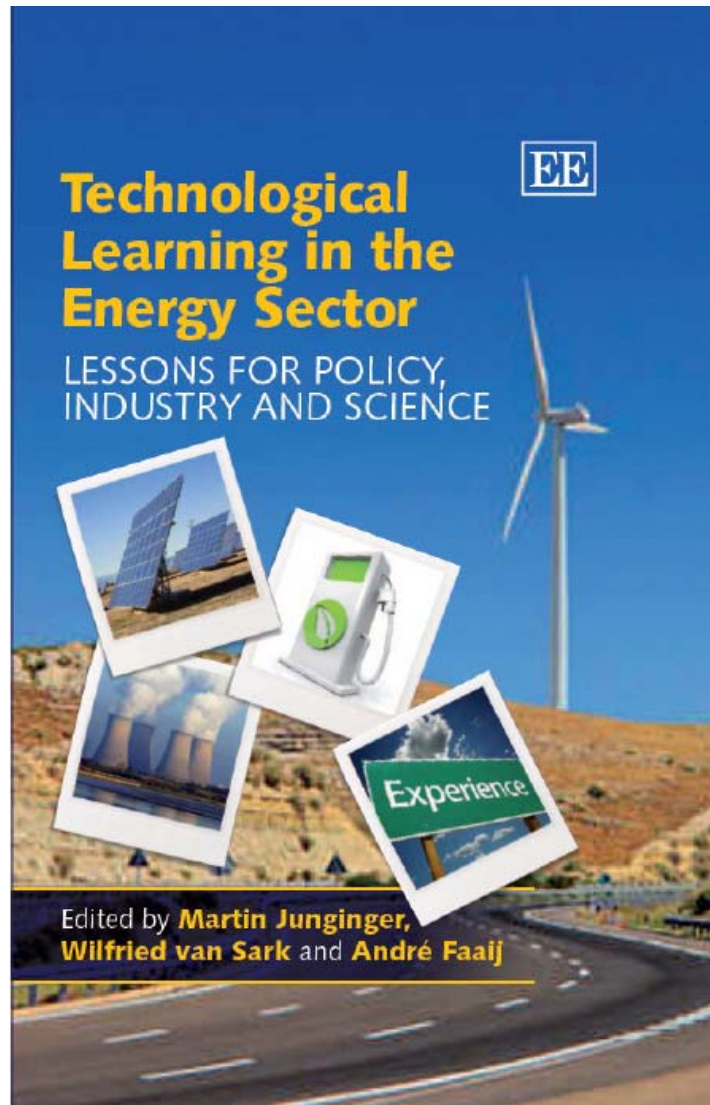


Technologische Leereffecten voor Beleidsmakers en Industrie

Samenvatting van het boek "Technological Learning in the Energy Sector, Lessons for Policy, Industry and Science", Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2010



André Faaij, Martin Junginger and Wilfried van Sark

Science, Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht
University
August 2010

Rapport: NWS-E-2010-59

André Faaij, Martin Junginger, Wilfried van Sark

Inhoudsopgave

1. Inleiding	5
2. Stimulering van technologische vooruitgang in energietechnologieën	7
2.1 Wind op land (onshore wind)	7
2.2 Wind op zee (offshore wind)	9
2.3 Fotovoltaïsche zonne-energie (photovoltaics, PV).....	11
2.4 Geconcentreerde thermische zonne-energie (concentrated solar power, CSP)	13
2.5 Biomassa	13
2.6 Elektriciteitsopwekking met fossiele brandstof en CO ₂ afvang en opslag	16
2.7 Kernenergie	18
2.8 Huishoudelijke apparatuur	20
2.9 Verlichting	21
2.10 Ruimteverwarming en koeling	22
2.11 Polymeren en kunstmest.....	24
3 Algemene conclusies en aanbevelingen.....	25
4 Ten slotte.....	30
Referenties	34

André Faaij, Martin Junginger, Wilfried van Sark

Technologische Leereffecten voor Beleidsmakers en Industrie

Samenvatting van het boek “Technological Learning in the Energy Sector, Lessons for Policy, Industry and Science”, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2010

André Faaij, Martin Junginger and Wilfried van Sark

1. Inleiding

De noodzaak voor vooruitgang van technologische ontwikkeling van energietechnologieën is duidelijk sinds de onderkenning van het wereldwijde klimaatprobleem. Het aanpakken van de toenemende wereldwijde energievraag evenals het voldoen aan de doelstellingen van broeikasgas emissies (naar minder dan 20% van het huidige niveau) naast andere milieucriteria, en dit alles tegen betaalbare kosten, kan alleen gerealiseerd worden wanneer een groot aantal technologieën beschikbaar komen voor duurzame energievoorziening en energiebesparing. Het ontwikkelen en stimuleren van het op de markt brengen van zulke technologieën is het hart van energie- en klimaat beleid in de wereld.

Veel nationale overheden ondersteunen daarom Onderzoek & Ontwikkeling (O&O), en zorgen voor stimuleringsmaatregelen voor de marktintroductie van de beoogde energie technologieën, die meestal kostbaarder zijn vergeleken met O&O. Om succes van de stimuleringsmaatregelen te kunnen garanderen is het echter moeilijk vast te stellen op welk tijdstip deze genomen worden, wat het specifieke ontwerp van de beleidsmaatregelen zou moeten zijn, alsmede de hoeveelheid steun. Voor de energiesector en de industrie is het ontwerp van strategische plannen voor het O&O

portfolio een evenzo grote uitdaging als het nemen van initiatief in bepaalde markten en het identificeren van sleutel marktniches (met of zonder beleidsondersteuning). Deze twee argumenten tezamen maakt een verbeterd begrip van technologische leereffecten extreem belangrijk. Op dit moment zijn de meeste strategieën en beleidsvormen slechts in beperkte mate gebaseerd op een rationeel en gedetailleerd begrip van leermechanismen en trajecten van technologische ontwikkeling. Welke condities voor een efficiënte ontwikkelingsroute zorgen is tot op de dag van vandaag nog niet goed begrepen, en onderwerp van veel onderzoek in bijvoorbeeld de innovatiewetenschappen. Naast wat de optimale condities en voorwaarden leveren om technologische vooruitgang en snelle marktintroductie te realiseren, is het duidelijk dat een gedetailleerd begrip van specifieke technologieën, hun voortgang en factoren die voortgang beïnvloeden, essentieel is om tot juiste en effectieve beleidsstrategieën te komen.

Om al deze redenen tracht dit boek state-of-the-art overzicht te geven van de inzichten in technologische leereffecten van een groot aantal energie technologieën. In twee hoofdstukken is een samenvatting gegeven van de kwantitatieve inzichten in de snelheid en tempo van waargenomen leereffecten, de variatie in daarmee gepaard gaande onzekerheden, evenals de methodologische lessen getrokken uit dit empirische bewijs. In deze samenvatting wordt door ons een overzicht gegeven van de lessen voor beleidsmakers en industrie. Maar eerst worden de belangrijkste uitkomsten voor iedere behandelde technologie apart samengevat, gevolgd door een algemeen overzicht van de gevonden resultaten.

