



Universiteit
Leiden
The Netherlands

On the emergence of the energy transition

Kraan, O.D.E.

Citation

Kraan, O. D. E. (2019, April 25). *On the emergence of the energy transition*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/71807>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/71807>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:

<http://hdl.handle.net/1887/71807>

Author: Kraan, O.D.E.

Title: On the emergence of the energy transition

Issue Date: 2019-04-25



9

Samenvatting

9.1 Onderzoekscontext, focus en aanpak

Dit proefschrift bevat een aantal verschillende benaderingen om inzicht te geven in de zich ontwikkelende energietransitie; intellectuele kaders zijn beschreven, mogelijke paden zijn gesuggereerd en bevindingen uit simulatiemodellen zijn gepresenteerd. In dit hoofdstuk wordt een korte samenvatting gegeven van meer dan vier jaar van mijn onderzoek naar de zich ontwikkelende energietransitie. Bovendien bevat dit hoofdstuk een reflectie op dit onderzoek en worden aanbevelingen voor beleidsmakers en bedrijfsvertegenwoordigers gegeven.

9.1.1 Onderzoekscontext en focus

Klimaatverandering is een van de grootste uitdagingen voor de mensheid in haar huidige vorm. Aangezien het energiesysteem de grootste bijdrage levert aan de uitstoot van broeikasgassen door het gebruik van fossiele brandstoffen, zal de samenleving moeten werken aan een transformatie van het energiesysteem; een energietransitie. Deze transitie zal moeten voortkomen uit de interactie tussen sociale actoren en hun drijfveren, de economie, technologieën en het ecosysteem. Dit maakt de transitie een complex probleem en niet alleen een technische, maar ook een intellectuele uitdaging. Tegen deze achtergrond heeft dit proefschrift de vraag onderzocht:

Hoe beïnvloeden individuele drijfveren en de interacties tussen actoren het pad en het tempo van de zich ontwikkelende energietransitie?

We kunnen niet verwachten deze vraag in zijn volledige vorm te kunnen beantwoorden in deze dissertatie. Deze vraag heeft wel de richting van ons onderzoek bepaald en de resultaten hebben inzicht gegeven in verschillende aspecten van deze vraag.

Het simuleren van interacterende actoren als computer-entiteiten, “agenten”, geeft ons de middelen om de dynamiek van interacties tussen actoren te verkennen. De toepassing van een relatief nieuwe modelleringsmethode, “agent-based modelling” (of agent-gebaseerde modellering), waarmee deze agenten kunnen worden gesimuleerd, biedt scenario ontwikkelaars een additionele methode voor het quantificeren van scenarios van de energietransitie. Agent-gebaseerde modellering geeft de mogelijkheid om *verhalenvertellers* te verbinden met *modelleerders*.

Inzichten verkregen door het simuleren van realistisch actor-gedrag hebben inzicht gegeven in de dynamiek tussen individuele motieven, prikkels en collectieve actie. Modelresultaten hebben nieuwe inzichten opgeleverd die kunnen worden gebruikt om actuele en mogelijke toekomstige ontwikkelingen rondom de energietransitie in perspectief te plaatsen. De gegenereerde inzichten kunnen worden

Hoofdstuk 9

Tabel 9.1 – Onderzoeksvragen per hoofdstuk. Rechter kolom geeft de gebruikte onderzoeksmethode aan.

Hoofdstuk	Onderzoeksvraag	Methode
Hoofdstuk 2	Gezien de aard van klimaat verandering en de emergente energie transitie, wat zijn relevante intellectuele denkkaders waarmee de dynamiek tussen individuele drijfveren en collectieve actie kan worden beschreven?	Intellectuele denkkaders
Hoofdstuk 3	Welke verhaallijnen kunnen worden onderscheiden om de mogelijke paden van de energie transitie te beschrijven in de scenario ruimte opgespannen door individuele drijfveren en collectieve actie?	Verhaallijnen & systeem quantificatie
Hoofdstuk 4	Gezien deze paden en de implicaties voor beleid, hoe beïnvloedt de energie transitie de energie metriek waarmee de transitie wordt gemonitord?	Literatuur analyse
Hoofdstuk 5	Hoe kunnen sociale elementen rondom de energie transitie worden geconceptualiseerd en hoe beïnvloeden ze de snelheid van de energietransitie?	ABM
Hoofdstuk 6	Hoe kunnen we investeerders in de elektriciteitsmarkt simuleren en wat is het effect van hun niet-perfect rationele gedrag op de emergence elektriciteitsmix?	ABM
Hoofdstuk 7	Zullen geliberaliseerde elektriciteitsmarkten met sterke CO ₂ -beprijzing leiden tot een volledig gedecarboniseerde elektriciteitsmix en hoe kan deze markt verbeterd worden dit doel gehaald wordt?	ABM

gebruikt ter ondersteuning van strategische beslissingen door publieke en private actoren en om te anticiperen op de gevolgen van hun (toekomstige) beslissingen.

