minder medewerkers per verkochte Megawatt in te zetten en *operating expenses* in zijn geheel te verlagen.

Implicaties:

Dit onderzoek kan enerzijds gebruikt worden door fabrikanten om productiedoelen te bepalen en anderzijds een richtlijn zijn dat hun kosten minstens met ongeveer 23% per twee jaar dalen om competitief te kunnen blijven. In de dataset is onder andere een lineaire daling in het aantal medewerkers per verkochte Megawatt gevonden. Daarnaast daalde het gebruik van Silicium per Watt-Peak en steeg de efficiëntie van modules. Al deze factoren kunnen van belang zijn om op de lange termijn te kunnen concurreren. Volgens de theorie van Conley (1970) is het raadzaam dat bedrijven zich in markten als deze waar hoge groei is vooral te focussen op het verkrijgen van een groot marktaandeel en niet op hoge verkoopprijzen; meer productie zal leiden tot lagere kosten en een betere concurrentiepositie als de groei daalt. Analisten en overheden kunnen de gevonden waardes gebruiken om (de risico's van) fabrikanten in kaart te brengen.

De learning rate kan overheden helpen met het bepalen van een toekomststrategie. Overheden kunnen productie stimuleren en daardoor de kosten verder laten dalen, zoals China en Duitsland momenteel doen.

Inhoudsopgave

Introductie	4
1. Inleiding	5
1.1 Onderzoeksvraag en deelvragen.	5
1.2 Zonnepanelen.	5
1.3 Fabricage zonnepanelen.	6
1.4 Innovatie.	7
2. Theoretisch kader	8
2.1 Learning curves.	8
2.2 Learning curves industrieën	9
2.3 Learning curves zonnepanelen.	10
2.4 Learning curves limitaties & valkuilen.	10
3. Methoden	12
3.1 Methoden deelvraag 1	12
3.2 Methoden deelvraag 2	13
4. Learning curves zonnepanelen	15
4.1 Learning curve industrie.	15
4.1.1 Learning curve industrie limitaties & valkuilen	16
4.2 Learning curve marktspelers	17
4.2.1 Learning curve marktspelers limitaties & valkuilen	18
4.3 Beantwoording deelvraag 1	19
5. Analyse kostprijscomponenten van zonnepanelen	20
5.1 Labor learning.	20
5.2 Organisational learning	21
5.3 Capital learning.	22
5.4 Knowledge spillover.	23
5.5 Loonkosten en winstmarges.	24
5.6 Situatie 2011-2013	24
5.7 Beantwoording deelvraag 2	25
5. Conclusie	26
6. Refenties	28

Introductie

In 1839 ontdekte Alexandre Edmond Becquerel het *photovoltaic* (PV) effect, het creëren van een voltage door licht te laten reflecteren op materiaal. De eerste zonnecel met een efficiëntie van 1% werd 44 jaar later ontwikkeld door de Amerikaanse onderzoeker Charles Fritts. In 1954 werd de eerste silicium-zonnecel ontwikkeld met een efficiëntie van 6%, dit vormde de basis voor de verdere ontwikkeling van zonnecellen (Al-Abdullah, Mahmod, & Sutaif, 2012).

Onderzoekers stellen dat in één uur de zon meer energie aan de aarde afgeeft dan de totale jaarlijkse elektriciteitsbehoefte (Lewis & Nocera, 2006). Dit maakt zonne-energie tot een van de mogelijke oplossingen om hernieuwbare energiedoelen te bereiken zoals de EU Energy Roadmap 2050 met als doel om in 2050 80 tot 95% minder CO₂ uit te stoten dan in 1990.

Zonne-energie is echter niet de enige hernieuwbare energiebron en zal moeten concurreren met onder andere bio- en windenergie. De kostprijs speelt hierin een grote rol en deze zal moeten dalen om dichterbij goedkope elektriciteitsbronnen zoals kolen en aardgas te komen. Consumenten kunnen daarnaast ook kiezen om eerst andere investeringen te doen om energiekosten te besparen, zoals isolatie en een betere combi-ketel (Verdegaal, 2012). De zonnepanelen sector zal er voor moeten zorgen dat de verkoopprijs verder daalt, wat gezien de grote aanhoudende concurrentie vermoedelijk alleen mogelijk is via verbetering in de efficiëntie (technologie) van het product en het productieproces. Als dit succesvol gebeurt kunnen de maatschappelijke implicaties groot zijn; zonnepanelen op veel daken en mogelijk overdag goedkope stroom, in tegenstelling tot 's avonds nu.

Het is hierdoor interessant om te kijken hoe deze industrie zich ontwikkeld heeft en om dit in kaart te brengen via een *learning curve*. De eerste learning curve is in 1936 gemaakt door T.P. Wright in dienst van de Amerikaanse luchtmacht; hij merkte dat het bouwen van vliegtuigen sneller gaat naar mate er meer vliegtuigen gebouwd zijn (Wright, 1936). De learning curve is hiervan een grafische representatie met op de X-as het aantal gemaakte producten en op de Y-as bijvoorbeeld het aantal arbeidsuren per product.

Later bleek dat het ook mogelijk is om learning curves voor gehele industrieën - zoals de kosten van wasmachines - te maken, er volgden ook variaties op het oorspronkelijke model (Badiru, 1992). Er is sprake van een learning curve wanneer bij elke procentuele toename in de cumulatieve productie de afhankelijke variabele –zoals kostprijs- met een vast percentage afneemt.

In dit onderzoek tracht ik een learning curve te maken van zowel de zonnepanelen sector als geheel en van enkele grote spelers in de markt. Deze marktspelers zullen vervolgens verder geanalyseerd worden om de gevonden learning curves te verklaren.

1. Inleiding.

1.1 Onderzoeksvraag en deelvragen.

Hoewel momenteel zonnepanelen in bepaalde situaties tot kostenbesparingen leiden (NRC, 2012) zijn verdere kostendalingen cruciaal om een directe concurrent van traditionele energiebronnen te worden. In de media wordt regelmatig gemeld dat panelen wederom in prijs gedaald zijn, de vraag die gesteld moet worden is echter hoe hard prijzen dalen over een langere periode en waardoor deze prijsdaling ontstaat. Hierdoor kunnen op basis van historische waarden voorspellingen worden gedaan over de toekomst en mede gezegd worden of elektriciteit uit zonnepanelen een (grote) rol gaat spelen in de energie behoefte van de toekomst. De onderzoeksvraag luidt dan ook: *“Hoe hebben de prijzen van zonnepanelen zich ontwikkeld en wat zijn de oorzaken hiervan?”*

De prijsontwikkeling zal onderzocht worden via *learning curves* voor zowel de industrie als geheel als voor enkele grote marktspelers (Trina Solar, Yingli Green, Suntech, Canadian Solar & First Solar). Een learning curve is een grafische representatie met in dit geval het aantal geproduceerde units op de X-as (geproduceerde Megawatts) en de kostprijs op de Y-as. Kostprijzen zijn het meest betrouwbaar maar kunnen vervangen worden door verkoopprijzen als de invloed van derde variabelen zoals verzendkosten, BTW en subsidie beperkt worden. Beide assen zijn logaritmisch waardoor er een rechte lijn ontstaat wanneer de prijs met een vast percentage afneemt bij elke incrementele productietoename (Conley, 1970). Learning curves kunnen gemaakt worden voor losse bedrijven als industrieën als geheel (Conley, 1970). Na de presentatie van de learning curves zal worden ingegaan op de ontwikkeling van kostprijscomponenten bij de vijf geselecteerde marktspelers om zo de prijsdaling in zonnepanelen te verklaren. De onderzoeksvraag wordt opgedeeld in twee deelvragen:

- 1) Hoe heeft de prijs van zonnepanelen zich ontwikkeld en is er sprake van een learning curve?
- 2) Welke kostprijscomponenten zijn verantwoordelijk voor de ontwikkelingen in de prijs van zonnepanelen?

Deelvraag één is beschrijvend, deelvraag twee zal de bevindingen proberen te verklaren via een analyse van jaarverslagen van de vijf bedrijven die worden beschreven in deelvraag één. De indeling van het onderzoek is als volgt; in hoofdstuk twee wordt het theoretisch kader behandeld, hoofdstuk drie de methode van dataverzameling en dataverwerking, hoofdstuk vier en vijf behandelen de deelvragen. Tot slot de conclusie, te vinden in hoofdstuk zes.

Voordat de deelvragen behandeld worden zal de zonnepanelen industrie worden toegelicht. Het is voor de beantwoording van de onderzoeksvraag van belang om te weten hoe het productieproces in elkaar zit, wie de marktspelers zijn en wat de praktische implicaties van de prijzen van zonnepanelen zijn.

1.2 Zonnepanelen.

Omdat zonnepanelen werken via het fotovoltaïc effect worden ze doorgaans PV-panelen genoemd. Deze panelen bestaan uit aan elkaar gesoldeerde zonnecellen en hebben een standaardmaat van 165 bij 99 centimeter. Fabrikanten houden deze standaardafmeting aan zodat andere bedrijven montage materiaal zoals daksteunen kunnen ontwikkelen.

Zonnepanelen kunnen zowel *on-grid* als *off-grid* aangesloten worden. On-grid is veruit het populairst in westerse landen en houdt in dat installaties direct verbonden zijn met het elektriciteitsnet. Hierdoor kunnen panelen stroom afleveren wanneer men het zelf niet nodig heeft en kan er gemakkelijk extra

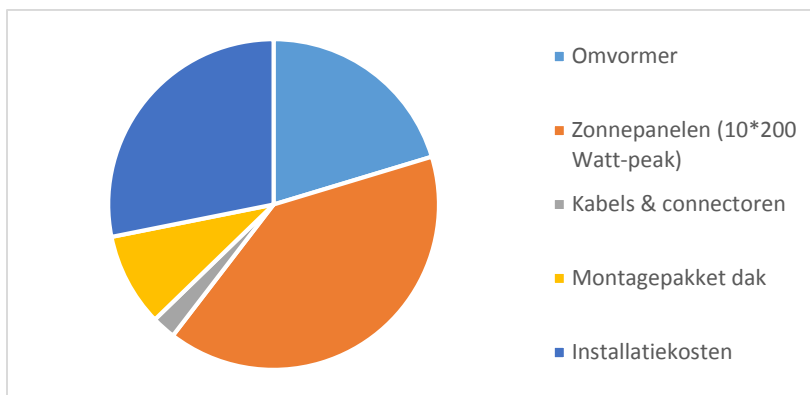
stroom worden afgenomen als de installatie niet genoeg levert. Off-grid installaties werken met een accu om tijdelijk elektriciteit op te slaan wat leidt tot rendementsverlies.

Een particulier heeft naast een paneel ook een omvormer nodig. Een zonnepaneel genereert gelijkstroom, een omvormer zet dit om in wisselstroom met een klein vermogensverlies van enkele procenten. Eventuele stroom die over is gaat via de kWh-meter naar het elektriciteitsnet. Oude kWh-meters draaien in dat geval fysiek de teller terug, nieuwe meters houden de afname en uitgifte met het elektriciteitsnet afzonderlijk bij. Deze nieuwe meters geven elektriciteitsleveranciers de optie om minder te vergoeden voor teruggeleverde elektriciteit, momenteel is dit echter niet toegestaan in Nederland.

Het belangrijkste van een zonnepaneel zelf is de output, uitgedrukt in Watt-Peak. In een laboratorium worden de panelen gemeten onder instraling van 1000W/m^2 , de geleverde output is de Watt-peak van het paneel. Dit wordt gedaan omdat zoncondities verschillen over de aarde en per seizoen. In Nederland komt een 1000 Watt-Peak installatie overeen met een jaarlijkse opbrengst van 880 kWh (de Boer, 2011).