2. Stimulering van technologische vooruitgang in energietechnologieën

2.1 Wind op land (onshore wind)

Voor onshore wind kunnen zogenaamde leercurves gebruikt worden om de kosten (of prijs) reducties door technologiebeleid programma's te illustreren. De beschikbare leercurves voor windenergie laten zien dat ervaring in productie en gebruik van turbines noodzakelijk is naast market pull maatregelen. Enkel O&O maatregelen zijn daarmee onvoldoende voor het op de markt brengen van nieuwe producten. Het vroege succes van de Deense windindustrie kwam niet door grote investeringen in O&O; Duitsland en Zweden hebben in eerste instantie veel meer uitgegeven aan O&O dan Denemarken. Op de lange termijn echter zijn investeringen in O&O waarschijnlijk doorslaggevend geweest voor technologie ontwikkeling en verder kostenreducties.

Door recente (tot eind 2008) prijsstijgingen van windparken is het de vraag of het leercurve concept nog steeds wel geldt voor windturbines. De belangrijkste redenen achter de prijsstijgingen hiervoor zijn toenemende materiaal en grondstof kosten, algemene prijsstijgingen voor alle energietechnologieën, en een sterk toenemende vraag voor wind energie dat heeft geresulteerd in een leveranciers oligopolie. Het is duidelijk dat windturbine technologie zich verder heeft ontwikkeld in de afgelopen jaren, en waarschijnlijk dat productiekosten (gecorrigeerd voor grondstofprijzen) zijn gedaald als gevolg (en verder zullen dalen). Of windturbine prijzen deze daling zullen volgen is een vraag die betrekking heeft op veel meer factoren, voornamelijk de mate van (te grote) marktvrage.

Het gebruik van leercurves voor het beoordelen van beleidsprogramma's heeft beperkingen: de analyse en beoordeling van beleidsprogramma's kan niet worden gerealiseerd zonder dat relevante leercurves ontwikkeld worden op basis van goede data. Leercurves laten een geaggregeerd beeld zien, en meer data en gedetailleerde analyse middelen zouden nodig zijn voor analyse van verschillende potentiële kostenreducties zoals door individuele beleidsmaatregelen. Eerdere analyses concentreerden op nationale leersystemen. Dit zou over het algemeen echter vermeden moeten worden omdat de kostenreductie gebaseerd is op spillover van internationale leereffecten, en zich ontwikkeld heeft in een wereldwijde setting met kennisoverdracht die plaats vindt op wereldwijde schaal.

Toch is het bepalen van algemene 'wereldwijde windturbine marktprijzen' moeilijk door de gegeven variëteit van markten in verschillende landen, en het feit dat prijzen voor windturbines zijn gestegen over het afgelopen paar jaar. Het is sterk aan te raden dat leercurves de reductie van elektriciteitskosten analyseren en niet zozeer de investeringskosten. Een ander effect is dat de beste locaties voor windparken in veel landen steeds vaker vol raken, wat wellicht de verkoop verschuift naar turbines aangepast voor lagere windsnelheden met over het algemeen hogere kosten per kilowatt. Verdere kostenreducties voor elektriciteit zullen voornamelijk komen van toenemende capaciteitsfactoren. Het meer efficiënter en betrouwbaarder maken van bestaande turbines zullen sleutelfactoren zijn voor toekomstige verbeteringen en kostenreducties.

Op basis van de verzamelde informatie is het redelijk aan te nemen dat – vooropgesteld dat grondstofprijzen stabiel blijven, windturbinekosten de dalende

trend hervatten, gegeven dat fabrikanten hun productietechnieken blijven verbeteren evenals het bereiken van besparingen in de meeste onderdelen van het windturbineontwerp. Op basis van leercurve data over een lange periode lijkt de gemiddelde langetermijn progress ratio (PR) rond 89% te liggen. Deze ratio geldt waarschijnlijk ook voor elektriciteits opwekkingskosten. Aannemend dat de cumulatieve wereldwijde capaciteit zal verdrievoudigen in de komende 5 jaar, met daarbij een PR van 89%, kan dit kostenreducties tot 30% impliceren. Of zulke kostenreducties ook werkelijk zullen leiden tot vergelijkbare prijsreducties zal nog steeds afhangen van marktomstandigheden, en kan niet voorspeld worden met het leercurve concept.

2.2 Wind op zee (offshore wind)

De ontwikkeling van offshore wind is duidelijk verbonden met het energie- en klimaatbeleid. In 2008 voerden negen landen in de EU beleid om offshore wind verder te ontwikkelen, andere landen zullen dit voorbeeld volgen. De offshore windindustrie is redelijk divers in vergelijking tot onshore wind. Junginger (2005) stelt dat stabiele lange termijn vooruitzichten voor offshore kostenreducties kan helpen, vooral voor de installatiekosten maar ook voor (offshore) windturbine fabrikanten. Geen enkel (Europees) land heeft de potentie om over een langere tijdsperiode aan deze voorwaarde te voldoen. Dus een belangrijke beleidsaanbeveling is om een gezamenlijk Europees beleid te overwegen voor het stimuleren van offshore windparken, omdat dit een groot voordeel betekent voor het garanderen van offshore wind technologie diffusie en kostenreducties. Logischerwijs geldt dit ook voor andere regio's in de wereld.

Net als voor onshore windenergie zijn de kosten van offshore wind gestegen in het afgelopen jaar. Voor “wet feet” turbines in ondiep water waren investeringskosten onlangs nog 1600 €₂₀₀₈/kW. Toekomstige parken hebben investeringskosten van 3000-3500 €/kW. Typische productiekosten voor offshore wind zijn gestegen van ongeveer 10 ct/kWh vijf tot tien jaar geleden, tot 15-18 ct/kWh op dit moment, ook al zijn er lagere kosten voor windparken niet ver uit de kust gevonden (< 15 ct/kWh). Als gevolg hiervan laat de leercurve van offshore wind niet een karakteristieke dalende trend zien. De factoren die de marktstructuur beïnvloeden door gebrek aan concurrentie zijn: de bloeiende onshore industrie, de hoge technische en financiële risico's gerelateerd aan offshore projecten, beperkte concurrentie tussen (offshore) turbine fabrikanten, onzekerheden over overheidsbeleid en subsidie-toekenningen, moeilijke toegang tot financiering, beperkt potentieel voor kostenreducties door leereffecten en een tekort aan zowel installatievaartuigen als competente aannemers. In de offshore wind markt gebeurt echter meer dan alleen stijgende grondstofprijzen en een beperkte leveranciersmarkt: vele waardevolle (en dure) lessen zijn geleerd betreffende bijvoorbeeld de corrosieve condities van het zeeklimaat, de sterke wind die schade kan berokkenen aan de apparatuur, en het belang van goede onderhoudsconcepten. Deze ervaringen leiden in eerste instantie tot additionele kostenstijgingen van de aangepaste ontwerpen, iets dat typisch is voor opkomende technologieën. De kosten van een technologie in de eerste markt penetratiefase zijn vaak hoger dan de kosten voor demonstratieprojecten.