9.1.2 Onderzoeksaanpak

Gezien de complexe aard van het probleem van klimaatverandering moest onze onderzoeksbenadering verschillende aspecten bestrijken: i) de omvang en aard van het probleem van de klimaatverandering (met betrekking tot tijd en ruimte), ii) het faciliteren van dialoog met belanghebbenden, iii) het aanpakken van de uitdagingen van agent-gebaseerde modellering en iv) de kloof overbruggen tussen verhalenvertellers en modelleerders, tussen wetenschappers en politici en tussen wetenschappers en bedrijfsvertegenwoordigers. Dit heeft geleid tot onze algemene onderzoeksaanpak die zich richtte op het vinden van een minimale weergave van de relevante systeemelementen met een minimum aan veronderstellingen die recht

deed aan de complexiteit van het probleem.

Proberen te begrijpen hoe de energietransitie zich zal ontwikkelen, brengt ons naar de grens van de wetenschap omdat de onzekerheden en belangen groot zijn, keuzes gemaakt moeten worden en culturele waarden in het geding zijn. In dat licht kan onze onderzoeksbenadering worden gezien als een voorbeeld van postnormale wetenschap. Dit heeft ons een perspectief gegeven waarmee we de meerwaarde van agent-gebaseerde modellering konden verkennen.

Ons onderzoek heeft geleid tot verschillende conclusies en aanbevelingen die hieronder zullen worden besproken. Deze samenvatting eindigt met een reflectie op het onderzoeksproces en de bevindingen.

9.2 Conclusies

Conclusies van ons onderzoek werden gegenereerd in onderzoeksprojecten die verschillende aspecten van onze onderzoeksvraag exploreerde. Gepresenteerde modellen en analyses zijn gebaseerd op de in Hoofdstuk 2 gepresenteerde intellectuele kaders. Deze verschillende intellectuele kaders hebben de basis gevormd voor de conceptualisering van het actorgedrag in de agent-gebaseerde modellen. Perspectieven vanuit de economie, de psychologie en de ecologie gaven achtergrondinformatie over de dynamiek tussen individuele drijfveren en collectieve actie.

Omdat de atmosfeer wordt gedeeld door ons allen is gebleken dat het “common pool resource dilemma” een relevante beschrijving geeft van het dilemma van actoren in de energie transitie; het dilemma tussen individuele drijfveren en collectieve actie. Dit dilemma is in het geval van klimaatverandering vooral uitdagend vanwege de volgende drie aspecten; de intergenerationele tijdschaal, de wereldwijde geografische schaal en de onvoorspelbaarheid van de gevolgen van klimaatverandering en de zich ontwikkelende energie transitie. Inzichten uit de psychologie en sociologie hebben verschillende elementen laten zien die het menselijk gedrag onderscheiden van de veronderstellingen van de neoklassieke economie; persoonlijke vorming, wereldbeelden en begrensd rationeel gedrag leidden tot beslissingsstructuren die in verschillende simulatiemodellen zijn gebruikt.

De in de verschillende onderzoeksprojecten gegenereerde inzichten, gerangschikt per hoofdstuk, zullen respectievelijk worden besproken.

Hoofdstuk 3: Optimistische veronderstellingen over de technologische ontwikkeling van Solar Fuels maken een nieuw scenario mogelijk over hoe de vraag naar brandstoffen kan worden voorzien zonder additionele broeikasgas emissies. Tegelijkertijd blijft dit een risicovolle gok. Twee

energietransitie scenarios geven ons een nieuw perspectief op de mogelijke paden van de energietransitie: *All Renewable* en *Balancing Act* laten zien welke mogelijkheden de samenleving heeft om klimaatverandering aan te pakken en om aan de stijgende energievraag te blijven voldoen. Beide verhaallijnen gaan uit van het idee dat de energietransitie vandaag de dag wordt gedreven door verbeterde energie-efficiëntie, de verdere uitbouw van elektrische, hernieuwbare energiebronnen en sectorgewijze electrificering. Deze ontwikkelingen zullen echter tegen grenzen aanlopen omdat er sectoren zijn die moeilijk te elektrificeren zijn (denk aan de luchtvaart, scheepvaart, zwaar wegvervoer en hoge temperatuur processtechnologie). Dit zal leiden tot een residuele vraag naar op koolstofgebaseerde brandstoffen. De vraag naar deze brandstoffen kan emissie-loos worden voldaan door de resulterende emissies af te vangen of de resterende emissies in evenwicht te brengen met negatieve emissies. Een andere manier zou zijn een nieuw type, op hernieuwbare energie gebaseerde brandstoffen, zogenaamde “Solar Fuels”, te produceren.