Dit maakt Watt-Peak een belangrijke factor bij het selecteren van een paneel. Alle fabrikanten geven 20 tot 25 jaar garantie op de opbrengst, meestal minimaal 80% rendement van de originele output na 20 jaar. Deze garantie is van belang aangezien de investering van zonnepanelen zichzelf moet terugbetalen na een aantal jaren.

In figuur 1 is een kostenindicatie te zien van een PV-systeem op de Nederlandse markt. Zonnepanelen hebben doorgaans 25 jaar garantie, de omvormer echter maar 10 jaar. In het voorbeeld is maar één omvormer meegenomen.



Figuur 1: Kostenindicatie van een on-grid PV-systeem in Nederland met 2000 Watt-peak, totaal €5160 (MetDeZon, 2012).

1.3 Fabricage zonnepanelen.



Silicium (Si) vormt de basis van elk traditioneel zonnepaneel. Dit chemisch element kan in verschillende gradaties verwerkt worden tot een wafer; monocrystalline en polycrystalline. Polycrystalline wafers zijn het populairst door de lagere prijs, wel zijn deze minder efficiënt. Een wafer is een dunne snee van het desbetreffende materiaal waarop vervolgens de halfgeleidermaterialen bevestigd worden om tot een

werkende zonnecel te komen. Deze zonnecellen worden vervolgens aan elkaar gesoldeerd en er komt een raamwerk omheen, resulterend in een zonnepaneel, ook wel module genoemd.

De Silicium (wafers) zijn in feite gestandaardiseerde commodity's die iedereen kan produceren. Dit resulteert in een markt met veel spelers en de bijbehorende concurrentie (Renewableenergyworld.com, 2012). Verkopers van zonnepanelen zoals Suntech, First Solar, Trina, Yingli & Canadian Solar produceren vaak de zonnecellen zelf, hoewel sommige marktspelers momenteel de cellen inkopen.

Verscheidende experts beginnen zonnepanelen zelf ook al als commodity's te zien, alle panelen zijn immers even groot en hebben een gestandaardiseerde output. Panelen worden echter op verschillende manieren geproduceerd en hebben een fabrieksgarantie, de kwaliteit van panelen verschilt hierdoor. Dit resulteert in een voordeel voor bestaande spelers met een goed imago en zeker voor spelers die er financieel gezien goed voorstaan. In de praktijk blijkt de prijs echter wel het belangrijkste selectiecriteria te zijn voor klanten (Wang, 2012).

Baziliana et al. (2012) hebben de kosten van een Chinees zonnepaneel in 2012 uitgesplitst: Silicium bedraagt 19% van de kostprijs, het verwerken van Silicium tot wafer 9%. Het verwerken van de wafer tot zonnecel 25% en het maken van de module 47%.

1.4 Innovatie.

Kostenverlaging door innovatie kan plaatsvinden op productieketen-niveau en bij de panelenfabrikanten zelf. De totale productieketen bevat veel stappen die alle bijdragen aan het eindresultaat en de uiteindelijke prijs voor de klant.

- Installateurs. Vooral bij particulieren is de installatie meestal hetzelfde; efficiëntie neemt toe naar mate een taak vaker uitgevoerd wordt wat kan leiden tot kostendalingen.
- Zonnecellen, doorgaans geproduceerd door de fabrikanten zelf. Universiteiten en overige instellingen houden zich bezig met het ontwikkelen van de meest rendabele cellen (onderzoekscellen).
- Onderhoud. Software die bijhoudt hoeveel stroom elk paneel afgeeft, verlaagt de arbeidskosten voor onderhoud.
- Omvormer. Traditioneel worden zonnepanelen aan elkaar geschakeld in een stringopstelling en vervolgens aan een omvormer; groot nadeel hiervan is dat als één paneel niet optimaal functioneert (of minder licht opvangt) de rest van de panelen net zo weinig output levert. De oplossing hiervoor zijn *micro-inverters*, elk paneel heeft dan zijn eigen omvormer.

Fabrikanten kunnen hun productieproces op vele vlakken verbeteren, onder meer:

- Goedkopere grondstoffen en mogelijk hogere efficiëntie in de verwerking hiervan.
- Beter machines voor de massaproductie.
- Lagere arbeidskosten per paneel dankzij repetitie van het productieproces (Wright, 1936).
- Technologische vernieuwingen. In principe zijn doorbraken alleen interessant als deze kunnen concurreren op prijs. Het Amerikaanse bedrijf First Solar boekte hier de afgelopen jaren succes mee door met een andere grondstof te werken dan het traditionele Silicium.
- Verhogen efficiëntie van zonnecellen.

2. Theoretisch kader.

In dit hoofdstuk wordt de bestaande literatuur die van belang is voor de beantwoording van de onderzoeksvraag behandeld. De meeste artikelen zijn gevonden via Google Scholar door te zoeken op relevante trefwoorden waaronder *learning curves industries*, *learning curves solar*, *pv price development* en *organisational learning*.

2.1 Learning curves.

Wright (1936) was de eerste die learning documenteerde; het bouwen van vliegtuigen ging sneller naarmate er meer vliegtuigen van hetzelfde type geproduceerd waren. Arrow (1962) creëerde een model voor dit effect waarmee het te kwantificeren is. Dit was vooral relevant omdat een investering meer aantrekkelijk is als de onderliggende productie steeds efficiënter wordt. Bahk & Gort (1993) zette drie typen learning uiteen:

Labor learning, het efficiënter uitvoeren van simpele taken door middel van het leren uit repetitie van deze taken. Organisational learning, het efficiënt inzetten van medewerkers bij de beschikbare taken, verzamelen van kennis van medewerkers en learning van managers op het gebied van planning en bijvoorbeeld selectie van leveranciers. Capital learning, al het leren wat verband houdt met het fysieke kapitaal, onderhoud machines, gebruik van de beschikbare instrumenten, voorkomen van problemen met machines.

Conley (1970) was de eerste die een learning curve voorstelde voor hele industrieën. Zijn model ging niet uit van de efficiëntie van medewerkers, doorgaans uitgedrukt in uren, maar van de kostprijs van een product. Deze curve is het resultaat van labor learning, proces verbetering, product standaardisatie en economies of scale (Lieberman, 1984). Uit Conley's datasets bleek dat de kostprijs van een product in een industrie daalt naarmate er meer geproduceerd is. Over een lange periode gebeurde dit met een vast percentage elke keer dat de totale productie verdubbelde. Dit noemt hij een *experience curve*. De formules die hierbij horen zijn als volgt:

$$c_x = ax^m \text{ (formule 1)}$$

$$PR = 2^m \text{ (formule 2)}$$

$$LR = 1 - PR \text{ (formule 3)}$$

Waar C_x in formule 1 staat voor de kosten van unit x , a de prijs van de eerste unit en m gelijk staat aan de afnamesnelheid (of toename) van de kosten (van Sark, 2008). a en m kunnen worden berekend met statistische software zoals Mathematica en OriginPro aan de hand van een dataset met prijzen bij productie x (C_x) (Van Sark & Alsema, 2012). m is negatief als er sprake is van een daling in de kosten en positief wanneer de kosten stijgen naar mate er meer geproduceerd wordt.

Met formule 2 wordt de *progress ratio* (PR) berekend. Bij elke verdubbeling van de totale, cumulatieve, productie wordt de nieuwe prijs berekend door de PR te vermenigvuldigen met de originele kosten (Dutton & Thomas, 1984). De *learning rate* (LR), te zien in formule 3, is het percentage waarmee de kosten dalen wanneer het volume met 100 procent toeneemt (Van Sark, Alsema, Junginger, De Moor, & Schaeffer, 2008). Voorbeeld: m van -0.2, PR is dan 0.87 en de procentuele daling per verdubbeling van de totale productie 0.129 (LR) ofwel 12.9%.

Managers kunnen een experience curve gebruiken als leidraad voor toekomstige kostprijzen van concurrenten, maar ook om te kijken hoeveel zij willen produceren; meer productie resulteert immers in een lagere kostprijs en dus een betere concurrentiepositie. Bedrijven kunnen een productportfolio opstellen waarbij het geld van winstgevendende producten deels gebruikt wordt om te investeren in nieuwe producten met een markt waar veel groei is. Wanneer de markt hard groeit, is het belangrijk om marktaandeel te verkrijgen; de focus op grote winst moet pas beginnen als de groei van de markt daalt. Bedrijven moeten wel oppassen dat ze niet blijven investeren als de groei daalt, want groei is niet voor altijd (Conley, 1970).

Conley (1970) publiceerde de curves op een logaritmische schaal op zowel de X-as als Y-as, de learning curve zal vervolgens lineair zijn aangezien de prijs met een vast percentage daalt bij elke verdubbeling van de productie. Historische prijzen moeten wel aangepast worden aan inflatie omdat anders het prijseffect onterecht verminderd wordt door de waardedaling van geld (Conley, 1970).

Bedrijven kunnen verschillende dingen doen om hun learning rate te verhogen: het behouden van mensen met veel kennis over het productieproces, beschikbaar maken van in het verleden gebruikte routines en overige data voor medewerkers, reverse-engineering van producten van concurrenten en het inhuren van mensen die gewerkt hebben bij concurrenten (Argote & Eppler, 1990). Onderzoek gedaan door Wiersma (2007) bij TPG post concludeerde onder andere dat enerzijds het spreiden van aandacht over verschillende doelen een negatieve impact kan hebben en dat anderzijds vrije productiecapaciteit de learning rate kan bevorderen. Beide onderzoeken concludeerden ook dat heterogene producten leiden tot hogere learning rates, zoals post- en pakketbezorging.

2.2 Learning curves industrieën.

Het is interessant om te kijken naar andere industrieën en deze te vergelijken met zonnepanelen op basis van experience curves. Het belangrijkste getal is hierbij de learning rate (LR, formule 3). Elke keer dat het aantal geproduceerde units verdubbelt neemt de prijs af met een vast percentage, de learning rate (LR).

In tabel 1 zijn learning rates van diverse producten te zien. De periode is hierbij van belang, een learning rate voor een lange periode vasthouden is moeilijker dan voor enkele jaren. Op de Y-as is te zien waar de vooruitgang gemeten is, bijvoorbeeld bij omvormers (1) de vermindering van het rendementsverlies. De x-as betreft welke eenheid met 100% moet toenemen om de Y-as met de LR te laten dalen, doorgaans is dit het aantal geproduceerde cumulatieve units.

Product	LR	Tijdsperiode	Y-as	X-as
Omvormers (1)	37%	18 jaar	Conversion loss	Units
Omvormers (2)	17%	7 jaar	Verkoopprijs €/cW	PV kWh geïnstalleerd wereldwijd
Olieverwerking	20%	50 jaar	Product prijs	Productie
Airconditioning	10%	25 jaar	Verkoopprijs	Units
Vaatwassers	11%	21 jaar	Verkoopprijs	Units
Zwart-wit TV	22%	26 jaar	Verkoopprijs	Units
Wasdrogers	12%	24 jaar	Verkoopprijs	Units
Windenergie	18%	15 jaar	Kostprijs €/kWh	kWh geproduceerd

Gas combi boilers	7%	18 jaar	Verkoopprijs	Units
Wasmachines	31.7%	42 jaar	Verkoopprijs EUR/kg capaciteit	Units

Tabel 1: Learning rates (LR) van verschillende producten. Bron: omvormers (1), olieverwerking, airconditioning (McDonald & Schrattenholzer, 2001), omvormers (2) (Schaeffer et al., 2004), vaatwassers, zwart-wit TV, wasdrogers (Bass, 1980), windenergie (Junginger, 2005), gas combi boilers & wasmachines (Weiss, Junginger, & Patel, 2008).