Offshore wind komt pas net uit de demonstratiefase. Met de voorziene toename in capaciteit van 2 GW in 2009 tot 70-120 GW in 2030 kunnen zelfs met bescheiden PR waarden van 90-95% significante kostenreducties gehaald worden op de lange

termijn. We hebben echter nog niet het einde van de kostenstijgingen voor offshore windenergie gezien. Een analyse op basis van leercurves voor offshore wind moet met zorg behandeld worden.

2.3 Fotovoltaïsche zonne-energie (photovoltaics, PV)

Voor PV systemen is het lastig gebleken om een juiste balans te vinden tussen O&O activiteiten die direct gericht zijn op technologie ontwikkeling (een 'technologie push' effect) en het stimuleren van marktpenetratie (een 'demand pull' effect). Het is duidelijk uit de literatuur dat stimuleren van leereffecten door zowel marktondersteuning als beleidsprogramma's gericht op het verbeteren van de progress ratio belangrijk zijn. Effectief leren vindt alleen plaats wanneer beide hand in hand gaan. Kwalitatieve en kwantitatieve analyse kunnen helpen om te zien wat de mogelijke voordelen zijn van het benadrukken van of marktondersteuning of O&O vergeleken met een business-as-usual scenario. Een bijzondere lastige kwestie is het vaststellen van het juiste tijdstip van de overgang van het benadrukken van technology push en demand pull.

Substantiële reducties van leerinvesteringen zijn mogelijk wanneer hoogwaardige markten eerst ontwikkeld worden. Het Japanse PV programma heeft het succes laten zien van een aanpak dat richt op hoogwaardige markten. Veel van de voordelen van leerinvesteringen komen uit stabiel beleid en geloofwaardige toezeggingen door overheden over hoe zij die markten willen ondersteunen in de toekomst. Bedrijfsinvesteringen in kostenreducties hangen af van de verwachting van de toekomstige marktomvang, zoals beslissingen om productiecapaciteit te vergroten of te investeren in nieuwe machines (Nemet, 2007). Beleid zoals het Japanse

subsidie programma in de jaren 1990, het Duitse feed-in-tariff programma vanaf het jaar 2000 tot nu, en meer recent het Californische Solar Initiative, zijn effectief gebleken omdat zij een duidelijk verwachtingspatroon schetsen met een tijdshorizon van 10 jaar.

De EU, VS, en Japan hebben vergelijkbare scenario's opgesteld voor toekomstige technologische ontwikkelingen, net als scenario's voor de groei van geïnstalleerde PV capaciteit. Om de hoge jaarlijkse groei van PV technologie te continueren is O&O gefocust op: reductie van materiaalconsumptie per silicium zonnecel en Wp (door het realiseren van hogere conversie efficiëntie, dunnere silicium plakken, hogere opbrengsten in de volledige productieketen), introductie van dunne-film zonnecel technologieën, drastische toename van silicium feedstock faciliteiten voor zonnecellen, grootschalige productiefaciliteiten die 1 GWp jaarlijkse productie realiseren, en intensieve O&O op volgende generatie PV cellen en materialen om >50% efficiëntie te halen op een kostenniveau dat lager ligt dan 1 €/Wp. Verschillende scenario's hebben laten zien dat PV een belangrijk onderdeel zal vormen van de energievoorziening in de komende decennia. Recente plannen voor een grootschalige PV elektriciteitscentrale met een capaciteit van >1 GWp in de Mongoolse woestijn illustreren dit.

De markt voor PV modules is wereldwijd en dynamisch, met marktspelers vanuit alle werelddelen, ook al domineren op dit moment fabrikanten uit Duitsland en Japan, terwijl Chinese fabrikanten sinds 2008 steeds belangrijker worden. De wereldwijde progress ratio van 79,3% blijkt hoger te zijn wanneer de nationale systeemgrenzen beschouwd worden. BOS leereffecten kunnen hoog zijn op nationaal niveau wanneer

een gunstig ondersteuningsprogramma gebruikt wordt. Een opmerking moet gemaakt worden over de fabricage van omvormers die steeds meer op wereldschaal plaats vindt, terwijl andere installatieonderdelen en arbeid voor het installeren zal af blijven hangen van lokale (nationale) leereffecten.

2.4 Geconcentreerde thermische zonne-energie (concentrated solar power, CSP)

Ook al dateren CSP centrales van de jaren 1980, verdere uitbreiding van deze technologie begint nu pas op gang te komen. Leercurves op basis van historische data zijn daarom niet beschikbaar. Van studies die kostenontwikkelingen voorspellen zijn PR waardes in de range van 80-88% afgeleid. Gegeven de recente hernieuwde interesse en gerealiseerde en geplande installaties, zal het van dichtbij volgen van de kosten het mogelijk maken om in de komende jaren een leercurve te construeren.

2.5 Biomassa

Voor de meeste bio-energie technologieën die beschouwd zijn in dit boek heeft beleidsondersteuning een groot deel uitgemaakt van de succesvolle ontwikkeling en marktdiffusie. Duidelijke voorbeelden zijn de beleidsondersteunende maatregelen in Zweden en Brazilië. In Zweden is de duurzame ontwikkeling van houtachtige biomassa voor stadsverwarming mogelijk gemaakt door onder andere belastingen op fossiele brandstoffen voor verwarming en subsidies op investeringskosten. Het Braziliaanse ProAlcool programma bevatte O&O ondersteuning, investeringsondersteuning, en verschillende andere markt ondersteuningsmaatregelen.

Het meest belangrijke in beide landen, is dat de ondersteuningsmaatregelen voor een langere tijdsperiode gelden (een decennium of langer), wat het mogelijk maakte dat investeerders de feedstock productie en productieketen verbeterden en proces technologieën ontwikkelden. In Brazilië hebben O&O programma's duidelijk bijgedragen aan zowel kostenreducties van feedstock en industriële verwerking, terwijl in Zweden het technologisch leren op het gebied van brandstof leveringsketens uit de bossen juist plaatsvond zonder noemenswaardige grote gerichte (publieke) O&O inspanningen.

Biomassa energie systeem zijn over het algemeen complex, en omvatten veel combinaties van conversietechnologieën en brandstof leveringsketens. Leercurves zijn tot dit moment alleen ontwikkeld voor een beperkt aantal systemen, en deze curven zijn gebaseerd op een brede dataset. Verscheidene bio-energie systemen – echter, niet altijd individuele technologieën – zijn nog niet volwassen en de toekomstige technologische ontwikkeling is moeilijk in te schatten. Het is daarom complex om toekomstige kosten ontwikkeling te beoordelen en het is aanbevolen een onderscheid te maken tussen leercurves van bio-energie conversie, van biomassa feedstock kosten, en van de finale energiedragers.

