

RIVM-rapport 550006002/2005

Survival of the Greenest

Evolutionaire economie als inspiratie voor energie- en transitiebeleid

J.C.J.M. van den Bergh^{1,3}, A. Faber², A.M. Idenburg², F.H. Oosterhuis³

1. Faculteit der Economische Wetenschappen en Bedrijfskunde, Vrije Universiteit, Amsterdam
2. Milieu- en Natuur Planbureau (MNP), RIVM, Bilthoven
3. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit, Amsterdam

Contact:

Annemarth Idenburg
Nationale Milieubeleidsvaluatie en Duurzaamheid (NMD)
Milieu- en Natuur Planbureau (MNP) - RIVM
Postbus 1, 3720 BA Bilthoven
T 030 - 274 2626
E annemarth.idenburg@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van de directie RIVM, in het kader van project S/550006/01/EE.

RIVM, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven, telefoon: 030 - 274 91 11; fax: 030 - 274 29 71. info@rivm.nl
IVM, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1087, 1081 HV Amsterdam Tel. 020 - 4449 555. info@ivm.falw.vu.nl

Abstract

Survival of the Greenest,

Evolutionary economics as an inspiration for energy and transition policies

Evolutionary economics offers clear insights into the mechanisms that underlie innovations, structural changes and transitions. It is therefore of great value for the framing of policies aimed at fostering environmental innovations and a transition to a sustainable development. This report offers an overview of the main literature on evolutionary economics and derives some core concepts from this theory, namely 'diversity', 'innovation', 'selection environment', 'bounded rationality', 'path dependence and lock-in', and 'coevolution'. These concepts are subsequently used to assess and understand processes of change in economic structure, technological development and institutions, as well as to formulate guidelines for the role of the government and the design of public policies, such as the learning from historical technological pathways and the creation of an extended level playing field. Next, current Dutch policies relating to energy technologies – and related policy documents – are evaluated against the background of the identified concepts and derived policy suggestions. In addition, the developments of certain energy technologies are examined in detail within the adopted evolutionary economics framework. Three particular technologies received attention, namely fuel cells, nuclear fusion, and photovoltaic cells. The evolutionary-economic analysis results in a number of very concrete policy recommendations, which partly conflict with current policy advice as well as current policy developments. The case study further illustrates that evolutionary-economic mechanisms have played an important role in the emergence of energy-innovations in the past.

Keywords: energy; environmental policy; evolutionary economics; innovation policy; sustainable development; transition management

Rapport in het kort

Survival of the Greenest,

Evolutionaire Economie als inspiratie voor energie- en transitiebeleid

De evolutionaire economie toont inzicht in de mechanismen achter innovaties, transities en veranderingen in institutionele structuur. Deze theorie kan daarom bijzonder waardevol zijn in de vormgeving van het huidige milieubeleid, dat transities naar een duurzame ontwikkeling als doelstelling hanteert. Dit rapport geeft eerst een overzicht van de belangrijkste literatuur op het vakgebied van de evolutionaire economie, waaruit een aantal centrale concepten van de evolutionaire economie wordt gedestilleerd: diversiteit, innovatie, selectieomgeving, beperkte rationaliteit, padafhankelijkheid, insluiting en co-evolutie. Deze concepten worden gebruikt ten behoeve van een beter begrip van en inzicht in processen van verandering in economische structuur, technologische ontwikkeling en institutionele verandering. Aan de hand hiervan tonen we een aantal inzichten, dat van belang kan zijn voor beleidsmakers, zoals het bewustzijn van historische technologische paden en het creëren van een gelijk speelveld. Vervolgens evalueren we het Nederlandse beleid ten aanzien van energie-innovaties aan de hand van de evolutionair-economische concepten. Hiervoor is gebruik gemaakt van de beschikbare documenten op het gebied van innovatiebeleid, energiebeleid en transitiebeleid. Tenslotte is het evolutionair-economische raamwerk gebruikt om de ontwikkeling van een aantal specifieke technologieën te onderzoeken. Dit betreft brandstofcellen, kernfusie en fotovoltaïsche energie (PV). Uit de evolutionair-economische analyse komen een aantal zeer concrete aanbevelingen voor beleid, die deels strijdig zijn met huidige beleidsadviezen en trends in beleid. De case studie toont tevens aan dat evolutionair-economische mechanismen een belangrijke rol hebben gespeeld in de totstandkoming van energie-innovaties in het verleden.

Trefwoorden: duurzame ontwikkeling, energiebeleid, evolutionaire economie, innovatiebeleid, milieubeleid, transitie management

Voorwoord

Dit rapport is het resultaat van een samenwerking tussen het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) van het RIVM, de Faculteit der Economische Wetenschappen en Bedrijfskunde van de Vrije Universiteit te Amsterdam en het Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM) van diezelfde universiteit. Dit heeft geleid tot een diepgaand zoekproces naar de betekenis van de evolutionaire economie voor het doorgronden van innovaties en transities in de context van energie en duurzame ontwikkeling. Tevens worden praktische suggesties afgeleid voor wat betreft de rol(len) van de overheid en de specifieke invulling van publiek beleid gericht op een duurzame ontwikkeling. In het bijzonder wordt hier aandacht geschonken aan een duurzame energievoorziening. In dit kader wordt onder meer het huidige beleid kritisch doorgelicht tegen de achtergrond van de lessen die volgen uit de toepassing van de evolutionaire economie. Voorts worden drie specifieke technologieën, te weten brandstofcellen, kernfusie en fotovoltaïsche energie, in detail bestudeerd binnen het ontwikkelde evolutionair-economische raamwerk.

Wij zijn de reviewers René Kemp (MERIT, Maastricht), Frank Dietz (Ministerie van VROM), Marjan Hofkes (IVM) en Marlouke Durville (Ministerie van Economische Zaken) bijzonder erkentelijk voor hun waardevolle commentaren op eerdere concept-versies van de tekst. Binnen het MNP hebben de commentaren van en de gesprekken met Rob Maas, Fred Langeweg, Leon Janssen, Jan Ros, Harry Wilting, Eric Drissen en Jacco Farla bijgedragen tot een aanscherping en verbetering van de tekst. Ook aan hen is onze dank verschuldigd.

We hopen dat dit rapport een stimulans oplevert voor toekomstig onderzoek naar, en de beleidsmatige toepassing van, de evolutionaire economie op thema's als milieubeleid, duurzame ontwikkeling en transitie management.

Jeroen van den Bergh
Albert Faber
Annemarth Idenburg
Frans Oosterhuis

januari 2005

Inhoud

Samenvatting	9
1 Inleiding	15
2 Evolutionaire economie	17
2.1 Evolutionair denken	17
2.2 Een kort overzicht van ideeën en concepten binnen de evolutionaire economie	19
2.2.1 Oorsprong	19
2.2.2 Winstmaximalisering door marktselectie?	20
2.2.3 Routines en zoekgedrag: Nelson en Winter	22
2.2.4 Huidige scholen (1): Neo-Schumpeteriaanse theorieën	24
2.2.5 Huidige scholen (2): Evolutionaire speltheorie	25
2.2.6 Connecties, hyperstructuren en discrete wiskunde: Potts	26
2.3 Evolutionaire groeitheorie	27
2.3.1 Algemene kenmerken en modellen	27
2.3.2 Evolutionaire versus endogene groeitheorie	29
2.4 Centrale concepten binnen de evolutionaire economie	30
2.4.1 Inleiding	30
2.4.2 Diversiteit	32
2.4.3 Innovatie	33
2.4.4 Selectieomgeving	35
2.4.5 Begrensde rationaliteit	37
2.4.6 Padafhankelijkheid en ‘lock-in’ (insluiting)	38
2.4.7 Co-evolutie van deelsystemen	39
2.5 Integratie van de evolutionaire concepten	42
3 Evolutionair milieu- en transitiebeleid	45
3.1 Inleiding	45
3.2 Evolutionair-economische analyse van milieubeleid en beheer van natuurlijke hulpbronnen	48
3.3 Uitgangspunt: diversiteit en gelijk speelveld	51
3.4 Case studie: Energievoorziening als complex en evoluerend systeem	54
3.5 De rol van de overheid	56
3.6 Begrensde rationaliteit	58
3.6.1 Begrensde rationaliteit en milieubeleid	58
3.6.2 De korte termijn als barrière	59
3.7 Diversiteit en schaal gecombineerd: van lokaal tot internationaal	62
3.8 Conclusie	63

4	Evolutionair beleid voor energie-innovaties	69
4.1	Inleiding	69
4.2	Beleidsdocumenten en adviezen	69
4.3	Energiebeleid	72
4.3.1	Historisch overzicht van het Nederlandse energiebeleid	72
4.3.2	Uitgangspunten recent beleid	73
4.3.3	Vormgeving energiebeleid ter stimulering energie-innovaties	73
4.4	Innovatiebeleid	77
4.4.1	Historisch overzicht van het Nederlandse innovatiebeleid	77
4.4.2	Uitgangspunten van recent beleid	78
4.4.3	Vormgeving en instrumentarium van innovatiebeleid	81
4.5	Evolutionair-economische analyse van het energie- en innovatiebeleid	84
4.5.1	Diversiteit	84
4.5.2	Innovativiteit	86
4.5.3	Selectieomgeving	89
4.5.4	Begrensde rationaliteit	92
4.5.5	Padafhankelijkheid en lock-in	93
4.5.6	Co-evolutie	96
4.6	Conclusie	96
5	Casestudies	99
5.1	Inleiding	99
5.2	Brandstofcellen	100
5.2.1	Geschiedenis en stand van zaken	100
5.2.2	Toekomstbeelden	107
5.2.3	Drijvende krachten en barrières	109
5.2.4	Conclusies	112
5.3	Kernfusie	113
5.3.1	Geschiedenis en stand van zaken	113
5.3.2	Toekomstbeelden	116
5.3.3	Drijvende krachten en barrières	117
5.3.4	Conclusies	119
5.4	Fotovoltaïsche energie (PV)	120
5.4.1	Geschiedenis en stand van zaken	120
5.4.2	Toekomstbeelden	127
5.4.3	Drijvende krachten en barrières	130
5.4.4	Conclusies	133
5.5	Implicaties van de casestudie-bevindingen	133
6	Conclusies	137
	Literatuur	141
	Lijst van kernbegrippen	151

Samenvatting

Milieubeleid dat is gericht op innovaties en transitieën kan veel leren van de inzichten van de moderne evolutionaire economie. Dit rapport beoogt hiertoe een bijdrage te leveren. Het resultaat is een theoretisch raamwerk met zes centrale concepten: diversiteit, innovatie, selectieomgeving, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie. Het raamwerk volgt uit een algemene analyse op basis van de literatuur. Vervolgens is met dit raamwerk het huidige beleid gericht op de stimulering van energie-innovaties doorgelicht. Ten behoeve hiervan is gebruik gemaakt van de belangrijkste beleidsnota's over energie-innovaties. Tot slot is op basis van het raamwerk een gedetailleerde analyse uitgevoerd van de ontwikkeling van drie technologieën, namelijk brandstofcellen, kernfusie en zonnecellen.

Evolutionaire economie

De evolutionaire economie wordt in steeds bredere kring opgevat als een benadering die zich goed leent om structurele veranderingsprocessen ten aanzien van technologie, organisaties, economische structuur en instituties te doorgronden. Het in de traditionele economische theorie veronderstelde rationele, optimaliserende gedrag van individuen en groepen wordt in de evolutionaire benadering vervangen door de meer realistische benadering van begrensde rationaliteit van alle actoren. Deze begrensde rationaliteit neemt de vorm aan van routines, gewoonten, imitatie van anderen en het hanteren van een beperkte tijdshorizon.

Begrensde rationaliteit gaat gepaard met heterogeniteit in gedrag van actoren, hetgeen zich uit in een grote diversiteit aan gedragsstrategieën. De diversiteit van het systeem wordt beïnvloed door innovatie- en selectieprocessen. Innovatieprocessen doen de diversiteit toenemen, terwijl selectieprocessen deze juist verminderen. Selectie omvat velerlei factoren, gerelateerd aan fysische, technologische, geografische, bedrijfsinterne, markt-, en institutionele dimensies. Tezamen bepalen zij de 'fitheid' van een bepaald technisch, organisatorisch of institutioneel alternatief. Ten aanzien van innovatie speelt serendipiteit een grote rol, hetgeen aanduidt dat een combinatie van toeval en kennis tot nieuwe inzichten leidt. Kennis is essentieel omdat creatieve innovaties vrijwel altijd het resultaat zijn van het combineren van bestaande kennis, technieken of concepten.

De dynamiek van evolutionaire systemen resulteert in padafhankelijkheid en co-evolutie. Padafhankelijkheid betekent dat door toenemende schaalvoordelen aan de aanbod- en vraagzijde een zelfversterkend terugkoppelingsmechanisme in werking wordt gezet, waardoor een bepaalde – mogelijk ongewenste – technologie en een economische structuur gaan domineren. Het gevolg is een historisch, onomkeerbaar pad dat uitermate gevoelig is voor initiële, toevallige gebeurtenissen. De toenemende schaalvoordelen ontstaan als gevolg van onder meer leereffecten, netwerkvoordelen, en imitatiegedrag. Een padafhankelijk proces eindigt vaak in een situatie van insluiting ('lock-in'), waarbij één bepaalde technologie overblijft. De zelfversterkende schaalvoordelen van deze technologie maken het vaak lastig om uit deze situatie te ontsnappen.

Co-evolutie is een begrip dat wijst op de wederzijdse beïnvloeding van evolutionaire processen binnen en tussen twee of meer systemen. Het is daarmee een bruikbaar concept

voor het nadenken over complexe processen waarbij deelsystemen een rol spelen. Co-evolutie kan worden beschouwd als een uitwerking van het evolutionaire idee dat innovaties meestal volgen uit combinaties van bestaande zaken of deelsystemen. Co-evolutie is daarbij gericht op de wijze waarop deelsystemen over de tijd heen complementair en interactief veranderen en beter op elkaar raken afgestemd.

De evolutionaire economie kreeg een vroege impuls toen rond 1900 de econoom Veblen zich afvroeg “Why is economics not an evolutionary science?” Enige decennia later zou de invloedrijke econoom Joseph Schumpeter een vruchtbare basis leggen voor de ontwikkeling van het vakgebied, onder meer door de introductie van de concepten ‘entrepreneur’ en ‘creatieve destructie’. De ontwikkeling van de evolutionaire economie als vakgebied kwam echter pas in de jaren zeventig van de vorige eeuw werkelijk op gang. Dit was met name te danken aan het werk van Nelson en Winter, die zich schatplichtig verklaarden aan Schumpeter. Inmiddels hebben zich allerlei takken van evolutionaire economie ontwikkeld, met als dominante ‘scholen’ de evolutionaire speltheorie en de neo-Schumpeteriaanse technologie-analyse. Recentelijk is tevens de evolutionaire multi-agent modellering in opkomst.

Implicaties voor milieubeleid gericht op een duurzame ontwikkeling

De evolutionaire theorie en de daarbij horende concepten kunnen bruikbaar zijn voor de ontwikkeling van nieuwe inzichten over de vormgeving van het milieubeleid. Dit is met name relevant tegen de achtergrond van het streven naar een duurzame ontwikkeling en transitie management.

Padafhankelijkheid biedt hiertoe een belangrijk startpunt, vanwege de idee dat vroege en deels toevallige ontwikkelingsfasen een onomkeerbare invloed uitoefenen op latere ontwikkelingen van een systeem (‘historical accidents’). Zorgvuldigheid in de beginfase van een innovatie- of transitiebeleid is dan ook van groot belang. Zorg voor diversiteit en een gelijk speelveld (‘level playing field’) vormen vanuit evolutionair perspectief belangrijke uitgangspunten voor beleid. Diversiteit sluit goed aan bij de brede visie op duurzame ontwikkeling, waarbinnen veel aandacht bestaat voor biodiversiteit en veerkracht. De overheid kan vanuit deze gedachte via haar innovatie- en transitiebeleid aansturen op een toename in de diversiteit van technologieën en bedrijfsstrategieën.

Een gelijk speelveld is een toestand waarbij partijen en technologieën vanuit gelijke uitgangspunten met elkaar concurreren. Het evolutionair economisch perspectief suggereert dat dit breder wordt opgevat dan alleen de aanwezigheid van een vrije markt. Een aantal andere kenmerken is eveneens van belang. Allereerst dienen prijzen alle relevante sociale – private en externe – kosten te reflecteren. Voorts moet het beleid zich er rekenschap van geven dat technologieën die aantrekkelijk zijn vanuit duurzaamheidsoogpunt, maar laag op de leercurve staan, een ongunstige concurrentiepositie hebben ten opzichte van technologieën die al verder op de leercurve staan. Vrije marktconcurrentie is dan niet altijd gunstig vanuit het oogpunt van duurzaamheid en transitie management. Het is tevens van belang om een ongewenste, vroegtijdige lock-in van bepaalde technologieën te vermijden. Dit vereist dat aan het begin van een transitietraject de toenemende schaalvoordelen die het voordeel geven aan één boven een andere technologie voortdurend worden gecorrigeerd. Tot slot dienen verschillen in selectieomgeving te worden weggenomen zodat verschillende alternatieven aan een vergelijkbare selectieomgeving worden blootgesteld en aldus eerlijk concurreren. Het

gevolg van het resulterende gelijke speelveld in brede (evolutionaire) zin is dat op lange termijn een grotere diversiteit aan technieken een rol zal spelen, waardoor de kans op insluiting van één ongewenste technologie sterk wordt verkleind.

De notie van insluiting speelt ook nog op een subtieler niveau. Een grote inzet van beleid op energiebesparing, schoon fossiel (CO₂-afvang en -opslag) en warmtekrachtkoppeling zou kunnen leiden tot een versterking van de insluiting (lock-in) van fossiele brandstoffen, waardoor een transitie naar duurzame energiebronnen kan worden vertraagd. Tegen deze achtergrond zou extra energiebesparing moeten samengaan met een extra stimulering van hernieuwbare energie, om te voorkomen dat de lock-in van fossiele energiebronnen steeds moeilijker ongedaan gemaakt kan worden. Eventueel dienen ook bepaalde randvoorwaarden te worden opgelegd aan de stimulering van energiebesparing.

Belangrijke (radicale) innovaties zijn vaak creatieve combinaties, die gebaat zijn bij een grote mate van diversiteit of variatie in technologieën en strategieën. Verspilling moet vanuit deze gedachte dus worden gekoesterd: zonder verspilling zullen belangrijke innovaties niet tot ontwikkeling kunnen komen. In het verlengde hiervan bieden ongebruikelijke combinaties van kennis, concepten en technologieën perspectief voor kansrijke innovaties. De overheid kan hierbij een rol spelen door bijvoorbeeld een stimulerende rol te spelen in het bouwen van netwerken en het samenbrengen van experts uit natuur- en sociaal-wetenschappelijke domeinen, gericht op kruisbestuiving en samenwerking. Vanuit een co-evolutionair perspectief is het bovendien zinvol om de dynamiek van mogelijk creatieve combinaties aan stimulerend en gecoördineerd beleid te onderwerpen.

Diversiteit is een meerdimensionaal begrip dat gekarakteriseerd wordt door variatie, ongelijkheid en ongelijksoortigheid. Variatie duidt het aantal verschillende alternatieven (technieken, processen, producten, organisaties, instituties of strategieën) in een populatie van elementen aan. Ongelijkheid heeft betrekking op de mate waarin één of enkele elementen qua omvang of voorkomen al dan niet domineren in een populatie. Ongelijksoortigheid geeft de mate van verschil tussen elementen in een populatie aan. Alle drie dimensies van diversiteit hebben een invloed op de uitkomsten van innovatie en selectie.

Ook een zekere mate van isolatie van experimenten en innovatie-initiatieven kan unieke paden opleveren, omdat deze dan buiten de invloed van de dominante technologie en denkwijzen kunnen blijven. Nichemarkten zijn hiervan een praktische uitwerking. Voorts kan het ondersteunen van diversiteit aan initiatieven op lokale schaal (gemeenten en provincies) bijdragen aan het stimuleren van (ruimtelijk) min of meer geïsoleerde proeftuinen en broedplaatsen.

De overheid zou zich vanuit evolutionair economisch perspectief dus niet moeten richten op het kiezen van winnaars ('picking the winners'), maar op het creëren van een geschikte innovatie- en selectieomgeving waarbinnen bepaalde opties beter presteren dan andere. Sommige dimensies van de selectieomgeving zijn nauwelijks door de overheid te beïnvloeden (fysische en geografische dimensies), maar andere kunnen wel gevoelig zijn voor beleid. Voor elk specifiek innovatiedoel dient deze selectieomgeving zorgvuldig in kaart te worden gebracht, inclusief de dynamiek ervan in de tijd.

Het is van belang om te beseffen dat uit de evolutionaire economie geen 'optimaal beleid' voortvloeit. In dit opzicht wijkt de evolutionaire economie dus sterk af van de traditionele, neoklassieke economische theorie. De traditionele visie veronderstelt namelijk dat bedrijven

en consumenten optimaliserend gedrag vertonen, een stelling die de evolutionair-economische benadering niet deelt. In de evolutionair-economische visie betekent dit ondermeer dat prijsinstrumenten niet altijd voldoende zullen zijn om (milieu)beleidsdoelstellingen te realiseren. Deze instrumenten beïnvloeden weliswaar de keuzes van actoren, maar deze worden gekenmerkt door begrensde rationaliteit – in de vorm van routines, gewoonten, imitatie of kortzichtigheid. Als gevolg hiervan worden de effectiviteit en doelmatigheid van prijsinstrumenten door de traditionele economische theorie van milieubeleid overschat. Deze imperfecties worden nog eens versterkt door het lock-in effect, waardoor het beprijzen van externe (milieu)kosten onvoldoende zal zijn om een transitie naar een duurzame ontwikkeling mogelijk te maken.

Binnen een evolutionair-economisch beleidsperspectief is het cruciaal om een goede balans te vinden tussen doelmatigheid en diversiteit. Dit kan worden vertaald naar de afweging tussen de kosten van diversificatie op korte termijn en de baten van diversificatie op de lange termijn. Wegens onzekerheden over de toekomst kan deze afweging niet volledig objectief – bijvoorbeeld via een kosten-batenanalyse – worden gemaakt, maar krijgt zij de vorm van een kwalitatieve beoordeling op basis van de opinie en intuïtie van een breed scala aan experts, leken en betrokkenen. Op een grootschaliger en internationaal niveau is de afweging of balans tussen diversiteit en schaalomvang minder lastig, omdat de schaalvoordelen daar aanzienlijk kunnen zijn, terwijl er toch een grote mate van variatie aan technologieën of instituties kan blijven bestaan. Voor de beleidsvorming betekent dit een uitdaging, namelijk om door samenwerking tussen landen een afstemming tot stand te brengen van de investeringen in duurzame innovatietrajecten, waarbij schaal en diversiteit als belangrijke criteria gelden.

Hoewel evolutionaire economie in principe het economisch systeem als een autonoom en doelloos proces ziet, blijkt uit het voorgaande dat door middel van aangepast milieu- en transitiebeleid ook normatieve elementen (bijvoorbeeld gericht op duurzaamheid) aan dit systeem kunnen worden toegevoegd. In concreto gebeurt dit via directe beïnvloeding van de innovatie- en selectieomgeving door beleidsmaatregelen. Aldus resulteert een deels gestuurd evolutionair proces waarmee een transitie naar een duurzame ontwikkeling kansrijker wordt.

Een evaluatie van het huidige Nederlandse innovatiebeleid ten aanzien van milieu en energie

De centrale concepten van de evolutionaire economie (diversiteit, innovatie, selectieomgeving, begrensde rationaliteit, afhankelijkheid en co-evolutie) kunnen worden gebruikt voor een evaluatie van het beleid rond energie-innovaties. Verschillende beleidsvelden spelen hierbij een rol: milieubeleid, transitiebeleid, energiebeleid en innovatiebeleid. Een belangrijke ontwikkeling is dat eind jaren negentig het lineaire concept van technologie-ontwikkeling heeft plaatsgemaakt voor een systeemaanpak. In de systeemaanpak staan netwerken van bedrijven en kennisinstellingen centraal en zijn de ontwikkeling, overdracht en het gebruik van kennis onderdeel van beleid. In de toepassing van beleidsinstrumenten ligt de nadruk echter nog sterk op het ‘oude’ financiële instrumentarium, terwijl er nog veel kansen blijven liggen voor het gebruik van *systeeminstrumenten*, zoals innovatienetwerken en integrale innovatieprogramma's. Er is wel een toenemende tendens zichtbaar naar de ontwikkeling van deze systeeminstrumenten, met name vanuit het transitiebeleid.

Veel van de centrale concepten van de evolutionaire economie zijn terug te vinden in het huidige beleid gericht op energie-innovaties, maar de uitwerking in concreet beleid is vaak beperkt. Zo wordt het belang van openhouden van diversiteit door het beleid wel onderkend, maar dit wordt voornamelijk toegepast op technieken en minder op bedrijven, producten of strategieën. Bij de praktische invulling van het beleid gaat de discussie over het dilemma tussen het creëren van voldoende massa (onder andere ter voorkoming van een ondoelmatige versnippering van het budget) en het behoud van diversiteit. Het concept innovatie komt uiteraard veelvuldig naar voren, maar wordt vanuit het perspectief van de evolutionaire economie nogal eenzijdig benaderd. De aandacht voor samenwerking en toekomstbeelden scoort hoog, maar de uitwerking van scholing en durfkapitaal in de beschouwde nota's is nogal bescheiden. Aandacht voor aspecten als kruisbestuiving, serendipiteit, isolatie en nichemarkten, in de evolutionair-economische theorie bijzonder belangrijk voor innovaties en innovatieklimaat, ontbreekt grotendeels in het beleid. In sommige gevallen lijkt het beleid zelfs negatief op deze aspecten uit te werken.

Ook het concept selectieomgeving scoort slecht in het huidige beleid. Het algemeen leidende principe in het innovatiebeleid is dat 'de markt moet kiezen'. Hierdoor lijkt de invloed die de overheid zichzelf toekent in het bevorderen van de selectieomgeving per definitie negatief te worden beoordeeld. Immers, 'de overheid verstoort de marktwerking'. De beleidsstukken tonen veel aandacht voor het wegnemen van barrières voor innovatie, maar kansen om de selectieomgeving voor maatschappelijk wenselijke innovaties positief te beïnvloeden worden niet gezien.

Het beleid scoort goed ten aanzien van het concept begrensde rationaliteit, met name als het gaat om de tijdhorizon van ondernemers en het imitatiegedrag. Een kanttekening hierbij moet echter zijn dat de overheid zelf ook vaak routinematig handelt, met name door slechts een beperkt aantal beleidsinstrumenten in beschouwing te nemen en toe te passen.

De noties van padafhankelijkheid, lock-in en gelijk speelveld hebben inmiddels hun weg gevonden naar het beleid. Maar de uitwerking van deze concepten in concreet beleid is, vanuit evolutionair-economisch perspectief, wat eenzijdig. Het tegengaan van lock-in lijkt de overheid vooral te willen bewerkstelligen door het 'uitstellen' van selectie, in plaats van door het bewust stimuleren van flexibele opties. Juist in het energiebeleid is een discussie over flexibele opties in het kader van duurzaamheid echter wel op zijn plaats, bijvoorbeeld in de afweging tussen grootschalige versus kleinschalige opwekking. Het aspect gelijk speelveld wordt eenzijdig opgevat als het creëren van gelijke concurrentieverhoudingen tussen producenten uit verschillende landen. Het speelveld tussen technologieën die zich in verschillende fasen van de leercurve bevinden speelt in de discussie geen rol.

Uit de evolutionair-economische evaluatie van huidig beleid gericht op energie-innovaties blijkt dat een aantal elementen zijn onderbelicht. Het gaat daarbij met name om diversiteit binnen bedrijven, producten en strategieën, om innovatiefactoren als combinatie/kruisbestuiving, serendipiteit en nichemarkten, en om de selectieomgeving. Samenvattend kan men stellen dat met name de evolutionaire economische concepten die *geen spanning* opleveren met (het bevorderen van) doelmatigheid van beleid zijn terug te vinden in het beleid. In de uitwerking van die concepten wordt vaak teruggegrepen op beleidsinstrumenten die ook vanuit de traditionele economische theorie goed scoren.

Evolutionair milieubeleid gericht op de transitie naar een duurzame energievoorziening

In het kader van deze studie zijn de evolutionair-economische concepten ook toegepast op een drietal specifieke energietechnologieën.

Brandstofcellen kenmerken zich door een grote mate van diversiteit in bedrijven, technieken en mogelijke toepassingen. Nederland in het bijzonder en de Europese Unie in het algemeen richten zich voor deze technologie nog sterk op de R&D-fase, want de leercurve tot en met de mogelijkheid voor commerciële toepassing lijkt nog lang. De toepassing en diffusie van de technologie zullen echter een steeds grotere rol moeten gaan spelen. Het belang van nichemarkten, hybride toepassingen en de rol van de overheid als launching customer neemt dan ook sterk toe. De toepassing van brandstofcellen zal uiteindelijk een breuk vergen met bestaande routines, met name in het geval van de verbrandingsmotor.

De weg naar commerciële toepassing is voor *kernfusie* nog bijzonder lang en het onderzoek is nog grotendeels fundamenteel van aard. Het bedrijfsleven is dan ook nog nauwelijks betrokken bij deze technologische ontwikkeling. Niettemin ontwikkelt de leercurve zich bijzonder snel. Omdat de schaalvoordelen enorm zijn, is decentrale, kleinschalige toepassing van kernfusie uitgesloten. De diversiteit aan technologieën en betrokkenen is klein. Het toekomstbeeld is niettemin zeer aantrekkelijk: een goedkope en nauwelijks vervuilende energiebron. Publieke investeringen in het onderzoek worden met name gerechtvaardigd door de kortere tijdshorizon van private investeerders.

Foto-voltaïsche cellen (PV) of zonnecellen staan tegenover kernfusie, in de zin dat het hier juist gaat om een zeer decentrale vorm van energieopwekking. De silicium-zonnecel is min of meer 'per ongeluk' uitgevonden in de elektronica-industrie (serendipiteit) en het idee voor een dunne-film-zonnecel komt voort uit de fotografie (kruisbestuiving). Nichemarkten voor PV hebben zich met name in de ruimtevaart ontwikkeld, maar ook bijvoorbeeld op zeer afgelegen plekken zoals voor lichtbakens op zee. PV kan aan het energienet gekoppeld worden, maar dat is niet noodzakelijk. De mogelijke toepassingen zijn dan ook groot, maar de investeringskosten eveneens, ondanks een snelle ontwikkeling van de leercurve. PV heeft in de toepassing weinig voordelen van schaalvergroting. In Nederland is het voordeel van PV door het dichte energienet beperkt; decentrale toepassingen blijven daardoor in nichemarkten zitten. Grootschalige toepassingen vergen een sterke breuk met het bestaande systeem van energievoorziening.

1 Inleiding

Economische principes en uitgangspunten spelen een belangrijke rol in de vormgeving van het Nederlandse milieubeleid. In de traditionele, neoklassieke economie domineren noties als rationaliteit, efficiëntie en optimalisatie. Dit leidt tot een aanpak die niet goed geschikt blijkt te zijn voor de analyse en interpretatie van grootschalige systeemveranderingen (transities) en innovaties. Alternatieve economische theorieën bieden complementaire, en soms ook tegenstrijdige gezichtspunten. Het belangrijkste theoretische raamwerk voor de studie van innovaties en transities is de *evolutionaire economie*, waarin beperkte rationaliteit, diversiteit, innovatie en selectie centraal staan. De evolutionaire economie hanteert als uitgangspunt dat mensen handelen volgens beperkte rationaliteit, welke de vorm aanneemt van routines, imitatiegedrag en een beperkte tijdshorizon. Met name in studies van technologische ontwikkeling en innovaties speelt de evolutionaire economie een steeds belangrijker rol. Hier zijn we met name geïnteresseerd in het raakvlak van milieu- en innovatiebeleid. De centrale vraag die we ons in dit rapport stellen is:

Welke inzichten biedt de evolutionair-economische theorie voor een milieubeleid gericht op innovatie en transitie?

In deze studie zullen we deze vraag toespitsen op energie, in het bijzonder het beleid voor energie-innovatie en het energietransitiebeleid. De centrale vraag is daartoe opgesplitst in drie deelvragen:

1. Welke concepten en ideeën uit de evolutionaire economie kunnen worden gebruikt voor het ontwikkelen van een visie op (milieu)beleid en hoe kunnen deze concepten worden toegepast?
2. In welke mate zijn de visies op het beleid ten aanzien van het stimuleren van energie-innovaties (zoals weergegeven in huidige beleidsdocumenten en adviezen) in lijn met de inzichten van de evolutionaire economie?
3. Hoe kan de ontwikkeling van specifieke energietechnologieën worden begrepen vanuit een evolutionair-economisch perspectief? Drie technologieën worden nader beschouwd: brandstofcellen, kernfusie en fotonvoltaïsche energie.

Dit rapport is in vier delen opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt een algemeen theoretisch overzicht gegeven van de principes en uitgangspunten van de evolutionaire economie. In hoofdstuk 3 zal het theoretisch overzicht worden gekoppeld aan de uitgangspunten van het milieubeleid. In hoofdstuk 4 wordt een verdere koppeling gemaakt met het energie- en innovatiebeleid, en meer in het bijzonder met het energietransitiebeleid. Aan de hand van de evolutionair-economische beginselen uit de eerste hoofdstukken, wordt een 'evolutionaire evaluatie' van het energietransitiebeleid uitgevoerd. We beperken ons hierbij tot het Nederlandse energie- en innovatiebeleid. In hoofdstuk 5 worden de algemene inzichten geïllustreerd en uitgewerkt aan de hand van een drietal case-studies, gericht op de transitie naar een duurzame energievoorziening. Hierbij worden drie technologieën nader beschouwd: brandstofcellen, kernfusie en fotonvoltaïsche energie. Hoofdstuk 6 bevat de belangrijkste conclusies van het onderzoek.

2 Evolutionaire economie

2.1 Evolutionair denken

Evolutie wordt in steeds bredere kring opgevat als een algemeen concept en mechanisme om structurele veranderingsprocessen ten aanzien van technologie, organisatie en structuur te doorgronden (Ayres, 1994; Dennett, 1995). De toepassing van de evolutionaire wijze van denken in de economische wetenschap is vooral in de afgelopen twee decennia goed op gang gekomen. Dit komt onder meer voort uit onvrede met de manier waarop technologieontwikkeling in het neoklassieke model van economische groei werd gemodelleerd. Technologie werd aanvankelijk gezien als een exogene variabele die zich buiten het economisch proces ontwikkelt, en later als een endogene variabele die vrij eenvoudig kan worden ingepast in economische evenwichtsanalyse. Voortschrijdende inzichten in het innovatieproces verzwakken deze laatste veronderstelling. Technologieontwikkeling wordt nu beschouwd als de resultante van een continue interactie tussen generatie (innovatie) en selectie van diversiteit aan technologieën en organisatiestructuren. Uitgaande van deze visie biedt de evolutionaire benadering een geloofwaardig alternatief voor traditionele theorieën van economische en technologische verandering. Het in de traditionele economische theorie veronderstelde rationele gedrag van individuen en groepen wordt in de evolutionaire benadering vervangen door begrensde rationaliteit, welke de vorm van gewoonten, routines, bijziendheid en imitatie kan aannemen (Nelson en Winter, 1982; Robson, 2001).

De volgende elementen en processen spelen een centrale en complementaire rol binnen de evolutionaire economie:

- *Diversiteit* (variatie): populaties van strategieën, producten, technologieën of organisatiestructuren;
- *Selectie*: processen die bestaande diversiteit verminderen;
- *Innovatie*: processen die nieuwe diversiteit genereren;
- *Overdraagbaarheid* (transmissie): replicatie door reproductie of kopiëren (mogelijk imitatie). Dit is de oorzaak van continuïteit en cumulatieve processen;
- *Begrensde rationaliteit*: individuen en organisaties (groepen) gedragen zich in grote mate volgens automatische patronen die het resultaat zijn van aanpassingen in het verleden aan een bepaalde omgeving, ofwel zijn geselecteerd door deze omgeving. Met name gewoonte of routinematig gedrag, het imiteren van anderen en myopie (korte tijdshorizon) zijn kenmerkend.

Diversiteit expliciet aandacht geven impliceert een aanpak waarbij populaties van agenten het startpunt vormen. Dit betekent dat de in de neoklassieke economische theorie gebruikelijke aanname van de representatieve agent wordt verlaten. Een populatiebenadering kan worden vertaald naar een formeel model. Het type model hangt in belangrijke mate af van de mate van aggregatie. Evolutionaire speltheorie, bijvoorbeeld, hanteert vrij geaggregeerde variabelen, waardoor de mate van diversiteit veelal beperkt blijft tot twee of drie kenmerken.

Een tweede benadering beschrijft populaties en veranderingen hierin door middel van kansverdelingen. Een derde aanpak is gebaseerd op multi-agent systemen, hetgeen de ultieme microbenadering representeert. Hierbinnen worden individuen expliciet beschreven op grond van unieke kenmerken. Dit levert de meest gedetailleerde beschrijving op van mogelijke interacties tussen economische agenten. Deze kunnen vervolgens worden geplaatst in een context van volledige aselechte interacties (een gaswolk), of systematische interacties in een netwerk of cellulaire (grid) rasterstructuur.

Evolutie is een krachtige theorie, ondanks de eenvoud van de achterliggende mechanismen. De kern bestaat uit twee tegengestelde krachten of causale processen. Een betreft de creatie van diversiteit, door verscheidene mechanismen, vaak verzameld onder de termen uitvinding en innovatie. Dit kan worden gezien als een onevenwicht-bevorderende kracht. Een tweede kracht is selectie, waardoor diversiteit afneemt. Deze kan worden beschouwd als een evenwicht-bevorderende en gerichte kracht. In plaats van een wetmatigheid, zoals de zwaartekracht, representeert selectie een taxonomie van nauw verwante maar een groot aantal verschillende processen. Met andere woorden, het is een paraplueterm. Het omvat marktconcurrentie, interacties tussen werkgevers en werknemers (vakbonden), relaties met andere belangengroeperingen, fusies en overnames, financiële eisen gesteld door verschaffers van kapitaal (aandeelhouders, banken), wetgeving en publieke regulering, en de publieke opinie.

Het resultaat van deze tegengestelde krachten, innovatie en selectie, is een continu veranderingsproces zonder dat dit hoeft te eindigen in een evenwicht. Alleen zonder innovatie of met geringe innovatie kan een systeem onder invloed van selectieprocessen convergeren tot een evenwichtssituatie (dit is de benadering die de evolutionaire speltheorie volgt). Dan immers zal de diversiteit afnemen. Bij een balans tussen selectie- en innovatiekrachten zal de diversiteit zo nu en dan toenemen en dan weer afnemen, maar nooit volledig worden gereduceerd. De evolutionaire dynamiek hangt af van de bestaande diversiteit en zal deze op haar beurt beïnvloeden. Met andere woorden, zonder diversiteit in een evolutionair systeem te beschrijven resulteert onvolledig begrip van de dynamiek van dat systeem.

Een belangrijk gevolg van een langdurig volgehouden evolutionaire dynamiek is dat structuur en complexiteit ontstaan. Evolutionaire theorie verklaart dus hoe processen op één niveau nieuwe structuren genereren op een hoger niveau. Dit wordt wel aangeduid met niet geheel scherp gedefinieerde termen als 'zelf-organisatie' en 'emergentie' (Holland, 1998; Kauffman, 1993). De evolutionaire theorie biedt een belangrijke algemene basis voor verklaringen van deze fenomenen. Het succes van evolutionaire theorie blijkt niet alleen binnen het traditionele toepassingsgebied, de biologie. Het vakgebied 'evolutionary computation' binnen de informatica, dat onder andere ontwerp- en optimalisatieproblemen oplost met behulp van evolutionaire algorithmen, is een voorbeeld van de praktische bruikbaarheid en effectiviteit van evolutionaire theorie en modellen (Bäck, 1996).

Indien een evolutionair systeem wordt gekenmerkt door een grote mate van interne diversiteit – dat wil zeggen een grote populatie met veel verschillende kenmerken – dan is het op grond van pure kansrekening erg onwaarschijnlijk dat het systeem een eerdere toestand opnieuw zal aandoen, ofwel er is sprake van onomkeerbaarheid. De consequentie hiervan is dat historie wordt geïntroduceerd. Een belangrijk kenmerk van een evolutionaire aanpak is dan ook dat het theoretische en historische aspecten verenigt, met veel nadruk op causaliteit. De

theoretische gevolgen hiervan zijn padafhankelijkheid en insluiting ('lock-in'), welke later uitgebreid aandacht zullen krijgen.

De kracht en aantrekkelijkheid van een evolutionaire benadering is dat, ondanks een vrij eenvoudig conceptueel startpunt, complexe structuren kunnen worden begrepen en verklaard op basis van deels endogene processen (innovatie en in mindere mate selectie) die simpele in complexe systemen veranderen. Men kan daarom rustig stellen dat evolutie een van de meest krachtige en verrijkende ideeën is die zijn voortgebracht door de wetenschap (Ayres, 1994; Dennett, 1995). Ten bewijze hiervan kan men vaststellen dat evolutionaire theorie ten volle wordt benut binnen de moderne biologie, al meer dan vijftig jaar en met enorm veel succes. Sinds enige decennia neemt de erkenning van de potentie van evolutionair denken binnen de sociale wetenschappen gestaag toe. Een boeiende toepassing van evolutionaire (multi-agent) modellering bijvoorbeeld is het inmiddels beroemde Sugarscape model van Epstein en Axtell (1996) dat de ontwikkeling van een complex sociaal-economisch systeem beschrijft en aldus elementen uit de economie, demografie, sociologie en biologie combineert. Vergelijkbare evolutionaire modellen zijn inmiddels ook met veel succes toegepast op financiële markten (Levy e.a., 2000). De onderhavige studie, gericht op een analyse van milieu- en energiebeleid sluit aan bij deze ontwikkelingen.

2.2 Een kort overzicht van ideeën en concepten binnen de evolutionaire economie

De evolutionaire economie bouwt voort op de algemene evolutionaire principes zoals geschetst in de vorige paragraaf. De ontwikkeling van dit veld wordt gekenmerkt door een groot aantal verschillende bijdragen die een scala aan nieuwe concepten en ideeën hebben opgeleverd welke mogelijk nuttig zijn bij het onderzoeken van de relevantie voor milieu- en transitiebeleid. Deze paragraaf biedt een kort, enigszins historisch getint overzicht van de belangrijkste bijdragen aan en inzichten van de evolutionaire economie. Een volledig en gedetailleerd overzicht is te vinden in Hodgson (1993). Een toegankelijke Nederlandse introductie is Boschma e.a. (2002).

2.2.1 Oorsprong

Veblen (1898) wordt vaak aangemerkt als de eerste evolutionaire econoom, hoofdzakelijk op grond van het feit dat hij de term 'evolutie' expliciet hanteerde. In het bijzonder vroeg hij zich af waarom de economische wetenschap niet tot een evolutionaire wetenschap was ontwikkeld. Veblen's aanpak is erg sociologisch, met nadruk op de gedragingen van ondernemers. Hij had veel aandacht voor technische verandering, die rond 1900 overduidelijk aanwezig was, en waarover een coherente theorie volledig ontbrak. Zijn visie op evolutionair economische theorie was er een van een causaal proces, van een ontvouwen van stadia, van een accumulatie van gevolgen.

Joseph Schumpeter was de meest invloedrijke persoon van alle vroege evolutionaire economen, zowel vanwege het aanzien dat hij genoot binnen de economische wetenschap (in

Europa en de VS) als vanwege de vele concepten en ideeën die hij voortbracht. Schumpeter stelde vraagtekens bij de dominantie van de statische aanpak van de economische wetenschap. Dit sloot aan bij de grote interesse die hij in al zijn belangrijke werken toonde voor economische dynamiek, in het bijzonder de ontwikkeling van het kapitalistische systeem, in navolging van Karl Marx (Schumpeter 1934, 1939, 1942). Hij beschouwde kwalitatieve economische en technische verandering in een bredere context van sociale verandering, daarbij psychologische kenmerken en de invloed van de innovatieve *entrepreneur* benadrukkend, in zijn boek 'The Theory of Economic Development' (Schumpeter 1934; voor het eerst gepubliceerd in het Duits in 1911). Schumpeter geloofde in de waarde en het ideaal van evenwichtsanalyse, hetgeen enigszins inconsistent was met zijn zoektocht naar een dynamische, evolutionaire theorie. Een mogelijke verklaring is dat zijn visie veranderde in de loop der tijd.

Schumpeter beschouwde economische (kapitalistische) verandering als het resultaat van revolutionaire krachten binnen de economie, die oude processen vernietigen en nieuwe creëren. Hij duidde dit aan met de later veelgeciteerde term *creative destruction*. Dit maakt discrete of niet-graduele veranderingen mogelijk (ver van evenwicht verwijderd). Deze worden versterkt door clusters van afgeleide innovaties die volgen op een majeure innovatie. Deze thema's werden uitgewerkt in Schumpeter's studies van 'business cycles' ofwel economische cycli, in het bijzonder de zogenaamde *lange golven*. Schumpeter deelt met de klassieke economen Marx, Mill en Ricardo het algemene idee van een stationaire toestand van stabiele, geleidelijke veranderingen, waarin de economie uiteindelijk terecht zal komen. In Schumpeter's geval wordt deze gekarakteriseerd door technische vooruitgang als het resultaat van zorgvuldig gepland teamonderzoek binnen een socialistische organisatie van de samenleving. Een andere belangrijke notie die uit Schumpeter's dynamische perspectief voortkwam is wat later 'Schumpeteriaanse concurrentie' (tegenover evenwichts- of prijsconcurrentie) werd genoemd. Dit duidt op het realiseren van een concurrentievoordeel door de vroege innovatie of adoptie van een nieuw product of proces (technologie) door een bedrijf in vergelijking met zijn concurrenten. Dit is later gegeneraliseerd naar de zogenaamde 'Porter hypothese', welke beschouwd kan worden als een soort Schumpeteriaanse beleidsconcurrentie tussen landen (Porter, 1990; Porter en Van der Linde, 1995).

Hoewel Schumpeter's geschriften niet steunen op expliciet evolutionaire begrippen en terminologie, is zijn werk verbonden met de moderne evolutionaire economie. Toch vermeed Schumpeter niet volledig het gebruik van de term 'evolutie': "... the essential point to grasp is that in dealing with capitalism we are dealing with an evolutionary process" (Schumpeter, 1954: p. 82; geciteerd in Potts 2000). Het is echter duidelijk dat Veblen en Schumpeter in grote mate werden beïnvloed door wat er om hen heen aan veranderingen optrad ten aanzien van zowel economische structuur als technische verandering. Deze veranderingen werden namelijk gekenmerkt door een grote mate van diversiteit en innovatie.

2.2.2 Winstmaximalisering door marktselectie?

Sinds 1950 is er een gestage toename van het aantal publicaties over economische evolutie. Dit kan worden verklaard uit het succes van de evolutionaire biologie, maar ook door toenemende kritiek op de neoklassieke uitgangspunten en de grenzen waar de neoklassieke economie tegen oploopt door vragen als: hoe om te gaan met technologieverandering?

Daarnaast ontwikkelt zich de zoektocht naar de evolutionaire basis van optimaliserend gedrag, zoals verondersteld door de neoklassieke economie. Een vroege poging om het laatste te realiseren is te vinden in het werk van Alchian (1950) en de 'vertaling' ervan door Friedman (1953). Alchian beredeneerde dat het onnodig is om winstmaximalisatie of zelfs het zoeken naar winst als een fundamenteel en universeel kenmerk van ondernemingen te poneren, aangezien bedrijven die winst zoeken en succesvol hierin zijn zullen worden geselecteerd (Alchian gebruikt de term 'adopted') door het marktmechanisme: alleen zij overleven. Of bedrijven succesvol zijn is echter grotendeels bepaald door toevalsfactoren, ongeacht of ze winst zoeken of niet, en hoe onzekerder de wereld, hoe meer winst zal afhangen van puur geluk en niet van gecalculiseerd zoeken naar winst. Friedman (1953) ging verder dan Alchian door te stellen dat effectief of succesvol winstmaximalisatiegedrag wordt geselecteerd door de markt, en niet slechts 'winst zoeken en maken'.

Winter (1964) bekritiseerde Alchian en Friedman in hun gebruik van het begrip selectie, omdat ze geen aandacht besteden aan transmissiemechanismen, die bepalen dat succesvol gedrag over de tijd kan worden gehandhaafd en gekopieerd. Zelfs zonder onzekerheid is het dan onmogelijk om bedrijven te selecteren die consistent over de tijd er in slagen om winst te behalen, laat staan te maximaliseren. Zonder overdraagbaarheid van specifiek ondernemingsgedrag zal winst in één periode ongerelateerd zijn aan winst in een andere periode. Als winst maken of maximaliseren niet gericht of bewust is, dan kan het niet worden doorgegeven aan, of geleerd door anderen. Het gevolg is dat winst maken grotendeels een toevalsspel wordt, ofwel afhankelijk is van teveel onbeheersbare factoren. Dit wordt geïllustreerd door het feit dat de winst van veel bedrijven onregelmatig fluctueert (soms zelfs van positief naar negatief) over de tijd.

Voorts geldt dat indien een overdracht van gedrag plaatsvindt, onzekerheid en veranderingen in economische omgeving als een versturende factor optreden bij het selectieproces. Ofwel, selectie levert niet altijd de beste op: *survival of the fittest* gaat niet altijd op. Het gevolg is dat de markt er niet in zal slagen om op consistente wijze winstmakers of maximaliseerders te selecteren.

Tot slot kan men ook kanttekeningen plaatsen bij het mechanisme van marktselectie zelf. In het geval van zwakke competitie zal bijvoorbeeld de selectieve druk gering zijn. Voorts zijn er meestal een groot aantal additionele selectiekrachten die de invloed van marktkrachten temperen. Hierbij kan men denken aan allerlei vormen van wetgeving en overheidsregulering die er niet specifiek op gericht zijn om het maken van winst te selecteren (Foss, 1993).

Friedman (1953) had in tegenstelling tot Alchian een ambitieus doel, namelijk om een duidelijke methodologische richting aan te geven voor de economische wetenschap. In zekere zin is hij succesvol geweest, en niet alleen omdat zijn essay een van de meest geciteerde is op het gebied van economische methodologie. Met name de evolutionaire speltheorie, welke gedurende de jaren tachtig van de vorige eeuw opkwam, sluit in haar redenering goed aan bij het gedachtegoed van Alchian en Friedman (zie paragraaf 2.2.5). Beiden benadrukken evenwichtsselectie van bestaande diversiteit, en veronachtzamen structurele processen van innovatie die het systeem uit zijn evenwicht brengen. Hierdoor volgt doorgaans de conclusie dat een systeem in een evenwicht eindigt, in het geval van Friedman met alleen nog winstmaximaliseerders aanwezig.

2.2.3 Routines en zoekgedrag: Nelson en Winter

Het meest geciteerde en wellicht meest invloedrijke werk binnen de evolutionaire economie sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw is dat van Richard Nelson en Sydney Winter, hetgeen culmineerde in hun beroemde boek uit 1982, 'An evolutionary theory of economic change'. Niet alleen heeft het evolutionaire economen in de neo-Schumpeteriaanse traditie beïnvloed, maar tevens heeft het erkenning gekregen van mainstream economen. Een belangrijke reden hiervoor ligt in de sterke theoretische en empirische analyses, die gepaard gaan met een formele, axiomatische aanpak.

Het uitgangspunt van Nelson en Winter is niets minder dan "... a major reconstruction of the theoretical foundations of our discipline is a precondition for significant growth in our understanding of economic change." Ze concentreren hun aandacht op routines van bedrijven en graduele verandering, en veronderstellen als kern van bedrijven: "... motivated by profit and engaged in search for ways to improve their profits, but their actions will not be assumed to be profit maximizing over well-defined and exogenously given choice sets." Wat betreft hun analyse stellen ze: "... we do not focus our analysis on hypothetical states of 'industry equilibrium', in which all the unprofitable firms no longer are in the industry and the profitable ones are at their desired size." (Nelson en Winter, 1982: p. 4).

Men kan de benadering van Nelson en Winter samenvatten als *graduele economische evolutie* op basis van veranderingen in *routinematig gedrag* op microniveau die het gevolg zijn van zoekprocessen. De drie kernelementen van hun theorie van microevolutie zijn organisationele routines, zoekgedrag en selectieomgeving.

Organisationele routines

Organisationele routines verwijzen naar de manier waarop ondernemingen functioneren en beslissingen worden genomen. Een routine kan worden gezien als het equivalent van het gen in de biologische evolutie. Het is de complexe synthese van vaardigheden van werknemers en hun onderlinge relaties, zoals communicatie, samenwerking en afspraken. Vaardigheden of expertises kunnen worden gedefinieerd als verworven, ingesleten kennis en vaardigheden ('stilzwijgende kennis' of 'tacit knowledge'), met een zeker karakter van automatismen. Zowel een vaardigheid als een routine kan worden beschouwd als programmeerbaar. Het verschil tussen de twee is dat vaardigheden kunnen worden gezien als een individueel kenmerk, terwijl routines gelden als kenmerk op het niveau van een organisatie zoals een bedrijf. Een routine verwijst dan ook naar de verzameling van individuen met specifieke, unieke vaardigheden en samenwerking daartussen. Een routine beschrijft dus in feite een complexe verzameling van interactieve vaardigheden.

De interacties binnen een routine zijn cruciaal, en hangen af van vroegere contacten (leren, aanpassing) en organisatie-specifieke 'taal'. Net zoals een vaardigheid wordt een routine 'onthouden' door deze uit te voeren: 'remembering by doing'. Het geheugen van een organisatie kan dus niet simpelweg worden gereduceerd tot de som van individuele geheugens, aangezien interacties tussen vakmensen daar geen onderdeel van uitmaken. Men kan organisationeel geheugen ook niet reduceren tot blauwdrukken, omdat dit de gemeenschappelijke ervaring van herhaalde interacties in het verleden zou ontkennen. Volgens Nelson en Winter (p. 104) zijn dergelijke blueprints wel nuttig: "... perhaps, as a checkpoint to assess what might be wrong when the routine breaks down." Geen enkel

individu, inclusief de ‘baas’, kan alle informatie bezitten om de organisatie te laten functioneren. De expertises en communicatie-ervaringen staan niet op papier of in een digitaal bestand, en de ‘baas’ hoeft zich hun bestaan niet eens te realiseren. Volgens deze visie werkt een organisatie-routine als een gedecentraliseerd en *zelforganiserend systeem*, zonder dat iemand in de organisatie zich er bewust van hoeft te zijn, en zonder dat er zelfs een hiërarchische organisatiestructuur hoeft te bestaan. Merk tevens op dat met meer individuen, of meer organisationele complexiteit, een gegeven taak over meer menselijke geheugens kan worden verdeeld (Nelson en Winter, 1982: p. 106). Dit betekent dat alle of sommige individuen een eenvoudigere taak hebben, of dat taken accurater kunnen worden uitgevoerd.

Verandering in routines door zoekgedrag

Routines creëren een bestendigheid of continuïteit in het gedrag van bedrijven. Hieraan liggen een aantal factoren ten grondslag. Nelson en Winter noemen politiek, vermijden van conflicten, gevestigde belangen, financiële (transactie)kosten van verandering, en hiërarchische managementstructuur als de belangrijkste. Desalniettemin kunnen routines wel degelijk veranderen. Dit is het tweede element van Nelson en Winter’s raamwerk. Verandering van routines kan op een aantal manieren verlopen. Een evaluatie van bestaande routines leidt tot kleine of grotere veranderingen in, of uiteindelijk zelfs tot vervanging van routines. Georganiseerde zoekprocessen gebaseerd op afzonderlijke organisationele eenheden (die op zichzelf ook volgens specifieke routines functioneren) zijn een belangrijke activiteit gericht op het veranderen van bestaande routines. Dit omvat in potentie alles van producten en processen tot marketingstrategieën, interne organisatie, etc. Verandering van routines betekent dat het gedrag van bedrijven op middellange termijn gekarakteriseerd wordt door flexibiliteit en aanpassing. Merk op dat ‘geroutineerde innovatie’ van dit type iets is dat zelf ook onderhevig kan zijn aan innovatie. Dit was dan ook een belangrijke ontwikkeling na de Industriële Revolutie, waarbij entrepreneurs-ondernemers werden vervangen door grote bedrijven met R&D-afdelingen.

Veel veranderingen in routines zijn echter *ongericht* en *toevallig*, bijvoorbeeld omdat ze het resultaat zijn van het oplossen van problemen in de organisatie of de prestatie ervan, of omdat oude werknemers weggaan en nieuwe binnenkomen, met nieuwe expertises en vaardigheden, die veelal ook leiden tot nieuwe interactiepatronen. Een belangrijke categorie van veranderingen is nieuwe combinaties van bestaande routines (Schumpeter, 1934), ofwel *kruisbestuiving*, analoog aan de notie van recombinitie in biologische evolutie. Volgens Nelson en Winter (p. 130) kan dit de vorm aannemen van “... new patterns of information and material flows among existing subroutines.” Dit is het meest effectief gedaan door betrouwbaar gebleken routines als uitgangspunt te nemen, zodat experimenten via ‘trial-and-error’ zich kunnen richten op het bepalen van problemen die gekoppeld zijn aan de nieuwe combinatie, en niet aan fouten in de bestaande routines. Dit levert een cumulatief proces op van verbetering via een combinatie van selectie en innovatie.

Een ander patroon dat veel routinewijzigingen verklaart is *replicatie* of *imitatie* van producten, processen, strategieën of organisationele structuren van andere bedrijven. Perfecte replicatie is zeldzaam, omdat informatie over de te kopiëren routine doorgaans onvolledig is. Nelson en Winter suggereren dat daarom replicatie onvermijdelijk ‘mutaties’ zal bevatten. De complexiteit van een routine kan eenvoudig onderschat worden, vooral wanneer men veronachtzaamt hoeveel technologie, mensen, expertises, en communicatie zij omvat. Op

grond van mutaties tijdens het proces van replicatie stellen Nelson en Winter voor om de imitator te zien als een ‘innovator’, aangezien imitatie en uitvinding worden gecombineerd.

Het raamwerk van Nelson en Winter gebruikt *begrensde rationaliteit* en automatisch gedrag als een algemeen model van bedrijven, en suggereert dus dat het neoklassieke economische model van een bewuste, weloverwogen keuze uit een gegeven verzameling van alternatieven niet overeenkomt met de werkelijkheid. Bedrijven kunnen wel soepel opereren, maar dit is het gevolg van routines, en niet van consistente optimalisering onder een brede range van verschillende omgevingscondities (Nelson en Winter, 1982: p. 126).

