

Eindhoven, 27 juli 2011
(correcties v5 2014)

Chemergy – korte versie

Prof Dr Ir Egbert-Jan Sol
TNO Directeur Hightech systemen en materialen



Samenvatting

Dit artikel geeft een analyse van een optimistisch lijkend beeld van de zonne-energie markt. Dit beeld is realistischer dan velen denken. Wel moet onderzoek naar goede opslag in de periode 2020-2030 tot resultaat leiden. Doel van dit artikel is om de hightech equipment en chemie spelers in een vroeg stadium op kansen en uitdagingen te duiden.

Dit artikel schetst een beeld van de komende langetermijnontwikkelingen op zonne-energiegebied. Op basis van leercurve verwachtingen wordt de situatie tot 2020 voorspeld. Ten eerste wordt een basisscenario voor de periode 2010-2030 geschetst. Vervolgens wordt de 2020-situatie op landelijke schaal uitgewerkt. Dan wordt het opslagprobleem duidelijk. Daarna volgt de grootschalige opslagoplossing op landelijk niveau (Sabatier-proces) en de eisen voor een betere, nu nog hypothetische oplossing voor de opslag van het zonne-energie overschot in chemische energie (chemergy) op lokaal niveau (huis/boer). Dit wordt in een chemergy-scenario uitgewerkt voor de periode 2025-2035. Ten slotte volgt een vergezicht (2040-2050) vanuit dit laatste scenario.

Naast deze 2500 woorden versie is ook een 7500 woorden versie met een meer gedetailleerde analyse inclusief cijfermatige onderbouwing beschikbaar.

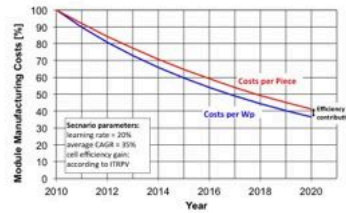
Deze tekst NIET in het Engels te vertalen © Egbert-Jan Sol
Egbert-Jan.Sol@TNO.nl / ejsol@dse.nl / Egbert-Jan.Sol@science.ru.nl

Uitleg in slides:

What would you do if:

You use 3500 kWh/y electricity at 875 €/y
20 solar panels would cost you 9000 € and generate 3500 kWh/y

➡ Learning curve for solarpanels goes similar as digital electronics



What if they cost 4000+1000 €,
And what if 2000+1000 €

The solarpanels at peak sunshine generate $4kW_p$
You use average $3500/350=10$ kWh a day, or $1/24$ h = 0,5 kW
Midsummer sunny day 10 hours give 40 kWh >> 10 kWh
Peak factor of 4-8

➡ Feed surplus into the net

Some numbers, just as reference

Solar radiation (at NL) $1000W/m^2 \approx 100 W/m^2$ yearly average
1000W/m² at NL, 2000 in Spain, 2500 in South Sahara
At PV efficiency: 12% (from 2020 20%) = 10 W/m²

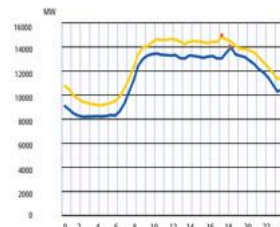
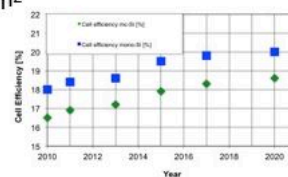
At home:

$$1 kW_p \approx 1000 \text{ kWh/y} \approx 5 m^2 \text{ (at 20\%)}$$

At large scales:

$$1 GW_p \text{ (Giga Watt peak)} \approx 5 km^2$$

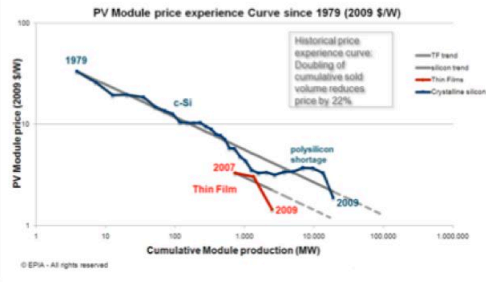
NL peak electricity usage: 14 GW
Tennet dec/jan 2007/2008





07/26/11 10:38 PM
Chemergy - Egbert-Jan Sol@TNO.nl

Solar PV Module learning curve (after EPIA 2009)



07/26/11 10:38 PM

Solar basic scenario in GW_p

Solar	NL	Germany	EU/Europe	World EPIA 6	World IEA 2010
People 16M and &space 41k km ²	80M and 350k km ²	≈400M/750 4M km ² /10M			≈8B 150 M km ²
2010	<1	14		35	40 GW _p
2020	4-10	52	125-375	350-700	200 GW _p
2030	10-30		275-650	1000-1850	800 GW _p
2040				(2000-3000)	1800 GW _p
(2050)	30-80			(3000-4500)	3000 GW _p

Is 1000 GW_p in 2030 and 4000 GW_p in 2050 possible

Note: 1 GW_p (Giga Watt_{peak}) ≈ 5 km²
 in 2050 NL 80 GW = 400 km² of 41.000 km² (=1%)
 WW 3000 GW = 15k km² of 150 M km² (0,01%)



07/26/11 10:38 PM

How to produce 1.000 GW in 2030 & 4.000 GW_p in 2050 in the basic scenario

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs added that year	Sales output all fabs
2010	40	2	20	4	40B
2015	200	1	40	4	40B
2020	500	0,80	60	4	48B
2025	900	0,65	80	4	54B
2030	1400	0,55	100	4	55B
2040	2650	0,50	140	4	70B
2050	4000	0,40	180	4	72B

Uh, this is too easy, already in 2010 4 x 1 GW_p new fabs were added



Within 10-20 years everybody has solarpanels

¼ of 10 M houses with 4kW_p = 2.5 x 4 M kW = 10 GW_p, say in 2020

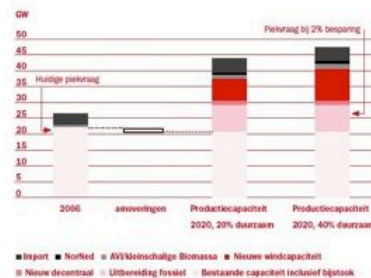
Assume, as an example by 2030 ¾ of 10 M houses with 4 kW_p & ½
50.000 farms with 1 hectare, if that peaks we get

$$30 \text{ GW}_p + 25.000 \times 10.000 \times 0,1 \text{ kW}_p = 55 \text{ GW}_p$$

20-55 GW_p versus 20 GW power plants

By 2025 your surplus at peak times
are NOT allowed to be feed into
the network!!

Shutdown of Store



De N. Energiestaat, Besluit-advies in bevoegd, 22 januari 2009, DSOI-076-04-74307-46-3.



Storage

Pumped storage of water

from downhill lake to uphill lake:
100 m or more delta, not sensible in NL



Electrical car batteries: 20 kWh for 100 km at 150 kg and 5000 € each
5 M electrical cars (i.e. 80% of all cars, not realistic)
& how to charge all those cars when they are away from home

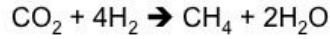
Hydrogen: all hydrogen problems solved, except for one fundamental:
storage: 75 Bar minimum, but more likely 600 bar is needed

Chemergy: convert surplus electricity into hydrocarbons
Artificial photosynthese, but how?



Chemergy

Sabatier proces:

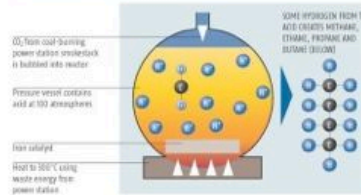


needs ruthenium catalyst,
temperature and pressure

get your CO₂ from a point-source and H₂ from electrolyse

Problem: you need economy of scale

MAKING FUEL FROM GREENHOUSE GASES



[Yamasaki, 2002, New Scientist]

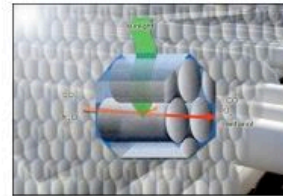
Electrolyse & photo-electrochemical process with semi-conductor electords

Problem: efficiency

Nanostructured Catalysts: mechatronics with

e.g. 3 nanometer structures

Problem: does not exist, but see next slide



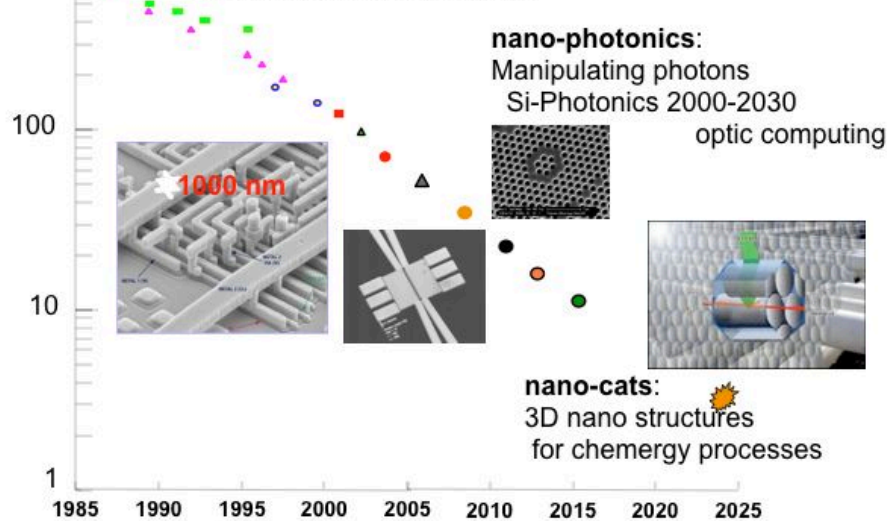
Heinz Frei, 2006, 3-D nanostructure



Nano-Tech

- ◆ 436 nm
- 365 nm
- ▲ 248 nm
- 193 nm
- 130 nm
- ▲ 90 nm
- 65 nm
- ▲ 45 nm
- 32 nm
- 22 nm
- 16 nm
- 10 nm

From micro-electronics in 1970
to nano-electronics in 2000





The most optimistic view

Chemergy scenario: storage works, more solar fine:
if every one does a little, we achieve a little,
so we go for 4B people at 20.000kWh/y we need 80.000 GW_p

Solar	%	NL	Germany	EU/Europe	World
People & space	m ² /p	16M and 41.k km ²	80M and 350k km ²	≈400M/750 4M/10M km ²	≈8B (only 4B) 150M km ²
2010			14 GW _p		40 GW _p
2020 avr			52 GW _p	200 GW _p	
2020 10		20 GW _p	70 GW _p	400 GW _p	1.000 GW _p
2030					
2040 100				8000 GW _p	24.000 GW _p
(2050) 100		320 GW _p =4% opp.			(80.000 GW _p) =0,25 % opp.



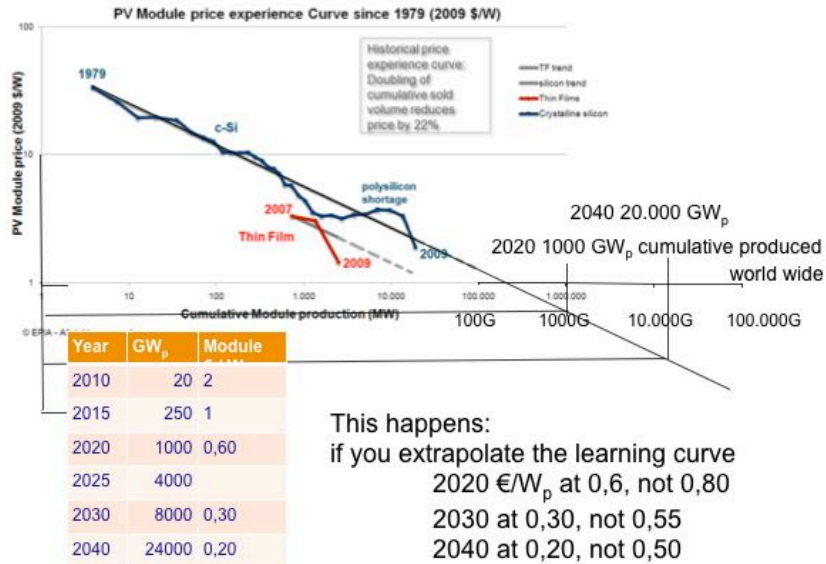
How to produce 80.000 GW_p installed by 2050

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs added that year	Sales output all fabs
2010	35		2	13	7
2015	285		1	88	15
2020	1210	0,60		263	47
2025	3320	0,40		544	71
2030	7205	0,28		949	96
2040	22800	0,20		2134	146

OK, we can build more and more 1GW_p production capacity, and reach ¼ of it by 2040 with 2000 factories of 1GW_p instead of 200.
Uhh, you need to build a 40.000 m²/day glass plant next it each 1GW_p



Solar PV Module learning curve (after EPIA 2009)



Conclusion

Space travel prediction
by Jules Verne



What would you do if?

