

# Systemintegratie

Het fundament onder een  
succesvolle energietransitie



# Voorwoord

Om klimaatverandering een halt toe te roepen is een transformatie van onze energievoorziening nodig. Dit is een zeer ingrijpende veelomvattende wereldwijde uitdaging, energie is namelijk verweven met talloze maatschappelijke functies, met de manier waarop we leven, met onze economie en met ons welzijn. De energietransitie gaat aanzienlijk verder dan het louter vervangen van fossiele energiedragers door duurzame alternatieven. Het gaat om veranderingen op systeemniveau. In deze publicatie wordt een overzicht gegeven van deze systeemveranderingen, of beter gezegd, van de systeemintegratie-uitdagingen die voor de energietransitie nodig zijn.

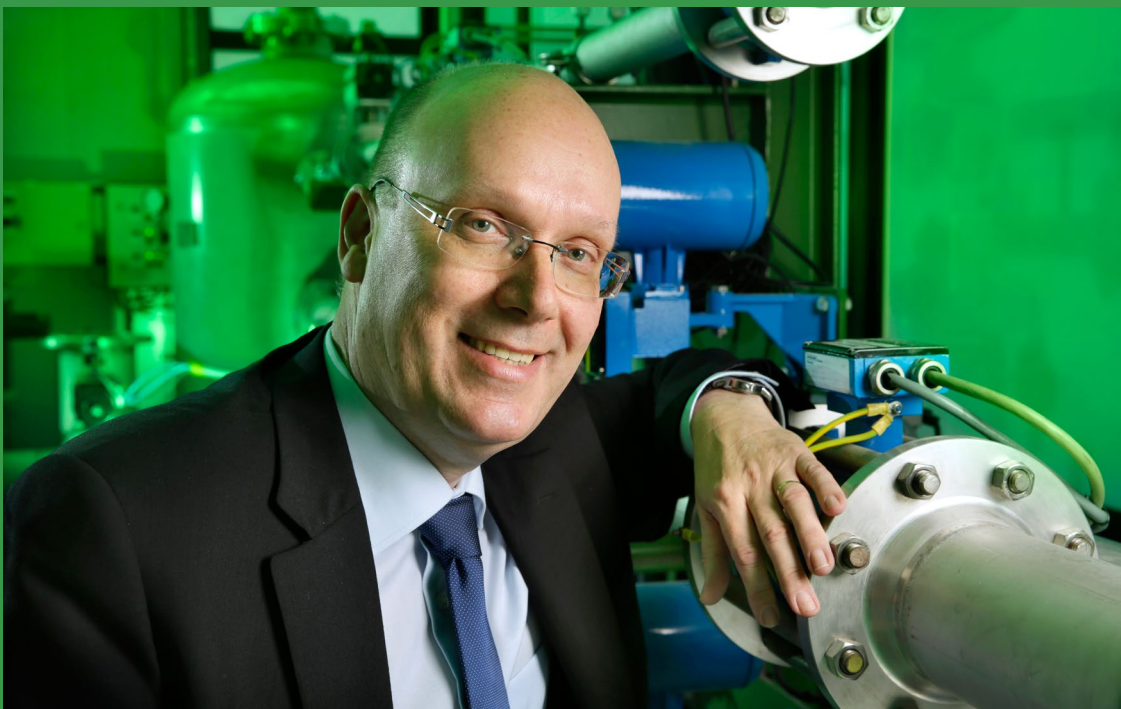
We beginnen met een nadere beschrijving van een energiesysteem. Vervolgens besteden we aandacht aan drie aspecten:

- de verschillende systeemveranderingen;
- de onderlinge samenhang tussen deze veranderingen;
- de cruciale rol van systeemintegratie die er voor moet zorgen dat ook in de toekomst het energiesysteem betrouwbaar, rechtvaardig, veilig en betaalbaar blijft, met een breed draagvlak in de maatschappij.

Mogelijk doet u bij het lezen van dit document nieuwe inzichten of inspiratie op, of zorgt het juist voor vragen. Laat het mij of een van de teamleden dat dan weten. Wij denken graag met u mee.

*Mart van Bracht*

Directeur Programma Systeemintegratie



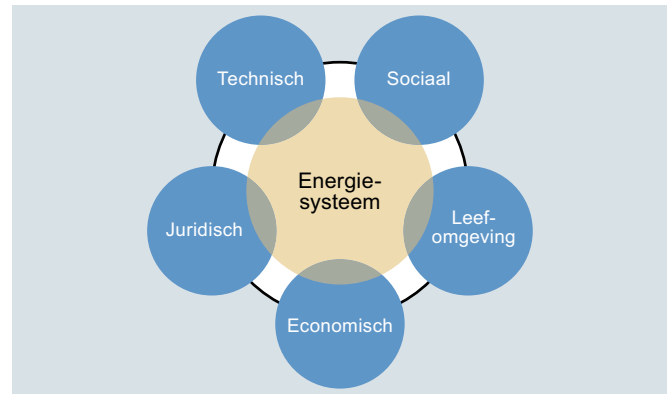
# Wat is een energiesysteem?

Een energiesysteem omvat de hele energie-waardeketen, dus alles wat nodig is om energie van opwek naar gebruik te brengen. Dit systeem heeft een technische, economische, juridische, sociale en leefomgevingsdimensie (zie Figuur 1).

Denk bij de technologische dimensie aan technische installaties en infrastructuur (zie Figuur 2). Onder de economische dimensie verstaan we zaken zoals verdienmodellen, marktmechanismen, investeringen en financierbaarheid. Juridische aspecten omvatten wet- en regelgeving, fiscale regimes, vergunningen, normering enz. Binnen de leefomgeving dimensie vallen onder meer ruimtelijke inpassing en de realisatie van klimaat en milieudoelen. Tot slot is er de sociaal-maatschappelijke dimensie, zoals de (rechtvaardigheid van de) verdeling van de consequenties van de energietransitie, de rol van maatschappelijke instituties, consumentengedrag en het participatieproces voor burgers en bedrijven, oftewel de mogelijkheid om deel te nemen aan besluitvorming over de toekomstige inrichting van het energiesysteem.

Al deze dimensies zijn aan elkaar gerelateerd. Zo kan nieuwe regelgeving, bijvoorbeeld een verlaging van belasting op elektrisch vervoer, zorgen voor een economisch effect (beter verdienmodel). Dit heeft op zijn beurt weer invloed op consumentengedrag, waardoor het gebruik van elektrisch vervoer toeneemt. Die toename heeft dan weer impact op de technische infrastructuur (grotere vraag naar laadinfrastructuur en elektriciteit).