Desondanks is het mogelijk om leereffecten te beschrijven in bio-energie technologieën en kunnen potentiële verbeteringen beoordeeld worden. De essentie hierin is de erkenning dat investeringkosten van een conversie eenheid over het algemeen afhangen van de lokale omstandigheden en dat tevens de brandstofsoort een belangrijke invloed heeft op de investeringskosten. Daarnaast beïnvloeden schaafeffecten sterk de kosten per eenheid van capaciteit (specifieke kosten). Verder zijn effecten ten gevolge van “leren door te gebruiken” (learning-by-using) oftewel

die ontstaan gedurende het gebruik van de centrale en het systeem, belangrijk voor kostenreducties

De productiekosten van elektriciteit of biobrandstoffen worden beïnvloed door brandstof- en onderhoudskosten; deze kosten kunnen mogelijk veranderen gedurende de volledige levensduur van een centrale. Bijvoorbeeld, brandstofkosten kunnen mogelijk dalen als gevolg van een meer efficiënte leveringsketen en verbeteringen in oogst methodieken. Om technologische ontwikkeling te stimuleren in bio-energie systemen moeten O&O en beleid zich daarom op de verschillende componenten van bio-energiesystemen richten.

Ondanks dat er maar een beperkte empirische database beschikbaar is lijkt het dat feedstock productie kosten behoorlijk adequaat beschreven kunnen worden met het leercurve concept, en dat progress ratio's erg klein blijken (55-68%), hetgeen een snelle afname van productiekosten in relatie tot cumulatieve productie impliceert. Deze reducties worden aangejaagd door toenames in opbrengst. Het is echter belangrijk de opbrengstbeperkingen te beschouwen in toekomstige schattingen.

Waardes van de PR van 91-92% zijn gevonden met voldoende betrouwbaarheid voor elektriciteit uit warmte-kracht-koppeling (WKK) installaties met biobrandstoffen, en van 85-100% voor biogas productiekosten. Investeringskosten dragen maar een klein deel bij aan de kosten van de uiteindelijke energiedrager. In beide gevallen veranderen de andere kostencomponenten (brandstof- en onderhoudskosten) en jaarlijkse belastingsfactoren op een geleidelijke en gestructureerde manier, en dat maakt dat deze data meer geschikt is voor gebruik in leercurves. De leercurve

aanpak lijkt ook geschikt te zijn voor het bepalen van kostenontwikkelingen in complexe brandstof leveringsketens. Het is niettemin aanbevolen om verder onderzoek te doen of dit ook geldt voor andere (biomassa) leveringsketens.

Het modeleren van kostenreducties van biomassa technologieën in scenario's en energie modellen is moeilijk door het gebrek aan empirische data en onderzoek. Een nieuwe aanpak is gepresenteerd in het Refuel project (De Wit et al., 2010, Londo et al., 2010), waarbij de ontwikkeling van productiekosten van 2^e generatie biomassa brandstoffen is gemodelleerd gebruikmakend van een hybride aanpak van bottom-up technisch onderzoek en leercurves. Het gebruik van recente inzichten in technologische verbeteringen voor biobrandstoffen was belangrijk voor bijvoorbeeld resultaten van de Energy Technology Perspectives Report van de International Energy Agency (IEA 2008). De analyse van biobrandstoffen voorzag een snelle penetratie van 2^e generatie brandstoffen na 2010 en een bijna volledige uitfasering van graan en maïs gebaseerde ethanol productie en raapolie gebaseerde biodiesel na 2030. Dit was in tegenspraak met de World Energy Outlook studies (van 2006 en 2007) (IEA 2006, IEA 2007) waar 2^e generatie biobrandstoffen simpelweg ontbraken uit de scenario analyses en dus speelde biobrandstoffen op zijn best een marginale rol in de projecties voor 2030. Dit is een duidelijk voorbeeld van het belang van hoge kwaliteitsdata op de prestatie vooruitzichten (en dus leerpotentie en ratio's) van energietechnologieën, en in het algemeen voor zulke strategische studies.

2.6 Elektriciteitsopwekking met fossiele brandstof en CO₂ afvang en opslag

Zowel STEG centrales (centrales met gecombineerde stoom en gasturbines) als kolencentrales worden commercieel toegepast gedurende een lange periode. Beleid

met betrekking tot R&D en marktpenetratie voor STEG- en kolencentrales is over het algemeen momenteel afwezig, omdat de technologie volwassen is en verbeteringen dan ook incrementeel zijn en vooral gebaseerd op verdere R&D door de belangrijkste leveranciers. De STEG centrale is ontwikkeld door technologieoverdracht van vooral de jetmotor ontwikkeling, gasturbines en volwassen stoomturbine technologie. Het is een duidelijk voorbeeld van de manier waarop een technologie geleidelijk kan verbeteren met de tijd. Kolencentrales zijn de laatste jaren onderworpen aan striktere milieuwetgeving, waardoor kostenreducties vertraagden terwijl emissies van met name niet-broeikasgassen zijn gedaald. Toch laten ook kolencentrales een PR van 92% zien over een periode van meer dan een halve eeuw.

2.6.1 CO₂ Afvang en Opslag

Gegeven de vroege fase van de technologische ontwikkeling van CCS (CO₂ Capture and Storage) is het onmogelijk om historische leercurves te bepalen. In plaats daarvan kunnen empirisch waargenomen snelheden van verandering van analoge technologieën worden gebruikt. Het is gebleken dat de leerpotentie van CCS substantieel is en waarschijnlijk een algemene trend volgt. Algemene waarnemingen met implicaties voor beleid zijn:

- De verbetering (met betrekking tot kosten en performance) van elektriciteitscentrales met CO₂ afvang na verbranding (post-combustion) hangt vooral af van de verbeteringen van volwassen technologieën. Ook al is de verwachte potentie voor verbeteringen van deze volwassen technologieën klein, de werkelijke verbeteringen dat gehaald kan worden kunnen nog steeds significant zijn, wanneer de capaciteitsuitbreiding van fossiele elektriciteitscentrale met de huidige snelheid doorgaat.

- De verbeteringspotentie van elektriciteitscentrales op basis van kolenvergassing (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) en CO₂ afvang processen wordt veel hoger verwacht. Met een cumulatieve ervaring beperkt tot 17 units is IGCC nog steeds een nieuwe technologie die nog steeds een behoorlijke technologische ontwikkeling behoeft. Omdat de IGCC technologie geschikt is voor de combinatie van CCS en biomassa is het toekomstige potentieel in het licht van ambitieus klimaatbeleid groot, welke kan resulteren in een toenemende ervaring met de IGCC technologie. Echter, er kan alleen voordeel gehaald worden van dit potentieel wanneer de geïnstalleerde capaciteit van deze technologieën groeit.
- Ook al hangt de reductie van de elektriciteitskosten van CCS elektriciteitscentrales vooral af van de ontwikkeling van de referentiecentrales (de centrale zonder CO₂ afvang), de kosten van de verlaging van de CO₂ uitstoot kunnen alleen gereduceerd worden als er elektriciteitscentrales met CCS gebouwd worden.
- Om de realisatie van progressieve leercurves voor CCS opties te stimuleren moet klimaatbeleid uitgebreid worden met technologiebeleid, dit zal diffusie van milieutechnologie versterken.