20 panels would cost 9000 € for 3500 kWh/y
and reduces your electricity bill to zero

but,

IF SURPLUS SOLAR ENERGY is stored as Solar Fuel

and 100 panels would generate enough to cover all
your energy bills at 8000 € (6000+1000+1000) in 2030

6000 € single investment in 2040

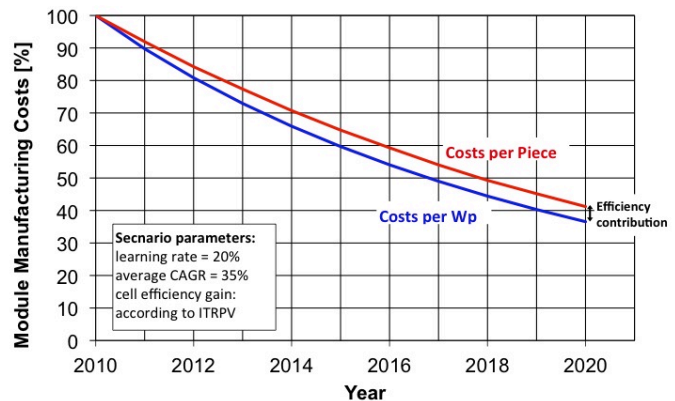
all energy bills, even driving your car!!

The learning curve of solar energy goes similar as Moore's law for computers
For 3 decades (2010-40, as from 1970-2000) we can predict what will happen

De overwegingen van een huiseigenaar

Zonnepanelen worden snel goedkoper. Momenteel kosten 20 zonnepanelen 9.000 € (standaard ~1.5 m²). Binnen 10 jaar zal de prijs van 9000 € rond de 4500 € bedragen (zie afb. 1). De terugverdientijd wordt minder dan 6 jaar op een looptijd van 30 jaar.

Een huiseigenaar kan spaargeld tegen 3% op de bank zetten en na dertig jaar met rente 11.000 € ophalen. Ieder jaar moet wel een energierekening van 875 € worden betaald. Of de huiseigenaar koopt zonnepanelen. In plaats van een jaarlijkse netto spaarrente (80 €) hoeft niets voor elektriciteit te worden betaald. Na aftrek van de investering in zonnepanelen, kan hij het uitgespaarde bedrag op de bank zetten. Na 30 jaar levert dat 22.000 € op. Of hij vergroot zijn hypotheek. De extra aflossing, na de Nederlandse hypotheekrenteaftrek, is dan een fractie van het bedrag dat anders voor de elektra betaald zou moeten worden. Investeren in zonnepanelen in Nederland is binnenkort een positieve business case.



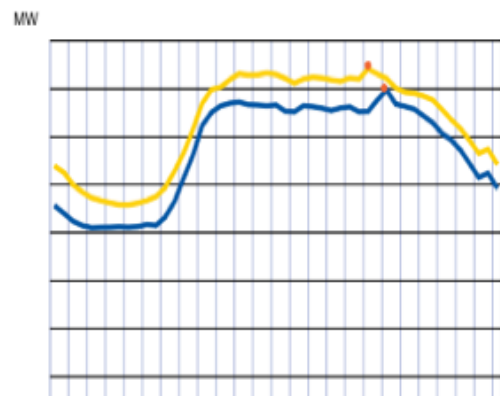
Afbeelding 1 ITRPV 2010 Kostprijs verloop (www.itrpv.net)

De 20 panelen leveren op jaarbasis evenveel capaciteit als het huis verbruikt. Als de zon maximaal schijnt wordt 8 x meer elektriciteit opgewekt dan op dat moment door een gebruiker wordt verbruikt. Wettelijk is in Nederland op dit moment afgesproken dat overschotten terug worden geleverd aan het openbare elektriciteitsnetwerk. Tot 3000 – 5000 kWh per jaar mag u salderen, dat wil zeggen dat uw energieleverancier het teruggeleverde overschot aftrekt van het verbruik.

Door de snelle prijsdaling zal binnen afzienbare tijd in Nederland op piekdagen vrijwel evenveel stroom worden terug geleverd als het Nederlandse elektriciteitsnet op dat moment verbruikt. Omdat elektriciteitscentrales niet uitgezet kunnen worden, moeten we op dat moment zonne-energie opslaan.

Om gedurende 10 uur lang dit energieoverschot op te slaan is waterkracht een optie in landen met stuwweren met een hoogteverschil van honderden meters. In Nederland is een waterkrachtoplossing, positief geformuleerd, een waterbouwkundige droomuitdaging, in gewoon Nederlands onzin.

Elektriciteitsbedrijven pleiten voor opslag in elektrische auto's. Overdag is men weg van huis en 's nachts zouden dan de batterijen moeten opladen. Verwisselbare



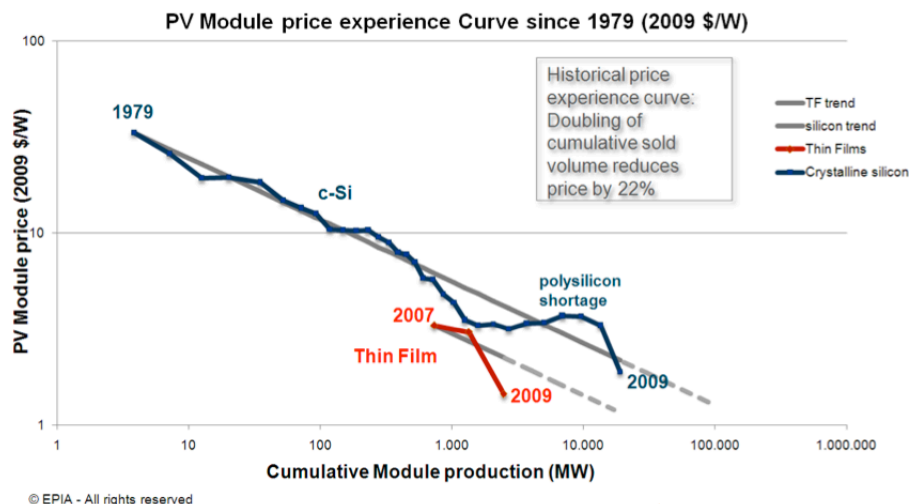
Afbeelding 2 Verbruik Elektriciteit in NL op piekdag

batterijen zijn niet zinvol. Niemand gaat iedere dag thuis twee batterijen van 150 kg wisselen. De batterijen van een elektrische auto gebruiken voor de opslag van zonne-energie is niet zinvol.

Wat als we, op het moment van energieoverschot, koolwaterstoffen zouden maken van uit CO₂? Dat doet de natuur met fotosynthese ook. De energiedichtheid van koolwaterstoffen is vele malen groter dan bij andere oplossingen. In de techniek wordt met het Sabatier proces H₂ en CO₂ omgezet in CH₄. Dit proces vereist druk en temperatuur en daarmee schaalgrootte. Met een elektriciteitsnetwerk kunnen wij in principe 10 GW terugleveren naar centrales waar een dergelijke omzetting en opslag kan plaatsvinden. Maar zonnepanelen kunnen zo goedkoop worden dat de piek zo groot wordt dat we lokaal koolwaterstoffen moeten produceren. Met een groot dak vol zonnepanelen kan tijdens piekdagen per dag 25 liter methanol of 10 kubieke meter methaan (aardgas) worden gemaakt en op normale dagen 5 liter of 2 kub. Methanol kun je zo bijmengen bij benzine en je rijdt 10 kilometer op 1 liter. Met het methaan (aardgas) kun je koken en een centrale verwarming of micro-WKK (warmtekracht-koppeling) laten draaien. Met de laatste kun je als de zon niet schijnt, naast warmte, ook stroom produceren.

De leercurve voor zonnepanelen

De leercurvetheorie kan de afname van de kostprijs van een eenheid voorspellen bij een toename van de markt. Het probleem is het kiezen van de eenheid. De laatste jaren werd duidelijk dat de Watt-piek prijs een goede eenheid is om



Afbeelding 3 De leercurve voor zonnepanelen

leercurve -effecten van zonnepanelen te voorspellen.

De leercurvetheorie voorspelt dat bij het verdubbelen van de productie van zonnepanelen uitgedrukt in Watt-piek, de prijs per Watt-piek volgens een rechte lijn naar beneden gaat. Dit is in afbeelding 3 goed weergegeven. Op de kostprijscurve van de ITRPV uit afbeelding 1 staan jaren. Feitelijk is dat niet juist. Leercurve zegt niets over jaren, maar het is wel een populaire manier van gebruik van de leercurvetheorie. Ook de wet van Moore is daarvan een voorbeeld. Moore stelt dat de prijs van micro-elektronica-chips per 18 maanden halveert.

Er is een omweg om uit cumulatieve verdubbeling het jaar waarin dat plaatsvindt terug te rekenen. Stel je kent het aantal fabrieken in de wereld waar zonnepanelen worden geproduceerd, hun jaarlijkse output en hoeveel fabrieken er per jaar bij komen. Dan is het cumulatief aantal geproduceerde panelen (en daarmee de kostprijs in een bepaald jaar) terug te rekenen. Met deze aanname is het mogelijk om uitgaande van de groei van

een markt voor twee scenario's (basisscenario zonder opslag en een doorgroeiscenario waarin zonne-energie-overschotten in chemie worden omgezet (chemergy-scenario)) uit te werken.

Uitgangspunt voor het basisscenario is de situatie in 2010 en de aanname dat er ieder jaar vier grote zonnepaneel productie fabrieken van ieder 1GW_p bijkomen (niet de solar farms). De veronderstelling is dat daar voldoende afzetmarkt voor is en de stijgende marktvrage rondom 2025-2030 op 1000 GW_p wereldwijd geïnstalleerd vermogen uitkomt. Wat wordt dan de Watt-piek kostprijs in welk jaar?

Tabel 1 Basisscenario

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs added per year	Sales output all fabs
2010	40	2	20	4	40B
2015	200	1	40	4	40B
2020	500	0,80	60	4	48B
2025	900	0,65	80	4	54B
2030	1400	0,55	100	4	55B
2040	2650	0,50	140	4	70B
2050	4000	0,40	180	4	72B

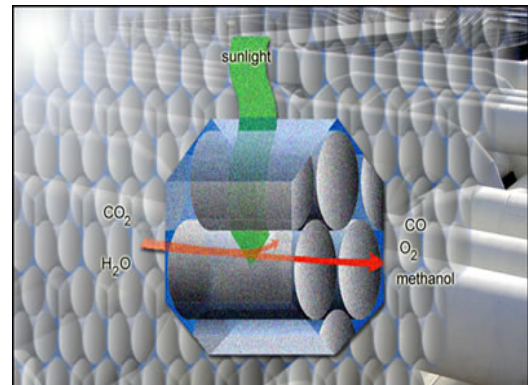
Bij deze ontwikkeling hebben wij in NL (als voorbeeld) over 15 à 20 jaar 10 GW_p geïnstalleerd. Met 16 miljoen inwoners in een rijk land is dat 1% van de zonnepanelen van de wereld (1000 GW in 2030). NL heeft 0.2% van de wereldbevolking van 8 miljard, dus 1% van de zonnepanelen is niet irreëel. De plannen voor 2020 van 350-700 GW_p (World EPIA 6) of 200 GW_p (IEA, de vertegenwoordiger van de iets conservatieve olie industrie) zijn de basis voor dit scenario. 500 GW in 2020 en 1000-2000 GW in 2030 lijkt reëel. Maar hoe reëel is een gemiddelde toename over 30 jaar van 4 1GW_p grote zonnepaneelfabrieken als dat in 2011 reeds gebeurt. Als zonne-energieopslag mogelijk is dan zal de markt ook na 2020 hard door kunnen groeien.

Chemergy: opslaan van zonne-energieoverschot in chemische energie

Zonne-energie omzetten in chemische energie kan door het reduceren van CO₂ naar CH₄ (methaan, ook wel bekend als aardgas) of CH₃OH (methanol, ook wel bekend als keukenspiritus). Dit Sabatier-proces: CO₂+4H₂ -> CH₄ + 2H₂O, stamt uit 1912 en is geen succes geworden. Methaan in de vorm van aardgas was goedkoper uit de grond te halen. Het proces vereist voldoende waterstof en CO₂. Waterstof verkrijgen wij door elektrolyse van water. CO₂ wordt in de buitenlucht gemeten in een concentratie van rond de 400 ppm. Het kost energie CO₂ te concentreren. Bij een elektriciteitscentrale kost CO₂-afvang middels ab-/desorptie rond de 30% aan thermische energie. Maar die centrale kan tijdens een zonne-energiepiek niet worden uitgezet en het thermische deel zougedurende een dergelijke periode over kunnen schakelen op CH₄-productie, terwijl

gedurende een periode van gebrek aan zonlicht haar elektriciteit relatief veel waard is. Thuis kun je ook uit de rookgassen van een verwarmingsketel de CO₂ afvangen en opslaan. Echter je zult thuis niet snel een Sabatier proces met waterstof en methaan willen hebben. Wat zijn de alternatieve mogelijkheden?