Selectieomgeving

Het totaal van selectiefactoren beïnvloedt de prestatie van een bedrijf alsmede veranderingen in het bedrijf. Dit is het derde element van Nelson en Winter. In paragraaf 2.4.4 wordt dit aspect uitvoerig behandeld.

2.2.4 Huidige scholen (1): Neo-Schumpeteriaanse theorieën

Neo-Schumpeteriaanse theorieën van technologische verandering domineren momenteel de evolutionaire economie (Dosi e.a., 1988; Metcalfe, 1998; Witt, 1993). Zij bestuderen fenomenen op het niveau van bedrijven (technologische innovatie), de markt en sector (concurrentie en diffusie, structurele verandering), en op macro-niveau (groei, lange golven en internationale handel). De invloed van innovaties op bedrijfsniveau is veelvormig. Innovatie veroorzaakt asymmetrieën in beschikbare technologie tussen bedrijven, sectoren en landen, waardoor handel en commercie gegeneerd worden. Comparatieve voordelen liggen niet voor eeuwig vast maar veranderen door innovatie en diffusie. Handel zelf stimuleert diffusie van kennis en technologie. Voorts beïnvloedt technische verandering de arbeidsdeling, de organisatie van relaties binnen en tussen bedrijven, en dus de industriële structuur en patronen van intermediaire leveranties. Merk op dat dit verder gaat dan structurele veranderingen zoals bestudeerd met (toegepaste) algemeen-evenwichtsmodellen. Daar liggen bijvoorbeeld de sectoren en technologieën vast, terwijl binnen de evolutionaire benadering innovatie nieuwe technieken en activiteiten oplevert. Interacties tussen gebruikers en producenten kunnen hierbij relevant zijn, zoals geografische en culturele nabijheid, hetgeen kan leiden tot nationale of regionale systemen van innovatie. Bovendien trachten sommige bedrijven hun reikwijdte van activiteiten en producten te verbreden, niet slechts om ‘economies of scope’ te realiseren, maar ook om veerkrachtig (‘resilient’) te zijn in het proces van marktconcurrentie.

De neo-Schumpeteriaanse school, mede gestimuleerd door het werk van Nelson en Winter, heeft een grote hoeveelheid literatuur over technologische evolutie voortgebracht. Kernbegrippen hierin zijn uitvinding, innovatie, adoptie (imitatie) en diffusie (sectoraal of ruimtelijk). Grofweg kan men stellen dat een innovatie altijd wordt voorafgegaan door een uitvinding die een zeker verrassend karakter heeft. Innovatie is bovendien een cumulatief proces dat gepaard gaat met onzekerheid. Een typologie van innovaties is:

- *Incrementeel*: continu, ‘learning-by-doing or using’, efficiëntieverbeteringen;
- *Radicaal*: discontinu; combineert product-, proces- en organisatieinnovaties;
- *Technologie-systeemveranderingen*: meerdere sectoren worden significant beïnvloed;
- *Techno-economische paradigmaveranderingen* (technologische revoluties): invloed op de gehele economie.

2.2.5 Huidige scholen (2): Evolutionaire speltheorie

Een tweede ‘school’, welke meer invloed begint te krijgen, is evolutionaire speltheorie (Samuelson, 1997; Weibull, 1995; Friedman, 1998a,b). Deze heeft een relatie met drie benaderingen. De eerste wordt gevormd door het besproken werk van Alchian en Friedman, die trachten een evenwichtstheorie af te leiden van evolutionaire theorie. Evolutionaire speltheorie staat dan ook wel bekend als ‘*equilibrium selection theory*’, refererend aan het uitgangspunt dat niet-lineaire modellen vaak meerdere (Nash) evenwichten opleveren. De tweede relatie is met een groep van bekende ‘Chicago economen’ die in de jaren zeventig evolutie en met name selectie bestudeerden, ideeën uit de sociobiologie oppikten om een theorie van ‘utilitarian altruïsme’ te ontwikkelen (Becker, 1976; Hirshleifer, 1977; Tullock, 1979). De derde benadering is de methode van evolutionaire speltheorie zoals ontwikkeld binnen de biologie (Maynard Smith, 1964; Maynard Smith en Price, 1973; Maynard Smith, 1982). Deze methode werd oorspronkelijk gebruikt om inzichten uit de sociobiologie te ondersteunen.

Evolutionaire speltheorie benadrukt het bestaan van asymptotische evenwichten. Deze zijn mogelijk omdat een structureel innovatieproces buiten beschouwing blijft, zodat selectie volledig domineert. Daardoor vermindert de diversiteit slechts zodat een evenwicht met minimale diversiteit wordt bereikt. In dit verband is de uitspraak van Foster and Metcalfe (2001: p. 9) relevant: “One intriguing aspect of evolution is that it consumes its own fuel. Processes of competitive selection necessarily destroy (or rather absorb) the very variety on which evolution depends. Unless variety is replenished, evolution will come to an end.” De nadruk op selectie maakt tevens formele analytische oplossingen van evenwichten mogelijk. Qua formele aanpak (zeer simpele modellen) en inzichten (evenwichten) leunt de theorie dan ook dicht tegen de neoklassieke economie. De meerwaarde is gelegen in diversiteit aan begrensde rationaliteit en de (evolutionaire/selectie) dynamiek hiervan.

In de literatuur worden verschillende evenwichtconcepten gehanteerd. Evolutionair evenwicht geeft aan dat de populatieverdeling van relevante kenmerken niet wijzigt, hetgeen betekent dat alle kenmerken een gelijke ‘fitness’ hebben. Economische (Nash) evenwichten benadrukken dat een economische agent, gegeven de keuzes van anderen, niet zijn winst of nut kan verhogen door zijn beslissing of keuze te wijzigen. Het economisch evenwicht wordt bepaald met een statisch model. Evolutionair evenwicht is daarentegen dynamisch bepaald, aangezien het de resultante is van een dynamisch pad dat een initiële populatie met een bepaalde compositie aan kenmerken (diversiteit) volgt. Deze dynamiek geschiedt op grond van een zogenaamde ‘replicator dynamica’, waarbij individuen met een bovengemiddelde fitness hun aandeel in de populatie zien stijgen en individuen met een ondergemiddelde fitness hun aandeel juist zien dalen. De relatieve fitness is dus cruciaal en afhankelijk van de verdeling van kenmerken in de populatie. Een centraal concept in de evolutionaire speltheorie is ‘evolutionair stabiele strategie’ (ESS). Deze combineert kenmerken van een Nash

evenwicht met stabiliteitseisen. Stabiliteit wordt hier gezien als het uitblijven van structurele gevolgen bij een eenmalige verstoring van een toestand door een kleine verandering in de populatieverdeling.

2.2.6 Connecties, hyperstructuren en discrete wiskunde: Potts

Een recent voorstel voor de richting die de evolutionaire economie zou kunnen volgen is afkomstig van Potts (2000). Hij legt een verbinding tussen evolutionaire economie en netwerk-theoretische concepten. In zijn visie zijn economische systemen complexe hyperstructuren, ofwel geneste verzamelingen van verbindingen tussen de afzonderlijke componenten. Dit kan betrekking hebben op relaties tussen componenten en subcomponenten van technologie (auto, computer, machines in een fabriek), maar evenzeer op materiaal- en communicatiestromen tussen individuen of afdelingen in een organisatie (zoals een bedrijf). Nelson en Winter's notie van bedrijfsroutines als interacties tussen individuen met specifieke vaardigheden sluit ook goed aan bij Potts' hyperstructuur. Tegen deze achtergrond zijn economische verandering en groei van kennis in essentie processen van verandering in connecties. Bijvoorbeeld computerchips doen overal hun intrede, en maken zodoende nieuwe connecties met bestaande technologie, zoals televisies, audioapparatuur, auto's, wasmachines, of telefoons. Het gevolg is dat deze apparatuur doelmatiger werkt en zelfs nieuwe taken aankan. Internet is een heel concreet voorbeeld van de meerwaarde van connecties tussen mensen en kennis die een geheel eigen hyperstructuur vormt.

In overeenstemming met dit idee van veranderende connecties, bepleit Potts een nieuwe micro-economie, gebaseerd op de techniek van discrete, combinatorische wiskunde, zoals netwerk- of graaftheorie. Daarnaast gebruikt hij ook de reeds bestaande multi-agent evolutionaire modellen, ook wel bekend als 'artificial life' of 'artificial world' simulatiemodellen (niet te verwarren met traditionele multisector modellen). Potts stelt tevens dat veel connecties een ruimtelijke dimensie hebben. Hij beschouwt de traditionele microeconomische evenwichtstheorie als een benadering die een continue werkelijkheid veronderstelt, hetgeen handig is omdat het de toepassing toestaat van concepten als evenwicht, productiefunctie en nutsfunctie, en technieken als integreren en differentiëren. Hij beargumenteert dat deze aanpak daarentegen niet goed om kan gaan met noties als complexiteit, heterogeniteit, modulariteit en decompositie, noch met veranderingen daarin.

Potts' netwerkaanpak kan wel overweg met complexiteit door de dynamische interpretatie van de balans tussen orde en chaos – een soort evenknie of pendant van evenwicht maar dan in een meer dynamische setting. Deze gedachte volgt vrij direct het werk van Kauffman (1993). Hier hangt orde samen met de aanwezigheid van een paar connecties tussen systeemcomponenten, terwijl chaos op de aanwezigheid van talrijke connecties duidt. Complexiteit doet zich voor in een bepaalde range van het aantal connecties tussen beide extremen in. 'Onderconnectie' kan veroorzaakt worden door bijvoorbeeld padafhankelijkheid en betekent een inflexibel, niet-adaptief systeem met geïsoleerde, onafhankelijke elementen. 'Overconnectie', zoals in sommige ongereguleerde financiële markten, betekent continue en onvoorspelbare verandering (chaos) omdat heel veel of zelfs alle componenten direct op elkaar reageren (bijvoorbeeld doordat veel mensen dezelfde informatie via de media ontvangen). Complexiteit, er tussenin, duidt op een systeem met een betrekkelijk stabiele

structuur die de capaciteit heeft, binnen bepaalde grenzen, om zich aan te passen aan zowel externe als interne veranderingen.

In de continue, integreerbare en differentieerbare aanpak van de neoklassieke economie is alles met alles verbonden, met het gevolg dat geen onderscheid gemaakt kan worden tussen simpele (weinig connecties) en complexe (veel connecties) systemen. Evenmin is een herkenning van formatie van structuur (groepering, emergentie) mogelijk binnen een dergelijk kader. In plaats hiervan veronderstelt de neoklassieke theorie (en haar modellen) dat het economische systeem een vaste structuur met slechts één niveau van interacties kent – dus geen onderscheid tussen individuen en groepen.

2.3 Evolutionaire groeitheorie

2.3.1 Algemene kenmerken en modellen

In de zoektocht naar een duurzame ontwikkeling is een belangrijk onderdeel van de evolutionaire economie de evolutionaire groeitheorie. In deze paragraaf worden de aannames en inzichten van evolutionaire visies op de analyse van economische groei uiteengezet. Bovendien worden kort de belangrijkste verschillen met endogene (neoklassieke) groeitheorieën aangeduid.

De essentie van een evolutionaire theorie van economische groei is dat deze een bottom-up structuur heeft, hetgeen tot uitdrukking komt in een beschrijving van een populatie van heterogene bedrijven. Dit geeft aanleiding tot zogenaamde differentiële groei, hetgeen beschouwd kan worden als een verandering in de frequenties van alle mogelijke individuele eigenschappen. Groei gaat hier dus onvermijdelijk gepaard met een verandering in de onderlinge compositie van de bedrijvigheid, net zoals in werkelijkheid. Nelson en Winter (1982: part IV, met name hoofdstuk 9) ontwikkelden het eerste formele evolutionaire model van economische groei, dat vergeleken kan worden met het beroemde Solow groeimodel uit 1957. Het model van Nelson en Winter heeft tot doel om patronen van geaggregeerde outputs, inputs en factorprijzen te genereren. Veranderingen in de toestand van een sector volgen kansregels, waarbij de kansen afhangen van zoekgedrag (naar verbeteringen in winst of andere prestatie-indicatoren), imitatie, investeringen, toetreding en selectie. Alleen als bedrijven voldoende winst maken zullen ze niet zoeken of imiteren. Zoekgedrag is lokaal, hetgeen kleine verbeteringen en in de buurt van de huidige technologie blijven suggereert. Imitatie kan zich richten op het gemiddelde of de ‘best practice’. Dit evolutionaire groeimodel is een uitwerking van Nelson en Winter’s theorie van bedrijven die handelen op basis van routines, zoekgedrag en selectie. Dit resulteert in een groeitheorie met een expliciete link naar de evolutionaire microtheorie.

Een cruciaal concept binnen de neoklassieke groeitheorie is de *geaggregeerde productiefunctie*, ofwel een relatie tussen inputs en output van economische productie-activiteiten op een zeer geaggregeerd (macro)niveau: dus bijvoorbeeld uitgaande van totale arbeid, kapitaal en inkomen van een land. Nelson en Winter redeneren dat: “... movements along the production function into previously inexperienced regions – the conceptual core of

the neoclassical explanation of growth – must be rejected as a theoretical concept.” Een algemeen bezwaar tegen continue en differentieerbare productiefuncties is dat noch een individueel bedrijf noch een gehele sector kan bewegen over de gehele functie, aangezien informatie of kennis slechts een beperkt aantal productietechnieken bestrijkt. Evolutionaire groeitheorie stelt voor om een geaggregeerde productiefunctie te vermijden door diversiteit van productierelaties op het niveau van individuele bedrijven te behouden. Dit impliceert vanwege de resulterende modelcomplexiteit een numerieke analysebenadering.

Nelson en Winter bekritisieren de neoklassieke groeitheorie, omdat deze voor slechts ongeveer 20% van productiviteitsgroei een verklaring biedt, gebaseerd op bewegingen langs een geaggregeerde productiefunctie ten gevolge van factorinputveranderingen. De resterende 80% blijft dus onverklaard, en wordt vaak aangeduid met de term ‘total factor productivity’ (TFP), waarin technologische veranderingen en algemene veranderingen in milieu en hulpbronfactoren verborgen zitten. Nelson en Winter’s aanpak maakt het mogelijk om de micro- en macro-aspecten van technologie en technologische verandering te integreren. De resultaten zijn niet alleen consistent met beslissingen van bedrijven (routines, zoekgedrag), maar ook met empirische observaties, zoals aangegeven door geaggregeerde data over factor (kapitaal, arbeid) niveaus, efficiëntie van sectoren, en patronen van innovatie en diffusie.

Er is een aantal andere formele evolutionaire modellen van groei voorgesteld (Conlisk, 1989; Silverberg e.a., 1988). Conlisk werkt met een kansverdeling van de productiviteit van bedrijven. Het groeitempo kan analytisch worden afgeleid en blijkt afhankelijk te zijn van het tempo van diffusie van innovaties en de omvang van innovaties zoals aangegeven door de standaardfout van de kansverdeling van de productiviteit. Silverberg e.a. formuleren een model dat zijn oorsprong heeft in het Goodwin model, waarin een formalisering van de Phillips curve centraal staat. Deze curve beschrijft de relatie tussen prijsinflatie en werkloosheid. Het modelleren van een populatie van bedrijven en hun gedrag als vaste regels genereert de industriële dynamica. Nieuw kapitaal is het gevolg van winst op grond van de regel dat relatief winstgevendende vormen van kapitaal relatief snel accumuleren. Dit kan worden beschouwd als een combinatie van kapitaalaccumulatie en -selectie, in de zin dat een techniek met een relatief hoge fitness zich snel verspreidt via een groeiende ‘populatie van technieken’ als gevolg van accumulatie. Bedrijven kunnen twee strategieën voor innovatie hanteren: een mutatie of imitatie. De kans op imitatie door een bedrijf hangt af van het verschil tussen zijn winst en de maximale winst in de populatie van bedrijven. Dit volgt het algemene model van innovatie en imitatie zoals ontwikkeld door Iwai (1984).

Empirisch onderzoek naar diversiteit is vaak gebaseerd op een statistische analyse van verschillen tussen landen (Fagerberg, 1988). Belangrijke indicatoren die worden gebruikt zijn input-gerichte maatstaven zoals R&D-uitgaven, en output-gerichte maatstaven zoals octrooien. Door deze indicatoren te combineren met de niveaus van productiviteit (inkomen per capita) kunnen clusters van landen worden bepaald. Enkele inzichten zijn als volgt: R&D en patenten blijken zwak gecorreleerd te zijn met productiviteit; R&D biedt geen garantie voor succesvol patenteren; en het groeitempo kan omgekeerd evenredig zijn met niveaus van productiviteit in dezelfde periode. Dit laatste wijst in de richting van een soort ‘inhaalmechanisme’, dat wil zeggen het idee dat technische verschillen worden overbrugd door imitatie. De algemene Schumpeteriaanse niet-evenwichtsaanpak benadrukt de interactie tussen tegengestelde krachten: innovatie die technische verschillen tussen landen vergroot, en imitatie of diffusie waardoor zulke verschillen worden verkleind.

2.3.2 Evolutionaire versus endogene groeitheorie

Hier worden kort de belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen evolutionaire en (neoklassieke) endogene groeitheorieën besproken. De reden is dat beide expliciet aandacht schenken aan het feit dat groei wordt gestimuleerd door technische verandering en dat deze op haar beurt in sterke mate afhangt van de structuur en kenmerken van de economie. Met deze vergelijking wordt tevens beoogd om de essentie en het unieke karakter van de evolutionaire groeitheorie te verhelderen.

Beide theorieën endogeniseren technische verandering door uitgaven aan R&D als een kernvariabele op te nemen. Neoklassieke theorie definieert R&D op het geaggregeerde of macroniveau. Gerelateerd hieraan is het feit dat neoklassieke modellen op cruciale wijze afhangen van een geaggregeerde productiefunctie, dus op macroeconomisch niveau. Evolutionaire theorie leidt zowel productie als technische verandering af van de populatie van bedrijven, waardoor R&D expliciet wordt beschreven als een fenomeen op het niveau van of binnen bedrijven (microniveau). Evolutionaire modellen starten bij bedrijfspopulaties, dus vanuit de microeconomische theorie. Dankzij de populatieaanpak kunnen evolutionaire modellen veel beter *diversiteit* aan gedrag en technologie hanteren, terwijl neoklassieke theorieën representatieve of identieke agenten als uitgangspunt nemen. Dit laatste gebeurt expliciet in een vaak gehanteerde redenering binnen endogene groeitheorie, namelijk dat productiefuncties op microniveau perfect kunnen worden gerepliceerd (omdat er immers sprake is van identieke bedrijven), hetgeen resulteert in constante schaalopbrengsten op een geaggregeerd niveau.

Evolutionaire modellen veronderstellen voorts een *begrensde rationaliteit* van bedrijven, meestal in de vorm van routines en leren door imiteren. Neoklassieke modellen veronderstellen perfecte rationaliteit, waaruit de bekende optimale marginale beslisregels volgen. Dit verklaart ook de nadruk van de neoklassieke groeitheorie op groei-in-evenwicht (ofwel optimaal), in tegenstelling tot niet-evenwichtskennmerken van evolutionaire groei. De aanpak van Aghion en Howitt (1998) bevat enkele elementen van heterogeniteit en destructieve innovatie – ‘creative destruction’ à la Schumpeter – in een neoklassiek modeltype, maar behoudt de aanname van de rationale agent. Mulder e.a. (2001) noemen dit een ‘neo-classical Schumpeterian approach’.

Beide theorieën kunnen aspecten van onzekerheid en onomkeerbaarheid behandelen, hoewel dit gebruikelijker is in de evolutionaire modellen. Evolutionaire theorieën beschrijven een specifiek type van onomkeerbaarheid, namelijk *padafhankelijkheid*. Neoklassieke groeimodellen kunnen dit vanwege hun aggregatieniveau niet of nauwelijks beschrijven. Hiervoor is een populatiemodel vereist, waarin de verdeling van kenmerken van bedrijven of technieken een historisch pad volgt, zodanig dat deze verdeling onomkeerbaar verandert. Voorts zijn stochastische elementen niet ongebruikelijk in evolutionaire modellen, vooral om de natuurlijke onzekerheid over het type, de omvang en de ‘timing’ van innovaties weer te geven.

Neoklassieke endogene groeitheorie richt zich op publieke externaliteiten in technologische innovatie: het idee dat kennis voor iedereen beschikbaar is zonder dat er sprake hoeft te zijn van rivaliteit zoals bij private goederen. Evolutionaire theorie benadrukt de barrières en vertragingen in het proces van diffusie van innovaties, alsmede imperfecte replicatie en

diffusie (Mulder e.a., 2001). Voorts wordt dit laatste als een niet te veronachtzamen bron van imitatie gezien.

Zoals geïllustreerd door Nelson en Winter (1982) en Conlisk (1989) kunnen evolutionaire groeimodellen patronen genereren die nauw aansluiten bij patronen die zijn voortgebracht door neoklassieke modellen. Daarnaast kunnen evolutionaire groeimodellen echter veel nauwkeuriger patronen genereren en fenomenen beschrijven die gevoelig zijn voor overheidsregulering, zoals het tempo van diffusie (imitatie), bedrijfsspecifieke innovatiefactoren, selectiekrachten, en insluiting ('lock-in'). Zij zijn dus in staat om over een breder scala van beleid en instrumenten gericht op groei en technologie te informeren.

Deze inzichten zijn consistent met het algemene idee dat evolutie niet altijd groei impliceert, en vice versa. Om de eerste implicatie te begrijpen, kan men een evolutionair proces beschouwen waarin de diversiteit van bedrijven verandert, maar de totale output (in monetaire of fysieke termen) constant blijft of zelfs afneemt. Dat groei evenmin evolutie impliceert wordt geïllustreerd door een (hypothetische) perfecte replicatie van bestaande productieve activiteiten in de economie, waardoor de totale output wordt verhoogd, maar de diversiteit niet verandert.

Vanwege het negeren van structuur en structurele verandering kan de neoklassieke groeitheorie eigenlijk geen *tijdshorizon* van meer dan enkele decennia aan. Stiglitz (1997) heeft gesuggereerd dat de tijdshorizon het beste kan worden geïnterpreteerd als om en nabij de zestig jaar, dus enigszins vergelijkbaar met een lange golf in een Kondratieff cyclus. Aangezien evolutionaire groeitheorie geschikt is om met structurele verandering om te gaan zou zij in principe kunnen worden ingezet om vragen gekoppeld aan een langere tijdshorizon te beantwoorden.

2.4 Centrale concepten binnen de evolutionaire economie

2.4.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de centrale evolutionair-economische concepten besproken die volgen uit de discussies in vorige twee paragrafen (2.2 en 2.3). Deze concepten vormen een leidraad voor de analyses in de hoofdstukken 3 t/m 5. De concepten zijn geïnclassificeerd in een aantal hoofdgroepen (zie Tabel 2.1): diversiteit, innovatie, selectieomgeving, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie. In de volgende deelparagrafen worden ze elk toegelicht.

Tabel 2.1 Centrale concepten uit de evolutionaire economie

Diversiteit

- Bedrijven (specialisme, omvang)
- Technieken (productie)
- Product (kenmerken)
- Strategieën (verkoop, R&D)

Innovatie

- Combinatie/kruisbestuiving
- Serendipiteit
- Scholing
- Isolatie (ruimtelijk, economisch)
- Samenwerking
- Durfkapitaal
- Nichemarkten
- Toekomstbeelden

Selectieomgeving

- Fysica (bijv. thermodynamische grenzen)
- Technologie (wat is technisch mogelijk, kosten)
- Geografische kenmerken (inclusief bodem, water, wind en zon)
- Bedrijfskenmerken (organisatie)
- Markt (relatieve prijzen, marktmacht)
- Instituties en publiek beleid
- Specifieke condities die R&D beïnvloeden

Begrensd rationaliteit

- Tijdshorizon
- Routines
- Imitatie

Padafhankelijkheid en lock-in

- Onomkeerbaarheid
- Toenemende schaalopbrengsten (schaalvoordeel, imitatie, leereffect en positieve netwerk-externaliteit)
- Lock-in
- 'Level playing field'

Co-evolutie

- Deelsystemen
- Negatieve of positieve terugkoppeling
- Ruimtelijk

2.4.2 Diversiteit

Diversiteit of heterogeniteit is het sleutelbegrip binnen de evolutionaire economie, en het essentiële onderscheid met de neoklassieke economie waar representatieve agenten de boventoon voeren.

Diversiteit wordt beïnvloed door innovatie en selectie en beïnvloedt beide op haar beurt. Hierdoor ontstaat een ontwikkeling naar betere prestaties (onder andere welvaart, milieudruk), en complexiteit. Deze ontwikkeling is ongericht, maar kan door sturing vanuit de mens of overheid een bepaalde richting opgaan. Deze sturing, die in het volgende hoofdstuk meer aandacht krijgt, kan zich richten op bepaalde selectiefactoren of op het stimuleren van bepaalde innovaties.

Verbetering van prestatie van geselecteerde eenheden wordt wel geconceptualiseerd via het begrip 'fitness', een maat voor overleving en reproductie. Fisher's theorema is dan relevant: "The greater the genetic variability upon which selection for fitness may act, the greater the expected improvement in fitness" (Fisher, 1930). Dit inzicht kan aan zowel innovatie als selectie worden gekoppeld. Meer diversiteit betekent namelijk meer mogelijkheden voor creatieve combinaties, terwijl selectie (overleving en reproductie) uitgaande van een bredere basis (meer diversiteit) tevens een betere prestatie ofwel fitness oplevert. Het doelbewust nastreven van diversiteit is dus zinvol. Niet de beste op korte termijn willen selecteren maar diverse portefeuilles stimuleren moet het doel zijn. Dit impliceert dat beslissingen gebaseerd op een korte termijn kosten-batenanalyse, dus gericht op kosteneffectiviteit of doelmatigheid, funest kunnen uitwerken voor verbetering door evolutie, ofwel hogere welvaart en lagere milieudruk op lange termijn.

In het verlengde hiervan kan worden gesteld dat verspilling onvermijdelijk is in evolutieprocessen, en dat evolutie die tot meer verbetering (voortgang) leidt ook relatief veel verspilling met zich meebrengt. Ofwel, er is geen innovatie mogelijk zonder verspilling en zonder doodlopende paden. Dit roept uiteraard de vraag op of onvermijdelijke verliezen of mislukkingen wel 'verspilling' genoemd moeten worden.

In overeenstemming met de evolutionaire biologie en recente discussies over biodiversiteit stelt Stirling (2004) dat diversiteit een meerdimensionaal begrip is, hetgeen gekarakteriseerd wordt door variatie, balans en ongelijksoortigheid. Variatie duidt het aantal verschillende technieken, processen, producten, organisaties, instituties of strategieën in een populatie van elementen aan. Balans (gelijkheid) heeft betrekking op de mate waarin een of enkele elementen qua omvang of voorkomen al dan niet domineren in een populatie. Ongelijksoortigheid geeft de mate van verschil tussen elementen in een populatie aan. Alle drie dimensies van diversiteit hebben een invloed op innovatie en selectie, en daarmee op toekomstige diversiteit.

2.4.3 Innovatie

Innovaties kunnen worden begrepen aan de hand van een groot aantal kenmerken. Een niet-uitputtende lijst van kenmerken is als volgt:

- Producten, processen of diensten;
- Factorbesparend of kwaliteitsverbeterend;
- Relevant voor één sector, meerdere sectoren of de gehele economie;
- Codeerbaar/documenteerbaar of verinnerlijkt ('tacit/embodied');
- Incrementeel versus radicaal;
- Publiek of privaat of gecombineerd;
- Onbedoeld of georganiseerd;
- Autonoom of systemisch.

Innovaties komen op verschillende manieren tot stand. Deze kunnen met name worden gekoppeld aan het onderscheid tussen incrementele (of graduele) veranderingen, zoals efficiency-verbetering van bestaande technieken, en radicale veranderingen, zoals geheel nieuwe concepten, technieken of producten. Incrementele veranderingen kunnen op hun beurt twee vormen aannemen. Geïsoleerde mutaties kunnen het gevolg zijn van *serendipiteit*, ofwel ontdekkingen en uitvindingen doen zonder dat er bewust naar wordt gezocht doordat toeval, intelligentie en kennis of expertise worden gecombineerd (Fine en Deegan, 1996). Dit suggereert meteen dat goede scholing – gericht op alfa, bèta en gamma – serendipiteit bevordert. Incrementele veranderingen zijn daarnaast vaak het gevolg van onvermijdelijke leerprocessen ('learning by doing') en gericht zoeken (onderzoek door universiteiten, publieke instituten en bedrijven).

Radicale innovaties komen vaak tot stand via kruisbestuiving en niet eerder uitgeprobeerde combinaties van bestaande concepten, technologie of organisatie. De uitvinding van de windmolen in de 12^e eeuw kan worden gezien als een succesvolle (re)combinatie van enerzijds radertechnologie ontwikkeld voor de watermolen en anderzijds het zeil dat geschikt was om wind om te zetten naar bewegingsenergie (Mokyr, 1990: p. 44). De resulterende windmolen verspreidde zich zeer snel over Europa, en stimuleerde een toename van energiegebruik, voor verschillende soorten economische activiteiten, zoals houtzagen, het vermalen van granen en verfproductie.

(Re)combinaties varen wel bij variatie. Verspilling moet daarom worden gekoesterd: zonder verspilling geen innovatie. Te weinig verspilling kan dus duiden op te weinig innovatie. Nauw verwant aan radicale innovaties zijn disruptive versus sustaining innovations (Christensen, 1997). Disruptive innovations ondervinden belangrijke barrières omdat de selectieomgeving daar niet op aangepast is en vanwege het feit dat ze concurrentie ondervinden van sustaining innovations die voortbouwen op de bestaande kennis en belangen.

Systematisch zoeken (R&D, wetenschap), veel uitproberen en samenwerken kunnen de kans op innovatieve combinaties vergroten. Daarbij kan de methode van het bedenken van en terugredeneren vanuit extreme toekomstbeelden (backcasting) zinvol zijn. Het gebruik van toekomstbeelden kan een nuttige functie vervullen in het ontwikkelen van begrip over de

mogelijke variatie aan combinaties van technologie, organisaties en instituties. Veel deelinformatie over deze zaken berust bij individuen en wordt onvoldoende geïntegreerd tot een synthese die als een redelijk volledig alternatief of toekomstbeeld kan dienen. Het combineren van de kennis van individuen met verschillende expertises kan stimulerend en inspirerend werken en nieuwe gedachten over voorheen ongeschetste combinaties van elementen opleveren. Om de inspiratie af te dwingen kan men extreme toekomstbeelden nastreven. Dergelijke toekomstbeelden hoeven dus geen streefbeelden op te leveren.

Een zekere mate van isolatie is nuttig omdat daardoor unieke paden kunnen worden ingeslagen die buiten de invloed van dominante technologieën en denkwijzen blijven. Deze isolatie kan een ruimtelijke dimensie hebben; IJsland kan bijvoorbeeld door zijn ligging wellicht gemakkelijker een uniek spoor van een waterstofeconomie inslaan. Culturele verschillen tussen geïsoleerde gebieden dragen bij aan unieke innovatierichtingen. Ook binnen regio's in een land kan ruimtelijke isolatie een dergelijk effect sorteren. Daarnaast is niet-ruimtelijke isolatie een bron van unieke ontwikkelingen. Nichemarkten zijn een voorbeeld hiervan.

Belangrijke innovaties zijn meestal radicaal. De mate van radicaliteit lijkt samen te gaan met de mate van onzekerheid. Dit kan ertoe leiden dat bedrijven onderling of met de overheid samenwerken, dan wel dat dit soort innovaties wordt ontwikkeld binnen fundamenteel onderzoek aan universiteiten en publieke onderzoeksinstituten. Op bedrijfsniveau is durfkapitaal nodig om radicale innovaties mogelijk te maken. Dit kan betrekking hebben op zowel entrepreneurschap in kleine bedrijven als onderzoeksafdelingen binnen grote bedrijven.

Het enigszins abstracte en soms ruimtelijk ingevulde concept van een innovatiesysteem is wel voorgesteld als kader om te benadrukken dat veel factoren een rol spelen bij het al dan niet tot stand komen en succesvol zijn van innovaties. Deze factoren zijn onder andere benoemd door Porter (1990), resulterend in een zogenaamde 'groeidiamant' met als dimensies factorvoorwaarden, binnenlandse vraagfactoren, bedrijfsstrategie en bedrijfsnetwerk. Daarnaast is een ruimtelijke invalshoek (regio's of landen) met een redelijk homogene cultuur vaak impliciet in het gebruik van het concept innovatiesysteem.

Merk op dat een innovatiesysteem niet verward moet worden met een lineair systeem van innovatie (Boschma e.a., 2002: hoofdstuk 7). Innovaties worden gekenmerkt door verschillende fasen. Vaak wordt het onderscheid gemaakt tussen fundamenteel en toegepast onderzoek, alsmede tussen uitvinding en adoptie. In de toegepaste fase zijn product- en procesontwikkeling en diffusie belangrijke fasen. De scheiding tussen uitvinding en innovatie is echter niet scherp in de praktijk. Weinig uitvindingen zijn dermate perfect dat ze zonder aanpassingen commercieel zijn te maken. Dit kan vertaald worden naar een zogenaamd interactief model waarbij fundamentele onderzoeksinspanningen (uitvindingen) worden beïnvloed door marktervaringen (innovaties of adopties).

Het is lastig om factoren te onderscheiden die innovaties stimuleren danwel ontmoedigen. Een interessant onderscheid is gemaakt door Diamond (1997). Hij onderscheidt directe ('proximate') en fundamentele of ultieme ('ultimate') factoren, die economen zouden aanduiden met respectievelijk endogene en exogene factoren. De ultieme factoren zijn de milieu- en ruimtelijke aspecten die vastliggen op lange termijn, namelijk klimaat en geografische structuur van de continenten. De geografische factor die Diamond benadrukt is de richting van de as van de continenten: noord-zuid of verticaal in het geval van Amerika en Afrika, en west-oost of horizontaal in het geval van Eurazië. De horizontale as van Eurazië

impliceert een relatief grote experimentele ruimte voor landbouw omdat dezelfde klimaatzone een gebied met een enorm grote oppervlakte omvat.

2.4.4 Selectieomgeving

Selectie verwijst naar het proces dat veranderingen in de populatiestructuur tot stand brengt door het reduceren en richten van diversiteit. Hoewel niet vaak opgemerkt, is selectie geen specifiek begrip maar functioneert het veeleer als een paraplu-terme die een scala aan betekenissen omvat. Dit volgt uit het feit dat selectie vaak wordt beschouwd als een ex-post en geaggregeerd fenomeen, dat zijn oorzaak vindt in verscheidene micro- en macroprocessen, zoals concurrentie, imitatie en externe verstoringen (bijvoorbeeld economische recessie of een natuurramp). Imitatie wordt soms echter gescheiden van selectie, in welk geval selectie wordt opgevat in de strikte zin van verwijdering ('wegselecteren') van een individu uit de populatie. Wij vatten selectie hier op in brede zin.

De eenheid of het niveau van selectie is binnen de biologie onderhevig geweest aan veel en felle discussies. Een vergelijkbaar probleem doet zich voor binnen de economie. Technologie en bedrijf (organisaties) kunnen worden 'geselecteerd'. Er is dus geen uniek aangrijpingspunt voor selectie maar er zijn meerdere niveaus waarop selectie plaatsvindt (Van den Bergh en Gowdy, 2003). In de zogenaamde 'punctuated equilibrium theory' worden hogere selectieprocessen aangeduid met sorting, tegenover 'differential selection or survival' (Eldredge en Gould, 1972; Somit en Peterson, 1989).

Selectie kent verschillende dimensies. Er is dus geen sprake van een eenvoudige optimalisatie via selectie. Er vindt impliciet een afweging plaats tussen de verschillende selectiefactoren, die tezamen de selectieomgeving vormen:

1. Fysica (bijvoorbeeld thermodynamische grenzen);
2. Technologie (wat is technisch mogelijk, kosten);
3. Geografische kenmerken (inclusief bodem, water, wind en zon);
4. Bedrijfs-interne kenmerken (organisatie);
5. Markten (inclusief relatieve prijzen, en marktmacht van een grote speler);
6. Specifieke condities die R&D beïnvloeden;
7. Instituties en publiek beleid.

Deze factoren kunnen als volgt worden begrepen. Een fundamentele selectiefactor heeft betrekking op de mate waarin tegen fysieke grenzen (1) wordt aangelopen. Bijvoorbeeld thermodynamische efficiëntie is begrensd. Dit geldt evenzeer voor de omzetting van fossiele brandstoffen door verbrandingsmotoren in nuttige bewegingsenergie als voor de doelmatigheid van de transformatie van zonne-energie in elektriciteit door PV-systemen. Deze theoretische grenzen worden in de praktijk nog nauwelijks bereikt. Dit betekent dat andere selectiefactoren op dit moment een belangrijkere rol spelen. De beperkte kennis over alsmede de kosten van hoogwaardige technologie (2) vormen tezamen een zeer belangrijke selectiefactor. Indien een 'technologisch idee' is gerealiseerd maar de technische uitwerking nog niet mogelijk is vanwege te beperkte kennis of technologische ontwikkeling zal de toepassing ervan niet op gang kunnen komen. Selectie geschiedt dus reeds in een (pre-)R&D-stadium. Geografische verschillen (3) in bodem, water (rivieren, getijden), wind en

hoeveelheid zou spelen een rol bij zowel het technische uitvoeren van bepaalde projecten (bijvoorbeeld rondom hernieuwbare energiebronnen) als bij het doorgroeien van een bewezen technologie op grond van acceptatie aan de vraagzijde van de markt. Kenmerken van organisaties (4), met name bedrijven, bepalen mede de selectiedruk. Soms worden deze kenmerken aangeduid met interne (versus de overige externe) selectiefactoren. Indien een organisatie niet flexibel kan reageren op veranderingen in de omgeving of onderhevig is aan een intern conflict betekent dit dat er een spanningsveld ontstaat waardoor overleving van de organisatie in het geding kan komen. Interne selectie in combinatie met een flexibele, adaptieve organisatie kan daarentegen leiden tot het gericht zoeken naar nieuwe ideeën, technieken en producten teneinde een aanpassing aan veranderende omstandigheden te realiseren.

Selectie door markten (5) kan worden onderverdeeld in verschillende soorten, afhankelijk van het doel en het perspectief: productmarkt, intermediaire en inputmarkten, financiële markten en de arbeidsmarkt. De selectie door financiële markten geschiedt via een beoordeling door banken en investeerders van verwachte winstgevendheid van bedrijven en de afgeleide beslissing om al dan niet te investeren of een lening te verstrekken. Producenten van finale producten en diensten voelen selectiedruk vanuit de consumentezijde van de markt. Producenten van intermediaire producten, procesttechnologie en diensten voelen juist selectiedruk vanuit andere, afnemende bedrijven. Succesvolle innovatie vertaalt zich via hogere winsten, betere kwaliteit of lagere prijzen in een groeiend marktaandeel. Marktselectie lijkt in het algemeen sterker aan te grijpen op producten dan processen. De reden is dat proceskosten vaak alleen een indirecte relatie met productkosten hebben en een nog minder directe relatie met productprijzen. Dit geldt met name voor multi-product bedrijven, waarbinnen overheadkosten vaak op een vrij willekeurige wijze worden toegedeeld aan producten. Uiteraard kan de overheid als marktpartij ook een rol spelen in de selectie door markten. De mate van concurrentie speelt uiteraard een belangrijke rol in het (weg)selecteren van alternatieven (producten, bedrijven). Perfecte marktwerking levert in het algemeen de meeste selectiedruk op.

Onderzoek (wetenschap, R&D) (6) heeft zijn eigen specifieke selectiemechanismen. Een belangrijke is de combinatie van beperkte ruimte in gerenommeerde publicatiekanalen, vooral internationale toptijdschriften, in combinatie met 'peer review'. Daarnaast kan men concurrerende scholen waarnemen, zodat zogenaamde groepselectie of selectie op het niveau van groepen een rol kan spelen (Van den Bergh en Stagl, 2003). Op het niveau van private bedrijven is R&D onderhevig aan selectie ten gevolge van concurrentie en effecten op kosten en baten door 'first-mover advantages' (geheimhouding, leercurve) en patenten.

Instituten en publiek beleid (7) kunnen niet alleen de genoemde selectiefactoren beïnvloeden, maar zelf ook als een selectiefactor fungeren. Belangrijke elementen van dergelijk beleid zijn: concurrentiewetgeving (mededinging), regulering gericht op veiligheid (algemeen en arbeid), milieubeleid, regulering van de arbeidsmarkt, sociale verzekeringen, en internationale verdragen. Beleids-, economische en milieufactoren kunnen variëren over de ruimte, hetgeen bijdraagt aan de diversiteit van lokale en nationale selectiedruk. Voorts omvat selectiedruk op economische activiteiten lokale factoren (buren, ruimte, bereikbaarheid, educatie), regionale factoren (infrastructuur, regulering, markten, arbeidsmarkt, recreatie), nationale factoren (cultuur, regulering, publieke goederen) en mondiale factoren (klimaat, internationale markten en internationale verdragen). Instituten omvatten ook de wijze waarop informatie wordt verkregen van, en wordt onderhandeld door, belangenvertegenwoordigers, politici en

technische of wetenschappelijke experts. Het Nederlandse Poldermodel – geïnstitutionaliseerd via overlegorganen en adviesraden – is een goed voorbeeld van een institutionele setting die een belangrijke selectie-invloed uitoefent.

De selectieomgeving is niet noodzakelijkerwijs constant, zodat de evolutie van een systeem en zijn selectieomgeving beschouwd kan worden als een speciaal geval van co-evolutie (zie paragraaf 2.4.7). Zowel markt als niet-markt-selectieomgevingen en – mechanismen kunnen veranderen; bijvoorbeeld door marktconcurrentie, ‘entry and exit’. Selectie op grond van overheidsregulering is ook onderhevig aan verandering. Deels is dit het gevolg van interactie tussen publieke opinie (inclusief ethische normen), media en wetenschap – denk bijvoorbeeld aan de discussies over regulering van genetisch modificeren van organismen.

Selectie is niet deterministisch. Dit is een reden waarom ‘survival of the fittest’ een verkeerde voorstelling van evolutie is. Evenals innovatie is selectie stochastisch van karakter. Potts (2000: p.95-96) zegt: “Selection is a regime, selecting not the most fit or profitable or in some way optimal entity, but selecting a range of tolerably well fit. Selection as a filtering mechanism favours not the fastest, but the sufficiently fast, not the most profitable but the sufficiently profitable.”

2.4.5 Begrensde rationaliteit

Begrensde rationaliteit houdt onder meer in dat bedrijven niet individueel rationeel of optimaal handelen, zoals blijkt uit onderzoek naar onder andere implementatie van energiebesparingsopties (Velthuisen, 1995). Bedrijven handelen veelal routinematig, ook in hun innovatie-gerichte activiteiten. Dit creëert een zekere mate van heterogeniteit tussen zowel bedrijven als sectoren, omdat de routines gebaseerd zijn op eigen, unieke ervaringen. Begrensde rationaliteit impliceert daarmee een grote diversiteit aan strategieën: allerlei vormen van vuistregels, starheden, routines, imperfecte leerprocessen, conflictoplossing en (imperfecte) imitatie van anderen. Merk op dat dit veel verder gaat dan de soms gehanteerde benadering van heterogeniteit binnen de neoklassieke economie: deze richt zich op diversiteit gegeven rationaliteit, dus bijvoorbeeld op verschillen in de mate van vervuiling gerelateerd aan de omvang van de productie; bovendien is de heterogeniteit exogeen verondersteld in plaats van endogeen dynamisch ten gevolge van herhaalde innovatie en selectie. Begrensde rationaliteit is de keerzijde van evolutie en diversiteit. Begrensde rationaliteit draagt bij aan diversiteit, en selectie die hierop inwerkt levert automatismen en routines op.

Begrensde rationaliteit houdt tevens in dat bedrijven een beperkte tijdshorizon hanteren (myopie), en dus niet investeren in zaken die wellicht nodig zijn op lange termijn. Ook hier is sprake van diversiteit onder bedrijven, waarbij sommige bedrijven relatief meer aandacht geven aan investeringen die zich slechts op langere termijn terugbetalen.

Ook gedrag aan de consumentenzijde van de economie wordt gekenmerkt door begrensde rationaliteit, die hier de vorm aanneemt van gewontegedrag en imitatie van anderen (denk aan modeverschijnselen). Het succes van bepaalde consumentenproducten is zeer gevoelig voor de sociale interactie van consumenten. Informatie verstrekt via media en educatie kan ook een grote invloed uitoefenen. Binnen de ‘behavioral economics’, sterk leunend op inzichten uit economische experimenten, bestaat er momenteel veel aandacht voor het effect van groepen en sociale interactie op het gedrag van individuele economische agenten. Hierbij

spelen een aantal sociale ('non-selfish' of 'other-regarding') preferenties en emoties een rol: wederkerigheid, altruïsme, jaloezie, haat, rancune en aversie tegen ongelijkheid. Dit heeft gevolgen voor beleidstheorie. Bijvoorbeeld incentives veranderen indien begrensde rationaliteit op grond van sociale preferenties in acht wordt genomen (Fehr en Gächter, 1998; Fehr en Fischbacher, 2002).

2.4.6 Padafhankelijkheid en 'lock-in' (insluiting)

Binnen de neo-Schumpeteriaanse literatuur over technische evolutie, heeft de notie van *padafhankelijkheid* veel aandacht gekregen. Deze is gebaseerd op het idee dat veranderingen in heterogene populaties worden gekarakteriseerd door toenemende schaalopbrengsten. Deze zijn gebaseerd op verschillende fenomenen, zoals 'learning-by-using', imitatie aan de vraagzijde (mode), netwerkeexternaliteiten (bijvoorbeeld telecommunicatie), informatiele effecten (als een product meer is gekocht dan is het ook bekender bij potentiële kopers), en technische complementariteit (Arthur, 1989).

Toenemende schaalopbrengsten spelen een cruciale rol bij de competitie tussen alternatieve technologieën. Wie door toeval een groter marktaandeel krijgt, heeft een voordeel en kan relatief snel groeien ten koste van concurrenten. De paden naar een bepaalde constellatie van een systeem worden dan relevant, hetgeen typisch het studiegebied van de evolutionaire economie is. Een gevolg van padafhankelijkheid (of toenemende schaalopbrengsten) is dat inefficiënte of ongewenste evenwichten kunnen resulteren waarvan men door de toenemende schaalopbrengsten niet kan weggkomen. Dit wordt 'lock-in' of *insluiting* genoemd. Toevallige historische patronen en gebeurtenissen ('historical accidents') en aanvangscondities kunnen een zeer groot effect hebben, meestal als gevolg van een grote mate van instabiliteit en gevoeligheid. Evolutionaire systemen met veel diversiteit hebben een relatief grote kans om een padafhankelijk proces te volgen, aangezien de grote diversiteit op zichzelf reeds impliceert dat het onwaarschijnlijk is dat een eerder aangedane toestand opnieuw wordt bezocht. Indien de diversiteit afneemt door toenemende schaalopbrengsten van een dominant alternatief kan dit leiden tot insluiting in een toestand met minimale of zelfs een volledig gebrek aan diversiteit. Insluiting betekent dat het zeer moeilijk is om uit een dergelijke situatie weg te komen, aangezien de toenemende schaalopbrengsten dan maximaal in het voordeel werken van het overgebleven alternatief.

Er is veel empirische steun voor het bestaan van insluiting wegens toenemende schaalopbrengsten. Bekende voorbeelden van ingesloten – en veelal suboptimale – technologieën zijn: het QWERTY-toetsenbord, de VHS-videorecorder, de (fossiele) brandstofmotor, en het Windows besturingssysteem. Op een hoger schaalniveau kan de fundamentele afhankelijkheid van energievoorziening en transport van fossiele brandstoffen als voorbeeld van insluiting worden beschouwd. Ook hier doen zich enorme schaalvoordelen, netwerkeffecten (denk aan benzinstations), en technologische complementariteit voor (auto- en elektriciteitsopwekkingstechnologie en gerelateerde R&D zijn bijvoorbeeld in hoge mate afgestemd op fossiele brandstoffen).

Insluiting van een gewenst systeem kan acceptabel of zelfs zinvol zijn, maar een mogelijk nadeel is dat op termijn het systeem minder aantrekkelijk kan worden wegens veranderingen in de algehele omgeving. Door de insluiting is het dan niet mogelijk om een overgang naar een beter systeem te realiseren. Een zekere diversiteit aan kenmerken maakt een systeem

flexibel en garandeert aldus een eenvoudiger overgang naar een nieuwe gewenste situatie. Dit sluit aan bij een algemeen evolutionair principe, namelijk dat diversiteit zichzelf terugbetaalt, omdat het bijdraagt aan 'fitness'-verbeteringen. Systemen die automatisch diversiteit genereren leiden tot betere prestaties op lange termijn. Meer specifiek impliceert deze gedachtelijn met betrekking tot de energievoorziening een streven naar diversiteit aan energiedragers, (vernieuwbare) energiebronnen, en centralisatie en decentralisatie.

2.4.7 Co-evolutie van deelsystemen

Co-evolutie is een begrip dat voortkomt uit de synthese van ecologie en evolutionaire biologie (zie Box 2.1). Het betekent dat een evoluerend systeem selectiedruk uitoefent op een ander evoluerend systeem en aldus veranderingen in diversiteit binnen dat systeem beïnvloedt, en vice versa. Het gevolg is dat de evolutie van het ene systeem samenhangt met die van het andere. Co-evolutie is dus een preciezer begrip dan dynamische interactie, maar wordt wel - ten onrechte - in losse zin gebruikt om interactieve dynamische systemen aan te duiden. Tegenwoordig wordt het ook gehanteerd om een verscheidenheid aan interacties te beschrijven en te verklaren: biologisch/genetisch-cultureel, ecologisch-economisch, productie-consumptie, technologie-preferenties en individu-instituties (Lumsden en Wilson, 1981; Norgaard, 1984 en 1994; Durham, 1991; Gowdy, 1994; Feldman en Laland, 1996; Wilson, 1998). Norgaard (1984) was de eerste die de notie van co-evolutie expliciet toepaste op sociaal-economische systemen. Hij beschouwt co-evolutie als de terugkoppelingen op lange termijn tussen vijf deelsystemen, namelijk kennis, waarden, organisatie, technologie en milieu. Variatie in elk deelsysteem wordt in sterke mate beïnvloed door selectie vanuit de andere deelsystemen, die tezamen de totale omgeving van het respectievelijke deelsysteem vormen. Hij illustreert zijn raamwerk met de interactie tussen ongedierte, de productie en het gebruik van pesticiden, beleid en instituties om pesticiden te reguleren, en kennis en waardering van pesticiden en ongedierte. Campbell (1996: p. 569) merkt op dat de opkomst van de landbouw met de domesticatie van dieren en planten en de daarop volgende cultureel-economische ontwikkelingen kunnen worden beschouwd als een speciale vorm van co-evolutie tussen dieren en planten. Mensen zijn afhankelijk van de gecultiveerde en geselecteerde planten, en de planten zijn op hun beurt afhankelijk van menselijke controle en beheer. Met andere woorden, de een kan niet zonder de ander.

Box 2.1 Co-evolutie in natuurlijke systemen

Co-evolutie is als begrip oorspronkelijk geïntroduceerd binnen de ecologie om de gezamenlijke, interactieve evolutie van vlinders en bloeiende planten te beschrijven (Ehrlich en Raven, 1964). Co-evolutie betekent dat evolutionaire verandering in de ene soort samenhangt met veranderingen in een andere soort. Aanvankelijk werd de term co-evolutie gebruikt op het niveau van soorten, met name om de wederzijdse evolutionaire aanpassingen te verklaren, zoals van parasieten en hun gastheer, roofdieren en hun prooi, en herbivoren en de planten die zij eten. Co-evolutie moet niet worden verward met het biologische concept 'co-adaptation'. Dit laatste duidt op – mogelijk complementaire – veranderingen in informatie op meerdere plaatsen in het genoom als gevolg van selectie. Het beschrijft een simultane evolutie van verschillende kenmerken (morfologisch, fysiologisch en gedragsmatig) binnen een soort. Evolutie in een ecologische context duidt daarentegen op ecologische aanpassing.

Er zijn in beginsel twee basisstrategieën denkbaar voor de groei van populaties en ecologische systemen. Deze strategieën zijn terug te voeren op de bekende logistische curve voor populatiegroei:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(\frac{1-x}{K} \right)$$

Hierbij duidt x de populatieomvang aan en dx/dt de verandering ervan over de tijd. De aangrijpingspunten voor de strategieën zijn de parameters voor intrinsieke groei (r) en de natuurlijke draagkracht (K):

- De *r*-strategie: Produceer zoveel mogelijk nageslacht en pas weinig ouderlijke zorg toe. Dit is typisch voor insecten en amfibieën, die klein zijn, snel geslachtsrijp worden, en een relatief korte levensduur hebben. Eenjarige planten behoren ook hiertoe.
- De *K*-strategie: Produceer weinig nageslacht en pas veel ouderlijke zorg toe. Dit is typisch voor vogels en vooral zoogdieren, die tevens relatief groot zijn, langzaam volwassen worden, en oud kunnen worden.

Dankzij deze dynamica verschillen groeicurven tussen *r*- en *K*-strategen danig. Een populatie van *r*-strategen volgt een exponentieel groeipad, kan zijn natuurlijke draagkracht overschieten en dan instorten, en mogelijk cycli genereren onder instabiele omgevingscondities. *K*-strategen volgen de logistische groeicurve hetgeen in erg stabiele populaties resulteert (maar bij lage niveaus kan de populatie uitsterven). Jonge evoluerende systemen worden veelal gedomineerd door *r*-strategen, die door hun kenmerken perfecte kolonisten zijn. *K*-strategen worden typisch aangetroffen in meer ontwikkelde of geëvolueerde systemen, waarbij een stabiele omgeving een complexer systeem van arbeidsdeling en specialisatie mogelijk heeft gemaakt dat de *K*-strategen kan ondersteunen. Het onderscheid tussen beide strategieën is uiteraard een karikatuur, en de twee kunnen het beste worden beschouwd als relatieve concepten. Meer en minder extreme vormen bestaan, zowel tussen als binnen groepen van soorten. Desalniettemin lijkt evolutie een beweging naar het ene of andere uiterste te hebben gestimuleerd (Putman en Wratten 1984: hoofdstuk 10).

Een specifieke vorm van co-evolutie die veel aandacht heeft ondervonden staat wel bekend als de 'wapenwedloop': kenmerken van soorten reageren positief op elkaar. Bijvoorbeeld snelle roofdieren selecteren snelle prooidieren en vice versa. De langzame prooidieren worden opgegeten en de langzame roofdieren krijgen te weinig voedsel. De snelle roof- en prooidieren zullen meer nageslacht krijgen en beide soorten evolueren naar een grotere snelheid. Enigszins vergelijkbaar is de toename in de omvang van prooidier-populaties, om zo (individueel) beter beschermd te zijn tegen roofdieren. Dit leidt tot selectie van grotere roofdieren. Tenslotte is ook de omvang van de hersenen van prooi- en roofdieren onderhevig aan wederzijdse selectie, aangezien deze de vaardigheid van zowel jagen als het vermijden van roofdieren in positieve zin beïnvloedt (Strickberger 1996: pp. 399 en 429).

Co-evolutie betekent feitelijk dat mensen hun omgeving niet beheersen en veranderen teneinde vooraf gestelde doelen te bereiken, maar dat natuur en menselijke samenleving worden gevormd in een gezamenlijke, interactieve ontwikkeling waarbij doelen invloed kunnen hebben maar zeker niet allesbepalend zijn. Noties als vooruitgang en planning verliezen aan geloofwaardigheid in de context van co-evolutie, en kunnen beter worden vervangen door noties als verandering en aanpassing door experiment en selectie. Er is een flink aantal voorbeelden van co-evolutie met sociaal-economische aspecten voorhanden (Durham, 1991; Boyd en Richerson, 1985; Ofek, 2001; Galor en Moav, 2002):

- De frequentie van sikkelcel-anemie (een bloedziekte) onder volkeren in West Afrika blijkt afhankelijk te zijn van de wijze waarop zij in hun bestaan voorzien. Het omhakken van bomen is bevorderlijk voor het cultiveren van yamswortel, maar hierdoor ontstaan poelen van stilstaand water waarin muggen goed gedijen. Deze muggen dragen malaria over aan mensen. Selectie van sikkelcelanemie vindt vervolgens plaats omdat deze bescherming biedt tegen malaria.
- De opkomst van de landbouw met dierlijke melkproducten zorgde voor een selectieomgeving waarin het aandeel van individuen met genen die ervoor zorgen dat lactose-opname mogelijk is kon toenemen.
- Het leven in dichtbevolkte samenlevingen met gedomesticeerde dieren zoals koeien, varkens en schapen heeft geresulteerd in besmettelijke ziekten, en uiteindelijk na massale sterfte (onder andere zwarte dood) weerstand ertegen.

Durham (1991) biedt een algemene classificatie van co-evolutie van genen en cultuur, die wellicht model kan staan voor een meer algemene toepassing van co-evolutie op deelsystemen van een evoluerend systeem:

- *Genetic mediation*: genetische veranderingen beïnvloeden culturele evolutie;
- *Cultural mediation*: culturele veranderingen beïnvloeden genetische evolutie;
- *Enhancement*: culturele veranderingen versterken natuurlijke evolutie;
- *Opposition*: culturele verandering gaat tegen natuurlijke evolutie in (maakt deze gedeeltelijk ongedaan).

Hoewel dit een classificatie betreft waarbij genetische evolutie een rol speelt, biedt het inspiratie voor een toepassing in de richting van co-evolutie van kennis, samenwerking, technologie en economie. Daarbij staat voorop dat economische ontwikkeling niet een statische toestand is maar een continu veranderende werkelijkheid vertegenwoordigt, waarbij allereerst economische en ecologische domeinen co-evolueren, met name in ruimtelijke zin. Beleid kan daardoor over de tijd minder effectief worden, bijvoorbeeld omdat het ecologisch systeem zich aanpast aan de selectiedruk vanuit het economisch systeem (denk aan de pesticide case van Norgaard hierboven). De essentie van co-evolutionaire analyse is dit soort evolutionaire terugkoppelingen bloot te leggen. Hoewel sturing van het systeem niet mogelijk is kan aldus beter worden geanticipeerd op reacties van deelsystemen en in het verlengde hiervan de mogelijke dynamische patronen van het totale co-evoluerende systeem.

