

Kennis en Innovatie Agenda

Programma Systeemintegratie



TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy

Kennis en Innovatie Agenda

Programma Systeemintegratie

Juli 2018

Inhoud

Inleiding	7
Kennis-Innovatie-Agenda Ontwerp en management van het Energiesysteem	9
Inleiding: het energiesysteem is meer dan de losse delen	11
Inleiding	14
1 Visualisatie van de roadmap	15
2 Toekomstbeeld	16
3 Issues en knelpunten	17
5 Kennis- en innovatieagenda	24
Kennis-Innovatie-Agenda Ontwerp en management van geïntegreerde duurzame warmtesystemen	31
1 Inleiding	33
1.2 Visie op de opdracht	33
1.3 Aanpak	33
2 Routes voor verduurzaming van de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie	34
3 Toekomstbeelden	37
4 Issues en knelpunten	42
5 Kennis- en innovatieagenda	50
Kennis en Innovatie Agenda Grootschalige opslag en conversie	57
1 Inleiding	59
1.1 Achtergrond	59
1.2 Probleemstelling	59
1.3 Doelstelling	59
1.4 Scope	59
1.5 Aanpak	59
2 Systeemscenario's	60
2.1 Base case + CCS	60
2.1.1 Korte omschrijving Business as usual maar met Carbon Capture & Storage	60
2.1.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen	61
2.2 Scenario A: All electric	61
2.2.1 Korte omschrijving	61
2.2.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen	61
2.3 Scenario B: Big on hydrogen	62
2.3.1 Korte omschrijving	62
2.4 Scenario C: Circular & Bio-based	62
2.4.1 Korte omschrijving	62
2.5 Scenario D: Small-scale	63
2.5.1 Korte omschrijving	63
2.5.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen	63

3	Issues en knelpunten	64
3.1	Toekomstscenario's als uitkomst van keuze en gebeurtenissen	64
3.2	Korte beschrijvingen issues / knelpunten	64
3.2.1	Schaarse middelen	64
3.2.2	Infrastructuur	64
3.2.3	Maatschappelijke acceptatie	64
3.2.4	Regulering	65
3.2.5	Concurrerende technologieën	65
3.3	Aan welke toekomstbeelden relateren de issues en knelpunten?	65
3.4	Wanneer gaat dit issue spelen?	66
3.4.1	Inzet van schaarse middelen (biomassa, duurzame elektriciteit)	66
3.4.2	Investerings in infrastructuur	66
3.4.3	Maatschappelijke acceptatie van technologie of oplossingen	66
3.4.4	Regulering van (energie-) markten	67
3.4.5	Concurrerende technologieën	67
3.5	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	67
4	Kennis en Innovatie Agenda (KIA)	68
4.1	Introductie	68
4.2	Beschrijving van programmalijnen	68
4.3	Generieke onderzoeksagenda	68
4.4	Betrekken van stakeholders	69
4.5	Producten / moleculen die ten grondslag liggen aan de KIA	70
4.4.1	Toekomstbeeld Waterstof (H ₂)	70
4.4.2	Toekomstbeeld Bulk chemicaliën en brandstoffen C _x H _y O _z	72
4.4.3	Toekomstbeeld Ammoniak (NH ₃)	73
4.4.4	Toekomstbeeld Methaan (CH ₄)	75
4.4.5	Toekomstbeeld staal / ijzer	76
5	Referenties	78