Een energiesysteem heeft verschillende schalen. Dat is van groot naar klein op de eerste plaats een mondiale schaal, waarbij een leveringszekere levering van energie het

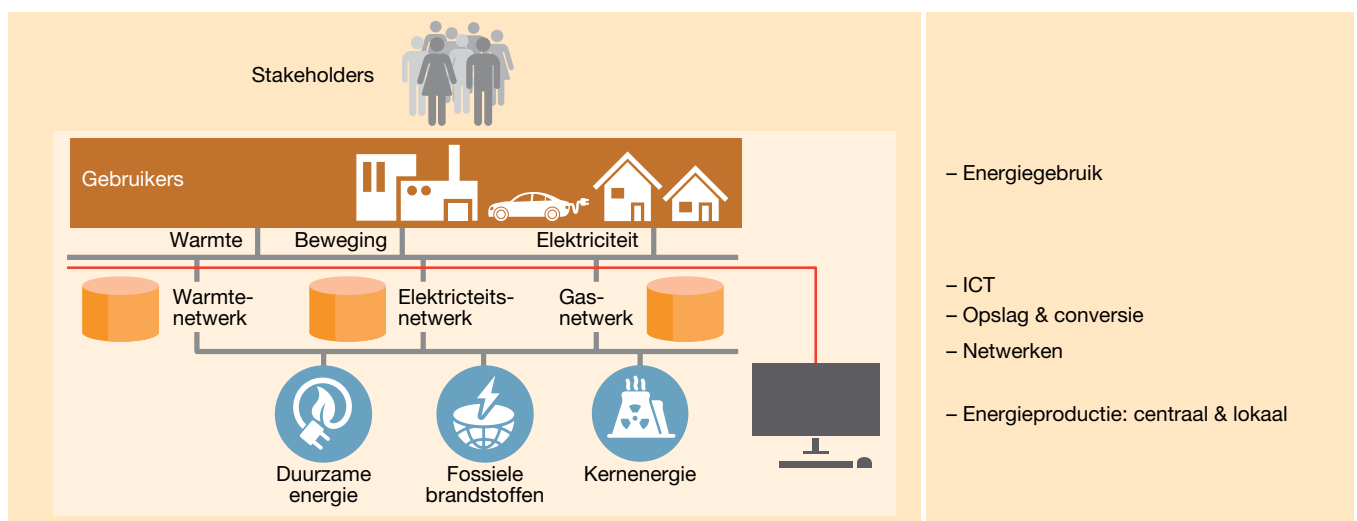


Figuur 1. Een energiesysteem heeft meerdere dimensies.

belangrijkste proces is. Daarna volgt een Europese schaal, waar 'interconnectie', oftewel verbinding tussen energiesystemen van verschillende landen het dominante proces is. Tenslotte kent het energiesysteem achtereenvolgens een nationale, regionale en lokale schaal waar de energievoorziening op nationaal, regionaal of lokaal niveau centraal staan. Al deze schalen zijn direct aan elkaar gerelateerd als een 'genest' systeem (zie Figuur 3).



Figuur 3. Het energiesysteem is een genest systeem.



Figuur 2. Overzicht componenten van de technische dimensie van een energiesysteem.



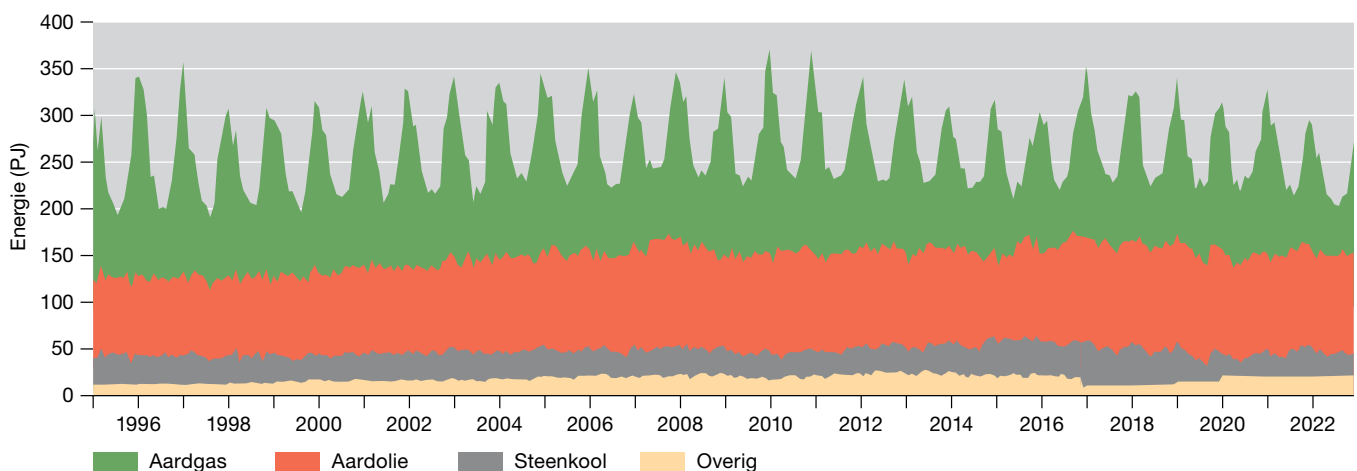
# Hoe verandert het energiesysteem in Nederland?

## Vraag en aanbod

Door verduurzaming van de opwek van energie zal het aandeel fossiele brandstoffen in de energiemix afnemen. Daarvoor in de plaats komen grote hoeveelheden duurzame energie, waarvan de twee meest belangrijke bronnen (zon en wind) weersafhankelijk ('intermitterend') zijn en daardoor een moeilijk voorspelbare productie leveren. Deze duurzame energie wordt deels centraal opgewekt (windparken op zee), maar wordt ook geproduceerd uit zeer vele decentrale lokale bronnen. Ook de vraag naar de hoeveelheid en type energiedrager verandert. Door bijvoorbeeld een groeiende elektrificatie, in het vervoer, de gebouwde omgeving en industrie, groeit de behoefte aan (duurzame) elektriciteit aanzienlijk. Het afscheid nemen van aardgas, betekent dat nieuwe duurzame brandstoffen nodig zijn voor de productie van warmte. Daarnaast doen nieuwe spelers hun intrede in de markt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan 'aggregators' en energiegebruikers die ook energieproducenten worden

(de zogenaamde prosumers, producer-consumers). Deze veranderingen doorvoeren is voor Nederland, met zijn grote aandeel fossiele brandstoffen in haar energiemix en grote economische verwevenheid met deze delfstoffen, een zeer grote opgave (zie Figuur 4) en Box 'Belang fossiele energie voor Nederland'.