2.5 Integratie van de evolutionaire concepten

In dit hoofdstuk is een korte inleiding tot de evolutionaire economie geboden. Deze kent een lange doch gefragmenteerde historie. De diversiteit aan concepten, specifieke theorieën en toepassingen is groot. De twee belangrijkste stromingen zijn de neo-Schumpeteriaanse school, met veel aandacht voor technologie, en de evolutionaire speltheorie die een brug tussen evenwichtsdenken (neoklassieke economie) en evolutie slaat door de aandacht te richten op herhaalde selectie resulterend in evenwicht. De evolutionaire groeitheorie onderscheidt zich in een aantal opzichten van de populaire endogene (neoklassieke) groeitheorie, terwijl er ook een aantal overeenkomsten zijn.

Evolutie is een concreet proces met als kernelementen diversiteit, innovatie en selectie. Innovatie vermeerderd en selectie vermindert de bestaande diversiteit. Diversiteit stimuleert op haar beurt innovatie, met name via (re)combinaties. Selectie is tevens afhankelijk van de interne diversiteit van de beschouwde populatie.

De in de vorige paragraaf gemaakte scheiding tussen de centrale concepten diversiteit, innovatie, selectieomgeving, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie betekent een vorm van reductionisme die als typisch nadeel heeft dat zaken die met twee of meer van deze concepten te maken hebben enigszins willekeurig een plaats krijgen. Tevens verklaart een reductionistische aanpak waarom bepaalde zaken bij meerdere concepten genoemd zijn. Een poging tot een synthese van de belangrijkste concepten resulteert in het schema zoals getoond in Figuur 2.1. Pijlen in het schema duiden invloeden van een element of set van elementen op andere elementen aan. Het moge duidelijk zijn dat het resulterende, door evolutie gedreven systeem complex en verre van triviaal is. Dit betekent onder andere dat het volledig doorgronden ervan moeilijk is, alsmede dat het zo nauwkeurig mogelijk voorspellen of doorrekenen van bepaalde veranderingen een formele modelbenadering vereist. Intuïtie schiet hier tekort.

Evolutie binnen de economie heeft betrekking op technologie, organisaties en instituties. Het gaat dus niet alleen om technologische variatie. Wat betreft het gedrag van economische agenten wordt uitgegaan van begrensde rationaliteit, die zich uit in onder andere gewoontegedrag, routines van bedrijven, imitatie van anderen, en korte ruimtelijke en tijdshorizonnen. Het niet-rationeel gedrag van individuen en organisaties impliceert een grote variatie aan gedragsvormen aangezien een representatieve of uniforme rationale agent niet langer opgaat. Een dergelijke diversiteit onderstreept eens te meer de relevantie van evolutionair-economische analyse.

Selectiedruk moet niet worden opgevat als een eenduidig of een-dimensionaal begrip maar dient te worden gezien als gebaseerd op een rijke waaier van selectiefactoren. Dit omvat fysische, technologische, geografische, bedrijfsinterne, markt-, en institutionele dimensies. Waar de marktdimensie een overheersende rol speelt in de traditionele economische theorie, worden binnen de evolutionaire economie alle selectiefactoren in gelijke mate meegenomen in analyses. Deze factoren kunnen aangrijpingspunten voor beleid vormen dat erop is gericht via beïnvloeding van de selectiedruk ontwikkelingen in een bepaalde richting te sturen. Beleid kan daarnaast ook direct een selectie-Invloed uitoefenen, namelijk via wet- en regelgeving op allerlei terreinen (arbeid, milieu, veiligheid, etc.), op grond waarvan specifieke keuzes door

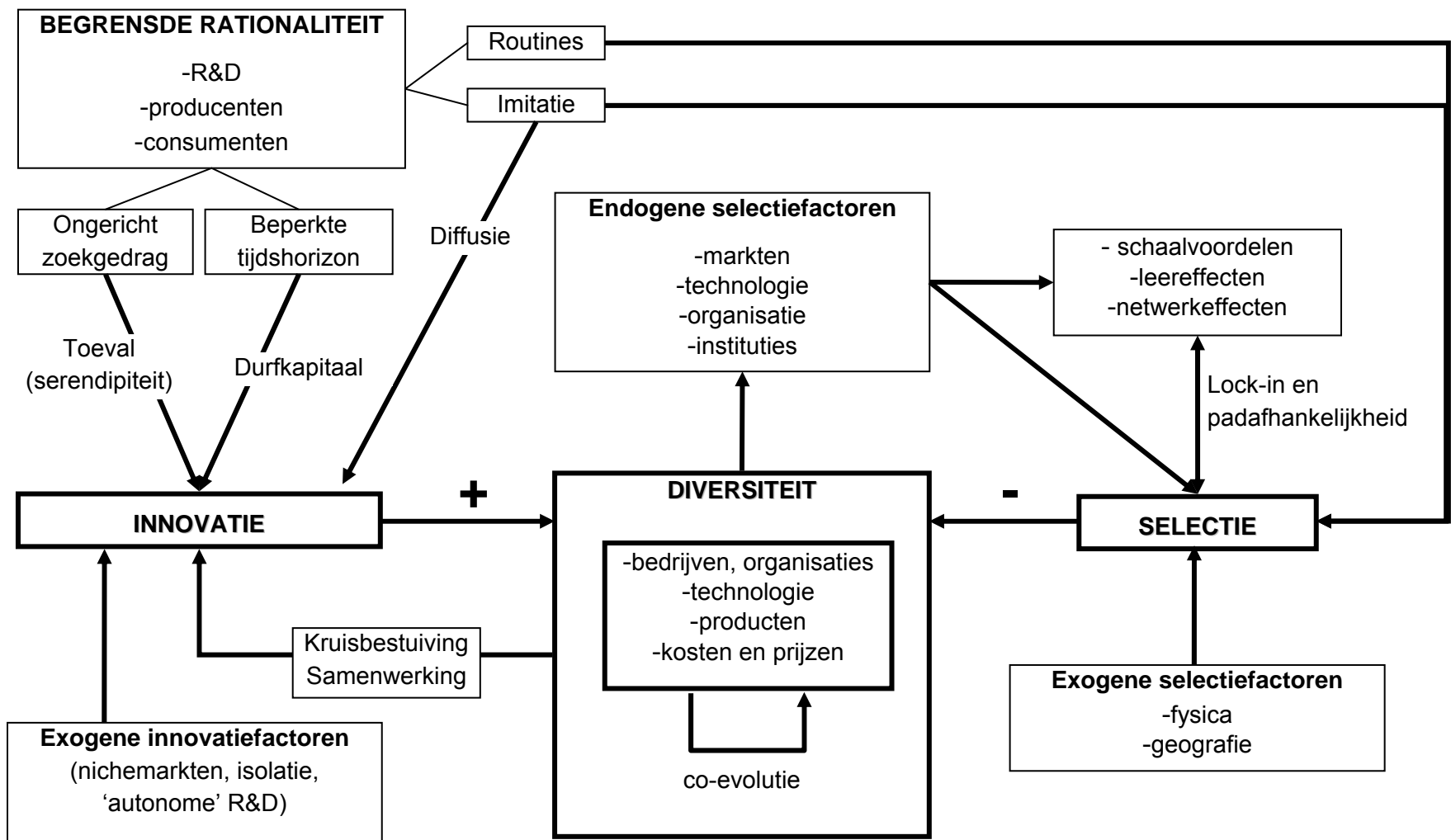
economische agenten worden geselecteerd of afgedwongen. Dit impliceert een endogene selectiedruk. Maar selectiedruk kan tevens autonoom veranderen, namelijk doordat de populatie over de tijd verandert als gevolg van innovaties en herhaalde selectie. Hoe dan ook, veranderingen van selectiedruk over de tijd zijn onvermijdelijk.

Innovaties nemen verschillende vormen aan. Incrementele veranderingen kunnen worden gezien als het resultaat van geïsoleerde mutaties, leerprocessen of gericht zoeken (R&D). Radicale innovaties komen vaak tot stand via kruisbestuiving en niet eerder uitgeprobeerde combinaties van bestaande concepten, technologie of organisatie. Serendipiteit kan hierbij een rol spelen. Daarnaast kunnen systematisch zoeken (R&D, wetenschap), veel uitproberen en samenwerken de kans op innovatieve combinaties vergroten. Een zekere mate van isolatie is nuttig omdat daardoor unieke paden kunnen worden ingeslagen die buiten de invloed van dominante technologie en denkwijzen blijven. Nichemarkten zijn een praktische uitwerking hiervan. Op bedrijfsniveau is durfkapitaal nodig om dergelijke nieuwe paden te kunnen inslaan. (Re)combinaties varen wel bij variatie. Verspilling moet worden gekoesterd: zonder verspilling geen innovatie, en te weinig verspilling kan duiden op te weinig innovatie.

Padafhankelijkheid en lock-in zijn de resultanten van op elkaar inwerkende selectie- en innovatiekrachten. Padafhankelijkheid betekent dat vroege ontwikkelingsfasen een onomkeerbare invloed uitoefenen op latere ontwikkelingen van een systeem. Daardoor kunnen toevallige gebeurtenissen ('historical accidents') in een vroegtijdig stadium in sterke mate de kenmerken van een systeem op lange termijn bepalen. In het jargon van de traditionele economie betekent dit dat er meerdere evenwichten bestaan, en dat het uiteindelijke evenwicht waarin een systeem belandt puur toeval is. Voor een begrip van dit evenwicht, alsmede voor beleid gericht op beïnvloeding of correctie ervan, zijn de paden ernaar toe van belang. Deze worden gekenmerkt door toenemende schaalopbrengsten aan de vraag- en aanbodzijde, ofwel in minder technische bewoordingen, zelfversterkende mechanismen. Een mogelijk en waarschijnlijk resultaat hiervan is een inefficiënt of anderszins ongewenst evenwicht, een lock-in van waaruit men niet kan ontsnappen.

Tot slot kan co-evolutie van systemen een bruikbaar concept opleveren voor het nadenken over complexe processen waarbij deelsystemen en evolutionaire mechanismen een rol spelen. Een voorwaarde daarbij is dat co-evolutie niet losjes wordt geïnterpreteerd als interactie tussen systemen, maar als interactie van evolutionaire processen binnen twee of meer systemen. De literatuur bevat een groot aantal inspirerende ideeën over mechanismen en consequenties van co-evolutie. Co-evolutie kan worden gezien als een dynamische uitwerking van het begrip innovatieve combinatie, waarbij complementaire en interactieve deelsystemen over de tijd heen veranderen en mogelijk beter op elkaar worden afgestemd.

Figuur 2.1 Een synthese van de belangrijkste evolutionaire concepten



3 Evolutionair milieu- en transitiebeleid

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de evolutionaire concepten en inzichten uit het vorige hoofdstuk worden vertaald naar het milieu- en transitiebeleid. Voor het illustreren van te hanteren principes en instrumenten richten we ons met name op de transitie naar een duurzame energievoorziening. De complexiteit van het energiesysteem betekent dat een grote variatie aan toekomstbeelden kan worden geschetst, op basis van alle relevante combinaties van elementen, zoals (de)centralisatie, energiebron, energiedrager, technologie en mate van systeemintegratie. Vanuit die toekomstbeelden kan vervolgens worden teruggewerkt naar trajecten, en van daaruit naar beleid gericht op innovatie en selectieomgeving.

Het begrip transitie vindt zijn oorsprong in de populatiedynamica en sluit daarmee goed aan op de evolutionaire concepten die in dit rapport gehanteerd worden (zie ook Kemp, 1997; Rotmans e.a., 2001; Geels, 2002a; Geels, 2002b). Een maatschappelijke transitie kan gedefinieerd worden als “een gradueel continu proces van maatschappelijke verandering, waarbij de maatschappij (of een complex deelsysteem daarvan) structureel van karakter verandert” (Rotmans e.a., 2000). Transities zijn dus eigenlijk *systeemveranderingen*. Een aantal kenmerken van maatschappelijke en technologische transities komt regelmatig terug in de literatuur over duurzaamheid en technologische verandering (Faber en Van Welie, 2004).

Een eerste belangrijk concept daarbij is de levenscyclus. Deze omvat de temporele fasen voorontwikkeling, take-off, versnelling en stabilisatie. Daarnaast speelt de transitie zich meestal af op meerdere schaalniveaus. Hierbij worden macro- (‘landschap’), meso- (‘regime’) en microprocessen (‘niches’) onderscheiden. Daarnaast bestaan er ‘majeure’ naast ‘mineure’ transities. Bij het eerste type kan men bijvoorbeeld denken aan de uitvinding door mensen van het ontsteken en instandhouden van vuur, het ontstaan van de landbouw en sedentaire samenlevingen, en de Industriële Revolutie. Het tweede type omvat veranderingen binnen elk van deze ‘regimes’, zoals de overschakeling van steenkool naar aardgas en de groene revolutie in de landbouw; de transitie naar een geëlektrificeerde wereld, de opkomst van de auto en de ontwikkeling van massaproductie zitten wellicht op de scheiding van majeure en mineure. Van meer recent ingezette veranderingen zoals op het gebied van ICT en gen-technologie is nog niet duidelijk wat de reikwijdte is en dus of er sprake is van een majeure dan wel mineure transitie. Een belangrijk onderscheid is tot slot autonome versus gestuurde en bedoelde transities, zoals respectievelijk de Industriële Revolutie en de overschakeling van steenkool naar aardgas in Nederland. Vrijwel altijd gaat een meer gestuurde transitie gepaard met een kleinere omvang en reikwijdte. De transitie in het kader van duurzame ontwikkeling is een gestuurde transitie met een duidelijk doel (duurzaamheid) waaraan echter op verschillende wijze invulling kan worden gegeven.

Transitiebeleid of -management wordt gezien als het aanjagen, sturen van leerprocessen (al doende leren en al lerende doen), als het openhouden van opties, als multi-actor en multi-domein gericht, en als gemotiveerd door een lange termijn interval doel (Rotmans e.a., 2000).

Transitiebeleid is inhoudelijk dus breder dan milieubeleid, energiebeleid en technologiebeleid.¹ Wat dient te veranderen is ook veel meer dan technologie: kennis (op individueel en publiek niveau), gedrag, organisaties (inclusief netwerken) en instituties (inclusief markten), en al deze zaken op verschillende schaalniveaus, van lokaal tot internationaal. De overheid dient het aan te sturen, maar zeker niet te plannen.

De benadering die in het navolgende wordt geschetst wijkt af van de *neoklassieke benadering* van publiek (milieu)beleid (zie Box 3.1). Allereerst geldt dat dynamische diversiteit, inclusief de drie dimensies variatie, balans en ongelijksoortigheid (zie paragraaf 2.4.2), geen duidelijke plaats hebben binnen de neoklassieke economie. Hierdoor kan dus ook niets worden gezegd over beleid gericht op dynamische processen die het gevolg zijn van een interactie tussen innovatie en selectie, die elk de dimensies van diversiteit beïnvloeden en veranderen. Een belangrijk inzicht van de evolutionaire economie is dat het nastreven van diversiteit evolutionaire verbetering en dus baten met zich meebrengt, en niet zoals de neoklassieke economie zou stellen alleen maar kosten oplevert. Hier is dus een subtiele impliciete of kwalitatieve en daarmee intuïtieve kosten-baten afweging nodig. Niet de beste optie op korte termijn willen selecteren maar diverse portefeuilles stimuleren is de implicatie ervan. Kosten-baten analyses zonder meeneming van de dynamiek van diversiteit, zoals gebruikelijk is binnen de traditionele economie, bieden een onvolledig beeld van de baten en frustreren daardoor mogelijke verbeteringen ten gevolge van evolutionaire processen.

Diversiteit is een begrip dat goed aansluit bij het idee van duurzame ontwikkeling. Dit geldt evenzeer voor de notie van biodiversiteit als voor noties als culturele, economische en technologische diversiteit. Volgens Stirling (2004) ligt hier een veld van onderzoek open, en is het verrassend dat de literatuur over duurzame ontwikkeling en die over technologie en diversiteit nog zo weinig tot elkaar zijn gekomen. Een uitzondering hierop vormt de discussie over diversiteit en veerkracht ('resilience') in de ecologische economie (zie bijvoorbeeld Gunderson en Holling, 2002). Diversificatie in brede zin kan inderdaad als sleutelbegrip dienen om beleid gericht op duurzaamheid te karakteriseren.

In het verlengde hiervan bieden ook de andere centrale evolutionaire concepten, zoals genoemd in Tabel 2.1, onderscheidende kenmerken voor de evolutionaire economie ten opzichte van de neoklassieke economie: diversiteit, bepaalde aspecten van innovatie, de selectieomgeving, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie. Paragraaf 3.3 gaat hier systematischer op in. Begrensde rationaliteit betekent dat de aannames over gedrag van economische agenten (bedrijven en huishoudens) in de traditionele economische theorie van milieubeleid (Box 3.1) niet opgaan en dus correctie behoeven (voor specifieke suggesties, zie paragraaf 4.6). In het algemeen komt dit erop neer dat de noties van optimaliteit en efficiëntie veel minder steun vinden binnen de evolutionaire economie.

Een belangrijke suggestie van de neoklassieke beleidstheorie is dat prijzen correct dienen te zijn, dat wil zeggen dat prijzen alle sociale kosten – de som van private en externe kosten – dienen te representeren. Een belangrijk algemeen inzicht van de evolutionair-economische benadering is de suggestie dat correcte prijzen noodzakelijk maar onvoldoende zullen zijn om te ontsnappen uit een evolutionaire situatie van padafhankelijkheid en insluiting (zie paragraaf 2.4.6). Dit suggereert dat de beide benaderingen tot op zekere hoogte complementaire inzichten verschaffen.

¹ Zie voor een dieper gaande beschrijving van deze beleidsterreinen hoofdstuk 3.

Box 3.1 Neoklassieke milieubeleidstheorie en de neoklassieke visie op transities*Neoklassieke milieubeleidstheorie*

De economische theorie van milieubeleid start vanuit de notie van 'negatieve externaliteiten' of 'externe kosten', die kunnen worden gedefinieerd als de invloed van de beslissing door een economische agent op de welvaart of productie (en dus winst) van een andere agent, gegeven dat deze invloed geschiedt buiten de markt (dus een direct fysiek effect) en ongecompenseerd blijft (Baumol en Oates, 1988). De aanwezigheid van externaliteiten – die vanwege thermodynamica en schaarse ruimte veeleer regel dan uitzondering is – impliceert dat individuen geen volledige controle over de verzameling van factoren hebben die hun productie of welvaart beïnvloeden. Het veld van de milieueconomie richt zich op negatieve milieugerelateerde externaliteiten, zoals negatieve fysieke effecten van milieuvervuiling, en op het gebruik van natuurlijke hulpbronnen.

Het is goed te beseffen dat de notie van een externaliteit op zichzelf niet typisch neoklassiek-economisch van aard is, en ook geen neoklassiek-economische analyse vereist. Externaliteiten zijn echter voornamelijk analytisch onderzocht met behulp van partiële en algemene evenwichtstheorieën uit de neoklassieke economie. Deze theorieën gaan uit van rationeel gedrag van individuen en bedrijven. Externe effecten verstoren de werking van markten, en leveren een uitkomst op die afwijkt van een sociaal welvaarts optimum. De analyse van economische instrumenten van milieubeleid is overwegend gebaseerd op (comparatieve) statica en statische evenwichten. Veranderingstrajecten krijgen sporadisch aandacht.

Instrumenten van milieubeleid worden traditioneel beoordeeld op basis van hun efficiëntie kenmerken – optimale sociale welvaart, Pareto-efficiëntie of kosteneffectiviteit (Baumol en Oates, 1988). Effectiviteit (de mate van zekerheid dat het beoogde resultaat wordt bereikt) en verdelingsaspecten (billijkheid, rechtvaardigheid) komen als criteria op een tweede plaats. De meest gebruikelijke (archetypische) vergelijking is tussen uniforme standaarden en heffingen om vervuiling tegen te gaan. Heffingen zijn aantrekkelijk omdat ze betere prikkels geven dan standaarden om individueel gedrag te veranderen, en dus meer doelmatige (efficiënte) uitkomsten genereren: ofwel sociale welvaart valt hoger uit ofwel de kosten van gegeven emissiereductiedoelen vallen lager uit. Het bekendste prijsinstrument is de Pigovianse heffing of belasting, welke gelijk is aan de marginale externe kosten van vervuiling in het (hypothetische) optimale evenwicht. Standaarden ('command-and-control') zijn vooral aantrekkelijk bij extreme externe kosten (toxische stoffen) en grote onzekerheid, vanwege hun effectiviteit. Een instrument dat eigenschappen van standaarden en heffingen combineert is een systeem van verhandelbare rechten. Dit heeft twee kenmerken: een plafond is opgelegd aan alle vervuilende emissies van een bepaald type door een beperkte hoeveelheid emissierechten toe te kennen; en deze rechten zijn verhandelbaar. Het eerste kenmerk zorgt ervoor dat er een bovengrens is aan de totale emissies (nationaal, regionaal of sectoraal). Het tweede kenmerk garandeert flexibiliteit en doelmatigheid op het niveau van individuele agenten, zodat de marginale kosten van vervuilingreductie gelijkgeschakeld worden over alle vervuilers (en gelijk zijn aan de evenwichtsprijs van een vervuilingsrecht). Naast prijsinstrumenten en standaarden is toekenning van eigendomsrechten mogelijk (de zogenaamde Coase-oplossing). Onder strikte voorwaarden (weinig vervuilers en slachtoffers, goedkope toegang tot het rechtssysteem) wordt dit beoordeeld als een doelmatige oplossing. Bovendien blijkt de initiële verdeling van de rechten over vervuilers en slachtoffers onafhankelijk te zijn van de resulterende doelmatigheid.

Het is de vraag of de neoklassieke milieubeleidstheorie veel invloed heeft (gehad) op de praktijk van milieubeleid. Hoewel economen sinds de jaren zeventig het gebruik van economische ('market-based') instrumenten hebben bepleit, is van deze adviezen toch weinig gebruik gemaakt (Opschoor e.a., 1994). Hiervoor zijn twee belangrijke redenen te geven. Allereerst is de politieke besluitvorming erg gevoelig voor specifieke belangengroepen (zie een economische analyse door Dietz en Vollebergh, 1999). Voorts is de internationale concurrentiepositie in het geding wanneer zulk beleid unilateraal wordt uitgevoerd.

De neoklassieke visie op transities

Wat zegt de traditionele, neoklassieke economie over transitiebeleid? Ze suggereert elementen om een gelijk speelveld te realiseren. Deze elementen omvatten ondermeer het internaliseren van de externe kosten van milieudruk alsmede van de positieve externe effecten van innovatie, en het zorgen voor voldoende concurrentie. De evolutionaire economie voegt daar een aantal belangrijke elementen aan toe, zoals de rol van diversiteit of opties open houden, leercurve-effecten, padafhankelijkheid en selectieomgeving. Conceptueel kan de analyse of het ontwerp hiervan worden beschouwd als een afweging van enerzijds opties open houden (diversiteit garanderen en benutten) en anderzijds schaalvoordelen genieten van een dominante technologie-organisatiestructuur.

Twee specifieke onderdelen van de neoklassieke economie werpen enig licht op transities. Allereerst biedt de (algemene en partiële) evenwichtsanalyse een raamwerk waarmee sectorale verschuivingen ten gevolge van exogene factoren, bijvoorbeeld technologieverandering of beschikbaarheid van natuurlijke hulpbronnen, alsmede de graduele vervanging van een oude, obsoleete door een nieuwe, winstgevendere techniek kunnen worden geanalyseerd. Het laatste geschiedt bijvoorbeeld met jaargangmodellen van kapitaal. Deze analyse beperkt zich wel tot verschuivingen die via markten, kosten en relatieve prijsverschillen lopen. Daarnaast is de economische (exogene en endogene) groeitheorie gebruikt om vragen over technologie, R&D en investeringen in 'human capital' (kennis en vaardigheden) te beantwoorden. De belangrijkste tekortkomingen van beide benaderingen zijn dat uitgegaan wordt van rationele representatieve agenten, lock-in wordt veronachtzaamd (een uitzondering is Hofkes en Gerlagh, 2002), en innovaties slechts impliciet en in het ergste geval exogeen worden beschreven (zie ook paragraaf 2.3). De hoop is dan alleen nog gericht op endogene groei modellen, waarin nieuwe technologie wordt beschreven als resultante van R&D investeringen. Deze modellen bieden echter vanwege hun hoge abstractieniveau betrekkelijk weinig informatie over de inhoud en onderliggende factoren van transities (zie ook Den Butter en Hofkes, 2004). Diversiteit van technologieën speelt al helemaal geen rol binnen dit soort modellen.

3.2 Evolutionair-economische analyse van milieubeleid en beheer van natuurlijke hulpbronnen

Hoewel schaars, zijn er een aantal voorbeelden in de literatuur te vinden waar evolutionair-economische theorie en modellen zijn gecombineerd met vragen en problemen binnen de milieueconomie. Voor meer volledige overzichten zie Van den Bergh en Gowdy (2000) en Van den Bergh (2004).

De evolutionaire economische theorie veronachtzaamt milieu- en hulpbrondimensies. De *synthese van milieueconomie en evolutionaire economie* is dan ook van recente datum. Belangrijke perioden en fasen uit de economische geschiedenis kunnen niet goed begrepen worden zonder een beroep te doen op milieu- en hulpbronfactoren. Het veld binnen de economische wetenschap dat zich op deze factoren richt, de milieueconomie, wordt echter gedomineerd door neoklassieke evenwichtsbenaderingen (zie Box 3.1). Dit geldt voor drie kerntheorieën, te weten van milieubeleid, monetaire waardering, en exploitatie en beheer van natuurlijke hulpbronnen. De recente aanvaarding van de notie 'duurzame ontwikkeling' heeft iets meer nadruk op een lange termijn perspectief opgeleverd, hetgeen gemakkelijk kan worden beschouwd als een uitnodiging om evolutionaire perspectieven toe te passen, met

name om de complexe rol van structurele en technische veranderingen in het conflict tussen economische groei en milieubehoud te onderzoeken (Mulder en Van den Bergh, 2001; Gowdy, 1999). Norgaard (1985) stelt voor om het van origine biologische begrip co-evolutie als een gezamenlijke en interactieve evolutie van natuur, economie, technologie, normen, beleid en andere institutionele structuren op te vatten (zie paragraaf 2.4.7). Gowdy (1994) combineert een vergelijkbare visie met macro-evolutionaire elementen, hetgeen economische evolutie en interacties met milieu en natuur voorstelt als een proces op meerdere schalen (zie tevens Van den Bergh en Gowdy 2003).

Nicholas Georgescu-Roegen (1971) benadrukte de onomkeerbaarheid van lange termijn economische ontwikkelingen vanuit het perspectief van de *entropiewet* van de thermodynamica. Voorts suggereerde hij het begrip 'exosomatische ontwikkeling' van mensen, waarmee hij bedoelt het systematisch gebruik van instrumenten en technologie, als een stap in de evolutie van de mens om zijn biologische, endosomatische (lichamelijke) tekortkomingen te overwinnen. Drie technische, exosomatische innovaties beschouwt hij als cruciaal ('Promethean') voor belangrijke veranderingen in de wijze van economische activiteit over de geschiedenis: beheersing van vuur, landbouw en de stoommachine (Mesner en Gowdy, 1999). Hoewel zijn werk soms wordt gekenschetst als 'bioeconomic', kan het niet worden beschouwd als echt evolutionair, aangezien het specifieke evolutionaire mechanismen en concepten (diversiteit, selectie) ontbeert.

Vanuit een vergelijkbare achtergrond, namelijk economie gecombineerd met zorg over het milieu, trachtte Kenneth Boulding (1966, 1978, 1981) om economische methoden te veranderen door ecologische en evolutionair-biologische analogieën te hanteren, zoals ecologisch evenwicht, ecologische stabiliteit, homeostase, en populatie. Boulding (1966) benadrukt, zoals Hayek, dat evolutionaire economie zich zou moeten richten op de verandering in kennis. Ook hier stelt hij een analogie met de biologie voor, namelijk het onderscheid tussen genotype en fenotype (later uitgewerkt door Faber en Proops, 1990). Potts (2000: p. 58) bekritiseert deze nadruk op kennis als ineffectief, omdat het de vraag oproept: "What, then, is knowledge?" Boulding was de eerste die uitgebreid schreef over economische evolutie vanuit een systeemperspectief (1981), en legde ook al vroeg een relatie met milieuproblemen (1978).

Er zijn tot dusver slechts weinig concrete modellen waarbij de koppeling tussen economie, milieu en evolutie wordt gelegd. Munro (1997) heeft evolutionaire elementen toegevoegd aan het standaard probleem van de *exploitatie van een vernieuwbare hulpbron*. Zijn motivatie is dat exploitatie niet alleen van invloed is op de omvang van de hulpbron maar ook op zijn kwaliteit, dat wil zeggen de samenstelling in genetisch opzicht. Voorbeelden zijn monoculturen en het gebruik van pesticiden, herbiciden of fungiciden in de landbouw, het gebruik van netten met een bepaalde maasgrootte in de visserij, de periode gedurende het jaar van vissen (waarbij er bijvoorbeeld veel of weinig jonge en dus kleine vissen zijn), het beheer van grondwater in ecosystemen, beheersing van branden in natuurgebieden, en gebruik van antibiotica in de geneeskunde. De *genetisch-selectieve effecten* van hulpbrongebruik en vernietiging van habitats biedt tevens een relatie met de zorg om biodiversiteitsverlies. Munro formuleert een dynamisch optimaliseringsmodel dat uitgaat van het idee dat het gebruik van insecticiden de fitness van resistente insecten ten opzichte van vatbare concurrenten in de populatie verhoogt. Het optimale gebruik van insecticiden hangt af van de evolutionair-selectieve dynamiek van het systeem. In vergelijking hiermee is het traditionele optimale plan, dat evolutie negeert, kortzichtig, ofwel het leidt tot een te hoog niveau van

pesticidegebruik dat zich op termijn tegen zichzelf keert. Noailly (2003, hoofdstuk 5) breidt het model uit naar een co-evolutie met een populatie van boeren die verschillende strategieën van pesticidengebruik hanteren, en anderen imiteren indien deze beter presteren.

Veel aandacht is geschonken aan het risico van overexploitatie van ‘common property’ (gemeenschappelijke eigendom) of ‘common-pool resources’, zoals sommige vispopulaties in open wateren. Hoewel ‘common property’ vaak wordt verward met vrije toegang (‘open access’), alwaar overexploitatie zeer waarschijnlijk is, doet zich ook bij ‘common property resources’ het risico van overgebruik voor. In het bijzonder hangt het risico af van het type regime dat geldt, en kan daarom van situatie tot situatie verschillen. Een fundamentele vraag is of het zinvol is om te reageren op conflicten over schaarse hulpbronnen en overexploitatie in de vorm van strikte publieke regulering door overheden op een hoger niveau (op afstand), of dat in plaats hiervan het beter is om te vertrouwen op een endogene, spontane vorming van gebruiksregimes. Een evolutionair perspectief kan worden gehanteerd om de tweede optie te analyseren. Het idee is hierbij dat zulke regimes alleen dan kunnen ontstaan als zij in voldoende mate worden gesteund door de individuen die erin participeren of eraan onderhevig zijn. Met andere woorden, een unieke sociale norm moet evolueren. Veel bijdragen aan de literatuur hierover suggereren dat extern opgelegde regels en controle contraproductief kunnen uitwerken, doordat zij samenwerking en interactie reduceren en destabiliseren, of zelfs volledig vernietigen. In plaats hiervan heeft het de voorkeur om een norm te ondersteunen door communicatie tussen de gebruikers van de hulpbron. Als monitoren imperfect is vallen de resultaten van centrale regulering zelfs nog slechter uit, en heeft het stimuleren van normen door communicatie zeker de voorkeur. Externe regulering is alleen dan wenselijk als een effectief systeem van monitoren en sancties kan worden geïmplementeerd.

Evolutie van normen is een vorm van zelforganisatie, die in zijn meest fundamentele eigenschappen nog steeds niet goed wordt doorgrond. De omvang van een groep van exploitanten bijvoorbeeld lijkt van belang voor de zelforganisatie en stabiliteit van een geëvolueerd regime, maar het is niet duidelijk welke factoren precies van invloed zijn op de kritieke omvang van de populatie waarbij al dan niet stabiele samenwerking of complexe sociale organisatie en instituties zullen optreden. Bij het laatste moet men denken aan specifieke normen, groepsvorming, of zelfs het ontstaan van hiërarchie en complexe wetgeving. Wijzigingen in bepaalde parameters, zoals de prijs van de output van de hulpbronexploitatie of regels die worden opgelegd door een externe regulator, kunnen leiden tot instabiliteit van een evolutionair regime. In het geval van regelgeving kunnen de normen eroderen, hetgeen uiteindelijk uitputting van de hulpbron tot gevolg kan hebben. Een regime kan ook kapot gaan doordat exploitatietechnologie productiever wordt (technische vooruitgang), of doordat de prijs stijgt (Ostrom, 1990). Dit kan een element of een begin aanduiden van een transitie naar een nieuw gebruiksregime. Deze problemen zijn onderzocht met een breed scala aan methoden, waaronder evolutionaire speltheorie (Sethi en Somanathan, 1996; Noailly e.a., 2003) en multi-agent modellen (Noailly, 2003: hoofdstuk 4), laboratoriumexperimenten en empirische veldstudies.

De voorbeelden hierboven suggereren dat milieu (en resource) economen reeds enkele pogingen hebben ondernomen om een brug met de evolutionaire economie te slaan. Deze voorbeelden blijken echter schaarse uitzonderingen te zijn. In het algemeen kan men rustig stellen dat de milieueconomie de evolutionaire economie heeft genegeerd, en vice versa.

3.3 Uitgangspunt: diversiteit en gelijk speelveld

Een aantal principes uit de evolutionair-economische theorie kan worden toegepast in de voorbereiding of beoordeling van het milieubeleid. Deze principes hangen samen met de in hoofdstuk 2 geïntroduceerde kernbegrippen diversiteit, innovatie, selectie, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie (zie Tabel 2.1). *Diversiteit* is reeds uitvoerig besproken in paragraaf 2.4.2 en begrensde rationaliteit komt uitvoerig aan de orde in de paragrafen 2.4.5 en 3.6. De andere kernbegrippen worden hier kort toegelicht vanuit een beleidsachtergrond.

Innovatie heeft vele gezichten. Het is vaak het resultaat van het combineren van zaken die tezamen iets nieuws opleveren, zoals bijvoorbeeld een verbrandingsmotor met een (paarden)wagen, die uiteindelijk leidt tot de auto. Deels is innovatie het gevolg van toeval plus inzicht en opleiding (kennis). Het is dus belangrijk om goede scholing te hebben, expliciet gericht op het versterken van innovatieve geesten. Steeds meer wordt innovatie afgedwongen door vanuit marktkansen of technische einddoelen te opereren en grotere onderzoekslaboratoria in te zetten. Samenwerking tussen veel hoogopgeleiden vergroot de kans dat complementaire ideeën samen worden gebracht en tot een innovatie leiden. Drie andere factoren zijn eveneens van belang:

1. *Isolatie* - ruimtelijk of anderszins - draagt bij aan een onafhankelijke ontwikkeling die unieke paden kan betreden. Tussen samenwerking en isolatie kan natuurlijk spanning bestaan. Beleid dient beide te stimuleren, onder meer door lokaal, provinciaal en internationaal samen te werken, en door beschermde nichemarkten te ondersteunen.
2. *Diffusie* of adoptie van bestaande ideeën of technieken leidt soms tot onbedoelde fouten of aanpassingen die innovaties impliceren. Beleid dient dus diffusie te stimuleren, opdat een grotere experimenteerruimte – letterlijk en figuurlijk – ontstaat.
3. *Risicozoekend gedrag* gesteund door durfkapitaal vergroot de kans op innovaties. Beleid dient de voorwaarden te scheppen voor meer risicozoekend gedrag, bijvoorbeeld door belastingwetgeving en specifiek beleid gericht op investeerders en financiële markten.

De *selectieomgeving* bepaalt naast innovatie, en padafhankelijkheid en insluiting (zie hieronder), de ontwikkeling van een evolutionair systeem. De overheid kan trachten deze te vormen, daarbij rekening houdend met de in hoofdstuk 2 genoemde dimensies (paragraaf 2.4.4): fysische, technologische, geografische, bedrijfsinterne-, markt- en R&D-dimensies. De fysische en geografische condities zijn niet of amper beïnvloedbaar door beleid. De technologische condities kunnen gunstig worden gevormd door te zorgen dat voldoende basiskennis (opleiding) en basistechnieken (voldoende diverse sectorstructuur) aanwezig zijn op nationaal niveau. Op interne bedrijfscondities heeft een overheid niet zoveel vat, hoewel wellicht indirect wel via haar invloed op opleiding en condities voor entrepreneurschap. Marktcondities kan de overheid deels controleren via onder andere de mededingingsautoriteit. R&D-condities zijn afhankelijk van zaken als belastingwetgeving, subsidieregelingen, publiek-private samenwerking (universiteiten en technologische instituten) en specifiek innovatiebeleid. Alles bij elkaar genomen resulteert een economische selectieomgeving die tamelijk complex is en tevens aan grote verandering onderhevig is. Wat betreft het laatste kan men denken aan de recente trends van liberalisering, privatisering en internationalisering. Bijvoorbeeld op het gebied van de energievoorziening is de vrij stabiele selectieomgeving van de monopolistische nutsbedrijven verlaten. Belangrijke selectiedruk

gaat uit van allerlei regulering gericht op duurzaamheid, met name gericht op emissies van broeikasgassen en verzurende stoffen, zoals het Kyoto Protocol, of gericht op investeerders (groenfondsen voor wind- en zonne-energie) en consumenten (denk aan groene en natuurstroom).

Onomkeerbaarheid en padafhankelijkheid: welke opties succesvol zijn en welke niet is grotendeels bepaald door toeval en niet uitsluitend door prestatiefactoren als doelmatigheid, winstgevendheid en duurzaamheid. De reden is dat door toenemende schaalopbrengsten een technologie die toevallig iets sneller haar marktaandeel ziet groeien in een vroeg stadium van ontwikkeling en competitie met aanverwante technologieën, daarna geen serieuze competitie hiervan meer voelt. De toenemende schaalopbrengsten kunnen hun oorzaak vinden in een groot aantal factoren, zoals kostenvoordelen bij grootschalige productie, netwerkexternaliteiten, mode- of imitatie-effecten, informatie-externaliteiten, standaardisering en complementaire technologie. Naast het instandhouden of stimuleren van technologische, organisatorische of institutionele diversiteit is het creëren van een gelijk speelveld in brede zin een vereiste. Dit wordt hieronder nader uitgewerkt.

Insluiting (lock-in) van technologie en organisatiestructuren: als eenmaal een systeem domineert op grond van toenemende schaalopbrengsten, dan is het zeer moeilijk om die toestand te doorbreken. Het corrigeren van prijzen voor bijvoorbeeld externe kosten (milieuschade) is een noodzakelijke, maar meestal onvoldoende voorwaarde voor het ontsluiten (ongedaan maken van de insluiting) van een systeem, omdat concurrentie niet alleen op basis van kostprijzen geschiedt en bovendien de kostprijzen door schaalvoordelen aanzienlijk kunnen verschillen. Er is dus aanvullend beleid nodig, zoals het pushen van alternatieven via subsidies, creatie van nichemarkten, fysieke doelstellingen, afspraken met bedrijven, informatie en educatie van consumenten, etc. Eventueel is ook een 'overcorrectie' van prijzen, ofwel een heffing hoger dan de marginale externe kosten, mogelijk. Dit lijkt echter minder eenvoudig door te voeren, vanwege geringe politieke en maatschappelijke steun, dan de eerder genoemde maatregelen. Uiteindelijk is hier een gelijk speelveld van groot belang (zie de discussie hieronder).

Co-evolutie is een begrip dat aangeeft dat de complexiteit van evolutionaire systemen groot is. De reden is dat deelsystemen elk hun eigen variatie, innovaties en selectiedruk kennen, terwijl er tevens interactie tussen de deelsystemen plaatsvindt. Dit betekent dat veranderingen in diversiteit in deelsystemen zijn gekoppeld. Het is nuttig om voor beoogde innovaties uit te zoeken welke technologische complementariteiten een rol spelen en daarop beleid in te zetten. Hierbij dient ook de economische sectorstructuur te worden bestudeerd, ofwel de rol van toeleverende en afnemende bedrijven en sectoren die zijn gesitueerd rond een bepaalde technische innovatie. Voorts past onder dit begrip ook het idee dat innovaties zo veel mogelijk moeten kunnen steunen op een diversiteit aan complementaire technologieën, in plaats van dat zij volledig afhankelijk zijn van één complementaire technologie. De laatste situatie zou namelijk kunnen resulteren in een ongewenste barrière of vroegtijdige insluiting.

Alles tezamen genomen resulteert het idee dat voor een transitie, ofwel het ontsluiten van bestaande structuren alsook het vermijden van een vroege lock-in, het creëren van een *gelijk speelveld in brede zin* ('extended level playing field') een conditio sine qua non is. Dit wordt veelal beschouwd als een toestand waarbij partijen op gelijke en eerlijke voorwaarden kunnen concurreren. Vanuit een evolutionair economisch perspectief dient het echter meer te

omvatten dan een vrije markt (ofwel de afwezigheid van een imperfecte markt). Vijf elementen zijn van belang:

1. *Prijzen* dienen alle sociale, private plus externe, kosten te reflecteren;
2. Binnen de verzameling van perspectiefvolle technologieën kunnen die technologieën welke zich nog vroeg op de *leercurve* bevinden relatief veel steun krijgen, zodat ze serieuze concurrentie kunnen bieden aan technologieën die zich al verder op de leercurve bevinden. Een verwante beleidsoverweging is om relatief snel ontwikkelende alternatieven een poosje af te remmen of in ieder geval niet te stimuleren;
3. Stel de factoren vast die de *tijdshorizon* van investeerders of bedrijven bepalen en neem in het verlengde hiervan maatregelen die deze tijdshorizon zo veel mogelijk gelijkenschakelen over actoren verbonden aan concurrerende alternatieven (technologieën);
4. Corrigeer voortdurend de toenemende *schaalvoordelen* die het voordeel geven aan één boven een andere technologie, teneinde een ongewenste, vroegtijdige lock-in te vermijden;
5. Corrigeer de verschillen in *selectieomgeving* anders dan markten zodat alle alternatieven (technologie-organisatiesystemen) onderhevig zijn aan dezelfde selectiefactoren.

Men kan dus in overdrachtelijke zin zeggen dat het creëren van een gelijk speelveld veel meer omvat dan het weghalen van de molshopen (lees: goede marktwerking), aangezien het veld op een helling ligt (lees: de vijf genoemde elementen).

Het ondersteunen van concurrerende opties kan niet eindeloos duren. Indien de krachten naar een bepaald traject te sterk worden, op grond van gunstige ontwikkelingen (doorbraken van duurzame technologie, grootschalige toepassingen met positief beoordeelde effecten), kan het voordeel van de twijfel hieraan worden gegeven. Het speelveld kan dan smaller worden. Een volledige insluiting van een enkele technologie moet echter altijd worden vermeden, aangezien dit verlies aan flexibiliteit en *veerkracht* ('resilience') voor de toekomst betekent. Het beleid zal dus moeten zorgen voor een mechanisme dat voorziet in een gewenste mate van diversiteit.

Samenhangend met het bovenstaande is de vraag op welke basis opties definitief kunnen worden afgesloten. Hierbij zou als criterium kunnen worden gehanteerd hoe snel de beweging langs de leercurve is ten opzichte van die van alternatieven. Een alternatief criterium is hoe steil de leercurve loopt. Dit is wellicht een theoretisch verschil tussen criteria dat in de praktijk echter niet relevant is aangezien de leercurve onbekend is en geschat wordt op basis van extrapolatie van veranderingen in het recente verleden alsmede op basis van analogie met vergelijkbare opties. Ofwel bewegen langs de leercurve is de enige manier om de leercurve te leren kennen.

De kosten van het handhaven van een gelijk speelveld met meerdere opties kunnen worden gezet tegenover het vroegtijdige verlies van opties door vroegtijdige insluiting van een bepaalde technologie. Conceptueel gezien is deze afweging tussen doelmatigheid en diversiteit de fundamentele afweging vanuit een evolutionair perspectief (de traditionele economie (h)erkent deze afweging niet). Er zal dan ook gezocht moeten worden naar bruikbare richtlijnen om de genoemde afweging te kunnen maken. Dit zoekproces wordt gekenmerkt door *trial-and-error*. De afweging kan meestal niet geschieden op basis van een volledig gekwantificeerde kosten-batenanalyse, vanwege de onvermijdelijke onzekerheden over de beweging langs een leercurve. De afweging tussen de korte termijn kosten en lange termijn baten van diversificatie is een kwalitatieve beoordeling die deels moet worden gevoed

door de opinies en intuïtie van experts. Een goede methode hiervoor ontbreekt en heeft nog diepteonderzoek (zie ook Stirling, 2004).

Vaak wordt evolutie gezien als een doelloos proces, maar daar houdt het niet mee op. In feite betekent transitiebeleid dat normatieve elementen worden gecombineerd met de acceptatie dat een systeem verandert volgens het principe van doelloze evolutie. De normatieve elementen kunnen hun beslag vinden via beleid gericht op het stimuleren van innovatie dan wel het beïnvloeden van de selectieomgeving. Het resultaat is autonome evolutie binnen grenzen, waarbij de grenzen zo nu en dan in een (politiek) gewenste richting worden bijgestuurd. Dit beeld van gestuurde evolutie is in essentie niet anders dan de traditionele economische visie die autonome, doelloze marktwerking koppelt aan beleid om verschillende vormen van marktfalen te corrigeren, zodat marktwerking ten dienste komt te staan van de sociale welvaart. Op vergelijkbare wijze kan de evolutionaire verandering van de economie door adequaat milieu- annex transitiebeleid ten dienste worden gesteld van duurzaamheid. Wellicht levert een evolutionair-economische visie met begrensde-rationele agenten, lock-in en complexe co-evolutie een sceptischer beeld op van de maakbaarheid van de samenleving. Dit moet echter worden gezien als een ‘tekortkoming’ van de werkelijkheid en niet van de evolutionaire economie.

3.4 Case studie:

Energievoorziening als complex en evoluerend systeem

In de rest van dit hoofdstuk wordt de analyse voortgezet met nadruk op het voorbeeld van een ‘duurzame energievoorziening’. De reden voor deze keuze is dat de algemene inzichten ten aanzien van evolutionair-economische analyse van milieubeleid en transitiebeleid dan aangevuld kunnen worden met concrete voorbeelden. Door het hanteren van een vaste context wordt aldus een samenhangend beeld opgebouwd van milieu- en transitiebeleid.

Opties voldoende lang open houden is een belangrijke algemene boodschap die de evolutionaire economie oplevert. De vraag naar de precieze invulling van een ideaal, emissie-arm systeem als een toekomstbeeld kan en hoeft niet te worden beantwoord. Niet alleen weet niemand wat het ideale systeem is maar bovendien kan een te sterke mening met een deterministisch beeld wel eens contraproductief zijn en tot verkeerde beslissingen van overheden en bedrijven leiden. De complexiteit van de problematiek werkt tegen een al te eng omschreven toekomstbeeld. Dat laat onverlet dat een verkenning van mogelijke toekomstige systemen en de wegen die daarheen kunnen leiden wel van belang is, omdat daar beleidslessen uit kunnen worden getrokken. Een aantal cruciale parameters van de energievoorziening is als volgt:

1. *Centrale versus decentrale energievoorziening*: lokaal, op fabrieksniveau, woonwijken of zelfs individuele huishoudens, of juist op nationaal of zelfs internationaal/Europees niveau met gekoppelde energiedistributienetwerken en zeer grote energiecentrales. Dit raakt nauw aan het thema van schaalvoordelen versus flexibiliteit/diversiteit;
2. *Energiedrager(s)*: met name elektriciteit of waterstof;

3. *Energiebron of -bronnen*: fossiel; nucleair; vernieuwbaar (zon, wind, water, biomassa, aardwarmte). Of een combinatie;
4. *Technologie*: verbranding, kernfusie, kernsplijting, brandstofcel, etc.;
5. *Mate van systeemintegratie*: bijvoorbeeld verkeer gescheiden van stationaire bronnen en gebruikers, of een volledig geïntegreerd systeem; veel of weinig gebruik van WKK en restwarmte.

Deze parameters zijn niet onafhankelijk van elkaar; met name 3 en 4 hangen sterk samen.

Gegeven de complexiteit en onzekerheid is het open houden van opties van groot belang. Vroegtijdig kiezen voor een toekomstbeeld kan verkeerde keuzes impliceren vanuit het oogpunt van zowel economische doelmatigheid (efficiëntie) als duurzaamheid. In een beleidscontext kunnen toekomstbeelden vaak worden gekoppeld aan *criteria* waaraan het systeem zou moeten voldoen. De belangrijkste criteria die in het huidige beleid worden gehanteerd zijn *betrouwbaarheid* (voorzieningszekerheid), *betaalbaarheid* en *duurzaamheid*. De complexiteit van het energievoorzieningssysteem maakt het niet eenvoudig om te toetsen welk beeld voor de toekomst het meest aantrekkelijk is ten aanzien van de drie genoemde criteria. De onzekerheid over een aantrekkelijk energiesysteem voor de toekomst wordt geïllustreerd door het niet aflatende onderzoek naar kernfusie. Kernfusie is nog lang niet rijp voor commerciële toepassing en in de vrije concurrentie met andere technieken kansloos. Op de lange termijn (meer dan vijftig jaar) is de technologie mogelijk wél aantrekkelijk volgens alle criteria. Dit vereist echter een zeer aanzienlijke publieke financiële investering van vele landen, naast uiteraard een publiek-private samenwerking op het gebied van kennis- en technologieontwikkeling (zie verder paragraaf 5.3).

Samenhangend met de mate van centralisatie is de vraag naar de mate van *systeemintegratie*. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om de omvang van het gebruik van warmtekrachtkoppeling en om de vraag of verkeer/vervoer en energievoorziening aan huishoudens en bedrijven gescheiden kunnen blijven dan wel moeten worden geïntegreerd. De consequenties van het laatste zijn bijna niet te overzien. Maar dat is misschien wel het duurzame systeem van de toekomst.

Een belangrijk kenmerk is de mate van *decentralisatie*, zowel voor winning als voor opwekking, omzetting, transport en distributie, opslag en eindgebruik. Een voorbeeld van decentrale opwekking is de nachtkoppeling van de brandstofcel in een auto aan het huis, waardoor eindgebruikers van energie tevens producenten worden. Twee of meer parallelle systemen voor groot- en kleinverbruikers behoren ook tot de mogelijkheden, aangezien de schaalvoordelen bij deze groepen niet gelijk hoeft te zijn.

De economische en technologische consequenties van een fundamentele verandering in de centralisatie en planning van de energievoorziening zijn moeilijk te overzien. Aan de economische kant spelen kosten van netwerken en schaalvoordelen een rol, en moet tevens rekening worden gehouden met gedragsverandering in reactie op de nieuwe technologie, met name bij een hoge mate van decentralisatie. Dit laatste wordt wel geïllustreerd door het *rebound effect*, dat een scala aan gedrags-, markt-, sectorverschuivings- en (andere) macro-effecten omvat. Consumenten kunnen bijvoorbeeld energiezuinige spaarlampen vaker en langer laten branden dan de oude gloeilampen. Het moge duidelijk zijn dat een toekomstverkenning die alle rebound effecten beoogt mee te nemen vanuit het perspectief van gedragsmodellering enorm veeleisend is.

3.5 De rol van de overheid

De overheid is doorgaans de partij die het voortouw zal moeten nemen in het opzetten van een vorm van transitie management. Dit wordt gemotiveerd door de combinatie van drie factoren, namelijk externe milieueffecten (sociale kosten), externe baten van innovatie (kennis spill-overs) en insluiting (lock-in) van een maatschappelijk ongewenste technologie. Tezamen veroorzaken deze een maatschappelijk probleem dat niet kan worden opgelost door bedrijven of de markt. Alleen door een leidende regisseursrol van de overheid die tevens generiek en specifiek beleid omvat kan een oplossing worden gevonden voor dit probleem.

Een belangrijke notie in het transitie management, die aansluit op de concepten uit de evolutionaire economie, is dat de overheid weliswaar een belangrijke rol vervult in de coördinatie en beïnvloeding van de transitie, maar dat zij er nooit een volledige controle over kan uitoefenen (Rotmans e.a., 2000). De overheid zal in deze positie daarom veel meer een rol spelen in de afstemming van toekomstbeelden, de omgang met onzekerheden en lock-in, de coördinatie van korte termijn-beleid met lange termijn-doelen, en de omgang met de verschillende schaalniveaus (in tijd, ruimte en instituties) waarop de transitie zich afspeelt. Een traditionele, hiërarchische regeerstijl zal daarbij steeds meer plaats maken voor een meer netwerkgerichte aanpak, waarbij de rol van de overheid verandert van regent naar regisseur (Faber e.a., 2003). Desalniettemin zullen sturende elementen van groot belang blijven. Belangrijke elementen in de vormgeving van de rol van de overheid in een evolutionair transitie management zijn (zie ook Faber en Van Welie, 2004):

- Internaliseren van de kosten van *externe effecten* door regels of heffingen, en door een stabiel prijsbeleid. Ook subsidies en groencertificaten kunnen hierbij een rol spelen. Maar dit is onvoldoende (zie Box 3.2);
- Verbeteren van de informatieuitwisseling tussen spelers, zodat het *collectieve leerproces* beter verloopt. Subsidies kunnen een rol spelen bij het genereren van nieuwe kennis en technologie;
- Het beschermen van *nichemarkten*, totdat technologische ontwikkelingen daarin rijp zijn om volledige concurrentie aan te kunnen op de vrije markt (zie Kemp e.a., 1998);
- Assisteren om *lock-in* ongedaan te maken of te vermijden (opties openhouden). Onder andere kan men niches creëren door subsidies aan consumenten of producenten. Nichemarkten kunnen de leercurves en schaalvoordelen versnellen. Vanuit een evolutionair perspectief is het stimuleren van niches een specifiek geval van een algemene conditie die belangrijke innovaties stimuleert, namelijk 'isolatie'. Lock-in is tot op zekere hoogte onvermijdelijk, maar het beleid kan er wel toe bijdragen dat die lock-in niet in (maatschappelijk gezien) inferieure technologieën plaatsvindt, en dat er voortdurend ruimte wordt geschapen voor potentieel superieure technologieën om de lock-in te doorbreken. Het *overheidsaanbestedingsbeleid* kan een rol spelen bij het stimuleren van nichemarkten (de publieke sector als 'launching customer'). Diversiteit stimuleren druipt in tegen marktwerking en veroorzaakt extra kosten. Daar ligt dus een taak voor de overheid;
- De overheid speelt een belangrijke rol in het ondersteunen van *wetenschappelijk onderzoek* naar fundamentele vernieuwing, omdat de terugverdientijden en onzekerheden hierbij te onaantrekkelijk zijn voor private partners;

- In zekere zin valt hieronder ook het wetenschappelijk onderzoek naar transities, met aandacht voor theorie, historische analyse en multidisciplinariteit (technologie en sociale wetenschappen). Dergelijk onderzoek kan bijdragen aan het leren van mislukte, geslaagde (bijvoorbeeld de overgang van kolen naar aardgas) en half-geslaagde transities (bijvoorbeeld de overgang naar een nucleair tijdperk) (zie Geels en Smit, 2000);
- Publiek-private samenwerking kan in het fundamentele wetenschappelijk onderzoek nuttig zijn, hoewel zich dan problemen van geheimhouding en recht op onderzoeksbevindingen voordoen. Op het publieke niveau passen tevens de meest risicovolle investeringen;
- De overheid speelt een rol in de omgang met grote spelers, met name vanuit het oogpunt van (beperkte) dominantie van de markt van bepaalde technologie. Dit beleid raakt aan het streven naar diversiteit, niet alleen van technologieën, maar ook van betrokken spelers. Dit komt neer op een soort portfolio-management: een waaier aan perspectiefvolle initiatieven wordt gestimuleerd waarbij na verloop van tijd minder succesvol of perspectiefvol gebleken alternatieven worden verwijderd (Kemp en Rotmans, 2004). ‘Perspectiefvol’ duidt hier een beoordeling aan tegen het licht van een duidelijk geformuleerd milieubeleidsdoel.
- Tot slot geldt dat transitiebeleid voortdurende *adaptatie* vereist aan veranderende omstandigheden (externe, exogene factoren) en trajecten die in ongewenste richtingen lopen. Daaronder valt ook het eventueel afbouwen van eerder ontwikkelde steun als een onderdeel van strategisch nichemanagement. Dus zo nu en dan moeten duidelijk keuzes worden gemaakt in zowel positieve (stimuleren) als negatieve zin (afbouwen).

Box 3.2 Lock-in en correcte prijzen

Correcte prijzen waarin externe effecten of kosten zitten verwerkt zijn noodzakelijk maar zeker niet voldoende om een transitie naar een duurzame energievoorziening af te dwingen. De reden is dat de onduurzame energievoorziening op basis van verbranding van fossiele brandstoffen onderhevig is aan een zogenaamde insluiting of ‘lock-in’, op grond van schaalvoordelen, netwerkeffecten (denk aan benzinestations), en technologische complementariteit (auto- en elektriciteitsopwekkingstechnologie en gerelateerde R&D zijn in hoge mate afgestemd op fossiele brandstoffen). Gegeven dat de externe kosten in onvoldoende mate zijn verwerkt in de prijzen van fossiele brandstoffen is de *marktwerking (liberalisering)* van de huidige energievoorziening wellicht te vroeg in gang gezet. Deze versterkt dan immers de insluiting van fossiele brandstoffetechnologieën en stuurt het systeem alleen maar verder in de verkeerde, onduurzame richting. Ook internationalisering – met name handel in elektriciteit op EU niveau – zal bijdragen aan een dergelijke ontwikkeling. Voor het doorbreken van een lock-in is het dan ook van belang dat de transitie naar een duurzame energievoorziening expliciet wordt betrokken in alle besluitvorming op nationaal en EU niveau ten aanzien van energievoorziening en transport.

3.6 Begrensd rationaliteit

3.6.1 Begrensd rationaliteit en milieubeleid

Indien we de aanname van de neoklassieke economie loslaten dat actoren zijn gericht op maximeren van hun winst of nut en hierin ook slagen, dan vervallen de zogenaamde eerste en tweede hoofdtheorieën van de welvaartseconomie. Dit betekent dat er geen directe relatie is tussen een marktevenwicht en een sociaal welvaartsoptimum. De implicatie voor milieubeleidstheorie is dat er geen eenvoudige relatie is tussen externaliteiten en milieubeleidsinstrumenten: er is niet langer zoets als ‘optimaal beleid’. Men kan namelijk niet langer uitgaan van het idee dat agenten optimaal reageren op marginale waarden en prikkels. Merk trouwens op dat de kernnotie van externaliteiten behouden blijft, aangezien deze niet vereist dat agenten optimaliseren. Een afgeleide is dat de methoden economische waardering en kosten-batenanalyse relevantie verliezen doordat ze minder accuraat werken (Van den Bergh e.a., 2000).