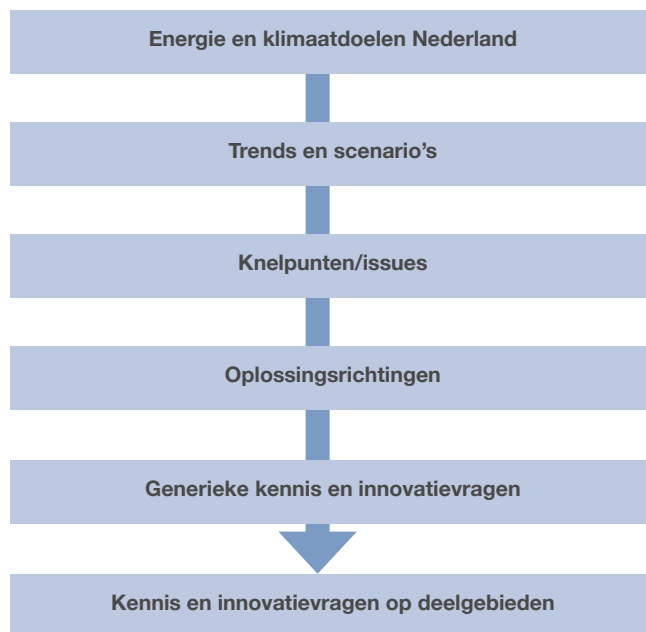
Inleiding

Het thema Systeemintegratie richt zich, als doorsnijdend thema binnen de Topsector Energie, op de systeemveranderingen die essentieel zijn om de transitie naar een geïntegreerd en flexibel energiesysteem van de toekomst mogelijk te maken. Het huidige systeem is zeer stabiel, veilig en betaalbaar. De Nederlandse maatschappij wil dat deze eigenschappen behouden blijven. Dit wordt echter een forse uitdaging; de veranderingen die het energiesysteem zal ondergaan zijn namelijk zeer ingrijpend en erg onzeker.

Het Systeemintegratie programma richt zich op de volgende maatschappelijke vraagstukken:

1. Op welke wijze ontwerpen en managen we gedurende en na de energietransitie het geïntegreerde energiesysteem, met behoud van de huidige betrouwbaarheid, veiligheid en betaalbaarheid en hoe zorgen we tevens voor een maatschappelijke acceptatie van het nieuwe systeem. Welke gereedschappen, instrumenten, configuraties, concepten, testbanks enz. zijn hierbij nodig en welke kennisleemtes en innovatiebehoeftes horen hierbij, zowel op technisch als niet technisch niveau.
2. Hoe realiseren en beheren we in Nederland op korte en lange termijn, voor verschillende gebruiksgroepen en schaalniveaus, geïntegreerde duurzame warmtesystemen die alle transitiepaden ondersteunen en efficiënt gebruik maken van alle beschikbare bronnen (restwarme industrie, geothermie enz.) en componenten voor transport, opslag, opwaardering en conversie. Wat zijn kennisleemtes en innovatiebehoeftes, zowel op technisch als niet technisch vlak.
3. Welke grootschalige opslag en conversieconcepten van duurzame energie vanuit een technisch en economisch perspectief zijn in Nederland mogelijk. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen chemische opslag en conversie (bezien vanuit een geïntegreerde visie op de productie van grondstoffen en energie) en mechanische opslag; cq 'Compressed Air Energy Storage' (CAES) of 'Compressed Nitrogen Energy Storage' (CNES).

Voor deze programmalijnen zijn in 2018 drie hoogwaardige en breed gedragen (innovatie) roadmaps en Kennis en Innovatie Agenda's (KIA) ontwikkeld (geldt niet voor grootschalige mechanische conversie en opslag; hiervoor worden haalbaarheidsstudies uitgevoerd).



Deze roadmaps en KIA 's brengen op een eenduidige en gestructureerde wijze de belangrijkste kennis en innovatievragen in kaart. De basis van de roadmap aanpak wordt gevormd door werksessies met ter zake kundige personen van de belangrijkste stakeholders. Door het gezamenlijke karakter van de bijeenkomst ontstaat er niet alleen overzicht, maar ook draagvlak voor de aanpak. Bovenstaand figuur toont de gekozen werkwijze. De roadmaps en KIA 's zullen de basis vormen voor toekomstige innovatieprogramma's waarbij systeemintegratie een rol speelt.