2.3 Learning curves zonnepanelen.

Verschillende typen learning rates zijn beschikbaar voor zonne-energie. Het grootste deel omvat de prijs per Watt Peak van modules, andere kijken naar specifieke soorten modules of *Balance of System* (BOS); de installatiekosten van een systeem. BOS prijzen zijn alleen lokaal relevant aangezien deze enkel installatiekosten, vergunningen, preparatie van de grond etc. bevatten en niet de zonnepanelen zelf.

Type	LR	Tijdsperiode	Y-as	X-as
BOS [1]	22%	1992-2001	€/Wp Duitsland	Capaciteit Duitsland Wp.
BOS [1]	19%	1992-2001	€/Wp Nederland	Capaciteit Nederland Wp.
Module [1]	20%	1976-2001	\$/Wp	Geproduceerde capaciteit Wp.
Module [2]	22.8%	1981-2000	\$/Wp	Geproduceerde capaciteit Wp.
Module [3]	20.2%	1968-1998	\$/Wp	Geproduceerde capaciteit Wp.
Module [4]	20%	1976-1996	\$/Wp	Geproduceerde capaciteit Wp.
Module Crystalline [5]	24%	1976-2011	\$/Wp	Geproduceerde capaciteit Wp.

Tabel 2: Learning rates (LR) van zonnepanelen (module) en BOS (systemen) van verschillende auteurs. [1] (Schaeffer et al., 2004), [2] (Parente, Goldemberg, & Zilles, 2002), [3] (Harmon, 2000), [4] (van der Zwaan & Rabl, 2004), [5] (Bloomberg New Energy Finance, 2011).

2.4 Learning curves limitaties & valkuilen.

Het is van belang om de juiste eenheid te meten bij het maken van een learning curve (Junginger, 2000). Zo is het bijvoorbeeld bij windenergie de curve van de kosten per kW vs. de cumulatieve hoeveelheid kW geïnstalleerd anders dan een curve die kijkt naar de kosten per kWh vs. het aantal geïnstalleerde windturbines. Door het gebruik van een onjuiste eenheid op de X-as kan een misleidend beeld gecreëerd worden.

Bij zonnepanelen moet er niet gekeken worden naar het aantal panelen dat geïnstalleerd is. Dit komt omdat panelen krachtiger zijn geworden in de afgelopen dertig jaar en hierdoor wordt de X-as onterecht minder breed. Een minder brede X-as leidt tot een hogere learning rate. Het is mogelijk om de geproduceerde capaciteit in Watt-Peak op de horizontale as te zetten, of de wereldwijd geïnstalleerde capaciteit (ongeacht of de capaciteit nog in gebruik is). Beide wijken vermoedelijk weinig van elkaar af aangezien het vernietigen van voorraad nutteloos en duur is. Op de Y-as moet de prijs voor een Watt-Peak komen; de (kost) prijs van een paneel gedeeld door het aantal Watt-Peak dat deze levert. De sterkte van de relatie kan worden onderzocht via de determinatiecoëfficiënt R^2 , een hoge R^2 waarde (>0.8) duidt

op een sterke relatie tussen de X en Y variabelen. Hoge R^2 waarden bevorderen de betrouwbaarheid van de gevonden relatie.

Voor de analyse van bedrijven is het belangrijk om te kijken naar de fluctuatie in de wisselkoers van valuta's. De gemiddelde verkoopprijs per Watt-Peak kan stijgen als deze wordt uitgedrukt in een valuta die verzwakt is ten opzichte van de lokaal geldende valuta. Tevens moeten overige variabelen die de prijs beïnvloeden, maar niets te maken hebben met het productieproces zelf, worden geïdentificeerd omdat deze variabelen prijsdalingen mogelijk kunnen verklaren.

Zo kunnen dalende loonkosten optisch een positieve invloed hebben op learning curves, ervan uitgaande dat de vraag naar het product niet mee daalt door koopkrachtdaling. Nemet (2006) bestempelt de prijsdaling van Silicium ook als een variabele die niet toegeschreven mag worden aan de learning rate van de zonnepanelen industrie. De reden hiervoor is dat het overgrote deel van de vraag naar Silicium komt vanuit de computerchip industrie; dit wordt door hem een knowledge spillover genoemd (Nemet, 2006). In het volgend hoofdstuk is te lezen hoe de data verkregen is en hoe deze geanalyseerd is.

3. Methoden.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verzameling, selectie & verwerking van de bronnen die gebruikt worden in de analyse. Aangezien de methoden per deelvraag sterk verschillen wordt allereerst deelvraag 1 behandeld en daarna deelvraag 2.

3.1 Methoden deelvraag 1.

In deelvraag 1 worden er twee soorten learning curves gemaakt, één voor de sector als geheel en één voor enkele grote marktspelers. Allereerst worden de methoden van de sector learning curve besproken.

De sector learning curve bestaat uit de cumulatieve productie van zonnepanelen op de X-as, gemeten in geproduceerde Watt-Peak, en de kostprijs per Watt-Peak op de Y-as. Historische secundaire data voor de sector kan in principe goed gevonden worden via internet, maar is niet altijd vrij beschikbaar bij de originele bron. Dit komt omdat prijsdata vaak verkocht wordt door consultancy bureaus, zij geven echter regelmatig presentaties die wel vrij beschikbaar zijn met daarin de data.

Het nadeel van de beschikbare data voor de Y-as is dat de kostprijzen niet gemeten zijn, maar de *Average Sales Price* (ASP). Het nadeel aan het gebruik van ASP's ten opzichte van kostprijzen is dat het theoretisch mogelijk is dat de prijsdaling verklaard kan worden door dalende winstmarges. De gevonden datasets nemen subsidie, belasting en leveringskosten niet mee in de ASP, dit is gunstig omdat deze prijscomponenten niets met de kostprijs te maken hebben. Aangezien er verschillende variabelen overblijven die niets met learning te maken hebben maar wel de ASP kunnen beïnvloeden, is er voor gekozen om onder andere winstmarges en loonkosten te onderzoeken in deelvraag 2.

Voor de Y-as (prijs per Watt-Peak) zijn de datasets van Earth-Policy/PVNews (1975-2006), Navigant Consulting (1982-2011) & U.S. Energy Information Administration (1989-2010) gebruikt. De eerste twee bevatten gemiddelde verkoopprijzen (ASP) van panelen wereldwijd, de EIA (2011) dataset baseert zich op de ASP van import en export van zonnepanelen door Amerikaanse bedrijven. De datasets verschillen weinig van elkaar in prijs en zijn in nominale Amerikaanse dollars gepubliceerd. De historische prijzen zijn vervolgens aangepast op de consumentenprijsindex (CPI) van het Amerikaanse Bureau of Labor Statistics en kunnen zo worden uitgedrukt in 2012-US dollars (2012\$).

Het beste is als op de X-as het cumulatieve wereldwijd geproduceerde aantal Megawatt komt, echter deze data is niet beschikbaar. Wel zijn er twee bedrijven die bijhouden wat het wereldwijd geïnstalleerd vermogen is, de afwijking tussen deze twee is minimaal; er is geen reden om geproduceerde panelen niet te installeren.

Wereldwijd geïnstalleerd PV vermogen wordt onder andere bijgehouden door de International Energy Agency (1992-2010), BP (1996-2010) & Bloomberg New Energy Finance (1976-2011). De waarden van de IEA zijn minder bruikbaar aangezien zij maar 25 landen meenemen in hun onderzoek in tegenstelling tot BP en Bloomberg. Tot 2005 zijn de datasets van BP en Bloomberg vrijwel gelijk, daarna loopt de BP index sterk uit (21%), dit wordt veroorzaakt doordat Bloomberg alleen Crystalline Silicium panelen meeneemt in haar onderzoek en recentelijk andere technologieën een rol spelen, zoals Thin Film van het bedrijf First Solar. De gelijkenissen in de datasets tot 2005 maken het goed mogelijk om de data van Bloomberg van 1976 tot 2005 aan de data van BP (2006-2011) te koppelen.

De learning curves en learning rates worden berekend via OriginPro. De ingebouwde formule *Allometric1* wordt gebruikt om deze te berekenen aan de hand van het cumulatief geïnstalleerd vermogen (X) en de

op inflatie aangepaste ASP bij de desbetreffende hoeveelheid (Y). Van Sark & Alsema (2012) hebben verschillende statistische software onderzocht en zij concludeerden dat Origin zeer nauwkeurig is. Origin berekent ook de determinatiecoëfficiënt R^2 , deze waarde zal gebruikt worden om de sterkte van de relatie te testen.

In het tweede deel van deelvraag 1 worden enkele grote marktspelers onderzocht. Uit onderzoek van Al Jaber et al. (2012) blijkt dat First Solar, Canadian Solar, Yingli Green, Trina Solar & Suntech samen een marktaandeel van 24.6% hadden in 2011. Deze bedrijven zijn allen genoteerd op de Amerikaanse beurs en de beurswaakhond SEC verplicht bedrijven om te vermelden hoeveel MW zij jaarlijks geproduceerd hebben in modules, dan wel cellen en de ASP van de verkochte producten.

Het nadeel van het gebruik van ASP's gepubliceerd in jaarverslagen is dat shipping costs en de winstmarge hier aan toegevoegd zijn. Daarnaast zijn alleen de grote marktspelers vertegenwoordigd op de Amerikaanse beurs welke mogelijk hogere prijzen vragen dan de kleine spelers, gezien de merknaam. Van de kleine fabrikanten is echter geen data beschikbaar. First Solar heeft bij de beurswaakhond aangegeven dat de ASP betrouwbaar is, maar vermeldt wel de kostprijs en het productievolume.

Vier van de vijf fabrikanten (Trina Solar, Suntech, Canadian Solar & Yingli Green) bevinden zich in China maar gebruiken Amerikaanse dollars in hun jaarverslagen. Het is hierdoor belangrijk om te kijken naar de fluctuatie in de wisselkoers tussen de twee valuta's. Om het effect van wisselkoersen uit te sluiten zijn de jaarlijkse ASP's omgerekend naar Chinese yuan via de Noon Buying Rate, zoals de Amerikaanse beurswaakhond voorschrijft. Vervolgens zijn de ASP's aangepast op Chinese inflatie, gepubliceerd door het Chinees Bureau van Statistiek (Trading Economics, 2013).

3.2 Methoden deelvraag 2.

Deelvraag twee zal verder ingaan op de onderliggende factoren die de gevonden learning curves verklaren. Hiervoor worden de verschillende typen learning van Bahk & Gort (1993) gebruikt.

Labor learning zal worden berekend via medewerkers per geproduceerde Megawatt voor drie verschillende afdelingen: productie, administratie en verkoop. Jaarverslagen publiceren het aantal medewerkers per afdeling, de gemiddelde ratio's worden berekend door het totale aantal medewerkers van de marktspelers te delen door de totale productie. Deze ratio's worden vervolgens uitgezet tegen de cumulatieve productie van de desbetreffende marktspelers op een logaritmische schaal. In sommige jaren wijkt de ratio iets af van de realiteit (<1%) omdat een kleine hoeveelheid cellen los zijn verkocht. De sterkte van deze relatie, en de relaties van de overige typen learning, wordt gemeten via de determinatiecoëfficiënt R^2 .

Organisational learning zal worden gemeten via de operating expenses ten opzichte van het cumulatieve MW verkocht. Operating expenses bestaan uit verkoop, R&D en administratie uitgaven en worden gepubliceerd in jaarverslagen. Deze worden aangepast op de lokaal geldende valuta en inflatie. De totale operating expenses van Trina Solar, Canadian Solar & Yingli Green worden bij elkaar opgeteld en gedeeld door de productie om zo een prijs per Watt-Peak te krijgen. First Solar is niet gebruikt omdat zij een andere valuta gebruiken; Suntech is niet meegenomen vanwege enige losse cel-verkoop.