Een gevolg voor *instrumentenkeuze* in het beleid is dat prijsinstrumenten minder aantrekkelijk worden. Natuurlijk beïnvloeden prijzen keuzes, maar prijsinstrumenten worden minder effectief en doelmatig dan gesuggereerd door de neoklassieke economie. Men kan op grond hiervan de aandacht verschuiven naar instrumenten die (mits voorzien van waarborgen als controle en sancties) een hoge effectiviteit hebben, zoals technische standaarden en hoeveelheidsregulering.

Vanuit het specifieke perspectief van ‘satisficing’ en ‘routines’ zullen reacties op milieubeleid minder evident zijn dan in het geval van maximerend gedrag. Satisficing suggereert dat op zijn best kosteneffectiviteit wordt nagestreefd: verhandelbare rechten zijn dan aantrekkelijk. Zowel gewontegedrag als bedrijfsroutines bieden een bevredigende verklaring voor de waargenomen ‘energy gap’, ofwel de ongenoten economische baten samenhangend met potentiële energiebesparingsmaatregelen in bedrijven. Van Raaij (1988) bespreekt dit punt in de context van modellen van consumentengedrag die rekening houden met zaken als zichtbaarheid, demonstratiewaarde, milieuzorg, informatie, gewoonten en sociaal-demografische determinanten.

Roe (1996) past de zogenaamde ‘Girardian economics’ toe, die uitgaat van extreme onzekerheid. Imitatiegedrag wordt gezien als het logische gevolg hiervan. Het geeft aanleiding tot een reductie van economische diversiteit, in termen van gedragsstrategieën, ideeën, producten, etc. Dit model wordt toegepast op het algemene probleem van duurzame ontwikkeling. Dit wordt dan gezien als een sociale conventie die voor enige tijd beslissen onder grote onzekerheid stabiliseert; het zou ertoe moeten leiden dat de trend van ‘undifferentiation’ (homogeneity) ten gevolge van imitatie ongedaan wordt gemaakt of wordt omgekeerd. Dit kan onder meer worden gerealiseerd door onzekerheid op het individuele bedrijfs- of consumentenniveau te verminderen; door milieusystemen te bufferen of los te koppelen van algemene milieuonzekerheden (bijvoorbeeld klimaat); en door diversiteit te bevorderen via het stimuleren van meerdere typen van duurzame ontwikkeling, zoals het toestaan van decentrale initiatieven (bijvoorbeeld op stedelijk of provinciaal niveau).

Het idee dat *preferenties* van consumenten endogeen en evolutionair in plaats van invariant zijn brengt Norton e.a. (1998) tot de gedachte dat het veranderen van

consumentenpreferenties een onderdeel vormen van milieubeleid. In het bijzonder stellen zij dat stabiele preferenties op zijn best realistisch zijn over korte tijdsperioden, en dat soevereine preferenties inconsistent kunnen zijn met lange termijn doelen van duurzaamheid. In hun visie zou een publieke discussie over verantwoorde consumptie en duurzaamheid moeten worden gestimuleerd via educatie, regels voor adverteren, culturele normen, etc. Dit staat wel bekend als ‘morele overreding’ (‘moral suasion’). Economen accepteren traditioneel al dat de ruimte voor beslissingen beperkt is, maar ook preferenties kunnen beperkt zijn of worden. De meeste democratisch gekozen regeringen formuleren reeds allerlei publiek beleid dat erop is gericht om handelingen die worden gezien als crimineel, racistisch of anderszins schadelijk voor de samenleving tegen te gaan. Dit zou in beginsel kunnen worden uitgebreid tot preferenties die conflicteren met duurzaamheid. We accepteren immers ook dat preferenties van consumenten in sterke mate worden beïnvloed door advertenties van bedrijven. Zie voor een diepgaandere discussie van begrensde rationaliteit, alternatieve gedragsmodellen en milieubeleidsimplicaties Van den Bergh e.a. (2000), en voor een empirisch-econometrische toepassing Ferrer-i-Carbonell en Van den Bergh (2004).

3.6.2 De korte termijn als barrière

Een belangrijk element van begrensde rationaliteit is de korte termijn horizon (zie paragraaf 2.4.5). Deze fungeert vaak als hobbel voor het bereiken van lange termijn doelen. Zowel individuen als bedrijven zijn doorgaans gericht op het behalen van resultaten op de korte termijn. Een afgeleide hiervan is de neiging tot verdisconteren, hetgeen leidt tot het zwaarder wegen van het heden dan de toekomst. Dit kan gemakkelijk leiden tot het meer aandacht geven aan effecten op korte dan lange termijn. Dit lijkt het geval te zijn ten aanzien van *energiebesparing*. Hoewel dit op korte termijn niet strijdig lijkt met een transitiedoel, kan het toch zo zijn dat energiebesparing contraproductief is, omdat het de insluiting (‘lock-in’) van het huidige systeem versterkt. Dit probleem doet zich in concreto voor bij de uitwerking van de CO₂-emissiedoelen in de context van het Kyoto Protocol, aangezien Nederland hieraan blijkt te kunnen voldoen zonder fundamentele aanpassingen in de energievoorziening door te voeren. De uitkomst van de internationale klimaatonderhandelingen en de lage emissiedoelen die zijn vastgesteld kunnen worden begrepen op grond van de korte tijdshorizon die wordt gehanteerd. Deze leiden tot betrekkelijk weinig druk op het realiseren van een duurzaam energiegebruik vanuit klimaatperspectief gericht op hernieuwbare energiebronnen.

Het is goed te beseffen dat het streven naar doelmatigheid en energiebesparing de dominantie van fossiele brandstoftechnologieën zal versterken, omdat daar op korte termijn het meest valt te besparen (zie Box 3.3). Teneinde dit te voorkomen zouden bij het streven naar energie-efficiëntie in opwekking, transport, omzetting en eindverbruik eisen kunnen worden gesteld aan de vernieuwbaarheid van energiebronnen (wind, zon, water), of aan de flexibiliteit ten aanzien van de energiedrager (bijvoorbeeld waterstof). Eenzelfde redenering gaat op voor warmtekrachtkoppeling en CO₂-afvang en -opslag, wanneer deze beide net als energiebesparing de lock-in van fossiele brandstoffen versterken.

Voorts lijkt het zinvol om combinaties van oude en nieuwe technologie te stimuleren teneinde de ontwikkeling en grootschalige toepassing van, en leereffecten met, nieuwe technologie te stimuleren. Hierbij kan men bijvoorbeeld denken aan de brandstofcel die loopt op waterstof verkregen uit fossiele brandstoffen (zie ook paragraaf 5.2). Concrete maatregelen die de korte

termijn horizon van economische agenten kunnen oprekken naar een wat langere termijn zouden zich kunnen richten op het aanpassen van de discontovoet, het stimuleren van durfkapitaal en het creëren van nichemarkten. Al deze opties kosten geld, en ze zijn in dit opzicht enigszins substitueerbaar.

Beleid kan de tijdshorizon van economische agenten ook verder verkorten in plaats van die juist te verlengen. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat de huidige belasting op basis van een vast rendement op investeringen een stimulans geeft om te beleggen in ondernemingen met een hoog rendement op korte termijn in plaats van op lange termijn. Dit betekent een impuls voor op korte termijn relatief winstgevende sectoren of projecten, ten koste van projecten die op lange termijn rendement leveren.

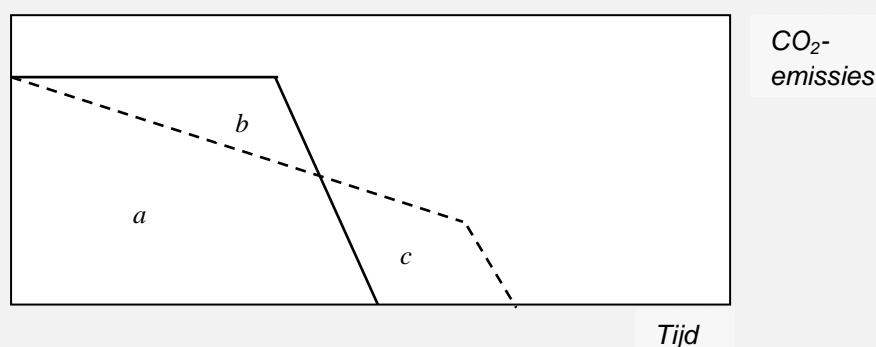
Burgers, politici en andere actoren hanteren niet alleen vaak een korte tijdshorizon, maar richten zich ook vaak op de kleine schaal, ten koste van het grootschalig perspectief. Individuen – en als afgeleide landen – hebben de neiging om problemen in de toekomst of ver weg in de tijd én in de ruimte sterk te verdisconteren. Het eindresultaat is een patstelling of ‘prisoner’s dilemma’. dat wordt gekenmerkt door afwachten en ‘free riding’.

De beperkte horizon in tijd en schaal komt in het internationale speelveld naar voren als gevolg van de liberalisering van de energiemarkt. De toenemende rol van de private partijen versterkt de invloed van korte termijn-activiteiten ten koste van investeringen op de lange termijn of de grote schaal (EZ, 2002: p. 58). Het is hierdoor denkbaar dat de voordelen op de korte termijn en de kleine schaal als het ware worden verdisconteerd met teruglopende investeringen op de grote schaal en de lange termijn. Een voorbeeld hiervan is reeds zichtbaar geweest in Californië, waar achterblijvende investeringen in dure productiefaciliteiten herhaaldelijk tot problemen in de energievoorziening hebben geleid.

Box 3.3 De invloed van energiebesparing op een overgang naar hernieuwbare energie

Veel vormen van energiebesparing gaan gepaard met een doelmatiger gebruik van fossiele brandstoffen. Hierbij is een onderscheid tussen twee vormen van energiebesparing zinvol: (a) minder vraag naar energie (bijvoorbeeld isolatie van woningen, auto's met minder luchtweerstand); en (b) efficiëntere productie van energie ofwel omzetting met een hoger rendement van fossiele brandstoffen in andere vormen van energie zoals beweging en elektriciteit (bijvoorbeeld HR-ketel, zuinigere motoren). In het geval van energiebesparing door minder vraag is er niet noodzakelijk een verandering van de kosten per eenheid geleverde energie (behalve wellicht als de vraagverandering zodanig groot is dat schaalvoordelen in energieproductie afnemen). Bij energiebesparing ten gevolge van een doelmatigere omzetting van fossiele brandstoffen naar nuttige energie zullen echter de kosten per eenheid geleverde nuttige energie altijd lager uitvallen. Aldus wordt de economische positie en daarmee de bestaande insluiting (lock-in) van deze brandstoffen versterkt. Als gevolg hiervan zal de transitie naar hernieuwbare energiebronnen, het einddoel van de transitie, trager op gang kunnen komen. Om het cumulatieve CO₂ emissie-effect van een dergelijke vertraging te bepalen dient men twee deeleffecten in te schatten, namelijk emissiereductie ten gevolge van energiebesparing over de tijd, en gemiste emissiereductie als gevolg van een vertraagde overgang naar hernieuwbare bronnen.

Dit duidt op een optimale afweging ofwel theoretisch optimum, dat gegeven de vele onzekerheden niet nauwkeurig kan worden gekwantificeerd. Schematisch kan de afweging echter als volgt worden weergegeven:



De continue curve in de figuur toont CO₂-emissies ten gevolge van een transitie zonder energiebesparing. De onderbroken curve duidt de ontwikkeling aan van een transitie met energiebesparing. In dit geval begint de transitie – ofwel de overgang naar hernieuwbare en dus CO₂-emissievrije energiebronnen – op een later tijdstip. Voor het gemak is aangenomen dat de transitie leidt tot een eindsituatie zonder CO₂-emissies (deze aanname is echter niet essentieel voor de redenering).

De cumulatieve emissies onder het scenario zonder energiebesparing zijn gelijk aan $a+b$, en die onder het scenario met energiebesparing aan $a+c$. Welk scenario de voorkeur heeft hangt af van wat waarschijnlijker is: $b>c$ of $b<c$. Hierbij staat b voor de cumulatieve emissiereductie door energiebesparing, en c voor de gemiste emissiereductie vanwege de vertraagde overgang naar hernieuwbare bronnen.

Indien de tijdsvertraging van de transitie als gevolg van energiebesparing erg groot is zal c relatief omvangrijk zijn en het scenario zonder energiebesparing de voorkeur hebben vanuit het oogpunt van cumulatieve CO₂-emissies. Naarmate de energiebesparing groter is zal a kleiner en b groter worden maar tevens de transitie aan meer tijdsvertraging onderhevig zijn, waardoor c toeneemt. Hieruit volgt dat meer energiebesparing niet noodzakelijkerwijs een zegen is voor de cumulatieve CO₂-emissies op lange termijn. Dit verdient aandacht in een analyse van een energietransitie. Dit geldt temeer omdat naar mate energiebesparing succesvoller is de overgang naar duurzame bronnen trager zal verlopen. Men dient dus voorzichtig te zijn in het streven naar maximale, ongelimiteerde energiebesparing. Dit laat nog onverlet dat de investeringen in energiebesparing deels ten gunste zouden kunnen komen van R&D in hernieuwbare energieopwekking. Een interpretatie van dit alles is dat energiebesparing de noodzakelijke 'sense of urgency' van een transitie naar duurzame energiebronnen tegenwerkt.

Men dient zich tevens te realiseren dat een finaal, duurzaam energiesysteem nooit kan worden gerealiseerd via de weg van energiebesparing maar wel via de weg van duurzame bronnen. Energiebesparing alleen leidt namelijk nooit tot een emissievrij energiesysteem. In de transitie moet daarom de overgang naar duurzame bronnen centraal staan en niet de besparing of het doelmatig gebruik van energie door huishoudens of bedrijven.

Het belangrijkste inzicht van de voorgaande discussie is dat er een afweging nodig is tussen de voordelen (directe emissiereductie) en nadelen (indirecte toename emissies door de vertraging van de transitie) van energiebesparing. Deze afweging is in de praktijk niet eenvoudig te maken omdat de onzekerheden over de toekomst enorm groot zijn. Ongetwijfeld is empirisch-historisch onderzoek nuttig om de omvang van de effecten van energiebesparing op een transitie enigszins te kunnen kwantificeren. Het is echter al wel mogelijk om algemene beleidsinzichten af te leiden:

1. De overheid dient kritische randvoorwaarden op te stellen voor energiebesparing, gericht op de stimulering van technieken die niet specifiek aan fossiele brandstoffen zijn gekoppeld, maar volledig neutraal zijn ten opzichte van hernieuwbare bronnen. Hierbij kan het onderscheid tussen de twee soorten energiebesparing zinvol zijn.
2. Indien extra inspanningen voor energiebesparing worden geleverd dient ter compensatie duurzame energieopwekking (met hernieuwbare bronnen) extra te worden gestimuleerd.

Een combinatie van (1) en (2) is mogelijk, daar de ene beleidsoptie de andere niet uitsluit.

3.7 Diversiteit en schaal gecombineerd: van lokaal tot internationaal

Transities in het algemeen, en dus ook een transitie naar een duurzame energievoorziening, beperken zich niet tot individuele landen. Bovendien is het onmogelijk voor een land alleen, vooral als dat niet al te groot is, om een gerichte of bedoelde transitie op gang te brengen. Internationale samenwerking en afstemming van transitiebeleid is daarom zinvol.

We hebben gezien dat evolutionair transitiebeleid een goede balans moet vinden tussen diversiteit aan opties en schaalvoordelen. De context was tot nu toe impliciet nationaal. Op internationaal niveau lijkt het wegens de grotere schaal eenvoudiger om zowel diversiteit als schaalvoordelen na te streven. Tegen deze achtergrond dient een goede balans te worden gevonden tussen enerzijds afstemming van wat in verschillende landen aan innovatie en investeringen op het terrein van vernieuwbare energie plaatsvindt, en anderzijds het streven naar diversiteit door een internationaal gelijk speelveld in brede zin te creëren. Beide aspecten vragen om een bepaalde mate van afstemming en samenwerking tussen landen.

In de Nederland en veel andere landen domineert nu elektriciteitsopwekking met op aardgas en kolen gestookte centrales aangevuld met warmtekrachtkoppeling. Vanuit het transitiebeleid geredeneerd ligt het voor de hand om een variatie aan systemen te creëren, met verschillende energiedragers, verschillende energiebronnen, en verschillende technologieën. De vraag is wel of variatie binnen Nederland kan worden geregeld, of beter op een hoger politiek niveau. De EU ligt daarbij voor de hand, niet alleen vanwege de politiek-economische integratie, maar ook omdat hier een grote variatie bestaat aan energiebronnen en technologie en omdat energiedistributie steeds internationaler wordt vormgegeven.

Het nastreven van *diversiteit op internationaal niveau* kan gebaat zijn bij overleg en afstemming tussen landen (bijvoorbeeld in EU of VN verband). Aldus kan worden afgestemd wie zich richt op bepaalde vernieuwbare hulpbronnen of energiedragers, waarbij gunstige selectiefactoren als klimaat (hoeveelheid zonuren en intensiteit van zonne-energie), geografie, hulpbronnen (stromend water en wind) worden meegenomen. Dit kan een zekere balans bieden tussen schaal en diversiteit. Met andere woorden, de ruimtelijke heterogeniteit van constante milieucondities (geografische en klimatologische omstandigheden) kan zo op geschikte wijze worden vertaald in een patroon van ruimtelijke diversiteit aan technologie en organisatie van energievoorziening.

Daarnaast kan diversiteit aan initiatieven ook juist ontstaan als gevolg van beperking van coördinatie. Dit is met name relevant voor de sub-nationale schaal. Indien decentralisatie van energievoorziening serieus wordt genomen zouden gemeenten en provincies meer dan nu het voortouw kunnen nemen naast de nationale overheid. Dat kan een grotere diversiteit aan initiatieven opleveren waaruit op termijn de meest succesvolle zullen overblijven en zich zullen verspreiden. Hierbij is het interessant te bedenken dat een aantal historische energietransities (kolen, elektriciteit) lokaal of provinciaal zijn gestart. Om een dergelijke aanpak te realiseren dienen wellicht een aantal beleidshiërarchische en ruimtelijke orderingsbarrières worden geslecht.

3.8 Conclusie

Beleid en instituties zien er vanuit een evolutionair-economische optiek anders uit dan vanuit een traditionele economische optiek. Een belangrijk verschil is de nadruk op diversiteit versus doelmatigheid. Diversiteit aan opties wordt binnen de evolutionaire visie als essentieel beschouwd voor het inslaan van nieuwe wegen, en voor het verschijnen van nieuwe innovaties. Beleidsturing moet echter niet gericht zijn op voorafbepaalde uitkomsten maar op het beter functioneren van variatie-selectieprocessen. Daarbij is er een rol voor zowel generiek als specifiek beleid. Ten behoeve van transities is er allereerst een beleidstransitie nodig: minder top-down en meer gericht op leerprocessen gericht op systeeminnovaties.

Diversiteit is de kern in het evolutionaire milieubeleid. Het creëren en instandhouden van diversiteit impliceert echter verspilling van tijd, geld en intellectuele capaciteit. Zonder verspilling zullen er echter te weinig innovaties verschijnen. Dus verspilling moet worden gekoesterd. Fisher's theorema is hier bijzonder relevant: "The greater the genetic variability upon which selection for fitness may act, the greater the expected improvement in fitness" (Fisher, 1930). Geen belangrijke innovaties en geen transitie naar een duurzame ontwikkeling zonder verspilling en zonder doodlopende paden. Een te strakke planning en vroegtijdige keuze van winnaars zijn de dood in de pot.

Hiermee hangt samen dat vanuit een evolutionair-economische optiek er niet zoiets bestaat als 'optimaal beleid'. Economische agenten gedragen zich namelijk volgens begrensde rationaliteit, hetgeen zich uit in de vorm van gewoonten en routines, imitatie van anderen en het hanteren van een beperkte tijdshorizon. De overheid speelt een meervoudige rol in milieubeleid, energiebeleid en innovatiebeleid gericht op een duurzame ontwikkeling. Internaliseren van de kosten van externe effecten is nodig maar zeker onvoldoende. De overheid dient informatie-uitwisseling tussen spelers te bevorderen en geleiden, zodat een collectief leerproces plaatsvindt. Subsidies kunnen nodig zijn om grootschalige innovaties in gang te zetten, en in het bijzonder om situaties van technologische insluiting ongedaan te maken of te vermijden. Subsidies of overheidsaanbestedingsbeleid kunnen leiden tot nichemarkten die leercurves en schaalvoordelen van innovatieve technieken, producten en processen versnellen. Vanuit een evolutionair perspectief is het stimuleren van niches een specifiek geval van 'isolatie', hetgeen een belangrijke evolutionaire verklaring is van belangrijke innovaties (denk aan de belangrijke rol van eilanden en ruimtelijke barrières als rivieren en bergen binnen de biologische evolutie). Uiteraard speelt de overheid een centrale rol in het ondersteunen van wetenschappelijk onderzoek naar fundamentele innovaties, aangezien terugverdiertijden en onzekerheden daar vaak private partijen afschrikken. Wetenschappelijk onderzoek naar transities is een specifiek aandachtspunt. Dergelijk onderzoek kan bijdragen aan het leren van zowel mislukte als geslaagde transities. In dit opzicht valt er nog heel veel te leren.

Uiteindelijk gaat het bij een transitie naar een duurzame ontwikkeling (en energiesysteem) om het creëren van een gelijk speelveld ('level playing field'). In eerste instantie omvat dit het corrigeren van externe kosten van milieudruk en positieve externe effecten van innovatie (onder meer via heffingen en patenten) en het garanderen van eerlijke en gezonde concurrentie. Daarnaast moet zeer bewust worden gewerkt aan het open houden van opties, waarbij rekening gehouden wordt met leercurve-effecten, padafhankelijkheid (historische toevalligheden) en selectieomgeving. Bijvoorbeeld, het feit dat een bepaalde (duurzame)

technologie verder is ontwikkeld dan een andere hoeft niet te betekenen dat hierop alle geld moet worden ingezet ('backing winners'). Conceptueel komt de fundamentele afweging neer op enerzijds opties open houden en anderzijds schaalvoordelen genieten van een dominante technologie en organisatiestructuur.

De overheid moet zich niet richten op 'picking the winners', maar op het creëren van een geschikte innovatie- en selectieomgeving. Selectie moet dus niet verward worden met het idee dat een overheid actief technologische opties selecteert. Selectie komt voort uit het evolutionaire idee dat bepaalde opties beter presteren dan andere en daardoor overleven en repliceren (bijvoorbeeld door imitatie). Bepaalde dimensies van de selectieomgeving zijn amper te beïnvloeden (fysische en geografische dimensies) terwijl andere veel beter in een gunstige richting zijn te stellen. Het is verstandig om voor een bepaald innovatiedoel zorgvuldig de selectieomgeving te verkennen. Alleen dan kan een goed overzicht worden verkregen van de aangrijpingspunten voor beleid.

Vanuit een co-evolutionair perspectief is het zinvol om voor beoogde innovaties uit te zoeken welke technologische complementariteiten een rol spelen; hier kan vervolgens specifiek beleid op gevoerd worden. Hieronder kan ook de economische sectorstructuur worden geschaard, ofwel de rol van toeleverende en afnemende bedrijven. Een belangrijk idee is dat innovaties zo veel mogelijk dienen samen te gaan met een diversiteit aan complementaire technologieën. Indien namelijk het succes van een innovatie volledig afhankelijk is van één, specifieke complementaire technologie zou dit gemakkelijk kunnen leiden tot een ongewenste barrière of vroegtijdige lock-in.

Op nationaal niveau kan de balans tussen diversiteit en schaalomvang wel eens lastig zijn. Op internationaal niveau is dat wegens een grotere schaal iets eenvoudiger. Om de internationale mogelijkheden te benutten dient er door samenwerking tussen landen een afstemming te komen van investeringen in specifieke innovatietrajecten op het terrein van duurzame ontwikkeling. Daarnaast kan diversiteit aan initiatieven (technologie, netwerken, organisatie, regulering, instituties) op lokale schaal, variërend van gemeenten tot provincies, worden gestimuleerd. Daarvoor dienen wellicht een aantal beleidsbarrières te worden weggenomen.

Ten aanzien van het specifieke probleem van een transitie naar een duurzaam energiesysteem geldt dat efficiëntieverbeteringen strijdig kunnen zijn met het streven naar een transitie, aangezien zij de insluiting ('lock-in') van het huidige systeem op basis van fossiele brandstoffen versterken. Het verdient daarom aanbeveling om bij het streven naar energie-efficiëntie prioriteit te geven aan de opwekking, transport, omzetting en eindverbruik van energie met als basis vernieuwbare energiebronnen (wind, zon, water). De verleiding is groot om alle aandacht op energiebesparing van fossiele brandstoffen te richten omdat er al veel kennis beschikbaar is en omdat het om een hoog energiegebruik gaat, maar dit kan botsen met de realisatie van lange termijn energietransitiedoelen. Een vergelijkbare redenering gaat op voor warmtekrachtkoppeling en schoon fossiel (CO₂-afvang en -opslag), aangezien deze ook tot een versterking van de lock-in van fossiele brandstoffen kunnen leiden. In beleid kan men als reactie hierop kritische technische en institutionele randvoorwaarden opstellen voor energiebesparing en warmtekrachtkoppeling gericht op maximale flexibiliteit in de richting van hernieuwbare energie als primaire bron. Tevens kan duurzame energieopwekking (met hernieuwbare bronnen) extra worden gestimuleerd als daar tegenover extra inspanningen voor energiebesparing staan. Aldus kan het negatieve effect van versterkte besparingsinspanningen en andere maatregelen op de transitie worden gecompenseerd.

De complexiteit van het energiesysteem impliceert dat een variatie aan toekomstbeelden over mogelijke structuren moet worden geschetst, op basis van alle relevante combinaties van elementen, zoals de mate van (de)centralisatie, het soort energiebron, het type energiedrager, de specifieke technologie en de mate van systeemintegratie (elektriciteitsopwekking en verkeer/vervoer). Dit kan leiden tot toekomstbeelden die het accent leggen op zon, wind, waterstof, kernfusie, energiebesparing of schoon fossiel. Vanuit die toekomstbeelden kan vervolgens worden teruggewerkt naar transitietrajecten, en vandaar uit naar de selectieomgeving en de invloed van beleid daarop. De overheid zal hierbij het voortouw moeten nemen, vanuit haar verantwoordelijkheid ten aanzien van duurzaamheid en voorzieningszekerheid. Tevens moeten hierbij de externe kosten van de energievoorziening in energieprijzen worden verwerkt.

Het is van belang om relevante kennis effectief te bundelen. Dit levert niet alleen een test op van het realisme van bepaalde opties maar kan tevens aanleiding geven tot niet eerder voorziene innovatieve combinaties. Een netwerk van transitiedeskundigen is reeds in het leven geroepen, en op lokaal niveau wordt vaak al (leken)kennis gebundeld in een duurzame richting.² Tenslotte zou een transitiepanel een rol kunnen spelen in het bundelen van relevante kennis en het beoordelen van innovativiteit en realisme van bepaalde opties. Tevens kan een dergelijk panel de continue afweging tussen diversiteit en doelmatigheid (efficiëntie) in de gaten houden, zodat niet een van beide gaat domineren.

Tot slot zijn twee opmerkingen van meer algemene aard te maken. Allereerst geldt dat vanuit een evolutionair-economisch perspectief de fundamentele afweging neerkomt op een balans vinden tussen doelmatigheid en diversiteit, ofwel tussen de korte termijn kosten en lange termijn baten van diversificatie. De traditionele economie (h)erkent deze afweging niet. Er zijn echter nog geen bruikbare richtlijnen om deze afweging te kunnen maken. Dus resteert een kwalitatieve beoordeling op basis van de opinie en intuïtie van experts. Het ontwikkelen van een goede methode voor het maken van deze afweging is van belang in toekomstig vervolgonderzoek. Een tweede algemene opmerking is dat de evolutionaire economie in principe het economisch systeem beschrijft als een autonoom en doelloos proces. Milieu- en transitiebeleid impliceren dat normatieve elementen aan dit systeem worden toegevoegd via beleid gericht op het stimuleren van innovaties dan wel het beïnvloeden van de selectieomgeving. Als gevolg hiervan verandert evolutie van een autonoom, doelloos proces in een deels gestuurd proces op grond van politiek bepaalde grenzen. Het beeld van doelloze evolutie is overigens vergelijkbaar met het beeld in de traditionele economie van inherent doelloze marktwerking. Zoals beleid ter correctie van marktfalen er in een dergelijke context voor zorgt dat marktwerking ten dienste komt te staan van de sociale welvaart, zo kan milieu- en transitiebeleid de evolutionaire veranderingen in de economie ten dienste stellen van lange termijn welvaart en duurzaamheid. In de tabellen 3.1 en 3.2 worden de belangrijkste kernpunten van dit hoofdstuk samenvattend in beeld gebracht.

² Veel transitiedeskundigen zijn aangesloten bij het Netwerk Systeeminnovaties, dat vanuit de ICES/KIS-3 Investeringsimpuls wordt aangestuurd. Een goed voorbeeld van een lokaal netwerk gericht op duurzaamheid is VEL/VANLA, dat in Noordoost Friesland activiteiten in de richting van een duurzame landbouw coördineert met ondersteuning van de Landbouwuniversiteit Wageningen.

Tabel 3.1 Beleidsimplicaties voortvloeiend uit evolutionair-economische inzichten

Evolutionair-economisch element	Effect	Barrière / opportunity (B/O)	Gewenste beleidsrespons en voorbeelden van instrumenten	Opmerkingen
<i>Populatie met diversiteit aan agenten, strategieën of technieken</i>	Diversiteit (in besluitvorming, strategieën e.d. van bedrijven)	O	Koesteren en stimuleren van diversiteit aan opties; niet bang zijn voor verspilling, want dat is korte termijn denken; verspilling is noodzakelijk want het komt innovativiteit en een beter systeem op lange termijn ten goede.	
<i>Innovatie</i>	Vergroten diversiteit, verbeteren gewenste prestaties	O	Met name majeure innovaties stimuleren door wederzijdse bevruchting – (re)combinaties – van een variatie aan alternatieven (meerdere vormen van vernieuwbare energie naast elkaar).	
<i>Selectieomgeving</i>	Verminderen diversiteit, verbeteren of verminderen gewenste prestatie systeem, o.a. door imitatie	O en B	Correcte prijzen, controleren liberalisering (marktwerking), privatisering (netwerken) en internationalisering van regulering voor duurzaamheid (met name gericht op emissies van broeikasgassen en verzurende stoffen), stimuleren groenfondsen (gericht op wind en zonne-energie) en consumenten (bijv. groene en natuurstroom).	
<i>Begrensde rationaliteit</i>	Beperkte tijdshorizon (myopie)	B	Verlengen tijdshorizon d.m.v. o.a. subsidies, 'zachte' leningen, octrooiregels, stimuleren nichemarkten	
	Gewoonte- en imitatiegedrag bij consumenten	B en O	Gedragbeïnvloeding: informatie, educatie, 'voorbeeldgedrag' van invloedrijke personen/groepen	
<i>Padafhankelijkheid en lock-in</i>	Toenemende schaal-opbrengsten en 'lock-in' in (maatschappelijk gezien) inferieure technologieën	B	Creëren 'gelijk speelveld' door: internaliseren externe kosten in prijzen; steun voor technologieën aan begin van de leercurve; gelijkschakelen tijdshorizon; corrigeren van toenemende schaalvoordelen Vermijd vroege lock-in van zowel onaantrekkelijke als aantrekkelijke opties; beter een minimum aan diversiteit handhaven teneinde flexibiliteit (veerkracht) en nieuwe transities in de toekomst te faciliteren.	Mechanisme nodig om te voorzien in blijvende diversiteit; richtlijn nodig om afweging te kunnen maken tussen diversiteit en schaalvoordelen; criterium nodig om opties af te sluiten dan wel te stimuleren.
<i>Co-evolutie</i>	Moeilijk voorspelbaar en stuurbaar systeem	B	Doorgronden van evoluerende deelsystemen en interacties daartussen zodat co-evolutionaire feedbacks ertussen kunnen worden bepaald; eventueel systemen onafhankelijk maken waar feedbacks ongunstig uitwerken; en gunstige positieve feedbacks bevorderen.	Alle transities worden gekenmerkt door co-evolutie, hetgeen ze complex en moeilijk voorspelbaar en stuurbaar maakt.

Tabel 3.2 Mogelijke beleidsimplicaties van de evolutionaire economie met betrekking tot de energievoorziening op lange termijn

<p>Genereren van een groot aantal mogelijke toekomstbeelden op basis van combinaties van de belangrijkste parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> • centraal/decentraal; • mate van systeemintegratie; • energiebronnen, energiedragers en omzettingstechnologieën.
Eerste screening van toekomstbeelden
Vertalen van resterende toekomstbeelden in opties met tijdspaden ('backcasting'): diversiteit of opties genereren
<p>'Gelijk speelveld' creëren en handhaven om alle opties open te houden en een kans te geven:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Externe effecten in prijzen verwerken • Economisch niet gefundeerde subsidies afschaffen • Lock-in ongedaan maken of vermijden (creëren van niches; aanpakken marktmacht; bijsturen technologieontwikkeling) • Wetenschappelijk onderzoek gericht op fundamentele en risicovolle innovaties stimuleren • innovatie-afspraken maken met grote, gevestigde spelers • ideeën van wetenschappers omzetten in toepasbare technologie (via stimulering van nieuwe, kleine bedrijven) • diversiteit aan energiedragers, energiebronnen en decentrale/centrale energievoorziening; lokale initiatieven een kans geven (unieke aanpak op stedelijk/regionaal niveau).
Bundelen van kennis rond transitie en systeeminnovaties (transitie-netwerken)
'Transitiepanel' van onafhankelijke deskundigen in het leven roepen t.b.v. het bundelen van relevante kennis en het beoordeling van innovativiteit en realisme van bepaalde opties.
Gevoel van urgentie creëren door adequate informatievoorziening en educatie
Wetenschappelijk onderzoek naar transitie stimuleren

4 Evolutionair beleid voor energie-innovaties

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft in algemene termen het huidige Nederlandse beleid ten aanzien van het stimuleren van energie-innovaties. Het uitgangspunt is de volgende centrale vraag:

In welke mate liggen de visies op het beleid ten aanzien van het stimuleren van energie-innovaties (zoals weergegeven in huidige Nederlandse beleidsdocumenten en adviezen) in lijn met de inzichten van de evolutionaire economie?

Verschillende beleidsterreinen zijn van belang voor het stimuleren van energie-innovaties, zoals het energiebeleid, het milieubeleid, het klimaatbeleid, het technologie- of innovatiebeleid, het wetenschapsbeleid en het transitiebeleid. In dit hoofdstuk kijken we met name naar het energiebeleid en het technologie- en innovatiebeleid. De andere beleidsvelden komen aan de orde voorzover ze direct betrekking hebben op energie-innovaties.

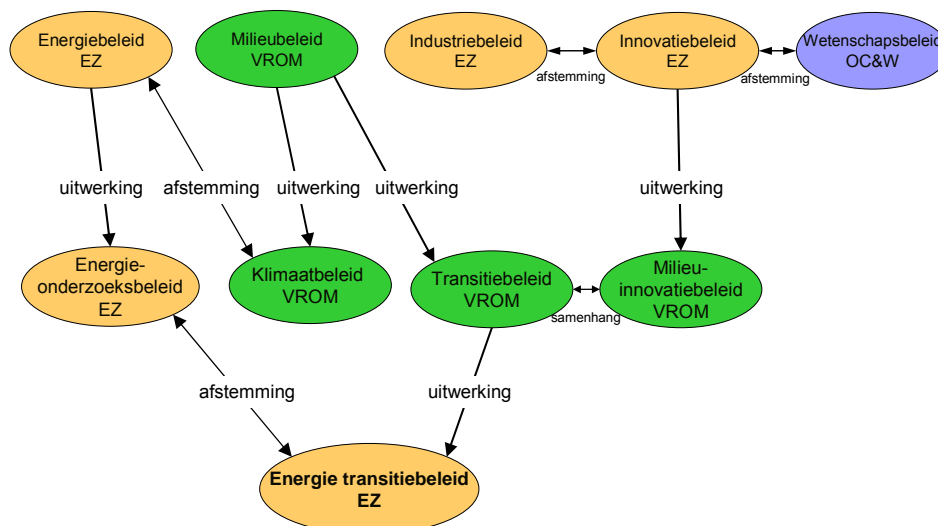
Dit hoofdstuk begint met een korte opsomming van de beleidsnota's en adviezen die in deze studie tegen het licht zijn gehouden. De focus ligt daarbij op samenhang en motivatie voor het energieonderzoeksbeleid en het innovatiebeleid, zonder overigens een uitgebreide analyse te geven van deze beleidsvelden. In paragraaf 4.5 beschrijven we in kwalitatieve termen of en op welke wijze er in de nota's aandacht is besteed aan begrippen die een centrale rol spelen in de evolutionaire economie (zie Tabel 2.1). In hoofdstuk 5 wordt een aantal specifieke energietechnologieën in case-studies nader uitgewerkt.

4.2 Beleidsdocumenten en adviezen

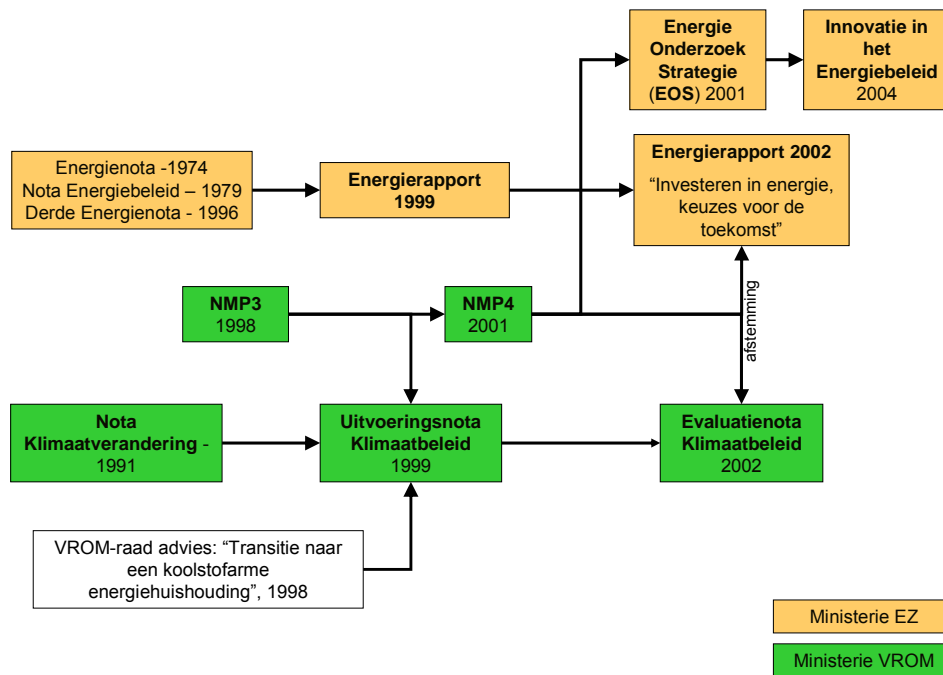
Sommige beleidsterreinen zijn duidelijk in de geschiedenis te traceren voor andere is dat veel moeilijker. Het *energiebeleid* gaat al decennia terug en is vanaf de jaren zeventig min of meer helder te volgen. Het *technologiebeleid* is wat moeilijker te traceren, met name omdat het voorheen ook onderdeel was van het industriebeleid. Tegenwoordig spreekt men bij voorkeur over *innovatiebeleid*, wanneer de overheid zich richt op het stimuleren van innovaties en technologische ontwikkelingen. *Transitiebeleid* is in 2001 in het Vierde Nationaal Milieubeleidsplan (NMP4) geïntroduceerd, en het is daarmee een nog jong beleidsterrein (VROM, 2001). Transitiebeleid is een systeembenadering die voortkomt uit het reguliere milieubeleid, maar inhoudelijk gaat het verder dan de ecologische component alleen. Er zijn duidelijke raakvlakken met het energie- en innovatiebeleid. Dit hoofdstuk concentreert zich op het beleid vanaf de eeuwwisseling.

De complexiteit van het beleid ten aanzien van het stimuleren van energie-innovaties hangt sterk samen met de betrokkenheid van verschillende ministeries en directies van ministeries. Specifiek beleid ten aanzien van het stimuleren van energie-innovaties wordt voornamelijk vorm gegeven op het Ministerie van Economische Zaken (EZ). Dit ministerie is verantwoordelijk voor het energiebeleid en het generieke technologie- en innovatiebeleid. Het milieubeleid wordt door het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) gecoördineerd. Hiermee heeft VROM ook een belangrijke rol in het stimuleren van milieu-innovaties. Het door VROM gecoördineerde klimaatbeleid (als onderdeel van het milieubeleid) heeft weer een relatie met het energiebeleid van EZ. Het transitiebeleid kan worden gezien als dat deel van het milieubeleid dat zich richt op de lange termijn. Hoewel het transitiebeleid dus inhoudelijk breder is dan (of zelfs overkoepelend aan) de andere genoemde beleidsvelden, is het beleidsmatig onderdeel van het milieubeleid. Het transitiebeleid wordt door VROM gecoördineerd, maar de coördinatie van de afzonderlijke deeltransities landbouw, energie, biodiversiteit en mobiliteit is over verschillende vakministeries verdeeld. EZ is de regisseur van de energietransitie.

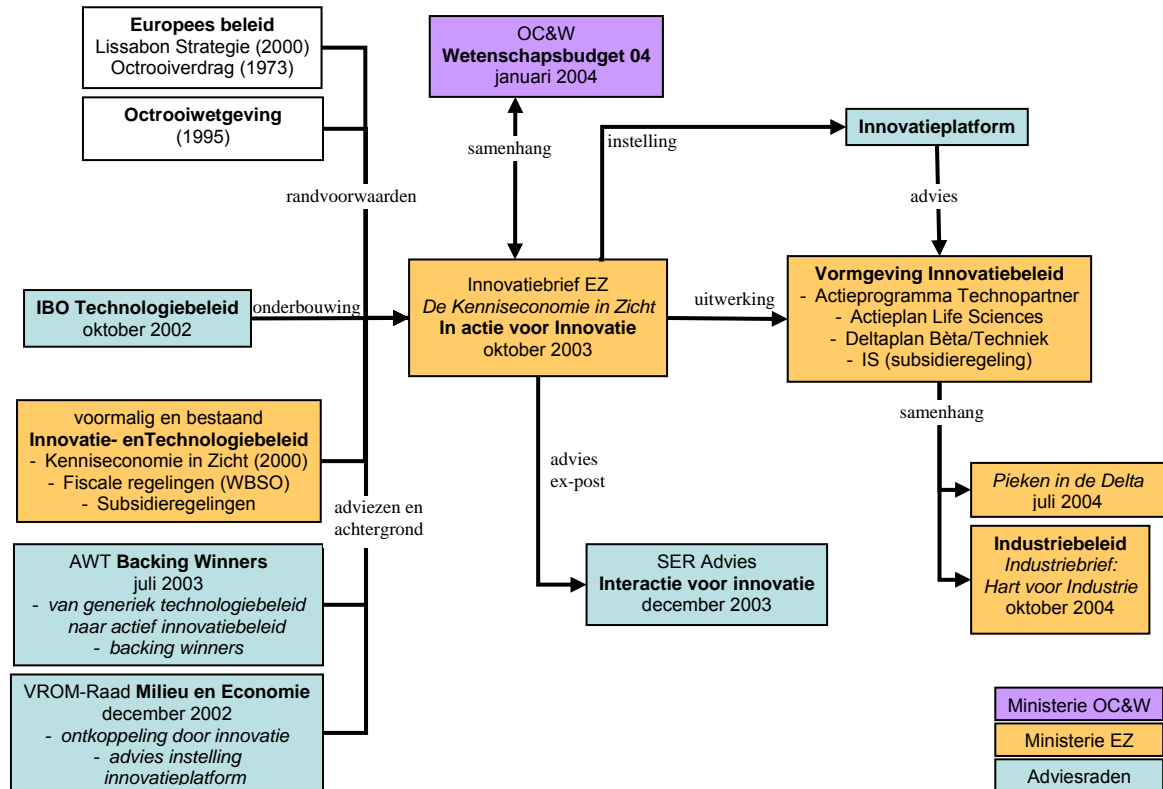
Het wetenschapsbeleid wordt vormgegeven door het Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OC&W), in nauwe samenhang met het innovatiebeleid. Figuur 4.1 geeft een globale samenhang tussen de beleidsterreinen die energie-onderzoek en -innovaties direct beïnvloeden. Figuur 4.2 en Figuur 4.3 geven de samenhang tussen een aantal nota's en adviezen die een belangrijke rol hebben gespeeld in de vormgeving van het huidige beleid. Uiteraard beïnvloeden vele andere beleidsterreinen direct of indirect het energie-onderzoek en de toepassing van energie-innovaties, zoals onderwijs, economisch beleid, ruimtelijke ordening en externe veiligheid. Deze beleidsterreinen worden in deze analyse buiten beschouwing gelaten.



Figuur 4.1 Samenhang tussen beleidsvelden rond de ontwikkeling van energie-innovaties (elk departement heeft een eigen kleur).



Figuur 4.2 Samenhang tussen nota's en beleidsstukken van verschillende ministeries rond energie- en klimaatbeleid



Figuur 4.3 Samenhang tussen nota's, adviezen en instellingen rond de vormgeving van het innovatiebeleid

4.3 Energiebeleid

4.3.1 Historisch overzicht van het Nederlandse energiebeleid

Als reactie op de energiecrisis en het rapport aan de club van Rome (Meadows e.a., 1972), verscheen in 1974 de eerste Energienota (EZ, 1974). In 1979 volgde de Nota Energiebeleid (EZ, 1979). Belangrijkste motivatie voor het energiebeleid, zoals vormgegeven in deze beide nota's, is de snelgroeiende energievraag en de afhankelijkheid van de olieleverende OPEC-landen. Energiebesparing krijgt daarom de hoogste prioriteit. Daarnaast moet diversificatie van de brandstofinzet voor de elektriciteitsproductie de afhankelijkheid van olie (en gas) verminderen. In eerste instantie wordt kernenergie gezien als een aantrekkelijk alternatief voor fossiele brandstoffen. Tot ver in de jaren zeventig gaat het meeste onderzoeksgeld van de overheid dan ook naar de ontwikkeling van kernenergie, maar door de groeiende maatschappelijke weerstand neemt dit in de loop der jaren snel af.³ Er wordt steeds meer geïnvesteerd in onderzoek voor energiebesparing en in de ontwikkeling van wind- en zonne-energie en milieuvriendelijke kolenverbranding.

In de jaren tachtig worden de verzuring en het klimaatprobleem als bijkomende redenen genoemd voor het energiebeleid en onderzoek naar duurzame energiebronnen. In 1990 komt het ministerie van EZ met de Nota Energiebesparing. Het ministerie van VROM brengt in 1991 de Nota Klimaatverandering uit die, wat betreft acties op het gebied van energie sterk verwijst naar de Nota Energiebesparing. Het verhogen van de efficiëntie van energiegebruik (lees: energiebesparing) wordt gezien als de belangrijkste maatregel van het CO₂-beleid in de energiesector. Daarnaast worden onderzoeks- en stimuleringsprogramma's aangekondigd voor de brandstofcel, warmtekrachtkoppeling, zonneboilers en zonnecellen, biomassa en windenergie. Verder wordt er een onderzoek gestart naar een regulerende energie- of CO₂-heffing. In 1996 verschijnt de Derde Energienota. Nog steeds is de afhankelijkheid van het beperkte aantal landen dat fossiele brandstof produceert een belangrijke motivatie voor het energiebeleid. Het klimaatprobleem speelt daarnaast een steeds prominentere rol in de vormgeving van het beleid. Tenslotte is ook de liberalisering van de energiemarkt in Europa een steeds voornamer *Leitmotiv* in het energiebeleid, met name vanwege de mogelijke effecten voor de voorzieningszekerheid.

³ De opeenvolgende nota's voorzien echter nog steeds in de groei van het aantal kerncentrales in Nederland, ook nadat de in 1979 ingestelde 'Brede Maatschappelijke discussie' concludeert dat de meerderheid van de Nederlandse bevolking tegen deze vorm van elektriciteitsopwekking is. De ramp met de kerncentrale in Tsjernobyl in 1986 betekent dat ook het kabinet verdere ontwikkeling van kernenergie in Nederland niet meer als acceptabele optie ziet. In het NMP4 (VROM, 2001) wordt kernenergie wel weer als optie genoemd, met name vanwege de klimaatproblematiek.

4.3.2 Uitgangspunten recent beleid

Liberalisering van de energiemarkt en de doelstellingen voor de reductie van CO₂-emissies zoals vastgelegd in het Kyoto-protocol van 1997 zijn de voornaamste uitgangspunten van het huidige energiebeleid. De overheid hoopt blijkens de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid een fors deel van de Kyoto-doelstellingen te kunnen realiseren met energiebesparing en duurzame energie (VROM, 1999). In de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid wordt, in navolging van het VROM-raad advies uit 1998, gesproken over de noodzaak om te komen tot een *transitie naar een koolstofarme energiehuishouding*. Het concept van transitie wordt in het NMP4 verder uitgewerkt: “Voor het oplossen van de grote milieuproblemen is systeeminnovatie nodig, die op verschillende manieren vorm kan krijgen. Bij enkele daarvan zal de innovatie vorm moeten krijgen door middel van een maatschappelijk transformatieproces van lange duur (vaak meer dan een generatie). Die transformatie houdt technologische, economische, sociaal-culturele en institutionele veranderingen in, die op elkaar inwerken en elkaar moeten versterken” (VROM, 2001: p. 74).

Het klimaatprobleem is één van die harnekkige milieuproblemen en aangezien de energievoorziening en mobiliteit de grootste veroorzakers zijn van CO₂-emissies is één van de nodig geachte transities de ‘transitie naar een duurzame energiehuishouding’ (VROM, 2001). Het energietransitiebeleid is verder vormgegeven in de nota’s ‘Energie Onderzoek Strategie-EOS’ (EZ, 2001), ‘Energierapport 2002; Investeren in energie, keuzes voor de toekomst’ (EZ, 2002), ‘Evaluatienota Klimaatbeleid’ (VROM, 2002) en ‘Innovatie in het Energiebeleid’ (EZ, 2004). Daarnaast zijn er diverse andere beleidsdocumenten en plannen van aanpak voor (onderdelen) van de energietransitie.⁴

Van belang is de in EU-verband overeengekomen recente liberalisering van de energiemarkt. Een bijkomend gevolg van deze liberalisering is een afnemende prikkel voor de energiesector om lange termijn onderzoek te doen. Dit onderzoek is echter wel nodig voor de gewenste energie-transitie. Het innovatiebeleid alleen is hiervoor te generiek, en dit rechtvaardigt voor de overheid de aanvullende taak specifiek aandacht te besteden aan het stimuleren van lange termijn energieonderzoek. Dit wordt grotendeels vorm gegeven in de ‘Energie Onderzoek Strategie (EOS)’ (EZ, 2001).

4.3.3 Vormgeving energiebeleid ter stimulering energie-innovaties

De stimulering van energie-innovaties wordt ingegeven door twee beleidsdoelen, die beide zijn afgeleid uit de (overkoepelende) Kyoto-doelstellingen voor het verminderen van de CO₂-uitstoot. De eerste doelstelling is om tot een energiebesparing van 2% per jaar te komen (EZ, 1998). De tweede doelstelling is om 10% van het totale energiegebruik in 2020 uit duurzame energiebronnen te genereren (VROM, 1999). In de Memorie van Toelichting op de begroting van Economische Zaken voor 2004 zijn de operationele doelstellingen van het energiebeleid als volgt geformuleerd (EZ, 2004a):

⁴ Zie voor een overzicht de EZ website over transities: www.energietransitie.nl

1. *Energie-efficiëntie*: verbetering met gemiddeld 1,3% per jaar;
2. *Duurzame energie*: 10% aandeel in het energiegebruik van 2020;
3. *Duurzame ('groene') elektriciteit*: 9% in 2010 (tussendoel: 6% in 2005);
4. *CO₂-emissiereductie*: 9,4 Mton CO₂-equivalent per jaar in de periode 2008-12 (ten opzichte van 1990).

EOS maakt onderscheid tussen onderzoek voor de lange termijn en voor de korte termijn. Voor het korte termijn-onderzoek ligt de focus op het aanscherpen van normen en het beïnvloeden van de prijsstructuur. Daarbij ziet de overheid voor zichzelf vooral een rol als ondersteuner, makelaar en kennisoverdrager van partijen die betrokken zijn bij het (korte termijn) energieonderzoek en toepassing van nieuwe energietechnieken (EZ, 2001). Ten aanzien van het lange termijn-onderzoek ziet de overheid voor zichzelf meer een rol als regisseur, waarbij dus welbewust een richting aangegeven wordt. Twee criteria bepalen daarbij de inzet van het Nederlandse energie-onderzoeksbeleid: de internationale positie van Nederland op het onderzoeksveld en de bijdrage aan een duurzame energiehuishouding. Deze criteria zijn uitgezet in een 'besluit matrix' (zie Figuur 4.4).

	wel een bijdrage aan een duurzame energiehuishouding	geen bijdrage aan een duurzame energiehuishouding
<i>NL heeft wel internationale topositie</i>	speerpunten	kennisexportthema's
<i>NL heeft geen internationale topositie</i>	kennisimportthema's	niet relevante thema's

Figuur 4.4 Besluitmatrix voor het lange termijn-energieonderzoek in Nederland

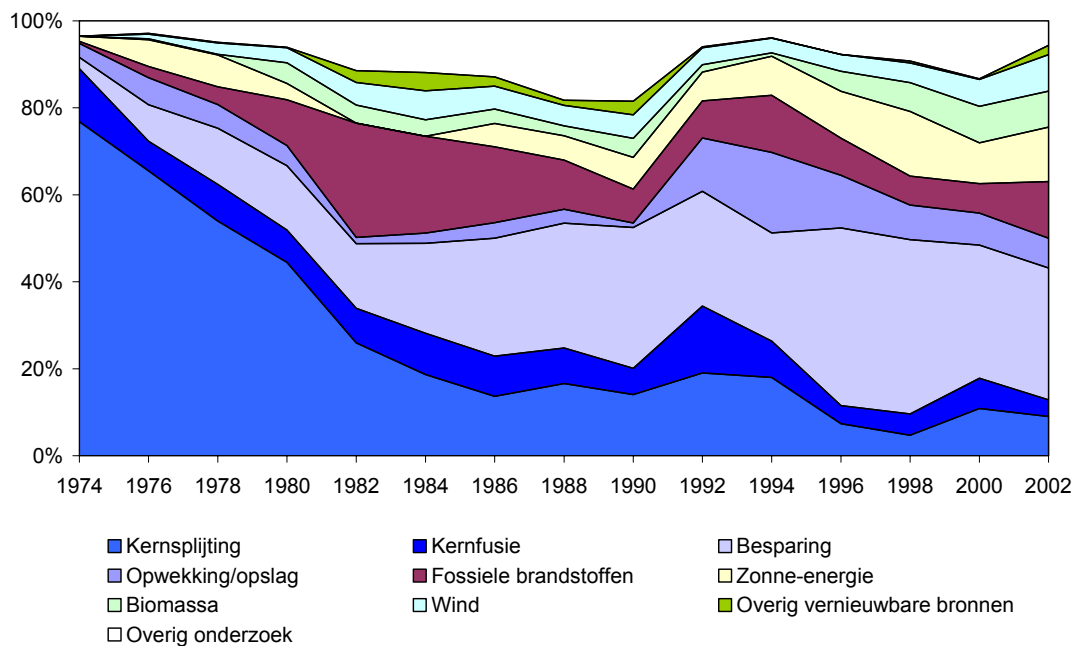
Bron: EOS (EZ, 2001)

Speerpunten van het energieonderzoek zijn onderzoeksvelden waarin Nederland een internationale topositie heeft en die een bijdrage leveren aan een duurzame energiehuishouding. Om versnippering van het onderzoek te voorkomen worden er niet meer dan vijf speerpunten gekozen. *Kennis-importthema's* zijn onderzoeksvelden die vanuit energieoogpunt van belang zijn maar waar Nederland een zwakke kennispositie heeft. EOS geeft aan dat het voor deze thema's van belang is de aanwezige kennis te handhaven en verder actief kennis te importeren. Het stimuleren van R&D wordt voor deze thema's minder passend geacht. Demonstratieprojecten zijn wel gepast. Bij *Kennisexportthema's* en *Niet relevante thema's* ziet EOS geen rol voor de overheid voor specifieke ondersteuning vanuit het energieonderzoek.

Bij de concretisering van het energieonderzoeksbeleid zet EOS in op een mix van beleidsinstrumenten, waarbij rekening wordt gehouden met de afstand tot de

marktintroductie. De overheid maakt daarbij steeds meer gebruik van de instrumenten van het generieke innovatiebeleid (zie paragraaf 4.4). Daarnaast is er nog ruimte voor financiële ondersteuning van speerpunten en kennisimportthema's. Die financiële ondersteuning richt zich dan met name op co-financiering (ondersteuning van onderzoek bij kennisinstututen dat primair door het bedrijfsleven wordt aangestuurd en gefinancierd), lange termijn onderzoek, demonstratie, en kennisinfrastructuur (gericht op instandhouden en ontwikkelen van kennis voor de doelstellingen van het energiebeleid). Verschillende actoren spelen hierbij een rol, van fundamenteel onderzoek op de universiteiten tot toepassingen bij bedrijven. Intermediaire organisaties als ECN spelen een ondersteunende rol voor marktpartijen.

Het energieonderzoeksbudget in Nederland bedroeg in 2001 ongeveer €10 miljoen, waarvan ongeveer €40 miljoen door de rijksoverheid werd gefinancierd. De bijdrage vanuit de Europese Commissie was ongeveer €20 miljoen, en circa €150 miljoen werd privaat gefinancierd (EZ, 2001). De bestemming van de energieonderzoeksgelden is over de jaren heen nogal gewijzigd. In de jaren zeventig gingen de meeste onderzoeksgelden naar kernenergie. In de jaren tachtig en negentig is het aandeel energiebesparing en duurzame energie (onder andere zonne-energie, windenergie, biomassa en afval) sterk gegroeid (zie Figuur 4.5).