In dit hoofdstuk wordt besproken wat er nodig zou zijn om deze scenarios bewaarheid te laten worden. In *Balancing Act* beschrijft een scenario waarin de wereld de collectieve actieproblemen overwint. Dit zou leiden tot grootschalige toepassing van (bio-energie) koolstofafvang en -opslag en de uitrol van grote nieuwe distributie- en transmissieinfrastructuren. *All Renewable* beschrijft daarentegen een scenario waarin wordt gegokt op technologie ontwikkeling dat uiteindelijk zou moeten leiden tot de ontwikkeling en productie van zonnebrandstoffen. Deze emissieneutrale koolwaterstofbrandstoffen zouden moeten worden geproduceerd door uit de lucht geabstraheerde CO₂ te synthetiseren met waterstof. Dit kan mogelijk gemaakt door gebruik te maken van hernieuwbare elektriciteit, waterelektrolyse (productie van waterstof), CO₂ activering van de uit de lucht geabstraheerde CO₂. Als optimistische veronderstellingen over technologieontwikkeling werkelijkheid worden, kunnen deze emissieneutrale brandstoffen betaalbaar worden (tegen een prijs van 200 \$ /bbl) wat zou kunnen leiden tot grootschalige marktgestuurde inzet.

Het feit dat individuele (commerciële) drijfveren de ontwikkeling van solar fuels zouden kunnen stimuleren, differentieert *All Renewables* van *Balancing Act* waarvoor meer betrokkenheid van de overheid vereist is om de collectieve actieproblemen te overwinnen.

Hoofdstuk 4: Nu energie afkomstig van hernieuwbare en niet-brandbare bronnen een steeds belangrijker deel van de energiemix wordt, wordt de precieze betekenis van belangrijke energie metriek, Totale Primaire Energie en Elektriciteitsproductiecapaciteit, steeds onduidelijker en mogelijk misleidend. De ontwikkeling van modellen voor de energietransitie vereist

diepgaand inzicht in energie-metrick, de bouwstenen van beleidsdoelen en energiescenario's. De afgelopen decennia zijn fossiele, brandbare energie bronnen met een eenvoudig te bepalen primaire energie equivalent, de dominante energiebron in de energiemix geweest. De voortgaande decarbonisatie heeft er echter toe geleid dat energie afkomstig van hernieuwbare en niet-brandbare bronnen een groter deel van de energie mix beslaat. Hierdoor wordt er meer energie geproduceerd uit bronnen met een ruime totale beschikbaarheid, maar een beperkte instantane beschikbaarheid (wind en zon).

Dit hoofdstuk heeft laten zien dat de aanhoudende elektrificatie van het energiesysteem in combinatie met de decarbonisatie van het elektriciteitssysteem ertoe heeft geleid dat de huidige energie-metrick niet meer representatief is. Dit heeft invloed op belangrijke energie-metrick: Totale primaire energie en bijbehorende indicatoren Energie-efficiëntie en Energie-intensiteit, en Elektriciteitsproductiecapaciteit.

De primaire-energie-equivalent voor niet-brandbare energiebronnen zoals wind en zon wordt niet consequent gedefinieerd in energie modellen en scenario's. De resulterende verschillende statistische representaties van hun primaire energie-equivalent resulteert in onduidelijkheid. Evenzo heeft intermitterende hernieuwbare energieopwekking verschillende capaciteitsfactoren die interpretatie en sturing op elektriciteitsproductiecapaciteit ambivalent maken. Dit maakt dat deze metriecken niet-representatief, moeilijk te interpreteren en uiteindelijk misleidend worden. Dit is problematisch omdat deze energie-metrick klimaatbeleid en investeringsbeslissingen stuurt op basis van statistische artefacten, in plaats van een feitelijke weergave van het energiesysteem.

Om deze problemen te verhelpen, wordt modelleerders en energie scenario ontwikkelaars aangeraden om expliciet en transparant te zijn over de toegepaste statistische methodes om het primaire energie-equivalent voor niet-brandbare energiebronnen te berekenen en mogelijke consequenties van de gebruikte aanpak te benadrukken. Hierdoor kunnen conclusies op basis van statistische artefacten worden voorkomen. Een verdere aanbeveling bestaat de suggestie om te focussen op energie-*verbruik* en dus op de energie-metrick Totale Energie Verbruik omdat deze energie-metrick vrij is van de besproken ambiguïteit. Met betrekking tot de productiecapaciteit voor elektriciteit wordt de aanbeveling gedaan om deze cijfers in perspectief te plaatsen door ze te begeleiden met de verwachte capaciteitsfactor (waarmee de verwachte electriciteits opwekking kan worden berekend) of de grote van de gemoeide investering.