Capital learning wordt geoperationaliseerd door middel van het gebruik van Silicium per Watt-Peak (gemeten in gram) en de efficiëntie van de modules. Bedrijven publiceren het gemiddelde Silicium

gebruik en de gemiddelde paneel-efficiëntie niet; hiervoor zullen algemene bronnen worden gebruikt die zijn gevonden via Google zoektermen als *Silicon usage 2005* en *average solar module efficiency 2005*.

De ontwikkeling van de prijs van Silicium (knowledge spillover) is lastig te analyseren, aangezien er geen bron is die de prijs consistent heeft bijgehouden. Wel zal dit kort behandeld worden met bronnen die gevonden zijn met zoektermen als *PV Grade Silicon Price 2008* om zo een beeld te geven van de prijsontwikkeling sinds 2001.

Aangezien het theoretisch gezien mogelijk is dat constant dalende winstmarges of dalende salarissen een learning curve verklaren, worden deze twee variabelen kort geanalyseerd. Gemiddelde lonen van Chinese fabrieksarbeiders worden gepubliceerd door het Chinees Bureau van Statistiek (Trading Economics, 2013), deze zijn vervolgens aangepast op Chinese inflatie. Winstmarges zijn geanalyseerd door zowel de gross profit margins (omzet – kosten van verkochte producten) als de operating profit margins (gross-profit – operating expenses) uit te zetten tegen de cumulatieve verkochte Megawatts van de vier Chinese fabrikanten. De sterkte van deze twee relaties is wederom gemeten via de determinatiecoëfficiënt R^2 .

4. Learning curves zonnepanelen.

In dit hoofdstuk wordt de eerste deelvraag behandeld: *Hoe heeft de prijs van zonnepanelen zich ontwikkeld en is er sprake van een learning curve?* Eerst wordt de learning curve van de zonnepanelen sector gepresenteerd en de limitaties, valkuilen & opvallende dingen besproken. Daarna wordt hetzelfde gedaan voor enkele grote marktspelers. Het is te verwachten dat de learning rate voor de marktspelers aanzienlijk lager ligt. Zij vergroten hun productiecapaciteit relatief sneller dan de sector als geheel, waardoor zij de afgelopen tien jaar de grootste spelers zijn geworden. Aangezien deze bedrijven naar verwachting marktconforme verkoopprijzen hanteren zal de learning rate door de grote productie dalen.

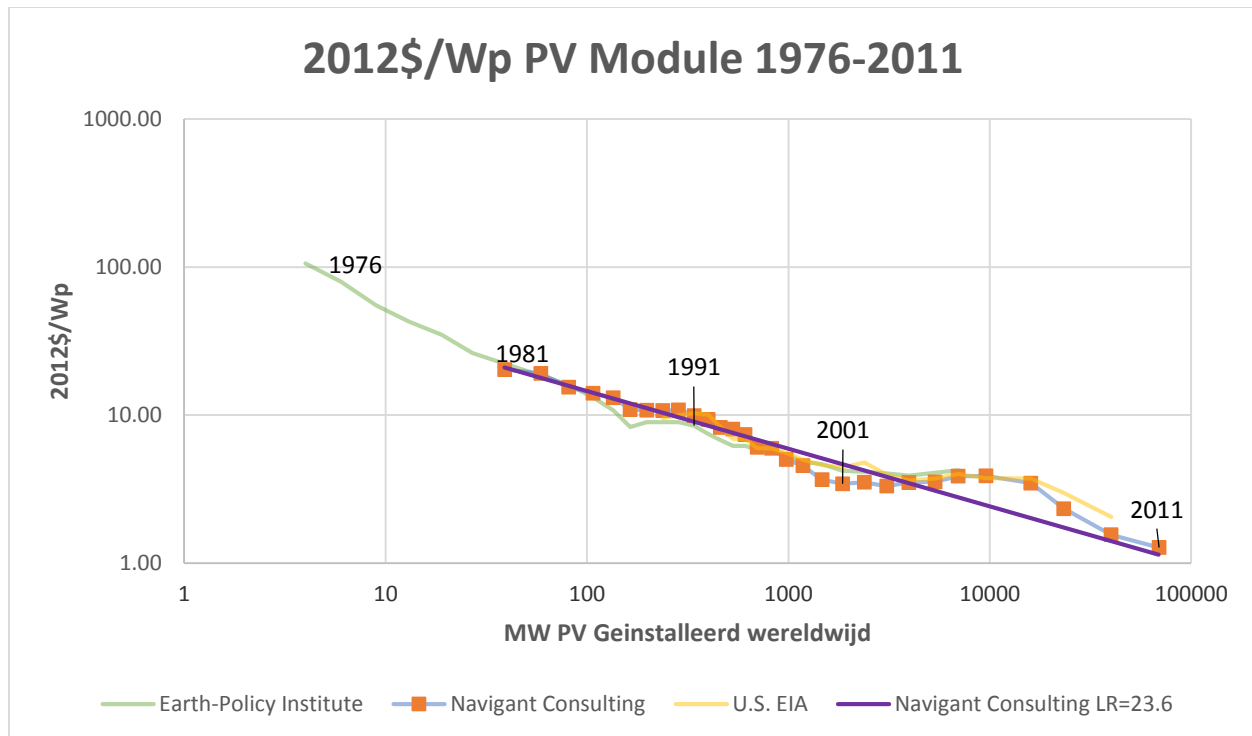
4.1 Learning curve industrie.

De learning curve van de industrie (figuur 2) bevat drie prijs indices: Earth-Policy Institute/PVNews (1976-2006), Navigant Consulting (1982-2011) en de U.S. EIA (1989-2010). Daarnaast is de curve van de Navigant Consulting dataset toegevoegd met learning rate 23.6%.

De berekende learning rates wijken sterk van elkaar af; Earth-Policy (36%), Navigant Consulting (23.6%) & EIA (20.5%). De learning rate (LR) van Earth-Policy is hoger omdat in de jaren 1976-1981 sterke prijsdalingen zijn gemeten, voor de periode 1982-2006 is de LR 26.1%. De LR van de U.S. EIA dataset is het laagst, dit komt mede omdat de average sales price (ASP) tussen 2003 en 2008 niet of nauwelijks gedaald is. Ditzelfde patroon is zichtbaar bij de data van Navigant Consulting en Earth-Policy. Deze periode heeft bij de learning rate van EIA het grootste effect omdat het totaal aantal gemeten jaren minder is. De determinatiecoëfficiënt R^2 toont dat er bij alle drie de datasets er sprake is van een sterke relatie, U.S. IEA (0.895), Navigant Consulting (0.9737) & Earth-Policy (0.988).

De gevonden learning rates komen goed overeen met de bevindingen van andere auteurs (hoofdstuk 2.3), met een afwijking van enkele procenten voor de data van Navigant Consulting en U.S. EIA. De LR van Earth-Policy is wel aanzienlijk hoger wat vermoedelijk veroorzaakt wordt door de prijzen tussen 1976 en 1987, waar ze harder daalden dan de prijzen die Navigant Consulting vermeldt. Het vergelijken van de data met die van andere auteurs is lastig aangezien zij deze niet publiceren.

Gemiddeld groeide het totale geïnstalleerde vermogen jaarlijks met 33.1% tussen 1976 en 2011 (Bloomberg New Energy Finance, 2011 & BP, 2010). Sinds 2000 ligt dit percentage hoger (41.4%) met een stijgende trend, 71.8% voor 2010 en 73.3% voor 2011. Over de gehele periode kostte het gemiddeld 29 maanden om het totaal geïnstalleerde vermogen te verdubbelen.



Figuur 2: PV Module experience curve 1976-2011, X-as 1976-2005 (Bloomberg New Energy Finance, 2011), 2005-2011 (BP, 2010), Y-as: (Earth Policy Institute, 2006), (Energy Information Administration, 2011) & (Mints, 2008). De dollarprijs is gecorrigeerd voor inflatie met als basisjaar 2012. LR Navigant is de learning curve met learning rate 23.6.

4.1.1 Learning curve industrie limitaties & valkuilen.

In figuur 2 is een duidelijke prijsstijging zichtbaar die rond 2004 begint en aanhoudt tot 2007. In deze tijden was er sprake van een hoge vraag naar zonnepanelen wat resulteerde in onvoldoende productiecapaciteit voor Silicium (dit wordt in hoofdstuk 5.4 verder behandeld). Er zijn ook verschillende korte periodes geweest met prijsstagnatie, zoals 1987-1990 en 1996-1997. Dit maakt een learning curve onbetrouwbaar voor korte termijn voorspellingen.

Er zijn auteurs die een toekomstige learning rate proberen te schatten en tegelijkertijd te onderbouwen met toekomstige dalingen in de kosten gezien door experts; een bottom-up assessment. Neij (2008) voorspelt panelen met hogere efficiëntie die langer meegaan en goedkoper zijn in onderhoud. Schaeffer et al. (2004) verwachten ook dat de efficiëntie van panelen zal toenemen en dat er minder silicium nodig is per Watt-Peak. Frankl, Menichetti & Prenzushi (2005) deden namens de Europese Commissie onderzoek naar de potentie van onder andere zonnepanelen, zij zien in alle scenario's de learning rate van panelen 20% blijven tot 2025. Na 2025 zakt de learning rate naar 10% in het pessimistische scenario, dit scenario gaat er van uit dat nieuwe typen panelen niet kunnen doorbreken. Het 'realistische' en 'zeer optimistische' scenario stelt de learning rate tot 2050 vast op 20%.

4.2 Learning curve marktspelers.

Om learning curves van verschillende marktspelers te maken zijn jaarverslagen van Suntech, Yingli Green, Trina Solar & Canadian Solar en First Solar gebruikt, op First Solar na zijn dit allemaal Chinese fabrikanten. De Chinese fabrikanten produceren allemaal panelen van Silicium, First Solar maakt gebruik van Thin Film technologie wat een andere learning curve volgt dan Siliciumpanelen.