Figuur 4.5 Verdeling energie-onderzoeksgelden in Nederland, 1974-2002 (aandelen)

Bron: IEA (www.iea.org)

Figuur 4.5 laat zien dat de diversiteit van het energieonderzoek sinds de jaren zeventig flink is toegenomen. Toch is ook op EOS de kritiek geuit dat zij te beperkt is tot een klein aantal hoopvolle energietechnologieën, waarbij niet of nauwelijks rekening wordt gehouden met leereffecten en ervaringen (Kets en Schaeffer, 2004). De kosten per eenheid duurzame technologie dalen normaliter als gevolg van (private of publieke) R&D-investeringen en door toepassing van de technologie. De overheid zet dan weliswaar in op R&D en op demonstratieprojecten, maar ze houdt te weinig rekening met het leereffect van geïnstalleerd vermogen ('learning by using'), aldus Kets en Schaeffer (2004).

Na het uitkomen van EOS heeft het energieonderzoeksbeleid via het transitiepad verder vorm gekregen, met name waar het zich richt op de lange termijn. Voor het energietransitiebeleid werkt de overheid bij voorkeur samen met het bedrijfsleven en met 'open agenda's'. De overheid kiest daarbij geen specifieke opties, maar organiseert haar beleid rond een cluster van opties. Deze zogenaamde hoofdroutes moeten marktpartijen houvast bieden. Er zijn vijf hoofdroutes geselecteerd (EZ, 2004a):

- *Efficiënt en groen gas*: hier wordt nadrukkelijk rekening gehouden met de voorbereiding op een toekomstige waterstofeconomie, die gebruik kan maken van de aardgas-infrastructuur;
- *Keten-efficiëntie*: besparing energie en grondstoffen over de hele keten;
- *Groene grondstoffen*: biomassa ter vervanging van fossiele brandstof, maar ook als grondstof voor chemische industrie;
- *Alternatieve motorbrandstoffen*: ter vervanging van olieproducten;
- *Duurzame elektriciteit*: met name biomassa en wind, maar ook opties in de gebouwde omgeving ('opties achter de meter').

Het is de bedoeling om deze hoofdroutes in de komende tijd verder uit te diepen en te concretiseren. De Algemene Energieraad en de VROM-Raad krijgen een adviserende functie in de verdere verdieping. Concretisering zal onder andere plaatsvinden met behulp van transitie-experimenten, waarvoor binnen de zogenaamde Unieke Kansen Regeling (UKR) inmiddels €35 miljoen is gereserveerd. De programmering van EOS en de kennisinfrastructuur (ECN, SenterNovem) zullen op de transitieaanpak worden toegesneden. Expliciet wordt gewezen op de mogelijkheid om de ervaringen van de energietransitie toe te passen bij de verdere invulling van het generieke beleid, zoals bijvoorbeeld fiscale vergroening. Tenslotte wijst EZ in zijn notitie op de internationale verankering, zowel in samenwerking en netwerken, als in de mogelijkheid voor buitenlandse partners om van de Nederlandse 'experimenteerruimte' gebruik te mogen maken (EZ, 2004a).

4.4 Innovatiebeleid

4.4.1 Historisch overzicht van het Nederlandse innovatiebeleid ⁵

Tot ver in de jaren zeventig werd wetenschap en technologie vormgegeven via verschillende beleidslijnen op verschillende ministeries. Meestal werd hierin het Amerikaanse voorbeeld gevolgd: wetenschap als motor voor vooruitgang. Dit was gebaseerd op een sterk lineair concept van technologieontwikkeling. In 1979 werd de Innovatienota gepubliceerd door het toenmalige Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. Dit was een belangrijk startpunt voor het innovatiebeleid. De rol van wetenschap en technologie veranderde van 'vooruitgangsmotor' naar 'probleemoplosser' (Kern, 2000). De beleidsaandacht verschoof van de ontwikkeling van innovaties naar de toepassing en vermarkting er van. Dit beleid werd sterk vormgegeven in de vorm van een soort industriebeleid, waarbij individuele bedrijven steun kregen voor de ontwikkeling van specifieke technologieën.

In de jaren tachtig kwam het failliet van dit industriebeleid, met name door miljardenaffaires zoals de RSV. Het beleid werd daarna steeds generieker, maar wel met speciale aandacht voor strategische technologiegebieden, zoals informatietechnologie, biotechnologie en materiaalontwikkeling. De aandacht verschoof verder van ontwikkeling en aanbod van technologie naar een meer vraaggestuurde vormgeving van technologieontwikkeling. Marktoriëntatie stond dan ook steeds meer centraal. De overdracht van kennis werd een steeds belangrijker aandachtspunt. Eind jaren tachtig werd niet meer de ontwikkeling van kennis, maar het gebruik ervan het centrale element van het Nederlandse innovatiebeleid. De Commissie Dekker (1987) had dit ook als centrale boodschap aan de regering geadviseerd: focus op kennisoverdracht en gebruik kennis voor de ontwikkeling van nieuwe producten ten behoeve van de concurrentiekracht, in plaats van een focus op kennisontwikkeling. Kritiek op dit beleid kwam vooral van de Raad van Advies voor het Wetenschapsbeleid (RAWB), die wees op het risico dat het fundamentele onderzoek in Nederland achter zou raken (Kern, 2000).

In de jaren negentig bleek dat veel (grote) bedrijven hun R&D afbouwden of verplaatsten naar het buitenland. In deze periode werd de strategische vormgeving van het beleid steeds integraler, op basis van een drietal hoofdlijnen: versterken van publiek-private netwerken, versterking van de onderzoeksinfrastructuur en betere sociale inbedding (Kern, 2000). Dit is een volgende stap in de integratie van het innovatiebeleid in andere beleidsgebieden, een tendens die onder de paarse kabinetten werd doorgezet. Het beleidsinstrumentarium voor het innovatiebeleid werd daarmee ook steeds generieker van aard, met bijvoorbeeld de instelling van een fiscale regeling als de Wet Bevordering Speur- en Ontwikkelingswerk (WBSO)⁶. Het is interessant om te zien dat de ontwikkeling van milieutechnologie nog steeds erg lineair werd beschouwd in de Nota *Technologie en Milieu* (1991). Opmerkelijk daarin is ook de

⁵ Voor deze paragraaf is sterk gebruik gemaakt van Kern (2000).

⁶ De officiële naam luidt Wet Vermindering Afdracht Loonbelasting en Premie Volksverzekeringen, Onderdeel Speur- en Ontwikkelingswerk.

nauwkeurige inschatting van de potentie van milieutechnologie: “Globaal kan de helft van de uitstoot van schadelijke stoffen worden aangepakt met technologie die al op kleinere of grotere schaal in gebruik is. Ongeveer een zesde deel is vervolgens oplosbaar met technologie die nu in een demonstratiefase verkeert. De rest moet komen van technologieën in de onderzoeksfase of van geheel nieuwe technologieën” (EZ en VROM, 1991).

Eind jaren negentig maakt het lineaire concept van technologie-ontwikkeling plaats voor een systeemaanpak. Dit zogenaamde *clusterbeleid*, waarin netwerken van bedrijven en kennisinstellingen centraal staan en waar de ontwikkeling, overdracht en gebruik van kennis onderdeel van beleid zijn. De beleidsfocus is sterk gericht op het wegnemen van deze marktperfectionen, met name door deregulering en privatisering (zie Kern, 2000, met verwijzing naar Roelandt e.a., 1997).

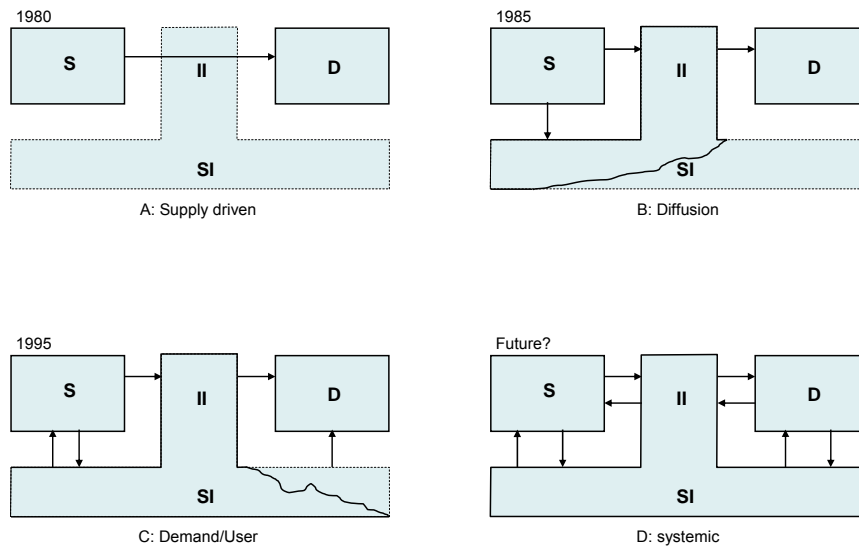
In grote lijnen is dus een verschuiving zichtbaar van aanbodgedreven innovatiebeleid naar uiteindelijk een systeembenadering, waarin rekening wordt gehouden met alle functies van het innovatiesysteem (zie Figuur 4.6). In de toepassing van beleidsinstrumenten ligt de nadruk echter nog veel op het ‘oude’ financiële instrumentarium, terwijl er nog veel kansen open liggen voor *systeeminstrumenten*, zoals Innovatienetwerken, integrale programma’s (DTO) en toekomstverkenningen (Smits en Kuhlmann, 2004). Er is wel een toenemende tendens zichtbaar naar de ontwikkeling van deze systeeminstrumenten, met name vanuit het transitiebeleid.

4.4.2 Uitgangspunten van recent beleid

In maart 2000 tekenden de Europese regeringsleiders voor de Lissabon Strategie, met als belangrijkste doelstelling om de Europese Unie in 2010 de meest concurrerende en dynamische kenniseconomie ter wereld te laten zijn.⁷ Bij de Top van Göteborg (juni 2001) werd duurzame ontwikkeling ingepast als een belangrijk onderdeel van de Lissabon Strategie: duurzaamheid als kans voor economische groei.

De eerste Nederlandse invulling van de Lissabon Strategie is ‘De Kenniseconomie in zicht’ (EZ, 2000a). De inzet van deze nota was vooral om enkele structurele hervormingen door te voeren, zoals het versnellen van de liberalisering van netwerksectoren als energie en telecom en het versneld voltooiën van de interne markt voor financiële diensten. In 2002 volgt dan een invloedrijke interdepartementale studie voor een herziening van het Nederlandse innovatiebeleid, waarin wordt gewezen op de maatschappelijke baten voor kennisontwikkeling als legitimatie voor een (thematisch) innovatiebeleid (IBO, 2002).

⁷ Zie de Presidency Conclusions van de Voorjaarstop Lissabon (2000): http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/ec/00100-r1.en0.htm



Figuur 4.6 Ontwikkeling van het Nederlandse innovatiebeleid

De figuur geeft een schematisch overzicht van de samenhang in het Nederlandse innovatiebeleid.

D (demand side): gebruikers van kennisdiensten en –producten;

S (supply side): kennisproductie, o.a. universiteiten, laboratoria, onderzoek ,etc.;

II (intermediary infrastructure): omvat innovatiecentra, beleid t.b.v. technologie-overdracht, e.d.;

SI (supportive infrastructure): onderwijssysteem, materiële en immateriële infrastructuur, durfkapitaal, etc.

Bron: Smits en Kuhlmann (2004)

De probleemperceptie en de beleidsoplossing zijn de laatste jaren in veel beleids- en adviesstukken tamelijk unaniem: de productiviteit van de Nederlandse economie blijft achter en de oplossing ligt in een meer kennisintensieve, innovatiegedreven economie (zie ook AWT, 2003; SER, 2003). In 2003 werd het innovatiebeleid met dit uitgangspunt vernieuwd, maar nog wel als invulling van de Lissabon Strategie vormgegeven. De vernieuwde nota valt dan ook nog steeds onder de naam ‘Kenniseconomie in Zicht’, maar het stuk zelf wordt meestal de *Innovatiebrief* genoemd (EZ, 2003b). Het belangrijkste probleem dat in de Innovatiebrief wordt genoemd is dat de groei van de Nederlandse economie structureel achterblijft als gevolg van een gebrek aan innovatievermogen. Belangrijkste oorzaken hiervan zouden zijn: de complexiteit van het Nederlandse innovatiesysteem, het tekort aan kenniswerkers en het onaantrekkelijke innovatieklimaat. Bovendien is er onvoldoende focus en massa in het innovatiebeleid, aldus de Innovatiebrief. In ‘De Kenniseconomie in Zicht’ (zowel in 2000 als in 2003) wordt uitgegaan van een *integrale strategie* om de gevoelde problemen aan te pakken. Dat betekent dat het vernieuwde innovatiebeleid een sector- en

technologieoverschrijdend karakter krijgt. Dit past in een algemene tendens van integratie van het innovatie- en technologiebeleid in andere beleidsterreinen. Daarmee is het innovatiebeleid uiteindelijk verschoven van een vorm van aanbodgedreven technologiebeleid naar een bredere visie op het innovatiesysteem als geheel (Quist, 2004). Tenslotte werd (en wordt) aandacht besteed aan algemeen ondersteunend beleid voor innovaties, zoals het beleid voor hoger onderwijs en het octrooibeleid. Zie tekstbox 4.1 voor een korte uitleg over het octrooibeleid.

Box 4.1 Octrooibeleid

Bescherming tegen ongeautoriseerd gebruik van een uitvinding maakt dat het voor innovatoren zinvol is om in innovatie te investeren, omdat de bescherming voorziet in een bijdrage van de gebruiker aan de uitvinder. Deze bescherming loopt na een periode van meestal 20 jaar af, om voortschrijdende innovaties niet verder te belemmeren. Deze periode geeft een evenwicht aan tussen enerzijds private baten (inkomsten) en kosten (investering in R&D), en anderzijds maatschappelijke baten (de innovatie) en kosten (hogere productprijs). Met name in sectoren als farmacie en electronica speelt de bescherming van uitvindingen en innovaties een cruciale rol.

De bescherming van uitvindingen en innovaties in Nederland is uitgewerkt in de Rijsoctrooiwet. Deze wet uit 1910 werd in 1995 hernieuwd, waardoor octrooi-aanvragen van voor 1995 nog steeds onder de oude wetgeving vallen. Een octrooi is het recht van de octrooihouder op een exclusief gebruiksrecht van zijn of haar uitvinding. Dit houdt in dat de octrooihouder anderen kan verbieden de vinding te gebruiken of producten met de vinding te produceren en te verhandelen. Het octrooisysteem is een ruilsysteem: in ruil voor bescherming van de vinding wordt deze openbaar. Door deze openbaarheid kan de wetenschap voortborduren op eerdere vindingen, zodat de techniek zich verder kan ontwikkelen. Het octrooi wordt door het Bureau Industriële Eigendom (BIE) toegekend. Dit bureau is een overheidsorgaan en valt onder het Ministerie van Economische Zaken.

Op Europees niveau kan octrooi worden aangevraagd bij het European Patent Office (EPO), dat aanvragen regelt op grond van het Europees Octrooiverdrag (1973). Momenteel wordt gewerkt aan herziening van dit verdrag, met name gericht op harmonisering van de verschillende nationale regelingen. De onderhandelingen richten zich met name op octrooien voor software, die nu grotendeels buiten het verdrag vallen. De discussie spitst zich toe op de open-source software en op de breedte van het octrooi: hoe ruim mag een algoritme beschermd worden?

Momenteel woedt er discussie over de rol van intellectueel eigendom onder de WTO, met name in het TRIPS-verdrag (Trade Related Aspects of Intellectual Property Rights). Het verdrag is sinds 1994 in werking, maar in de huidige ronde WTO-onderhandelingen wordt met name fel gediscussieerd over de mogelijkheden om medicijnen in ontwikkelingslanden goedkoper (d.w.z. zonder of met een goedkoop octrooi) op de markt te kunnen zetten.

Informatie:

- *Bureau Industrieel Eigendom* (BIE), www.bie.minez.nl
- *European Patent Office* (EPO), <http://www.european-patent-office.org>
- *Trade Related Aspects of Intellectual Property Rights* (TRIPS), http://www.wto.int/english/tratop_e/trips_e/trips_e.htm

4.4.3 Vormgeving en instrumentarium van innovatiebeleid

Interventie van de overheid wordt meestal gerechtvaardigd vanuit het argument dat de markt niet altijd datgene voortbrengt wat in het collectieve maatschappelijke belang is. Dit staat bekend als *marktfalen*. Er is met betrekking tot innovaties sprake van marktfalen als de markt onvoldoende investeert in R&D die maatschappelijk gezien grote baten kan opleveren. Beleidsinstrumenten die zich richten op marktfalen kunnen bijvoorbeeld het investeringsrisico verlagen, de rendementshorizon naar voren halen of de private baten verhogen. De benadering vanuit het concept innovatiesysteem gaat nog iets verder, en erkent dat niet alleen marktfalen een rol speelt, maar dat er ook *systeemfalen* op kan treden. Er is sprake van systeemfalen als de vormgeving van het totale innovatiesysteem (bestaande uit private en publieke partijen) innovaties belemmert (VROM-Raad, 2002). Het huidige innovatiebeleid gaat uit van het *dynamische innovatiesysteem*: de ontwikkeling, ondersteuning, toepassing en vermarkting van innovaties worden in samenhang beschouwd.⁸ Een innovatiesysteem is een functioneel geheel, met aandacht voor kennisproductie, overdracht en toepassing van kennis. De gedachte is dat met deze benadering overzichtelijk de kansen en barrières in het innovatiesysteem kunnen worden geïdentificeerd, waardoor het beleid zich op die punten kan concentreren. Hiermee wordt beoogd het innovatieklimaat te versterken, de economische dynamiek rond innoverende bedrijven te vergroten en kansen op strategische innovatiegebieden te benutten (EZ, 2003b). Er is overigens wel beargumenteerd dat het concept van innovatiesystemen weliswaar post heeft gevat in strategische beleidsanalyses, maar dat dit nog geen adequate vertaling heeft gevonden in het beleidsinstrumentarium (Kern, 2000; Quist, 2004). De instelling van het Innovatieplatform kan wél gezien worden als een instrument om systeemfalen aan te pakken (zie verderop in deze paragraaf).

Het huidige innovatiebeleid richt zich sterk op het vermeende zwakste punt in het nationale innovatiesysteem: uitwisseling van kennis tussen de betrokken partijen, en toepassing van innovaties in de markt. Met het vernieuwde innovatiebeleid en de meer integrale aandacht voor het innovatiesysteem als geheel, is het beleidsinstrumentarium generieker in vormgeving geworden. Hiertoe is bijvoorbeeld de WBSO-regeling uitgebreid, die voorziet in een belastingaftrek in de afdracht voor de lonen van R&D-werkers. De octrooiwetgeving is belangrijk in de vormgeving van de innovatiekracht van de Nederlandse economie (zie box 4.1). Daarnaast is een aantal oude subsidieinstrumenten samengevoegd tot de Innovatiesubsidie Samenwerkingprojecten (IS), waarvoor elk consortium met een private partij aanvragen kan indienen. Deze worden beoordeeld op vier criteria: duurzaamheid, kwaliteit, innovativiteit en economisch potentieel. Innovativiteit lijkt daarmee verschoven van op zichzelf staand doel naar middel om economische groei te garanderen. Duurzaamheid is ook geen doel van het innovatiebeleid maar eerder een minimum criterium waar een innovatie aan moet voldoen.

⁸ Leidend hierin is Michael Porter (1990). Het concept innovatiesysteem werd vooral uitgewerkt door Nelson (1993), Lundvall (1992) en Edquist (1997)

Opmerkelijk is dat het (letterlijke) failliet van het oude industriebeleid bij de Nederlandse overheid lang heeft geleid tot grote aarzelingen in de vormgeving van het huidige (industriegerichte) innovatiebeleid. De idee dat er op enige wijze sprake kan zijn van (door Europa verboden) staatssteun beperkte in zekere zin de slagkracht van de overheid. Belangrijker wellicht is dat de overheid zich opnieuw moest beraden op de rol die ze moet of kan spelen bij innovatieprocessen. Het balanceren tussen sturing door de overheid enerzijds en het overlaten aan de markt anderzijds is nog altijd een politieke discussie, getuige de discussie in de Tweede Kamer naar aanleiding van de EZ-begroting 2005, waarin de heer Van Dam (PvdA) zegt: “Innovatie ontstaat volgens Porter vooral door concurrentie. Soms heeft de markt een duwtje nodig, zoals bij duurzame energie [...]. Het moet echter wel een duwtje blijven. De overheid mag de investeringen niet overnemen.”

In de recent verschenen ‘Industriebrief’ toont het kabinet de huidige visie op het industriebeleid (EZ, 2004b). Dit beleid richt zich op het verzorgen van de randvoorwaarden van het ondernemingsklimaat en het generieke innovatiebeleid, maar schenkt ook aandacht aan specifieke sectoren en doelgroepen. Dit gebeurt met de ‘sleutelgebiedenaanpak’, die in de Innovatiebrief (EZ, 2003b) al werd voorgesteld en door het Innovatieplatform verder is ontwikkeld. Het Innovatieplatform heeft inmiddels een viertal sleutelgebieden onderscheiden: ‘flowers and food’, ‘high-tech systemen en materialen’, ‘water’ en ‘creatieve industrie’. Overigens zijn de meeste acties die onder het industriebeleid vallen al ingezet en genoemd in eerdere nota’s en beleidsstukken.⁹ Daarnaast kondigt de ‘Industriebrief’ aanvullende acties aan voor het beperken van de regelgevingsdruk, de aansluiting van het VMBO en beroepsonderwijs op de arbeidsmarkt, het verbeteren van de wisselwerking tussen publieke kennisinfrastructuur en het bedrijfsleven onder andere specifiek gericht op het MKB en de sleutelgebieden, en acties ten aanzien van zogenaamde doelgroepspecifieke aspecten en gelijk speelveld (level playing field).

Instrumenteel in de vernieuwing van het innovatiebeleid kan het Innovatieplatform zijn.¹⁰ Het Innovatieplatform is een overlegstructuur met vertegenwoordigers van overheid, bedrijfsleven en wetenschap en is bedoeld “om effectief doorbraken tot stand te brengen in de Nederlandse kenniseconomie” (Tweede Kamer, 2004). Het idee voor een Innovatieplatform is overgenomen uit Finland, waar het een cruciale rol vervulde in de omschakeling van een hoofdzakelijk op bosbouw en papier-gerelateerde industrie naar een hoogtechnologische industrie. De VROM-Raad nam het idee over in zijn advies ‘Milieu en Economie’ (VROM-Raad, 2002). Het uitgangspunt daarbij is dat “de structuur van onze economie moet verbeteren om de concurrentie aan te kunnen”; ze beoogt barrières weg te nemen voor de ontplooiing van die kansrijke sectoren. De doelstelling van het Innovatieplatform is, in navolging van de overheid, dat Nederland qua innovatievermogen bij de top van Europa gaat behoren. Het Innovatieplatform ziet voor zichzelf vier rollen weggelegd: ijsbreker, versneller, katalysator en cultuurveranderaar. Het richt zich uiteindelijk naar eigen zeggen op fundamentele systeemveranderingen, al is nog onduidelijk hoe dit vorm gegeven moet

⁹ De ‘Industriebrief’ noemt zelf de nota’s ‘Kiezen voor Groei’, ‘Mobiliteit’, ‘Ruimte’, ‘Pieken in de Delta’, ‘Innovatie in het Energiebeleid’, de brief ‘In actie voor ondernemers’, de ICT-agenda, de ‘Breedbandnota’ en de verdere invulling van de agenda van de ‘Innovatiebrief’ (EZ, 2004b).

¹⁰ Zie Grosfeld e.a. (2004) voor een beschrijving van de Strategische agenda van het Platform.

worden. Het Innovatieplatform toont een sterk vertrouwen in technologie als basis voor economische groei en vooruitgang. Nadruk ligt vooralsnog op verbetering van de doorstroming van de beroepskolom, 'dynamisering van de kennisketen', focus op lange termijn keuzes, een centrale rol van de overheid en een aantrekkelijk vestigingsklimaat.

In het Wetenschapsbudget '04 is een bedrag oplopend tot €185 miljoen per jaar in 2007 vrijgemaakt voor 'de dynamisering van de kennisketen' (OC&W, 2003). Binnen dit budget vallen bijdragen aan het 'TechnoPartner actieprogramma' en het 'Deltaplan Bèta-Techniek', programma's ten behoeve van de vermarkting van technologieën. Deze plannen borduren voort op instrumenten als 'BioPartner', waarin de overheid een rol speelt in het ondersteunen van beginnende innovatieve bedrijven. In totaal €100 miljoen (per 2007) van bovenstaand bedrag is de zogenaamde 'smart-mix', die verdeeld wordt over de begrotingen van OC&W en EZ. Dit geld is in eerste instantie bedoeld om versnippering in het innovatiesysteem tegen te gaan en zal worden ingezet voor versterking van excellente onderzoeksgroepen aan universiteiten en voor de verbetering van de wisselwerking tussen bedrijven en publieke kennisinstellingen. Het Innovatieplatform speelt een belangrijke rol in het vaststellen van criteria voor de uitwerking hiervan.

Een deel van het innovatiebeleid in Nederland wordt tenslotte thematisch ingevuld met de zogenaamde BSIK-gelden¹¹ (voorheen ICES-KIS). In dit fonds wordt een deel van de opbrengsten van het Nederlandse aardgas geïnvesteerd in de kennisinfrastructuur. Via drie rondes van tenders is veel geld beschikbaar gekomen voor verschillende projecten. In de derde ronde was circa €750 miljoen beschikbaar voor projecten op het gebied van ICT, hoogwaardig ruimtegebruik, duurzame systeemopties, nanotechnologie en microsystemen en life science. Voor de beoordeling van deze projecten is een speciale beoordelingsmethodiek opgesteld, met als centrale criteria de legitimiteit, het maatschappelijk rendement en het risicoprofiel van de ingediende projecten (CPB e.a., 2003). In eerdere rondes werden projecten gehonoreerd op het gebied van de agrocluster, bio-organische materialen, bodemkunde en nog een aantal andere. Het BSIK-instrument sluit aan bij een vraag- (of probleem-) gestuurde thematische systeemaanpak.

¹¹ BSIK staat voor Besluit Subsidies Investerings Kennisinfrastructuur. Het doel van deze subsidieregeling is de Nederlandse samenleving meer bruikbare kennis en researchcapaciteit te verschaffen op vijf thema's: 1) ICT; 2) Ruimtegebruik ; 3) Duurzame systeeminnovaties; 4) Microsysteem- en nanotechnologie; 5) Gezondheids-, voedings-, gen- en biotechnologische doorbraken (waaronder genomics).

(zie: <http://www.senter.nl/asp/page.asp?id=i000000&alias=iceskis>)

4.5 Evolutionair-economische analyse van het energie- en innovatiebeleid

Vanuit de evolutionair-economische theorie uit de hoofdstukken 2 en 3 komen zes belangrijke aspecten naar voren met betrekking tot technologische ontwikkeling en beleidsvorming: diversiteit, innovativiteit, selectieomgeving, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid, en co-evolutie. In deze paragraaf worden deze concepten naast het huidige energie- en innovatiebeleid gelegd zoals dat hierboven is beschreven, om zo een inzicht te krijgen in de mate waarin de evolutionaire kenmerken in het beleid vorm hebben gekregen. In feite leggen we dus het huidige beleid langs de evolutionair-economische maatlat. Het resultaat van deze beoordeling is dat een aantal van de genoemde aspecten goed scoren in het huidige beleid, andere aspecten daarentegen ontbreken geheel. Ook blijkt dat het beleid met name gericht is op de technische kant van innovaties, terwijl de meer institutionele aspecten onderbelicht blijven. In de hoofdstukken 2 en 3 bleek al dat er een sterke samenhang is tussen de verschillende aspecten. Dit heeft tot gevolg dat sommige onderdelen van het beleid relevant zijn voor meer dan één van de factoren genoemd in Tabel 2.1. Om herhalingen in de tekst te voorkomen hebben we er voor gekozen deze onderdelen bij één van de aspecten te beoordelen, met het risico dat de keuze voor het relevante aspect soms wat willekeurig overkomt.

4.5.1 Diversiteit

Het stimuleren van diversiteit is in zichzelf een kenmerk van evolutionair-economisch beleid. In essentie betekent zo'n beleid dat de overheid het aantal bedrijven, technieken, producten en strategieën breed zal willen houden. Een dergelijk beleid kan op verschillende schaalniveaus vorm worden gegeven: de overheid kan zich bijvoorbeeld beperken tot duurzame energie, maar binnen dat gegeven alle mogelijke technieken stimuleren. De Adviesraad voor Wetenschap en Technologie stelt dat generiek beleid geschikt is voor het scheppen van algemene voorwaarden voor innovatie, maar niet voor het aanjagen van innovaties in veelbelovende gebieden; daar is specifiek beleid voor nodig (AWT, 2003).

De diversiteit hangt dus samen met de vormgeving van het beleid: generiek beleid zal meer 'het veld breed houden', terwijl specifiek beleid (per definitie) gericht is. De verschuiving van specifieke naar generieke strategieën en instrumenten in het innovatiebeleid betekent dan ook dat diversiteit zal kunnen toenemen. Deze verschuiving naar generiek beleid en de aandacht voor het openhouden van diversiteit lijkt zich echter voornamelijk te beperken tot *technieken*, terwijl het belang van diversiteit in bedrijven, producten en strategieën in de stukken niet wordt genoemd. Overigens betekent ook het openhouden van diversiteit van technieken niet dat er op nationaal niveau geen keuzes worden gemaakt. Zo kiest EOS duidelijk wel voor duurzame energie, maar binnen dat domein niet specifiek voor bijvoorbeeld een bepaalde technologie.

In de Derde Energienota ligt sterk de nadruk op diversiteit aan technologieën (EZ, 1996). Een dergelijke verbreding van technologische ontwikkeling wordt in de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid ook noodzakelijk geacht, omdat dit bij kan dragen aan de CO₂-reductiedoelstellingen en aan het verminderen van de kwetsbaarheid van de energievoorziening (VROM, 1999). Een belangrijk uitgangspunt is dat het niet in eerste instantie aan de overheid is om keuzes te maken voor specifieke technologieën boven andere, maar om criteria te leveren voor de selectie daarvan (EZ, 2001). Deze criteria worden in de EOS geleverd: ‘internationale positie’ en ‘bijdrage aan duurzaamheid’ (zie ook paragraaf 4.3). Deze criteria zijn vervolgens voor de overheid van belang in de onderbouwing van de overheidsstrategie: als een technologie naar voren komt en aan de criteria voldoet kan de overheid deze met bijvoorbeeld subsidies stimuleren. Met de criteria wordt in zekere zin wel een thematische keuze gemaakt voor duurzame energie, waarmee de diversiteit aan energietechnologieën in breedste zin beperkt lijkt te worden. Daar staat tegenover dat het stimuleren van technologieën lager op de leercurve (zoals zon-PV, windenergie of kernfusie) de ongelijkheid tussen de technologieën kan verkleinen. Omdat het totale pakket aan technologieën beter in balans is neemt de diversiteit tussen de verschillende technologieën toe.

In het kader van het energietransitiebeleid zijn een vijftal hoofdroutes gekozen voor het lange termijnbeleid in de energietransitie: groene grondstoffen, alternatieve brandstoffen, duurzame elektriciteit (wind op zee en biomassa), aardgas en energiebesparing. Het gaat hierbij dus om een gevarieerde mix van energievormen, waardoor de diversiteit in zekere mate gewaarborgd blijft. Binnen deze technologische opties wordt niet heel specifiek verder gekozen: “Uit de transitie-aanpak is geleerd dat het verstandig is om niet bij voorbaat voor één van deze opties te kiezen, maar meerdere ontwikkelingslijnen open te houden” (EZ, 2004a).

De steun voor zon-PV lijkt in het energie-onderzoeksbeleid wel af te nemen. Biomassa en windenergie op zee worden op grond van de internationale positie van Nederland als kansrijker ingeschat. Nederland heeft ook op het gebied van zon-PV weliswaar een goede kennispositie, maar de mogelijke bijdrage hiervan aan de doelstelling van 10% duurzame energiehuishouding in de toekomst wordt gering geacht (EZ, 2001). Deze afname van aandacht voor zon-PV in de teksten van de nota's is overigens niet terug te vinden in de onderzoeksgelden voor zonne-energie. Het aandeel zonne-energie (alle vormen van zonne-energie) in de besteding van energie R&D in Nederland (privaat en publiek) is zelfs licht gestegen tot net boven de 10% (zie figuur 4.5). Publiek onderzoek voor brandstofcellen lijkt af te nemen, maar een aantal bedrijven blijft hierin zeer actief. Het overheidsbeleid richt zich meer op alternatieve brandstoffen en biofuels, als kansrijker optie op de korte tot middellange termijn. Dit sluit beter aan bij het bestaande systeem van energieproductie en -distributie; de weg voor radicale alternatieven (met name de waterstof-economie) wordt niet afgesloten, maar ook nog niet voluit gestimuleerd. Op macroniveau wordt dus in beginsel geen grote diversiteit in systemen nagestreefd, afwijkend van het huidige systeem van centrale energievoorziening.

Conclusie diversiteit

Samenvattend kan gesteld worden dat het belang van openhouden van diversiteit in het beleid wel wordt onderkend, maar dit wordt voornamelijk toegepast op technieken. Het belang van diversiteit in bedrijven, producten en strategieën komt minder naar voren.

4.5.2 Innovativiteit

In veel van de nota's en adviezen wordt het gebrek aan innovatiekracht van Nederlandse bedrijven een groot probleem genoemd. Voor een evolutionair-economische beoordeling zijn in Tabel 2.1 een aantal kenmerken gegeven van het concept 'innovativiteit'. In de overheidsanalyse blijkt dat sommige van die kenmerken veel aandacht krijgen (samenwerking, durfkapitaal en scholing), terwijl andere termen vrijwel niet worden genoemd.

Combinatie/kruisbestuiving en serendipiteit

Innovatie wordt in de beleidsstukken vooral wordt opgevat als 'het met succes naar de markt brengen van nieuwe, verbeterde, of meer concurrerende producten, processen, diensten of organisatievormen' (AWT, 2004: p. 13). De vinding van het nieuwe – de inventie, of de uitvinding – ligt weliswaar ten grondslag aan 'het naar de markt brengen', maar dit ligt met deze definitie niet meer in de focus van het beleid. Combinaties maken, kruisbestuiving en serendipiteit zijn begrippen die juist met name betrekking hebben op de uitvinding. In het beleid worden deze begrippen dan ook nauwelijks genoemd.

Strikt genomen hoeven combinatie, kruisbestuiving en serendipiteit ook niet beperkt te blijven tot de uitvinding, want ook bij succesvolle vermarktingsstrategieën spelen kruisbestuiving en toeval vaak een belangrijke rol (denk aan de Post-It van 3M)¹². De begrippen combinatie/kruisbestuiving en serendipiteit komen hoe dan ook in het beleid eigenlijk niet naar voren. In het Wetenschapsbudget '04 ligt de nadruk op focus en concentratie, 'valorisatie' (is het in economische waarde omzetten van de resultaten van het onderzoek), en concurrentie bevorderen. Hiermee lijkt de ruimte voor experimenteren juist beperkt te worden.

¹² Het verhaal achter Post-It is een klassieker. Het bestaat uit drie fasen. De eerste fase is de vinding van de lijm. Deze vinding was het gevolg van een mislukt experiment van Spence Silver, gedaan in de 15 procent van de tijd die hij van 3M mocht besteden aan het uitproberen van nieuwe ideeën. De lijm droogde nauwelijks. Silver gebruikte het daarom voor het bulletin board, om daar makkelijk papiertjes op te plakken en weer af te halen. In de tweede fase van het verhaal speelt Arthur Fry de hoofdrol. Hij was collega van Silver en een koördirigent, die bedacht dat de lijm ook op de papiertjes zelf geplakt kon worden. Op deze manier kon hij gemakkelijk de gezangen terug vinden die tijdens een dienst gezongen werden. Dit was de vinding van de Post-It. In de derde fase speelt de marketing een belangrijke rol. Want hoewel de Post-Its binnen 3M zeer populair werden, bleken ze daarbuiten niet te verkopen. Twee marketing medewerkers hebben vervolgens de Post-Its aan een groot aantal bedrijven kado gedaan, om zo het balletje te doen rollen (zie ook www.uh.edu/engines/epi726.htm).

In het energietransitiebeleid lijkt er op het eerste gezicht wel ruimte voor experimenteren. Opmerkelijk genoeg lijkt de doelstelling van deze experimenten de ruimte voor werkelijk experimenteren te verkleinen: “De experimenten beogen dus iets aan te tonen, allereerst natuurlijk voor de deelnemers zelf, maar ook voor een groter publiek. Doel van dit alles is immers ook dat de aanpak, invulling en resultaten van deze eerste set experimenten een zodanig enthousiasmerend effect hebben dat straks nieuwe partijen worden uitgedaagd om het ‘duurzame pad’ op te gaan, partijen die nu wellicht nog aarzelen” (EZ, 2004a: p. 23). Deze doelstelling roept de vraag op of deze experimenten ruimte geven voor het onderzoeken van nieuwe opties en ideeën, of dat het gaat om demonstratieprojecten.

Scholing

Scholing is een cruciale factor voor het niveau van innovatie. In de Nota Energiebesparing (1990) wordt al gerept van scholing van procestechnologen. In het kader van ‘De Kenniseconomie in zicht’ is ook het Deltaplan Bèta/Techniek verschenen, waarin sterk de nadruk wordt gelegd op scholing van technologen (EZ, 2004a). Overigens behoren de financiële middelen voor scholing en onderwijs in Nederland tot de laagste van Europa (NOWT, 2003). De overheid leek aanvankelijk onevenredig veel aandacht te hebben voor het hoger onderwijs, terwijl ook het MKB problemen had adequaat (middelbaar) geschoold personeel te vinden. De Industriebrief lijkt deze tekortkoming recht te zetten door de aankondiging van aanvullende acties specifiek gericht op het VMBO en beroepsonderwijs (EZ, 2004b).

Het Wetenschapsbudget ‘04 geeft aan de belemmeringen te willen wegnemen voor de immigratie van kenniswerkers, met name bèta-onderzoekers (OC&W, 2003). Daarnaast is er de intentie om ‘een leven lang leren’ te stimuleren (EZ, 2003b). De recent aangekondigde maatregelen van het Kabinet om studiebeurzen voor studenten van buiten de EU en voor studenten ouder dan dertig jaar te schrappen lijken overigens in in directe tegenspraak met de intenties in de genoemde nota’s.

Isolatie

Nederland is economisch en ruimtelijk gezien geen geïsoleerd land. Van oudsher is de Nederlandse economie open en sterk op het buitenland gericht. Taalkundig gezien is Nederland wel een geïsoleerd land. Juist hier is veel beleid gericht op het verlagen van de taalkundige barrières, door Nederlanders al vroeg te onderrichten in andere talen. Het is dus niet verrassend dat isolatie als positieve factor voor innovatieve experimenten niet terug te vinden is in de nota’s.

Samenwerking

Samenwerking krijgt in het Nederlandse innovatiebeleid veel aandacht. Een belangrijke uitdaging die in het innovatie- en wetenschapsbeleid herhaaldelijk wordt genoemd is het oplossen van de ‘Europese paradox’: Europese onderzoekers publiceren veel in toptijdschriften, maar het aantal commerciële octrooien dat hier uit voortkomt is relatief laag.

Het stimuleren van samenwerking tussen bedrijven en kennisinstituten wordt gezien als een belangrijk element om deze ‘benutting’ van kennis te verbeteren. Ook de ondersteuning door EZ en OC&W van Innovatiegerichte Onderzoeksprogramma’s (IOP) en Technologische Topinstituten (TTI’s) zijn voorbeelden van overheidsbeleid gericht op samenwerking tussen publieke kennis en private ondernemers. Een belangrijk instrument uit de EOS is de ‘co-financiering’, waarbij de overheid medefinanciering levert voor onderzoek bij kennisinstituten, dat wordt aangestuurd door het bedrijfsleven.

Ook in het energietransitiebeleid is er veel aandacht voor samenwerking. Eén van de rollen die de overheid voor zichzelf ziet in de energietransitie is de rol van ‘makelaar’, die verschillende stakeholders bij elkaar brengt: marktpartijen, kennisinstituten en overheden. Daarnaast geeft ook het Wetenschapsbudget ‘04 aan de samenwerking tussen universiteiten, kennisinstituten en het bedrijfsleven te willen verbeteren. Tevens heeft het wetenschapsbeleid aandacht voor samenwerking tussen onderzoeksinstituten. Met deze samenwerking beoogt het beleid de kritische onderzoeksmassa te creëren die noodzakelijk wordt geacht voor toponderzoek. Onduidelijk is hoe dit zich verhoudt tot het vergroten van concurrentie tussen onderzoeksgroepen, wat in het beleid ook als noodzakelijk naar voren komt.

Durfskapitaal

De geringe beschikbaarheid van durf- of risicokapitaal wordt in een aantal adviezen gezien als een belangrijke beperkende factor voor de innovativiteit van het Nederlandse bedrijfsleven. De R&D-activiteiten van bedrijven in Nederland blijven achter bij die van bedrijven in andere landen (NOWT, 2003). Door de liberalisering van de energiemarkt lijken energiebedrijven steeds minder animo te hebben voor het doen van lange termijn-energieonderzoek (EZ, 2002). De Nederlandse overheid gaf in 2001 ongeveer €140 miljoen uit aan het energie-onderzoek, terwijl private partijen ongeveer €150 miljoen investeren. De EU geeft ongeveer €20 miljoen uit aan energie-onderzoek in Nederland (EZ, 2001). De overheid probeert op verschillende manieren de beschikbaarheid van onderzoeksmiddelen te vergroten. Ten eerste met directe onderzoeksfinanciering (eerste geldstroom), en daarnaast door het voor bedrijven aantrekkelijker te maken om te investeren in onderzoek, onder andere door middel van de eerder al genoemde co-financieringsregeling uit de energietransitie en de generieke WBSO-regeling. De Innovatiebrief heeft aangekondigd dat de WBSO wordt uitgebreid, specifiek voor de ondersteuning van onderzoek bij het MKB. Overigens hangt de beschikbaarheid van risicokapitaal nauw samen met de begrensde rationaliteit van bedrijven en overheid (zie ook paragraaf 4.5.4).

Nichemarkten

De aanwezigheid van nichemarkten kan stimulerend werken voor innovaties, maar dit beginsel komt nauwelijks terug in de besproken nota’s en adviezen. Meer impliciet is het stimuleren van ‘groene stroom’ en het gunstige belastingstarief voor Groenfondsen wel uit te leggen in termen van nichemarkt-ontwikkeling door de overheid, namelijk als een nichemarkt in de stroomvoorziening en in de financiële dienstverlening. Ook regelgeving zou kunnen bijdragen aan het stimuleren en/of beschermen van een nichemarkt. In andere gevallen kan

regelgeving ook belemmerend werken voor de ontwikkeling van nichemarkten. Regelgeving is in het energie- en innovatiebeleid echter nauwelijks expliciet gericht op het creëren van nichemarkten.

Toekomstbeelden

In het Nederlandse energie- en innovatiebeleid is er veel aandacht voor toekomstbeelden (EZ, 2000b; EZ, 2004a). Projecten in het kader van het innovatiebeleid en de energietransitie beginnen bijna standaard met een verkenning. Ook in het algemene energiebeleid en het klimaatbeleid wordt vaak gebruik gemaakt van toekomstbeelden. De overheid maakt ook bewust gebruik van de verschillende rollen die toekomstbeelden kunnen spelen. Zo zijn er scenariostudies die aangeven wat het ‘beleidsgat’ is: het verschil tussen enerzijds de verwachte resultaten van ontwikkelingen en ingezet beleid, en anderzijds de gewenste doelstellingen van het beleid. Ook worden toekomstbeelden gebruikt om verschillende beleidsopties verder in bredere context te onderzoeken (‘backcasting’). Tenslotte worden toekomstbeelden ook regelmatig ingezet als communicatiemiddel en om overeenstemming te krijgen tussen verschillende stakeholders over de te varen koers. Ook uit de casestudies in hoofdstuk 5 blijkt de belangrijke rol van toekomstbeelden in het Nederlandse beleid gericht op het stimuleren van energie-innovaties.

Conclusie innovativiteit

Er wordt in het beleid veel gesproken over innovaties, maar in het perspectief van de aspecten van belang voor innovativiteit volgens de evolutionaire economie lijkt de aandacht nogal eenzijdig. Samenwerking en toekomstbeelden scoren heel goed. Scholing en durfkapitaal worden wel genoemd in het nota’s, maar de uitwerking in concreet beleid is nogal bescheiden. Aandacht voor aspecten als combinatie/kruisbestuiving, serendipiteit, isolatie en nichemarkten ontbreekt grotendeels in het beleid, en in sommige gevallen lijkt het beleid zelfs negatief op deze aspecten uit te werken.

4.5.3 Selectieomgeving

De selectieomgeving wordt bepaald door de fysica, technologie, geografische kenmerken, bedrijfskenmerken, markt, instituties en publiek beleid en specifieke condities die R&D beïnvloeden (zie Tabel 2.1). In de beleidsnota’s en adviezen wordt niet zoveel aandacht besteed aan de fysica en technologie. Geografische kenmerken komen meestal indirect aan de orde; ze liggen bijvoorbeeld wel ten grondslag aan het feit dat het Nederlandse beleid met name windenergie als serieuze optie onderzoekt, terwijl waterkracht niet in de stukken voorkomt. Bij de keuze van de Rijnmond als experimenteergebied heeft waarschijnlijk een combinatie van geografische- en bedrijfskenmerken een rol gespeeld, maar dit wordt in de stukken niet genoemd.

Markt

Waar het beleid wel vaak naar verwijst zijn de marktcondities. Veel van de nota's geven aan dat een goed functionerende markt automatisch de juiste selectieomgeving creëert voor duurzame innovaties. Ten aanzien van energie-innovaties wordt met name veel aandacht geschonken aan de liberalisering van de energiemarkt en de olieprijs. De liberalisering van de energiemarkt maakt dat de overheid minder direct kan sturen: 'van speler in het veld naar regisseur' (EOS, 2001). Daarnaast betekent de liberalisering dat de energiebedrijven zich meer op korte termijn ontwikkelingen zullen richten en minder op lange termijn onderzoek (zie ook begrensde rationaliteit). De liberalisering van de energiemarkt wordt echter wel voornamelijk gezien als een positieve ontwikkeling, omdat de economische efficiëntie van de energievoorziening hiermee zou moeten verbeteren. In een geliberaliseerde markt wordt de olieprijs echter een veel bepalender factor in het al dan niet doen van investeringen in duurzame energietechnieken. Bij een lage olieprijs (of wellicht nog belangrijker: een onzekere olieprijs) is de bereidheid om te investeren in duurzame alternatieven niet hoog. Daarom is "Het lopende energiebeleid [is] gericht op het zo kosteneffectief mogelijk realiseren van doelstellingen in 2010 op het gebied van CO₂-emissiereductie, energiebesparing en duurzame energie" (EZ, 2004a: p. 6). Er wordt zelfs een grens gelegd van omgerekend €68 per ton CO₂ bij het kiezen van maatregelen voor het terugdringen van CO₂-emissies (VROM, 1999). In de recente notitie 'Innovatie in het Energiebeleid' staat: "Het generieke beleid is erop gericht, de 'externe kosten' van energiegebruik (zoals die van voorzieningszekerheid en milieubescherming) zoveel mogelijk in de energieprijzen op te nemen, te 'internaliseren'. Dit gebeurt door het treffen van fiscale maatregelen en door gebruik van een Europees systeem van CO₂-emissiehandel. Wanneer de maatschappelijke kosten in rekening worden gebracht aan de veroorzakers, ontstaan de juiste condities waaronder de markt zijn werk kan doen. Er ontstaat dan een nieuw, marktconform, selectiemechanisme voor innovaties. De overheid hoeft daarin geen keuzes te maken – de winnaars dienen zichzelf wel aan" (EZ, 2004a: p. 12).

Instituties en publiek beleid

De overheid heeft veel aandacht voor de markt als factor in de selectieomgeving en het overheidsbeleid is er in hoge mate op gericht om het falen van de markt op te heffen, door het zelf financieren van lange termijn-onderzoek en door het internaliseren van maatschappelijke kosten in de prijzen. Andere factoren die bepalend zouden kunnen zijn in het vormen van de selectieomgeving zijn (milieu-)regulering en institutionele investeerders. Opmerkelijk is dat stringente milieuregulering in geen van de beleidsstukken genoemd wordt als optie voor het stimuleren en/of het uitlokken van innovaties (zie ook onder Nichemarkten). De rol die de overheid voor zichzelf ziet in de energietransitie vertaalt zich in termen als 'vertrouwensrelaties', 'makelaarschap', 'partnerschap' en 'leiderschap' (EZ, 2004a). Daarbij ligt bij vertrouwensrelaties en leiderschap sterk de nadruk op het kunnen garanderen van experimenteerruimte op de langere termijn. Daar waar de overheid zichzelf als probleemhouder ziet, bijvoorbeeld ten aanzien van de energiehuishouding en milieudoelstellingen, wordt een grotere sturende rol van de overheid geaccepteerd, dan bij het stimuleren van innovaties in het algemeen. De rol van de overheid als steller van strikte

randvoorwaarden en handhaver daarvan, en daarmee als stuurder van de selectieomgeving, komt niet in de stukken voor. Regelgeving komt wel in de Industriebrief naar voren, maar dan als negatieve factor voor ondernemers. Er wordt gesproken over een steeds grotere druk van wet- en regelgeving en acties zijn er op gericht om deze te verminderen (EZ, 2004b). De brief noemt met name de hoge administratieve lasten, ongelijkheid tussen Europese landen in de interpretatie van Europese regelgeving, lang durende onduidelijkheid over vergunningen, inconsistentie in regelgeving en problemen bij de handhaving. Ook als het gaat om de internationale concurrentiepositie van met name elektriciteitsproducenten wordt het milieubeleid genoemd als een negatieve factor (zie ook het stuk Level playing field onder paragraaf 4.5.5).

Ten aanzien van de selectieomgeving zou de overheid tenslotte ook een rol kunnen spelen in het doen van groene aanbestedingen ('green procurement'). De EU heeft in het kader van het Sixth Environmental Action Plan in 2003 een aantal *communications* uitgebracht die het belang van groene aanbestedingen aangeven: 'On Integrated Product Policy', 'Towards a Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources' en 'Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste'.¹³ Met de publicatie van een handboek voor groene aanbestedingen – 'Buying green! A handbook on environmental public procurement' – probeert de Commissie lidstaten te ondersteunen bij het doen van groene aanbestedingen die niet strijdig zijn met de overige EU-richtlijnen over het doen van publieke aanbestedingen (European Commission, 2004b). In de Nederlandse nota's wordt het belang van groene aanbestedingen echter niet genoemd.

Conclusie selectieomgeving

Het aspect selectieomgeving scoort slecht in het huidige beleid. Het algemeen leidende principe in het innovatiebeleid is 'de markt moet kiezen'. Hierdoor lijkt de invloed die de overheid heeft op de selectieomgeving per definitie negatief beoordeeld. Immers, 'de overheid verstoort de marktwerking'. Het huidige kabinet heeft veel aandacht voor het wegnemen van barrières voor innovatie, die door de overheid in het verleden zelf zijn opgeworpen (terugdringen van de regelgeving en administratieve lastendruk). Het nadeel is echter dat de kansen die er liggen om de selectieomgeving voor maatschappelijk wenselijke innovaties positief te beïnvloeden vaak over het hoofd worden gezien.

¹³ De Commissie geeft als voorbeeld dat wanneer alle overheden in Europa groene electriciteit zouden afnemen, dit een besparing oplevert van 60 miljoen ton CO₂, ofwel 18% van de EU Kyoto verplichtingen (<http://europa.eu.int/comm/environment/gpp/background.htm>).

4.5.4 Begrensd rationaliteit

Tijds horizon

De overheid houdt in haar beleid rekening met de beperkte tijds horizon van bedrijven, die ontstaat als gevolg van hun begrensd rationaliteit: “Aangezien onderzoek bij het bedrijfsleven zich [...] concentreert op de korte termijn, verlegt de overheid het accent naar de lange termijn.” (EZ, 2001). Ook in het Wetenschapsbudget ‘04 en in de Innovatiebrief plus de daaraan gerelateerde adviezen wordt veel aandacht geschonken aan het gebrek aan een lange termijn visie bij bedrijven, en de gevolgen die dat heeft voor lange termijn onderzoek en de financiering daarvan (zie ook paragraaf 4.5.2). De remedie voor dit gebrek aan interesse in lange termijn onderzoek bij het bedrijfsleven wordt voornamelijk gezocht in financiering en initiëren van dit onderzoek door de overheid zelf, of daarvoor in het leven geroepen instanties.¹⁴ Het zou ten aanzien van dit punt interessant zijn om te onderzoeken wat het effect is van de Nederlandse forfaitaire vermogensrendementsheffing op het risicogedrag van bedrijven. Door uit te gaan van een standaard rendement op aandelen zijn vermogenverschaffers wellicht minder geïnteresseerd geraakt in het doen van investeringen in (de ontwikkeling van) technologieën die mogelijk pas op langere termijn renderen. Er is helaas voorzover bekend geen empirisch onderzoek gedaan naar het effect van deze recente verandering in het belastingstelsel op het risicogedrag van ondernemingen en hun vermogenverstrekkers.

De overheid zelf heeft een veel langere tijds horizon in de programmering van onderzoek. Toekomstbeelden van twintig tot soms vijftig jaar vooruit zijn niet ongebruikelijk. Toch lijkt in de concretisering van het beleid de overheid zelf ook last te hebben van een kort tijds horizon. In het klimaatbeleid heeft het halen van de doelen in 2010 de hoogste prioriteit. Het is niet altijd duidelijk wat de focus op die doelen betekent voor het realiseren van de lange termijn doelen.

Routines

In de keuze van het beleidsinstrumentarium hanteert de overheid zelf ook een zekere mate van routine, met name door de nadruk op marktconforme instrumenten en traditioneel prijsbeleid. Dergelijke instrumenten gaan er van uit dat bedrijven en consumenten rationeel op prijsprikkels zullen reageren. Een voorbeeld van begrensd rationaliteit is de centrale rol van economische groei als doelstelling in plaats van als middel tot toenemend welzijn. De Innovatiebrief poneert kennis als centrale concurrentiefactor, waarmee deze economische groei behaald kan worden. Daarnaast echter stelt de brief ook dat “loonmatiging noodzakelijk

¹⁴ Een heel recent voorbeeld hier is de motie die door de leden Aptroot, Bakker en Ten Hoopen (nr. 22 (29800-XII) tijdens de EZ begrotingsbehandeling is ingediend. Deze motie verzoekt de regering de mogelijkheid van een garantiefonds voor risicovolle investeringen te onderzoeken. Als motivatie voor dit verzoek stelt de motie “dat er een gebrek is aan de beschikbaarheid van risicodragend vermogen op de Nederlandse kapitaalmarkt via de reguliere bancaire instellingen en de participatiemaatschappijen, vooral als het gaat om bedragen tot 5 mln euro”.

[is] om ons kostenniveau concurrerend te maken” (Innovatiebrief, deel 1: p. 9). De overheid deelt hier niet de economische visie dat loonmatiging tot laagwaardige banen leidt, in plaats van tot de (gewenste) hoogwaardige innovatieve arbeid (zie bijvoorbeeld Kleinknecht e.a., 2002). Deze stelling is overigens nog hevig onder discussie, omdat hogere lonen ook tot hogere werkloosheid kunnen leiden, waarna de lonen in de arbeidsmarkt weer zullen dalen (zie bijvoorbeeld Huizinga en Broer, 2004). De aandacht voor loonkosten *an sich* wordt overigens vaak geplaatst in het meer neoklassieke economische beleid (Boschma e.a., 2002).

Imitatie

Uit de beleidsstukken blijkt een sterk bewustzijn van het belang van imitatie. Al sinds jaar en dag is er in het kader van het energiebeleid veel aandacht voor demonstratieprojecten. Ook in het innovatiebeleid is demonstratie van nieuwe technologieën een belangrijk punt. Voor een deel gebeurt dit door het stimuleren van de ‘first movers’, in de hoop dat die een voorbeeldfunctie kunnen hebben voor anderen.

Het ministerie van Economische Zaken is zich er van bewust dat een deel van met name het MKB zich nooit met innovaties in zal laten. Het innovatiebeleid verschuift de laatste jaren dan ook steeds meer van het bijtrekken van de ‘achterblijvers’ naar het ondersteunen van de voorlopers, i.e. de actieve innoverende bedrijven. Beleidsinitiatieven als ‘Technostarter’ zijn hiervoor illustratief. In het energietransitiebeleid is erg veel aandacht voor transitie-experimenten. Het doel van deze experimenten is dat “de aanpak, invulling en resultaten [...] een zodanig enthousiasmerend effect hebben dat straks nieuwe partijen worden uitgedaagd om het ‘duurzame pad’ op te gaan, partijen die nu wellicht nog aarzelen” (EZ, 2004a). Om dit aspect te versterken stelt de overheid als eis aan het verstrekken van de voor deze experimenten beschikbare subsidie, dat een marktpartij leidend is in het experiment. Zo wordt het experiment dus een voorbeeld van een marktpartij aan andere marktpartijen, en niet van de overheid aan de markt. Overigens is het recent opgericht Innovatieplatform een mooi voorbeeld van imitatiegedrag van de overheid zelf, die dit immers naar succesvol Fins model heeft overgenomen.

Conclusie begrensde rationaliteit

Samenvattend kunnen we stellen dat het beleid goed scoort in het bewustzijn van het aspect van begrensde rationaliteit, met name ten aanzien van de tijdhorizon van ondernemers en het imitatiegedrag. Een kanttekening daarbij is echter dat, zeker met betrekking tot die tijdhorizon van ondernemers, de overheid zelf vaak routinematig handelt door slechts een beperkt aantal beleidsinstrumenten te beschouwen en toe te passen.

4.5.5 Padafhankelijkheid en lock-in

Padafhankelijkheid leidt vaak tot insluiting of lock-in van technologieën en organisatiestructuren: als eenmaal een systeem domineert, dan is het erg lastig om dit nog te veranderen. Beleidsvorming vanuit het bewustzijn van padafhankelijkheid houdt er rekening

mee dat routines en onderlinge technologische systemen van cruciaal belang zijn. De Adviesraad voor Wetenschap en Technologie adviseert bijvoorbeeld om in te haken op reeds bestaande innovatieve hotspots, waar een positieve lock-in voor bedrijven plaats zou moeten vinden (AWT, 2003). Een belangrijke vraag is: beperkt de padafhankelijkheid (lock-in) de selectie van technologieën of strategieën, of leidt deze selectie juist tot lock-in? In onze benadering gaan we uit van padafhankelijkheid als beperking van de selectiemogelijkheden. Evolutionair-economisch beleid zal zich in principe moeten concentreren op het versterken van de economische dynamiek op de lange termijn (Boschma e.a., 2002: p. 179). De verschuiving van specifiek technologiebeleid naar een meer generiek innovatiebeleid is dan ook als evolutionair-economisch te kenschetsen, omdat hiermee de lange termijn-dynamiek wordt gestimuleerd.