2.7 Kernenergie

De investeringskosten van kernenergiecentrales zijn in de jaren 1970 en 1980 toegenomen door hogere veiligheidseisen. Vanaf 1990 zijn verschillende evolutionaire licht-water reactoren (LWR) met geavanceerde veiligheidskenmerken en betrouwbare operationele karakteristieken commercieel beschikbaar. Op dit

moment is een klein aantal geavanceerde LWR ontwerpen commercieel beschikbaar, en zijn gebouwd of in aanbouw. Het is twijfelachtig of leercurves gebruikt kunnen worden om toekomstige kostenreducties te schatten. Aan de ene kant kan beargumenteerd worden dat een voldoende hoog veiligheidsniveau is bereikt, zodat verwacht kan worden dat kostenreducties weer zullen ontstaan. Aan de andere kant ontbreekt de nodige ervaring met de nieuwe (vierde) generatie LWR, en daarom is het lastig op dit gebied toekomstige kostenreducties te schatten op basis van ervaring in het verleden.

Het lijkt dat 'Generatie III' LWRs uitontwikkeld zijn, en dat alleen kostenreducties gerealiseerd kunnen worden door schaalvoordelen (het bouwen van meerdere identieke centrales), wat kan resulteren in een niet zo gunstige progress ratio. Aan de andere kant, de ontwikkeling van 'Generatie IV' reactors is gericht op verbeterde veiligheid en fysieke bescherming, duurzaam materiaal gebruik, en lagere kosten. Vanwege het geavanceerde karakter van deze technologieën is het twijfelachtig of hun progress ratio vergelijkbaar zal zijn met die van de 'Generatie III' reactoren.

Waarschijnlijk zullen kostenreducties alleen plaatsvinden wanneer grote aantallen identieke centrales worden gebouwd (dus het gebruik maken van schaalvoordelen en meer bouwervaring), terwijl veiligheidseisen uniform bepaald zullen worden en ook vergelijkbaar zullen zijn voor de landen waar de centrales gebouwd zullen worden. Een mogelijk verdere kostenreductie zou een wereldwijd regelgevend raamwerk kunnen zijn met betrekking tot veiligheid of reductie van de hoeveelheid lang-actief radioactief afval.

2.8 Huishoudelijke apparatuur

Leercurve analyses van verschillende belangrijke huishoudelijke apparaten laten een trend zien naar dalende prijzen en specifieke energie consumptie. Literatuur geeft aan dat prijzen van grote huishoudelijke apparaten dalen met waarden voor de progress ratio van 67-93%. Op een zelfde manier laat de specifieke energie consumptie van grote huishoudelijke apparaten een stabiele daling zien met progress ratio's van 65-87%.

In het verleden zijn energielabels en standaarden over minimale energieprestatie een effectief instrument geweest om de energie-efficiëntie van apparaten te verbeteren. De effectiviteit van deze instrumenten in de toekomst hangt echter af van een periodieke aanpassing van steeds toenemend hogere energie-efficiënte drempels. Evaluatie cycli van 3-5 jaar zijn aanbevolen om een duidelijk signaal naar de industrie te geven met betrekking tot de verwachte doelstellingen. Het is erg waarschijnlijk dat verdere substantiële verbeteringen van energie-efficiënties behaald kunnen worden omdat fabrikanten tot nu toe aan energieprestatie eisen voldoen zonder noemenswaardige extra kosten. Een beperkend energiebeleid hoeft dus niet te leiden tot grote permanente prijstoenames van de huishoudelijke apparaten.

Verwacht wordt dat trends in technologisch leren, schaalvoordelen, en technologische innovatie de kosten van toekomstige energie-efficiëntie maatregelen zullen compenseren zoals zij ook de kosten van eerdere efficiëntie maatregelen compenseerden. Ondersteunend beleid voor veelbelovende maar initieel dure energietechnologieën kan inderdaad leiden tot innovatie en helpen om de kosten van deze technologieën te verlagen. Om dit te bereiken kan leercurve analyse een

aanvulling zijn op conventionele ex-ante technische analyse teneinde betrouwbare prijsvoorspellingen voor nieuwe en energie-efficiënte huishoudelijke apparaten te maken voor verschillende marktscenario's.

2.9 Verlichting

Voor de spaarlamp (CFL, compact fluorescence light bulb) technologie laat literatuur review een gemiddelde progress ratio van 79% zien. De bereikte prijs- en kostenreducties kunnen toegeschreven worden aan schaaleardeffecten, automatisering, en het stroomlijnen van productieprocessen, en sinds de jaren 1990 ook de verschuiving van CFL productie naar lage-lonen landen zoals Oost-Europa en China. Ondanks het kostenvoordeel over de volledige levenscyclus ten opzichte van conventionele gloeilampen hebben CFLs nog steeds een relatief klein aandeel in de totale verlichtingsmarkt. Deze situatie kan toegeschreven worden aan de product kenmerken (bijvoorbeeld grootte, kleurkwaliteit van het licht) en hogere verkoopprijzen welke nog steeds een factor 5-10 hoger zijn dan de conventionele gloeilamp. Veel landen hebben echter gedemonstreerd dat ondersteunend beleid erg effectief is in het vergroten van het marktaandeel van CFLs. CFLs zijn kosteneffectief op basis van zijn levenscyclus. Daarom kan verwacht worden dat het succesvol uitbannen van gloeilampen in de Europese en Noord-Amerikaanse verlichtingsmarkt wellicht in de nabije toekomst zal leiden tot de markt introductie van een grote bandbreedte aan CFL applicaties.

Het kan verwacht worden de zich zelf opgelegde verplichting van een groeiend aantal verschillende landen om geleidelijk gloeilampen te bannen grote mogelijkheden biedt voor verdere ontwikkeling van de LED lamp (licht emitterende

diode). In de nabije toekomst zal het grootste potentieel liggen in het uitschakelen van de meest inefficiënte gloeilampen door de 2e generatie CFLs. Halfgeleiders zoals LED's hebben nog steeds vooruitzichten op kleine technische verbeteringen voordat ze wijdverspreid zullen worden. Verder bestaan er barrières voor de marktdiffusie van de LED technologie, zoals het gebrek aan consistente kwaliteit van LED's en het gebrek aan eenvoudige voorlichting, welke nog steeds een snelle markttransformatie ten gunste van deze technologie voorkomt.