Een mogelijke oplossing kan elektrolyse van CO₂ zijn. Het nadeel is de nog lage efficiëntie. In principe wordt vanuit CO₂ + H₂O en e⁻ (elektriciteit) zuivere zuurstof aan de anode-zijde en aan de kathode-zijde syngas (CO + 2 H₂) geproduceerd. Uit syngas wordt via een Cu/ZnO katalysator (warmte) en CH₃OH gemaakt. Echter nog een stap verder is foto-elektro-chemische conversie van CO₂ naar o.a. methanol met halfgeleider elektrodes van o.a. p-GaP. Een derde voorstel is om op nanoschaal via katalyse op lage temperatuur de zuurstofverbinding van de CO₂ in een paar stappen te vervangen door waterstofketens zodat CH₃OH (methanol) of CH₄ (methaan) ontstaat. In feite wordt net als in fotosynthese een CO₂ molecuul zodanig in een nanostructuur gepositioneerd dat de H⁺ ionen de O= verbindingen kan over nemen.



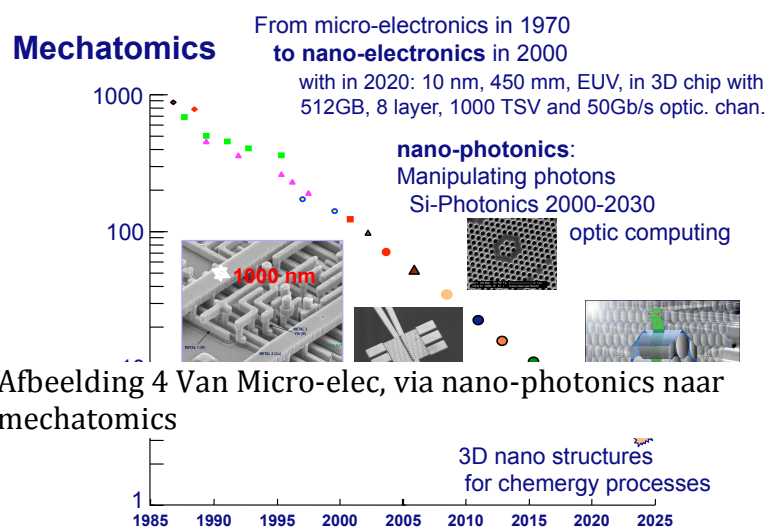
Afbeelding 3 Concept Nano-katalyse van Frei
FIGURE 1, 2000, J-L

De veronderstelling bij nano-katalyse van CO₂ is dat wij nanostructuren van bijv. 3 nanometer kunnen maken waarbij wij in putjes of andere nanostructuren actieve metaal of metaaloxide toevoegen (zelfassemblage) die het chemische bulkproces van Sabatier in feite op nanometerniveau fysisch gecontroleerd uitvoeren. Tot nog toe kunnen wij dergelijke structuren niet maken. Op dit moment kunnen wij wel 4 nanometer dunne lijntjes schrijven en over een aantal jaren is sub-10 nanometer lithografie op grote oppervlakten mogelijk. In lijn met de samenvoeging van chemie en energie in “chemergie” voor het aanduiden van het opslaan van energie in chemie, kan voor het op nanometerniveau aanbrengen en plaatsen van atoom-structuren de samenvoeging “mechatronics” worden gebruikt.

In feite is dit een ultieme uitvoering van high-tech proces-intensificatie waarbij op molecuulniveau reacties worden beheerst.

De komende jaren is de uitdaging voor de wetenschap een proces te ontwikkelen om voor eenvoudige molecuulstructuren als H₂, H₂O, CO₂, CH₄ en CH₃OH (C-1 structuren) mechanismen te ontwikkelen om met nanotechnologie met lage

temperatuur en geringe druk CO₂ in CH₄ (methaan), CH₃OH (methanol) en CH₃OH₃C (dimethylether) met een redelijke efficiëntie om te zetten. Voor de engineering ligt de uitdaging om hightech proces-intensificatie installaties te creëren, zowel voor grote schaal Sabatier-type processen als voor kleiner schaal. Voor dit laatste moeten nano-katalyse



Afbeelding 4 Van Micro-elec, via nano-photonics naar mechatronics

systemen zoals door de wetenschap voorgesteld tot betrouwbare en betaalbare systemen worden uitgewerkt. Onze bomen en planten bewijzen dat zoiets met lage temperaturen en zonder schaarse metalen kan.

De overwegingen van een huiseigenaar of boer in 2025-2030

Zodra over 10 jaar zonne-energie met opslag mogelijk is, zal de overcapaciteit die er bij een piek toch al is, worden gebruikt om meer koolwaterstoffen aan te maken. Met rond de 50 à 100 m² kan de totale energiebehoefte, elektra, verwarming, vervoer, etc. worden gerealiseerd. Per piekdag wordt 25 liter methanol geproduceerd, normaal 5 liter/dag.

Niet iedereen heeft zoveel schaduwvrij dak, maar op Nederlandse schaal zouden boeren gemiddeld 3 hectare (2,5 hectare (25.000 m²) zonnepanelen met 0.5 hectare loopruimte) van hun 70 hectare kunnen uitrusten. Gemiddeld over het jaar zal hij per dag 12500 kWh in chemery kunnen omzetten. Dat levert de boer bij 50% omzetting efficiëntie gemiddeld 625 m³ methaangas of 1500 liter methanol per dag op. 50.000 boeren tezamen produceren dan gemiddeld per dag 30 M m³ gas of 75 M liter methanol. Ter vergelijking: de gemiddelde dagproductie van Slochteren is 200 M m³ en Rotterdam raffineert per dag rond de 200 M liter brandstof.



Een en ander is afhankelijk van de reactie van de overheid. Niet alleen wordt dan 3.5% van ons landoppervlakte met glas van zonnepanelen bedekt. Nu is Nederland met 150 km² (0,35%) glas van tuinbouwkassen bedekt. Lastiger voor de overheid is het verdampen van belastinginkomsten. Echter een CO₂-neutrale techniek kan politiek gezien niet verboden worden. Olie- en gasmaatschappijen worden geconfronteerd met een game-changer, vergelijkbaar met de ondergang van de mainframe computers met de komst van de personal computer in de jaren 80 en 90. Wat wordt de reactie van chemiebedrijven die niet-fossiele, CO₂-vrije basischemicaliën kunnen verkrijgen en minder afhankelijk worden van een seizoensafhankelijke biomassaroute?

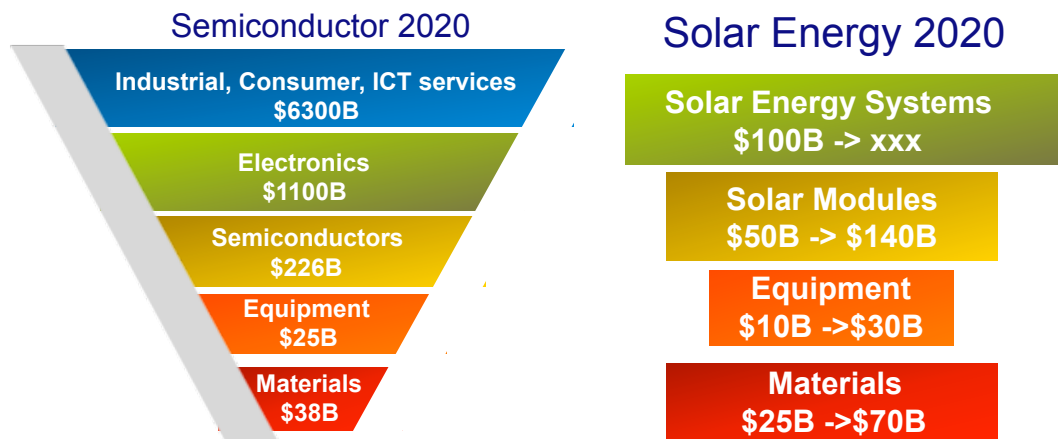
Bij opslag van het overschot aan zonne-energie in chemische energie, groeit de markt voor zonnepanelen fors door. Leercurve theorie voorspelt dat de prijs per W_p verder omlaag gaat. Dit is wat de voorspelling bij een chemery scenario is:

Tabel 2 Chemery scenario

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs / year	Sales output all fabs
2010	35	2	13	7	40B

	285	1	88	15	50B
2020	1210	0,60	263	47	140B
	3320	0,40	544	71	300B
2030	7205	0,28	949	96	280B
2040	22800	0,20	2134	146	400B

Het wereldwijde aantal 1GW_p fabrieken gaat in 2030 van 100 in het basisscenario naar 1000 fabrieken in het chemergy-scenario. Alleen al de bouw van ieder jaar meer fabrieken en het leveren van ieder jaar meer en meer equipment is een gigantische markt op zich. Om enige referentie te geven: de semicon equipmentmarkt voor de 80 grote “300 mm front-end fabs” wereldwijd bedraagt momenteel rond de 25 B\$ per jaar in een semiconmarkt van 225B\$.



Afbeelding 5 Semicon en Solar markten

De Watt-piek-prijs (€/W_p) eenheid ligt in 2020 al op 0.60 bij 1200 GW geïnstalleerd vermogen en rond 2030 rond de 0,28 bij 7200 GW t.o.v. een 2 €/W_p nu. In de huidige perceptie van velen is dat ongehoord. Net zoals de uitspraak in de jaren 1970 dat rond het jaar 2000 op een chip meer dan een miljoen transistoren zouden staan. Anno 2010 zitten we over 1 miljard transistors op een chip. Daar hebben we gezien dat met een snelle leercurve de wereld er in 20 tot 40 jaar heel anders uitziet. Als opslag lukt, dan groeit de zonne-energiemarkt, net als de elektronikamarkt door tot ongekende omvang.

Conclusie

De individuele burger heeft het gemakkelijk: die legt tussen 2015 en 2020 zonnepanelen op het dak. Rond 2025-2035 maakt die burger thuis of bij de boer, methaan of methanol. Voor wetenschappers is de uitdaging om onderzoek te doen naar procesintensificatie voor de CO₂ naar CH₄ of CH₃OH conversie bij normale temperatuur en druk. Hier zijn topprestatie op nanogebied voor nodig. Ingenieurs weten ook wat ze moeten doen. De leercurve van de €/W_p voor zonnepanelen verder aflopen door onderzoek en engineering en tegelijkertijd opslagsystemen te ontwikkelen. Voor beide geldt dat het

leercurven zijn en dat impliceert dat verbeteringen niet vanzelf gaan. Dat is niet zo eenvoudig als het lijkt. Voor ondernemingen in de hightech equipment, fabrieksbouw, zonnepaneelproductie, materiaal voor zonnepanelen en de chemische procesbouw voor hightech procesintensificatie ontstaan kansen voor innovatieve producten. Dit vereist ondernemerschap zoals het hoort. Spelers uit de hightech industrie die reeds een keer eerder een 20-jaarsleercurve en de effecten daarvan hebben meegemaakt zullen eerder de juiste keuzen maken. Succes wordt niet met de keuze, maar met de implementatie van de gevolgen van die keuze gemaakt. Traditionele grootmachten (olie- en gasmaatschappijen) en overheden (met veel olie of gas voorraden) worden geconfronteerd met een game-changer. Voor hun wordt chemergy een kans of een probleem.

Eindhoven, 27 juli 2011

Chemergy – Complete versie

Dr Ir Egbert-Jan Sol
TNO Directeur Hightech systemen en materialen
Egbert-Jan.Sol@TNO.nl



Inhoudsopgave	
Samenvatting	16
De overwegingen van een huiseigenaar in de periode 2015-2020	17
De leercurve voor zonnepanelen	18
Zonne-energie op landelijke schaal	21
Chemergy: opslaan van zonne-energieoverschot in chemische energie	23
De overwegingen van een huiseigenaar of boer in 2025-2030	27
Het vergezicht als opslag in 2030-2050 werkt	28
Conclusie	31

Deze tekst NIET in het Engels te vertalen © Egbert-Jan.Sol@TNO.nl / ejsol@dse.nl

Samenvatting

De leercurve voor zonnepanelen ontwikkelt zich sneller dan velen zich realiseren. Als gevolg hiervan daalt de prijs van zonnepanelen hard en groeit de markt explosief. Velen zullen in de periode 2015-2020 zonnepanelen op hun dak plaatsen. Tijdens de piekperiode van zonneschijn wordt 8 x meer energie opgewekt dan verbruikt. Door de omvang wordt opslag van zonne-energie een vereiste. Zonder opslag stopt de markt na 2020 op een niveau 50 tot 100 fabrieken met 50 miljard euro totale output per jaar. Lukt opslag dan groeit de markt door, loopt de leercurve verder, worden zonnepanelen nog goedkoper ($0,60-0,20 \text{ €/W}_p$) en is 300 miljard € en 1000 fabrieken rond 2030 mogelijk.