De eerste nota voor milieu en technologie (1991) haakt nog sterk aan bij de bestaande structuren, met name door de grote nadruk op nageschakelde en procesttechnologieën, die in het reguliere productieproces kunnen worden opgenomen. Het huidige transitiebeleid is juist gericht op systeemveranderingen, waarmee veranderingen niet worden beperkt tot technologieën alleen. Deze gedachte is sterk gestuurd door het bewustzijn van padafhankelijkheid: “Voortzetting of intensivering van het huidige beleid zal niet tot afdoende oplossingen leiden omdat daarmee voorbij wordt gegaan aan de barrières voor duurzame oplossingen. Deze barrières zijn feitelijk systeemfouten in de huidige maatschappelijke ordening, in het bijzonder het economische systeem en de thans functionerende instituties. Alleen door middel van systeeminnovaties kunnen de barrières worden geslecht en is het mogelijk te komen tot een echte oplossing van de grote milieuproblemen” (VROM, 2001: p. 65).

Uit zowel het energie- als het innovatiebeleid blijkt een bewustzijn van het concept van lock-in door de wens aan te willen sluiten op de relatieve sterktes van de Nederlandse economie. Het is de vraag of dat niet botst met het transitiebeleid, waar meer nadruk wordt gelegd op de noodzakelijk geachte veranderingen in (onder andere) het energiesysteem. Daar staat tegenover dat lock-in ook gebruikt kan worden om duurzame technologieën te stimuleren. Een dergelijk specifiek technologiebeleid kan gericht zijn op het voorkomen van een vroegtijdige lock-in van een suboptimaal geachte technologie, of op het stimuleren van de lock-in van een gewenste technologie. Hierbij moet wel bedacht worden dat dit een *riskante* strategie is, met name vanwege neveneffecten en rebound-effecten.

Het beleid zal er zich dan op moeten richten om te komen tot schaalvergroting en de vorming van leereffecten: de vorming van een alternatief technologisch regime. Een dergelijke intentie komt nauwelijks uit de beleidsstukken naar voren; tijdens een recent Kamerdebat over subsidies voor groene stroomproductie verklaarde Minister Brinkhorst nog: “Volume alleen bevordert geen innovatie.”¹⁵ Er wordt nauwelijks gesproken van het Schumpeteriaanse concept van creatieve destructie, de vernieuwing van sectoren en industrieën die bijvoorbeeld de concurrentie met andere landen niet meer aankunnen. Dergelijk industriebeleid is sinds begin jaren tachtig *not done* in Nederland vanwege de risico's van staatssteun; hierdoor is echter ook geen oog voor de mogelijke baten van een visie op industriële ontwikkeling (zie

¹⁵ Zie *Stromen* 3 december 2004: ‘Zonnestroom krijgt geen hogere mep-vergoeding’

ook paragraaf 4.4.3). Het Finse Innovatieplatform is een goed voorbeeld van hoe een samenhangend industrie/innovatie-beleid vorm zou kunnen krijgen, omdat in deze strategie de oude Finse industrieën werden vervangen door nieuwe hoogtechnologische sectoren. In dat perspectief is de oprichting van een Innovatieplatform in Nederland vanuit evolutionair-economische argumentatie goed te rechtvaardigen.

Level playing field

In de beleidsstukken wordt sterk ingespeeld op de liberalisering van de energiemarkt. Centraal thema hierbij is het creëren van een 'level playing field'. Dit houdt in dat verschillende technologieën vanuit gelijke uitgangsposities met elkaar zouden moeten kunnen concurreren: "het economisch potentieel moet zo dicht mogelijk bij het technologisch potentieel blijven" (VROM, 1999). Dat betekent in de praktijk dat technologieën die 'lager op de leercurve' staan een extra duwtje krijgen, om te compenseren voor de grotere investeringen die met (vooral) duurzame technologieën gemoeid zijn. Er wordt dan als het ware voorzien in een inhaalslag van investeringen, die voor reguliere technologieën reeds is gedaan. Subsidie van die meerkosten moet worden beschouwd als het in de tijd naar voren halen van een 'level playing field', waarin de nieuwe systemen zich met de bestaande kunnen meten wanneer hun leercurve doorlopen is (EZ, 2004a).

Het Nederlandse energiebeleid hanteert echter vooral het level playing field tussen landen, in plaats van tussen technologieën. Het beleid richt zich daarmee op het creëren van een goede concurrentiepositie ten opzichte van buitenlandse energieproducenten. Volgens het Energierapport 2002 is er door ongelijkheid van bijvoorbeeld fiscaal beleid en mileubeleid in Europa op dit moment nog geen sprake van een gelijk speelveld (EZ, 2002). Ook in de Industriebrief wordt er gesproken over het gebrek aan een gelijk speelveld voor specifieke sectoren. De Industriebrief kondigt vanuit dat oogpunt acties aan ten aanzien van de energieprijzen voor grootverbruikers, de gaswinning, luchtvaartcluster, de ruimtevaart en de maritieme sector, met als doelstelling het creëren van een gelijk speelveld (EZ, 2004b).

Het creëren van een level playing field wordt soms als legitimatie gebruikt voor het inzetten van bepaalde beleidsinstrumenten. Het level playing field hangt vaak samen met het reeds geïnstalleerd vermogen van een bepaalde energietechnologische productiemethode: een groter vermogen verlaagt de leercurve door 'learning by doing'. Ook de energieprijzen zijn belangrijk voor de vorming van de selectieomgeving: een hoge olieprijs maakt het interessanter om in duurzame energieopties te investeren.

Conclusie padafhankelijkheid en lock-in

De noties van onomkeerbaarheid, lock-in en gelijk speelveld hebben hun weg gevonden naar het beleid. Maar de uitwerking van deze aspecten in concreet beleid lijkt, vanuit evolutionair economisch perspectief, wat eenzijdig. Ten aanzien van lock-in gaat de discussie vooral om het dilemma tussen het creëren van voldoende massa, en het behouden van diversiteit. Het 'voorkomen' van lock-in lijkt daarmee vooral te worden bewerktstelligd door het 'uitstellen' van selectie, niet door het bewust stimuleren van flexibele opties. Juist in het energiebeleid

zou je zo'n discussie wel verwachten als het gaat om grootschalige versus kleinschalige opwekking. Het aspect level playing field of gelijk speelveld wordt weer eenzijdig opgevat als het creëren van gelijke concurrentieverhoudingen tussen producenten. Het speelveld tussen technologieën, die zich in verschillende fasen van de leercurve bevinden, speelt in de discussie geen rol.

4.5.6 Co-evolutie

Co-evolutie duidt op de koppeling tussen verschillende technologieën of technologische systemen: de ontwikkeling in het ene systeem is van invloed op de ontwikkeling in het andere systeem. Dit principe suggereert dat de leercurve van de ene technologie van invloed kan zijn op andere technologieën, waardoor het zinnig kan zijn om te investeren in technologie A, zodanig dat technologie B daar van kan profiteren. Een dergelijk effect is geen wet van Meden en Perzen, in de zin dat co-evolutie altijd optreedt (zie ook Miketa en Schratzenholzer, 2004). Het is niettemin goed denkbaar dat bepaalde technologische ontwikkelingen samenhang vertonen met ontwikkelingen op andere technologie-terreinen. EOS wijst op de invloed van onderzoek op het gebied van life science, nanotechnologie en ICT (EZ, 2001). Een concreet voorbeeld komt uit 'Innovatie in het Energiebeleid' (2004), waarin wordt gesteld dat de ontwikkeling naar een waterstof gedreven economie sterk kan profiteren van de al aanwezige infrastructuur voor aardgas. Tevens wordt erop gewezen dat het stimuleren van duurzame energiesystemen leidt tot concurrentie voor de reguliere systemen, die daarmee ook een prikkel krijgen om te optimaliseren en hun milieu-efficiëntie zullen verhogen (EZ, 2004a).

Conclusie co-evolutie

Vanuit co-evolutionair perspectief is er nog weinig samenhang tussen het energiebeleid en het innovatiebeleid. De verschillende beleidsstukken verwijzen bijvoorbeeld nauwelijks naar elkaar en in het energiebeleid wordt niet verwezen naar de bottlenecks die juist in het innovatiebeleid naar voren komen, zoals het tekort aan kenniswerkers. De verschillende beleidsgebieden zullen wellicht verschillen in de probleemanalyse en in de mogelijke oplossingsrichtingen, maar ook in de overeenkomsten is er geen sterke beleidsmatige benchmark.

4.6 Conclusie

In de huidige beleidsnota's die relevant zijn voor energie-innovaties is veel terug te vinden van het evolutionair economische gedachtegoed. Met veel van de aspecten uit Tabel 2.1 wordt in de nota's rekening gehouden. Er is met name veel aandacht voor de 'technische' kant van innovaties, en wat minder voor maatschappelijke en institutionele aspecten als

bedrijven, producten en strategieën. In het energietransitiebeleid komen deze aspecten wel steeds meer naar voren.

Men zou kunnen stellen dat met name de evolutionair-economische aspecten die *geen spanning* opleveren met (het bevorderen van) de doelmatigheid van het beleid, zijn terug te vinden in het beleid. Zo is er veel aandacht voor samenwerking, scholing, toekomstbeelden en demonstratieprojecten. Daar staat tegenover dat het creëren van condities die kruisbestuiving en serendipiteit zouden kunnen bevorderen (experimenteren, proberen en ‘spelen’) *niet* wordt gezien als een taak van de overheid, en soms zelfs wordt ontmoedigd. Dit geldt eveneens voor het stimuleren van technieken die nog laag op de leercurve zijn. Ook aspecten uit de evolutionaire economie die mogelijk een spanning opleveren met Europese regelgeving, zoals het creëren of beschermen van nichemarkten, zijn nauwelijks terug te vinden in de beleidsstukken. Tenslotte blijkt uit de stukken dat de overheid wel veel oog heeft voor de begrensde rationaliteit van ondernemers (met name de beperkte tijdshorizon), maar weinig oog heeft voor de rol van de overheid daarin, anders dan de negatieve aspecten van de regelgeving. Tabel 4.1 vat samen hoe, naar onze interpretatie, het huidige beleid gericht op energie-innovaties scoort op de inzichten uit de evolutionaire economie zoals aangegeven in Tabel 2.1.

Tabel 4.1 Score van in dit hoofdstuk besproken nota's en adviezen op de aspecten uit de evolutionaire economie

Diversiteit	
Bedrijven (specialisme, omvang)	
Technieken (productie)	
Product (kenmerken)	
Strategieën (verkoop, R&D)	
Innovatie	
Combinatie/kruisbestuiving	
Serendipiteit	
Scholing	
Isolatie (ruimtelijk, economisch)	
Samenwerking	
Durfskapitaal	
Nichemarkten	
Toekomstbeelden	
Selectieomgeving	
Fysica (bijv. thermodynamische grenzen)	
Technologie (wat is technisch mogelijk, kosten)	
Geografische kenmerken (inclusief bodem, water, wind en zon)	
Bedrijfskenmerken (organisatie)	
Markt (relatieve prijzen, marktmacht)	
Institutes en publiek beleid	
Specifieke condities die R&D beïnvloeden	
Begrensdde rationaliteit	
Tijdshorizon	
Routines	
Imitatie	
Padafhankelijkheid en lock-in	
Onomkeerbaarheid	
Toenemende schaalopbrengsten (schaalvoordeel, imitatie, leereffect en positieve netwerkexternaliteit)	
Lock-in	
'Level playing field'	
Co-evolutie +/-	
Deelsystemen	
Negatieve of positieve terugkoppeling	
Ruimtelijk	

5 Casestudies

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van een drietal energie-technologieën nagegaan op welke manier de evolutionair-economische aspecten die in de voorgaande hoofdstukken behandeld zijn in de praktijk van de ontwikkeling naar een duurzame energievoorziening een rol spelen. Uiteindelijk gaat het daarbij met name om de vraag of het gevoerde overheidsbeleid met betrekking tot de genoemde technologieën vanuit evolutionair-economisch oogpunt adequaat was (is), en zo niet, welke aanpassingen van dit beleid dan op grond van evolutionair-economische inzichten gerechtvaardigd zouden zijn.

De drie beschouwde energietechnologieën zijn: brandstofcellen (paragraaf 5.2), kernfusie (paragraaf 5.3) en fotovoltaïsche energie (paragraaf 5.4). Bij de keuze van deze cases hebben de volgende criteria een rol gespeeld:

- Het dient te gaan om mogelijke elementen van een *energievoorziening*ssysteem dat op lange termijn gebaseerd zal moeten zijn op duurzame bronnen;
- Binnen een beperkt aantal cases dient zo veel mogelijk diversiteit aanwezig te zijn wat betreft de kenmerken van de energietechnologie (zoals de mate van decentralisatie; variatie in energiebronnen en -dragers);
- Er dient sprake te zijn van technologieën die al onderwerp zijn (geweest) van overheidsbeleid, zodat een analyse van dat beleid mogelijk is.

De cases beginnen steeds met een korte beschrijving van de geschiedenis en stand van zaken met betrekking tot de techniek, de actoren die een rol spelen, de toepassingen en (niche)markten, de leercurve, het gevoerde beleid en institutionele aspecten. Vervolgens wordt besproken welke verwachtingen er bestaan van de betreffende technologie in de toekomstige energievoorziening. Daarna worden de drijvende krachten en barrières die van belang zijn (geweest) voor de ontwikkeling en toepassing van de technologie behandeld aan de hand van de aspecten zoals die in Tabel 2.1 zijn samengevat. Iedere paragraaf sluit af met een aantal opmerkingen over het gevoerde en te voeren overheidsbeleid, gezien vanuit evolutionair-economische optiek. Dit hoofdstuk besluit met een concluderende beschouwing op basis van de bevindingen van de drie casestudies.

5.2 Brandstofcellen

5.2.1 Geschiedenis en stand van zaken

Brandstofcellen

Brandstofcellen zetten (net als batterijen) de bij een chemische reactie vrijkomende energie rechtstreeks om in elektrische energie. Het verschil met een batterij is dat in een brandstofcel de elektroden zelf niet aan de reactie deelnemen. In een brandstofcel reageren een brandstof (zoals waterstof) en een oxidant (zuurstof) met elkaar, waarbij energie in de vorm van elektriciteit (en warmte) vrijkomt.¹⁶ Brandstofcellen hebben een potentieel hoog rendement, zeker als de vrijkomende warmte ook nog nuttig gebruikt kan worden. Bovendien komen bij de energie-omzetting geen emissies of geluid vrij.

Het principe van de brandstofcel was al in de negentiende eeuw bekend. In 1802 verscheen een artikel over brandstofcellen van Humphrey Davy (Schaeffer, 1998). In 1839 maakte Sir William Grove de eerste brandstofcel die op waterstof werkte. In 1897 verscheen een artikel van W.A. Jacques over een door hem gemaakte cel die steenkool (via waterstof) in elektriciteit omzette met een rendement van 80 procent (Sanders, 1972).

Toch is de brandstofcel, in tegenstelling tot de stoommachine, de verbrandingsmotor, de stoomturbine en de gasturbine, nooit echt doorgebroken in de energievoorziening. Het bleef bij incidentele successen, ook in de twintigste eeuw. Praktische toepassingen van brandstofcellen beperkten zich lange tijd voornamelijk tot de ruimtevaart.¹⁷

In de jaren zestig was er wel veel belangstelling voor brandstofcellen, maar in het begin van de jaren zeventig verflauwde die. Als oorzaken worden ondermeer genoemd het aflopen van het Apollo-programma en de tegenvallende resultaten (in termen van kosten per kW). In de Verenigde Staten zorgde de energiecrisis van 1973 al snel weer voor een opleving, maar in Europa en Japan bleven de brandstofcelactiviteiten beperkt. Pas vanaf 1980, toen in de VS een demonstratieproject van 4,8 MW tot stand was gekomen¹⁸, begon de rest van de wereld weer geïnteresseerd te raken.

¹⁶ Deze reactie verloopt indirect (via een elektrolyt) en met behulp van een katalysator (zoals platina). Het exacte verloop hangt af van het type elektrolyt. In een Proton Exchange Membrane brandstofcel (PEMFC) reizen H^+ -ionen via de elektrolyt (een membraan) van de anode- naar de kathodekant van de brandstofcel, terwijl de (met behulp van de katalysator) vrijgemaakte elektronen een omweg maken via het externe elektrische circuit, waar ze hun nuttige arbeid kunnen verrichten. Aan de kathodekant komen H^+ -ionen, elektronen en O^{2-} -ionen bijeen en vormen tezamen water.

¹⁷ Daarnaast werd met name in de Verenigde Staten ook veel verwacht van militaire toepassingen. In de Vietnamoorlog werden brandstofcellen gebruikt als draagbare energievoorziening voor allerlei apparatuur, maar er waren problemen met ondermeer lekkage en het gewicht (Schaeffer, 1998: p. 362).

¹⁸ Ter vergelijking: een conventionele elektriciteitscentrale heeft doorgaans een vermogen van enkele honderden MW.

Er bestaan diverse typen brandstofcellen, die meestal naar hun elektrolyt genoemd worden. Enkele kenmerken van de belangrijkste typen staan vermeld in Tabel 5.1. De 'derde generatie' brandstofcellen (SOFC en SPFC/PEMFC) worden momenteel gezien als de meest veelbelovende (zie Voermans, 2004).

Tabel 5.1 Typen brandstofcellen

Type cel	Brandstof	Elektrolyt	Werkings-temperatuur	Toepassingen	Generatie
<i>phosphoric acid (PAFC)</i>	waterstof (*)	fosforzuur	150-200 °C	decentrale elektriciteitsvoorziening, WKK	1
<i>molten carbonate (MCFC)</i>	waterstof, koolmonoxide	carbonaat (-ionen)	± 650 °C	decentrale elektriciteitsvoorziening, WKK	2
<i>solid oxide (SOFC)</i>	waterstof, koolmonoxide	metaaloxide	700-1000 °C	decentrale elektriciteitsvoorziening, WKK	3
<i>solid polymer (SPFC) (**)</i>	waterstof (*)	polymeer	40-80 °C	vervoer, decentrale elektriciteitsvoorziening, WKK, draagbare elektriciteit	3
<i>direct methanol (DMFC)</i>	methanol	polymeer	60-130 °C	draagbare elektriciteit; vervoer?	?
<i>alkaline (AFC)</i>	waterstof	kaliumhydroxide	80 °C	ruimtevaart, (vervoer)	1

(*) Ook mengsels van waterstof en kooldioxide. Deze brandstofcellen zijn, in combinatie met een 'reformer', ook geschikt voor koolwaterstoffen.

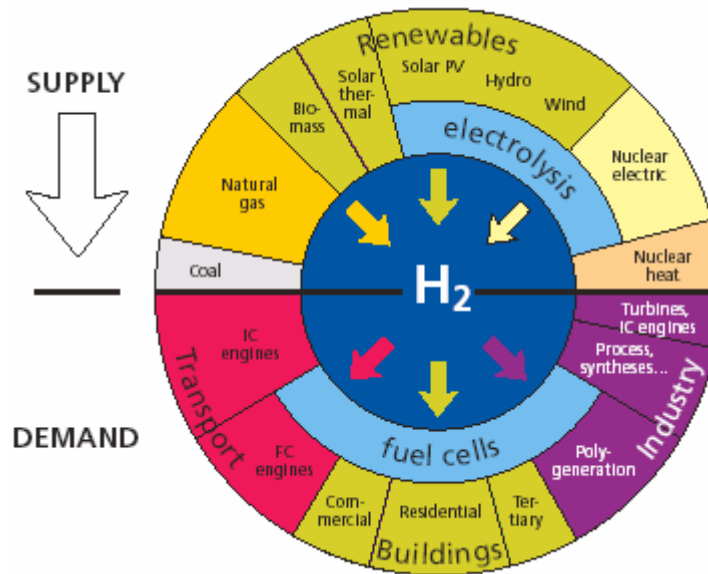
(**) Ook proton exchange membrane (PEMFC) of polymer electrolyte (PEFC) genoemd.

Bronnen: Koppert e.a. (1988); Schaeffer (1998); Van der Hoeven (2001); <http://www.ecn.nl/bct/fuelcellinfo/principle.en.html>

Brandstofcellen en waterstof

De mogelijke rol van de brandstofcel in de energiehuishouding kan niet los gezien worden van die van waterstof als energiedrager. Hoewel er ook brandstofcellen bestaan die door andere brandstoffen worden gevoed, gaat de meeste aandacht tegenwoordig toch uit naar brandstofcellen waarin waterstof en zuurstof met elkaar reageren en daarbij elektriciteit produceren.

Waterstof wordt gezien als een schone en veelzijdige energiedrager die (mits geproduceerd uit vernieuwbare energiebronnen of kernenergie) kan bijdragen aan de vermindering van de CO₂-uitstoot. Brandstofcellen spelen in de waterstofeconomie een belangrijke, zij het niet exclusieve rol (zie Figuur 5.1). Waterstof kan ook toegepast worden in inwendige verbrandingsmotoren en turbines.



Figuur 5.1 Waterstof: primaire bronnen, energie-omzetting en toepassingen (bron: European Commission, 2003).

NB: Grootte van de segmenten is geen indicatie van bestaande of verwachte markten

Al in de jaren zeventig van de vorige eeuw werd in Nederland geschreven over de potentiële rol van waterstof als toekomstige energiedrager (zie bijvoorbeeld Sanders, 1972; TNO, 1975; Lysen, 1977). Als techniek voor waterstofproductie werd vooral gedacht aan elektrolyse van water met behulp van elektriciteit uit kernenergie en (op langere termijn) ook uit wind- en zonne-energie.¹⁹ De aanwezigheid van een fijnmazig aardgasnet in Nederland werd gezien als een gunstige factor voor de introductie van waterstof.²⁰ Naast het gebruik van waterstof in brandstofcellen werd ook aan andere toepassingen gedacht, ondermeer in 'gewone' verbrandingsmotoren in auto's en gasturbines in vliegtuigen. De laatste jaren staat het visioen van waterstof als energiedrager van de toekomst opnieuw sterk in de belangstelling (zie bijvoorbeeld Hoffman, 2001; Dunn, 2002; Rifkin, 2002). De Verenigde Staten en de EU besteden grote sommen R&D-geld aan waterstof, en IJsland heeft zich voorgenomen de eerste 'waterstofeconomie' ter wereld te worden.

¹⁹ Waterstof kan ook uit fossiele brandstoffen worden verkregen door middel van 'reforming'. Recentelijk is ook een proces ontwikkeld waarbij aardgas in de brandstofcel zelf wordt omgezet in waterstof. Vanuit milieu-oogpunt is het nadeel hiervan dat er nog steeds CO₂ wordt uitgestoten, tenzij deze wordt afgevangen en opgeslagen (ondergronds of onderzee).

²⁰ De vanzelfsprekendheid waarmee werd aangenomen dat het aardgasnet ook voor het transport van waterstof geschikt zou zijn is overigens nadien ter discussie komen te staan (zie bijvoorbeeld Hoffmann: p. 198-199). Onlangs is het 'Naturalhy'-project gestart (onder leiding van Gasunie Research), waarin de mogelijkheden voor het gebruik van bestaande aardgasnetwerken voor mensgels van aardgas en waterstof worden onderzocht. Zie <http://www.gasunieresearch.nl>.

Actoren

Nederlandse *onderzoeksinstituten* spelen internationaal een belangrijke rol op het gebied van de brandstofceltechnologie. In de jaren vijftig bereikten Broers en Ketelaar aan de Universiteit van Amsterdam goede resultaten, maar de omvang van het onderzoek bleef beperkt.²¹ TNO ging zich in de jaren zestig ook met brandstofcellen bezig houden, maar stapte daar omstreeks 1970 weer uit (Van der Hoeven, 2001; Schaeffer, 1998).²² Bij ECN wordt sinds 1986 gewerkt aan brandstofcellen. Voorheen betrof dat met name de MCFC, maar dat onderzoek is eind jaren negentig stopgezet. Tegenwoordig richt de aandacht zich vooral op (materialen voor) SOFC en SPFC (PEMFC) (zie Tabel 5.1). In de universitaire wereld vindt brandstofcelonderzoek met name plaats bij de TU Delft.

De betrokkenheid van het Nederlandse *bedrijfsleven* bij de ontwikkeling en productie van brandstofcellen is in het verleden vrij beperkt geweest. Vanaf eind jaren '50 deden de Staatsmijnen (later DSM) wel iets aan brandstofcelonderzoek (Schaeffer, 1998), maar de elektriciteitsbedrijven (met hun kennisinstellingen zoals de KEMA), de SEP en de Gasunie hielden zich afzijdig (Sanders, 1972; Van der Hoeven, 2001). In 1987 besloot Hoogovens tot deelname aan het Nationaal Onderzoeksprogramma Brandstofcellen (zie hierna onder 'Beleid'), maar een jaar later trok het bedrijf zich al weer terug.²³ DSM vormde samen met een Belgische partner de joint venture Elenco, die zich richtte op de toepassing van AFC's voor defensie-, ruimtevaart- en transporttoepassingen. Elenco ging echter in 1995 failliet (ECN, 1999). Recentelijk is DSM echter opnieuw bij de ontwikkeling van brandstofcellen betrokken geraakt, doordat het bedrijf een polymeer in huis had dat zeer geschikt bleek voor toepassing in PEMFC's. Ook Akzo Nobel begon in 1998 om soortgelijke redenen in PEMFC's geïnteresseerd te raken. In datzelfde jaar werd de corporate research bij Akzo Nobel echter afgestoten. Enkele medewerkers van Akzo Nobel hebben toen het bedrijf Nedstack opgericht (Van der Hoeven, 2001). Onlangs kondigde Nedstack aan dat het samen met Akzo Nobel de grootste brandstofcelcentrale ter wereld wil gaan bouwen bij Akzo's chloorfabriek in de Botlek (Voermans, 2004).

In het buitenland heeft het bedrijfsleven wel steeds een grote rol gespeeld. Het ging daarbij met name om bedrijven op het gebied van energietechniek (zoals General Electric, Westinghouse, ABB en Siemens). In de Verenigde Staten heeft ook de gasindustrie een groot onderzoeksprogramma gehad, met als doel een kleine elektriciteitscentrale te ontwikkelen die consumenten thuis konden neerzetten voor opwekking van hun eigen elektriciteit (ECN, 1999). De elektriciteitsbedrijven in de VS hadden veel werk gemaakt van het propageren van

²¹ Het onderzoek van Broers en Ketelaar is overigens wel invloedrijk geweest en heeft de basis gevormd voor onderzoek in Frankrijk en de Verenigde Staten (Schaeffer, 1998: p. 353).

²² TNO is wel weer betrokken bij meer recente brandstofcelprojecten (Van der Hoeven, 2001).

²³ De reden voor het aanvankelijke enthousiasme van Hoogovens was het feit dat de staalfabrikant zijn (waterstofhoudende) kolengas graag zo efficiënt mogelijk ten nutte wilde maken. De reden dat het bedrijf uiteindelijk van deelname afzag was dat aan alle activiteiten die niet direct met de staalproductie verbonden waren extra rendementseisen werden gesteld. Op grond van een Amerikaans consultancyrapport concludeerde Hoogovens dat de paybackperiode van de MCFC te lang zou zijn en dat er teveel onzekerheid op lange termijn was (Van der Hoeven, 2001).

een 'all-electric society' en het brandstofcelprogramma van de gasbedrijven kan worden gezien als een tegenoffensief in de richting van een 'all-gas home' (Van der Hoeven, 2001).

In recente jaren zijn vooral ook de autofabrikanten (Daimler-Benz/DaimlerChrysler voorop) zeer actief op het gebied van brandstofceltechnologie. Daarnaast bestaan er (vooral in Noord-Amerika) gespecialiseerde brandstofcelproducenten, waarvan het Canadese Ballard de grootste is (PriceWaterhouseCoopers, 2003). Wereldwijd zijn er meer dan 500 bedrijven actief op het gebied van de brandstofceltechnologie (Comyns, 2004).

Internationale instellingen zoals het International Energy Agency (IEA) spelen een belangrijke rol bij de internationale samenwerking op het gebied van brandstofceltechnologie. Ook de Europese Unie is zeer actief op dit terrein (zie ook hierna onder 'Beleid'). Het European Space Agency (ESA) heeft zich met brandstofcelprogramma's bezig gehouden in verband met de energievoorziening van ruimtevaartuigen.

Toepassingen en (niche)markten

Brandstofcellen hebben een breed potentieel toepassingsbereik. De eerste grote nichemarkt bestond, zoals gezegd, uit de ruimtevaart. Wat de industrie betreft zagen Koppert e.a. (1988) in eerste instantie een markt bij situaties waar een aanbod van waterstof bestaat en/of vraag naar gelijkstroom. Een andere toepassing waarvoor zij destijds perspectieven zagen was warmte-krachtkoppeling. Voor de langere termijn (circa 15-20 jaar) werd ook gedacht aan grootschalige elektriciteitsopwekking uit steenkool (waarschijnlijk via kolenvergassing). Toepassing in de transportsector werd eveneens als een belangrijk mogelijk toepassingsgebied gezien, maar pas op langere termijn.

Tegenwoordig is het juist de transportsector (en niet grootschalige elektriciteitsopwekking) waar brandstofcellen hun eerste grote doorbraak lijken te gaan beleven. Een belangrijke factor die de toepassing van brandstofcellen in voertuigen heeft versneld was het 'Zero Emission Vehicle' (ZEV) programma in Californië, dat in 1990 van start ging. Dit programma voorzag erin dat in 2003 10% van de in Californië op de markt gebrachte voertuigen geheel emissieloos zou zijn. Aan deze eis konden alleen elektrische voertuigen (met accu of brandstofcel) voldoen. Het ZEV-programma is naderhand overigens wel bijgesteld, omdat de doelstelling te ambitieus bleek te zijn.

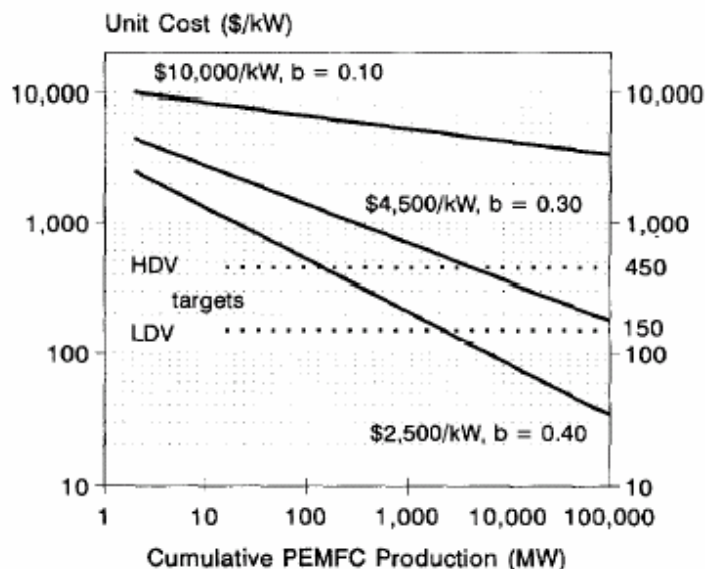
Autofabrikanten steken momenteel miljarden dollars in de ontwikkeling van brandstofcellen. Met name de 'derde generatie' cellen (SOFC en vooral SPFC/PEMFC; zie Tabel 5.1) worden gezien als het meest geëigend voor transportdoeleinden. De productiekosten (in 1998 ongeveer \$6000 per kW, tegen \$60 per kW voor een motor met inwendige verbranding) zijn echter nog veel te hoog om concurrerend te zijn (Schaeffer, 1998).²⁴

²⁴ Gezien de fluctuaties in de koersverhouding tussen euro en dollar in de afgelopen jaren (waarbij de euro zowel beneden als boven de koers van \$1,00 heeft gestaan) is er in dit hoofdstuk van afgezien deze valuta in elkaar om te rekenen. Ze worden dus door elkaar gebruikt, afhankelijk van de bron.

Leercurve

Sinds de jaren zestig is de kostprijs van brandstofcellen aanmerkelijk gedaald: van ruim boven de \$100.000 per kW naar ruim onder de \$10.000 (ECN, 1999). Erik Middelman van de Nederlandse brandstofcellenproducent Nedstack stelt dat de prijs van brandstofcellen de laatste vijf jaar elk jaar gehalveerd is; deze bedraagt nu zo'n €2000 per kW geïnvesteerd piekvermogen. Hij voorziet dat de jaarlijks halvering nog drie jaar zal doorgaan en daarna zal afvlakken (Voermans, 2004). Dat zou dus betekenen dat de prijs binnen enkele jaren tot onder de €250 per kW kan dalen.²⁵

Een vertegenwoordiger van Daimler Benz verwachtte in 1996 dat de kosten van een brandstofcelmotor in 2010 tot \$100 à \$150 gereduceerd zouden kunnen zijn (een vermindering ten opzichte van 1995 met ongeveer een factor 300) (Schaeffer, 1998: p. 405).



Figuur 5.2 Hypothetische leercurves voor PEMFC's.

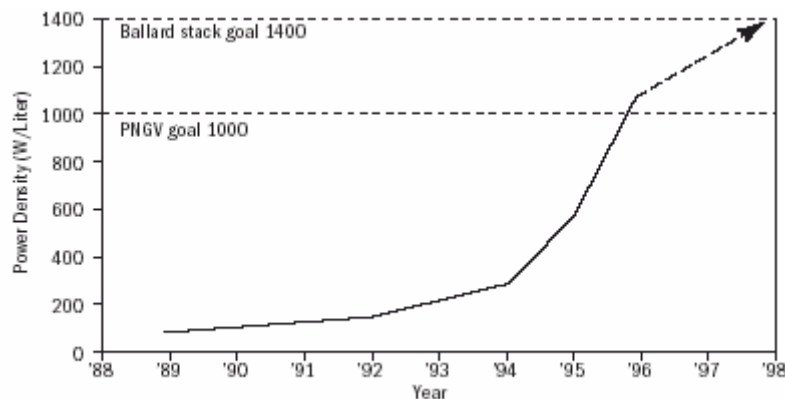
De curves volgen uit de vergelijking $C = aP^{-b}$, waarin C de productiekosten per eenheid zijn, P de cumulatieve productie en a en b constanten. De waarden van b zijn gebaseerd op bestaande leercurves voor gasturbines ($b = 0,10$) en PV-cellen. ($b = 0,30$); de waarde $b = 0,40$ kan worden gezien als bovengrens. De waarden van a zijn gebaseerd op drie schattingen van de huidige kosten en een veronderstelde huidige cumulatieve productie van 2 MW.

Bron: Rogner (1998)

²⁵ Ter vergelijking: de investeringskosten van een aardgasgestookte STEG-centrale (stoom- en gasturbine) bedragen bijna €600 per kW, van een poederkoolcentrale €1200 per kW, van een windturbine op land rond de €1000 per kW en van een windturbine op zee rond de €2000 per kW (bron: Menkveld, 2004).

Onderzoek naar de leercurve van brandstofcellen heeft zich vooral gericht op SPFC (PEMFC) voor auto's. Over het algemeen betreft het analyses op basis van hypothetische 'learning rates', aangezien empirische gegevens die nodig zijn voor het construeren van leercurves van brandstofcellen nog schaars zijn.

Rogner (1998) heeft hypothetische leercurves geconstrueerd voor PEMFC's (zie Figuur 5.2). Op basis hiervan komt hij tot de conclusie dat, zelfs bij gunstige veronderstellingen ten aanzien van de parameters, nog een aanzienlijke productie-omvang gerealiseerd moet worden om de kosten van deze brandstofcellen te laten zakken naar een niveau waarbij ze kunnen concurreren op de automarkt. Bij zware voertuigen ('HDV' in Figuur 5.2) zou het dan moeten gaan om een bedrag van \$450 per kW. Daarvoor is een cumulatieve productie vereist van honderd tot enkele duizenden MW (ter vergelijking: Rogner schatte de cumulatieve productie tot 1998 op minder dan 5 MW). Bij lichte voertuigen ('LDV' in Figuur 5.2) zouden de kosten moeten dalen tot \$150 per kW, waarvoor een cumulatieve productie nodig is van 10.000 tot enkele honderdduizenden MW.²⁶ De geschatte investeringen die nodig zijn om die niveaus te bereiken lopen uiteen van \$180 miljoen tot \$112 miljard. Het gaat bij deze bedragen om de additionele investeringskosten, dus bovenop de kosten van conventionele voertuigaandrijving.



Figuur 5.3 Historische ontwikkeling van de vermogensdichtheid van Ballard brandstofcellen, op basis van Kalhammer (1998).

PNGV = Partnership for Next Generation Vehicles, een in 1993 gestart R&D-programma van de Amerikaanse overheid en de 'grote drie' van de Amerikaanse auto-industrie.

Bron: Van den Hoed (2004)

²⁶Volgens Schaeffer (1998) zou een brandstofcelmotor, om aantrekkelijk te zijn voor de personenautomarkt, minder dan \$60/kW moeten kosten, en de brandstofcel zelf minder dan \$30/kW.

Tsuchiya en Kobayashi (2002) verwachten op basis van een leercurve-analyse dat de kosten van PEMFC voor auto's kunnen dalen tot een niveau dat vergelijkbaar is met dat van inwendige verbrandingsmotoren als de cumulatieve productie zo'n 5 miljoen stuks bedraagt. Schlecht (2003) komt, op basis van een veronderstelde 'learning rate' tussen 15 en 25% en een speltheoretische analyse, tot de conclusie dat het aangaan van allianties binnen de auto-industrie de beste manier is om brandstofcelvoertuigen op de markt te introduceren. Van den Hoed (2004) illustreert de snelle leercurve van brandstofceltechnologie aan de hand van de groei in vermogensdichtheid van Ballard brandstofcellen (zie Figuur 5.3).

Beleid en institutionele aspecten

De Nederlandse overheid draagt al geruime tijd bij aan R&D op het gebied van brandstofceltechnologie en stimuleert daarbij de samenwerking tussen bedrijfsleven en kennisinstellingen. In 1984 werd een Werkgroep Brandstofcellen ingesteld, die moest adviseren over een Nationaal Onderzoeksprogramma. Dit programma ging in 1986 van start. Het accent lag op de ontwikkeling van de MCFC. In 1990 ondertekende Nederland het IEA Implementing Agreement on Advanced Fuel Cells. Inmiddels heeft de Nederlandse overheid ongeveer €100 miljoen in de brandstofceltechnologie gestoken. In een evaluatie van dit beleid concludeert Van der Hoeven (2001) dat het ideaal van een zelfstandige nationale brandstofcelindustrie niet is gerealiseerd, maar dat de productie van brandstofcelcomponenten ondertussen wel een haalbare kaart lijkt voor Nederland.

In de huidige Energie Onderzoek Strategie (EOS) behoren PEMFC-brandstofcellen tot de *speerpunten* van de energie-R&D-portfolio (EZ, 2003a). Voor deze speerpunten geldt dat ze een grote bijdrage aan een duurzame energiehuishouding kunnen leveren en dat de Nederlandse kennispositie sterk is (zie voor een verdere uitleg paragraaf 4.3.3). SOFC-brandstofcellen worden gerekend tot de *kennisimportthema's*. Hieronder vallen opties, waarvoor geldt dat ze een grote bijdrage aan een duurzame energiehuishouding kunnen leveren en dat de Nederlandse kennispositie zwak is.

Ook de EU besteedt veel (onderzoeks)geld aan brandstofceltechnologie. De Europese Commissie heeft in 2002 een 'High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells' ingesteld, die in 2003 een eindrapport uitbracht (European Commission, 2003). Vervolgens is met steun van de EU het 'European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform' tot stand gekomen.

5.2.2 Toekomstbeelden

Brandstofcellen worden al geruime tijd gezien als een veelbelovende optie voor een schone en efficiënte techniek voor elektriciteitsopwekking in de toekomst. In de eerste Energienota werden ze al terloops genoemd (EZ, 1974). In de Vervolgnota Energiebesparing werd de verwachting uitgesproken dat er in 2000 enkele MW aan brandstofcelvermogen opgesteld zou zijn (EZ, 1993). Dit lag in de lijn van uitspraken zoals die van Westinghouse, dat in de jaren negentig commerciële toepassing van multi-MW systemen plaats zou vinden (Schaeffer, 1998). Deze prognoses zijn niet gerealiseerd.

Ook de verwachtingen omtrent de commerciële toepassing van brandstofcellen in voertuigen zouden volgens Schaeffer (1998) wel eens te hoog gespannen kunnen zijn. Volgens hem was niet te verwachten dat er in 2004 een brandstofcelauto in de showrooms zou staan, maar tien jaar later wel (Schaeffer, 1998: p. 493). Ook Van den Hoed (2004: p. 287) stelt dat commerciële brandstofcelauto's op zijn vroegst over tien tot vijftien jaar te verwachten zijn en omgeven zijn met grote technologische onzekerheden.

Het rapport van de High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells kan worden gezien als het toekomstbeeld dat de EU van brandstofcellen heeft (European Commission, 2003). Het schetst de contouren van een 'waterstofgeoriënteerde economie' en van de weg die daarheen zou kunnen leiden. Daarbij ligt tot 2020 het accent op onderzoek, ontwikkeling, demonstratieprojecten en nichemarkten, terwijl na 2020 de grootschalige doorbraak van brandstofcellen in mobiele en stationaire toepassingen zou kunnen plaatsvinden.

Ook de Nederlandse overheid rekent voor de lange termijn op een doorbraak van brandstofcellen. In de studie 'Energie en Samenleving in 2050' van het Ministerie van Economische Zaken spelen brandstofcellen in drie van de vier onderscheiden scenario's een belangrijke rol in het vervoer (EZ, 2000b).

Toch staat nog lang niet vast dat brandstofcellen ook daadwerkelijk een grote rol in de energievoorziening zullen gaan spelen. De onzekerheid over de toekomstige rol van brandstofcellen wordt geïllustreerd door de uitspraken van Robert Lifton, directeur van de Amerikaanse brandstofcellenproducent Medis Technologies, op het World Economic Forum in Davos (januari 2004). Hij zei dat regeringen zich beter kunnen richten op energiebesparing en -efficiëntie, omdat brandstofcellen moeilijk zijn op te schalen naar de vermogens die nodig zijn voor personenauto's of computers. In een reactie hierop verklaarde ECN dat Lifton een veel te negatief beeld gaf over de ontwikkeling van brandstofcellen, vooral voor de vervoersmarkt. Dat er nog geen commerciële producten met brandstofcellen verkrijgbaar zijn heeft volgens ECN te maken met serieproductie en infrastructuur.²⁷ Met andere woorden, brandstofcellen hebben nog niet of onvoldoende kunnen profiteren van schaalvoordelen, netwerkexternaliteiten, complementaire technologieën en leercurve-effecten; dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld benzinemotoren.

Welk(e) type(n) brandstofcellen de toekomstige markt(en) zullen gaan bedienen valt nu nog niet te zeggen. Gezien hun uiteenlopende eigenschappen lijkt het niet onwaarschijnlijk dat verschillende typen naast elkaar zullen (blijven) bestaan, afhankelijk van het toepassingsgebied.

²⁷ Artikel in tijdschrift *Stromen* (13 februari 2004), p. 2: 'Brandstofcel geen toekomst'

5.2.3 Drijvende krachten en barrières

In deze paragraaf worden de belangrijkste factoren die van invloed zijn (geweest) op de ontwikkeling en toepassing van brandstofceltechnologie besproken. Daarbij wordt aangesloten bij de aspecten die in Tabel 2.1 zijn onderscheiden.

Diversiteit

Het onderzoek naar en de ontwikkeling van brandstofcellen kenmerkt zich door een hoge mate aan diversiteit. Er zijn zowel grote als kleine bedrijven uit diverse *bedrijfstakken* bij betrokken. Ook qua *technieken en producten* is de diversiteit groot. Naast de verschillende typen brandstofcellen en de diverse toepassingsmogelijkheden bestaat er ook variatie in de energiebronnen die gebruikt kunnen worden. Waterstof kan op allerlei manieren geproduceerd worden, zowel uit fossiele brandstoffen als met behulp van vernieuwbare energiebronnen en kernenergie.

Diversiteit in *R&D-strategieën* bestaat er vooral tussen de verschillende sectoren en toepassingsgebieden. Binnen de auto-industrie is er juist sprake van een hoge mate van homogeniteit in *R&D-strategieën* (zie Van den Hoed, 2004: hoofdstuk 6).

Innovatie

Op sommige toepassingsgebieden lijken *combinaties* van brandstofcellen met ‘traditionele’ vormen van energie-omzetting het meest veelbelovend te zijn. Zo wordt in de elektriciteitsopwekking veel verwacht van SOFC-brandstofcellen waaraan een kleine gasturbine wordt toegevoegd (Schaeffer, 1998). Ook wordt, bij gebrek aan een waterstofinfrastructuur, gekeken naar mogelijkheden om brandstofcellen te combineren met traditionele (fossiele) brandstoffen. Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van ‘reformers’, die de fossiele brandstof omzetten in waterstof (bijvoorbeeld aan boord van een voertuig).

Bij de ontwikkeling van brandstofceltechnologie speelt *samenwerking* tussen verschillende soorten bedrijven en onderzoeksinstituten een belangrijke rol. Het gaat daarbij om combinaties van expertise op het gebied van brandstofceltechnologie en op het gebied van de toepassingen (bijvoorbeeld Ballard en DaimlerChrysler), maar ook om combinaties van (kleine) bedrijven met kennis en ideeën en (grote) bedrijven met geld (bijvoorbeeld Nedstack en AkzoNobel). Ook zien we dat, door de opkomst van de PEMFC, bedrijven met kennis van polymeertechnologie (zoals AkzoNobel en DSM) bij de brandstofcel-R&D betrokken raken.

Nichemarkten voor innovatieve brandstofceltoepassingen zijn ondermeer de ruimtevaart en de markt voor ‘nul-emissievoertuigen’ (door Californische regelgeving afgedwongen; zie hierna). Binnen de voertuigmarkt zijn ook andere nichemarkten te onderscheiden. Zo is het rijden op waterstof (zo lang er nog geen fijnmazig netwerk van waterstoftankstations bestaat) vooral interessant voor voertuigparken (zoals bussen en taxi’s) die na het rijden van een beperkte afstand steeds terugkeren naar dezelfde plek, waar ze waterstof kunnen tanken.

Zoals we in paragraaf 5.2.2 zagen is er geen sprake van een eenduidig en breed gedragen *toekomstbeeld* van de rol van brandstofcellen in de energievoorziening. Wel zijn er pogingen

om zo'n visie tot stand te brengen, zoals het rapport van de High Level Group van de Europese Commissie.

Selectieomgeving

De *technische mogelijkheden* van brandstofcellen zijn aanzienlijk, maar de *economische levensvatbaarheid* van toepassing op grote schaal moet nog bewezen worden.

Geografische kenmerken spelen met name een rol in het geval van IJsland, waar de overvloedige beschikbaarheid van goedkope mogelijkheden voor elektriciteitsopwekking uit vernieuwbare bronnen (aardwarmte, waterkracht) een gunstige omstandigheid vormt voor de introductie van waterstof en brandstofcellen.

Op de meeste *markten* vormen brandstofcellen nog geen concurrerende optie. Over de vraag welke markt als eerste 'brandstofcelrijp' zal zijn, verschillen de meningen. Hoewel de meeste aandacht uitgaat naar de automarkt, is het goed mogelijk dat bijvoorbeeld de markt voor draagbare elektronica deze wedstrijd zal winnen.²⁸ Sanders (1972) merkte op dat brandstofcellen voor een specifieke groep bedrijven al in een vroeg stadium aantrekkelijk kunnen worden, namelijk voor die bedrijven die gelijkstroom onder lage spanning nodig hebben, bijvoorbeeld voor elektrolyse en galvaniseren. De kostenverhogende gelijkrichters kunnen dan namelijk vervallen. Deze bedrijven zouden dus een nichemarkt voor brandstofcellen kunnen vormen. Koppert e.a. (1988) wezen daarnaast op een mogelijke markt bij situaties waar een aanbod van waterstof bestaat, zoals bij sommige chemische processen die waterstof als bij- of afvalproduct hebben. Een voorbeeld hiervan is de chloorproductie (zie Voermans, 2004).

Rogner (1998) onderscheidt drie factoren die van belang zijn om een technologie van de R&D-fase naar de fase van commercialisering te brengen: nichemarkten, overheidsbeleid en 'early adopters'. Van deze drie is volgens hem in het geval van waterstoftechnologie *overheidsbeleid* (en dan vooral milieubeleid) waarschijnlijk de belangrijkste. Ook Van den Hoed (2004) ziet in overheidsregelgeving (met name de Californische eisen ten aanzien van 'nul-emissievoertuigen') een belangrijke factor die de interesse van de auto-industrie voor de brandstofcel heeft gewekt.

Het overheidsbeleid in Nederland en Europa kan overwegend als 'brandstofcelvriendelijk' worden gekenmerkt. De liberalisering van de elektriciteitsmarkt biedt wellicht mogelijkheden voor nieuwe decentrale elektriciteitsaanbieders. Dit zou een gunstige factor kunnen zijn voor exploitanten van brandstofcellen. Aan de andere kant is ook een verdergaande lock-in van het bestaande electriciteitssysteem denkbaar; ook zijn er concurrerende technologieën die van de liberalisering kunnen profiteren (zoals decentrale warmte-kracht-systemen). De relatief schone en efficiënte alternatieven hebben vanzelfsprekend als handicap dat ze moeten

²⁸ Computerproducenten als NEC, Hitachi en Toshiba zijn van plan binnen enkele jaren laptops met brandstofcellen op de markt te brengen. In: Bakker, J. (2004). Handcomputer op brandstof. *Computable* 19 (7 mei 2004): p. 14.

concurreren met traditionele vormen van elektriciteitsopwekking waarvan de externe kosten niet (volledig) in de prijs doorberekend zijn (zie ook Box 3.2 in paragraaf 3.5).

Begrensde rationaliteit

De beperkte *tijdshorizon* die bedrijven hanteren bij hun investeringsbeslissingen is duidelijk van invloed geweest op de brandstofcellen-R&D in Nederland. Zo stapte Hoogovens bijvoorbeeld uit het Nationaal Onderzoeksprogramma in verband met de te lange terugverdientijd en te grote onzekerheid (zie noot 23).

De introductie van brandstofcellen vergt in sommige opzichten een breuk met bestaande *routines*. Wie voorheen gewend was alleen maar de stekker in het stopcontact te steken, kan met een brandstofcel zelf elektriciteit gaan produceren. Daarbij komen vragen aan de orde als: welk type brandstofcel wordt gebruikt en met welk vermogen; wordt dezelfde brandstofcel voor verschillende doelen gebruikt; wordt een eventueel overschot aan elektriciteit verkocht, etc.. Bestaande ervaringen met de introductie van warmte-kracht in bedrijven en kleinschalige energieopwekking door particulieren (windturbines, zonnepanelen) zijn hierbij zeker nuttig.

Ook *imitatie*-gedrag is waarneembaar. Veel autofabrikanten zijn, in navolging van DaimlerChrysler, brandstofcelauto's gaan ontwikkelen teneinde 'de boot niet te missen' (zie Schaeffer, 1998: p. 402 e.v.; Van den Hoed, 2004: hoofdstuk 6).

Padafhankelijkheid en lock-in

Toenemende schaalopbrengsten zullen zich bij brandstofcellen vooral voordoen in de vorm van leereffecten en schaalvoordelen in de *productie*. Bij de *toepassing* van brandstofcellen zijn er maar beperkte schaalvoordelen, aangezien brandstofcelsystemen modulair opgebouwd worden ('stacks').

Brandstofcellen moeten met name op het gebied van vervoerstoepassingen opboksen tegen een sterke '*lock-in*' in fossiele brandstoffen en de verbrandingsmotor. Ook op andere gebieden is er wellicht sprake van '*lock-in*' situaties, bijvoorbeeld in batterijen (in diverse niet-netgekoppelde toepassingen, waar brandstofcellen een alternatief zouden kunnen zijn).

Co-evolutie

De ontwikkeling van brandstofcellen is nauw verbonden met ontwikkelingen in de chemie, bijvoorbeeld op het gebied van polymeren en katalyse. De grootschalige introductie van brandstofcellen zal belangrijke gevolgen hebben voor het energiesysteem als geheel. Ze passen goed in een gedecentraliseerd energiesysteem, waarbij brandstoffen in elektriciteit (en warmte) worden omgezet op de plaats waar en het tijdstip waarop de vraag ernaar zich voordoet. Ze veronderstellen evenwel ook een brandstof-infrastructuur, waarbij de vraag zich voordoet welke brandstof(fen) in die infrastructuur dominant zal (zullen) zijn. Verschillende kandidaten zijn voorhanden: waterstof, aardgas, methanol, benzine, of wellicht nog andere.

5.2.4 Conclusies

Brandstofcellen hebben al een lange geschiedenis achter de rug. Ze zijn opnieuw in de belangstelling komen te staan op grond van hun potentiële milieuvordelen en energie-efficiëntie. Er bestaan echter nog steeds grote onzekerheden over de economische levensvatbaarheid van deze technologie op lange termijn. Bovendien zullen er nog vele technische problemen moeten worden overwonnen.

Zowel het Nederlandse als het EU-beleid met betrekking tot brandstofcellen heeft zich tot nu toe sterk gericht op de stimulering van R&D. In het geval van het Nederlandse Nationaal Onderzoeksprogramma heeft dat weliswaar niet de beoogde resultaten opgeleverd, maar ongetwijfeld wel bijgedragen aan de goede positie die ons land op het gebied van brandstofcel-expertise inneemt.

Vanuit evolutionair-economisch oogpunt zou het van belang kunnen zijn om nu meer aandacht te gaan schenken aan de toepassing en diffusie van de technologie. Het traject dat nog doorlopen moet worden langs de leercurve vóórdat er eventueel sprake kan zijn van commerciële en grootschalige toepassing is nog lang. Vanuit deze argumentatie is het dan ook van belang om (niche-)markten te stimuleren, zodat de cumulatieve productie van en ervaring met brandstofcellen sneller kunnen toenemen. Het belang van nichemarkten wordt bevestigd door de grote rol die de Californische 'nul-emissievoertuigeisen' hebben gespeeld bij de opkomst van de brandstofcel in de auto-industrie. Ook de mogelijke rol van de overheid als 'launching customer' zou gezien kunnen worden.

Met het oog op de verduurzaming van de energievoorziening doet zich de vraag voor of de toepassing van hybride systemen (zoals de combinatie van brandstofcel en verbrandingsmotor en de mogelijkheid om fossiele brandstoffen te gebruiken) niet leidt tot een 'lock-in' in fossiele technologie. Dunn (2002) pleit om die reden voor overheidsinitiatieven om een waterstof-infrastructuur tot stand te brengen, zodat de grote stap naar een waterstofeconomie gezet kan worden zonder met één been te blijven steken in de fossiele brandstoffen. De evolutionaire economie lijkt hier geen eenduidig antwoord te kunnen geven. Enerzijds speelt lock-in door netwerkeffecten en complementariteit een grote rol (hetgeen zou kunnen pleiten voor publieke steun voor een alternatief netwerk); anderzijds kunnen 'hybride' systemen vaak een nuttige rol spelen als tussenfase in de ontwikkeling van een nieuwe technologie.

Resumerend kan worden gesteld dat, gezien vanuit evolutionair-economisch gezichtspunt, de hoge mate van diversiteit (in bedrijven, technieken en productkenmerken), de interactie en samenwerking tussen diverse partijen, en publiek beleid (nul-emissie-regelgeving) belangrijke factoren zijn (geweest) bij de ontwikkeling van de brandstofceltechnologie. Om de brandstofcel te kunnen laten profiteren van toenemende schaalopbrengsten en de lock-in in bestaande technologie (met name de verbrandingsmotor) te doorbreken zullen echter sterkere impulsen vanuit de selectieomgeving nodig zijn. Daarbij valt met name te denken aan (milieu-)regelgeving en stimulering van (niche-)markten.

5.3 Kernfusie

5.3.1 Geschiedenis en stand van zaken

Inleiding

De oorsprong van het kernfusie-onderzoek ligt rond 1920, toen Britse fysici ontdekten dat bij de samensmelting van waterstofatomen tot helium massa in energie wordt omgezet. Kernfusie is als potentiële energiebron in de belangstelling gekomen na de eerste tests van waterstofbommen in de jaren vijftig van de twintigste eeuw. De gedachte was dat, als de enorme hoeveelheid energie die bij kernfusie vrijkomt²⁹ op een beheerste wijze vrijgemaakt zou kunnen worden, de wereld over een vrijwel onbegrensde energiebron zou beschikken. Bovendien zou deze wijze van energie-opwekking niet gepaard gaan met de gevaren van nucleaire explosies of de problemen van radioactief afval. In de praktijk blijkt het echter niet mee te vallen om deze beloften waar te maken.