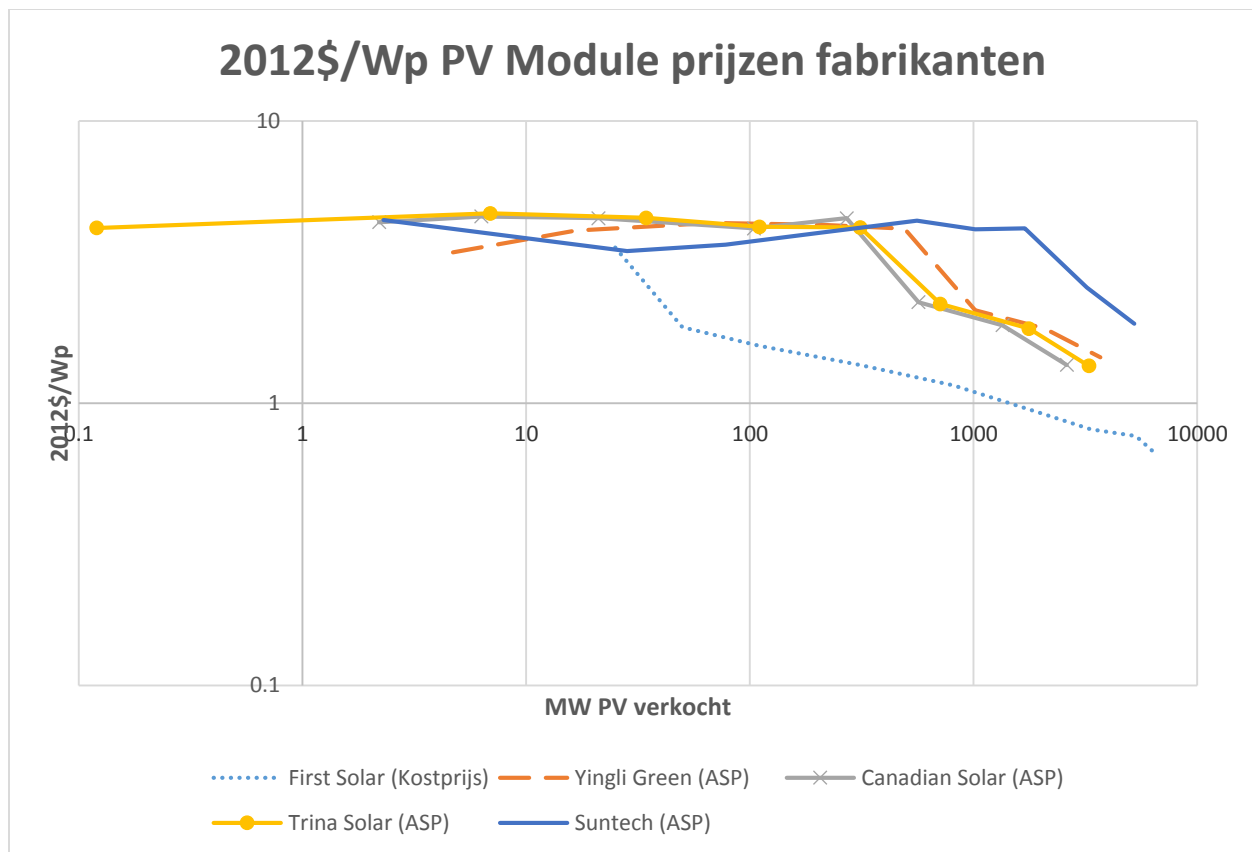
In de jaarverslagen van de Chinese fabrikanten staan onder andere de Average Sales Price (ASP) en het aantal verkochte/geproduceerde aantal Megawatt vermeld. In de jaarverslagen van First Solar is alleen de kostprijs te zien. De learning rates en R^2 waarden staan in tabel 3 en de learning curves zijn te zien in figuur 3.

De lage learning rates van de Chinese fabrikanten worden mede veroorzaakt door de snelle groei van het totaal aantal verkochte Megawatts. De sector als geheel heeft 29 maanden nodig om de output te verdubbelen; de vier Chinese marktspelers 6 maanden. Hoewel de marktspelers competitief met de sector waren op basis van ASP's is de learning rate lager dankzij de snellere toename van productie ten opzichte van de sector. Daarnaast worden de learning rates en R^2 waarden (gemiddeld 0.5) negatief beïnvloed door de tekorten aan Silicium. In meer dan de helft van de gemeten periode was er een tekort aan Silicium.

Bij First Solar is er sprake van een lineaire daling, met een learning rate van 18.9% en een R^2 waarde van 0.81. First Solar heeft geen last gehad van Silicium tekorten aangezien zij andere grondstoffen gebruiken. Tussen 2006 en 2011 behaalde First Solar onder andere kostenverlagingen door het verplaatsen van de productie. Zo werd nieuwe productiecapaciteit in Maleisië geplaatst waar de compensatie voor medewerkers lager is. De First Solar fabriek in Duitsland en Amerika waren in 2007 nog verantwoordelijk voor 100% van de productie, eind 2012 bedroeg dit percentage 26%. First Solar had gemiddeld 12 maanden nodig om het totaal aantal verkochte Megawatts te verdubbelen.

Bedrijf	Marktaandeel (2011)	Data periode (aantal jaar)	Type	LR (R^2)
Suntech	5.8%	2002-2011(9)	ASP (¥)	4.45% (0.387)
First Solar*	5.7%	2006-2011 (5)	Kostprijs (\$)	18.9% (0.811)
Yingli Green	4.8%	2004-2011 (7)	ASP (¥)	7.34% (0.474)
Trina Solar	4.3%	2004-2011 (7)	ASP (¥)	5.14% (0.476)
Canadian Solar	4.0%	2004-2011 (7)	ASP (¥)	8.76% (0.687)
<u>Totaal</u>	<u>24.6%</u>			

Tabel 3: Berekende learning rates (LR) van de vijf grootste marktspelers in 2011, data uit jaarverslagen van Suntech, First Solar, Yingli Green, Trina Solar & Canadian Solar. Data marktaandeel uit Al Jaber et al. (2012). * Prijs aangepast naar Amerikaanse inflatie.



Figuur 3: Learning curves van de vijf grootste marktspelers in 2011 (Al Jaber et al., 2012), de prijs uitgedrukt in dollars (op Amerikaanse inflatie aangepast) en uitgezet tegen de cumulatieve productie van het desbetreffende bedrijf in Megawatt.

4.2.1 Learning curve marktspelers limitaties & valkuilen.

De bruikbaarheid van de gevonden learning rates wordt gelimiteerd door de grote impact dat het tekort aan silicium op de prijzen heeft gehad en de daaropvolgende lage R^2 waarden. Van 2004 tot en met 2008 werd er nauwelijks vooruitgang geboekt in de prijs, de daling die daarna begon is tevens niet te extrapoleren: hier is de invloed van de prijsdaling in silicium groot en de wereldwijde productiecapaciteit, voor zowel Silicium als zonnepanelen, groeide harder dan de vraag.

Het feit dat de Chinese yuan sinds tussen 2006 en 2011 met 23% in waarde is toegenomen, resulteert in vertekende ASP's. Als de prijs van een Watt-Peak binnen China stabiel blijft dan zal dit een positieve invloed hebben op de gerapporteerde ASP, de hogere ASP geeft in dat geval een vertekend beeld. Dit effect is niet te verminderen aangezien fabrikanten niet de verkoopprijs per regio vermelden. Shipping costs kunnen ook een sterke invloed hebben op de ASP's; wanneer binnenlandse verkopen relatief toenemen, dalen de verzendkosten en dus de ASP's. Hiervoor is tevens niet genoeg data beschikbaar om dit effect te filteren.

Om de invloed van deze variabelen verder uit te sluiten zal in hoofdstuk 5 (deelvraag 2) verder ingegaan worden op de kostcomponenten van het productieproces bij deze bedrijven. Het Amerikaanse First Solar is de enige die zelf kostprijzen van panelen publiceert, wat resulteert in een learning rate van 18.9%. First Solar is mogelijk het bruikbaarste om te extrapoleren aangezien het een lineaire daling van kostprijzen laat zien met een hoge R^2 waarde en niet onderhevig is geweest aan Silicium tekorten.

4.3 Beantwoording deelvraag 1.

Deelvraag 1: Hoe heeft de prijs van zonnepanelen zich ontwikkeld en is er sprake van een learning curve?

De gevonden learning curves voor de zonnepanelen sector als geheel komen overeen met de bevindingen van andere auteurs, met een learning rate in de periode 1982-2011 van ongeveer 23.6%. De average sales price (ASP) volgt een vrij lineaire lijn op een logaritmische schaal; kenmerkend voor een learning curve. In de laatste jaren (2005-2008) wijkt deze echter af, dit komt door de tekorten aan Silicium wat de prijs van panelen tijdelijk omhoog dreef. De prijs van zonnepanelen uitgedrukt in Watt Peak is in de afgelopen 29 jaar in totaal met 93.7% afgenomen. In deze periode waren er slechts drie jaren waarin de prijs steeg (enkele procenten), er kan dus geconcludeerd worden dat de prijs nagenoeg constant daalt. De determinatiecoëfficiënt was bij alle drie de datasets hoog (>0.895), dit betekent dat de relatie betrouwbaar is en mogelijk geëxtrapoleerd kan worden.

De learning curves van bedrijven zijn minder constant, dit komt vooral omdat de meeste bedrijven pas 7 jaar bestaan en er in drie van deze jaren grote siliciumtekorten waren. First Solar had de hoogste learning rate (18.9%) en dit komt mede omdat zij geen silicium gebruiken. First Solar is ook de enige met een lineaire prijsdaling en een sterke relatie (R^2 0.81). De overige vier (Chinese) bedrijven hebben vergelijkbare learning rates, dit is ook te verwachten aangezien er gemeten is via verkoopprijzen en bedrijven vooral moeten concurreren op prijs. De determinatiecoëfficiënt R^2 is gemiddeld 0.5 voor de Chinese fabrikanten; de gevonden relatie is dus niet erg sterk.

De snelle stijging van de verkoop van de geanalyseerde bedrijven leidt tot een verdubbelingstijd van 6 maanden voor de Chinese fabrikanten ten opzichte van 29 maanden in de sector, dit zorgt er voor dat de learning rate sterk daalt. In het volgende hoofdstuk worden onder andere winstgevendheid en de invloed van silicumprijzen verder behandeld en wordt de gevonden prijsdaling verklaard.

5. Analyse kostprijscomponenten van zonnepanelen.

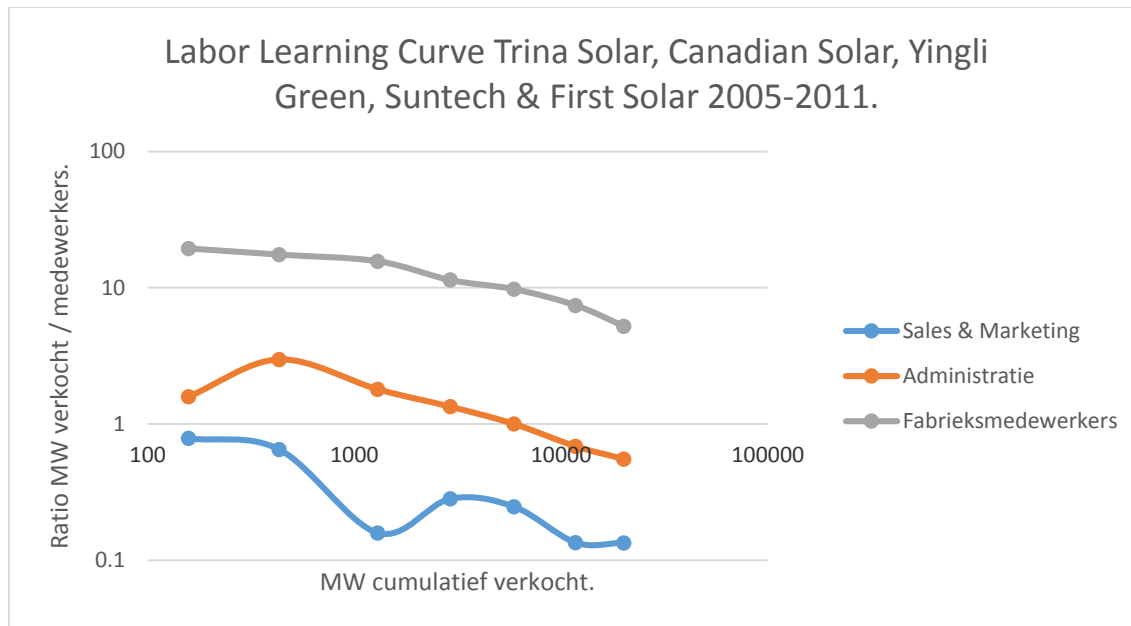
In dit hoofdstuk zal de tweede deelvraag worden behandeld; *welke kostprijscomponenten zijn verantwoordelijk voor de ontwikkelingen in de prijs van zonnepanelen?* Arbeidskracht, silicium verbruik en kosten, loonkosten, winstmarges en efficiëntie van modules worden geanalyseerd en zijn deels ingedeeld in de typen learning van Bahk & Gort (1993) en de knowledge spillover gevonden door Nemet (2006). Tot slot wordt ingegaan op de meest recente ontwikkelingen in de industrie (2011+).