2.10 Ruimteverwarming en koeling

Leercurve analyse voor woningverwarmings- en koelingstechnieken laten een continue trend zien naar dalende prijzen en productiekosten. Dit impliceert dat nieuwe en initieel dure technologieën waarschijnlijk substantieel minder kostbaar worden wanneer een grote markt diffusie bereikt kan worden. Dit refereert naar zowel actieve technologieën, zoals airconditioning en boilers, als passieve technologieën, zoals spouwmuur isolatie, passief zonlicht gebruik, en dubbel glas. Ondersteunend beleid om markten voor innovatieve en energie-efficiënte technologieën te openen is een cruciale factor. De keuze voor het meest geschikte beleidsinstrument om deze doelstellingen te halen verschilt echter behoorlijk tussen landen.

In geval van gasgestookte condensketels in Nederland geeft interessante inzichten: ook al is deze niet kosteneffectief in de eerste jaren na marktintroductie, condenscombiketels realiseerden in 2006 emissiebesparingen tegen negatieve kosten van -116 €/t (ton) CO₂. Dit is in contrast met Zwitserland en Duitsland waar condensketels werden geïntroduceerd met reglementen en standaarden in de

context van de 'Clean Air Act' en de 'Energy Saving Ordinance', zonder noemenswaardige publieke subsidies. Ambitieuze bouwreglementen en standaarden zijn een belangrijke component voor techno-economische vooruitgang, waarbij de leercurve een belangrijke richtlijn biedt voor gerichte en effectieve beleidsmaatregelen. In het geval van spouwmuurisolatie en dubbel glas produceren bedrijven over het algemeen niet op het niveau van de best beschikbare technologie (met betrekking tot energie-efficiëntie), maar op een niveau dat voldoet aan internationale standaarden.

Prijsverlagingen kunnen een belangrijke maar niet de enige drijvende kracht zijn om markten te openen voor nieuwe technologieën. In feite investeren of kopen pioniers en het marktsegment met bijzondere (daarmee wordt bedoeld milieu) voorkeuren vaak nieuwe technologieën, ook al zijn deze kostbaarder. Hierdoor helpen zij om de eerste ontwikkelingskosten en dus leerinvesteringen af te kopen, dat is dan dus het eerste deel van leercurve voordat het concurrentieniveau is bereikt.

Overheidsbeleid zal dus een cruciale drijvende kracht blijven spelen voor de implementatie van nieuwe, energie-efficiënte, en initieel meer kostbare ruimteverwarming- en koelingtechnologieën. Technologisch leren, dat vaak is geïnduceerd door beleid, maakt substantiële prijs en kostendalingen en efficiëntie verbeteringen mogelijk voor deze technologieën, en laat daarom het potentieel zien voor het realiseren van kosteneffectieve energiebesparingen in de woning en commerciële bouwsector.

2.11 Polymeren en kunstmest

De leercurve voor energie technologieën is waarschijnlijk net zo goed toepasbaar voor de productie van polymeren en andere bulk chemicaliën. De toepassing behoeft echter lange tijdseries aan data over de specifieke energieconsumptie van industriële processen welke normaalgesproken niet openbaar beschikbaar is vanwege vertrouwelijkheids overwegingen (ammonia productie is hierop een uitzondering net als staal en cementproductie, en mogelijk nog enkele andere industriële processen).

De bestudeerde analyses laten een relatief breed spectrum aan progress ratio's zien (64-88%). Ramírez en Worrell (2006) vinden progress ratio's van 71% en 89% voor de specifieke energieconsumptie in de productie van ammonia en ureum. Voor beide productcategorieën laten de resultaten een algemene trend zien naar lagere prijzen en productiekosten. Verschillende analyses bevestigen dat er nog steeds potentie bestaat voor energie-efficiëntie verbeteringen binnen de chemische industrie. Het hangt af van de implementatiesnelheid van deze energie-efficiëntie technologieën en van de ontwikkeling van de prijzen van fossiele brandstof of de productiekosten en marktprijzen van chemicaliën in de toekomst verder dalen met het tempo als eerder in het verleden gezien. Naast innovatie in conventionele petrochemische processen bieden chemicaliën gebaseerd op biomassa extra mogelijkheden voor zowel niet-hernieuwbare energie en CO₂ emissie besparingen en potentieel ook voor kostenbesparingen. Het is daarom aanbevolen om regelmatig de potentie van chemicaliën gebaseerd op biomassa te monitoren onder een scenario van hoge olieprijsen.

3 Algemene conclusies en aanbevelingen.

Het blijkt over het algemeen dat progress ratio's voor de belangrijkste duurzame energietechnologieën net als energie-efficiëntie opties typisch in een range van 70-95% liggen. Het gegeven overzicht in dit boek laat duidelijk zien dat progressie ratio's in energie-efficiëntie opties beschreven kan worden langs vergelijkbare lijnen als energieleveringsopties, inclusief progressie in de werkelijke energie-efficiëntie. Echter, leren en kostenreductie zijn niet altijd een gegeven: de ontwikkeling van de kosten van offshore wind laat enkele aspecten zien met een interessante overeenkomst met die van de kosten van kernenergie. Toenemende vraag van de maatschappij ('gevestigde belangen' van 'veiligheid') maakt het ontwerp van projecten verschillend. Als consequentie is de traditionele leercurve voor deze technologieën niet gebaseerd op een homogene set van projecten.

Er zijn enkele complicerende factoren in het evalueren van historische prestatie ontwikkelingen net als voor toekomstige projecties. Een typisch voorbeeld zijn de prijsniveaus van grondstoffen, deze fluctueren met de tijd en vertroebelen het werkelijke leereffect. Verder, het werkelijke (geografische) potentieel van technologieën (het meest evident voor duurzame energie opties) kan een aanzet geven tot het gebruik van minder gunstige locaties (bijvoorbeeld voor gemiddelde windsnelheden en zonne-instraling), duurder **grondstoffen** (in het geval van biomassa productie) en hogere kosten van integratie in het energiesysteem. Dit zou ook zo kunnen zijn voor energie-efficiëntie maatregelen (bijvoorbeeld schaalvoordelen). Daarnaast maken de gepresenteerde analyses duidelijk dat het leercurve concept makelijker ingezet kan worden op modulair in massa geproduceerde technologieën. Typische kostenreducties worden veroorzaakt door

meer efficiënte ontwerpen en productiefaciliteiten op grote schaal (met vaak geoptimaliseerde productieprocessen). Het blijkt echter ook mogelijk de meer complexe karakteristieken van grootschalige technologieën (bijvoorbeeld fossiele brandstof opties en grote industriële processen) en de meer locatie specifieke technologieën (zoals bio-energie) te analyseren met leercurves wanneer voldoende data beschikbaar is. Zo kan een veel gedetailleerder inzicht behaald worden, hetgeen relevant is voor een gericht beleids en bedrijfsstrategie.