Hoofdstuk 5: De maatschappelijke dynamiek rond klimaatverandering en de energietransitie geeft aanleiding tot het simuleren van de energietransitie als een potentiële kritische transitie. Met de toepassing van

op agenten gebaseerde modellering kan hun invloed op het tempo van de energietransitie worden onderzocht.

Kritische transities zijn snelle en sterke systeemveranderingen veroorzaakt door relatief kleine veranderingen in externe omstandigheden. In dit hoofdstuk wordt dit concept toegepast op de energietransitie om te onderzoeken hoe de sociale dynamiek rond het energiesysteem het tempo van de transitie beïnvloedt. We hebben het concept geïntegreerd in een agent-gebaseerd model en verschillende sociale aspecten van de emergente energie transitie onderzocht. De invloed van leiders, de heterogeniteit van actoren en het effect van netwerken die lokale gemeenschappen vormen zijn onderzocht.

De twee belangrijkste bevindingen zijn; i) het belang van lokale gemeenschappen en ii) leiders kunnen zowel de energietransitie stimuleren als ontmoedigen; een bevinding die bestaande literatuur over kritische overgangen nuanceert. Een analyse van de sterke en zwakke aspecten van de gekozen aanpak heeft geleid tot een reflectie op het gebruik van conceptuele modellen. Deze modellen bieden een nuttig hulpmiddel om de dynamiek tussen individuele prikkels en collectief gedrag te analyseren, deze dynamiek in de juiste context te plaatsen en een dieper begrip mogelijk te maken.

Hoofdstuk 6: Effectief beleid om het elektriciteitsnet te decarboniseren, vereist het ontwerpen en evalueren van dit beleid op basis van het realistische gedrag van actoren.

De transitie van het elektriciteitssysteem zal cruciaal zijn voor de transitie van het energiesysteem als geheel. In dit hoofdstuk wordt de invloed van het ontwerp van de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt op de uiteindelijke elektriciteitsmix geanalyseerd door het realistische gedrag van investeerders in deze markt te simuleren.

Dit hoofdstuk heeft laten zien dat het simuleren van het “realistisch gedrag” van agenten helpt bij het ontwerpen en evalueren van beleid met een specifiek (niet economisch) doel, in dit geval decarbonisatie van het elektriciteitssysteem. Het simuleren van investeerders in het elektriciteitssysteem met agent-gebaseerde modellen biedt een extra hulpmiddel voor dit beleidsontwikkelingsproces. Het geeft beleidsmakers de kans om het mogelijk effect van hun beleid te analyseren op basis van simulaties van het realistische gedrag van agenten.

Hoofdstuk 7: Volledig geliberaliseerde elektriciteitsmarkten zullen niet voldoen aan volledige decarbonisatie doelstellingen, zelfs niet met sterke CO₂-beprijzing

De volledige decarbonisatie van het elektriciteitssysteem vereist een grotere flexibiliteit om het toenemend aandeel van variabele elektriciteitsopwekking zoals als elektriciteit afgeleid van wind en zonnestraling te kunnen accommoderen. Door het gedrag van investeerders te simuleren en voort

te bouwen op de bevindingen uit Hoofdstuk 6, laat dit hoofdstuk zien dat de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt, zelfs met sterkte CO₂-beprijzing, niet zal leiden tot een volledige hernieuwbaar, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem in de tweede helft van de eeuw.

Met behulp van simulatie modellen hebben we laten zien dat het ontwerp van de elektriciteitsmarkt als als zogenaamde "energy-only"markt (i.e. een markt waarin enkel daadwerkelijk geleverde energie wordt vergoed) investeerders niet zal stimuleren om te investeren in de vereiste mix van flexibiliteit en hernieuwbare elektriciteitsproductie. We hebben aangetoond dat onder een CO₂-scenario van 200 €/tCO₂ (en zelfs oplopend tot 400 €/tCO₂), deze markten onvoldoende stabiele investeringssignalen geven aan investeerders om te investeren in een duurzaam elektriciteitssysteem. Mogelijke alternatieven voor deze volledig geliberaliseerde markten, waarin de capaciteitsvereiste van het systeem is geïnstitutionaliseerd via capaciteitsbeloningsmechanismen, zijn onderzocht. We concluderen dat een systeem waarin de beschikbare elektriciteitsproductie-capaciteit beloond wordt (in plaats van geproduceerde elektriciteit) een geloofwaardige oplossingsrichting biedt.