5.1 Labor learning.

Er zijn twee redenen om te verwachten dat het aantal benodigde medewerkers per geproduceerde Watt gedaald zijn. Producten als First Solar, Yingli Green, Canadian Solar, Trina Solar en Suntech verkochten in 2004 gezamenlijk 58MW, in 2011 bedroeg dit bijna 10000MW. Dankzij repetitie en het juist inzetten van medewerkers zullen het aantal uren per MW dalen (Bahk & Gort, 1993). Ten tweede is het eindproduct in fysieke zin niet groter geworden, hierdoor treden schaalvoordelen op voor bijvoorbeeld de logistieke afdeling en fabricage.

In figuur 4 zijn het aantal werknemers van de verschillende bedrijven bij elkaar opgeteld en gedeeld door het aantal verkochte MegaWatt. Zo kostte het in 2005 (150MW) gemiddeld 19.42 fabrieksmedewerkers om één verkochte MW te produceren, in 2011 (20000 MW) nam dit af tot 5.20, een daling van 73.2%. In dezelfde periode nam de ratio van Sales & Marketing medewerkers af met bijna 82.9% en de administratiemedewerkers met 65.2%. De learning rate voor fabrieksmedewerkers was 13.97% (R^2 0.92), administratie 13.2% (R^2 0.51) en Sales & Marketing 24.42% (R^2 0.874).

Bij alle bedrijven is er sprake van een nagenoeg constante daling. Tijdelijke toenames bij de fabrikanten ontstaan vooral doordat jaarverslagen het aantal medewerkers per 31 december vermelden en er constant nieuwe fabrieken bijkomen. Wanneer een nieuwe fabriek in augustus in werking wordt genomen en de eerste producten (MWs) een jaar later worden verkocht ontstaan er tijdelijke afwijkingen in ratio's. De schommeling in de Sales & Marketing ratio's zijn ontstaan door een sterke toename in medewerkers bij Suntech in 2006 en 2008; de reden hiervoor is onduidelijk.

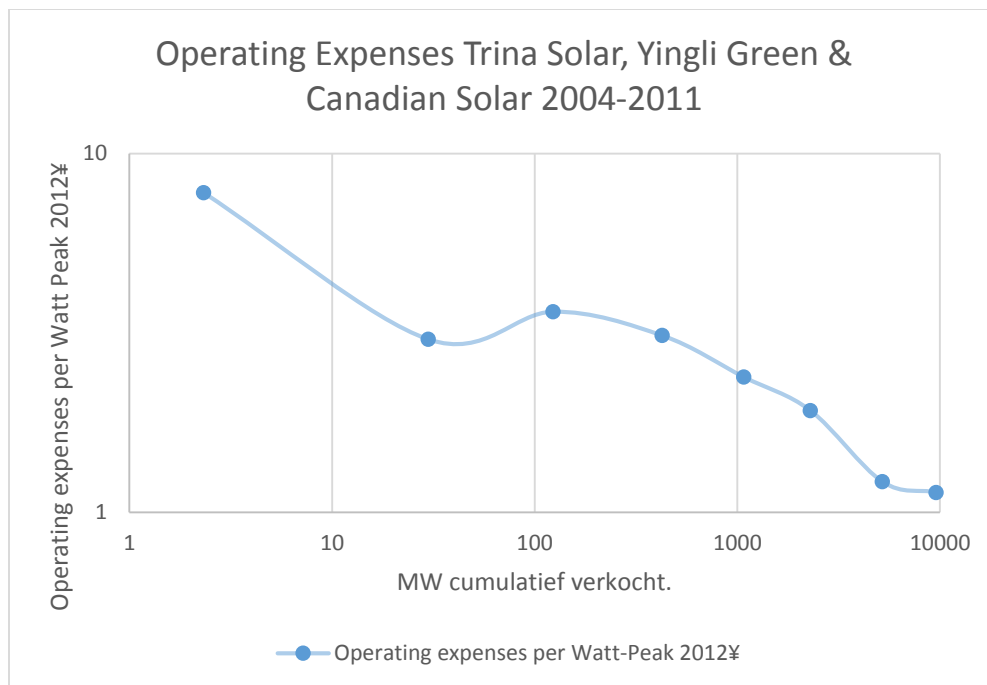


Figuur 4: Labor learning curve. Sales & Marketing + Administratie ratio's berekend via jaarverslagen Yingli Green (2007-2011), Canadian Solar (2006-2011), Suntech (2005-2011). Fabrieksmedewerkers ratio uit dezelfde jaarverslagen en First Solar (2006-2011).

5.2 Organisational learning.

Organisational learning wordt gemeten via de operating expenses vermeld door Trina Solar, Yingli Green & Canadian Solar in hun jaarverslagen. In de operating expenses zijn verkoop, R&D en algemene uitgaven meegenomen.

In figuur 5 is een duidelijke daling te zien, in totaal namen de uitgaven per Watt-Peak tussen 2004 en 2005 af met 82.5%. De learning rate in deze periode was 13.5% met R^2 0.92, dit toont aan dat er een sterke relatie is; er is zeker sprake van organisational learning.



Figuur 5: Operating expenses van Trina Solar (2004-2011), Canadian Solar (2004-2011) en Yingli Green (2005-2011) in 2012 yuan, aangepast op Chinese inflatie, uitgedrukt in expenses per verkochte Watt-Peak.

5.3 Capital learning.

Capital learning ontstaat door het leren over fysiek kapitaal zoals tools en machines (Bahk & Gort, 1993). Nemet (2006) identificeerde twee prijscomponenten die hierbij een belangrijke rol spelen; efficiëntie van de modules en het gebruik van Silicium in gram per Watt-Peak. Hij concludeerde in zijn onderzoek dat tussen 1975 en 2001 de consumptie van Silicium flink gedaald is: van 30 gram per Watt-Peak naar 18 gram. In 2004 bedroeg het industriegemiddelde 13 gram per Watt-Peak en in 2005 12 gram (Rogol & Fisher, 2005).

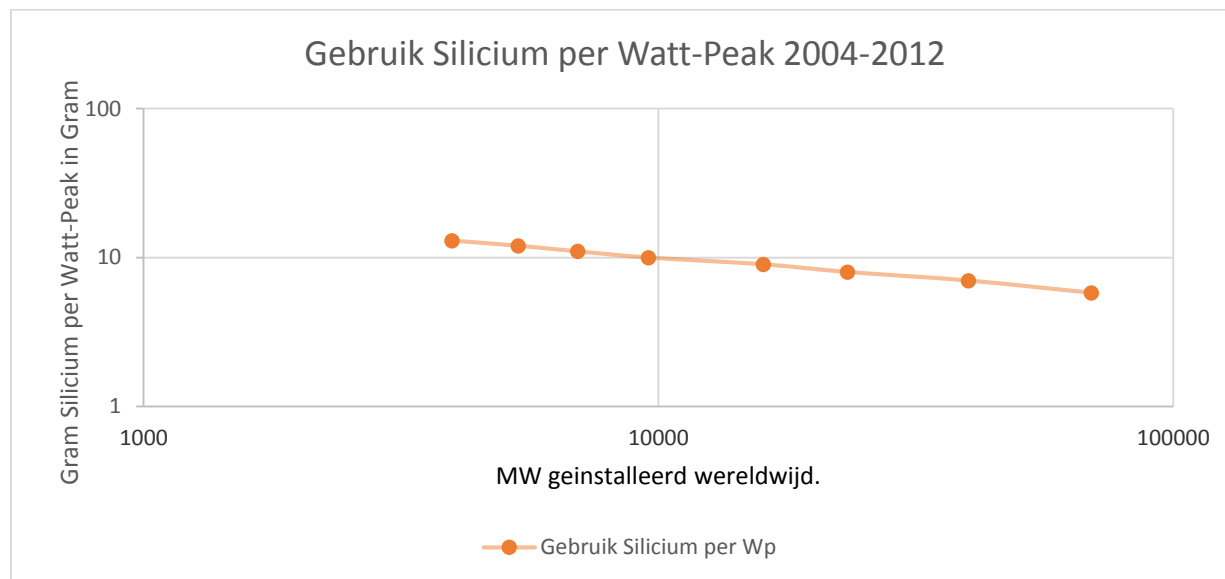
Recente schattingen van siliciumgebruik komen uit op 7 gram per Watt Peak in 2010 (Rao, 2010) en 5.5-6 gram per Watt Peak in 2011 (Zaman & Lockman, 2011), Trina Solar gebruikte in 2011 gemiddeld 5.8 gram per Watt Peak. Bij een kiloprijs van 25\$ komt deze vermindering neer op een kostenverlaging van ongeveer \$0.30 per Watt Peak. Verdere dalingen zijn te verwachten. Zo heeft een bedrijf in California machines ontwikkeld die wafers kunnen snijden met een dikte van 20 micrometer, ten opzichte van de normale 200 micrometer (Wald, 2012).

Nemet (2006) schrijft verder in zijn onderzoek dat tussen 1980 en 2001 de efficiëntie van panelen is toegenomen van 8% naar 13.5%, de resulterende kostendaling hierdoor bedroeg 30% van het totaal. Vooruitgang in efficiëntie wordt geboekt door verbetering van bestaande technologieën (zoals standaard crystalline Silicium panelen) en nieuwe technologieën zoals Thin Film. Er zijn al zonnecellen die een efficiëntie behalen van 41.6% (National Renewable Energy Laboratory, 2010), echter betreffen dit onderzoekscellen.

Trina Solar verkoopt momenteel panelen met een efficiëntie van bijna 16% (Trina Solar, 2013). Hoewel er geen datasets zijn blijkt uit oude productspecificaties wel dat producten beter worden. Zo behaalde een

Sharp paneel in 2005 een rendement van 12.3%, en een paneel uit 2012 een rendement van 14.7% (Sharp, 2005) & (Sharp, 2012).

Vanwege het gebrek aan historische data is het niet mogelijk om een learning curve te maken met daarin module efficiëntie; wel kan met zekerheid worden gezegd dat deze verder toegenomen is. Het verloop van het gebruik van Silicium per Watt-Peak tussen 2004-2012 is wel berekend met data uit verschillende bronnen, waarbij de data voor 2006-2009 geschat zijn (figuur 6). De daling in deze periode komt uit op 55% met een learning rate van 17.3%. De hoge R^2 waarde van 0.997 geeft aan dat er sprake is van een sterke relatie.



Figuur 6: Gebruik Silicium in gram per Watt-Peak 2005-2012. Data gebruik Silicium; 2004-2005 (Rogol & Fisher, 2005), 2010 (Rao, 2010), 2011 (Trina Solar, 2012).

5.4 Knowledge spillover.

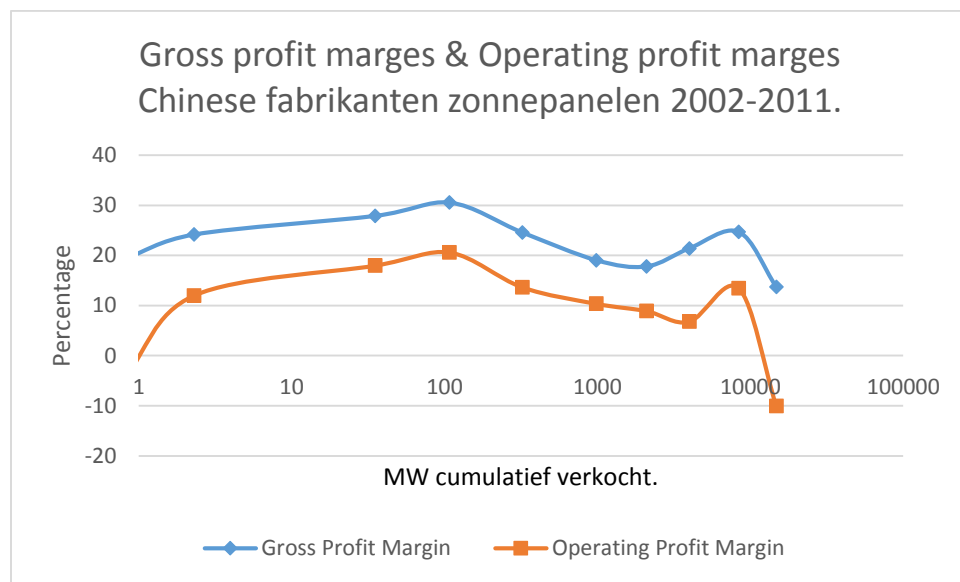
Nemet (2006) concludeerde in zijn onderzoek dat de prijs van Silicium in de periode 1985-2001 gedaald was van 300\$ per kilo naar 25\$. In 2005 begon er echter een tekort aan Silicium te ontstaan vanwege een verhoogde vraag naar zonnepanelen. Dit leidde tot prijzen van boven de 400\$ per kilo rond 2008 (Baziliana et al., 2012) (Trina Solar, 2009). Eind 2011 was de prijs weer gedaald naar 25\$/kilo volgens onderzoek van Bloomberg New Energy Finance (Baziliana et al., 2012).