In het verleden was het aanbod aan energie zeer goed regelbaar door het gebruik van gascentrales. Omdat het aanbod van energie moeilijk stuurbaarder wordt is het in evenwicht houden van vraag en aanbod aanzienlijk complexer geworden. Een belangrijke maatregel voor het balanceren van vraag en aanbod is het slim benutten van de flexibiliteit van energiesystemen en energiegebruikers. Onder flexibiliteit wordt verstaan het vermogen van het energiesysteem om verschillen tussen vraag en aanbod van energie in tijd en plaats te reduceren en piekbelastingen efficiënt en effectief op te vangen.

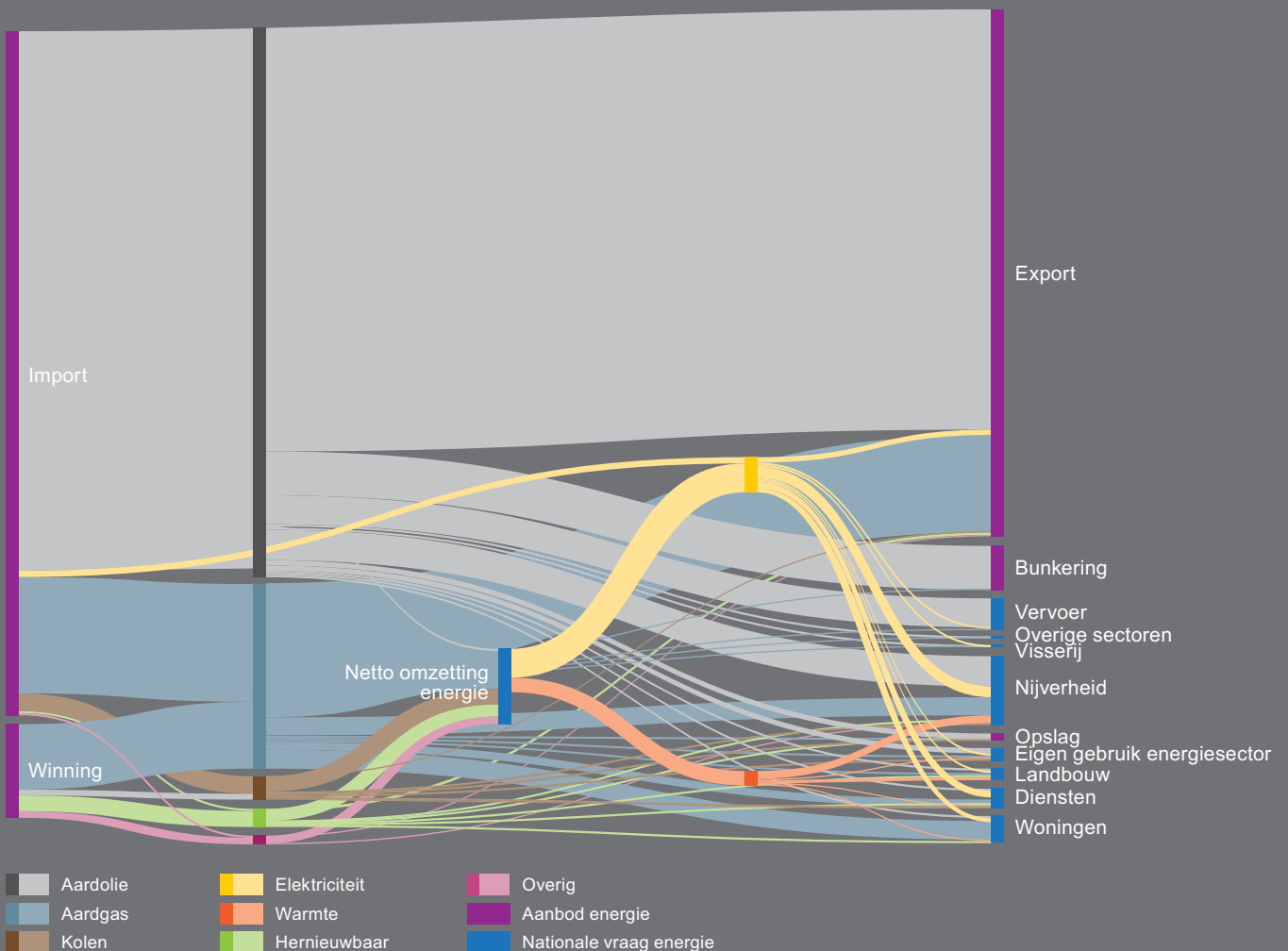


Figuur 4. Energieproductie per maand in 1992-2022 (databron CBS). Seizoeneffecten zijn duidelijk zichtbaar voor gas.



## Belang fossiele energie voor Nederland\*

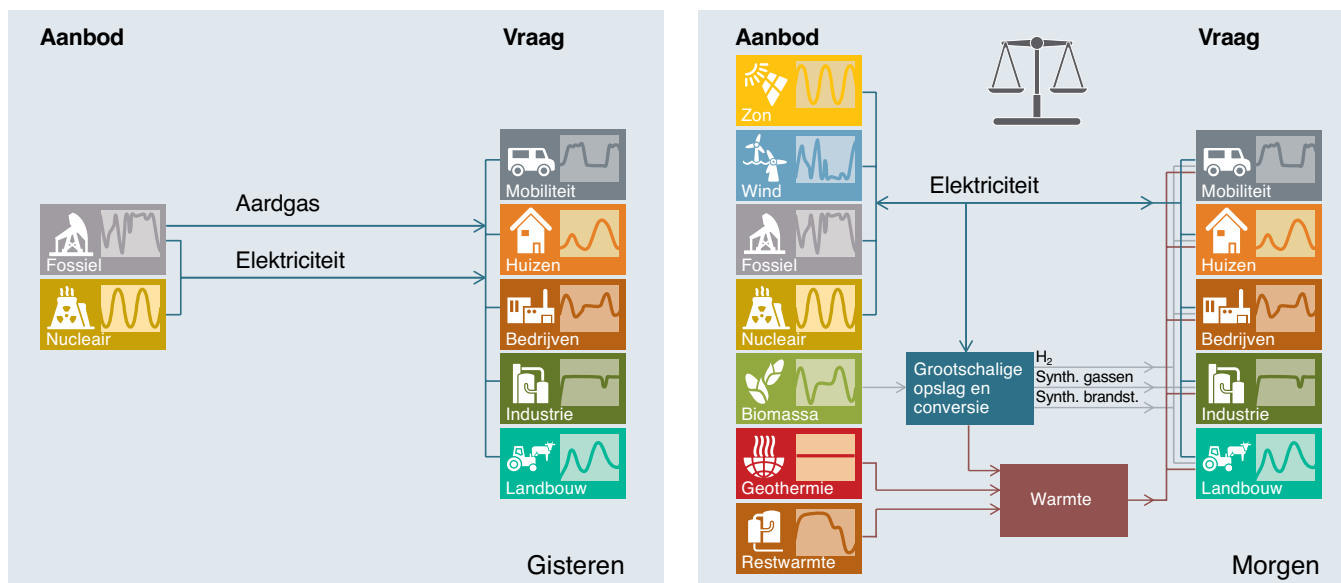
De productie en het gebruik van energie is een essentieel onderdeel van de Nederlandse economie. Van oudsher zijn fossiele brandstoffen hierbij van groot belang. Tot voor kort met name door de productie en export van aardgas. Daarnaast zijn verschillende sectoren afhankelijk van energie voor het vervaardigen van producten en het leveren van diensten. Het aandeel in het Nederlandse bruto binnenlands product (BBP) van de energieleverende en de energie-intensieve sectoren (sectoren welke meer dan – of gelijk aan – 0,01 PJ per miljoen euro toegevoegde waarde toevoegen aan de Nederlandse economie) was in 2019 gelijk aan 12%. Deze sector was in datzelfde jaar goed voor 49% van het Nederlandse energieverbruik. Naast de directe toegevoegde waarde van het energie-afhankelijke cluster voegt zij ook indirecte waarde toe aan de Nederlandse economie. De indirecte waarde van het energie-afhankelijke cluster (waarde die andere sectoren kunnen toevoegen door het leveren van producten en diensten) ligt hoger dan het gemiddelde van alle sectoren bij elkaar. Het energie intensieve cluster is daarnaast goed voor zo'n 671.000 voltijdsbanen. Het heeft hiermee een aandeel van 8,7% in de werkgelegenheid in de Nederlandse economie. Figuur 5 toont de energiestromen in 2019 van aanbod naar vraag. Dit figuur laat zien dat het Nederlandse energiesysteem zich kenmerkt in grote import en export van voornamelijk fossiele energiestromen.