Deze innovatieprogramma 's hebben als doel, door middel van kennisontwikkeling en innovatie, de energietransitie in Nederland te versnellen. De roadmaps en KIA geven een overzicht van de knelpunten en issues met betrekking tot systeemintegratiethema 's in Nederland. Inclusief eventuele oplossingsrichtingen en opties, voor alle actoren die actief of betrokken zijn bij de energietransitie, zoals regio's/gemeenten/provincies die binnenkort hun energie- en klimaatplannen gaan opstellen. Voor bedrijven die hun processen en energievoorziening willen verduurzamen, netbeheerders die hun infrastructuur moeten aanpassen en de Rijksoverheid ten behoeve van beleidsvoorbereiding en beleidsuitvoering.

In de volgende hoofdstukken zijn de drie roadmaps en KIA's nader uitgewerkt.

Kennis-Innovatie-Agenda Ontwerp en management van het Energiesysteem

Auteurs:

TNO Michel Emde
 Nienke Maas
 Niels Jansen
 Richard Westerga

Roadmap Management Energiesysteem

TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy

Toekomstbeeld & Trends
in transitie naar het energiesysteem van de toekomst

Knelpunten
op weg naar toekomstbeeld

Onderzoeksagenda
met onderzoeksvragen voortkomend uit de knelpunten

EEN CO₂-NEUTRAAL EN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM MET BEHOUD VAN

Stabiliteit

Veiligheid

Betrouwbaarheid

Maatschappelijke acceptatie

GOVERNANCE & SOCIAAL

Top down beleid vs. bottom-up realisatie

Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten

Onduidelijke mandaat-structuur

Niet one size fits all

Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijk

Rol bestaande gasinfrastructuur?

Informatievoorziening niet helder

ECONOMISCH

Internationale harmonisatie nodig

Merit order levert prijs=0, dus geen business case

P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand

Schaarste flexibiliteit

Dure/risicovolle nieuwe technologie

Elektrificatie leidt tot congestie/kosten

Meer volatiliteit leidt tot problemen balans-handhaving

Zonder centrales geen fysiek mechanisme voor 50 Hz

Onduidelijk beleid (energiedrager)

Verandernis vs. innovatiebehoefte

Verdeling kosten/baten

Investeringsonzekerheid

Tijdelijke oplossing is niet eind-oplossing

Verplaatsings-effecten

Sub-optimale netwerkbenutting

Schone technologieën leiden toch nog tot CO₂

KORTE TERMIJN

MIDDELLANGE TERMIJN

LANGE TERMIJN

De onderzoeksvragen zijn ingedeeld in drie soorten initiatieven:

TRANSITIEPRINCIPES

ACUTE VRAGEN

EXPERIMENTEN

7 THEMA'S

- + Samen Beslissen
- + Markt-mechanismen
- + Bestendige investeringen
- + Digitalisering
- + Keuze Energiedrager
- + Infrastructuur
- + Flexibiliteit

Tweynstra Guddé

Inleiding: het energiesysteem is meer dan de losse delen

De energietransitie heeft grote impact op het energiesysteem zoals we dat kennen. Er zijn allerlei vragen die niet zomaar te beantwoorden zijn. Hoe zorgen we op tijd voor voldoende aanbod aan duurzame energie? Hoe vullen we de warmtevraag in voor industrie en huishoudens? Hoe vullen we onze mobiliteitsbehoefte in?

Naast deze concrete vragen speelt er ook een minder grijpbare overkoepelende vraag die minstens net zo belangrijk is:

Hoe zorgen we er gezamenlijk voor dat het energiesysteem als geheel goed blijft werken als verschillende delen van het energiesysteem anders ingevuld gaan worden?