Onderzoeksbureau iHS iSuppli (Gu, 2012) laat zien dat vooral in 2012 de prijs hard gedaald is; van 29\$ naar 19\$. Solarbuzz (2012) zegt dat bedrijven het momenteel moeilijk hebben, maar dat een toekomstige kostendaling van 7% per jaar haalbaar is met gelijke winstmarges. De grootste winsten in de kostendaling lijken geboekt te zijn in de periode 1975-2001. Sinds 2001 is de prijs wel gedaald maar het is niet te zeggen hoeveel exact.

5.5 Loonkosten en winstmarges.

Winstmarges en loonkosten zullen kort toegelicht worden. Uit onderzoek van het Chinees Bureau van Statistiek blijkt dat het gemiddelde salaris van fabrieksmedewerkers in China tussen 2002 en 2012 toenam met 300%, dit heeft een negatieve invloed gehad op de kostprijs van panelen (Trading Economics, 2013). Het verloop van salarissen van medewerkers in de R&D en verkoop zijn onbekend, het is wel aanneembaar dat deze ook gestegen zijn.

In figuur 7 is te zien hoe de winstmarges zich de laatste jaren ontwikkeld hebben. Een duidelijke trend is hier niet te zien, de R^2 waarde van de gross profit margins is 0.102, voor de operating profit margins is deze 0.0059. Het is niet aannemelijk dat verlaagde winstmarges prijsdalingen op lange termijn hebben veroorzaakt aangezien er geen sterke relatie is tussen beide variabelen. In 2011 is er wel sprake van een scherpe daling, hierop zal in het volgende hoofdstuk verder worden ingegaan.



Figuur 7: Ontwikkeling gross profit/operating profit margins van Chinese fabrikanten van zonnepanelen. Data jaarverslagen: Suntech (2002-2011), Trina Solar (2004-2011), Canadian Solar (2004-2011) & Yingli Green (2003-2011).

5.6 Situatie 2011-2013.

Ondanks het grote marktaandeel dat First Solar, Trina Solar, Suntech, Yingli Green en Canadian Solar hebben wist er geen van deze bedrijven in 2011 winst te maken. Het slechte financiële klimaat – met name in Europa – doet de vraag naar panelen minder hard stijgen dan verwacht en daardoor ontstaat er overcapaciteit.

Recentelijk is de Chinese overheid beschuldigd door zowel de Verenigde Staten, Europa & India van het 'dumpen' van panelen op de internationale markt. De Chinese overheid zou €33 miljard aan goedkope leningen hebben verschaft aan producenten, zodat ze onder de kostprijs kunnen verkopen in Europa (Chaffin, 2012). De groep die de klachten heeft ingediend verwacht dat importheffingen in Europa beginnen rond mei/juni 2013 (Nicola, 2013). In Amerika geldt momenteel een importtarief van 24-36% op panelen uit China (Cardwell & Bradsher, 2012).

Hoewel de importheffingen worden ingesteld om lokale banen en bedrijven te beschermen, zal China mogelijk hetzelfde doen voor andere technologie die zij importeren vanuit bijvoorbeeld Europa (Lu,

2012). Momenteel lijkt het er op dat China de (over)capaciteit wil gebruiken om hun eigen energiemarkt te vernieuwen. Het energiedoel voor 2015 is verhoogd van 15GW naar 21GW aan zonnepanelen (Reuters, 2012).

Tussen november 2010 en november 2012 is de groothandelprijs van Chinese panelen gedaald van €1.47 naar €0.56 per Watt-Peak (-62%) (Sologico, 2013). Het is lastig om te zeggen of deze prijs winstgevend is voor zowel de makers van panelen, cellen, wafers en silicium. Gezien de gegeven overheidssteun is dit waarschijnlijk niet het geval.

5.7 Beantwoording deelvraag 2.

Welke kostprijscomponenten zijn verantwoordelijk voor de ontwikkelingen in de prijs van zonnepanelen?

In de zonnepanelen industrie is er sprake van alle drie de typen learning van Bahk & Gort (1993). Organisational learning, geoperationaliseerd via een analyse van operating expenses per Watt-Peak toont een daling van 82.5% in de periode 2004-2011 (LR 13.5%). Het aantal medewerkers per MW (labor learning) nam bij de fabricage af met 73.2% tussen 2004 en 2011 (LR 14%); de verkoopafdeling had een gemiddelde daling van 82.9% (LR 24.4%) en de administratie 65.2% (LR 13.2%). Capital learning is lastig te analyseren door het gebrek aan historische data. Wel kan met zekerheid gezegd worden dat de efficiëntie van zonnepanelen toeneemt en het gebruik van Silicium per Watt-Peak is gedaald (55% vermindering tussen 2004-2012, LR 17.3%).

Er is ook nog steeds sprake van de knowledge spillover die Nemet (2006) vond voor de periode 1985-2001. De prijs van Silicium is gedaald sinds 2001, het is echter niet mogelijk om te zeggen hoeveel aangezien er geen bronnen zijn die de prijs consistent hebben bijgehouden.

De salarissen voor Chinese medewerkers zijn sterk gestegen in de afgelopen tien jaar (300%); dit heeft een negatieve invloed gehad op de productiekosten. De winstmarges lijken geen rol te hebben gespeeld in de geobserveerde prijsdalingen tussen 2002 en 2011, met een determinatiecoëfficiënt van gemiddeld 0.054.

Eind 2011 begonnen de winstmarges van fabrikanten te kelderen door de lagere groei in vraag naar zonnepanelen dan verwacht. Hierdoor is overcapaciteit ontstaan wat resulteert in hard dalende verkoopprijzen. Op dit moment dalen de prijzen van panelen nog steeds hard, verkoopprijzen zijn momenteel niet winstgevend en bedrijven blijven overeind dankzij overheidssubsidie.

5. Conclusie.

De onderzoeksvraag “Hoe hebben de prijzen van zonnepanelen zich ontwikkeld en wat zijn de oorzaken hiervan?” is onderzocht via twee deelvragen. Deze zullen eerst behandeld worden en daarna de praktische implicaties van de bevindingen.

Hoe heeft de prijs van zonnepanelen zich ontwikkeld en is er sprake van een learning curve?

Analyse van drie verschillende datasets die jaarlijks Average Sales Prices meten resulteert in verschillende learning rates, uiteenlopend van 36% tot 20.5%. Verschillen in deze learning rates ontstaan vooral door de periode van de desbetreffende dataset; in het bijzonder de periode 1975-1981 waar de prijs hard gedaald zou zijn.

De curves volgen een nagenoeg lineaire daling op een grafiek met logaritmische assen. Bij elke verdubbeling van het wereldwijd geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen, wat gemiddeld 29 maanden duurt, neemt de prijs af met 20.5-26.1% (1981-2011).

De prijs per Watt-Peak is in de afgelopen 29 jaar met 93.7% afgenomen en bedroeg in 2011 gemiddeld \$1.28. Opvallend aan deze periode is een tijdelijke prijsstijging rond 2007 welke werd veroorzaakt door een tekort aan Silicium, de grondstof van de meeste zonnepanelen. De relatie tussen het aantal geproduceerde Megawatt-Peak en de gemiddelde verkoopprijs is sterk. De R^2 waarde van de US IEA dataset is 0.895, voor de dataset van Navigant en Earth-Policy is deze hoger dan 0.97. Deze hoge waarden maken de gevonden relatie sterk en betrouwbaar.

Vier van de vijf geanalyseerde marktspelers hadden een veel lagere learning rate dan de sector. Vier grote Chinese fabrikanten, Suntech, Trina Solar, Yingli Green en Canadian Solar hadden een gemiddelde learning rate van 6.42% over een periode van 7 jaar. Dit getal is sterk beïnvloed door de jaren met tekorten aan Silicium en de grote toename in het aantal verkochte Megawatt per bedrijf. In tegenstelling tot de sector die 29 maanden nodig had om de cumulatieve productie te verdubbelen hadden deze vier bedrijven gemiddeld 6 maanden nodig, terwijl zij dezelfde verkoopprijzen als de markt hanteerden. Mede door deze twee factoren is er bij de Chinese fabrikanten geen sprake van een lineaire prijsdaling en is de gemiddelde R^2 waarde 0.5. Deze lage R^2 waarde maakt de relatie zwak. First Solar's learning rate van 18.9% is betrouwbaarder vanwege de sterke relatie (R^2 0.87). First Solar had geen last van Silicium tekorten aangezien zij Thin Film technologie gebruiken.

De zwakte van de berekende learning rates voor zowel de sector als losse marktspelers (op First Solar na) is dat er gebruik gemaakt is van Average Sales Prices in plaats van kostprijzen. Deze zijn gebruikt omdat er geen data met kostprijzen te vinden is. Aangezien het theoretisch gezien mogelijk is dat variabelen zoals dalende winstmarges de geobserveerde daling hebben veroorzaakt, zijn kostprijscomponenten verder geanalyseerd in deelvraag 2.

Welke kostprijscomponenten zijn verantwoordelijk voor de ontwikkelingen in de prijs van zonnepanelen?

Verschiedende kostprijscomponenten hebben een positieve invloed gehad op de kostprijs in de periode 2005-2011. De kostprijscomponenten zijn onderzocht via jaarverslagen van vier Chinese fabrikanten en deels ingedeeld in de drie typen learning van Bahk & Gort (1993). Hieruit blijkt dat er aanzienlijk minder medewerkers vereist zijn om een Megawatt aan panelen te verkopen (labor learning) en het gemiddelde paneel efficiënter is geworden en minder Silicium per Watt-Peak vereist (capital learning). In totaal

namen de gemiddelde operating expenses per Watt-Peak uitgedrukt in yuan af met 82.5% in de periode 2004-2011 (organisational learning).

Stijgende loonkosten voor medewerkers in China hadden een negatieve impact op de kostprijs, zo nam het salaris van een fabrieksmedewerker in China tussen 2003 en 2011 toe met 300%. Winstmarges blijken niet structureel gedaald te zijn en dit verklaart dus niet de prijsdaling tussen 2002 en 2010 (R^2 0.054). De situatie sinds 2010 is anders; de vraag naar panelen stijgt niet zo hard als leveranciers hadden verwacht en overheden proberen nu fabrikanten overeind te houden via subsidie. Het is hierdoor de vraag of panelen niet (tijdelijk) onder de kostprijs verkocht worden, dit heeft geleid tot rechtszaken in verschillende landen waar lokale fabrikanten importheffingen eisen op Chinese zonnepanelen.

Praktische implicaties.