Figuur 5. Shankey diagram energiestromen Nederland 2019.\*

\* Bron: Ecomys (2021): Ontwikkeling van het belang van energie voor Nederland.





Figuur 6. Verandering vraag en aanbod.

De flexibilitateitsbehoefte zal de komende jaren toenemen, door:

- De forse groei van productiecapaciteit van duurzame, fluctuerende, bronnen.
- Het afstoten van aardgas als primaire warmtebron in de gebouwde omgeving, waardoor een belangrijk deel van de lage temperatuur warmtevraag zal worden voorzien uit alternatieve bronnen (restwarmte, geothermische bronnen, groen gas enz.), die in staat moeten zijn om op piekmomenten (koude dagen en op specifieke dagdelen) voldoende energie te leveren. Daarnaast zal een belangrijk deel van de warmtevraag worden gerealiseerd met warmtepompen, met als consequentie een forse groei van de vraag naar elektriciteit. Dit betekent ook dat de piek in de elektriciteitsvraag door de warmtevraag van de gebouwde omgeving in de winter aanzienlijk groter zal zijn dan de huidige piekbehoefte van het elektriciteitsstelsel.
- De decarbonisatie van de industrie en transport, waardoor de vraag naar verschillende energiedragers

en de vraagpatronen daarvan, gaan veranderen. Zo zal door elektrificatie van processen in de industrie en een toename van de elektrificatie van transport, niet alleen de vraag naar elektriciteit toenemen, maar ook de vraag naar extra flexibiliteit.

- Het 'dom' gebruiken van elektriciteit, bijvoorbeeld het in grote getale gelijktijdig laden van elektrische auto's, ontstaat een piekvraag, die zorgt voor een grotere flexibilitateitsbehoefte op dag- en uur-schaal.

Het ontbreken van synergie tussen de verduurzaming van de industrie, transport en gebouwde omgeving heeft grote impact op de noodzakelijke flexibiliteit. Ook al is er gemiddeld voldoende flexibiliteit, als iedereen op hetzelfde moment hierop een beroep doet kan het toch niet voldoende blijken. Het is dan ook van groot belang dat alle maatregelen op een geïntegreerde wijze worden beschouwd.

### Technologische veranderingen

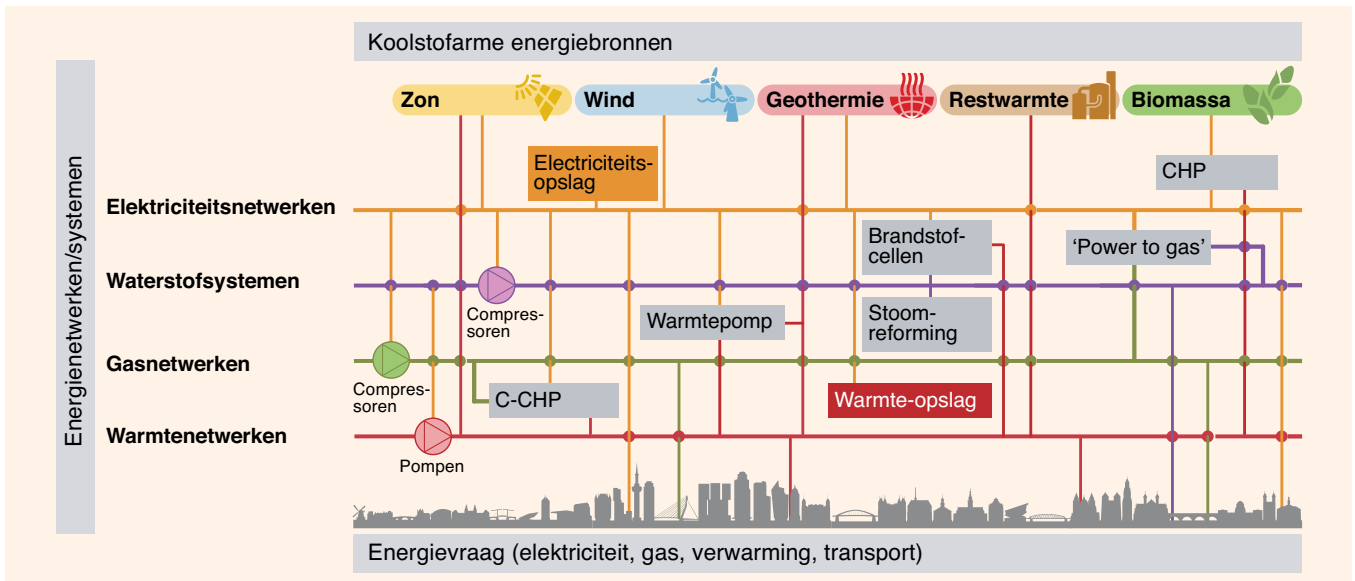
Dit brengt ons bij een andere belangrijke ontwikkeling, namelijk onzekerheid over de wijze waarop energiesystemen zich technologisch ontwikkelen en innoveren. Energietechnologie verandert snel. Zowel op componentniveau als op systeemniveau. Dit zorgt ervoor dat technologieroadmaps vrijwel altijd met onzekerheid hebben te kampen. Desondanks zijn er enkele trends waarneembaar:

- De grenzen tussen verschillende energiedragers gaan vervagen, waardoor er steeds meer 'multi-commodity' energiesystemen gaan ontstaan (elektronen, moleculen, warmte) waar verschillende energievormen geïntegreerd worden in één systeem (zie Figuur 7).