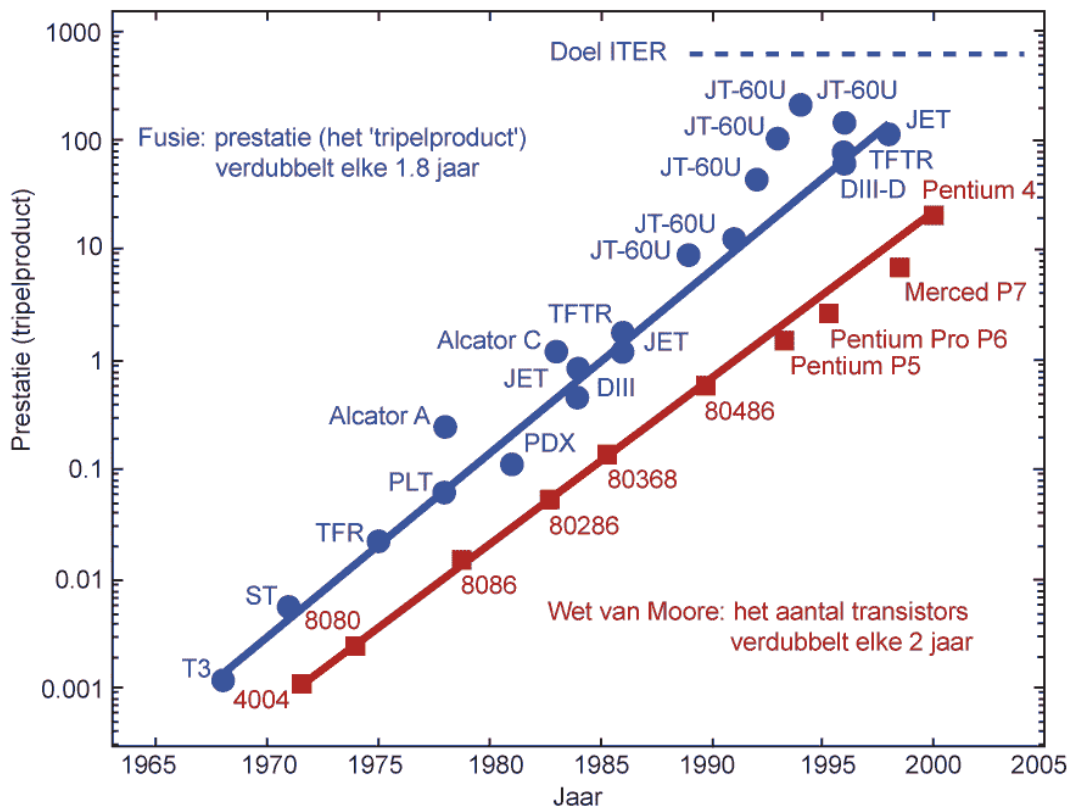
Het probleem van beheerste kernfusie met netto-energieopbrengst is, simpel gezegd, dat een combinatie van zeer hoge temperatuur (miljoenen graden Kelvin, zodat waterstof in de plasmatoestand verkeert) en zeer hoge dichtheid gedurende een voldoende lange tijd in stand gehouden moet worden. Om dit te bereiken zijn installaties nodig waarin zeer sterke magneetvelden het plasma 'in bedwang houden'. Zulke installaties ('tokamak' of 'torus' genoemd) zijn in verscheidene landen gebouwd.³⁰

Op EU-niveau werd in 1979 begonnen met de bouw van de Joint European Torus (JET) in Culham (Verenigd Koninkrijk). In 1983 kwam deze in bedrijf. In de loop der jaren werd hier en in andere tokamaks belangrijke vooruitgang geboekt. Het 'tripelproduct' is een maat voor de prestatie van het fusieplasma, weergegeven met $dichtheid \times temperatuur \times tijdsduur$. Het tripelproduct dat in experimenten kon worden bereikt is in 30 jaar met een factor 100.000 gestegen (zie figuur 5.4). In 1991 werd voor het eerst 1 MW fusievermogen gerealiseerd en in 1997 werd gedurende 4 seconden een vermogen van 4 MW bereikt.³¹

²⁹ De fusie-energie van de deuteriumatomen uit slechts één liter water is zo groot dat zij met de verbrandingswarmte van meer dan honderd liter benzine correspondeert (Fast, 1980). Deuterium is een waterstofisotoop die gebruikt wordt in kernfusiereactoren (tijdens het proces wordt tevens tritium, een andere waterstofisotoop, gevormd uit lithium). 'Gewoon' waterstof is onder aardse omstandigheden niet bruikbaar voor beheerste kernfusie.

³⁰ Een alternatieve techniek bestaat uit de verhitting van zeer kleine, vrij vallende deuterium-tritiumbolletjes met behulp van laserlicht (Lysen, 1977). Het huidige onderzoek concentreert zich echter op de tokamak-technologie en andere methoden van plasma-opsluiting, zoals de 'stellarator' en traagheidsopsluiting. Zie Westra, M.T. (2004). Kernfusie, een zon op aarde. <http://www.fusie-energie.nl/artikelen/watfusie.pdf> (geraadpleegd 13.2.2004).

³¹ Bron: <http://www.iter.org/> (geraadpleegd 13.2.2004).



Figuur 5.4 De vooruitgang van het fusie-onderzoek door de jaren heen, gemeten aan de hand van het tripelproduct, dat een maat is voor de prestatie van het fusieplasma.

NB: Tripelproduct is een maat is voor de prestatie van het fusieplasma. In de grafiek is ook de ontwikkeling van computerchips weergegeven, waaruit blijkt dat kernfusie een hogere 'progress ratio' heeft.

Bron: Westra (2004): Kernfusie, een zon op aarde.
<http://www.fusie-energie.nl/artikelen/watisfusie.pdf>

De EU werkt nu samen met andere landen (China, Rusland, Japan, de Verenigde Staten en Zuid-Korea) aan een nieuw project: ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Dit moet leiden tot de totstandkoming van een tokamak die aanzienlijk groter is dan de tot nu toe gebouwde. Deze experimentele fusiereactor zal, als alles goed gaat, een hoeveelheid energie produceren die vergelijkbaar is met wat er uit een gangbare energiecentrale komt (enkele honderden MW). Op dit moment wordt op hoog niveau gekibbeld over de vestigingsplaats van ITER (Cadarache in Frankrijk of Rokkasho in Japan), maar een compromis lijkt in de maak te zijn (Clery en Normile, 2004). De investeringskosten van ITER worden geschat op ongeveer € miljard.

Actoren

De Europese Gemeenschap voor Atoomenergie (*Euratom*) is de drijvende en coördinerende kracht achter het kernfusie-onderzoek in de EU. Sinds de oprichting van Euratom in 1957 heeft kernfusie-onderzoek steeds deel uitgemaakt van de Europese onderzoeksprogramma's. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de bedragen die sinds 1990 door de EU voor kernfusie-onderzoek zijn uitgetrokken. De landen die lid zijn van het Internationaal Energie Agentschap (*IEA*) hebben in de periode 1974-1998 in totaal \$26,8 miljard aan R&D op het gebied van kernfusie besteed.³²

De belangrijkste actoren op het gebied van kernfusie zijn *wetenschappelijke instellingen*. Daartoe behoort in Nederland met name het in 1958 opgerichte FOM Instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen', dat bijdraagt aan het Europese kernfusie-onderzoeksprogramma.³³ Onderzoekers van Rijnhuizen werken ondermeer bij de JET en (met Duitse en Belgische collega's) aan het fusie-experiment TEXTOR in het Kernforschungszentrum Jülich. Rijnhuizen werkt verder met een aantal Nederlandse universiteiten samen in het Centrum voor Plasmafysica en Stralingstechnologie (CPS).

Bij het ontwerp en de bouw van kernfusiereactoren zijn, naast de deeltjesfysica, nog vele andere disciplines betrokken. Voor het realiseren van de benodigde elektromagnetische velden wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt van kennis en technologie op het gebied van supergeleiding. En voor de wanden van de reactor zijn geavanceerde materialen nodig; onderzoek hiernaar vindt ondermeer plaats bij de Nuclear Research and Consultancy Group (NRG) in Petten.

Tabel 5.2 *Uitgaven aan kernfusie-onderzoek in de EU-kaderprogramma's sinds 1990*

Programma	Budget
Derde Kaderprogramma (1990-1994)	458 mln ECU
Vierde Kaderprogramma (1994-1998)	794 mln ECU
Vijfde Kaderprogramma (1998-2002)	788 mln euro
Zesde Kaderprogramma (2002-2006)	750 mln euro
Totaal 1990-2006 (op basis van ECU = euro)	2790 mln euro

Bronnen: EC Bulletin 9/1990; Lyons (1996); <http://europa.eu.int/comm/research/fusion/fusion3.html> (20-2-2004); http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_rd_en.html (20-2-2004).

³² Berekend op basis van IEA-cijfers (in prijzen en wisselkoersen van 2002).

³³ Het hoofd kernfusieonderzoek van Rijnhuizen, prof. dr. Niek Lopes Cardozo, ontving in 2003 de Koninklijke Shell prijs. Hij houdt zich niet alleen bezig met onderzoek, maar probeert ook door middel van een interactieve 'Fusion Road Show' het grote publiek (en met name middelbare scholieren) voor kernfusie te interesseren.

De rol van het *bedrijfsleven* in de ontwikkeling van kernfusie als energiebron is voornamelijk beperkt tot die van (potentiële) leverancier van materialen en installaties. Bedrijven als Holec hebben in het verleden opdrachten gekregen uit het Europese fusieprogramma en zijn ook gekwalificeerd om componenten voor de ITER te leveren (Van Hilten e.a., 1996). De *energiebedrijven* hebben nooit veel interesse getoond in kernfusie. In het rapport van de elektriciteitsbedrijven over de 'toekomstige energiesituatie in Nederland' (VDEN, 1980) werd kernfusie als 'futuristisch' bestempeld.

Toepassingen en (niche)markten

Op dit moment is er nog (lang) geen sprake van enige commerciële toepassing van kernfusie. Wel is al duidelijk dat kernfusie zich hoogstwaarschijnlijk alleen zal lenen voor grootschalige toepassing als basislastvermogen in de elektriciteitsvoorziening, gezien de grote schaalvoordelen, hoge kapitaalkosten en relatief lage brandstofkosten.

Beleid en institutionele aspecten

Het overheidsbeleid ten aanzien van kernfusie (in Nederland, de EU en elders) richt zich voornamelijk vrijwel uitsluitend op het stimuleren van onderzoek en ontwikkeling. Het Ministerie van Economische Zaken verleent geen directe steun aan kernfusie-onderzoek. Het standpunt van de regering is dat, gezien het internationale belang, kernfusie-onderzoek in EU-verband gefinancierd moet worden.³⁴ Er zijn geen aanwijzingen dat er in de beleidswereld al veel wordt nagedacht over de implicaties van een eventuele doorbraak van kernfusie voor het energiesysteem als geheel.

5.3.2 Toekomstbeelden

Al meer dan dertig jaar wordt kernfusie door velen gezien als een potentieel schone, veilige en vrijwel onuitputtelijke bron van energie. Dat kernfusie geen energiebron voor de korte termijn zou zijn, was echter van meet af aan duidelijk.³⁵ De Energienota van 1974 stelde dat 'op zijn vroegst in het begin van de volgende eeuw van kernfusie een bijdrage tot de energievoorziening kan worden verwacht' (EZ, 1974: p. 158). De Nederlandse kernfusiedeskundige Braams (1982) merkte op dat het moeilijk was, zich een ontwikkeling voor te stellen die ertoe zou leiden dat commerciële toepassing van kernfusie voor de productie van elektriciteit vóór het jaar 2020 gerealiseerd zou kunnen worden. Inmiddels wordt een commerciële toepassing van kernfusie niet meer verwacht vóór 2050. Bovendien is

³⁴ Aldus minister Jorritsma in een Algemeen Overleg met de Tweede Kamer over de Energie Onderzoek Strategie (EOS) op 6 december 2001 (Kamerstuk 28 108, nr. 2). Overigens wordt het onderzoek van 'Rijnhuizen' wel gedeeltelijk uit Nederlandse wetenschapsbudgetten gefinancierd (via FOM en NWO).

³⁵ Toch werd in de Verenigde Staten in de jaren zeventig een programma opgesteld dat erop gericht was om nog voor het eind van de twintigste eeuw een eerste kernfusiecentrale op economische schaal in bedrijf te stellen (LSEO, 1975).

het nog lang niet zeker dat de toepassing van kernfusie voor de energievoorziening ook technisch uitvoerbaar en economisch interessant zal zijn. In de meeste lange-termijn-energiescenario's speelt kernfusie dan ook nauwelijks een rol.

In Lako (2001) wordt als schatting voor de investeringskosten van een dubbele 1500 MW kernfusiecentrale in het jaar 2100 een bedrag genoemd van €3000 per kW. Een commerciële fusiecentrale van 1000 MW zou elektriciteit kunnen leveren tegen een kostprijs van bijna 7 eurocent per kWh. Hiermee kan de technologie niet concurreren met alternatieve basislastopties zoals kolencentrales, tenzij er een stringent beleid ter beperking van de CO₂-uitstoot gevoerd wordt. Als dat laatste gebeurt, kan kernfusie een aanzienlijk deel van de elektriciteitsvoorziening in 2100 gaan uitmaken, met name in scenario's waarin de energievraag sterk stijgt, de beschikbaarheid van olie en gas beperkt is en/of kernsplijting wordt afgebouwd wegens gebrek aan publieke acceptatie.

Ook Tokimatsu e.a. (2003) komen tot de conclusie dat kernfusie alleen concurrerend zal worden bij scherpe CO₂-eisen (550 ppmv en lager). De 'break-even prijs' zou dan in 2050 tussen de 6,5 en 13,5 dollarcent per kWh liggen, en in 2080 tussen de 9 en 30 dollarcent. Aangezien volgens de auteurs vanaf 2050 kernfusiereactoren beschikbaar kunnen komen die elektriciteit kunnen leveren tegen een kostprijs van 7 tot 13 dollarcent per kWh, zien zij goede mogelijkheden voor introductie in de periode 2050-60. In 2100 zou kernfusie een aandeel van maximaal 30% in de elektriciteitsproductie kunnen hebben.

Als er deze eeuw inderdaad commerciële kernfusiereactoren zullen gaan draaien, dan zullen deze waarschijnlijk van het tokamak-type zijn. Er wordt inmiddels al wel gewerkt aan andere manieren van plasma-opsluiting (zie voetnoot 30), maar deze technieken lopen een generatie achter op de tokamak.

5.3.3 Drijvende krachten en barrières

In deze paragraaf worden de belangrijkste factoren die van invloed zijn (geweest) op de ontwikkeling en toepassing van kernfusietechnologie besproken. Daarbij wordt aangesloten bij de aspecten die in Tabel 2.1 zijn onderscheiden.

Diversiteit

Binnen de kernfusietechnologie is de diversiteit beperkt. De 'tokamak' is momenteel de verst ontwikkelde techniek voor plasma-opsluiting. Andere technieken verkeren nog in een veel priller stadium. Gezien de enorme omvang van de investeringen die met kernfusie gemoeid zijn, zal de technologische diversiteit waarschijnlijk altijd beperkt blijven.

Innovatie

Het kernfusie-onderzoek speelt zich grotendeels af binnen een beperkte, wereldwijde kring van ingewijden. De onderlinge *uitwisseling* van kennis en ervaringen is intensief. Ter

illustratie: al tijdens de Koude Oorlog maakten Russen, Europeanen en Amerikanen hun resultaten aan elkaar openbaar (de ‘tokamak’ is een Russische uitvinding).

Van *durfkapitaal* of *nichemarkten* is in dit stadium nog geen sprake. De ontwikkeling van de technologie is volledig afhankelijk van overheidsfinanciering.

Zoals in paragraaf 5.3.2 bleek, bestaat er geen eenduidig *toekomstbeeld* van de rol van kernfusie in de energievoorziening. De enige consensus die er bestaat betreft de verwachting dat kernfusie vóór 2050 geen rol in de commerciële energievoorziening zal spelen.

Selectieomgeving

Voorlopig zal de levensvatbaarheid van kernfusie als energiebron eerst nog in *technische* zin aangetoond moeten worden. Vervolgens komt de vraag aan de orde of deze technologie ook in *economische* zin rendabel kan worden. Het antwoord op die vraag hangt af van de mate waarin er een stringent CO₂-beleid gevoerd zal worden (waardoor traditionele vormen van opwekking met fossiele brandstoffen het veld moeten ruimen), maar ook van de wijze waarop concurrerende, CO₂-vrije technieken zich ontwikkelen.

Begrensde rationaliteit

Het investeren van grote sommen publiek geld in kernfusie-onderzoek zou kunnen worden gelegitimeerd door te verwijzen naar de beperkte *tijdshorizon* van private investeerders. Miljarden euro's steken in een technologie die over 50 tot 100 jaar misschien (maar misschien ook niet) gaat renderen is niet iets wat particuliere bedrijven graag doen. Voor de overheden die het kernfusie-onderzoek steunen is het vooruitzicht van een onuitputtelijke, schone energiebron blijkbaar wel voldoende om het kortetermijndenken te doorbreken. Tenslotte is kernfusie een technologie die volstrekt afwijkt van de gangbare energietechnologie, waardoor er weinig mogelijkheden zijn om voort te bouwen op bestaande *routines*.

Padafhankelijkheid en lock-in

De investeringen die in het verleden in kernfusietechnologie zijn gedaan kunnen als *onomkeerbaar* worden beschouwd en bepalen de verdere ontwikkeling in hoge mate. Er is daarmee sprake van een sterke padafhankelijkheid. Zo is bijvoorbeeld met het kiezen voor een bepaalde techniek van plasma-opsluiting (de tokamak) het basisontwerp van kernfusiereactors voor lange tijd vastgelegd.

Schaalvoordelen in de productie spelen bij kernfusie een zeer belangrijke rol. Deze hebben hoofdzakelijk een technische achtergrond. Daarnaast zijn de *leereffecten* van belang: hoe meer fusiereactoren, hoe meer ervaring er uitgewisseld kan worden (maar het aantal reactoren zal, gezien de minimum vereiste schaalgrootte, altijd beperkt blijven).

Zoals alle ‘alternatieve’ vormen van energievoorziening zal kernfusie, om succesvol te worden, de huidige ‘lock-in’ in fossiele brandstoffen en kernsplijting moeten zien te

doorbreken. Kernfusie is echter wel goed inpasbaar in de bestaande systemen van grootschalige, gecentraliseerde elektriciteitsproductie. Op lange termijn is, bij toenemende schaalopbrengsten, een 'lock-in' in kernfusietechnologie denkbaar, zij het dat dit dan alleen de productie van basislastelektriciteit zal betreffen.

Co-evolutie

De ontwikkeling van kernfusie vindt plaats buiten de 'mainstream' van de energietechnologie. Er is dan ook weinig uitwisseling met andere energietechnologieën. Wel zijn er sterke banden met vakgebieden als fysica en materiaalkunde. Verder worden van het fusieonderzoek *spin-off*-effecten verwacht op het gebied van cryogene technieken, microgolfttechniek, supergeleidende materialen, *remote handling* en industrieel gebruik van plasma's.³⁶

Als kernfusie op den duur inderdaad de bijna onuitputtelijke en schone energiebron zal blijken te zijn die ons voorgespiegeld wordt, zal dit ongetwijfeld repercussies hebben voor de hele maatschappij en de aard en omvang van haar energiegebruik. Uitspraken daarover zijn vooralsnog speculatief.

5.3.4 Conclusies

Kernfusie wordt al vele decennia gezien als een veelbelovende energiebron voor de lange termijn. Er is ook, dankzij omvangrijke hoeveelheden overheidsgeld, de nodige vooruitgang geboekt bij de ontwikkeling van deze technologie, maar de weg naar commerciële toepassing is nog lang en of kernfusie ooit energie zal kunnen leveren tegen concurrerende kostprijs is nog erg onzeker.

Vanuit evolutionair-economisch perspectief zou de omvangrijke financiële steun voor het kernfusie-onderzoek gerechtvaardigd kunnen worden op grond van de beperkte tijdshorizon van private investeerders. Wel moet worden opgemerkt dat dit mogelijk ten koste gaat van de financiële mogelijkheden voor de ontwikkeling van andere energietechnologieën die om dezelfde reden niet van de grond komen. Hierdoor kan de diversiteit aan technologieën worden beperkt.

De ontwikkeling van kernfusie vindt geïsoleerd plaats van andere energietechnologieën. Er is daardoor weinig ruimte voor kruisbestuiving en samenwerking, waardoor de effectiviteit van R&D-stimulering (in termen van 'spill over' effecten) hier wellicht geringer is dan op andere, minder geïsoleerde gebieden.

Van toepassing van kernfusie als energiebron in de praktijk is vooralsnog geen sprake. Er zijn voorlopig dan ook geen mogelijkheden om de technologie te stimuleren door middel van het creëren van (niche)markten of een gunstige selectieomgeving.

³⁶ Westra (2004). Kernfusie, een zon op aarde. <http://www.fusie-energie.nl/artikelen/watisfusie.pdf>

Tenslotte kan nog worden opgemerkt dat kernfusie niet kleinschalig kan worden toegepast. De technologie is dus niet verenigbaar met gedecentraliseerde systemen van elektriciteitsopwekking, hetgeen weer een beperkend effect heeft op de diversiteit van energietechnologieën.

Al met al vormt kernfusie, gezien vanuit evolutionair-economisch gezichtspunt, een problematische energietechnologie, vooral omdat er in verscheidene opzichten sprake is van een gebrek aan diversiteit. Of de selectieomgeving over pakweg vijftig jaar (als kernfusie 'marktrijp' zou kunnen zijn) gunstig zal zijn, valt niet te voorspellen. Zo niet, dan kan men zich natuurlijk altijd nog troosten met de gedachte dat verspilling evolutionair-economisch gezien een onvermijdelijk verschijnsel is (zie paragraaf 2.4.2).

5.4 Fotovoltaïsche energie (PV)

5.4.1 Geschiedenis en stand van zaken

Inleiding

Fotovoltaïsche cellen (PV-cellen) zetten (zon)licht rechtstreeks om in elektriciteit. Hun werking berust op het principe dat de fotonen in licht in staat zijn elektronen in halfgeleidermateriaal (zoals silicium) vrij te maken en daardoor een elektrische spanning te creëren.

De PV-technologie heeft haar wortels enerzijds in de quantummechanica en anderzijds in de 'halfgeleiderrevolutie' van de jaren vijftig. De eerste efficiënte zonnecellen werden gemaakt in 1954 en de eerste commerciële toepassing (in de ruimtevaart) dateert van 1958. De oliecrises van de jaren zeventig gaven een nieuwe impuls aan het PV-onderzoek. In eerste instantie werd de technologie vooral gebruikt op plaatsen waar een elektriciteitsnet ontbreekt, maar de laatste jaren is er ook een sterke groei in netgekoppelde toepassingen (gestimuleerd door subsidieprogramma's). Aan het eind van de 20^e eeuw was de omzet van de PV-industrie gegroeid tot boven de \$1 miljard (Perlin, 1999; Green, 2000). De cumulatieve geïnstalleerde PV-capaciteit is de 1000 MW_p inmiddels ruimchoots gepasseerd.³⁷

Tabel 5.3 geeft een overzicht van bestaande en in ontwikkeling zijnde PV-technologieën. De 'eerste generatie', die de markt nu nog domineert, is gebaseerd op het gebruik van silicium'wafels'. De 'tweede generatie' bestaat uit dunne-film-technologie, die het voordeel heeft van lagere materiaalkosten en betere geschiktheid voor massaproductie. Binnen deze technologie zijn verschillende subtypen te onderscheiden die nu of op korte termijn commercieel beschikbaar (zullen) zijn. Verwacht wordt dat in de komende tien jaar duidelijk

³⁷ Het (maximaal leverbare) vermogen van PV-installaties wordt uitgedrukt in Megawatt-piek (MW_p).

zal worden welke van deze subtypen (die elk hun voor- en nadelen kennen) zal gaan domineren. Inmiddels worden ook de contouren van een ‘derde generatie’ al zichtbaar, waarbij de efficiëntie waarmee zonlicht in elektriciteit wordt omgezet (nu theoretisch maximaal 33%) verder kan worden opgevoerd (in de richting van het thermodynamische maximum van 93%). Dat kan door gebruik te maken van combinaties van verschillende soorten cellen die elk geoptimaliseerd zijn voor een ander deel van het spectrum (Green, 2000). Ook wordt gewerkt aan zonnecellen met een minder hoog rendement, maar ook lage productiekosten, bijvoorbeeld op basis van kunststoffen (De Wit, 2004).

Tabel 5.3 Overzicht van PV-technologieën

Type	Subtype/materiaal	Kenmerken	Behaald rendement	Toepassingen
silicium 'wafels'	monokristallijn Si	oudste generatie; ver ontwikkeld	> 20%	breed toegepast
	multikristallijn Si			
dunne film (‘tweede generatie’)	amorf Si (evt. met Ge)	productie bij lage temperatuur	6-7%	o.a. calculators
	polykristallijne halfge- leiderverbindingen (CdTe, CuInSe ₂)	benodigde materialen kunnen bottleneck zijn	12-19%	diverse, ook modules (nog in pilotstadium)
	polykristallijne Si-cellen	relatief hoog licht- absorptievermogen	> 10%	in ontwikkeling
	nanokristallijne organische kleurstoffen*	proces lijkt enigszins op fotosynthese	?	in ontwikkeling

* Dit type wordt ook wel tot de derde generatie gerekend.

Bron: Green (2000)

Actoren

De technologie die gebruikt wordt voor het maken van de meeste zonnecellen leunt zwaar op de *microelektronica-industrie*. Hierdoor kan de PV-sector meeprofiteren van de schaalvoordelen die in deze (veel grotere) industrie worden behaald. Bovendien gelden voor het in zonnecellen gebruikte siliciumkristal minder strenge kwaliteitseisen, zodat gebruik gemaakt kan worden van grondstoffen en silicium‘wafels’ die niet aan de specificaties voor de microelektronica voldoen. Tot de grootste spelers op de PV-markt behoren de Japanse elektronicaconcerns Sharp en Kyocera. Naarmate de PV-industrie rijper wordt, zal ze overigens steeds meer gebruik gaan maken van technologie die is geoptimaliseerd voor haar eigen eisen, zoals het gebruik van multikristallijne silicium‘wafels’ (Green, 2000).

Al in een vroeg stadium zijn ook verscheidene *oliemaatschappijen* actief geworden op het gebied van PV.³⁸ Sommige, zoals het voormalige Mobil, hebben zich weer uit deze markt teruggetrokken, maar Shell en BP behoren nu tot de grote spelers op de PV-markt. Ook *andere energiebedrijven*, zoals het Duitse RWE, zijn actief geworden in de productie van PV-systemen. Daarnaast zijn energiebedrijven uiteraard betrokken bij de PV-markt als afnemers of door het initiëren en stimuleren van (netgekoppelde) PV-systemen. Sommige energiebedrijven (met name Nuon) profileren zich daarnaast als PV-supporter door het sponsoren van projecten zoals de race met PV-aangedreven voertuigen door Australië.

Gespecialiseerde aanbieders van PV zijn over het algemeen betrekkelijk klein van omvang, met uitzondering van het Spaanse Isofotón en het Amerikaanse Astro Solar. Zulke bedrijven hebben hun oorsprong doorgaans in de academische wereld (technische universiteiten).

In Nederland was Shell Solar tot voor kort de enige producent van PV-cellen en -modules, maar in 2002 zijn daar Philips Solar Energy en Logic Electronics bijgekomen. Ook AKZO Nobel heeft plannen om met de productie van PV-systemen te beginnen (IEA, 2003). Shell Solar heeft daarentegen in 2002 besloten zijn productievestiging in Helmond te sluiten, in het kader van een reorganisatie in verband met overcapaciteit op de PV-markt.³⁹

In de *ruimtevaartindustrie* worden de meest geavanceerde PV-technieken toegepast. Het Nederlandse Dutch Space (voortgekomen uit Fokker) produceert zonnepanelen voor de ruimtevaart en is op dit gebied marktleider in Europa.

Naast de producenten van de PV-cellen en -modules zijn ook de gespecialiseerde aanbieders van andere componenten van PV-systemen, zoals inverters, batterijen en accu's en bouwtechnische constructies van belang. Consultants, advies- en ingenieursbureaus en installateurs zorgen voor de verbinding tussen de producenten en (potentiële) gebruikers van PV-systemen en de omzetting van de technologische kennis in concrete toepassingen. Tot die gebruikers behoren bedrijven en instellingen in tal van sectoren, alsmede particulieren. Naarmate het belang van gebouwgeïntegreerde PV-toepassingen toeneemt, wordt ook de rol van architecten en bouwbedrijven groter, zeker wanneer de PV-elementen als bouwcomponenten worden gebruikt. Banken en andere financiële instellingen kunnen zorgen voor de financiering van PV-systemen.⁴⁰

Overheden spelen een essentiële rol door het geven van (financiële en andere) steun aan onderzoek en ontwikkeling, pilotprojecten en investeringen en het (fiscaal) aantrekkelijk maken van het produceren en gebruiken van elektriciteit uit PV (zie ook hierna onder 'Beleid en institutionele aspecten'). Ook kunnen zij zorgen voor regelgeving en institutionele kaders die gunstig zijn voor PV. In Nederland gaat het met name om het Ministerie van EZ (verantwoordelijk voor het energiebeleid, inclusief duurzame energie) met Novem en Senter als uitvoerende organisaties ondermeer bezig met de diverse subsidieregelingen. Ook lagere overheden zijn vaak betrokken bij het initiëren of ondersteunen van PV-projecten.

³⁸ Het toenmalige Esso (nu Exxon) bracht al in 1973 via zijn dochteronderneming Solar Power Corporation PV-modules op de markt (Perlin, 1999).

³⁹ Bron: Persbericht Shell Solar, 25 oktober 2002.

Universiteiten en andere *onderzoeksinstituten* spelen een zeer belangrijke rol op het PV-toneel. In Nederland is ECN sinds 1990 actief op het gebied van PV-R&D. Bij ECN Solar Energy werken nu ruim 50 mensen aan de ontwikkeling van zonnecellen en -panelen met een hoger omzettingsrendement en een betere prijs-/prestatieverhouding. Bij een ander onderdeel van ECN (Duurzame Energie in de Gebouwde Omgeving, DEGO) wordt ondermeer gewerkt aan de elektrische en bouwkundige integratie van PV-systemen in gebouwen en de combinatie van thermische en elektrische zonne-energiesystemen.⁴¹ In het Dutch Polymer Institute (DPI, één van de vier Technologische Topinstituten in Nederland) werken zo'n twintig aio's en postdocs fulltime aan polymere zonnecellen (De Wit, 2004).

Internationale organisaties zijn van groot belang voor samenwerking en het uitwisselen van kennis tussen landen, zoals het International Energy Agency met zijn Photovoltaic Power Systems Programme, en de Europese Unie (die ondermeer in het Zesde Kaderprogramma voor Onderzoek veel aandacht aan vernieuwbare energie schenkt).

Toepassingen en (niche)markten

Er kunnen (buiten de ruimtevaart) vier hoofdvormen van PV-toepassing worden onderscheiden (IEA, 2003):

- *Off-grid domestic*: Een belangrijke nichemarkt wordt gevormd door relatief kleine, geïsoleerde plattelandsgemeenschappen, met name in ontwikkelingslanden. 'Off-grid' PV-systemen vormen hier een economisch aantrekkelijk alternatief voor uitbreiding van het elektriciteitsnet als de afstand tot het bestaande net meer dan 1 à 2 kilometer bedraagt.
- *Off-grid non-domestic*: Naast de ruimtevaart (de oudste nichemarkt voor PV) gaat het hierbij om zeer uiteenlopende toepassingen waar kleine hoeveelheden elektriciteit een hoge waarde hebben, zoals telecommunicatie, waterpompen, vaccinkoeling, navigatiehulpmiddelen, luchtvaartwaarschuwingslichten en meteorologische registratie-apparatuur.
- *Grid-connected distributed*: De opkomst van PV-toepassing in gebouwen die op het net zijn aangesloten is een relatief recent verschijnsel. Het gaat om kleine systemen (0,4 tot 100 kW), die voorzien in de elektriciteitsbehoefte van het gebouw zelf en eventuele overschotten terugleveren aan het net. Deze systemen hebben een aantal voordelen: beperking van de distributieverliezen; geen extra ruimtebeslag; de mogelijkheid om de PV-panelen als onderdeel van bijvoorbeeld de dakbedekking te gebruiken; en het doorgaans ontbreken van de noodzaak van energie-opslag.
- *Grid-connected centralized*: Deze systemen worden geïnstalleerd als alternatief voor conventionele centrale elektriciteitsopwekking of ter versterking van het distributiesysteem. Demonstratieprojecten die momenteel in verscheidene landen lopen, leveren ervaringen op voor de bouw, de werking en de prestaties van zulke systemen.

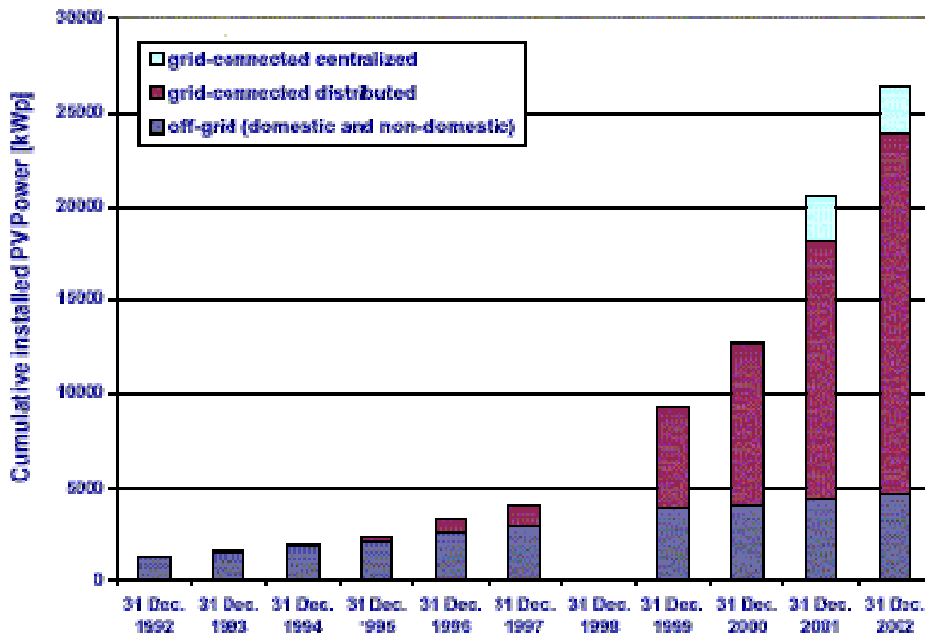
⁴⁰ De Wereldbank, die aanvankelijk niets in PV zag, heeft tegenwoordig een aparte afdeling waar een groot aantal specialisten werkt aan PV-projecten in ontwikkelingslanden (Perlin, 1999: p. 188-189).

⁴¹ Bron: www.ecn.nl

De 'off-grid' (niet-netgekoppelde) systemen zijn in veel gevallen dus al economisch aantrekkelijk. Netgekoppelde systemen moeten het meestal hebben van overheidssubsidies of van initiatieven van bedrijven en particulieren die niet primair door financieel-economische afwegingen worden bepaald.

Eind 2002 was in de 20 landen die aangesloten zijn bij het Photovoltaic Power Systems Programme van het IEA (IEA-PVPS) 1330 MW aan PV-vermogen geïnstalleerd (waarvan bijna de helft in Japan). Deze landen zijn tezamen goed voor meer dan 90% van de mondiale PV-productie. Sinds 1994 ligt de groei van de geïnstalleerde capaciteit tussen 20 en 40% per jaar (IEA, 2003).

Ook de geïnstalleerde PV-capaciteit in Nederland heeft de laatste 10 jaar een sterke groei doorgemaakt en bedroeg eind 2002 ruim 26 MW_p (zie figuur 4.5). De groei deed zich vooral voor in netgekoppelde decentrale systemen. Uitgedrukt in geïnstalleerde PV-capaciteit per hoofd van de bevolking staat Nederland (met 1,6 W_p/cap) nu op de vijfde plaats van de wereldranglijst, na Japan (5 W_p/cap), Duitsland, Zwitserland en Australië. Het grootste op een dak gesitueerde PV-project ter wereld (2,3 MW) werd in 2002 gerealiseerd op de Floriade (Lysen, 2003). In Nederland bevindt zich ook de enige stad ter wereld die volledig in zijn elektriciteitsbehoefte voorziet met PV: Madurodam (Van Beek e.a., 2003).



Figuur 5.5 Totaal geïnstalleerd PV-vermogen in Nederland, uitgesplitst naar hoofdvorm

Bron: Van Beek e.a. (2003)

Leercurve

Harmon (2000) heeft een leercurve geconstrueerd voor PV-modules voor de periode 1968-1998. In deze periode is de wereldwijde cumulatieve geïnstalleerde capaciteit van PV-modules gegroeid van 95 kW naar 950 MW. De kosten zijn in diezelfde periode gedaald van \$90 naar \$3,50 per W_p .

De leercurve kan in algemene zin worden uitgedrukt als:

$$Cost(CUM) = Cost_o * CUM^b$$

waarin:

$Cost(CUM)$ = de kosten per eenheid als functie van de cumulatieve productie;

$Cost_o$ = de kosten van de eerste geproduceerde eenheid;

CUM = de cumulatieve productie in de loop der tijd;

b = de ervaringsindex.

De 'learning rate' LR wordt gedefinieerd als:

$$LR = 1 - 2^b$$

De 'learning rate' geeft het percentage weer waarmee de kosten dalen bij een verdubbeling van de cumulatieve productie.⁴² In het geval van PV-modules bedraagt deze 20,2%. De bijbehorende leercurve is weergegeven (in een dubbel-logaritmisch diagram) in Figuur 5.6.

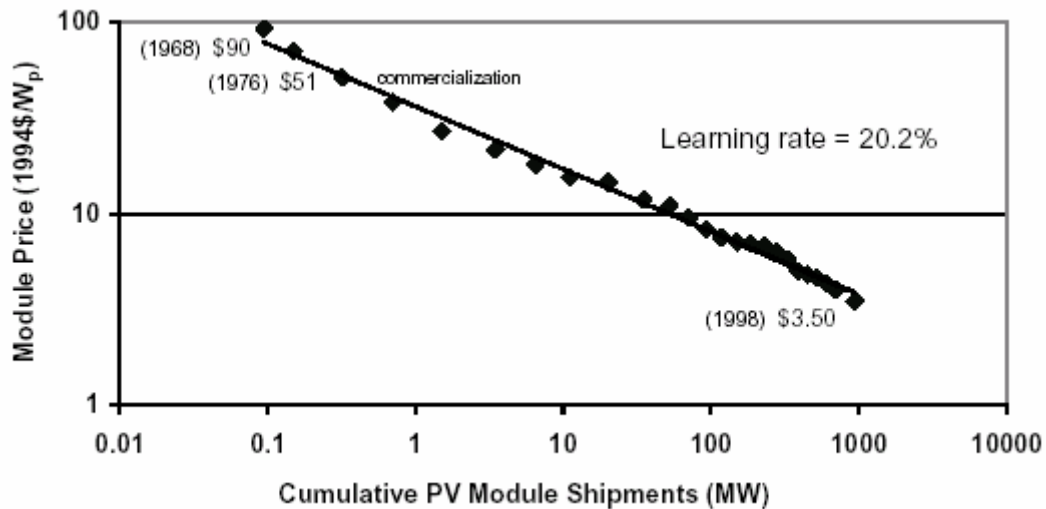
Poconi (2003) komt (gedeeltelijk op basis van andere gegevens) uit op een leercurve met een 'learning rate' van 25% voor de periode 1976-2002. Deze hoge waarde wordt echter sterk beïnvloed door de zeer hoge prijzen aan het begin van die periode, toen er nog maar heel weinig PV-systemen verkocht werden. Voor de periode 1989-2002 komt Poconi uit op een 'learning rate' van ongeveer 19,5%; bijna gelijk dus aan die van Harmon.

Het PHOTEX project, dat wordt gefinancierd uit het Vijfde Kaderprogramma van de EU, richt zich op de verdere ontwikkeling van PV-leercurves.⁴³ Binnenkort wordt de eindrapportage van dit project verwacht.⁴⁴

⁴² In andere publicaties (zoals Poconi, 2003) wordt de term 'progress ratio' gebruikt, waarmee (gegeven de hier gehanteerde symbolen) de waarde 2^b wordt bedoeld.

⁴³ Zie <http://www.energytransition.info/photex/>

⁴⁴ Persoonlijke mededeling E. Alsema, Universiteit Utrecht, Sectie Natuurwetenschap en Samenleving.



Figuur 5.6 Leercurve van PV-modules, 1968-1998.

Bron: Harmon (2000)

Beleid en institutionele aspecten

Lange tijd heeft in Nederland de opvatting geheerst dat PV voor ons land geen reële optie was; enerzijds wegens gebrek aan zon en anderzijds wegens ons fijnmazige elektriciteitsnetwerk (PV werd vooral gezien als een optie voor niet-netgekoppelde toepassingen). In het eerste Nationaal Onderzoekprogramma Zonne-energie (NOZ) (1978-1982) kwam PV dan ook maar uiterst beperkt aan bod (Knoppers en Verbong, 2001). In de tweede fase van het NOZ (1982-1985) kreeg PV al iets meer aandacht en de derde fase (1986-1990) bevatte een apart PV-programma van f 12 miljoen (€5,5 miljoen). In de jaren negentig besteedde de Nederlandse overheid zo'n f 50 miljoen (€23 miljoen) per jaar aan zon-PV (EZ, 1999b). Het ging daarbij ondermeer om onderzoek en ontwikkeling en demonstratieprojecten.

Innovatieve PV-projecten konden tot nu toe subsidie krijgen op grond van het BSE-DEN (Besluit Subsidies Energieprogramma's – Duurzame Energie in Nederland), dat door SenterNovem werd uitgevoerd. In het kader van de Energie Onderzoek Strategie (EOS) (EZ, 2003a) zal het instrumentarium worden aangepast. EOS rekent multikristallijne en dunnefilm-zonnecellen tot de 'speerpunten' van de energie-R&D-portfolio (de opties waarvoor geldt dat ze een grote bijdrage aan een duurzame energiehouding kunnen leveren en dat de Nederlandse kennispositie sterk is). Investerings in PV worden gestimuleerd door middel van ondermeer de Energiepremieregeling, de Energie-investeringsaftrek, de Vamil, het CO₂-reductieplan en de Regeling Groen Beleggen.

Tot 2003 werd het gebruik van 'groene' elektriciteit (met name uit wind, PV en biomassa) gestimuleerd door middel van een nihiltaarf in de regulerende energiebelasting. Deze

regeling wordt de komende jaren gefaseerd vervangen door een producentensubsidie op grond van de MEP-regeling (Milieukwaliteit Elektriciteitsproductie). Specifieke stimulering van PV door middel van hoge terugleververgoedingen, zoals in Duitsland, vindt in Nederland niet plaats.

De Nederlandse regering is de laatste jaren een zwaarder accent gaan leggen op de 'kosteneffectiviteit' van energiesubsidies, uitgedrukt in termen van bijvoorbeeld kilogrammen CO₂-reductie per euro subsidiegeld. Dit werkt in het nadeel van PV, aangezien met andere technologieën (nu nog) tegen lagere kosten CO₂-uitstoot vermeden kan worden.

In 1997 is er een 'PV *convenant*' afgesloten tussen het Ministerie van Economische Zaken, energiebedrijven en andere marktpartijen. Doelstelling van het convenant was om in 2000 in Nederland 7,7 MW PV-capaciteit te hebben. Deze doelstelling is ruimschoots gehaald.

Ook op internationaal niveau wordt PV gestimuleerd. De EU besteedt in haar kaderprogramma's veel geld aan R&D op het gebied van vernieuwbare energie en heeft ook speciale fondsen voor praktijkexperimenten en voorbeeldprojecten (zoals het Altener-programma). In de laatste tien jaar heeft de EU meer dan €200 miljoen besteed aan R&D-projecten op het gebied van PV. Recentelijk heeft de Europese Commissie een 'Photovoltaics Technology Research Advisory Council' (PV-TRAC) in het leven geroepen. De PV-TRAC heeft in september 2004 haar langetermijnvisie op de PV-technologie gepubliceerd (European Commission, 2004a). De landen die lid zijn van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) hebben in de periode 1974-98 in totaal \$5,2 miljard aan PV-R&D besteed.⁴⁵

Een belangrijke institutionele voorwaarde voor de ontwikkeling van de PV-markt is het bestaan van normen en codes. Met het oog hierop heeft de International Electrotechnical Commission (IEC) in 1981 een technisch comité ingesteld, dat tot 2003 26 internationale normen heeft vastgesteld. Op Europees niveau werkt CENELEC aan PV-normen en -codes (IEA, 2003).

5.4.2 Toekomstbeelden

De bijdrage van PV aan de mondiale energievoorziening wordt in de meeste scenario's op korte en middellange termijn nog niet erg hoog ingeschat. Zo voorzien Criqui en Kouvaritakis (2000) voor het jaar 2030 een elektriciteitsproductie uit zonne-energie van 15 TWh: 0,04% van de mondiale opwekking. Ook de IEA (2002) verwacht van vernieuwbare bronnen (ondanks een sterke groei) in de komende decennia geen grote bijdrage aan de elektriciteitsproductie: 7% in 2030 voor alle 'non-hydro renewables' tezamen, waarvan mag worden aangenomen dat PV slechts een bescheiden fractie is. Bauquis (2003) komt voor dezelfde parameter zelfs niet verder dan 3% in 2050. Alleen in de beide scenario's van Shell (2001) komt het aandeel van 'non-hydro renewables' in de energievoorziening in 2050 (ruim) boven de 10% uit.

⁴⁵ Berekend op basis van IEA-cijfers (in prijzen en wisselkoersen van 2002).

Volgens het rapport van de PV-TRAC (zie paragraaf 5.4.1) zou PV in 2030 wereldwijd in 4% van de elektriciteitsproductie kunnen voorzien (European Commission, 2004a). De PV-TRAC bepleit de oprichting van een Europees PV Technology Platform om PV-gerelateerde initiatieven, programma's en beleid te stimuleren en te coördineren.

Wat Nederland betreft waren de verwachtingen van PV in het verleden niet erg hoog gespannen. In de eerste Energienota merkte toenmalig minister van Economische Zaken Lubbers op: 'Voor toepassing in ons elektriciteitsproductiesysteem komen zonnecellen bij de huidige stand van de techniek niet in aanmerking' (EZ, 1974: p. 159). In 1980 stelde het rapport 'Toekomstige Energiesituatie in Nederland' (VDEN, 1980) dat het onwaarschijnlijk leek dat PV in Nederland een belangrijke bijdrage tot de elektriciteitsvoorziening zou leveren. Volgens de Nationale Energieverkenningen 1987 (ESC, 1987) zou de bijdrage van PV aan de energievoorziening in 2010 verwaarloosbaar zijn: maximaal 10 MW opgesteld vermogen⁴⁶.

Aan het einde van de jaren tachtig vond een kentering plaats. De KWW-studie 'Duurzame energie, een toekomstverkenning' (Krekel e.a., 1987) bevatte een scenario waarbij in 2050 83 PJ PV-elektriciteit geproduceerd zou worden (ruim 20% van de totale elektriciteitsproductie in dat scenario). Alsema en Turkenburg (1988: p. 77) voorzagen een productie van ruim 20 TWh⁴⁷ (72 PJ) binnen 25 tot 40 jaar na het begin van grootschalige introductie (bij een voldoende lage kostprijs). In de Nota Energiebesparing van 1990 werd de verwachting uitgesproken dat PV in 2010 nog niet meer dan 2 PJ aan de Nederlandse energievoorziening zou kunnen bijdragen (minder dan 0,1%), maar daarna zou het 'in beginsel' de belangrijkste duurzame energie-optie kunnen worden (EZ, 1990). Een voor Economische Zaken uitgevoerde studie (Alsema en Van Brummelen, 1992) concludeerde dat er in technische zin een groot potentieel is voor PV in de Nederlandse energievoorziening. In een optimistisch scenario zou in 2020 8% van het Nederlandse elektriciteitsverbruik gedekt kunnen worden door PV-vermogen (maar in een laag scenario slechts 0,3%).

De Vervolgnota Energiebesparing (EZ, 1993) bevatte een programma om in 2010 uit te komen op zo'n 250 MW_p PV-vermogen, goed voor ongeveer 2 PJ uitgespaarde fossiele brandstof per jaar. In de Derde Energienota (EZ, 1996) werd de bijdrage van PV aan de Nederlandse energievoorziening in 2020 geraamd op 10 PJ (minder dan 0,5% van de totale primaire energievraag). Volgens berekeningen van het CE (Bergsma e.a., 1997) zou het Nederlandse PV-potentieel veel groter zijn: in 2010 30 TWh (ruim 100 PJ; een kwart van de elektriciteitsvraag) tegen een kostprijs van minder dan f 0,30 (€0,14) per kWh (bij optimistische veronderstellingen). De Nederlandse overheid blijft echter voorzichtig. In de EZ-studie 'Energie en Samenleving in 2050' (EZ, 2000) speelt PV in slechts één van de vier onderscheiden scenario's een substantiële rol.

Over de vooruitzichten voor verdere kostendaling en efficiëntieverbetering van PV is de literatuur over het algemeen optimistisch. In een studie voor Greenpeace (KPMG, 1999) werd, op basis van een Europees onderzoek, geconcludeerd dat alleen al de benutting van schaalvoordelen (in de productie van PV-panelen) de kostprijs (bij de huidige technologie) met 60 tot 80% zou kunnen doen dalen. Volgens Lysen (2003) kan de prijs van complete PV-

⁴⁶ Zoals figuur 5.5 laat zien, is de 10 MW geïnstalleerd vermogen al in 2000 gepasseerd.

systemen (nu €4 tot 8 per W_p , overeenkomend met 20 tot 80 eurocent per kWh) in 2010 gedaald zijn tot € à 3, en uiteindelijk verder dalen tot ongeveer €1 per W_p , zowel door schaalvergroting als door voortgaande R&D. Het ECN kwam in 1995 uit op productiekosten voor PV in 2020 van f 0,12 tot f 0,23 (€0,05 tot €0,10) per kWh (EZ, 1996). Lenstra (2000) is pessimistischer. Hij gaat ervan uit dat de kWh-prijs van PV-elektriciteit nog kan dalen tot f0,35 (€0,16) en denkt dat dit onvoldoende is om te kunnen concurreren met andere klimaatneutrale opties, zoals biomassa en aardgas met CO₂-opslag.

Zoals uit dit laatste voorbeeld al blijkt, is voor de toekomst van PV de vraag van belang wat de 'break even' prijs van PV-elektriciteit is, dat wil zeggen de prijs waarbij PV zonder subsidies of andere specifieke steun kan concurreren met conventionele elektriciteit. Poponi (2003) heeft break even prijzen berekend onder uiteenlopende veronderstellingen betreffende levensduur, discontovoet en bedrijfstijd. Bij een elektriciteitsprijs van \$0,05 per kWh (maatgevend voor de situatie waarin PV moet concurreren met conventionele middenlast-opwekking) komt hij uit op gemiddelde break even prijzen van \$0,88 per W_p voor complete PV-systemen en \$0,52 voor alleen de PV-modules. Bij een elektriciteitsprijs van \$0,15 per kWh (typerend voor gebouwgeïntegreerde toepassingen waarbij elektriciteitsoverschotten door de gebruiker aan het net teruggeleverd kunnen worden tegen eindgebruikersprijzen) bedraagt de gemiddelde break even prijs \$3,20 per W_p voor PV-systemen en \$1,92 voor PV-modules. Deze break-even prijzen zouden, gegeven een 'learning ratio' van 20% (zie paragraaf 5.4.1) en een gemiddelde jaarlijkse marktgroei van 30% in respectievelijk 2026 en 2011 bereikt kunnen zijn (bij een marktgroei van 15% wordt dat respectievelijk 2045 en 2017).

Hoe lang de groei van de marktpenetratie van PV-technologie kan doorgaan is onzeker. Poponi (2003) noemt een tweetal mogelijke beperkende factoren:

- het feit dat er, met het oog op de betrouwbaarheid van de levering, een maximum-aandeel van niet-continue energiebronnen (zoals zon en wind) is in de totale elektriciteitsvoorziening (geschat op 10 tot 30%);
- de kosten van materialen: de PV-industrie profiteert nu nog van 'goedkoop' silicium uit de microelektronica-industrie (zie paragraaf 5.4.1), maar als de PV-markt sterk gaat groeien zal deze bron niet groot genoeg meer zijn.

Verder moet rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat ook op fossiele brandstof gebaseerde elektriciteitsopwekking blijft profiteren van leereffecten, waardoor de benodigde 'break even' prijs van PV nog lager komt te liggen. Ook is van belang dat de kostprijs van PV niet alleen bepaald wordt door de zonnecellen zelf, maar voor een belangrijk deel ook door de overige systeemcomponenten (zoals omvormers), de zogeheten 'Balance of System'. Het is de vraag of het potentieel van kostendaling voor de 'Balance of System'-componenten even groot is als voor de PV-cellen.

Van der Zwaan en Rabl (2003) concluderen dat na 2020 het aandeel van PV in de energievoorziening wereldwijd aanzienlijk zou kunnen worden als gevolg van kostenreducties door leercurve-effecten. Tot die tijd zal PV nog gesteund moeten worden

⁴⁷ In de tekst van het rapport staat abusievelijk 20 GWh.

door beleidsmaatregelen. Die kunnen volgens de auteurs gedeeltelijk gerechtvaardigd worden door de noodzaak om de externe kosten van fossiele energie te internaliseren, al zou de kloof daarmee naar verwachting nog niet helemaal gedicht worden.

De vraag welke PV-technologie de toekomst heeft, is nu nog niet te beantwoorden. Wel is er een zekere consensus dat het een vorm van dunnelaag-PV zal zijn. Green (2000) verwacht dat uit deze groep van technologieën rond 2010 een winnaar naar voren zal komen. Lysen (2003) merkt op dat er sprake kan zijn van meerdere winnaars, afhankelijk van het toepassingsgebied.

5.4.3 Drijvende krachten en barrières

In deze paragraaf worden de belangrijkste factoren die van invloed zijn (geweest) op de ontwikkeling en toepassing van PV-technologie besproken. Daarbij wordt aangesloten bij de aspecten die in Tabel 2.1 zijn onderscheiden.

Diversiteit

De *bedrijven* die zich met PV bezig houden vertonen een aanzienlijke mate van variatie, zowel qua omvang (van kleine, gespecialiseerde PV-bedrijfjes tot multinationals) als qua bedrijfstak (micro-elektronica, olie-industrie, chemie).

De diversiteit aan *PV-technieken* vertoont een duidelijke toename. Hoewel op de markt voor PV de cellen op basis van monokristallijn silicium nog steeds domineren, zijn er binnen de PV-technologie diverse nieuwe technische opties in ontwikkeling (zie paragraaf 5.4.1). Deze zullen in onderlinge concurrentie moeten gaan uitmaken of er onder hen een of meer systemen zijn die zich op den duur ook qua kosten kunnen meten met gangbare vormen van elektriciteitsopwekking.

PV-technologie wordt ook gekenmerkt door een grote mate van diversiteit aan *toepassingsvormen* en -mogelijkheden. Dit kan een indicator zijn voor kansrijkheid.

Innovatie

Nieuwe *combinaties* en toepassingen van bestaande technieken hebben een belangrijke basis gevormd voor PV. Zo kan de opkomst en ontwikkeling van de PV-technologie niet los worden gezien van die van de halfgeleidertechnologie: zowel het idee om silicium te gebruiken als de mogelijkheid om aan (relatief) goedkoop monokristallijn silicium te komen zijn te danken geweest aan de halfgeleiderindustrie. Verder is het idee voor de ontwikkeling van de 'dunne-film-technologie' afkomstig van Elliot Berman, een chemicus die gewerkt had aan fotografische films voordat hij bij Esso in de PV terecht kwam (Perlin, 1999).

Serendipiteit heeft ook in de ontwikkeling van PV een rol gespeeld. Aanvankelijk werden zonnecellen gemaakt van seleen, maar het lukte niet om daarmee voldoende elektriciteit te produceren om praktisch bruikbaar te zijn. In 1953 deed Gerald Pearson, een natuurkundige bij de Bell laboratories, onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van silicium in de

elektronica en maakte daarbij onbedoeld een silicium-zonnecel.⁴⁸ Zijn collega's ontwikkelden deze verder tot cellen die bruikbaar waren in elektrische apparaten (Perlin, 1999).

Berman vond indertijd met zijn ideeën voor dunne-film-PV geen gehoor bij 'venture capitalists': "They weren't very venturesome and what I had wasn't a venture by their definition" (Perlin, 1999: p. 53). Grote oliemaatschappijen, op zoek naar alternatieven voor de energievoorziening op lange termijn, zijn in het geval van PV wel een belangrijke bron van *durfskapitaal* gebleken.

De ruimtevaart was de eerste belangrijke *nichemarkt* voor PV-cellen. Een belangrijke factor hierbij was natuurlijk het feit dat de gangbare energietechnologie weinig alternatieven in huis had voor de energievoorziening van bijvoorbeeld satellieten. In tegenstelling tot batterijen hebben PV-cellen een vrijwel onbegrensde levensduur. Daarnaast pleitten de permanente beschikbaarheid van zonlicht en de afwezigheid van weersinvloeden in het voordeel van PV-toepassingen in de ruimte. Niettemin moest er nog veel weerstand worden overwonnen om PV in deze rol geaccepteerd te krijgen en het is met name aan de gedrevenheid van één persoon (Hans Ziegler van het US Army Signal Corps) te danken dat dit uiteindelijk is gelukt (Perlin, 1999).

De tweede grote *nichemarkt* lag op zee. In Japan werd al begin jaren zestig PV gebruikt voor vuurtorens en lichtbakens. De Amerikaanse kustwacht keek de kat langer uit de boom alvorens haar lichtboeien met PV uit te rusten.⁴⁹ Maar in de Amerikaanse offshore-industrie namen PV-cellen al snel de plaats in van batterijen als energiebron voor de verlichting van olieplatforms. Ook ging PV voorzien in de elektriciteit voor kathodische bescherming van gas- en oliewinningsinstallaties in afgelegen gebieden op land. Volgens een woordvoerder van het bedrijf Automatic Power zou de commercialisering van PV zonder de olie-industrie minstens met tien jaar vertraagd zijn (Perlin, 1999).

Andere PV-toepassingen in afgelegen gebieden op land werden gevonden in de telecommunicatiesector en bij de elektriciteitsvoorziening op het platteland in ontwikkelingslanden.

Netgekoppelde toepassingen, met name op daken van gebouwen, begonnen aan het eind van de jaren tachtig van de grond te komen. Met name in Duitsland (het 'duizend-daken-programma') werd dit een succes. Ook in Nederland, waar het potentieel voor 'stand alone' systemen gering was (gezien de hoge dichtheid van het elektriciteitsnet) is PV in de gebouwde omgeving de voornaamste *nichemarkt* geworden. Door integratie van zonnepanelen in gevel- en dakbedekking kan bovendien op de kosten van andere bouwmaterialen worden bespaard.

In de *toekomstbeelden* van de toekomstige energievoorziening speelt PV, zoals we zagen, meestal slechts een bescheiden rol. Voor Nederland werd PV lange tijd überhaupt niet als een

⁴⁸ Volgens Riordan en Hodderson (1997, aangehaald in Green, 2000) was het echter Russel Ohl die in 1940 bij toeval de eerste silicium-zonnecel ontdekte.

⁴⁹ Ook in Nederland waren lichtboeien en -bakens de eerste *nichemarkt* van enige omvang (zie Alsema en Turkenburg, 1988: p. 76).

serieuze optie gezien. Het is denkbaar dat dit gebrek aan ‘wenkend perspectief’ een remmende factor bij PV-innovatie is (geweest).

Selectieomgeving

Fysische beperkingen lijken geen belangrijke rol te spelen als selectiefactor voor PV. Hoewel er wel theoretisch maximale omzettingsrendementen bestaan, worden deze in de praktijk (nog) niet benaderd. Bovendien worden de theoretisch haalbare rendementen hoger bij de nieuwere generaties PV-technologie (zie paragraaf 5.4.1).

De *technologische mogelijkheden* en met name de *kosten* vormen wel een hoge barrière voor een doorbraak van PV. Zoals in paragraaf 5.4.2 bleek zullen aanzienlijke kostendalingen door leercurve-effecten nodig zijn om PV concurrerend te maken.