Een piek zonne-energieoverschot overdag van 20% van het totale elektriciteitsverbruik wordt zeer gewaardeerd voor "peak-shaving". Daarboven wordt opslag i.p.v. terugleveren aan het net nodig. Tot 100% bieden centrale grootschalige oplossingen nog enige soelaas, maar op termijn zijn lokale oplossingen nodig. De fraaiste oplossing is om het overschot aan elektrische energie in een huis- of boerderijsituatie in een redelijk goedkoop en veilig uit te voeren systeem om te zetten in chemische energie ("chemergy"). Net als in de natuur worden uit fotonen, kooldioxide (CO_2) en water (H_2O) koolwaterstoffen als methanol (CH_3OH) en methaan (CH_4) gemaakt. De uitdaging is om dit proces middels o.a. nano-katalyse te realiseren.

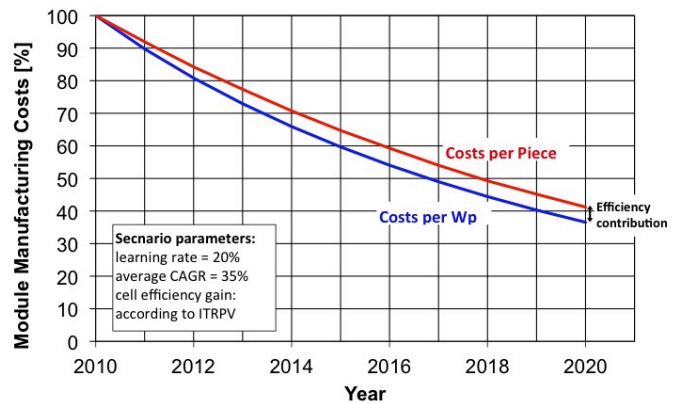
Als een eenvoudige CO_2 naar CH_4 energieopslagoplossing mogelijk is, dan groeit niet alleen de zonnepanelenmarkt explosief, maar gebeurt er veel meer. De overheid moet belastingsystemen wijzigen. Mensen gaan dan zelf transportbrandstoffen (en in sommige landen i.p.v. methanol, ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)) maken. Bestaande grootmachten als oliemaatschappijen zien hun business model verdampen. Een structurele, wereldwijde oplossing van het vraagstuk van duurzame energie komt dan binnen bereik. Het effect van een snelle leercurve voor zonne-energie is vergelijkbaar met de opkomst van de personal computer (1990), breedband internet (2000) en nu de smart phone (2010). Ook daar leidde een snelle leercurve (wet van Moore) binnen twee decennia tot grote veranderingen.

Dit artikel start vanuit de individuele situatie. Op basis van leercurve verwachtingen kan dan de situatie tot 2020 worden voorspeld. Ook wordt een basisscenario voor de periode 2010-2030 geschetst. De 2020-situatie wordt vervolgens op landelijke schaal uitgewerkt. Dan wordt het opslagprobleem duidelijk. Daarna volgt de grootschalige oplossing op landelijk niveau (Sabatier-proces) en de eisen voor een betere, nu nog hypothetische oplossing op lokaal niveau (huis/boer). Dit wordt in een doorgroei-opslagscenario met de naam "chemergy scenario" voor 2025-2035 uitgewerkt. Ten slotte volgt een vergezicht (2040-2050) van dit laatste scenario uitgewerkt en volgen de conclusies.

Dit artikel geeft een onderbouwing inclusief analyse en cijfermateriaal van een optimistisch lijkend beeld van de zonne-energiemarkt. De boodschap is dat die realistischer is dan velen denken: een serieuze game-changer. Wel moet onderzoek naar goede opslag op tijd tot resultaat leiden. Doel van de boodschap is om de hightech equipment- en chemiespelers in een vroeg stadium op kansen en uitdagingen te duiden.

De overwegingen van een huiseigenaar in de periode 2015-2020

Zonnepanelen worden snel goedkoper. Momenteel kosten 20 zonnepanelen 9.000 € geïnstalleerd (~30m²). Met 200 W per paneel krijgt u 4000 Watt tijdens maximale zonschijn (ook wel 4 kilowattpiek of 4 kW_p genoemd). Op jaarbasis produceert u in Nederland gemiddeld en bij gunstige ligging 3500 kWh. U bespaart op de elektriciteitsrekening rond de 875 € per jaar. De terugverdientijd is 10 jaar. Zonnepanelen gaan 30 jaar mee. Binnen 10 jaar zal de prijs van 9000 € gehalveerd zijn en ongeveer 4500 € bedragen (zie afb. 1). De terugverdientijd wordt minder dan 6 jaar. Zelfs bij een ongunstig oost-west dak krijgt u nog 80% van de opbrengst (bereken uw eigen situatie op <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>). In plaats van 6 jaar terugverdientijd, wordt het 7.5 jaar. Op 30 jaar maakt een anderhalf jaar weinig uit.



Afbeelding 1 ITRPV 2010 Kostprijs verloop (www.itrpv.net)

Een huiseigenaar kan 4500 € spaargeld tegen 3% op de bank laten staan en na dertig jaar met rente 10923 € ophalen. Ieder jaar moet wel 875 € voor stroomkosten worden betaald. Of de huiseigenaar koopt voor 4500 € zonnepanelen en kan zo per jaar 875 € aan stroomkosten besparen. Na aftrek van de aanschafkosten, loopt dan de spaarrekening in 30 jaar op tot 21750 €. Zelfs geld lenen is interessant. Leen 4500 € en los per jaar 875 € af omdat er geen stroomkosten meer betaald hoeven te worden. Inclusief rente is de lening in 10 jaar afgelost en u bespaart dan nog 20 jaar lang 875 € per jaar. Of verhoog de hypotheek, los in 30 jaar 150 € extra af (met hypotheek aftrek maar 75 €) en bespaar 30 jaar per jaar 875 €. Investeren in zonnepanelen is een positieve business case. Voor 2020 heeft u zonnepanelen op het dak.

Een gemiddeld huishouden verbruikt 3500 kWh per jaar, precies evenveel als de zonnepanelen uit ons voorbeeld per jaar leveren. Per dag wordt 10 kWh verbruikt, verdeeld over de nacht (2kWh in 8 uur) en de ochtend, de middag en avond (8 kWh in 16 uur, gemiddeld 0,5 kWh per uur). Stel dat de zon maximaal schijnt en van 7-17 uur, dus 10 uur lang, 4 kW_p opwekt, dan levert die dag 40 kWh op. Dus tijdens de maximale zonschijn is sprake van een factor 8 overproductie: 4 kWh/h productie versus 0,5 kWh/h verbruik. Op een gemiddelde dag leveren de panelen 10 kWh per dag op. Maar ook hier is een onbalans, want die 10 kWh wordt bijvoorbeeld van 9:30 – 14:30 (5 uur) opgewekt met 2 kWh per uur, terwijl het verbruik maar 0.5 kWh per uur bedraagt. De gemiddelde piek-factor is dan 4. Wettelijk is in Nederland op dit moment afgesproken dat het overschot terug mag worden geleverd aan het openbare elektriciteitsnetwerk. Tot 3000 – 5000 kWh per jaar mag u salderen, dat wil zeggen dat uw energieleverancier het terug geleverde overschot aftrekt van het verbruik. Feitelijk gaat dat tegen 0,25 € per kWh. Daar boven krijgt u slechts 0,08-0,09 € per kWh.

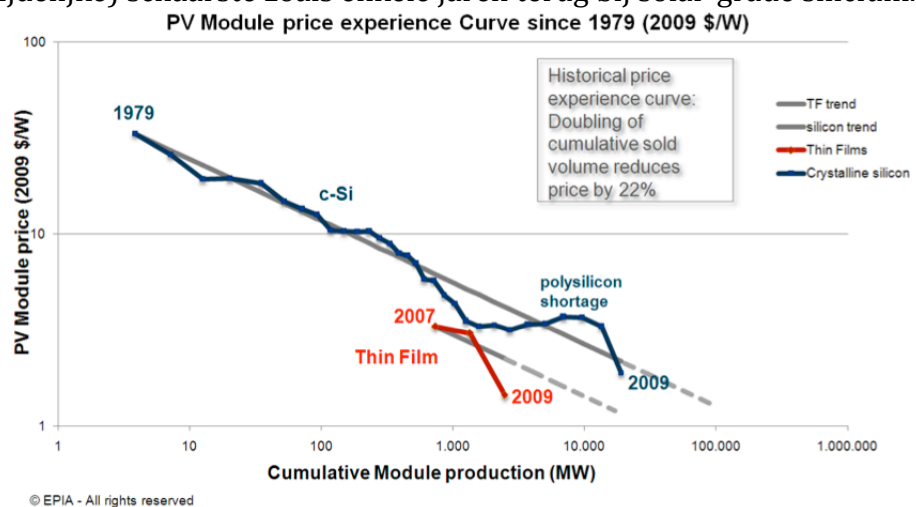
1 3500 kWh/j bij 0,25€ = 875€/j x 10,3 j € bij gelijkblijvende energieprijzen.

De leercurve voor zonnepanelen

De leercurvetheorie stamt uit de begintijd van de vliegtuigbouw. Het tiende vliegtuig dat werd geassembleerd was aanmerkelijk goedkoper dan de eerste. De honderdste bleek nog veel goedkoper. Men leerde het type vliegtuig steeds slimmer in elkaar zetten. Het begrip leercurve was geboren. Luchtvaartmaatschappijen begonnen bij de inkoop van vliegtuigen serieus met de continue prijsdaling rekening te houden. Langzaam werd de theorie in de jaren 1920-1950 beter begrepen. Als de kosten van de kritische eenheid dubbel logaritmisch wordt uitgezet tegen de aantallen van de cumulatief geproduceerde eenheid dan wordt dat een rechte lijn.

Dankzij die lijn kun je voorspellen wat de kostprijs wordt bij een bepaalde omvang van de markt. De theorie leert dat als de lijn niet recht naar beneden gaat, er iets mis is. Bijvoorbeeld omdat men niet meer innoveert of dat sprake is van een marktverstoring. Een voorbeeld is de (tijdelijke) schaarste zoals enkele jaren terug bij solar-grade silicium.

Het probleem is het kiezen van de eenheid. Voor de vliegtuigbouwers was dat eenvoudig. Bij de luchtvaartmaatschappijen, die bij de inkoop van vliegtuigen leercurve-effecten tot in detail mee namen, heeft het jaren geduurd voor men de juiste eenheid vond. Daar bleek de leercurve-eenheid het aantal passagierkilometers te zijn. Bij digitale elektronica is de eenheid het aantal transistoren op een chip, maar bij data-communicatie is het weer lastiger en blijkt het aantal bytes dat een consument per dag ontvangt en verstuurt de juiste maat te zijn die een dubbel logaritmische rechte lijn volgt. Het kiezen van de juiste eenheid is lastig. Bij zonnepanelen is ook een leercurve bekend.