In opdracht van de Topsector Energie – Systeemintegratie heeft ECN-TNO een kennisroadmap (KIA – Kennis-Innovatie-Agenda) ontwikkeld voor de kennis, tools, instrumenten, concepten, afwegingskaders (etc.) die nodig zijn om gedurende de energietransitie het energiesysteem als geheel dusdanig te ontwerpen en managen dat de huidige stabiliteit, betaalbaarheid, veiligheid en acceptatie door stakeholders gehandhaafd blijven. Deze opdracht is door ECN-TNO breed opgepakt door dit vraagstuk te beschouwen:

- vanuit verschillende schaalniveaus: land/regio/stad/wijk/individu
- vanuit verschillende perspectieven: technisch, economisch, sociaal
- vanuit verschillende domeinen: gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie, de energiepartijen
- in dialoog(sessies) met verschillende relevante stakeholders: netbeheerders, infrastructuur providers, energieleveranciers, lokale en provinciale overheden, ministeries, OEM's, milieupartijen, industrie, glastuinbouw, woningcorporaties en kennispartijen.

Visie en benadering: een issue is pas opgelost als het voor niemand meer een issue is, anders is het een knelpunt

De term “management van het energiesysteem” is in deze KIA geïnterpreteerd als het management van onderlinge afhankelijkheden – van de systeemintegratie dus. Het energiesysteem bestaat uit een veelheid aan verschillende partijen en deelsystemen. Voor de goede werking van het energiesysteem moeten de partijen en deelsystemen samenwerken. Dit gaat niet vanzelf, hetgeen grote implicaties heeft voor allerlei keuzes over bijvoorbeeld infrastructuur, ruimtebeslag, investeringen en energiedragers.

Het huidige energiesysteem is dusdanig ingericht dat het voldoet aan de eisen rond stabiliteit, veiligheid en betaalbaarheid en is breed geaccepteerd. Met het klimaatakkoord worden er eisen ten aanzien van CO₂ en duurzaamheid toegevoegd.

Dit leidt tot trends en ontwikkelingen waar het huidige energiesysteem niet op is berekend. Als gevolg daarvan zullen verschillende spelers in het energiesysteem tegen issues aanlopen. Een voorbeeld van zo'n trend is toenemende elektrificatie. Dit vergt een grotere netwerkcapaciteit, die standaard wordt ingevuld met netverzwaring, die gepaard gaat met hogere kosten voor de infrastructuur. Er komt echter een moment dat de kosten hiervoor dusdanig hoog worden dat dit voor de samenleving niet langer houdbaar is, en waarbij de doelstellingen voor stabiliteit en betaalbaarheid niet meer te verenigen zijn. In veel gevallen kunnen er, in samenwerking met andere partijen, oplossingen gevonden worden voor dergelijke issues, zodat het energiesysteem toch weer gemanaged is en voldoet aan de doelstellingen. Er zijn echter ook gevallen waarbij het oplossen van een issue leidt tot nieuwe issues bij andere partijen of andere delen van het energiesysteem. In dat geval spreken we van een systeemknelpunt. In het voorbeeld van elektrificatie kan het issue deels opgelost worden door flexibiliteit bij gebruikers te vragen om zodoende de pieken in de belasting te verlagen, maar als gebruikers niet bereid zijn om hieraan mee te werken is er sprake van een dergelijk knelpunt. De onderwerpen op de kennisagenda hebben als doel om dergelijke systeemknelpunten te adresseren.

Op basis van deze visie op het management van het energiesysteem zijn de volgende stappen doorlopen om te komen tot de kennisroadmap:

1. Identificeer bestaande/verwachte trends en veranderingen in het energiesysteem vanuit de hierboven genoemde domeinen
2. Stel vast tot welke issues bij welke partijen dit leidt
3. Analyseer voor welke van deze issues geen oplossingen zijn die voor alle relevante stakeholders acceptabel zijn: dit zijn systeemknelpunten.
4. Formuleer (kennis- en beleids)vragen die beantwoord moeten worden om deze systeemknelpunten op te kunnen lossen
5. Analyseer welke tools, instrumenten, kennis, concepten, afwegingskaders etc. ontwikkeld moeten worden om dit in te vullen. Bepaal daarbij op welke termijn deze ontwikkelingen nodig zijn en welke stakeholders erbij betrokken dienen te worden.