### Flexibiliteit is nodig om een aantal redenen:

- Leveringszekerheid: er moet voldoende energie beschikbaar zijn, ook als het erg koud is waardoor de energievraag stijgt, het niet waait waardoor de productie van windstroom daalt, of de zon niet schijnt, waardoor de productie van zonnestroom daalt.
- Balans handhaving: er moet een stabiel netwerk zijn, dat rekening houdt met de slechte voorspelbaarheid van het aanbod aan duurzame energie.
- Congestie management: de capaciteit van het netwerk moet gegarandeerd blijven, ook bij periodieke grote verschillen in vraag en aanbod.





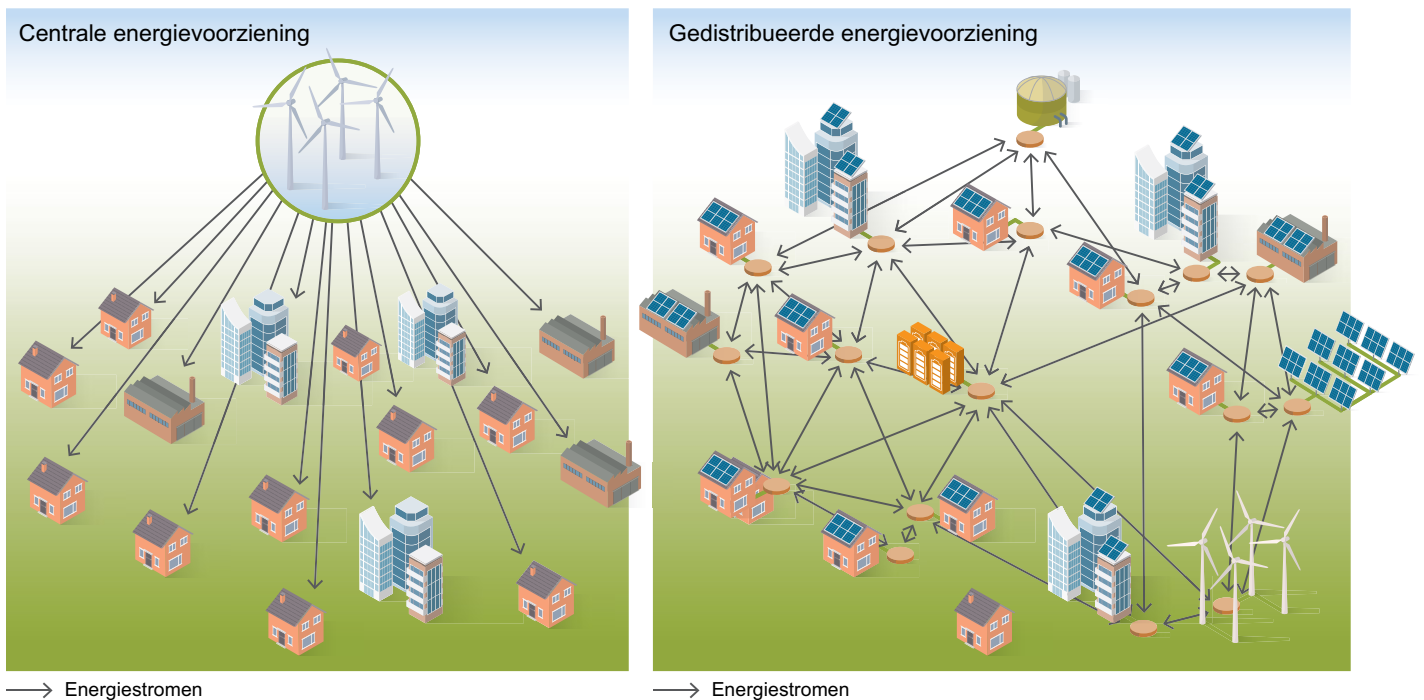
Figuur 7. Het technisch energiesysteem wordt steeds complexer: multi-commodity systeem.

- Het energiesysteem kent centrale energieproductie uit enkele centrale bronnen, bijvoorbeeld uit grote windparken op zee, of grote kerncentrales en decentrale productie uit een gedistribueerd systeem met talloze vaak kleine energiebronnen verdeeld over het land (Figuur 8).
- Door mogelijkheden die digitalisering biedt worden energiesystemen steeds meer intelligent ('smart').
- In toenemende mate ontstaan er Energy Hubs. Slimme oplossingen waarbij lokaal opgewekte energie zoveel mogelijk ook lokaal wordt gebruikt (zie box 'Energy Hubs').

- Nieuwe opkomende energie technologieën kunnen het systeem ingrijpend veranderen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan innovatieve opslag of transportsystemen of kleine modulaire kernreactoren (Small Modular Reactors (SMR)).

### Beleid en planvorming

Bij beleid en planvorming is het noodzakelijk breder te kijken dan naar sec het energiesysteem. Het energiesysteem heeft namelijk directe en indirecte relaties met economische, sociaal maatschappelijke, institutionele, juridische en politiek