Afbeelding 2 Leercurve voor zonnepanelen

Het probleem is de keuze van de eenheid. Er zijn verschillende type zonnepanelen:

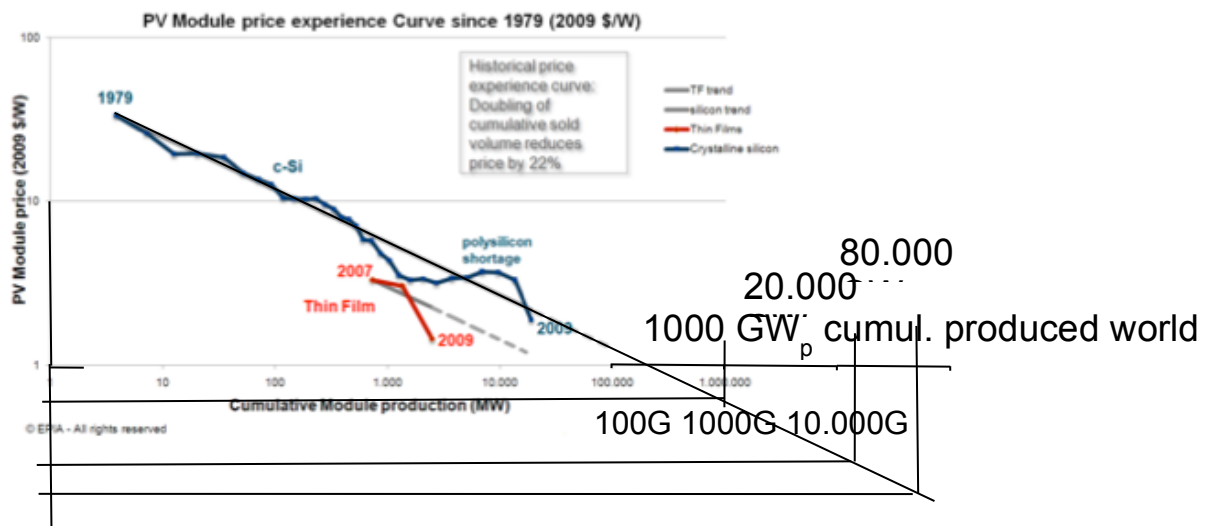
1. Mono- en multi-kristallijn silicium (85% van de markt)
2. Dunne film
 1. (Amorf) silicium
 2. CdTe (Cadmium-Telluride)
 3. CIGS (Copper-Indium-Gallium-Selenide)
3. Organische,
4. Gallium of andere III-V materialen

Iedere type heeft weer een andere efficiëntie, een andere kostprijs, etc. De efficiëntie bepaalt mede de watt-piek-opbrengst, het materiaal de kostprijs. Dunne film kent een lagere efficiëntie, maar dun betekent minder materiaal en dat is goedkoper. Uitgedrukt

in de prijs per wattpiek ($\text{€}/W_p$) maakt dit minder uit en de laatste jaren werd duidelijk dat de wattpiekprijs een goede eenheid is om leercurve-effecten te voorspellen. De wattpiekprijs wordt tegenwoordig gebruikt in offertes en zelfs de grootte van nieuwe fabrieken worden uitgedrukt in gigawatt (GW_p) productie per jaar, etc. Sommigen gebruiken liever de eenheid van $\text{€}/\text{kWh}/y$ opbrengst. Ze komen tot de conclusie dat draaibare zonnepanelen nog beter zijn.

Preciezer gezegd, de leercurvetheorie voorspelt dat bij het verdubbelen van de productie van zonnepanelen uitgedrukt in de prijs per wattpiek naar beneden zal gaan. Dit is in afbeelding hieronder goed weergegeven. Op de kostprijscurve uit afbeelding 1 staan jaren. Feitelijk is dat niet juist. Leercurve zegt niets over jaren. Formeel is de populaire versie van de wet van Moore die stelt dat de prijs van micro-elektronica chips per 18 maanden halveert niet correct. Maar het is wel een versie die eenvoudig is toe te passen. Voor zonnepanelen is een omweg om uit cumulatieve verdubbeling en dus een lagere kostprijs het jaar waarin dat plaats vindt terug te rekenen. Stel je kent het aantal fabrieken in de wereld, hun jaarlijkse output en hoeveel fabrieken er per jaar bijkomen. Dan is het cumulatief aantal geproduceerde panelen (en daarmee de kostprijs op dat moment) terug te rekenen naar het jaar waarin die totale productiecapaciteit beschikbaar is. Met deze aanname is het mogelijk om uitgaande van de groei van een markt voor twee scenario's (basisscenario zonder opslag en een door-groeiscenario waarin zonne-energieoverschotten in chemie worden omgezet (chemergy scenario)) uit te werken en op die manier de kostprijs in een bepaald jaar uit te drukken.

Wat gebeurt er als je de leercurvegrafiek extrapoleert?



Figuur 3: Doorgetrokken leercurve

Eind 2010 was wereldwijd voor 40 GW_p geïnstalleerd². Doorstappen naar 1000 GW_p en 10.000 GW_p is ronduit schokkend. 100.000 GW_p is ongehoord. Ambitieuze plannen

² Ter referentie, in 2006 leverde wind 95 GW en waterkracht 850 GW wereldwijd. Voor wind en waterkracht gaan de leercurve aanmerkelijk minder stijl naar beneden. Net als bij micro-elektronica resulteert een dergelijke snelle leercurve bij zonnepanelen dat een hele markt in 10 jaar compleet anders uit komt te zien. Wie kent nog leveranciers uit de jaren 70, 80 en 90 als Burroughs, Commodore, Libertel?

komen voor 2020 op 350-700 GW_p (World EPIA 6) of 200 GW_p (IEA). Doortrekken van die verwachtingen resulteert rond 2030 rond de 1000-2000 GW_p.

De aanname is dat een individuele burger voor zichzelf een positief business case voorziet. Ieder paneel wordt dan verkocht. Dat leidt tot meer productie waardoor de kostprijs daalt en nog meer panelen worden afgenomen. De markt verzadigt nog niet.

Uitgangspunt is situatie 2010 en dat er ieder jaar 4 grote zonnepaneel fabrieken bijkomen. De veronderstelling is dat daar voldoende afzetmarkt voor is en de stijgende markt vraag rondom 2025-2030 op 1000 GW_p wereldwijd geïnstalleerd vermogen uitkomt. Wat wordt dan de wattpiekkostprijs in welk jaar? Dit is het basisscenario.

Tabel 1 Basisscenario

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs added per year	Sales output all fabs
2010	40	2	20	4	40B
2015	200	1	40	4	40B
2020	500	0,80	60	4	48B
2025	900	0,65	80	4	54B
2030	1400	0,55	100	4	55B
2040	2650	0,50	140	4	70B
2050	4000	0,40	180	4	72B

Bij deze ontwikkeling hebben wij in NL (als voorbeeld) over 10 à 20 jaar 10 GW_p geïnstalleerd. Met 16 miljoen inwoners in een rijk land is dat 1% van de zonnepanelen van de wereld (1400 GW in 2030). NL heeft 0.2% van de wereldbevolking van 7,2 miljard, dus 1% van de zonnepanelen is niet irreëel.

We kunnen uit de leercurve de kostprijs voor de individuele gebruiker voorspellen. Allereerst is het voorbeeldbedrag van 9000 € inclusief omvormer, installatiemateriaal, etc. De leercurve geldt voor de module(paneel)prijs. Stel 1000 € voor installatie e.d. en 8000 € voor panelen, dan wordt het bedrag voor de individuele gebruiker bij halvering van de panelenprijs 4000 € + 1000 €. Ten tweede geldt de prijsdaling voor de cumulatieve geproduceerde aantallen en is op een logaritmische schaal een rechte lijn. De prijs zal dus niet halveren als wij van het huidige aantal van 40 GW naar 80 GW gaan, maar bij 200GW. Dat aantal kan bij een stabiele markt rond 2015 (of in de ITRPV 2010 grafiek rond 2017-2018) worden bereikt.

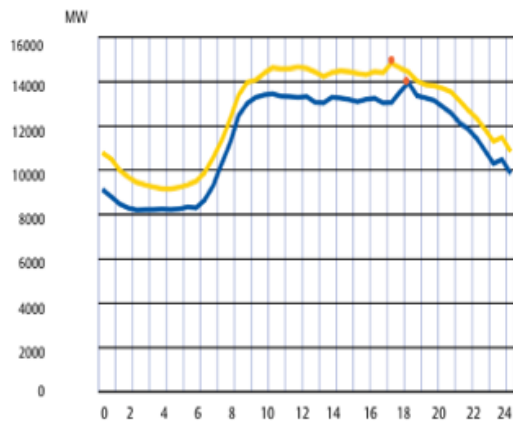
De komende jaren kunnen we een forse groei verwachten. Uit de tabel met dit scenario zou er in 2030 een capaciteit ter waarde van 100 1GW_p fabrieken zijn. Dat aantal is vergelijkbaar met de 80 grote 300 mm chip foundries in de wereld. Deze zogenaamde 300 mm-fabrieken zijn in ongeveer 10 à 15 jaar gebouwd en vergde ieder 1 miljard € of meer aan investering. Het is haalbaar om tot 2025 eenzelfde aantal

zonnepaneelfabrieken te bouwen. Bij een wereldproductie van 40B € is een investering in 4 nieuwe fabrieken van 1B € per jaar reëel. Een 1 GW_p fabriek is echter een supergrote fabriek. 1GW_p zonnepanelen per jaar vereist per dag, afhankelijk van het ontwerp van de geproduceerde panelen, rond de 30.000 m² 4 mm dik glas. Op dat glas wordt een 100 micro dikke silicium plak of een 4 micro dunne filmmateriaal aangebracht. Ergo, een 1GW_p fabriek is in feite een glasfabrieken waar op het einde nog een dun coatinglaagje (0,1-2,5%) aan wordt toegevoegd. Het aanbrengen van coatings is vandaag de dag al een standaardproces in glasfabrieken. De komende jaren wordt de bouw, het leveren van de equipment en de uitrol van al die zonnepanelen een gigantische ontwikkeling.

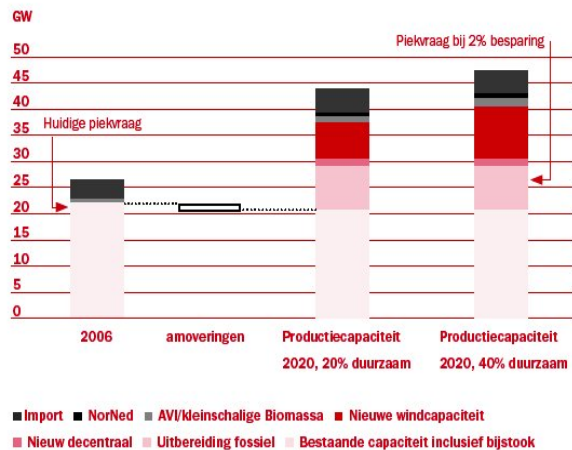
De plannen voor 2020 van 350-700 GW_p (World EPIA 6) of 200 GW_p (IEA) zijn in deze context aan de lage kant. 500 GW in 2020 en 900 GW in 2025 lijkt reëel.

Zonne-energie op landelijke schaal

Stel dat rond 2020 een kwart van de 6 miljoen huishoudens in Nederland 20 m² panelen op hun dak installeren. In 2020 leveren al deze zonnepanelen 5 GW_p (Giga Watt peak) vermogen³. Als men op platte daken van bedrijven en flatgebouwen eenzelfde oppervlakte realiseert, levert dat nogmaals 5 GW_p. Dan leveren die zonnepanelen tijdens maximale zonneschijn 10 GW_p. Dat is vrijwel evenveel stroom als het Nederlandse elektriciteitsnet momenteel levert.⁴ (zie afb Elektra dagverbruik NL)



Afbeelding 4 Electra dagverbruik in NL op piekdag (dec/jan 2007/8)



Bron: Energieraad, Brandstofmix in beweging, 22 januari 2008, ISBN 978-90-74357-46-3.

Tijdens de nacht is ook elektriciteit nodig. Voor die basislast zorgen grote thermische (kolen, biomassa, kernenergie) elektriciteitscentrales die niet als jojo's aan en uit kunnen worden gezet. Als die overdag op basislastniveau doordraaien, dan kan zonne-energie goed bijspringen. Op dit moment draagt op topdagen in Duitsland zonne-energie met 20% optimaal bij. Over enige tijd ontstaan bij mooi weer problemen als de schommelingen door zonne-energie een fors groter deel van het verbruik bedraagt.

$3 \times 20 \text{ m}^2 \times 20\% = 4 \text{ kW}_p \times 1,5 \text{ M huizen} = 6 \text{ GW}_p$, na omvorm- & transmissieverliezen 5 GW_p
 4 Beschikbare maximaal vermogen in NL 20 GW, piek in winter (2008) 14 GW.

Rond 2020, als een kwart van de 6 miljoen huishoudens hun panelen aangesloten hebben en op piekvermogen willen terug leveren, wordt de piek in zonne-energie-opbrengst rond de 100%. Wanneer iedereen zonnepanelen installeert dan zijn situaties van 400 tot 1000% theoretisch mogelijk. Praktisch kan het net zo'n piek niet aan en wordt terug leveren geblokkeerd. Op dat moment moeten we zonne-energie tijdens de piek opslaan.

Om gedurende 10 uur 10 GW op te slaan (100 GWh) is waterkracht een optie in landen met voldoende hoogteverschil (denk aan 100 à 500 m)⁵. Voor onze 100 GWh in een vlak land hebben we een meer nodig met 5 meter hoogteverschil en een oppervlakte van 4000 km² en 10 meter diep. Een 15 meter hoge dijk en een meer van iets meer dan 60 x 60 km (= 4 x Markerwaard) is, positief geformuleerd, alleen al een waterbouwkundige uitdaging.