Verscheidene algemene observaties kunnen worden gemaakt voor technisch leren in energietechnologieën. Zo hebben grondstofprijzen een grote invloed op de ontwikkeling van de kosten van energietechnologieën. Prijsstijgingen voor grondstoffen en elektriciteit en energietechnologieën in het algemeen in 2008 hebben project en productprijzen van onshore wind, offshore wind, PV en polymeer productie aanzienlijk beïnvloedt. Dit hoeft echter niet te betekenen dat het werkelijke technologische leren vertraagd. In het algemeen gaan verbeteringen van producten en processen gewoon door, maar dit wordt vertroebeld door prijsfluctuaties van grondstoffen en energiekosten. Dit laatste geldt voornamelijk voor de productie van bulk chemicaliën en fossiele elektriciteitsopwekking, waar primaire brandstofkosten de grootste kostencomponent is. Beperkt geografisch potentieel, bijvoorbeeld voor offshore wind en biomassa, kan leiden tot duurdere grondstoffen en locaties. Dit kan de energieproductie kosten opdrijven, ook al kan technologische vooruitgang nog steeds plaatsvinden.

Het is gebleken voor verscheidene duurzame energie technologieën (PV, wind, bio-energie) dat (te) sterk ondersteunende beleidsmaatregelen de prijzen op kunnen

drijven wat op termijn tot een vertraging van prijsreducties kan leiden. In sommige gevallen kon de bestaande productiecapaciteit het tempo van de vraag niet bijhouden (bijvoorbeeld voor wind en PV), wat leidde tot zogenoemde 'paraplu' fases, waarin prijzen behoorlijk hoger dan de werkelijke productiekosten liggen. Om de kosten van zulke beleidsmaatregelen te reduceren zou zodanig beleid moeten worden ontworpen dat er een gezonde balans tussen vraag en aanbod kan worden bereikt, na een mogelijke shake-out fase in de industrie.

Nieuwe of veranderde maatschappelijke belangen kunnen op termijn ook leiden tot het opdrijven van de kosten van technologieën, dit is bijvoorbeeld gebleken voor kernenergie (veiligheid), kolencentrales (milieu eisen) en offshore wind (locatie kwesties). Nogmaals, dit betekent niet dat technologieën niet op termijn verbeteren maar dat kostenreducties teniet worden gedaan door verbeterde prestaties op andere gebieden.

Hieraan gerelateerd is de observatie dat ook voor energie-efficiëntie leercurves zijn gemaakt voor bijvoorbeeld ethanol en ammoniak productie, net als huishoudelijke apparaten. Zulke bevindingen kunnen ook de basis vormen voor meer gerichte product ontwikkeling en beleid (bijvoorbeeld progressieve efficiëntie standaarden).

Het gebrek aan goede kostendata is een probleem voor het bereiken van leercurves in zijn algemeenheid. Tot nu toe is data, die zou kunnen leiden tot een idee over de relatie tussen investeren in leren en progress ratio's, erg schaars. Om kwalitatieve inzichten in leerpotentieel te verbeteren is betere monitoring nodig. Daarom zou een juiste datacollectie en monitoring van progress ratio's van de gewenste

technologieën opgezet moeten worden. Specifieke data formaten zouden ontwikkeld kunnen worden om een regelmatige datastroom op gang te brengen. Bovendien, wanneer dit gecombineerd zou worden met het monitoren van data van investeringen in leereffecten, dan zou dit monitoren kunnen leiden tot een beter begrip van de kwalitatieve relatie tussen investeringen in leren en de progress ratio. Dit is een taak voor de industrie, de overheid evenals de wetenschap. Gegeven dat nieuwe technologieën vaak ondersteunend beleid krijgen zou men kunnen argumenteren dat beleidsmakers als wederdienst zouden kunnen eisen dat kostendata en prestaties beschikbaar gemaakt worden voor wetenschappers. Gedetailleerde monitoring en datacollectie van relevante ontwikkelingen en parameters is dus vereist. Dit zou niet alleen nationaal gedaan moeten worden, maar in het bijzonder ook vanuit een internationaal perspectief omdat de grootste leereffecten plaatsvinden in een wereldwijde markt. Dit zou een taak kunnen worden voor bijvoorbeeld statistische bureaus, het Internationaal Energie Agentschap (IEA) en andere relevante internationale organen. Ook al vereist dit extra inspanningen, administratie en analyses, zulke inspanningen zijn waarschijnlijk minimaal vergeleken bij de kostenvoordelen die behaald kunnen worden door afgestemde ondersteuning die leiden tot een versnelling van het leer proces.

Het is aanbevolen om scenario's voor prijsprojecties te gebruiken: correcte historische leercurve analyses geven onzekerheidsmarges waar binnen de progress ratio zou kunnen variëren. Ook het toekomstige groeitempo van technologie toepassing kan veranderen. Daarom zouden er verschillende scenario's gebruikt moeten worden, bestaande uit verschillende combinaties van progress ratio's en groeisnelheden, om een waardevolle set prijsprojecties te creëren. Verder wordt

aanbevolen om altijd prijsprojecties op basis van de leercurve te combineren met bottom-up studies om inzichten te krijgen van een hoge kwaliteit. De combinaties vermijden de soms overoptimistische schattingen over kostenreductie tijdschema's van bottom-up studies, en levert de informatie over hoe toekomstige kostenreducties bereikt zouden kunnen worden. Prijsprojecties gebaseerd op leercurves zouden ondersteund moeten worden door technische studies die laten zien dat er voldoende mogelijkheden zijn om middellange termijn projecties te halen. Voor lange termijn projecties wordt dit lastiger doordat het onzekerder is welke resultaten en onderzoeksrichtingen verwacht kunnen worden op langere termijn.

Zulke gecombineerde aanpakken kunnen onrealistische toekomstige projecties vermijden die aannemen dat leren altijd door zal gaan, en dat er te simplistische projecties gebruikt worden dat "leren automatisch zal plaatsvinden" (wat duidelijk niet het geval is). Wat echter vaak wordt gezien is dat leren altijd *heeft* plaatsgevonden voor de meeste energie technologieën, ofschoon op een lager tempo later in de tijd omdat het steeds meer tijd kost om nogmaals een verdubbeling van capaciteit te realiseren.

Er zijn duidelijke aanwijzingen dat voor succesvolle innovatie en snelle vooruitgang en marktintroductie een thuismarkt, productiecapaciteit en sterke O&O capaciteit cruciaal zijn. Op hetzelfde moment lijkt voor veel energietechnologieën internationale samenwerking en afstemming van beleid duidelijk winst op te leveren omdat het leersysteem wereldwijd is voor de meeste onderdelen (behalve voor specifieke regionale condities die specifieke ontwerpen of prestaties vereisen, zoals specifieke milieustandaarden, klimaat condities, etc.). Ondanks dat is beleid vaak ontworpen op

nationaal niveau. Gegeven de bevindingen die gerapporteerd zijn in dit boek zou er naar meer harmonisering gestreefd moeten worden tussen verschillend (nationale) overheidsbeleid, wat een mogelijkheid moet zijn voor de Europese Unie (EU), IEA en mogelijk andere internationale instituten.