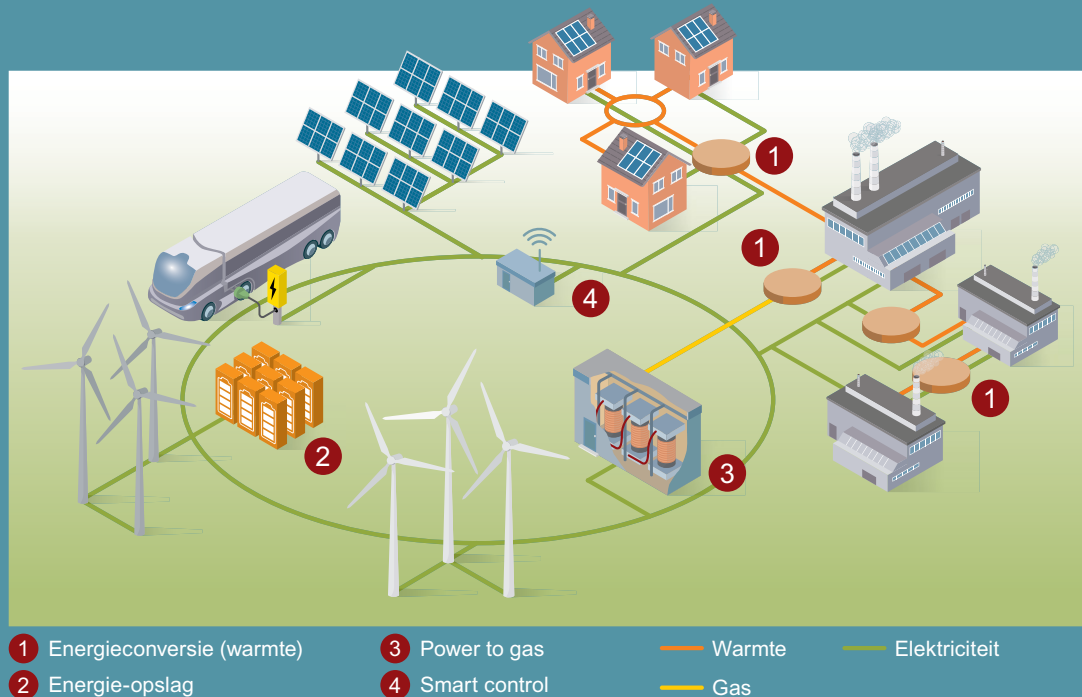


Figuur 8. Het technisch energiesysteem wordt steeds complexer: centrale én gedistribueerde energievoorziening.



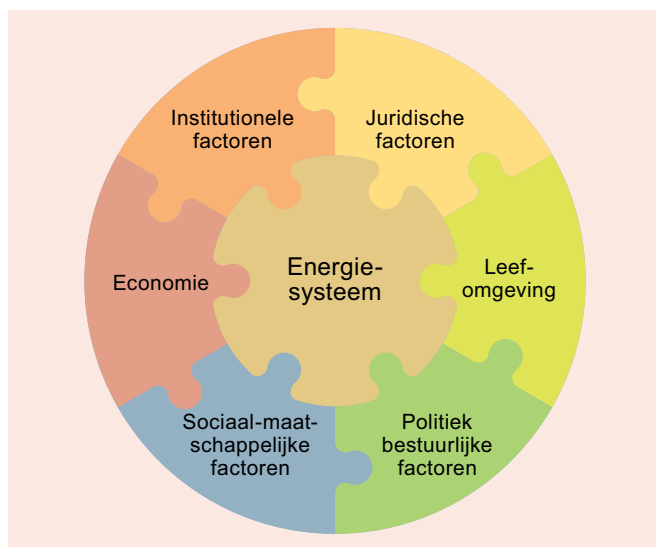
## Energy Hubs

Een Energy Hub is een slim gestuurd, decentraal energiesysteem waar duurzame energieopwekking en energieconsumptie in een specifiek gebied zoveel mogelijk op elkaar wordt afgestemd. Tegelijk wordt via de Energy Hub het bovenliggende energiesysteem ontlast en/of versterkt door binnen het gebied waar het kan vraag en aanbod van verschillende energiedragers te balanceren door lokale productie, consumptie, opslag en conversie te combineren. Om dit mogelijk te maken is naast de technische en digitale infrastructuur ook een verdienmodel, organisatievorm en afspraken met alle stakeholders nodig.



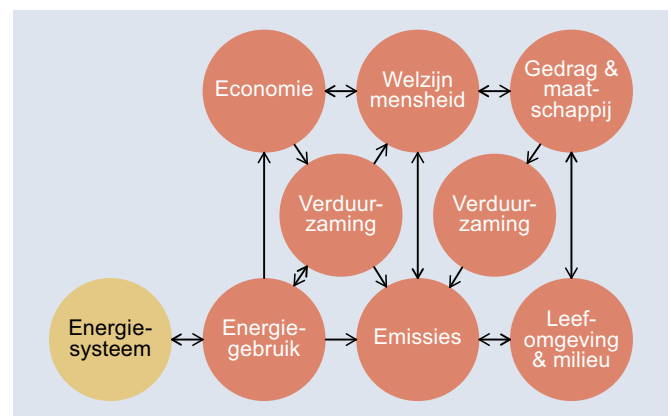
Figuur 9. Energy Hub.

bestuurlijke factoren. Daarnaast heeft het energiesysteem impact op de inrichting en de kwaliteit van de leefomgeving (zie Figuur 10).



Figuur 10. Het energiesysteem in de context van beleid en planvorming.

Ook al deze factoren zijn weer met elkaar verbonden. Figuur 11 toont bijvoorbeeld de relaties tussen energiesysteem, economie, leefomgeving en gedrag en maatschappij. Dit alles betekent dat het maken van beleid een complexe opgave is waar vele afwegingen moeten worden gemaakt en dito fundamentele keuzes, die richtinggevend zijn voor de ontwikkeling van het energiesysteem.



Figuur 11. Relatie tussen energiesysteem, economie, leefomgeving en gedrag en maatschappij.





Deze complexiteit is ook zichtbaar in de planvorming die rond de realisatie van de energietransitie wordt ontwikkeld. Figuur 12 geeft hiervan een overzicht en toont tevens de verbinding met programma's rond ruimtelijke inrichting. Het gaat hierbij om meer dan 10.000 plannen die, om aan de doelen genoemd in de Box 'Wat is Systeemintegratie' te voldoen, op elkaar zijn afgestemd. Dit is een zeer complexe opgave.