Elektriciteitsbedrijven pleiten (soms) voor opslag in elektrische auto's. Een auto met 20 kWh batterijen van 150 kg haalt 100 km. Bij ons voorbeeld van 20 m² panelen en 20% krijgen wij bij 10 uur maximaal zonlicht van 7-17 uur in theorie 40 kWh op een ideale dag. In theorie wordt de auto opgeladen als de zon schijnt. In het ideale geval houdt u genoeg over: 40 kWh max opbrengst op een dag, 20 kWh voor een volle auto en 20 kWh voor de rest, terwijl u thuis maar 10 kWh gemiddeld nodig is. Dus zelfs als de zon iets minder schijnt, zit u goed. In theorie kan met de batterijen van een auto zelfs gemiddeld twee dagen van 10 kWh verbruik zonder zonneshijn worden doorgekomen. In de praktijk wil niemand de volgende ochtend een lege autobatterij hebben. Bovendien kun je overdag als je weg bent van huis je auto niet opladen. Tenslotte voor 100 GWh opslag zijn 5 miljoen auto's met 20 kWh nodig. De batterijen van een elektrische auto gebruiken voor de opvang van een zonne-energiepiek is derhalve weinig zinvol.

Zijn verwisselbare of stationaire batterijen zinvol? Een of twee extra batterijpakketten voor de auto is handig om een leeg pakket te kunnen uitwisselen. Hier is het cruciale kengetal dat in een lithium-ion batterij 133Wh per kilogram wordt opgeslagen⁶. Bij loodaccu's is dat 40 Wh per kilogram. 20 kWh vergt dan 150 kg lithium-ion en zelfs 500 kg loodaccu's. Niemand wisselt iedere dag thuis even een set batterijen van 150 kg. Bovendien bedragen de kosten van 1 pakket 350 €/kWh in 2015 en 250 €/kWh in 2020. Dan kost 20 kWh 5000 €. Zelfs een stationair pakket van 500 kg lood is niet ideaal. Na 300 op- en ontladcycli verzwakt de werking. Iedere jaar 500 kg lood naar de recycling brengen en 500 kg nieuw installeren vergt een nieuwe industrie en een dienstverlening vergelijkbaar met de kolen- of olieboer die in de vorige eeuw jaarlijks langskwam.

Toch waren die koolwaterstoffen van vroeger niet zo gek. Ze produceerde wel CO₂-afval, maar hun energiedichtheid is groot. Wat als we, op het moment van energie overschot, koolwaterstoffen zouden maken van uit CO₂? Een voorbeeld is het Sabatier-proces waarbij H₂ en CO₂ worden omgezet in CH₄ (hier komen wij nog uitgebreid op terug). Het Sabatier-proces vereist druk en temperatuur en daarmee schaalgrootte. Met een elektriciteitsnetwerk dat geschikt is voor 10 GW leveren aan eindgebruikers zou je in principe eenzelfde hoeveelheid terug kunnen leveren. Maar als we 40 of 160 GW zouden produceren dan moeten overschotten lokaal worden omgezet en opgeslagen.

5 MacKay, Sustainable Energy, 2009, p192: 100 GWh delta 100 m, 20 km² x 10 m

6 MacKay, Sustainable Energy, 2009, p 199, tabel 26.14 b

Wat als je thuis per dag koolwaterstoffen (methanol en/of methaan) zou kunnen aanmaken? Op 10 liter methanol kan een auto 100 km rijden⁷ en/of wordt methaan 's avonds en 's nachts als de zon niet schijnt voor verbranding in een centrale verwarmingsketel of voor koken gebruikt. In het geval van verwarming met een micro-WKK⁸ (warmtekrachtkoppeling) kan zelfs elektriciteit (10-15% efficiëntie) worden opgewekt.

Chemergy: opslaan van zonne-energieoverschot in chemische energie

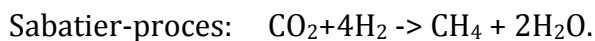
Energieopslag kan in een hiërarchie van drie soorten worden gekarakteriseerd:

1. Chemische energie = langdurig opslaan + transporteerbaar
2. Elektrische energie = transporteerbaar
3. Thermische energie = warmte (kun je slecht transporteren en opslaan)

De natuur heeft één keer een grote hoeveelheid energie opgeslagen in vrije elektronen (e⁻). Dat was met de big-bang. Dat duurde niet zo lang. De natuur slaat nog steeds grote hoeveelheden energie op in de vorm van waterstof (H⁺ en H₂). Dat gebeurt met hoge druk (en hoge temperatuur, 100 miljoen graden Celsius) in een ster. Waterstof kan in een brandstofcel perfect in elektriciteit worden omgezet. Jaren onderzoek hebben nog geen oplossing voor waterstofopslag opgeleverd. Opslag van waterstof hier op onze aarde vereist bij kamertemperatuur 600 bar. Het is te doen, maar is lastig en kostbaar.

Bij onze druk en temperatuur is opslag van energie in koolwaterstoffen (C_xH_{2x+2}) een oplossing die al miljarden jaren op aarde functioneert. Ook gezien de bestaande infrastructuur van transportleidingen en opslag van olie en gas en de toepassingen in verbrandingsmotoren en basischemicaliën loont het de moeite om een overschot aan elektrische energie om te zetten in chemische energie.

Zonne-energie omzetten in chemische energie kan door het reduceren van CO₂ naar CH₄ (methaan, ook wel bekend als aardgas) of CH₃OH (methanol, ook wel bekend als keukenspiritus). Dit is in essentie fotosynthese. De natuur doet dat met chlorofyl, supramoleculen waarmee langere koolstofketens precies zo gedraaid worden dat ze met -CH₂- stukjes worden uitgebreid. Reduceren van CO₂ naar CH₄ (of methanol⁹) staat bekend als het



⁷ Benzine 13 kWh/kg en methanol 5,5 kWh/kg, dus 10 liter methanol is vergelijkbaar met in de orde van 5 liter benzine (of diesel). Als een benzineauto 1 op 20 rijdt, dan rijdt die op methanol rond de 1:10.

⁸ Micro-Turbine Technology BV, Eindhoven, maakt middels een micro-gasturbine warmte met 15% rendement elektriciteit. Of een op een Stirlingmotor gebaseerde WKK.

⁹ Methanol kan ook vanuit CO₂ en waterstof met een katalyseproces met CU/ZnO/Al₂O₃ worden gemaakt. Dit proces heeft een temperatuur van 260 graden Celsius en druk van 30 tot 70 bar nodig.

Het Sabatier-proces stamt uit 1912 en is geen succes geworden. Methaan in de vorm van aardgas was goedkoper uit de grond te halen. Het Sabatier-proces is een proces onder druk en temperatuur waarbij ruthenium (Ru) als katalysator wordt gebruikt. Het proces vereist voldoende waterstof en CO₂.

Waterstof verkrijgen wij door elektrolyse van water. Eerst worden in het zonnepaneel de hoogenergetische fotonen omgezet in meer stabiele elektronen (elektriciteit). Elektriciteit is goed over afstand te transporteren naar een locatie waar het kan worden ingezet in elektrolyse voor de waterstofproductie. Fotokatalyse is een proces waarbij water direct door zonlicht in o.a. waterstof wordt omgezet. Voorlopig gebeurt dit met een lage efficiëntie van (lab waarde) 7%10. Maar zelfs als het zou werken dan zou je toch niet graag allerlei gaslangen op en aan zonnepanelen willen aanbrengen.

We hebben ook CO₂ nodig. Dat wordt in de buitenlucht gemeten in een concentratie van 400 ppm. Het kost energie CO₂ te concentreren. Het is daarom handiger CO₂ af te vangen bij een puntbron. Dat kan een kolen- of gasgestookte centrale zijn, maar het kan ook een cementfabriek zijn waar uit de rookgassen CO₂ wordt afgevangen. Bij een centrale kost CO₂-afvang middels ab-/desorptie rond de 30% aan thermische energie. Vaak is bij een CO₂-bron ook een thermische bron dichtbij. Daarnaast is ook de schaalgrootte geschikt voor een efficiënt Sabatier-proces. De output kan als methaan in het aardgasnet worden gepompt. In de Rotterdam situatie kan de output ook als basischemicaliën worden gebruikt. De veronderstelling is dat CO₂-uitstoot belast zal worden en dat CO₂-Capture and Utilisaton (CCU) een optie is om die belasting te omzeilen. Het gebruik van CO₂ in een Sabatier-proces op het moment van elektriciteitsoverschot is dan een optie.

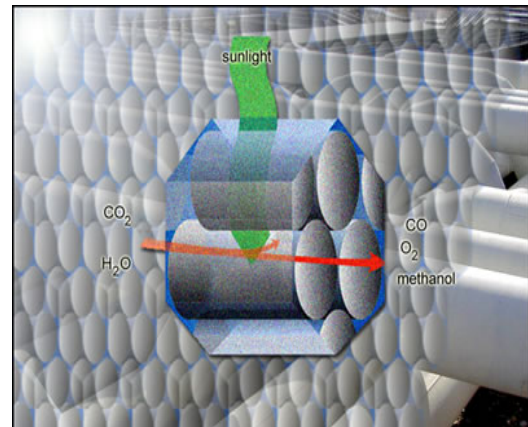
Een thermische centrale (kolen, biomassa, kernenergie) kan tijdens een zonne-energiepiek niet worden uitgezet. Als die centrale gedurende een dergelijk periode kan overschakelen op CH₄-productie dan biedt dat de mogelijkheid om steenkoolcentrales voor de basislast beschikbaar te houden. Gedurende een periode van gebrek aan zonlicht zal elektriciteit relatief veel waard zijn, terwijl tijdens wattpiektijden de prijs nagenoeg tot nul reduceert. Zodra zonne-energie grootschalig wordt opgewekt zal steeds vaker worden teruggevallen op (gas)turbinecentrales die sneller zijn aan te passen aan een (zeer) flexibele vraag. Ook deze turbines leveren CO₂ dat tijdens de piek omgezet kan worden in CH₄. Later kan dat methaan weer in de turbine worden ingezet. Naast een rendementsprobleem is er ook een limietprobleem. De capaciteit van het Nederlandse netwerk is beperkt tot het transporteren van 10 à 20 GW. Bij grootschalige inzet van zonne-energie stijgt het piekvermogen binnen Nederland tot 40 à 160 GW binnen Nederland. Een Sabatier-oplossing is dan gelimiteerd tot 10GW, de capaciteit die kan worden terug geleverd. Daarboven zijn lokale oplossingen nodig waarbij een elektriciteitsoverschot samen met CO₂ wordt omgezet in methaan of methanol.

Met een micro-WKK kun je ook thuis uit de rookgassen CO₂ afvangen en opslaan. Een micro-WKK zul je 's nachts of tijdens lange periodes met weinig zonlicht inzetten voor

10 PV-efficiëntie 12-20% x elektrolyse-efficiëntie 50-75% = totaal 6-15% via PV - elektriciteit – waterstof. Omdat je de elektriciteit bij weinig licht, en nog geen overschot, nodig hebt, is deze indirecte route (PV-electra-H₂) te verkiezen boven direct PV naar waterstof.

de opwekking van elektriciteit en, vooral warmte. Nu zul je thuis niet snel een hoge temperatuur Sabatier-proces met waterstof en methaan willen hebben. Wat zijn de alternatieve mogelijkheden?

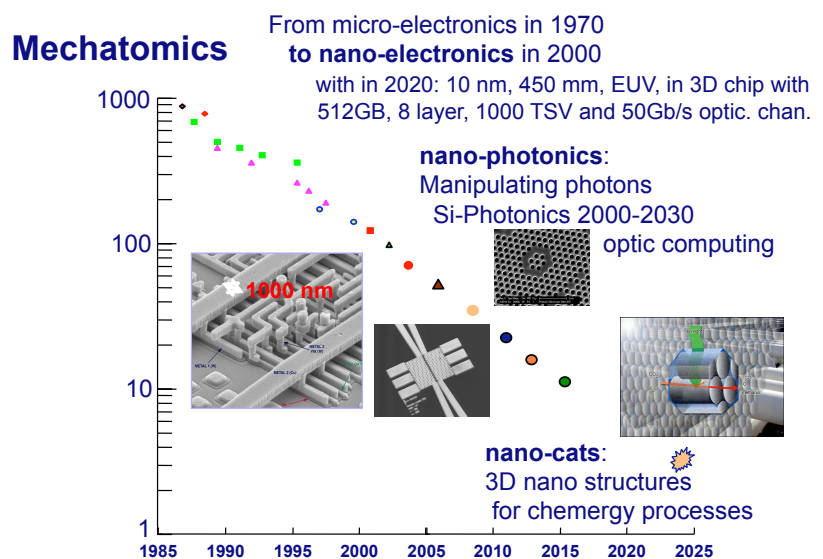
Een mogelijke oplossing kan elektrolyse van CO₂ zijn¹¹. Het nadeel is de nog lage efficiëntie. In principe wordt vanuit CO₂ + H₂O en e⁻ zuivere zuurstof aan de anode zijde en aan de kathode zijde syngas (CO + 2 H₂) geproduceerd. Uit syngas wordt via een Cu/ZnO katalysator (warmte) en CH₃OH gemaakt. Echter nog een stap verder is foto-elektro-chemische conversie van CO₂ naar o.a. methanol met halfgeleider elektrodes van o.a. p-GaP. Dit ligt dicht tegen de hypothese om via nog te ontwikkelen nano-katalysator-technologie een normale temperatuur/drukproces te ontwikkelen.