De gevonden learning rates en verdubbelingstijd kunnen door managers en particulieren gebruikt worden om te bepalen wanneer een investering in zonnepanelen naar verwachting kostendekkend zal zijn. De waarden kunnen ook gebruikt worden om te onderzoeken of een directe aankoop financieel gezien interessanter is dan enkele jaren wachten op verdere dalingen. Daarnaast kunnen analisten de geïdentificeerde kostencomponenten als leidraad gebruiken om fabrikanten te evalueren ten opzichte van de markt.

De learning rate creëert ook inzicht voor fabrikanten zelf, zij kunnen hieruit opmaken welke kostenverlaging zij moeten bereiken om competitief te blijven. Zij kunnen de product portfolio matrix van Conley (1970) toepassen door geld dat verdiend is met producten in markten met lage groei te investeren in nieuwe markten met een snelle groei (zoals zonnepanelen). De grote marktspelers van dit moment kunnen dit echter niet doen aangezien zij geen verschillende producten hebben. China lijkt de theorie van Conley (1970) als overheid zijnde momenteel toe te passen; door middel van subsidies en goedkope leningen verkrijgen producenten een groot marktaandeel op de wereldmarkt.

De gevolgen voor de maatschappij als geheel kunnen groot worden. Momenteel zijn investeringen in zonnepanelen vaak al kostendekkend; dit zal alleen maar toenemen als de prijs van zonnepanelen verder daalt. Overheden spelen hierin een grote rol aangezien zij het tarief kunnen bepalen voor de elektriciteit dat wordt geleverd aan het elektriciteitsnet. Zij zijn ook in de positie om lokale kennis te stimuleren zoals die van installateurs, want ook daar is sprake van learning. Naarmate installateurs meer panelen installeren vinden zij manieren om dit goedkoper te kunnen doen, dit maakt elektriciteit uit zonnepanelen meer competitief.

6. Refenties

Al-Abdullah, K., Mahmod, S., & Sutaif, M. (2012). Finding the Electrical Circuit that Require the Photovoltaic Solar Cell in Imaginary Resistance and Studying the Cell in the Static and Dynamic State. *Energy Procedia*, 19(0), 199-211. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.200

Al Jaber, S. A., Amin, A. Z., Clini, C., Dixon, R., Eckhart, M., El-Ashry, M., . . . Hamilton, K. (2012). *Renewables 2012 Global Status Report*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

Argote, L., & Epple, D. (1990). Learning curves in manufacturing. *Science* (247), 920-924. Doi: 10.1126/science.247.4945.920

Arrow, K. J. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3), 155-173. doi: 10.2307/2295952

Badiru, A. B. (1992). Computational survey of univariate and multivariate learning curve models. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 39(2), 176-188. doi: 10.1109/17.141275

Bahk, B. H., & Gort, M. (1993). Decomposing learning by doing in new plants. *Journal of Political Economy*, 561-583. S

Baziliana, M., IjeomaOnyejia, M. L., MacGilld, I., Chases, J., Shahe, J., Gielenf, D., . . . Zhengrongji, S. (2012). Re-considering the Economics of Photovoltaic Power. *Bloomberg NEF*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.bnef.com/WhitePapers/download/82>

Bloomberg New Energy Finance. (2011). Solar Silicon Price Drop Brings Renewable Power Closer. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://go.bloomberg.com/multimedia/solar-silicon-price-drop-brings-renewable-power-closer/>

BP. (2010). BP statistical review of world energy. Verkregen op 7 februari 2012 van http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf

Chaffin, J. (2012). EU steps up solar panel pressure on China. *Financial Times*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/341c33ec-29a5-11e2-a604-00144feabdc0.html>

Conley, P. (1970). Experience curves as a planning tool. *Spectrum, IEEE*, 7(6), 63-68. doi: 10.1109/mspec.1970.5213421

Cardwell, D. & Bradsher, K. (2012). U.S. Will Place Tariffs on Chinese Solar Panels. *The New York Times*. Verkregen op 7 februari 2012 http://www.nytimes.com/2012/10/11/business/global/us-sets-tariffs-on-chinese-solar-panels.html?_r=0

Dutton, J. M., & Thomas, A. (1984). Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity. *The Academy of Management Review*, 9(2), 235-247. doi: 10.2307/258437

Earth Policy Institute. (2006). World Average Photovoltaic Production and Module Cost per Watt, 1975-2006. Verkregen op 7 februari 2012 van http://www.earth-policy.org/datacenter/xls/indicator12_2007_7.xls

Energy Information Administration [EIA]. (2011). Annual Energy Review 2011. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf>

Frankl, P., Menichetti, E., & Prennushi, G. (2005). Deliverable n 11.2-RS Ia "Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications". Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.needs-project.org/RS1a/RS1a%20D11.2%20Final%20report%20on%20PV%20technology.pdf>

Getty Images. (g.d.). Verkregen op 7 februari 2012 van <http://energy.anu.edu.au/news/2011/aug/15/master-energy-change-applications-open-23-august-2011>

Gu, G. (2012). Solar Polysilicon Pricing in October Declines by Highest Rate Since February. *iHS iSuppli*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.isuppli.com/Photovoltaics/News/Pages/Solar-Polysilicon-Pricing-in-October-Declines-by-Highest-Rate-Since-February.aspx>

Harmon, C. (2000). Experience curves of photovoltaic technology. *International Institute for Applied Systems Analysis [IIASA]*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/IR-00-014.pdf>

Junginger, H. M. (2005). Learning in renewable energy technology development. (Proefschrift, Universiteit Utrecht, Nederland). Verkregen op 7 februari 2012 van <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0706-200016/index.htm>

Junginger, H. M. (2000). Experience curves in the wind energy sector use: analysis and recommendations. (Master thesis, Universiteit Utrecht, Nederland). Verkregen op 7 februari 2012 van <http://igitur-archive.library.uu.nl/copernicus/2006-0308-200152/i2000-29.pdf>

Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729-15735.

Lieberman, M.B. (1984). The Learning Curve and Pricing in the Chemical Processing Industries. *The RAND Journal of Economics*. 15(2), 213-228.

Lu, Y. (2012). No Winners in the Solar Trade War between China, the U.S. and EU. *China Briefing*. Verkregen op 7 februari 2012 <http://www.china-briefing.com/news/2012/12/20/no-winners-in-the-solar-trade-war-between-china-the-u-s-and-eu.html>

McDonald, A., & Schrattenholzer, L. (2001). Learning rates for energy technologies. *Energy policy*, 29(4), 255-261. doi: 10.1016/S0301-4215(00)00122-1

Mints, P. (2008). Global Potential for Solar Electricity, A Supply and Demand Perspective. *Navigant Consulting*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://ewh.ieee.org/r6/scv/eds/slides/20081002-Paula-Mints-Navigant.pdf>

National Renewable Energy Laboratory [NREL] (2010). Best Research-Cell Efficiencies. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://sroeco.com/solar/images/PVeff-rev100414.png>

Neij, L. (2008). Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. *Energy policy*, 36(6), 2200-2211.

Nemet, G. F. (2006). Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy policy*, 34(17), 3218-3232.

Nicola, S. (2013). Solarworld Expects EU's China Anti-Dumping Duties in May or June. *Bloomberg*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.bloomberg.com/news/2013-01-03/solarworld-sees-eu-imposing-china-dumping-duties-in-may-or-june.html>

Parente, V., Goldemberg, J., & Zilles, R. (2002). Comments on experience curves for PV modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10(8), 571-574. doi: 10.1002/pip.458

Rao, G. (2010). Key Considerations for Polysilicon Manufacturing in India. *PV Group*. Verkregen op 7 februari 2012 van http://www.pvgroup.org/NewsArchive/ctr_036225

Reuters. (2012). China hikes 2015 solar power target by 40 pct. *Reuters*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://in.reuters.com/article/2012/08/08/china-power-renewables-idINL4E8J80J120120808>

Rogol, M. & Fisher, B. (2005). Sun screen II: Investment opportunities in solar power. *CLSA*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.photon-international.com/news/PI%202005-08%20www%20med%20feat%20Sunscreen%20Study.pdf>

Schaeffer, G. J., Alsema, E., Seebregts, A., Beurskens, L., De Moor, H., Van Sark, W. & Laukamp, H. (2004). Learning from the sun; analysis of the use of experience curves for energy policy purposes: The case of photovoltaic power. final report of the PHOTEX project. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04035.pdf>

Sharp. (2005). 200 Watt Next Generation. Breakthrough performance. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.altestore.com/mmsolar/others/Sharp200.pdf>

Sharp. (2012). 240 Watt Residential Module. Verkregen op 7 februari 2012 van http://files.sharppusa.com/Downloads/Solar/Products/sol_dow_NDF5Q240.pdf

Trading Economics (2013). China Wages in Manufacturing. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.tradingeconomics.com/china/wages-in-manufacturing>

Trina Solar. (2009). Form 20-F: Trina Solar Limited. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://ir.trinasolar.com/phoenix.zhtml?c=206405&p=irol-sec>

Trina Solar. (2013). Trina Solar - Multi Series. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.trinasolar.com/eu/products/multi-series?tab=Multi%20Series>

Solarbuzz. (2012). Top-Tier Photovoltaic Polysilicon and Wafer Producers to be Profitable in 2013. *Solarbuzz*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.solarbuzz.com/news/recent-findings/top-tier-photovoltaic-polysilicon-and-wafer-producers-be-profitable-2013>

Sologico. (2013). Preisindex. Verkregen op 7 februari 2012 van http://www.pvxchange.com/priceindex/Default.aspx?template_id=1&langTag=de-DE

Van der Zwaan, B., & Rabl, A. (2004). The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy. *Energy policy*, 32(13), 1545-1554. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00126-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00126-5)

Van Sark, W. (2008). Introducing errors in progress ratios determined from experience curves. *Technological Forecasting and Social Change*, 75(3), 405-415.

Van Sark, W., & Alsema, E. (2010). Potential errors when fitting experience curves by means of spreadsheet software. *Energy policy*, 38(11), 7508-7511.

Van Sark, W., Alsema, E. A., Junginger, H., De Moor, H., & Schaeffer, G. J. (2008). Accuracy of progress ratios determined from experience curves: the case of crystalline silicon photovoltaic module technology development. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(5), 441-453.

Verdegaal, E. (2012). Zonnepanelen zijn goed, woningisolatie is beter. *NRC Handelsblad*.

Wald, M. (2012). Slicing Silicon Thinner to Cut the Price of Solar Cells. *The New York Times*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://green.blogs.nytimes.com/2012/03/13/slicing-silicon-thinner-to-cut-the-price-of-solar-cells/>

Wang, U. (2012). A debate emerges: are solar panels a commodity yet? *Gigaom*. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://gigaom.com/2012/10/31/a-debate-emerges-are-solar-panels-a-commodity-yet/>

Weiss, M., Junginger, H. M., & Patel, M. K. (2008). Learning energy efficiency: experience curves for household appliances and space heating, cooling, and lighting technologies. doi:chem/2009-0306-202533/UUindex.html

Wiersma, E. (2007). Conditions that shape the learning curve: Factors that increase the ability and opportunity to learn. *Management Science*, 53(12), 1903-1915. doi: 10.1287/mnsc.1070.0733

Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4).

de Boer, J. (2011). 'Zonnestroom binnen tien jaar rendabel'. Z24. Verkregen op 7 februari 2012
http://www.z24.nl/z24geld/artikel_225570.z24/_Zonnestroom_binnen_tien_jaar_rendabel_.html

Zaman, A. & Lockman, S. (2011). Solar Industry Growth ... You Ain't Seen Nothin' Yet. Verkregen op 7 februari 2012 van <http://www.strategicsiliconservices.com/wp-content/uploads/2011/09/MR-PJ-01012011.pdf>