Deze stappen zijn doorlopen in een drietal dialoogsessies met telkens ongeveer vijftientig vertegenwoordigers van relevante partijen rond het energiesysteem. In dialoogsessie 1 is vanuit de domeinen gediscussieerd over trends en issues en is toegewerkt naar knelpunten. In dialoogsessie 2 is nagedacht over kennisvragen en projecten en resultaten om deze kennisvragen te adresseren. In dialoogsessie 3 is het geconsolideerde resultaat besproken wat heeft geleid tot een aangescherping van de kennisroadmap.

Resultaat: Het nieuwe energiesysteem vergt helder beleid en samenwerken vanuit integraal perspectief

Uit de analyse van trends en issues komt een substantieel aantal knelpunten naar voren. Daarnaast zijn er een aantal overkoepelende knelpunten geïdentificeerd die belemmerend zijn voor de energietransitie en invloed hebben op het energiesysteem. Steekwoorden bij deze knelpunten zijn:

Overkoepelende knelpunten	Knelpunten voortkomend uit issues			
Onduidelijke mandaat-structuur	Top down beleid v.s. bottom-up besluiten	Verdeling kosten en baten	Dure en risicovolle nieuwe technologie	P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand
Onduidelijk beleid energiesysteem	Schaarste flexibiliteit	Verandersnelheid vs. Innovatiebehoefte	Elektrificatie leidt tot congestie/kosten	Zonder centrales geen fysiek mechanisme 50Hz
Suboptimale netwerkbenutting	Informatie-voorziening niet helder	Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijken	Schone technologie leidt nog tot CO ₂	Merit order levert prijs=0, dus geen business case.
Investerings-onzekerheid	Verplaatsings-effecten	Internationale harmonisatie nodig	Meer volatiliteit leidt tot probleem balanshandhaving	
Tijdelijke oplossing is niet eindoplossing	Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten	Niet one-size-fits-all oplossing	Rol bestaande gas-infrastructuur onduidelijk	

Voor het adresseren van deze knelpunten zijn acht thema's gedefinieerd, waarbij typisch vanuit een thema meerdere knelpunten worden geraakt en een knelpunt typisch wordt afgedekt door meerdere thema's. Binnen deze thema's zijn verschillende samenhangende beleids- en kennisvragen geformuleerd. De kennisroadmap beschrijft hoe deze kennisvragen beantwoord kunnen worden en welke instrumenten moeten worden ontwikkeld die bruikbaar zijn voor de relevante stakeholders. Daarnaast wordt in de roadmap aangegeven op welke termijn deze zaken ontwikkeld moeten worden en welke stakeholders bij de ontwikkeling betrokken moeten worden.

De thema's (beknopt samengevat) zijn:

Keuze energiedrager

Er zal een transitie naar nieuwe energiedragers plaatsvinden. Hierbij zijn verschillende keuzes nodig die vanuit systeem-perspectief in meer of minder mate optimaal zijn. In dit thema vindt ontwikkeling plaats om te bepalen *welke mix van energiedragers* globaal/regionaal/lokaal het best gekozen kan worden en hoe deze mix verandert in de loop van de tijd: hybridisering. Daarnaast worden binnen dit thema *nationale programma's* ontwikkeld rond grootschalige *duurzame opwek, opslag en conversie*.

Samen beslissen

Keuzes in het energiesysteem zijn lastig door de vele afhankelijkheden met andere partijen en deelsystemen. In dit thema wordt gewerkt om samen beslissen mogelijk te maken. In dit thema worden ervoor gezorgd dat essentiële *kennis, inzicht en ervaringen* voor keuzes op een *begrijpelijke* en *bruikbare* manier beschikbaar komen voor stakeholders en beleidsmakers en dat gezamenlijke keuzes met inachtneming van onderlinge afhankelijkheden op verschillende schaal-niveaus en *globale doelstellingen* ondersteund worden.