Afbeelding 5 Concept Nano-katalyse van Frei

Een voorstel is om op nanoschaal via katalyse op lage temperatuur de zuurstof-verbinding van de CO₂ in een paar stappen te vervangen door waterstofketens zodat CH₃OH of CH₄ ontstaat. In feite wordt net als in fotosynthese een CO₂-molecuul zodanig in een nanostructuur gepositioneerd dat de H⁺-ion de O= verbindingen over kan nemen. In de natuur gebeurt dit met een complex molecuul (chlorofyl) dat in feite aan een iets langere koolstofketen een -CH₂- keten toevoegt.

De veronderstelling bij nano-katalyse van CO₂ is dat wij nanostructuren van bijv. 3 nanometer kunnen maken waarbij we in putjes of andere nanostructuren actieve metaal of metaaloxide toevoegen die het chemische bulkproces van Sabatier in feite op nanometerniveau fysisch gecontroleerd uitvoeren. Tot nog toe kunnen wij dergelijke structuren niet maken. Echter (zie afb 6 mechatronics) op dit moment kunnen wij al 4 nanometer dunne lijntjes schrijven, over een aantal jaren is sub-10 nanometer lithografie op



Afbeelding 6 Van Micro-elec, via nano-photonics naar mechatronics

¹¹ Uit: <http://www2.potsdam.edu/exochemistry/electrorednco2.pdf>

“With good Faradaic efficiencies and chemical efficiencies, the electrolysis of CO₂ is a better method of obtaining methane and methanol than the Sabatier or Fischer-Tropsch processes alone because it can be achieved at lower energies.”

grote oppervlakten mogelijk en met nano-imprint ook op grote schaal roll-to-roll. In lijn met de samenvoeging van chemie en energie in “chemergy” voor het aanduiden van het opslaan van energie in chemie, kan voor het op nanometerniveau aanbrengen en plaatsen van atoomstructuren de samenvoeging “mechatomics” worden gebruikt. In feite wordt dit een ultieme uitvoering van procesintensificatie waarbij de morfologie aan het oppervlakte van de katalysator precies tot op nanometerprecisie wordt beheerst.

Indien een dergelijk proces in bijvoorbeeld een membraam met een nanostructuur mogelijk is, dan is de verwachting dat in de lokale situatie een procesbox met membraamplaten komt waar enerzijds de elektriciteit van de zonnepanelen, samen met de slangen met water en CO₂ in gaat en anderzijds, afhankelijk van de gewenste output, methaan of methanol uitkomt. Het methaan kan onder druk terug geleverd worden aan het aardgasnetwerk. De methanol kan in de auto met de benzine worden gemengd.

Wat is de totale energiebalans of rendement van het hele proces? Uitgangspunt is dat er een energieoverschot is dat anders wordt weg gegooid. Allereerst is er het energie slurpende elektrolyseproces dat in de praktijk slechts met 50-75% efficiëntie functioneert. Om 1 kg waterstof te maken is in de praktijk rond de 50 kWh aan elektriciteit nodig. Het verkrijgen van waterstof en het verwerken tot een koolwaterstof, zelfs als dat op druk gebracht moet worden, kan geschieden op het moment dat een overschot aan zonne-energie is¹².

De CO₂-collectie is een probleem. CO₂ in de atmosfeer heeft een concentratie van 0,037%. Er zijn amine-gebaseerde absorptie/desorptieprocessen waarin CO₂ uit de lucht wordt gehaald en in de desorptie-unit bij hogere temperatuur in een hoge concentratie vrijkomt. Handiger is om CO₂ uit rookgas te halen omdat daar de concentratie (afhankelijk van de inputlucht 80% N₂ (stikstof)) reeds richting 10 a 20% kan zijn. Of zelfs hoger als uit een eerder elektrolyseproces voor de waterstofproductie, ook het zuurstof wordt afgevangen en later als zuivere zuurstof het verbrandingsproces ingaat. Dan bestaat het rookgas praktisch alleen uit water en CO₂ (CH₄ + 2 O₂ -> CO₂ + 2 H₂O). Maar dit proces en het afvangen en/of onder druk opslaan van CO₂ kost energie op het moment dat er geen energieoverschot is. De vraag is wat het slimste is om zoveel mogelijk output te krijgen.

Kooldioxide kan ook op het boerenbedrijf (of thuis) worden verkregen door anaerobe vergisting van organisch afval (mest). In dat geval komt een combinatie van CH₄ en CO₂ vrij. Voor het Sabatier-proces levert een dergelijk mengsel geen enkel probleem op. Een andere mogelijkheid om CO₂ te verkrijgen is Kalium (potash) hydroxide (KOH) met CO₂ laten reageren tot K₂CO₃, in water oplossen en in dat water middels elektrolyse zowel CO₂ als H₂ produceren. De heilige graal voor CO₂-afvang is niet gevonden, hoewel ook voor CO₂-afvang er indicaties zijn dat nanogestructureerde ab/desorbers ongekende mogelijkheden bieden.

Tenslotte de vraag of je methaan, methanol of zelfs dimethylether (DME) wilt maken. Methaan is een gas, methanol is tot 65^o C vloeibaar en DME is eveneens een gas (-24^o C

¹² Feitelijk moet je alle energie kosten meenemen, dus ook van het maken en onderhouden van de installatie, en voor een vergelijking ook van een Sabatier proces. Gezien de schatting van een nog te ontwikkelen proces is dat hier achterwegen gelaten.

kookpunt). DME is zeer geschikt voor zeer schone diesel-motoren en kan net zo als LPG onder druk vloeibaar worden gehouden. Methanol is geschikt voor benzinemotoren zoals in M15 en M85 flexible fuel vehicles¹³, maar ook voor direct methanol fuel cells (DMFC). Methanol en DME zijn ook geschikt als basischemicaliën voor de productie van ethyleen en propyleen. In dit artikel laten wij in het midden wat tegen die tijd de voorkeur zal hebben. Methanol is net als benzine giftig, maar in tegenstelling tot de gasen is de opslag van methanol niet explosiegevoelig. Omdat methanol bij normale atmosferische druk vloeibaar is, ligt chemergy-opslag via methanol voor de hand. Het alternatief is daarna methaan en het op druk brengen en terugpompen in het aardgasnet.

De komende jaren is de uitdaging voor de wetenschap om een proces te ontwikkelen om voor eenvoudige molecuulstructuren als H₂, H₂O, CO₂, CH₄ en CH₃OH (C-1 structuren) mechanismen te ontwikkelen om met nanotechnologie met lage temperatuur en geringe druk CO₂ in CH₄, CH₃OH en CH₃OH₃C met een redelijke efficiëntie om te zetten. Voor de engineering ligt er de uitdaging om hightech procesintensificatie-installaties te creëren. Eerst ligt er de uitdaging Sabatier-type processen op grote (thermische) schaal, maar ook voor kleinere schaal met procesintensificatie te realiseren. Op termijn wordt de uitdaging om de nanokatalyse-systemen zoals door de wetenschap voorgesteld tot betrouwbare en betaalbare systemen uit te werken. Dit laatste is procesintensificatie optima forma waarbij tot op molecuulniveau de processen worden beheerd. Dat het kan, bewijzen onze bomen en planten die dit proces met lage temperaturen en zonder schaarse metalen altijd al doen. Tel daarbij het zelfherstellende vermogen van planten en de “natuurlijke” end-of-life verwerking van het afval en een respectvolle ;-) naar de natuur is op zijn plaats. Zo goed kunnen wij het nog niet.

De overwegingen van een huiseigenaar of boer in 2025-2030

Stel dat een huishouden in 2025 niet 4kW_p zonnepanelen (20 m²), maar voor 20+1 kW_p zonnepanelen (ongeveer 100 m²) heeft geïnstalleerd. De 1 kW in deze aanname is voor het basisverbruik in het huishouden. De rest mag niet aan het netwerk worden geleverd omdat iedereen opdat moment zonne-energie in elektriciteit omzet. Als de zon 10 uur schijnt (7:00-17:00 u) dan leveren die panelen die piekdag 200 kWh op. Deze 200 kWh zou bij 0,22€/kWh een saldering (vergoeding voor terug leveren) van 44 € opleveren, maar boven de 3000-5000 kWh per jaar terug levering nog maar 0,09 €/kWh respectievelijk 18 € per dag. Nu mag het niet worden terug geleverd en het huishouden heeft een tiental uren 20 kW over.

In het geval met 50% chemergy omzettingsrendement¹⁴ kan hiermee voor 1 m³ per uur (1,35 kg per uur) methaan of 2.5 liter (2 kg) per uur methanol worden geproduceerd¹⁵.

13 Benzine/diesel hebben een energiedichtheid 13 kWh/kg, methanol van 5.5 kWh/kg. 1 liter methanol komt overeen met 0,5 liter benzine/diesel, in huidige autotermen kun je daar 250 km mee rijden.

14 Aannee is dat de waterstof en zonnestroom uit het overschot komen. Die tellen niet mee. Wat rest zijn de kosten om al eerder de CO₂ te krijgen, de effectiviteit van CO₂ en H₂ reactie zelf (de energie hiervoor komt wederom uit het overschot) en de kosten om het eindproduct in geval om een gas (CH₄ of DME) op druk te brengen.

Bij 0,50 €/m³ levert dat op een dag met 10 uur maximaal zonlicht 5 € op. Op een gemiddelde dag leveren de panelen 50 kWh gedurende, stel 10 uren licht, ergo 5 kWh/h wanneer op hetzelfde moment 1 kWh/h wordt gebruikt. Gemiddeld zal de chemergy installatie dan 10 uur aan staan en 4 kWh per uur in plaats van de piek van 20 kWh/h verwerken. Per piekdag wordt 25 liter geproduceerd, op normale dagen 5 liter. Een tank van een paar honderd liter voldoet als je ieder dag 5 liter in de auto zou gooien ;-)

Stel dat een boer 10000 m² (1 hectare zonnepanelen) heeft geïnstalleerd. Gemiddeld over het jaar zal hij per dag 5000 kWh in chemergy kunnen omzetten. Dat levert de boer bij 50% omzettingsefficiëntie gemiddeld 250 m³ (170 kg) gas of 625 liter (500 kg) methanol per dag op. 50.000 boeren samen produceren dan gemiddeld per dag 12,5 M m³ gas of 30 M liter methanol. Ter vergelijking de gemiddelde dagproductie van Slochteren is 200 M m³ en Rotterdam raffineert per dag rond de 200 M liter brandstof. De getallen voor Slochteren en Rotterdam zijn groter omdat die productie niet alleen voor Nederland is. De genoemde hoeveelheden lokaal geproduceerde brandstoffen kunnen eenvoudig in de bestaande infrastructuur worden geabsorbeerd.

In financiële termen krijgt de boer per hectare 45.000 € per jaar (bij de gaslevering aan consumenten voor 0,50 €/m³ (Russisch gas kost momenteel rond de 0,30 €/m³). Methanol kost in Rotterdam rond de 0,30 € per kg, op jaarbasis levert dit de boer bij 500 kg gemiddeld per dag rond de 55.000 € per jaar op. Maar wat als mensen met een te klein of te schaduwwijk dak een coöperatie vormen met een boer in de buurt die de zonnebrandstoffen voor hun produceert en zoals interne levering de methanol buiten allerlei belastingen als BTW houden? Ten opzichte van 0,5 liter benzine van 1,5-2 € heeft die ene liter methanol voor deze mensen een waarde van 0,75-1 € i.p.v. een 0,30 € per liter.

Naast de rendementsvraag hint de alinea hierboven op diverse andere vraagstukken. Denk aan de consequenties voor bijvoorbeeld de overheid ten aanzien van belasting op benzine en alcohol indien mensen thuis produceren. Hoe reageren de olie- en gasmaatschappijen op een dergelijke game-changer? Wat wordt de reactie van chemiebedrijven die ineens niet-fossiele, CO₂-vrije basischemicaliën kunnen verkrijgen en de hele biomassa-route kunnen overslaan?