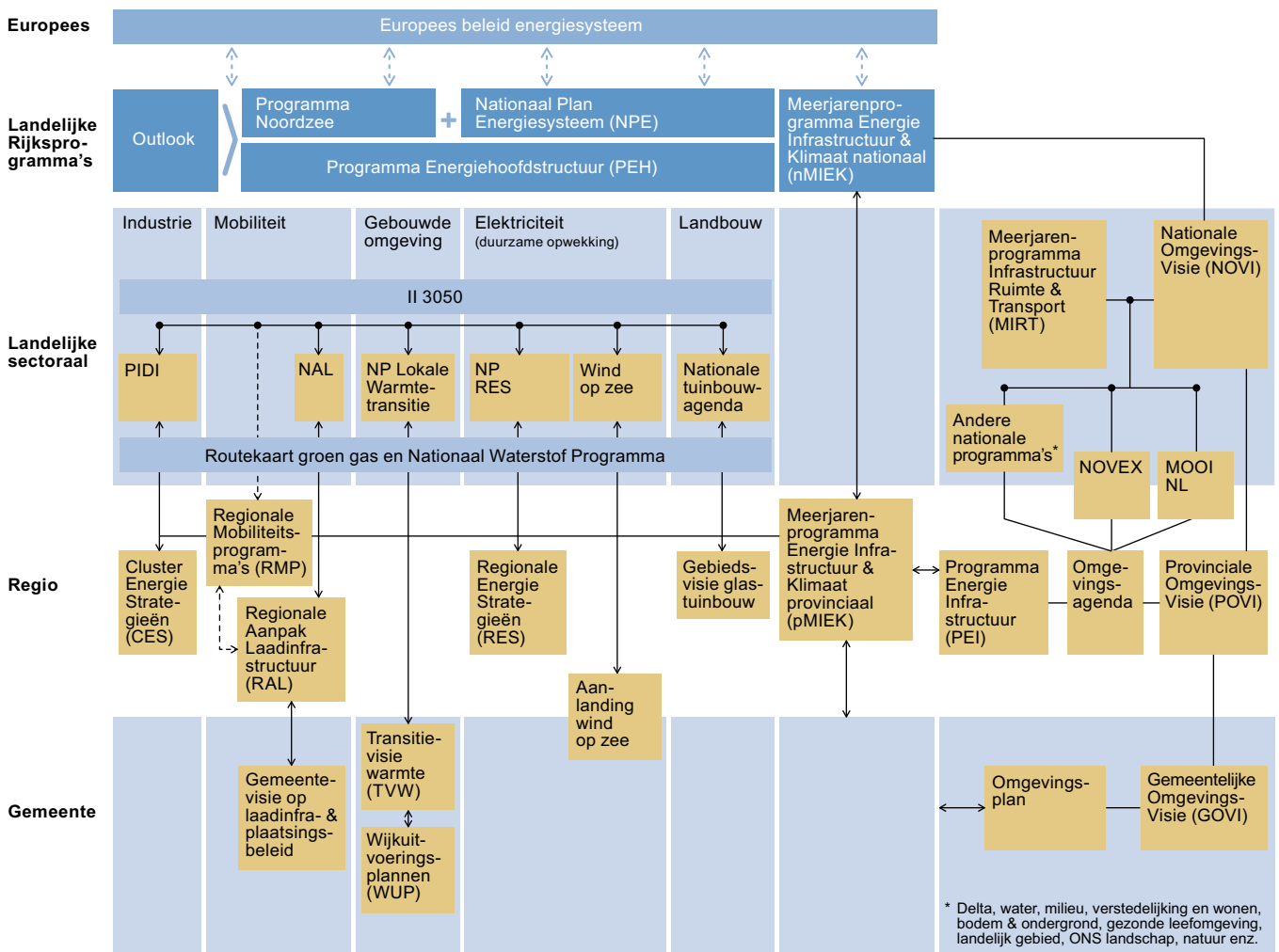
### Markt

Nederland kent een duidelijke scheiding tussen energie infrastructuur, die publiek eigendom is en de productie en levering van energie, waarvoor private markten zijn ingericht. Door de energietransitie is deze marktordering aan het veranderen:

- De vraag en het aanbod van energie wordt door een groot aantal spelers bepaald, die vanuit eigen belangen handelen, dit betreft ook spelers in nieuwe rollen (aggregators).

### Onze definitie van systeemintegratie

Systeemintegratie in het kader van de energietransitie betekent het op een gecoördineerde en efficiënte wijze integreren van ketens van verschillende energiedragers en gebruikssectoren tot één duurzaam, betrouwbaar, leveringszeker, betaalbaar, rechtvaardig en veilig energiesysteem, met een breed maatschappelijk draagvlak en optimaal geïntegreerd in de fysieke leefomgeving.



Figuur 12. Planvorming op het gebied van energie (linker deel) en ruimtelijke inrichting (rechter deel).



- De voorheen heldere rollen van verschillende actoren worden onduidelijker; producenten worden gebruikers en omgekeerd.
- Het aanbod van energie wordt, net als de vraag, slecht voorspelbaar met een grillige prijsvorming als gevolg.
- Het huidige marktwerkingsmodel stuurt op vraag en aanbod en niet op andere aspecten zoals maatschappelijke kosten en baten. Hierdoor wordt het energiesysteem niet automatisch efficiënter, robuuster, duurzamer en rechtvaardiger; belangrijke doelstellingen voor ons energiesysteem.

- Er is een groeiende behoefte waarneembaar naar meer vrijheid en autonomie bij burgers en bedrijven om hun eigen energievoorziening te regelen en ook om eigen markten te creëren.

Al deze plannen hebben direct impact op het energiesysteem. Om te zorgen dat het totale energie robuust, veilig en betaalbaar blijft, moeten deze plannen op elkaar zijn afgestemd. Dit is een zeer complexe opgave.



# Wat is de rol van systeemintegratie?

Het is goed om te beseffen dat alle hiervoor beschreven 'losse' ontwikkelingen samen komen in het totale energiesysteem. Hier worden de gezamenlijke, integrale consequenties en afhankelijkheden, pas echt duidelijk. De inrichting en het beheer van het energiesysteem moet dan ook vanuit een systeem perspectief worden aangepakt. Dit is, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, een zeer uitdagende opgave; zeker in Nederland door de vele onderlinge afhankelijkheden en de grote politiek-maatschappelijke, economische, sociale, financiële en technische onzekerheden. Het is risicovol om deze systeem aspecten te negeren. Zo kunnen er onbedoelde en niet gewenste situaties

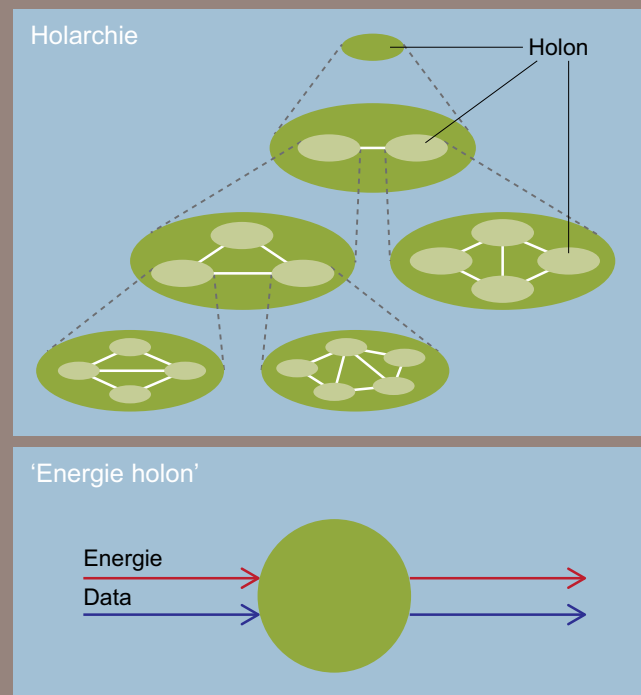
ontstaan, zoals zeer hoge kosten voor gebruikers, black-outs, zeer hoge niet efficiënte investeringen, back-up kosten, een haperende leveringszekerheid en meer. Verder ontstaat het risico dat echt noodzakelijke investeringen worden uit- of afgesteld. Ook kan het maatschappelijke draagvlak voor de energietransitie afnemen en is het mogelijk dat zelfs de uitvoering van de energietransitie onder druk komt te staan.