Bestendig investeren

Het duurzame hybride energiesysteem vergt aanzienlijke investeringen vanuit stakeholders die vanwege onduidelijkheid en verschillende belangen niet vanzelf op gang komen. Dit thema ontwikkelt instrumenten om investeringen te stimuleren, bestendig te maken en om belemmeringen op te lossen. In het thema wordt onderzoek gedaan naar de gewenste/benodigde *organisatie en wetgeving* rond de financiering van het energiesysteem en naar de manier om *langere termijn sturing op de klimaatdoelen* te waarborgen. Daarnaast worden nieuwe *samenwerkingsvormen, subsidie-instrumentarium* en nieuwe principes voor *business cases* en *businessmodellen* ontwikkeld waarmee *collectief* en *collaboratief* gewerkt kan worden aan het toekomstige energiesysteem en waarbij baten en lasten voor stakeholders in balans zijn.

Infrastructuur: algemeen

Gebruik van aardgas zal drastisch verminderen. De warmtevraag dient anders ingevuld te worden, waarvoor mogelijk nieuwe infrastructuur aangelegd moet worden. De bestaande gasinfrastructuur biedt kansen voor andere doeleinden dan transport van aardgas.

In dit thema worden een *governance-model* en de *rolverdeling* voor infrastructuurbeheerders uitgewerkt voor het toekomstige energiesysteem, passend bij de nieuwe taken en verantwoordelijkheden die hierbij komen kijken. Ook wordt er binnen het thema een nieuwe aanpak ontwikkeld voor de *kostenverdeling van de infrastructuur* voor het nieuwe systeem. Ten slotte gaat het thema in op de vraag hoe *opslag en conversie strategisch ingezet* moeten worden, welke rol de bestaande gasinfrastructuur daarin heeft en de economische, regulatorische en technische haalbaarheid hiervan.

Infrastructuur: elektrisch

Elektrificatie van de energievraag en verduurzaming van het energieaanbod heeft grote impact op de elektrische infrastructuur. Technische innovaties, slimmer gebruik van infrastructuur en maatschappelijke keuzes zijn nodig voor een infrastructuur die stabiel is, maar ook betaalbaar blijft.

Binnen het thema vindt ontwikkeling plaats van een integrale *ontwerpmethode* voor een stabiele en betaalbare *elektriciteitsinfrastructuur* en een *afwegingskader* voor keuzes in de elektriciteitsinfrastructuur vanuit holistisch perspectief. Daarnaast heeft het thema betrekking op de *strategische nationale positionering* t.a.v. afhankelijkheden van interconnecties en op de *samenwerking tussen nationale en regionale netbeheerders*. Ten slotte wordt binnen het thema onderzocht hoe in de toekomst omgegaan moet worden met *frequentiehandhaving zonder traditionele centrales* met draaiende massa.

Flexibiliteit

Flexibiliteit is nodig voor het praktisch en betaalbaar matchen van vraag en aanbod voor elektriciteit en is daarmee randvoorwaardelijk voor een werkend elektriciteitssysteem. Daarnaast kan flexibiliteit gebruikt worden voor congestiemanagement. Hiervoor zijn nog belangrijke keuzes te maken en is meer inzicht in en slimheid van het netwerk vereist.

Het thema ontwikkelt een *systeemmechanisme* waarmee de benodigde en beschikbare flexibiliteit effectief kan worden ingezet. Op basis van dit systeemmechanisme worden *businessmodellen* ontwikkeld waarmee het gewenste gebruik van flexibiliteit kan worden *gestimuleerd*. Er worden instrumenten ontwikkeld waarmee vraag en aanbod van flexibiliteit op verschillende tijdschalen en locaties kunnen worden *geprofileerd* en *voorspeld* ten behoeve van strategische, tactische en operationele beslissingen rond flexibiliteit. Ten slotte wordt de *operationele inrichting* van het systeemmechanisme, met het businessmodel en de instrumenten, vormgegeven.