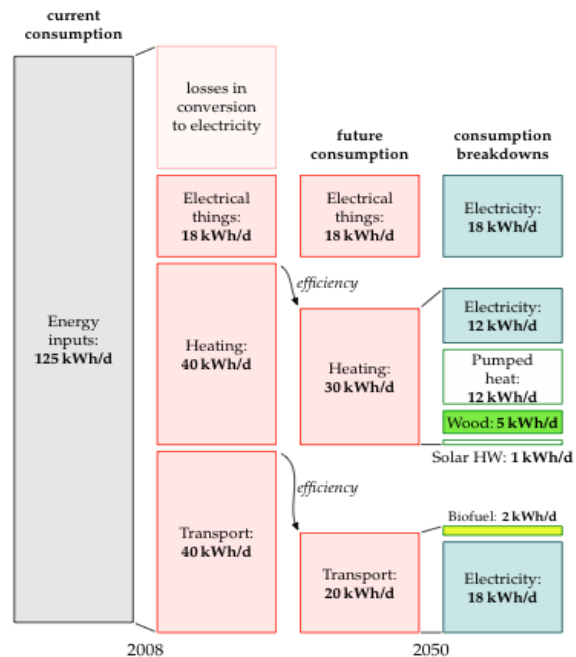
Het vergezicht als opslag in 2030-2050 werkt

De trend naar duurzaamheid resulteert in een verschuiving naar meer gebruik van elektriciteit. De meest logische ontwikkeling is dat de verwarming met aardgas vervangen wordt door warmtepompen. Warm water verkrijgt je zoveel mogelijk met zonnecollectoren, maar voor verwarming (en koeling) zijn warmtepompen geschikter omdat die warmte van een stabiele bron betrekken. Een warmtepomp kost elektrische energie. Voor iedere 1kW elektriciteit wordt 4 à 5 kW warmte verkregen. De elektriciteit komt zoveel mogelijke van zonnepanelen. Ook transport zal meer met elektrische auto's en minder met benzine/diesel worden gereden. De batterijen voor die auto probeer je

15 De energie-inhoud van methaan is 14,85 kWh/kg resp methanol 5.5 kWh/kg. Bij 25 graden Celsius en 1 bar is de dichtheid van methanol 0,8 kg/lit en methaan 0,65 kg/m³.

zoveel mogelijk met zonne-energie te laden. De koolwaterstoffen verkregen uit het opslagproces (chemergy) zijn nodig voor verwarming in huis, elektriciteitsproductie middels (micro)gasturbines indien de zon niet schijnt en voor langeafstandsvervoer.

MacKay geeft in zijn boek "Sustainable Energy –without the air" (2009, p 204 www.withouthotair.com) een goede beschrijving van dit toekomstbeeld. Het totale verbruik van elektriciteit van 10 kWh per dag (3650 kWh/j) voor een gemiddeld huis uit ons voorbeeld stijgt dan naar rond de 50 kWh per dag per persoon. Stel dat er twee mensen in een huis wonen en dat zij 100 kWh per dag nodig hebben. Op jaarbasis is dat, afgerond 36.500 kWh/jaar voor de totale energiebehoefte, dus niet alleen het huidige elektraverbruik, maar ook gas en benzinevervangers. Let wel dit is bijna 10x zoveel meer dan de 3000 kWh die een huishouden nu gemiddeld verbruikt.



Afbeelding 7 Energieverbruik per person per dag (MacKay)

In het doorgroei-chemergy scenario (vorige paragraaf van 2025-2030) naar 2030-2050 nemen we aan dat de benodigde 36.500 kWh/jaar direct van zonnepanelen komt en dat de rest via opslag wordt verkregen. Bij 20% efficiëntie van de panelen is voor 36.500 kWh/jaar 100 m² bij 100% opslagomzettingefficiëntie nodig. Stel dat de opslagomzettingefficiëntie wederom op 50% en dat 20% van de zonnepanelen direct de gewenste elektriciteit leveren, dan is 200 m² per huishouden nodig. Zoveel ruimte voor schaduwrijke zonnepanelen is per woning niet beschikbaar (en een deel is nodig voor zonne (warmte)collectoren). De ruimte lossen we op dankzij onze landbouwers, maar hoeveel blijft lokaal en hoeveel gaat naar het platteland?

Op een gemiddeld dak kan rond de 40 m² worden gebruikt. Op een groter (land)huis nog tot 100 m². Als voor 16 miljoen Nederlanders ieder 100 m² nodig is waarvan dan weer 20 m² reeds op het eigen dak, dan is er 16 M x 80 m² = 1280 km² landoppervlakte nodig. In feite wordt het iets meer, 1280+220 (loop/slagschaduw ruimte) = 1500 km². NL heeft 41.000 km² oppervlakte. 150 km² is glastuinbouw en 1500 km² zonnepanelen komt overeen met 3,65% bedekt met zonnepanelen op het platteland. Als wij 1500 km² verdelen over 50.000 boerenbedrijven met 50 hectare vereist dit 3 hectare (30.000 m²) per boer. In m² panelen uitgedrukt is dit per boer 25600 m².

Stel dat de €/W_p op 0,28 ligt (280€/1kW_p), de panelen 20% efficiency realiseren en ieder 5 m² 1 kW_p (en stel 925 kWh/j) oplevert. Dit



Afbeelding 8 Landschap over 20 jaar

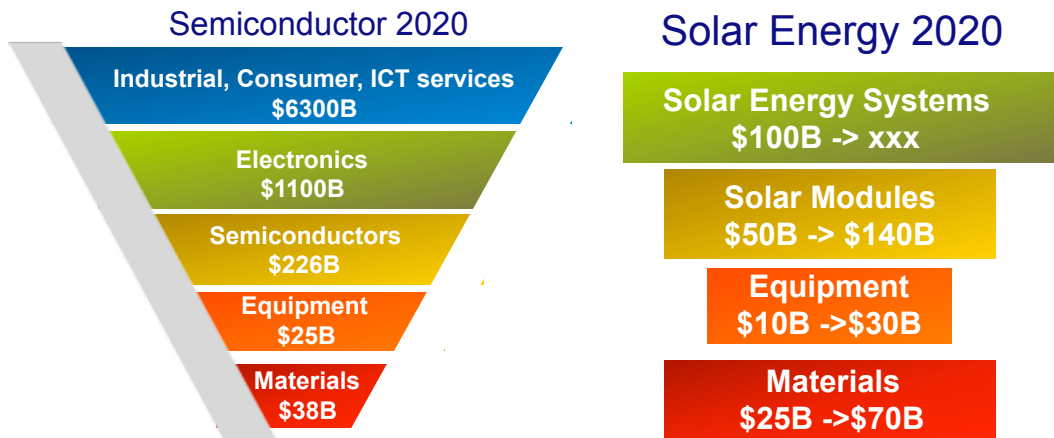
kost de boer dan 1,4 miljoen euro panelen als investering en hij produceert op een piek 5 MW en gemiddeld 5000 MWh/j. Deze boeren zullen zich niet op elektriciteitsproductie, maar zich volledig op de productie van chemergy richten. De 16 miljoen Nederlanders met gemiddeld 10 m² op hun dak leveren op een piekmoment 32 GW en dat is al een overload op het netwerk (vandaar het eerdere basis-scenario waarbij maar een kwart van de 6 miljoen huishoudens in 2020 panelen neerlegt). Maar investeert een boer 1,4 miljoen euro aan zonnepanelen en zeg 600.000 € aan een chemieproces installatie om 1500 liter methanol per dag te produceren als hij 30 jaar lang tussen de 140-200k € per jaar kan verdienen.

Als opslag van het overschot aan zonne-energie op het boerenbedrijf lukt dan gaat het aantal te produceren panelen omhoog van 20 m² voor een kwart van 6 miljoen huishoudens naar 50 m² voor 16 miljoen Nederlanders. De markt groeit in dat geval explosief door. Conform de leercurvetheorie gaat dan de prijs per W_p verder omlaag. Dit is wat de voorspelling bij een chemergy-scenario is:

Tabel 2 Chemergy-scenario

year	GW Cum. Installed panels	Learning Curve € / W _p	1 GW _p fabs	New fabs / year	Sales output all fabs
2010	35	2	13	7	40B
	285	1	88	15	50B
2020	1210	0,60	263	47	140B
	3320	0,40	544	71	300B
2030	7205	0,28	949	96	280B
2040	22800	0,20	2134	146	400B

De kolom met jaren is een relatie naar het aantal fabrieken die cumulatieve wereldwijde output tot dan toe bepalen. Het aantal 1GW_p-fabrieken gaat van 100 naar rond de 1000 in 2030. Alleen al de bouw van ieder jaar meer fabrieken en het leveren van ieder jaar meer en meer equipment is een gigantische markt op zich en in feite is het de beperkende factor. Om enige referentie te geven: de semicon-equipment markt bedraagt momenteel rond de 25 B\$ per jaar van een semiconmarkt van 225B\$. Hier praten wij dan in 2020 over een markt van 140 B€ en een markt voor investeringen in nieuwe fabrieken van 47 B€ indien een fabriek 1 B€ kost. Merk op dat de €/W_p eenheid in 2020 al op 0.60 ligt en rond 2030 richting de 0,28 gaat t.o.v. een 2 €/W_p nu. In de huidige perceptie van velen is dat ongehoord. Net zoals de uitspraak in de jaren 1960-70 dat rond het jaar 2000 op een chip meer dan een miljoen transistoren zouden staan. Anno 2010 zitten we over 1 miljard transistors op een chip. In 30 tot 40 jaar kan met een snelle leercurve de wereld er heel anders uitzien.



Afbeelding 9 Semicon en Solar markten

Als opslag lukt, dan groeit de zonne-energiemarkt explosief door. Wat net als de wet van Moore in 50 jaar een elektronica-industrie heeft opgeleverd van ongekeerde omvang, zal in de zonne-energiemarkt ook gebeuren.

De komende 10 tot 20 jaar worden het lastigst. Enerzijds komen we in een Kondratieff fase (6^e golf) waarin de economie tegen zal zitten. Door de groei van de economieën in Azië, de stijgende vraag naar grondstoffen en energie zullen prijzen en inflatie stijgen. Bovendien zal zolang betaalbare en uitontwikkelde opslagmethode nog niet werken mensen geen reden hebben om maximaal in zonnepanelen te investeren. Pas als een economie weer aantrekt (Perez, 2002), men nieuwe kansen ziet, weer volop investeert, dan gaat ook deze business fors doorgroeien. Echter de succesvolle spelers van dan zetten nu de juiste stappen en blijven dat 20 jaar lang volhouden.

Conclusie

De individuele burger heeft het gemakkelijk: die legt tussen 2015 en 2020 zonnepanelen op dak.

Rond 2025-2035 maakt die speler lokaal, thuis of bij de boer, methaan of methanol.

Voor wetenschappers is de uitdaging eenvoudig: komt met inspirerend en inventief "hardcore" katalyse-onderzoek naar o.a. de juiste nano-morfologie voor de CO₂ naar CH₄- of CH₃OH-conversie bij normale temperatuur en druk. En dan de procesintensificatie om op nanometerniveau processen uit te voeren.



Afbeelding 10 Huis met een chemergy installatie

Ingenieurs weten ook wat ze moeten doen. De leercurve van de €/W_p voor zonnepanelen verder aflopen door onderzoek en engineering, alsmede een leercurve om chemergy-proces op grote schaal betrouwbaar en betaalbaar te maken. Het is een leercurve en dat impliceert dat verbeteringen niet vanzelf gaan. Het is niet zo eenvoudig als het lijkt.

Voor ondernemingen in de equipment, fabrieksbouw, zonnepaneelproductie, materiaal voor zonnepanelen en de chemische procesbouw voor procesintensificatie ontstaan kansen voor innovatieve producten. Dit vereist ondernemerschap zoals het hoort.

Traditionele grootmachten (olie- en gasmaatschappijen) en overheden (met veel olie- of gasvoorraden) worden geconfronteerd met een game-changer.

Spelers uit de hightech industrie die reeds een keer eerder een 20 jaar leercurve en de effecten daarvan hebben meegemaakt zullen eerder de juiste keuzen maken. Maar het succes wordt niet met de keuze, maar met de implementatie van de gevolgen van die keuze gemaakt. Werk aan de winkel, maar het worden weer leuke en positief spannende tijden.

Referenties

MacKay, 2009, *Sustainable Energy – without the hot air*, PDF at www.withouthotair.com

Stern, 2009, *Methaniserung*

D. Maas, 2011, *TNO persbericht “4-nm lijntjes”*

Olah, G.A., et al, 2009, *Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether*, *Journal of Organic Chemistry*, 487-498

ITRPV, 2010, *International Technology Roadmap for Photovoltaics Results 2010*, www.itrpv.net

Matthew R. Hudson, 2005, *Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide*, <http://www2.potsdam.edu/exochemistry/electrorednco2.pdf>

Carlota Perez, 2002, *Technological Revolutions and Financial Capitals*.