De energietransitie kan daarom niet zonder systeemintegratie. De hoogste prioriteit hierbij is het opzetten van een adequaat proces voor besluitvorming en regie, inclusief fundamentele keuzes en afspraken over leidende principes die hierbij

## Een Holarchisch geordend energiesysteem

Een holarchie is een systeemmodel gebaseerd op 'holonen' (Grieks: ὅλον, holon onzijdige vorm van ὅλος, holos 'geheel'). Een holon is een entiteit die tegelijkertijd zelfstandig is én onderdeel van een geheel. Holonen zijn zelfstandige eenheden die een zekere mate van autonomie bezitten, maar tegelijkertijd ook onderhevig zijn aan controle vanuit een of meer hogere niveaus. Een holarchie is een hiërarchie van zelfregulerende holonen die op de eerste plaats functioneren als autonome gehelen (eventueel ondergeschikte holonen aansturend), op de tweede plaats als afhankelijke onderdelen in ondergeschiktheid aan controles van holonen op hogere niveaus en ten derde in coördinatie met hun lokale omgeving (zie Figuur 13). Een holarchie is een systeemconcept die eigenschappen heeft van zowel een hiërarchisch model, met vaste regels met grote betrouwbaarheid, als een autonoom opererend multi-agent systeem met veel flexibiliteit.

Een holarchie is een systeemconcept dat goed past bij de hiervoor geschetste behoefte aan centrale sturing én meer autonomie. Hierbij staat een 'energie holon' centraal. Elke holon heeft als input en output energie en data. Een energie holon functioneert, wanneer mogelijk, geheel zelfstandig. Soms is dat samen met holons op hetzelfde niveau en soms is het onderdeel van een holon op een hoger niveau. Dit is afhankelijk van het aanbod en vraag naar energie. Binnen een holarchie heeft de stroom van energie geen vaste route meer. Data zijn de basis voor een intelligent besturingssysteem dat zorgt dat de holarchie binnen vastgestelde afspraken functioneert. Met deze intelligente besturing kan het energiesysteem worden aangepast aan de mogelijkheden en behoeftes, zoals beschikbare flexibiliteit, behoefte aan balancering of voorkomen van congestie. Op deze wijze is het mogelijk een genest energiesysteem te ontwerpen en te beheren; van woning, buurt, regio, tot nationaal niveau. In feite kent dit model een getrapte besluitvorming en zijn er veel mogelijkheden voor maatwerk.



Figuur 13. Holarchie en Energie holon.

Zie voor meer informatie Topsector Energie Systeemintegratie publicatie: 'Naar een holarchisch energiesysteem!?'.



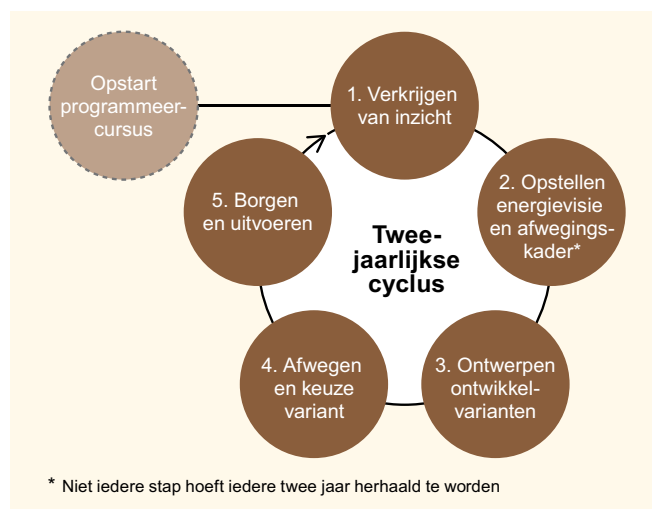
gehanteerd moeten worden: wat wordt de rol van de markt, hoe financieren we investeringen en welke investeringen vinden we acceptabel, hoe betrouwbaar en veilig moet het systeem zijn, wie is waartoe bevoegd, wie voert regie, wat moet lokaal worden georganiseerd en wat centraal, in hoeverre willen we afhankelijk zijn van het buitenland, hoe gaan we schaarse energiebronnen verdelen enz.

Een volgende stap is de ontwikkeling van een robuuste, realistische en stabiele nationale visie over de gewenste ontwikkeling van het energiesysteem: het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE). Dit plan moet ook rekening houden met de wijze waarop fossiele energie uitfaseert. Hiervoor is een adaptief en integraal ontwerp en ontwikkelproces nodig die rekening houdt met alle mogelijke scenario's. Het in kaart brengen van onzekerheden is hierbij van cruciale betekenis. Voor maken van plannen is een fact-based integraal besluitvormingsproces nodig, waarmee: multiple afwegingen (technisch, economisch, maatschappelijk, klimaateffecten, ruimte beslag, enz.) gemaakt kunnen worden, over verschillende schaalniveaus (nationaal-lokaal) heen. Dit besluitvormingsproces moet tevens de betrokkenheid van de vele stakeholders adequaat faciliteren. Draagvlak voor de realisatie van de grote transformatie van ons energiesysteem is cruciaal.

Tenslotte is een adequate vorm van regie noodzakelijk. Dit is een complexe opgave door de vele aan elkaar gerelateerde opgaven en actoren: diverse overheden, bedrijven, belangenorganisaties, kennisinstututen enz. Hier is behoefte aan een toekomstbestendige ordenings- en sturingsconcept die autonomie biedt aan afzonderlijke partijen en deelsystemen én centrale ontwerp, optimalisatie en sturingsmechanismen heeft die er voor zorgen dat het

systeem als geheel robuust, rechtvaardig, betaalbaar en veilig blijft. Een 'holarchisch' systeemmodel zou hierbij wellicht een oplossing kunnen bieden (zie Box: 'een Holarchisch geordend energiesysteem').

Voor systeemintegratie is nog veel kennis en innovatie nodig. De Topsector Energie, Programma Systeemintegratie, stimuleert de ontwikkeling en verspreiding van deze kennis en innovaties en brengt partijen samen die deze opgave tot een succes willen en kunnen brengen.



Figuur 14. Model voor integraal programmeren (handreiking integraal programmeren (RVO)).

*Systemintegratie draagt ertoe bij dat het nieuwe energiesysteem niet alleen duurzaam wordt, maar ook betrouwbaar, veilig, betaalbaar en rechtvaardig.*

#### Colofon

Dit is een uitgave van Topsector Energie – Systeemintegratie

Foto omslag: hxdbzxy – Shutterstock

Vormgeving: Jos Rietstap Vormgeving

Oktober 2023  
Versie 2

[www.topsectorenergie.nl/systemintegratie](http://www.topsectorenergie.nl/systemintegratie)