4 Ten slotte

Kan technologisch leren gestuurd en versneld worden, en wat zijn de optimale condities en settings om technologische vooruitgang en snelle marktpenetratie te boeken? Het is duidelijk dat een gedetailleerd begrip van specifieke technologieën, hun prestaties en beslissingsfactoren essentieel is om te komen tot een juist en effectief beleid en strategie. Sleutel succesfactoren die gedestilleerd kunnen worden uit de empirische informatie verzameld in dit boek zijn:

- Stabiel en consistent beleid met een lange tijdshorizon dat stabiliteit creëert en risico's in de markt en bedrijfsinvesteringen in innovatie verlaagt. Dit aspect is vaak onderschat in het ontwerp van beleid en stimuleringsmaatregelen die vaak de korte termijn cycli volgen van overheidsbeleid.
- Beleid dat technologische vooruitgang stimuleert (bijvoorbeeld door langzame maar gestage verlaging van financiële ondersteuning met de tijd, en het gericht laten toenemen van prestaties, bijvoorbeeld progressieve standaarden), zijn zowel sterk stimulerend als kunnen leiden tot verlagen van publieke financiële ondersteuning omdat de leercurve gevolgd wordt. Zulk meer gericht en flexibel beleid kan ook als doel hebben om de zogenoemde 'paraplu fases' te vermijden, waarbij prijzen van

technologieën substantieel hoger zijn dan productiekosten. Het ontwerpen van dit soort beleid vereist nog steeds veel zorg (omdat factoren zoals grondstofprijzen nog steeds kosten kunnen opdrijven ondanks leereffecten). Toch zou dit soort beleid historische leercurves kunnen gebruiken als benchmark om progressief het ondersteunende beleid af te bouwen (bijvoorbeeld een feed-in tariff) of het verscherpen van beleidsmaatregelen (bijvoorbeeld energielabels of bouwstandaarden).

- Bepaalde technologieën (bijvoorbeeld CCS, geavanceerde bio-energie opties) staan voor hoge initiële investeringskosten en grote uit te voeren projecten in de eerste fases van marktimplementatie. Dit vraagt om vroege actie om de benodigde kosten en prestatie verbeteringen op de lange termijn te bereiken, inclusief het creëren van niche markten, de ontwikkeling van kleine demonstratie centrales en gericht O&O.
- Impulsen zouden geïmplementeerd moeten worden op het juiste moment waarbij gericht moet worden op de fase van de specifieke technologie. Het is duidelijk dat dure en toch oncompetitieve technologieën meer intensieve O&O inspanningen nodig hebben voordat markt introductie ondersteund wordt, terwijl marktpenetratie en het verwijderen van barrières cruciaal kan blijken in een latere fase. Zulke beleidspaden of roadmaps zijn technologie specifiek en kunnen ontwikkeld worden in samenspraak met een gedetailleerd begrip van het ontwikkelingspad van technologieën en systemen. Zulke roadmaps kunnen met de tijd ook mogelijke verschuivingen van technologieën inhouden (bijvoorbeeld nieuwe generaties van zonnecellen of biobrandstoffen). Verder, harmonisering van (nationaal) beleid en een internationale aanpak naar technologie

ontwikkeling en implementatie is waarschijnlijk nodig om grote efficiëntie toenames te realiseren, zowel in investeringen als tijd.

Het boek startte met het statement dat “technologische ontwikkelingen van energietechnologieën cruciaal is om de groeiende energievraag te beperken, broeikasemissies te reduceren en andere milieudoelstellingen te realiseren tegen redelijke kosten”. Daaraan voegen we toe dat de snelheid van technologische ontwikkeling essentieel is om op tijd te voldoen aan de nodige reducties, de bijdragen aan efficiëntie verbeteringen en de totale energieleverantie. Nieuwe technologieën worden verder gezien als een grote mogelijkheid voor ontwikkeling, (duurzame) industriële activiteit en (hoog gekwalificeerde) arbeid. Een verbeterd begrip van technologisch leren is daarom extreem belangrijk om te komen tot geschikt en effectief beleid en strategieën, wat nu niet vaak het geval is.

Dit boek heeft een state-of-the-art overzicht gegeven van de huidig beschikbare inzichten in technologisch leren tijdens de ontwikkeling en implementatie van veel belangrijke energietechnologieën. Het algemene beeld en aanbevelingen die gepresenteerd zijn voor de wetenschap, industrie en beleid zijn complex en nog imperfect. Wetenschap vindt nog grote uitdagingen op haar pad, gecombineerd met het beter monitoren van technologische ontwikkelingspaden. Dit vraagt om meer geavanceerd onderzoek en dataverzameling welke belangrijk is voor de komende jaren. Maar er zijn ook solide inzichten: het is duidelijk dat (bijna) alle energietechnologieën die behandeld zijn in dit boek leercurves volgen, en een sterke reductie in prijzen laten zien, in veel gevallen over verscheidene decennia. De gecombineerde inzichten bevatten ook een belangrijke belofte: ons begrip van technologisch leren is gedeeltelijk op een zodanig niveau dat een meer gericht beleid

en strategie voor industrie ontworpen kan worden wat leidt tot efficiëntere overheidsuitgaven. De aanbevelingen die gemaakt zijn in dit boek dienen als een fundamenteel startpunt voor lange termijn strategieën, implementatie van impulsen en internationale samenwerking. Het vermogen van de mens om te leren is altijd al indrukwekkend geweest. Nu rekenen we op dat vermogen, niet in de laatste plaats om een volledig duurzame energievoorziening te ontwikkelen, op zichzelf een formidabele uitdaging. Het boek heeft een overzicht gegeven over hoe het leerproces eruit kan zien om dit doel te bereiken.

Referenties

- De Wit, M., M. Junginger, S. Lensink, M. Londo and A.P.C. Faaij (2010), 'Competition between biofuels: Modeling technological learning and cost reductions over time', Copyright Elsevier, *Biomass and Bioenergy*, 34, 203–217.
- IEA (2006), *World Energy Outlook 2006*, Paris: International Energy Agency.
- IEA (2007), *World Energy Outlook 2007*, Paris: International Energy Agency.
- IEA (2008), *Energy Technology Perspectives 2008 – Scenarios and Strategies to 2050*, Paris: International Energy Agency, available at: <http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id5330>.
- Junginger, H.M. (2005), 'Learning in renewable energy technology development', PhD thesis, Utrecht University, the Netherlands.
- Londo, M., S. Lensink, A. Wakker, G. Fischer, S. Prieler, H. van Velthuisen, M. de Wit, A. Faaij, M. Junginger, G. Berndes, J. Hansson, A. Egeskog, H. Duer, J. Lundbaek, G. Wisniewski, A. Kupczyk and K. Könighofer, (2010), 'The REFUEL EU road map for biofuels in transport: Application of the project's tools to some short- term policy issues', *Biomass and Bioenergy*, 34(2), 244–250.
- Nemet, G.F. (2007), 'Policy and innovation in low- carbon energy technologies', PhD Dissertation, University of California, Berkeley, CA.
- Ramírez, C.A. and E. Worrell (2006), 'Feeding fossil fuels to the soil: An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry', Copyright Elsevier, *Resources, Conservation and Recycling*, 46(1), 75–93.