9.3 Aanbevelingen voor beleidsmakers

Onderzoek gepresenteerd in dit proefschrift heeft verschillende implicaties voor beleidsontwikkeling. Verschillende beleidsaanbevelingen worden gedaan:

Ten eerste moeten beleidsmakers zich bewust zijn van de aard van het probleem van de klimaatverandering. Het probleem van de klimaatverandering is een "common pool resource" dilemma dat vooral uitdagend is omdat de gevolgen van klimaatverandering onvoorspelbaar zijn over tijd- (intergenerationeel) en ruimte- (wereldwijd) dimensies. Omdat de belangen en onzekerheden groot zijn maakt dat het bestuderen van de ontwikkeling van de energietransitie een voorbeeld van postnormale wetenschap. In dit perspectief op de wetenschap is het een illusie te denken dat wetenschappers de waarheid in pacht hebben om beleidsbepalers mee te kunnen inlichten. Het feit dat wetenschappers geen definitief antwoord kunnen geven aan beleidsmakers, maakt dat deze beslissingen de facto politieke beslissingen zijn (waarvoor politici niet mogen schrikken). Om deze beslissingen zo goed mogelijk te maken, kunnen verschillende perspectieven worden ingebouwd in beleidsdiscussies. In dit proefschrift wordt agent-gebaseerde modellering gepresenteerd als een extra hulpmiddel voor scenario- en beleidsontwikkeling als aanvulling op inzichten uit andere methodieken.

Beleidsmakers moeten een evenwicht vinden tussen de meest efficiënte, kostenoptimale marktontwerpstructuur en een marktstructuur die gericht is op het bereiken van een specifiek resultaat. In het geval van klimaatverandering is

dit niet alleen bijvoorbeeld kostenminimalisatie op basis van rationele agenten, maar moet gerelateerd zijn aan de totale CO₂-uitstoot en het realistische gedrag van de actor. Daarom moeten beleidsmakers gebruik maken van simulaties van realistisch actorgedrag om de uitkomst van specifieke beleidsmaatregelen te evalueren. Dit betekent dat beleidsmakers zich, in plaats van te veel te vertrouwen op modellen die uitgaan van perfecte informatie, perfecte rationaliteit, homogene actoren en focussen op de laagste (systeem) kosten, zich meer moeten richten op modellen die realistisch gedrag van agenten expliciet incorporeren. Dit proefschrift laat zien dat het omarmen van deze complexiteiten van de energietransities een ander en rijker perspectief biedt op de mogelijke ontwikkelingstrajecten van het energiesysteem.

Ons onderzoeksperspectief heeft de volgende specifieke aanbevelingen voor beleidsontwikkeling:

CO₂-neutrale brandstoffen Hoewel het aandeel van elektriciteit in de energiemix aanzienlijk zal stijgen (van de huidige 20% tot ongeveer 60%), zal de vraag naar op koolstof gebaseerde brandstoffen blijven bestaan. Het gebruikelijke verhaal van de belangrijkste scenario ontwikkelaars (zoals het IPCC) is afhankelijk van door de overheid opgelegde grootschalige koolstofafvang en -opslag, vaak in combinatie van biomassa. Door de integratie van verschillende opkomende technologieën zou echter een CO₂ neutrale brandstof kunnen worden geproduceerd waarvan de productie commercieel aantrekkelijk zou kunnen worden. Die zou kunnen leiden tot marktgedreven productie van CO₂ neutrale brandstoffen.

Gezien deze twee mogelijke scenarios voor de energietransitie, overheid of markt-gedreven, zou het voor beleidsontwikkelaars verstandig zijn ook de marktontwikkeling van de productie van solar fuels te stimuleren. (Hoofdstuk 3).

Energie-metriek Aangezien de algemene doelstelling van klimaatbeleid is om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, moeten beleidsdoelen worden uitgedrukt in energie-metriek die deze doelstelling ondersteunen. Bovendien moeten beleidsmakers zich bewust zijn van de verschillende boekhoudkundige kwesties rond belangrijke energiestatistiek en beleidsdoelstellingen voorkomen die zijn gebaseerd op statistische artefacten. (Hoofdstuk 4).

Sociale dynamiek en het tempo van de energietransitie Beleidsmakers moeten zich ervan bewust zijn dat actoren in de echte wereld niet perfect rationeel zijn en mogelijk anders reageren op beleidsmaatregelen dan rationele, geïdealiseerde actoren zouden doen. De sociale dynamiek van actoren beïnvloedt

beleidsresultaten en daarom zou moet beleid kunnen worden ontwikkeld dat rekening houdt met deze inzichten. Bovendien kunnen deze inzichten worden gebruikt in beleid, bekend onder de term *nudging*. (Hoofdstuk 5).