Geografische factoren spelen uiteraard ook een grote rol. Daarbij gaat het niet alleen om de beschikbaarheid van zonlicht, maar ook om andere specifieke omstandigheden die in het voordeel van (off-grid) PV kunnen werken, zoals de afwezigheid van een elektriciteitsnet.

Perlin (1999) geeft een aardig voorbeeld van de rol van *marktmacht* in de pioniersjaren van PV-toepassingen. Automatic Power, de quasi-monopolistische leverancier van verlichtingssystemen voor olieplatforms in de Golf van Mexico, kocht het prototype van Berman's PV-navigatiehulpmiddelen op en deed er niets mee, omdat het bedrijf bang was de lucratieve handel in batterijen kwijt te raken. Uiteindelijk brak PV in de offshore-industrie toch door via een andere onderneming (Tideland).

De belangstelling van oliemaatschappijen voor PV werd door sommigen ook gezien als een poging om de technologie kapot te maken door de octrooien op te kopen en er verder niets mee te doen. Vermoedelijk is dat echter niet het geval geweest. In het begin van de jaren zeventig waren deze bedrijven naarstig op zoek naar alternatieven voor de schaarse en duurder wordende olie, en PV leek zo'n alternatief te zijn. Toen in de jaren '80 de olieprijzen weer gingen dalen, zijn sommige oliemaatschappijen uit de PV-business gestapt, terwijl andere (zoals BP en Shell) bleven.

Overheidsbeleid (ondermeer in de vorm van R&D-subsidies en financiële prikkels voor PV-toepassingen) heeft steeds een belangrijke rol gespeeld en zal, zolang de kostprijs van PV nog ruim boven die van conventioneel geproduceerde elektriciteit ligt, een onmisbare factor blijven.

Padafhankelijkheid en lock-in

Gezien de modulaire opbouw van PV-systemen impliceert een verdubbeling van het vermogen ook een verdubbeling van kosten. De toepassing ervan kan dan ook niet of nauwelijks profiteren van *schaalvoordelen*. PV is daardoor bij uitstek geschikt voor decentrale elektriciteitsvoorziening. In de *productie* van PV-systemen spelen schaalvoordelen wel een grote rol (zie paragraaf 5.4.2).

Co-evolutie

Grootschalige toepassing van PV in het energiesysteem heeft implicaties voor andere systeemcomponenten, doordat het aanbod van zonlicht onregelmatig is. Om vraag en aanbod van elektriciteit uit PV met elkaar in evenwicht te brengen, zal de energie dus opgeslagen moeten kunnen worden en wellicht ook getransporteerd (van zonnrijke gebieden naar gebieden met een hoge energievraag). Daarnaast kan gezocht worden naar mechanismen en prikkels om de vraag naar energie meer te laten samenvallen met het aanbod van zonlicht.

Begrensd rationaliteit

Een korte *tijdshorizon* is niet gunstig voor een kapitaalintensieve technologie als PV. De levensduur van een PV-installatie is lang, de onderhoudskosten zijn laag en er is uiteraard geen brandstof nodig. De kosten zijn dan ook sterk afhankelijk van de discontovoet of terugverdientijd die de investeerder hanteert.

5.4.4 Conclusies

De PV-technologie wordt gekenmerkt door een hoge mate van diversiteit, innovativiteit en uitwisseling met andere technologiegebieden. Dankzij de aanwezigheid van nichemarkten wordt de leercurve tamelijk snel doorlopen. De kosten blijven voorlopig echter nog te hoog om PV op grote schaal concurrerend te laten zijn met andere energievoorzieningsopties.

Het overheidsbeleid is tot nu toe zowel gericht geweest op R&D-steun als op marktstimulering. Het Nederlandse stimuleringsbeleid is terughoudender dan bijvoorbeeld het Duitse, en de recente nadruk op kosteneffectiviteit van energiesubsidies werkt in het nadeel van PV. Om 'de vaart erin te houden' bij het doorlopen van de leercurve zal meer steun voor PV-toepassing nodig zijn, bijvoorbeeld door het stimuleren van nichemarkten (woningbouw, ontwikkelingshulp) en in het overheidsaanschafbeleid. Daarnaast zal een stringent CO₂-beleid een noodzakelijke (maar geen voldoende) voorwaarde zijn om PV een aanzienlijk aandeel in de energievoorziening te laten veroveren.

5.5 Implicaties van de casestudie-bevindingen

Uit de casestudies die in dit hoofdstuk zijn besproken, kunnen enkele conclusies worden getrokken die wellicht ook opgaan voor andere gevallen waarbij het gaat om de implicaties van evolutionair-economische inzichten voor de ontwikkeling en toepassing van nieuwe (energie)technologie.

In de eerste plaats valt op dat het overheidsbeleid vooral gericht is (geweest) op het stimuleren van R(D)&D. Dit heeft bijgedragen tot de grote vooruitgang die er geboekt is bij de totstandkoming van betere, schonere en efficiëntere technieken. Echter, om te zorgen dat de ontwikkelde technologieën ook voortgang boeken bij het doorlopen van hun leercurve zal

het beleid zich (ook) meer moeten gaan richten op toepassing en diffusie. Immers, de onafhankelijke variabele van de leercurve is de cumulatieve productie of toepassing van de technologie, en die variabele moet exponentieel toenemen om ook een exponentiële daling van de kosten of prijs te realiseren. Bij de analyse van leercurves moet men overigens niet vergeten dat ook de 'traditionele' technologie nog steeds van leercurve-effecten kan profiteren. Met andere woorden, het 'einddoel' is niet een kostprijs die kan concurreren met de huidige prijs van de 'oude' technologie, maar met die van de (wellicht eveneens lagere) toekomstige prijs daarvan.

Stimulering van de markt is met name ook van belang om 'kip-ei-situaties' te doorbreken. Bedrijven en consumenten nemen vaak een afwachtende houding aan: ze investeren niet in nieuwe technologie omdat ze prijsdalingen en technische verbeteringen afwachten, maar die treden in onvoldoende mate op omdat er te weinig in de technologie geïnvesteerd wordt. Het doorbreken van deze patstelling kan op diverse manieren plaatsvinden, met name door het creëren van een gunstige selectieomgeving (bijvoorbeeld door nichemarkten tot stand te brengen of te stimuleren).

Vaak bestaat de angst dat het stimuleren van specifieke technologieën neerkomt op 'picking the winners' (waarmee men slechte ervaringen heeft en waarvan men vindt dat de markt dat beter kan dan de overheid). Echter, duidelijk moet gemaakt worden dat het vooral gaat om het breed houden van het speelveld, diversiteit bevorderen, lock-in vermijden en eerlijke kansen scheppen.

Een probleem voor het creëren van een gunstige selectieomgeving is dat de overheid juist bezig is zich steeds meer terug te trekken van terreinen waar ze nichemarkten zou kunnen creëren (zoals de energiesector, de woningbouw en het openbaar vervoer). Een heroverweging van de rol van de overheid in deze sectoren lijkt dan ook zinvol. Het gaat hierbij immers om sectoren waarin veelal sprake is van grote schaalvoordelen en langetermijninvesteringen, met de bijbehorende kansen op lock-in en suboptimale uitkomsten als alles aan de markt wordt overgelaten.

Een dilemma waarvoor de beleidsmaker zich geplaatst kan zien bij grootschalige technologische veranderingen is de vraag: wel of niet investeren in verbetering van bestaande technologieën en ontwikkeling van hybride technologieën? Enerzijds zou dat kunnen bijdragen aan 'lock-in' in het oude systeem; anderzijds leert de ervaring dat een hybride technologie juist een opstapje kan zijn naar een technologische doorbraak. Een definitieve uitweg uit dit dilemma valt op grond van de hier beschouwde cases niet te geven.

In paragraaf 2.4.3 werd gesteld dat toekomstbeelden (met tijdspaden) een nuttige functie kunnen vervullen als inspiratiebron. Bij de drie energietechnologieën die in de casestudies zijn behandeld ontbreekt het nog aan samenhangende en breed gedragen toekomstbeelden, al geven de twee recente EU-rapporten van de 'High Level Group' en de 'PV-TRAC' daartoe wel een aanzet (respectievelijk voor brandstofcellen en PV).

Verder kan gewezen worden op het belang van uitwisseling, samenwerking en kruisbestuiving. De casestudies bevestigen het beeld dat technische doorbraken vaak tot stand komen doordat inzichten uit een geheel andere bedrijfstak of ander vakgebied worden

toegepast. Een advies aan beleidsmakers zou daarom kunnen zijn: breng mensen bij elkaar uit sectoren die niets met elkaar te maken hebben, zodat ze elkaar op ideeën kunnen brengen.

Tabel 5.4 geeft een samenvattend overzicht van een aantal kenmerken van de drie beschouwde energietechnologieën, waaronder de evolutionair-economische aspecten die in Tabel 2.1 werden onderscheiden.

Tabel 5.4 Kenmerken van de drie energietechnologieën en het ten aanzien daarvan gevoerde beleid

	Brandstofcellen	Kernfusie	PV
Diversiteit	Groot (toepassingen; typen; brandstoffen)	Gering	Groot (toepassingen; typen)
Innovatie	Sterke <i>interactie</i> tussen verschillende sectoren (o.a. chemie, energiebedrijven, autofabrikanten). <i>Nichemarkten:</i> ruimtevaart, voertuigen	Expertise geconcentreerd binnen een klein, mondiaal wereldje; daarbinnen veel <i>samenwerking</i> , maar weinig externe interactie Geen <i>nichemarkten</i>	<i>Serendipiteit</i> en kruisbestuiving waren belangrijk in ontwikkeling (bijv.: dunne film-technologie). <i>Nichemarkten:</i> ruimtevaart; off-grid toepassingen
<i>Cumul. R&D in IEA-landen, 1974-98 (mld \$)</i>	<i>Onbekend</i>	26,8	5,2
Selectie- Omgeving	Liberalisering kan kansen bieden (decentralisatie). Milieubeleid belangrijk ('zero-emission' wetgeving)	Nog niet marktrijp. Levensvatbaarheid zal o.a. afhankelijk zijn van stringent CO ₂ -beleid	Marktmacht heeft een rol gespeeld; Overheidsbeleid (m.n. subsidies) belangrijke factor
Begrensde rationaliteit	Toepassing vergt breuk met bestaande routines; Imitatiegedrag in auto-industrie	Private investeerders niet geïnteresseerd i.v.m. lange tijdshorizon; Voortbouwen op bestaande routines niet mogelijk	Kapitaalintensieve technologie; lange tijdshorizon
Padafhankelijk- heid en lock-in	Schaalvoordelen bij toepassing beperkt: → goede inpasbaarheid in decentrale systemen. <i>Lock-in</i> in bestaande technologie (b.v. verbrandingsmotor) belangrijke barrière	sterke padafhankelijkheid; schaalvoordelen zeer belangrijk: → slechte inpasbaarheid in decentrale systemen	schaalvoordelen bij toepassing beperkt: → goede inpasbaarheid in decentrale systemen
Co-evolutie	Samenhang met andere componenten energiesysteem van belang (waaronder brandstofinfrastructuur)	Weinig uitwisseling met andere energie-technologieën; intern wel complementariteit (b.v. plasmafysica en materiaalkunde)	Implicaties voor andere componenten van energiesysteem (o.a. i.v.m. fluctuaties in aanbod zonlicht)

6 Conclusies

Economische principes spelen een belangrijke rol in de vormgeving van het milieubeleid in Nederland en elders. Daarbij domineert het criterium doelmatigheid. Dit is zinvol voor veel aspecten van het milieubeleid, maar toont zich minder geschikt voor beleid gericht op innovaties en transities (grootschalige systeemveranderingen). In dit rapport onderzoeken we of de invalshoek van de evolutionaire economie meer aangrijpingspunten biedt voor dergelijk beleid.

Uit de evolutionair-economische theorie is een aantal kernelementen te destilleren: diversiteit, innovatie, selectie, begrensde rationaliteit, padafhankelijkheid en lock-in, en co-evolutie. Deze elementen kunnen weer verder onderverdeeld worden (zie hoofdstuk 2, met name Tabel 2.1). Diversiteit is het centrale element, dat gekarakteriseerd wordt door drie dimensies: variatie, ongelijkheid en ongelijksoortigheid. Alle drie dimensies beïnvloeden de effectiviteit ofwel het succes van innovatie- en selectieprocessen. Vanuit het beleid zou specifiek aandacht kunnen worden gegeven aan elk van deze dimensies, voor een scala aan elementen, zoals technologie, product, strategie, institutie en ruimte. Deze elementen vormen het uitgangspunt voor het denken over een innovatiegericht milieubeleid.

De kernboodschap van een beleidsmatige toepassing van de evolutionaire economie luidt dat een gelijk speelveld in brede zin nodig is teneinde duurzame innovaties en transities te bewerkstelligen. In toevoeging op de traditionele invulling van vrije marktconcurrentie dient dit de volgende zaken te omvatten: (1) prijzen dienen externe kosten te reflecteren; (2) aantrekkelijke technologieën vanuit het perspectief van duurzaamheid die relatief laag op de leercurve staan dienen te worden gestimuleerd; (3) toenemende schaalvoordelen van een alternatief dienen waar nodig te worden gecorrigeerd om een vroegtijdige lock-in ervan te vermijden; en (4) de selectieomgeving dient zoveel mogelijk te worden gelijkgeschakeld.

Belangrijke innovaties en een transitie naar een duurzame ontwikkeling zijn onmogelijk zonder verspilling of doodlopende paden. Diversiteit op alle niveaus en in alle dimensies (processen, producten, organisaties, instituties, ruimtelijk) dient te worden gekoesterd. Fisher's theorema geeft een reden hiervoor: "The greater the genetic variability upon which selection for fitness may act, the greater the expected improvement in fitness". Een grotere mate van diversiteit ondersteunt tevens belangrijke innovaties, aangezien dan een groter aantal combinaties van bestaande concepten of technologieën mogelijk is. Tegen deze achtergrond is het bevorderen van de interactie tussen economische sectoren relevant, omdat aldus de kansen op creatieve innovaties door combinaties, uitwisseling, samenwerking en kruisbestuiving worden vergroot. Daarbij kunnen samenhangende en breed gedragen toekomstbeelden ten aanzien van bepaalde energietechnologieën fungeren als inspiratiebron en als bindend element tussen verschillende maatschappelijke spelers, waardoor ze creatieve innovaties kunnen bevorderen. Het is vanwege de positieve effecten van diversiteit op zowel innovatie als selectie onverstandig om een strakke planning en vroegtijdige keuze van winnaars na te streven in het transitiebeleid en aldus diversiteit sterk te verminderen. Beleid gericht op 'picking the winners' biedt doorgaans niet veel perspectief, omdat niet vooraf bekend is wie of wat de winnaars op lange termijn zijn. Het is daarom effectiever om het

speelveld breed te houden, diversiteit te bevorderen, lock-in te vermijden en gelijke kansen te scheppen.

Het is voorts cruciaal om een goede balans te vinden tussen doelmatigheid en diversiteit, ofwel de korte termijn kosten en lange termijn baten van diversificatie. Dit is echter niet eenvoudig en kan wegens fundamentele onzekerheid over innovatie en selectie-effecten dan ook niet worden beschouwd als een traditioneel kosten-baten afwegingsvraagstuk. Meer onderzoek is gewenst om dit probleem te verhelderen. Op een internationaal niveau is de balans tussen doelmatigheid en diversiteit vanwege het schaalniveau beter te realiseren. Dit pleit voor meer samenwerking en afstemming van beleid, innovatietrajecten en investeringen tussen verschillende landen.

De beoordeling van het Nederlandse energie-innovatiebeleid brengt tamelijk veel evolutionair-economische elementen naar voren. Sterk is met name de aandacht voor: demonstratie, innovaties, samenwerking, opleiding/scholing, openhouden van diversiteit en de ontwikkeling van toekomstbeelden. Veel van deze elementen hangen samen met de meer algemene ontwikkelingen in het innovatiebeleid, dat zich heeft ontwikkeld van een lineair model voor technologiesturing in de jaren zeventig via het clusterbeleid tot aan de regie van het hele innovatiesysteem nu. Deze toename in complexiteit komt het sterkst naar voren in het transitiebeleid. De rol van de overheid verandert hiermee eveneens, omdat een hiërarchische regeerstijl steeds meer plaats zal moeten maken voor een meer netwerkgerichte aanpak: de overheid verschuift van regent naar regisseur.

Het energie-innovatiebeleid is nu nog sterk gericht op de ontwikkeling van innovaties via R&D, maar minder op diffusie en toepassing. In dit opzicht zijn de meer systeemgerichte evolutionair-economische elementen nog niet allemaal even goed ingeburgerd in het beleid. Meer aandacht is met name nodig voor de aspecten: serendipiteit, nichemarkten, creëren van condities waardoor leveren van privaat durfkapitaal aantrekkelijk wordt. Ook de rol van de overheid als 'launching customer' verdient nog nadere uitwerking. Veel aandacht is er voor *techniek* en de zogenaamde 'harde kant' van technologische ontwikkeling, terwijl de andere aspecten (maatschappelijke inbedding, instituties) wat achter blijven. Dit is mogelijk wel uit te leggen door te onderkennen dat ook de overheid zelf in zekere mate beperkt rationeel is; de beleidsontwikkeling is daardoor bijziend voor het stimuleren van technologieën laag op de leercurve. Bijzonder veel aandacht is er voor het 'Europese gelijke speelveld': de vrije Europese markt bepaalt in hoge mate de speelruimte die de rijksoverheid zichzelf toelaat. Dit betekent in concreto dat industrieën, sectoren of technologieën die niet economisch kunnen concurreren op deze markt ook geen ondersteuning hoeven te verwachten. Een meer evolutionair-economische invalshoek zou meer nadruk leggen op de onderontwikkeling van bepaalde technologieën, op het gebrek aan beprijzing van externe effecten (milieudruk) bij 'oude' technologieën en op het stimuleren van een zo divers mogelijk spectrum aan technologieën op de lange termijn.

Het 'voorkomen' van lock-in lijkt in het huidige beleid vooral te worden bewerktstelligd door het 'uitstellen' van selectie, en niet door het bewust stimuleren van flexibele opties. Juist in het energiebeleid zou je zo'n discussie wel verwachten, bijvoorbeeld met betrekking tot grootschalige versus kleinschalige opwekking. Ook het aspect 'level playing field' of gelijk speelveld wordt vaak eenzijdig opgevat als het creëren van gelijke concurrentieverhoudingen

tussen producenten. Het speelveld tussen technologieën, die zich in verschillende fasen van de leercurve bevinden, speelt in de huidige discussie (nog) geen rol. Samenhangende en breed gedragen toekomstbeelden ten aanzien van bepaalde energietechnologieën zouden kunnen fungeren als inspiratiebron en als bindend element tussen verschillende maatschappelijke spelers, en aldus creatieve innovaties kunnen stimuleren.

Ook voor de ontwikkeling van een aantal specifieke technologieën zijn evolutionair-economische elementen te identificeren. *Brandstofcellen* kenmerken zich door een grote mate van diversiteit in bedrijven, technieken en mogelijke toepassingen. Nederland in het bijzonder en de Europese Unie in het algemeen richten zich voor deze technologie nog sterk op de R&D-fase. De leercurve tot en met de mogelijkheid voor commerciële toepassing is nog lang. De toepassing en diffusie van de technologie zullen nu een steeds grotere rol moeten gaan spelen. Het belang van nichemarkten, hybride toepassingen en de rol van de overheid als launching customer neemt dan ook sterk toe. De toepassing van brandstofcellen zal uiteindelijk wel een breuk vergen met bestaande routines, met name rond de verbrandingsmotor.

De weg naar commerciële toepassing is voor *kernfusie* nog bijzonder lang en het onderzoek is nog grotendeels fundamenteel van aard. Het bedrijfsleven is dan ook nog nauwelijks betrokken bij deze technologische ontwikkeling. Niettemin ontwikkelt de leercurve zich bijzonder snel. Omdat de schaalvoordelen enorm zijn, is decentrale, kleinschalige toepassing uitgesloten. De diversiteit aan technologieën en betrokkenen is klein. Het toekomstbeeld is niettemin zeer aantrekkelijk: een goedkope en nauwelijks vervuilende energiebron. Publieke investeringen in het onderzoek worden met name gerechtvaardigd door de kortere tijdshorizon van private investeerders.

Foto-voltaïsche cellen (PV) of zonnecellen staan tegenover kernfusie, in de zin dat het hier juist gaat om een zeer decentrale vorm van energieopwekking. De silicium-zonnecel is min of meer 'per ongeluk' uitgevonden in de elektronica-industrie (serendipiteit) en het idee voor een dunne-film-zonnecel komt voort uit de fotografie (kruisbestuiving). Nichemarkten voor PV hebben zich met name in de ruimtevaart ontwikkeld, maar ook bijvoorbeeld op zeer afgelegen plekken zoals voor lichtbakens op zee. PV kan aan het energienet gekoppeld worden, maar dat is niet noodzakelijk. De mogelijke toepassingen zijn dan ook groot, maar de investeringskosten eveneens, ondanks een snelle ontwikkeling van de leercurve. PV heeft in de toepassing weinig voordelen van schaalvergroting. In Nederland is het voordeel van PV door het dichte energienet beperkt; decentrale toepassingen blijven daardoor in nichemarkten zitten. Grootschalige toepassingen vergen een sterke breuk met het bestaande systeem van energievoorziening.

Tot slot is het goed om te realiseren dat de inherente doelloosheid van evolutie niet betekent dat de overheid niet kan of moet sturen. De overheid kan wel degelijk invloed uitoefenen op de evolutionaire ontwikkeling. Beleid op uitkomsten is echter moeilijk te voeren en beleid zal zich dus meer moeten richten op de beïnvloeding van processen van technologische ontwikkeling en de daarbij horende randvoorwaarden.

Literatuur

- Aghion, P., and P. Howitt (1998). *Endogenous Growth Theory*. The MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Alchian, A. (1950). Uncertainty, evolution and economic theory. In: *Journal of Political Economy* 58: 211-222.
- Alsema, E.A., en M. van Brummelen (1992). *Minder CO₂ door PV. Studie naar de maximaal haalbare energie-opwekking en CO₂-emissiereductie met behulp van zonnecelsystemen in Nederland tot 2020*. Ministerie van Economische Zaken, Beleidsstudie Energie 3. Den Haag.
- Alsema, E.A., en W. Turkenburg (1988). *Elektriciteit in Nederland met zonnecellen*. Publikatiereeks Milieubeheer (1), Ministerie VROM, maart 1988.
- Anon. (2004). Brandstofcel geen toekomst. *Stromen*, 13 februari 2004: p. 2
- Arthur, B. (1989). Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *Economic Journal* 99: 116-131.
- AWT (2003). *Netwerken met kennis, kennisabsorptie en kennisbenutting door bedrijven*. Adviesraad voor Wetenschap en Technologie (advies 56), Den Haag
- AWT (2004). *Tijd om te oogsten, vernieuwing in het innovatiebeleid*. Adviesraad voor Wetenschap en Technologie (advies 59), Den Haag
- Ayres, R.U. (1994). *Information, Entropy and Progress: Economics and Evolutionary Change*. AIP Press, American Institute of Physics, New York.
- Bäck, Th. (1996). *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*, Oxford University Press.
- Baumol, W.J., and W.E. Oates (1988). *The Theory of Environmental Policy* (2nd ed). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bauquis, P.-R. (2003). Reappraisal of energy supply-demand in 2050 shows big role for fossil fuels, nuclear but not for nonnuclear renewables. *Oil & Gas Journal* (February 17, 2003): 20-29.
- Becker, G.S. (1976). Altruism, egoism, and genetic fitness: economics and sociobiology. *Journal of Economic Literature* 14 (3): 817-826.
- Beek, A. van, M. Maris, P. Heidbuurt and J. Roersen (2003). *National Survey Report of PV Power Applications in The Netherlands*. International Energy Agency, Co-operative Programme on Photovoltaic Power Systems. BECO Group BV, Zwolle, May-June 2003.
- Bergh, J.C.J.M. van den (2004). Evolutionary thinking in environmental economics: retrospect and prospect. In: J. Foster and W. Hözl (eds.) *Applied Evolutionary Economics and Complex Systems*. Edward Elgar, Cheltenham: pp. 239-275.
- Bergh, J.C.J.M. van den, A. Ferrer-i-Carbonell and G. Munda (2000). Alternative models of individual behaviour and implications for environmental policy. *Ecological Economics* 32 (1): 43-61.
- Bergh, J.C.J.M. van den, and J.M. Gowdy (2000). Evolutionary theories in environmental and resource economics: approaches and applications. *Environmental and Resource Economics* 17: 37-57.
- Bergh, J.C.J.M. van den, and J.M. Gowdy (2003). The microfoundations of macroeconomics: an evolutionary perspective. *Cambridge Journal of Economics* 27 (1): 65-84.
- Bergh, J.C.J.M. van den, and S. Stagl (2003). Coevolution of economic behaviour and institutions: towards a theory of institutional change. *Journal of Evolutionary Economics* 13 (3): 289-317.
- Bergsma, G.C., S.A.H. Moorman, J. Verlinden en F.G.P. Corten (1997). *Het potentieel van PV op daken en gevels in Nederland*. CE (rapport 97.3789.002), Delft.

- Boschma, R.A., K. Frenken en J.G. Lambooy (2002). *Evolutionaire economie. Een inleiding*. Coutinho, Bussum.
- Boulding (1966). *The economics of the coming spaceship earth*. In: H. Jarret (ed.). *Environmental Quality in a Growing Economy*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Boulding, K.E. (1978). *Ecodynamics: A New Theory of Societal Evolution*. Sage Publications, Beverly Hills.
- Boulding, K.E. (1981). *Evolutionary Economics*. Sage Publications, Beverly Hills.
- Boyd, R., and P.J. Richerson (1985). *Culture and Evolutionary Process*. University of Chicago Press, Chicago.
- Braams, C.M. (1982). Kernfusie. In: C.D. Andriess en A. Heertje (red.), *Kernenergie in beweging, handboek bij vraagstukken over kernenergie* (pp. 134-141). Keesing Boeken, Amsterdam.
- Butter, F.A.G. den, en M.W. Hofkes (2004). *Technological transitions: a neo-classical viewpoint*. Unpublished mimeo, Institute for Environmental Studies, Free University, Amsterdam.
- Campbell, N.A. (1996). *Biology*. 4th edition. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Menlo Park, Ca.
- Christensen, H.C. (1997). *The Innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail*. Harvard Business School Press, Boston.
- Clery, D., en D. Normile (2004). ITER Compromise Deal Hinges on a Graceful Runner-Up. *Science* 303: p. 940.
- Comyns, A. (2004). *The Fuel Cells Industry Worldwide: A Market / Technology Report*. Materials Technology Publications, Watford (UK).
- Conlisk, J. (1989). An aggregate model of technical change. *Quarterly Journal of Economics* 104: 787-821.
- CPB, Rathenau Instituut, RIVM-MNP, RPB en SCP (2003). *Investeren in kennis, een maatschappelijk-economische beoordeling van de BSIK-projecten*. CPB, Den Haag.
- Criqui, P., and N. Kouvaritakis (2000). World energy projections to 2030. *International Journal of Global Energy Issues* 14 (1-4), pp. 116-136.
- Dennett, D. (1995). *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. Simon and Schuster, New York.
- Diamond, J. (1997). *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*, W. W. Norton, New York.
- Dietz, F.J., en H.R.J. Vollebergh (1999). Explaining instrument choice in environmental policies. In: J.C.J.M. van den Bergh (red.). *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Dosi, G., C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg and L. Soete (eds.) (1988). *Technical Change and Economic Theory*. Pinter Publishers, London.
- Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* 27: pp. 235-264.
- Durham, W.H. (1991). *Coevolution: Genes, Culture and Human Diversity*. Stanford University Press, Stanford.
- ECN (1999). *Brandstofcellen, op weg naar de toekomst*. In: *Energie Verslag Nederland 1998*. ECN, Petten.
- Edquist, C. (1997). *Systems of innovation: technologies, institutions and organizations*. Pinter, London
- Ehrlich, P.R., and P.H. Raven (1964). Butterflies and plants: a study in coevolution. *Evolution* 18: 568-608.
- Eldredge, N., and S.J. Gould (1972). Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism. In: Schopf, T.J.M.(ed.), *Models in Paleobiology* (pp. 82-115). Freeman Cooper, San Francisco.

- Epstein, C., and R. Axtell (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. MIT Press, Boston, Mass.
- ESC (1987). *Nationale Energie Verkenningen 1987*. Energie Studie Centrum (rapport ESC-42), Petten.
- European Commission (2003). *Hydrogen Energy and Fuel Cells, A vision of our future*. Summary Report. High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells.
- European Commission (2004a). *A Vision for Photovoltaic Technology for 2030 and Beyond*. Preliminary Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC) Presented at the conference 'Future Vision for PV: A Vision for PV Technology for 2030 and Beyond', Brussels (Belgium), 28 September 2004.
- European Commission (2004b). *Buying green! A handbook on environmental public procurement*. Commission staff working document, SEC (2004) 1050, Brussels.
- EZ (1974). *Energienota*. Tweede Kamer 1974-75 (13 122 nrs. 1-2), Den Haag.
- EZ (1979). *Nota Energiebeleid*. Tweede Kamer (15802, nrs. 1 en 2), Den Haag
- EZ (1990). *Nota Energiebesparing*. Tweede Kamer (21570, nrs. 1 en 2), Den Haag
- EZ (1993). *Vervolgnota Energiebesparing*. Tweede Kamer 1993-94 (23 561, nrs 1-2), Den Haag
- EZ (1995). *Kennis in beweging*. Tweede Kamer (Bijlage bij 24229, nr. 1), Den Haag
- EZ (1996). *Derde Energienota*. Tweede Kamer (24525, nrs. 1-2), Den Haag
- EZ (1997). *Duurzame energie in opmars*. Actieprogramma 1997-2000. Ministerie Economische Zaken, Den Haag
- EZ (1999a). *Industrie- en dienstenbeleid*. Tweede Kamer (26628, nr. 1), Den Haag.
- EZ (1999b). *Energierapport 1999*. Ministerie Economische Zaken (publicatie-nummer 13-B-65)/ Tweede Kamer (26898 no. 1), Den Haag.
- EZ (2000a). *De Kenniseconomie in Zicht, De Nederlandse invulling van de Lissabon Agenda voor 2001*. Tweede Kamer (27406, nr. 2), Den Haag.
- EZ (2000b). *Energie en samenleving in 2050, Nederland in wereldbeelden*. Ministerie Economische Zaken, Den Haag
- EZ (2001). *Nota Energie Onderzoek Strategie (EOS)*. Ministerie Economische Zaken (publicatienummer 01ME14)/ Tweede Kamer (28108, nr. 1), Den Haag
- EZ (2002). *Energierapport 2002, investeren in energie, keuzes voor de toekomst*. Tweede Kamer (28241, nr. 2), Den Haag
- EZ (2003a) *Rapport Implementatie EOS*. Ministerie Economische Zaken, Den Haag, februari 2003.
- EZ (2003b). *Innovatiebrief: In actie voor innovatie*. Nota 'De kenniseconomie in zicht'. Tweede Kamer (27406, nr. 4), Den Haag.
- EZ (2004a). *Innovatie in het Energiebeleid*. Energietransitie: stand van zaken en het vervolg. Ministerie Economische Zaken, Den Haag.
- EZ (2004b). *Industriebrief: Hart voor industrie*. Ministerie Economische Zaken, Den Haag.
- EZ en VROM (1991). *Technologie en milieu, technologie als schakel tussen ecologie en economie*. Ministeries Economische Zaken/Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Den Haag
- Faber, A., T. Rood, and J. Ros (2003). *Evaluation of early processes in system innovation, a pilot study on the transformation of Dutch agriculture and food chain to sustainability*. Paper presented at conference 'Governance for Industrial Transformation', Berlin (Germany), 5-6 December 2003
- Faber, A. en D. van Welie (2004). *Onderzoek voor duurzame ontwikkeling, Research & Development voor transitie*. RMNO-rapport V.04. Lemma, Utrecht
- Faber, M., and J.L.R. Proops (1990). *Evolution, Time, Production and the Environment*. Springer-Verlag, Heidelberg.

- Fagerberg, J. (1988) Why growth rates differ. In: G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg and L. Soete (eds.) (1988). *Technical Change and Economic Theory*. Pinter Publishers, London.
- Farla, J. (2000). *Physical indicators of energy efficiency*. Utrecht University (thesis), Utrecht
- Fast, J.D. (1980), *Energie uit atoomkernen*. Natuur en Techniek, Maastricht.
- Fehr, E. and S. Gächter (1998). Reciprocity and economics: the economic implications of homo reciprocans. *European Economic Review* 42 (3-5): 845-59.
- Fehr, E., and U. Fischbacher (2002). Why social preferences matter - the impact of non-selfish motives on competition, cooperation and incentives. *Economic Journal* 112: C1-C33.
- Feldman, M.W., and K.N. Laland (1996). Gene-culture coevolutionary theory. *TREE* 11: 453-457.
- Ferrer-i-Carbonell, A., and J.C.J.M. van den Bergh (2004). A micro-econometric analysis of determinants of unsustainable consumption in The Netherlands. *Environmental and Resource Economics* 27: 367-389.
- Fine, G., and J. Deegan (1996). Three principles of serendipity: insight, chance and discovery in qualitative research. *International Journal of Qualitative Studies in Education* 9 (4): 434-447.
- Fisher, R.A. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Clarendon, Oxford.
- Foss, N.J. (1993). Theories of the firm: contractual and competence perspectives. *Journal of Evolutionary Economics* 3: 127-144.
- Foster, J., and J.S. Metcalfe (2001). Modern economic perspectives: An overview. In: J. Foster and J.S. Metcalfe (eds.). *Frontiers of evolutionary economics; competition, self-organisation and innovation policy*. Edward Elgar, Cheltenham: pp. 1-16.
- Friedman, M. (1953). On the methodology of positive economics. In: M. Friedman, *Essays in Positive Economics*. University of Chicago Press, Chicago.
- Friedman, D. (1998a). On economic applications of evolutionary game theory. *Journal of Evolutionary Economics* 8 (1): 15-43.
- Friedman, D. (1998b). Evolutionary economics goes mainstream: A review of the theory of learning in games. *Journal of Evolutionary Economics* 8: 423-432.
- Galor, O., and O. Moav (2002). Natural selection and the origin of economic growth. *Quarterly Journal of Economics* 117: 1133-1192
- Geels, F.W. (2002a). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31(8/9): 1257-1274.
- Geels, F.W. (2002b). *Understanding the Dynamics of Technological Transitions: A co-evolutionary and socio-technical analysis*. PhD thesis, Twente University Press, Enschede.
- Geels, F.W. and W.A. Smit (2000). Failed technology futures: pitfalls and lessons from a historical survey. *Futures* 32: 867-885.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Gowdy, J. (1994). *Coevolutionary Economics: The Economy, Society and the Environment*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gowdy, J. (1999). Evolution, environment and economics. In: J.C.J.M. van den Bergh (ed.). *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Green, M.A. (2000). Photovoltaics: technology overview. *Energy Policy* 28: 989-998.
- Grosfeld, T., F. Nauta en J. Duveen (2004). *Strategische agenda Innovatieplatform*. Innovatieplatform, Den Haag.
- Gunderson, L.H., and C.S. Holling (2002). *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington D.C.

- Harmon, J. (2000), Experience Curves of Photovoltaic Technology. Interim Report IR-00-014, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg.
- Hilten, O. van, F.M.J.A. Diepstraten, D.J. Gielen en R.J. Oosterheert (1996). Energieonderzoek in Nederland. Beschrijving van inhoud, omvang en maatschappelijke aspecten, ten behoeve van de Verkenningcommissie Energieonderzoek. In : Verkenningcommissie Energieonderzoek (1996), Verkenning Energie-onderzoek, achtergrondstudies.
- Hirshleifer, J. (1977). Economics from a biological viewpoint. *Journal of Law and Economics* 20 (1): 1-52.
- Hodgson, G.M. (1993). *Economics and Evolution: Bringing Life Back Into Economics*. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hoed, R. van den (2004). Driving fuel cell vehicles, how established industries react to radical technologies. Thesis, TU Delft
- Hoeven, D. van der (2001). Een gedurfd bod. Nederland zet in op de brandstofcel. Beta Text, Bergen.
- Hoffmann, P. (2001). *Tomorrow's Energy. Hydrogen, fuel cells and the prospect for a cleaner planet*. MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Hofkes, M.W., and R. Gerlagh (2002). Escaping lock-in: the scope for a transition towards sustainable growth. Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Holland, J.H. (1998). *Emergence: From Chaos to Order*. Perseus Books, Cambridge (Mass.)
- Huizinga, F. en P. Broer (2004). Wage moderation and labour productivity. CPB (Discussion Paper no. 28), Den Haag.
- IBO (2002). Samenwerken en stroomlijnen: opties voor een effectief innovatiebeleid. Eindrapportage Interdepartementaal Beleidsonderzoek (EZ-02-311), Den Haag.
- IEA (2002). *World Energy Outlook 2002*. International Energy Agency, Paris.
- IEA (2003). *Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2002*. International Energy Agency (report IEA-PVPS T1-12: 2003), Paris.
- Iwai, K. (1984). Schumpeterian dynamics, part I: an evolutionary model of innovation and imitation. *Journal of Economic Behaviour and Organization* 5(2): 159-190.
- Junginger, M., S. Agterbosch, A. Faaij, and W. Turkenburg (2004). Renewable electricity in the Netherlands. *Energy Policy* 32, pp. 1053-1073.
- Kauffman, S.A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, Oxford.
- Kemp, R. (1997). *Environmental policy and Technical Change: A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Kemp, R., J. Schot and R. Hoogma (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology Analysis & Strategic Management* 10 (2): 175-195
- Kemp, R., and J. Rotmans (2004). Managing the transition to sustainable mobility. In: B. Elzen, F. Geels and K. Green (eds.). *System innovation and the transition to sustainability: theory, evidence and policy*. Edgar Elgar, Cheltenham.
- Kern, S. (2000). Dutch innovation policies for the networked economy: a new approach? TNO-STB paper. TNO, Delft.
- Kets, A. en G.J. Schaeffer (2004). Dutch energy R&D policy: is there a role for technology learning? pp. 45-53 in: ECN (2004). *Dutch energy policies from a European perspective, major developments in 2003*. ECN (P-04-001), Petten.
- Kleinknecht, A., K. van Montfort and E. Brouwer (2002). The non-trivial choice between innovation indicators. In: *Economic Innovations and New Technology* 11 (2): 109-121

- Knoppers, R., en G. Verbong (2001). PV in Nederland. In: Verbong, G., e.a., Een kwestie van lange adem: de geschiedenis van duurzame energie in Nederland. Æneas, Boxtel, p. 200-236.
- Koppert, P.C., A.A. Olsthoorn en O.J. Kuik (1988). Emissiereductie door schone technologie. Een verkenning van de mogelijkheden van 10 'schone' technologieën. Rapport nr. R-88/2, Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- KPMG (1999). Solar Energy: from perennial promise to competitive alternative. KPMG Bureau voor Economische Argumentatie, Hoofddorp.
- Krekel, N.R.A., P.A.M. Berdowski, en A.J. van Dieren (1987). Duurzame energie, een toekomstverkenning. Krekel Van der Woerd Wouterse, Rotterdam, juli 1987.
- Lako, P. (ed.) (2001). Long-Term Scenarios and the Role of Fusion Power. ECN (rapport C-01-053), Petten.
- Lenstra, W.J. (2000). Zonnecellen, droom en werkelijkheid. Economisch Statistische Berichten 85 (4250): 288-290.
- Levy, H., M. Levy and S. Solomon (2000). Microscopic Simulation of Financial Markets: From Investor Behavior to Phenomena. Academic Press, New York.
- LSEO (1975), Interimrapport van de Landelijke Stuurgroep Energie Onderzoek. Tweede Kamer, Den Haag (1974-75). 13 250, nrs. 1-2.
- Lumsden, C., and E.O. Wilson (1981). Genes, Mind and Culture. Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Lundvall, B-Å. (1992). National systems of innovation. Pinter, London.
- Lyons, K.P. (1996). EU energy policies of the mid-1990s. A Business Intelligence Report. EC Inform, April 1996.
- Lysen, E. (1977). Eindeloze energie. Alternatieven voor de samenleving. Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen.
- Lysen, E. (2003). Photovoltaics: an outlook for the 21st century. Renewable Energy World January-February 2003: 43-53.
- Maynard Smith, J. (1964). Group selection and kin selection. Nature 201: 1145-46.
- Maynard Smith, J. (1982). Evolution and the Theory of Games. Cambridge University Press, Cambridge
- Maynard Smith, J., and G.R. Price (1973). The logic of animal conflict. Nature 246: 15-18.
- Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens (1972). The limits to growth. Universe books, New York
- Menkveld, M. (2004). Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid, factsheets. ECN (rapport ECN-C--04-020), Petten.
- Mesner, S., and J. Gowdy (1999). Georgescu-Roegen's evolutionary economics. In: K. Mayumi and J. Gowdy (eds.). Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honour of Nicholas Georgescu-Roegen. Edward Elgar, Cheltenham.
- Metcalf, J. S. (1998). Evolutionary Economics and Creative Destruction (Graz Schumpeter Lectures, 1), Routledge, London.
- Mierlo, B. van (2002). Kiem van maatschappelijke verandering. Verspreiding van zonnecelsystemen in de woningbouw met behulp van pilotprojecten. Proefschrift UvA. Aksant, Amsterdam.
- Miketa, A., and L. Schrattenholzer (2004). Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes; first results. Energy Policy 32: 1679-1692
- Mokyr, J. (1990). The lever of the riches: technological creativity and economic progress. Oxford University Press, Oxford.

- Mulder, P., and J.C.J.M. van den Bergh (2001). Evolutionary economic theories of sustainable development. *Growth and Change* 32 (4): 110-134.
- Mulder, P., H.L.F. de Groot and M.W. Hofkes (2001). Economic growth and technological change: a comparison of insights from a neoclassical and an evolutionary perspective. *Technological Forecasting and Social Change* 68: 151-171.
- Munro, A. (1997). Economics and biological evolution. *Environmental and Resource Economics* 9: 429-449.
- Nelson, R., and S. Winter (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Nelson, R. (ed.) (1993). *National innovation systems – a comparative analysis*. Oxford University Press, New York/Oxford.
- Noailly, J., J.C.J.M. van den Bergh and C.A. Withagen (2003). Evolution of harvesting strategies: replicator and resource dynamics. *Journal of Evolutionary Economics* 13 (2): 183-200.
- Noailly, J. (2003). *Coevolutionary Modelling for Sustainable Development*. Thesis, Free University. Thela Publishers and Tinbergen Instituut, Amsterdam.
- Norgaard, R.B. (1984). Coevolutionary development potential. *Land Economics* 60: 160-173.
- Norgaard, R.B. (1994). *Development Betrayed: The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future*. Routledge, London and New York.
- Norton, B., R. Costanza and R.C. Bishop, 1998. The evolution of preferences. Why 'sovereign' preferences may not lead to sustainable policies and what to do about it. *Ecological Economics* 24: 193-211.
- NOWT (2003). *Wetenschaps- en technologie-indicatoren 2003*. Nederlands Observatorium van Wetenschap en Technologie (Min. OC&W, MERIT, Universiteit Leiden), Den Haag
- OC&W (2003). *Wetenschapsbudget 04*. Tweede Kamer (29338, nr. 1), Den Haag.
- Ofek, H. (2001). *Second Nature : Economic Origins of Human Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Opschoor, J.B., L. de Savornin Lohman and J.B. Vos (1994). *Managing the Environment: The Role of Economic Instruments*. OESO, Paris.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Payne, A., R. Duke, and R.H. Williams (2001). Accelerating residential PV Expansion: supply analysis for competitive electricity markets. *Energy Policy* 29: 787-800.
- Perlin, J. (1999). *From Space to Earth: The Story of Solar Electricity*. Aatec Publications, Ann Arbor.
- Poconi, D. (2003). Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology based on experience curves. *Solar Energy* 74: 331-340.
- Poppen, R.S. (2003). *Sociale netwerken voor gedreven technologie. Een studie op het gebied van fotovoltaïsche cellen*. Proefschrift, Universiteit Twente.
- Porter, M. (1990). *The competitive advantage of nations*. Free Press, New York.
- Porter, M., and C. van der Linde (1995). Green and competitive. *Harvard Business Review* 73: 120-134.
- Potts, J. (2000). *The New Evolutionary Microeconomics: Complexity, Competence, and Adaptive Behavior*. Cheltenham, Edward Elgar.
- PriceWaterhouseCoopers (2003). *2003 Fuel Cell Industry Survey. A Survey of 2002 Financial Results of North American Public Fuel Cell Companies*.
- Putman R.J., en S.D. Wratten (1984). *Principles of Ecology*. University of California Press, Berkeley.

- Quist, J. (2004). Present and past of technology and innovation policy. In: Reader 'Technology Policy' (Wm0914), Technische Universiteit, Delft.
- Raaij, W.F. van, 1988. The use of natural resources. In: W.F. van Raaij, G.M. van Veldhoven and K.E. Wärneryd (eds.). *Handbook of Economic Psychology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Rifkin, J. (2002). *The Hydrogen Economy. The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. Tarcher/Putnam, New York.
- Robson, A.J. (2001). The biological basis of economic behavior. *Journal of Economic Literature* 39: 11-33.
- Roe, E.M. (1996). Sustainable development and Girardian economics. *Ecological Economics* 16: 87-93.
- Roelandt, T., P. den Hertog, J. van Sinderen en B. Vollaard (1997). Cluster analysis and cluster policy in The Netherlands. Paper presented at OECD workshop on cluster analysis and cluster policy, Amsterdam.
- Rogner, H.H. (1998). Hydrogen Technologies and the Technology Learning Curve. *International Journal of Hydrogen Energy* 23 (9): 833-840.
- Rotmans, J., R. Kemp, M. van Asselt, F. Geels, G. Verbong, en K. Molendijk (2000). *Transities en transitie management. De casus van een emissiearme energievoorziening*. ICIS/MERIT, Universiteit Maastricht.
- Rotmans, J., R. Kemp, en M. van Asselt (2001). More evolution than revolution: transition management in public policy', *Foresight* 3(1): 15-31.
- Samuelson, L. (1997). *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*. The MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Sanders, G.A. (1972). *Energie op leven en dood*. Wetenschappelijke Uitgeverij, Amsterdam.
- Schaeffer, G.J. (1998). *Fuel Cells for the Future. A contribution to technology forecasting from a technology dynamics perspective*. Thesis. University Twente, Enschede
- Schlecht, L. (2003). Competition and alliances in fuel cell power train development. *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 717-723.
- Schumpeter, J.A. (1934). *The Theory of Economic Development*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Schumpeter, J.A. (1939). *Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process* (2 vols). McGraw-Hill, New York.
- Schumpeter, J.A. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*. Harper and Brothers Publishers, New York.
- SER (2003). *Interactie voor Innovatie. Advies 03/11*. Sociaal Economische Raad, Den Haag.
- Sethi, R., and E. Somanathan (1996). The evolution of social norms in common property resource use. *American Economic Review* 86 (4): 766-788.
- Shell (2001). *Energy Needs, Choices and Possibilities. Scenarios to 2050*. Shell International Ltd., London.
- Silverberg, G., G. Dosi, and L. Orsenigo (1988). Innovation, diversity and diffusion: a self-organization model. *Economic Journal* 98: 1032-1054.
- Smits, R. and S. Kuhlmann (2004). The rise of systemic instruments in innovation policy. *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol 1(1/2): 4-32
- Sober, E., and D. S. Wilson (1998). *Unto Others: The Evolution and Psychology of Unselfish Behavior*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Somit, A., and S. Peterson (1989). *The Dynamics of Evolution: The Punctuated Equilibrium Debate in the Natural and Social Sciences*. Cornell University Press, Ithaca, NY.

- Stiglitz, J.E. (1997). Reply to Daly (Forum on 'Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz'). *Ecological Economics* 22: 269-270.
- Stirling, A. (2004). Diverse designs, fostering technological diversity in innovation for sustainability. Paper presented at conference 'Innovation, Sustainability and Policy', Seon (Germany), 23-25 May 2004
- Strickberger, M.W. (1996). *Evolution*. 2nd ed. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Mass.
- TNO (1975). Waterstof als energiedrager. Toekomstige mogelijkheden in Nederland. Nijverheidsorganisatie TNO, Den Haag.
- Tokimatsu, K., J. Fujino, S. Konishi, Y. Ogawa en K. Yamaji (2003). Role of nuclear fusion in future energy systems and the environment under future uncertainties. *Energy Policy* 31: 775-797.
- Tsuchiya, H., en O. Kobayashi (2002). Fuel Cell Cost Study by Learning Curve. Paper Submitted to Annual Meeting of the International Energy Workshop (EMF/IIASA), 18-20 June 2002 at Stanford University, USA.
- Tullock, G. (1979). Sociobiology and economics, *Atlantic Economic Journal* 220S: 1-10.
- Tweede Kamer (2004). Nota 'De kenniseconomie in zicht': Voortgangsbrief van de Minister-President. Tweede Kamer (27406 nr. 26), Den Haag
- V DEN (1980). Toekomstige Energiesituatie in Nederland. Vereniging van Directeuren van Elektriciteitsbedrijven in Nederland, Arnhem.
- Veblen, T. (1898). Why is economics not an evolutionary science? *Quarterly Journal of Economics* 12(4): 373-397
- Velthuisen, J.W. (1995). Determinants of investment in energy conservation. Proefschrift, Rijksuniversiteit Groningen en SEO (Stichting voor Economisch Onderzoek), Universiteit van Amsterdam.
- Voermans, F. (2004). Nedstack halveert prijs brandstofcel elk jaar; Olieconcerns remmen introductie waterstof af. *Utilities* mei 2004, p. 12-15.
- VROM (1990). Nota Klimaatverandering. Tweede Kamer (22232 nrs. 1 en 2), Den Haag
- VROM (1999). Uitvoeringsnota Klimaatbeleid. Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Den Haag
- VROM (2001). Een wereld en een wil, werken aan duurzaamheid – Nationaal Milieubeleidsplan 4. Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Den Haag.
- VROM (2002). Evaluatienota Klimaatbeleid, De voortgang van het Nederlandse klimaatbeleid: een evaluatie bij het ijkmoment 2002. Tweede Kamer (28240 no. 2), Den Haag
- VROM-Raad (2002). Milieu en economie: ontkoppeling door innovatie. VROM-Raad (advies 036), Den Haag.
- Weibull, J.W. (1995). *Evolutionary Game Theory*. The MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Wilson, E.O. (1998). *Consilience*. Alfred Knopf, New York.
- Winter, S.G. (1964). Economic 'natural selection' and the theory of the firm. *Yale Economic Essays* 4: 225-72.
- Wit, P. de (2004). De derde generatie zonnecel uitrollen. *Shell Venster* (maart/april): 26-29.
- Witt, U. (ed.) (1993). *Evolutionary Economics*. The International Library of Critical Writings in Economics (Vol. 25). Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Brookfield, US.
- Zwaan, B. van der, and A. Rabl (2003). Prospects for PV: a learning curve analysis. *Solar Energy* 74: 19-31.

Lijst van kernbegrippen

Adaptatie: Aanpassing door herhaalde selectie van individuen of elementen in een intern diverse populatie die relatief goed zijn aangepast aan hun (*selectie*)omgeving. De aanpassing is feitelijk een cumulatie van innovatie- en selectieprocessen in het verleden. Zie ook *selectie*.

Balans: Zie *diversiteit*.

Begrensd rationaliteit: Individuen en organisaties (groepen) optimaliseren niet consistent een vaste nutsfunctie; in plaats daarvan gedragen zij zich volgens aangepaste of geselecteerde *routines*, zij imiteren anderen en hanteren een beperkte tijdshorizon.

Co-evolutie: Een begrip dat voortkomt uit de synthese van ecologie en evolutionaire biologie. Het duidt een veranderingsproces aan waarbij variatie in één deelsysteem in sterke mate wordt beïnvloed door *selectie* vanuit een ander (of meerdere) deelsystemen. Het begrip wordt toegepast op puur biologische systemen (interactie tussen soorten), maar ook op terugkoppelingen tussen biologisch-genetische en culturele systemen en tussen ecologische en economische systemen. Zie ook *combinatie*.

Combinatie (of recombinatie): Een belangrijke bron van *innovatie*. Complementaire elementen (technologie en/of organisatie) zijn de basis, en kunnen via *co-evolutie* in samenhang veranderen. Kruisbestuiving kan een belangrijke oorzaak zijn van innovatieve combinaties, waarbij samenwerking een zinvolle strategie is. Zie ook *co-evolutie*.

Diversiteit: Een meerdimensionaal begrip dat variatie, ongelijkheid en gelijksoortigheid omvat. Variatie duidt het aantal verschillende technieken, processen, producten, organisaties, instituties of strategieën in een populatie van elementen aan. Ongelijkheid heeft betrekking op de mate waarin een of enkele elementen qua omvang of voorkomen al dan niet domineren in een *populatie*. Ongelijksoortigheid geeft de mate van verschil tussen elementen in een populatie van agenten, strategieën, producten of technologieën. Zie ook *populatie*.

Fitness: Een maat voor success in de zin van overleven en mate van reproductie (inclusief geïmiteerd worden).

Innovatie: Processen die *diversiteit* vermeerderen. Deze kunnen de vorm hebben van kleine, graduele verbeteringen (mutaties) of majeure, discrete veranderingen ((re)combinaties). Zie ook *combinatie*, *isolatie* en *serendipiteit*.

Insluiting (of 'lock-in'): Een situatie waaruit men vanwege toenemende schaalopbrengsten niet of zeer moeilijk kan weggelopen. Zie ook *padafhankelijkheid* en *toenemende schaalopbrengsten*.

Isolatie: Een belangrijk mechanisme van *innovatie*. Het kan zowel ruimtelijk als sociaal-economisch worden opgevat. *Nichemarkten* zijn een voorbeeld van economische isolatie.

Level playing field (of gelijk speelveld): Een toestand waarbij partijen op gelijke en eerlijke voorwaarden kunnen concurreren. Vanuit een evolutionair economisch perspectief dient dit meer te omvatten dan een vrije markt (afwezigheid van een imperfecte markt). Drie additionele kenmerken zijn van belang. Allereerst dienen prijzen alle sociale, private plus externe, kosten te reflecteren. Voorts dienen *toenemende schaalvoordelen* die het voordeel geven aan één boven een andere technologie te worden geneutraliseerd. En ten slotte dienen projecten die zich nog vroeg op de leercurve bevinden relatief veel steun te krijgen zodat ze een serieuze concurrentie kunnen bieden voor technologieën die al langer aandacht krijgen en zich verder op de leercurve bevinden.

Lock-in: Zie *insluiting*.

Mutatie: Een kleine verandering die ofwel willekeurig is ofwel ontstaat als gevolg van leren (met name 'learning by doing').

Nichemarkt: Een situatie waarbij een nieuw product of nieuwe technologie voor specifieke groepen gebruikers door bepaalde omstandigheden (bijvoorbeeld geen aansluiting op een netwerk; afwijkende preferenties; hoge inkomens) al in een vroeg stadium aantrekkelijk is, ondanks een relatief hoge prijs. Tevens kan het een beschermde markt ten gevolge van subsidies of regulering aanduiden, waarbij een nieuw product of nieuwe technologie kan profiteren van schaalvoordelen en leereffecten. Zie ook *isolatie*.

Ongelijksoortigheid: Zie *diversiteit*.

Overdraagbaarheid: Zie *transmissie*.

Padafhankelijkheid: Een combinatie van beginvoorwaarden, toevallige gebeurtenissen en *toenemende schaalopbrengsten* levert een historisch pad op dat tot een onomkeerbare ontwikkeling en mogelijk tot een *insluiting* ('lock-in') van een bepaald systeem (technologie, organisatiestructuur, instituties, etc.) kan leiden. *Toenemende schaalopbrengsten* spelen een cruciale rol bij concurrentie tussen alternatieve technologieën. Wie door toeval een groter marktaandeel krijgt dan concurrenten heeft een voordeel indien er sprake is van *toenemende schaalopbrengsten*, en kan relatief snel groeien ten koste van concurrenten. De paden naar een eindsituatie (evenwicht) worden dan relevant, vandaar dat men spreekt van padafhankelijkheid. Zie ook *insluiting*.

Populatie: Een groep van nauw verwante of gelijksoortige elementen die onder invloed staan van vergelijkbare innovatiemechanismen en dezelfde *selectieomgeving*. De elementen kunnen in meerdere of mindere mate van elkaar verschillen. De evolutionaire economie hanteert geen representatieve agenten maar populaties met interne *diversiteit* aan kenmerken. Zie ook *diversiteit*.

Recombinatie: Zie *combinatie*.

Routine: (Organisatie) routines verwijzen naar de manier waarop ondernemingen functioneren en beslissingen worden genomen. Een routine is de complexe synthese van vaardigheden van werknemers en hun onderlinge relaties die de vorm aannemen van communicatie en samenwerking. Een routine kan worden gezien als het equivalent van het gen in de biologische evolutie.

Selectie: Processen die bestaande *diversiteit* reduceren. De *selectieomgeving* is hiervoor verantwoordelijk. Zie ook *adaptatie* en *selectieomgeving*.

Selectieomgeving: Het totaal van factoren die selectiedruk uitoefenen op een *populatie*. Dit omvat fysische, technologische, geografische, bedrijfsinterne, marktgerelateerde, institutionele en publieke regulerende factoren. Economische selectiefactoren omvatten onder andere concurrentie, overname en fusie, beïnvloeding van reputatie, overheidsregulering, financieringseisen door banken. Zie ook *selectie*.

Serendipiteit: door een combinatie van toeval, intelligentie en kennis (of expertise) zaken ontdekken waar niet bewust naar gezocht werd.

Toenemende schaalopbrengsten: Bij toenemende schaal van productie en verkoop nemen de gemiddelde baten (per eenheid verkocht product) toe of de gemiddelde kosten af. Dit kan zijn oorzaak hebben aan de aanbod- of vraagzijde. Aan de aanbodzijde zijn schaalvoordelen in productie, leereffecten, technische complementariteiten en netwerkexternaliteiten van belang. Aan de vraagzijde gaat het om 'learning-by-using', imitatie, (ook) netwerkexternaliteiten, en informatiele effecten (als een product meer is gekocht dan is het ook bekender bij potentiële kopers). Zie ook *lock-in* en *padafhankelijkheid*.

Transmissie en bestendigheid: Replicatie geschiedt door reproductie of kopiëren (imitatie). Dit maakt cumulatieve veranderingsprocessen mogelijk.

Zelf-organisatie: Een proces waarbij interacties tussen elementen of agenten op een bepaald (micro)niveau tot spontane structuur en organisatie op een hoger (macro)niveau leiden.