Elektriciteitsmarktontwerp Elektriciteitsmarkten moeten volledig gedecarboniseerd om internationaal overeengekomen doelen om klimaatverandering tegen te gaan te halen. Om deze volledige decarbonisatie te faciliteren met behoud van betaalbaarheid en betrouwbaarheid van het elektriciteitssysteem, zullen beleidsmakers twee taken hebben. Ten eerste moeten zij hun aandacht verleggen van de verbetering van markten ontworpen als *energy-only* markten naar de ontwikkeling van geschikte capaciteitsbeloningsmechanismen. Dit mechanisme zou investeerders de juiste prikkels kunnen geven om te investeren in de combinatie van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en flexibilisering van het elektriciteitssysteem om elektriciteits van variabele productie technologieën zoals uit zon en wind, te kunnen absorberen. Ten tweede moeten flexibiliteitsmarkten, waarin opslagbedrijven kunnen betalen voor een overschot aan hernieuwbare elektriciteitsopwekking, worden gefaciliteerd. Dit zou investeerders de motivatie kunnen geven om overtollige hernieuwbare energie te genereren die op andere momenten kan worden opgeslagen. (Hoofdstuk 6 en 7).

9.4 Aanbevelingen voor zakelijk besluitvorming

Onderzoek gepresenteerd in dit proefschrift heeft geresulteerd in verschillende aanbevelingen ter verbetering van zakelijke besluitvorming:

Ondersteun van strategische besluitvorming met modelontwikkeling Modelontwikkeling zou een essentiële rol moeten spelen binnen het besluitvormingsproces van bedrijven. Hoewel het gemakkelijk is om modellen en hun uitkomsten te bekritisieren omdat ze altijd slechts een deel van de werkelijkheid weerspiegelen, dwingt modelontwikkeling als onderdeel van strategische besluitvorming de belanghebbenden ertoe zich in te zetten voor een structurele aanpak en veronderstellingen en resultaten kritisch te evalueren.

Wees betrokken bij het modelontwikkelingsproces Net als beleidsmakers bevinden zakelijke besluitvormers zich bij tijd en wijle in situaties waarin de belangen groot zijn, culturele waarden verschillen, en beslissingen dringend zijn. In die gevallen is het al te eenvoudig om het besluitvormingsproces uit te besteden aan een modelleerteam. Onze ervaring heeft geleerd dat de inzichten uit modelstudies vaak worden gegenereerd in het modelontwikkelingsproces. Om de meeste waarde uit deze modelstudies te halen, is het daarom voor zakelijke

besluitvormers belangrijk om niet enkel te wachten op de resultaten maar om actief deel te nemen aan dit modelleringsproces.

Creëer een omgeving die transdisciplinaire kennisuitwisseling mogelijk maakt

Uit ervaringen uit deze dissertatie blijkt dat agent-gebaseerde modellering in het algemeen, en onze modelleringsaanpak in het bijzonder, buitengewoon geschikt is om de kloof tussen modelmakers en belanghebbenden te overbruggen: agent-gebaseerde modellering biedt een natuurlijke manier om na te denken over actoren, hun interacties en de resulterende dynamiek van het systeem. Een aanpak die gericht is een minimale weergave van deze actoren en focust op de fundamentele dynamiek maakt betrokkenheid van belanghebbende, transparantie, reproduceerbaarheid en traceerbaarheid van model resultaten mogelijk.

Gebruik agent-gebaseerde modellering om strategische besluitvorming te ondersteunen

Veel modellen die worden gebruikt in de dagelijkse bedrijfsvoering zijn optimalisatiemodellen; denk aan supply chain-optimalisatie, logistieke optimalisatie, operationele optimalisatie, enz. Bij strategische besluitvorming gaat het echter vaak om het ontwikkelen van een strategisch plan om een bepaald doel te bereiken in een zakelijke omgeving waarin de onzekerheden groot zijn. Deze onzekerheden worden vaak veroorzaakt door menselijke reflexiviteit; mijn handelen heeft invloed op anderen waarop ik mij weer kan/moet aanpassen. Agent-gebaseerde modellering is bijzonder geschikt om de interactie tussen actoren in een commerciële omgeving te simuleren en strategische keuzes te evalueren.

Gebruik agent-gebaseerde modelling als additionele methode voor scenario-ontwikkeling

Veel bedrijven maken scenario's om strategische beslissingen te ondersteunen. Shell heeft bijvoorbeeld een lange geschiedenis in scenario-ontwikkeling. Binnen dit scenario-denken kunnen scenario-ontwikkelaars zich eenvoudig verliezen in technologische en economische ontwikkelingen; leercurves, empirisch gevalideerde relaties tussen belangrijke factoren, etc. Agent-gebaseerde modellering geeft deze scenario-ontwikkelaars een hulpmiddel om verhalen van het gedrag van actoren, hun interactie en hun emergente collectieve gedrag te onderzoeken en te quantificeren.

9.5 Reflectie

9.5.1 Het modelleren van de energie transitie

Omdat menselijke beslissingen complex zijn, zijn modellen die dit besluitvormingsproces (in het energiedomein) proberen te simuleren, onderhevig aan grote onzekerheden. Het simuleren van een transitie vereist inherent het simuleren van agent-gedrag dat anders is dan de empirisch gevalideerde historische besluitvormingsprocessen uit het verleden. Simulatiemethoden zoals agent-gebaseerde modellering zorgen er daardoor voor dat modelmakers voortdurende zoeken naar plausibel, geloofwaardig agent-gedrag.

De modelconceptualisering van het (onzekere) gedrag van actoren kan leiden tot uitkomsten die de begin-assumpties direct weerspiegelen. Conventionele modellen elimineren deze onzekerheid echter door te vertrouwen op rationele agenten. Vertrouwen op rationele agenten die in werkelijkheid rationeel begrensd zijn, kan een gevoel van zekerheid creëren dat illusoir is.

Dit aspect ben ik tegengekomen in een project waarbij ik consumenten modelleerde die konden kiezen tussen mitigatie en aanpassing aan klimaatverandering op basis van dynamische kostenverwachting van mitigatie- en aanpassingsinspanningen [431]. Deze modelleringsoefening bracht precies dit probleem aan het licht; eenvoudige quantificering van een verhaal leidt soms tot resultaten die direct de veronderstellingen weerspiegelen die in het model zijn opgenomen. Dit kan echter nog steeds waarde hebben als illustratie van een bepaald verhaal. Dit kan discussies tussen belanghebbenden over aannames en dynamieken mogelijk maken en daardoor toch nuttig zijn.

In de projecten beschreven in Hoofdstuk 6 en 7 van dit proefschrift werden actoren gekozen met een plausibele motivatie maar die heterogeen en niet perfect rationeel zijn; investeerders in het energiesysteem. De aannames die we moesten maken om hun besluitvormingsproces plausibel te simuleren konden relatief eenvoudig blijven, in de meest elementaire vorm zullen investeerders een commerciële motivatie hebben. Resultaten van deze modellen hebben interessante aspecten ontwikkelende elektriciteitsmarkt naar voren gebracht (die worden beschreven in Hoofdstuk 6 en 7).

Het onderzoeksproject dat beschreven is in Hoofdstuk 5 leidde ons tot meer fundamentele epistemologische vragen over de waarde van de toepassing van agent gebaseerde modellering op de energietransitie. Het resulteerde in de karakterisering van onze benadering als post-normale wetenschap zoals uitvoerig beschreven in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 5. Het benadrukte ook het belang van de juiste motivatie voor modelleer-studies: Men zou moeten modelleren om inzicht te verkrijgen in plaats om preciese getallen te verkrijgen. Dit weerspiegelt het

perspectief op modellering als een middel om een duidelijke en expliciete redenering te vinden.

Om agent-gebaseerde modellering te kunnen waarderen is het een vereiste om bescheiden te zijn over de eis om aan waarheidsvinding te doen. Deze uitdaging is even uitdagend voor conventionele modelleringsmethoden en heeft betrekking op modelstudies in het algemeen; “Alle modellen zijn fout, sommige zijn nuttig” [432]. Dit benadrukt dat de waarde van modelleren in het algemeen het vaakst ligt in de inzichten die het creëert die vaak ontstaan in het model-ontwikkelingsproces.

We hebben aangetoond dat agent-gebaseerde modellering een essentiële rol kan spelen om nieuwe perspectieven te bieden op de manier waarop maatschappelijke actoren het probleem van klimaatverandering kunnen en moeten aanpakken. Die rol kan worden samengevat in de volgende drie aspecten:

1. **Gequantificerende verhaallijnen van actorgedrag bieden hulpmiddelen om de communicatie tussen onderzoekers en belanghebbenden te verbeteren.** Met de toepassing van agent-gebaseerde modellering kan een verhaallijn worden geïllustreerd en gestructureerd. Op deze manier kunnen aannames en uitkomsten worden besproken met een verschillende belanghebbenden, zelfs zonder direct *nieuw* inzicht te krijgen uit de resultaten van het model zelf.
2. **Quantificering via conceptualisatie en simulaties biedt de mogelijkheid om het gedrag van actoren op een gestructureerde manier te analyseren.** Agent-gebaseerde modellering dwingt onderzoekers na te denken over actorinteracties en ze te structureren in model-conceptualisaties. Dit alleen kan inzichten genereren. Dynamiek die voortkomt uit deze agentgedragingen kan verder worden onderzocht en geanalyseerd om aanvullende inzichten te genereren. Vice versa kan agent-gedrag verder worden geanalyseerd in relatie tot de zich ontwikkelende dynamiek.
3. **Quantificering maakt het gebruik van rekenkracht van computers mogelijk waarmee emergent gedrag in complexe systemen kan worden bestudeerd.** Simulering van het gedrag van actoren in computermodellen vergroot de mogelijkheden om de uitkomsten van hun complexe interacties te berekenen.

9.5.2 De zich ontwikkelende energietransitie

Naast de inzichten over de waarde van modellering en specifiek de waarde van agent-gebaseerde modellering, heeft meer dan vier jaar onderzoek naar de zich ontwikkelende energietransitie een aantal additionele inzichten gebracht.

Een inclusieve energietransitie Gezien de aard van klimaatverandering, het complexe en common pool resource-karakter, zal deze transitie een inclusief karakter moeten hebben. Inclusief betekent hier dat alle actoren en alle sectoren betrokken moeten zijn bij deze transitie. Niet één energieverbruikende sector kan buiten beschouwing worden gelaten bij het aanpakken van de klimaatverandering, alle sectoren zullen moeten bijdragen om in de komende decennia tot nulnulemissies te komen. Dit betekent dat bijvoorbeeld luchtvaart, die tot nu toe vaak buiten beschouwing worden gelaten vanwege het internationale karakter en de beperkte technologische mogelijkheden, extra aandacht nodig zal hebben. Het betekent ook dat we geen enkele energiedrager mogen negeren. Hoewel er vaak veel aandacht is voor de elektriciteitssector, voorziet deze sector momenteel slechts een vijfde van onze energievraag. Het brandstof-gedeelte van de energiesector mag daarom niet worden vergeten.

Inclusief betekent ook dat alle landen, met name de grote contribuanten, aan boord moeten zijn. Tot dusverre is de internationale onderhandelingsarchitectuur van de Verenigde Naties, het UNFCCC, onze beste hoop om verdere internationale overeenstemming te bereiken om de klimaatverandering te beperken. Hoewel dergelijke onderhandelingen, unilateraal of op nationaal niveau tussen verschillende belanghebbenden (zoals het Nederlandse *Energie Akkoord*) soms slechts ogenschijnlijk trage vooruitgang boeken, is de energietransitie zo'n brede, alomvattende systeemverandering, dat ze nodig is voor een geslaagde energietransitie. Inclusief betekent echter niet dat individuele actoren, zijnde landen, bedrijven of individuen op anderen moeten wachten. Er zijn tal van individuele, economische, strategische, morele en ethische redenen om het energiesysteem te transformeren. Daarom hebben we dappere politici nodig die niet wegschrikken voor de facto politieke beslissingen over de toekomst van het energiesysteem.

Het balanceren van inspanningen Actoren in deze energietransitie moeten hun inspanningen in evenwicht houden met de huidige en toekomstige problemen. De Verenigde Naties hebben nu 17 Duurzame Ontwikkelingsdoelen [433] geformuleerd, wat betekent dat dit geen voor de hand liggende taak is. Om zo'n balans te bereiken, is het gemakkelijk om afgeleid te worden door trendy, modieuze kwesties zoals de circulaire economie. In het andere uiterste richt men zich op klimaatverandering en vergeet men de groeiende energievraag van een groeiende wereldbevolking. Beslissers moeten hun oog op de bal houden en zich bewust zijn van de overkoepelende impact die klimaatverandering heeft op onze samenleving, terwijl ze rekening houdt met de huidige behoeften van de wereldbevolking. Soms kunnen inspanningen op onderwerpen zoals het verlagen van het geluidsniveau in de buurt van luchthavens of het beperken van luchtvervuiling een tweesnijdend

zwaard zijn dat ook de klimaatverandering beperkt. Maar besluitvormers moeten zich er altijd van bewust zijn dat hun beslissing effect heeft op het juiste probleem.

Neem je eigen verantwoordelijkheid Actoren (individueen, politici, bedrijven) kunnen gemakkelijk betraapt worden op het wijzen van anderen op hun verantwoordelijkheid om verdere stappen te nemen om het energiesysteem te veranderen. Consumenten wijzen naar bedrijven, bedrijven wijzen naar hun aandeelhouders (vaak pensioenfondsen) die wijzen op hun verplichtingen jegens hun pensioengerechtigden wat ons weer terug brengt naar het begin. Hetzelfde geldt voor door burgers gekozen politici. Het punt is dat al deze actoren hun verantwoordelijkheid hebben. Een belangrijk en leidend beginsel dat is verwoord door Mahatma Gandhi is nog steeds waar: “je moet zelf de verandering zijn, die je in de wereld wilt zien”.