Marktmechanismen

Marktmechanismen zijn een middel voor het management van het energiesysteem. Binnen dit thema worden marktmechanismen ontwikkeld die sturen op een duurzaam en CO₂-vrij energiesysteem en die de transitie stimuleren met behoud van betaalbaarheid, acceptatie en stabiliteit.

Binnen het thema wordt een toekomstig *integraal marktmechanisme* onderzocht met een “kostenindex” die de gewenste verhouding representeert van de verschillende KPI's (stabiliteit/kosten/ acceptatie/duurzaamheid) en wordt gekeken naar een op kortere termijn realiseerbaar *ketenmarktmechanisme* dat drempels voor de transitie wegneemt en beter stuurt op CO₂-uitstoot. De *fiscale wetgeving* wordt onder de loep genomen om *prijsprikkels* te creëren voor het gewenste gedrag bij gebruikers. Daarnaast wordt een marktmechanisme ontwikkeld waarin *flexibiliteit als waarde* wordt meegevoerd, zonder dat dit leidt tot perverse prikkels. De resultaten van deze ontwikkelingen worden in een operationele pilot getoetst en opgeschaald.

Digitalisering

Het energiesysteem is een groot en complex netwerk dat steeds meer digitaal en slimmer wordt. De digitale infrastructuur wordt daarmee een vitale infrastructuur die ook zelf gemanaged moet worden. Binnen dit thema wordt een robuuste en veerkrachtige digitale infrastructuur ontwikkeld. Onder dit thema wordt een *raamwerk* (architecturen, standaarden, datasystemen) voor de *digitale infrastructuur* ontwikkeld die ervoor zorgt dat het energiesysteem als geheel goed en op uniforme wijze geregeld kan worden. Daarbij is ook aandacht voor autonome ontwikkelingen, bijvoorbeeld rondom IoT en AI. Data delen tussen het groeiende aantal partijen wordt binnen het thema geadresseerd. Dit gaat over technische invulling, maar ook over de afspraken ten aanzien van het gebruik van data: *data governance*. De ontwikkelde resultaten worden in een *praktijktoets* met stakeholders integraal getoetst op bruikbaarheid en zo nodig aangescherpt.

Binnen alle thema's in de roadmap wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten activiteiten om tot het gewenste resultaat te komen:

- *Transitieprincipes* werken basisprincipes uit voor het energiesysteem en de energietransitie, vaak ingevuld vanuit een holistische en/of “green field” gedachte
- *Acute vragen* adresseren specifieke vragen die stakeholders op dit moment hebben, waarbij zij gezamenlijk een antwoord zoeken dat direct toepasbaar is of getoetst kan worden in de praktijk
- *Experimenten* onderzoeken vragen in de praktijk. Dit kunnen proeven zijn voor vragen die niet eenvoudig theoretisch of via simulaties te beantwoorden zijn maar in de praktijk uitgeprobeerd moeten worden (learning by doing) en het kunnen proeven zijn waarin resultaten uit eerdere initiatieven in de praktijk worden getoetst, geïntegreerd of opgeschaald. Het kan voor een experiment nodig zijn om tests uit te voeren die in het bestaande energiesysteem niet zonder meer kunnen of mogen (vanwege regelgeving of technische drempels).

Ten slotte een advies: Systeemintegratie is een overkoepelende uitdaging die overkoepelend moet worden opgepakt

In de dialoogsessies, de vele discussies in andere gremia en in een-op-een gesprekken werd duidelijk dat het onderwerp systeemintegratie door alle partijen als belangrijk wordt gezien en dat er nog aanzienlijke uitdagingen zijn rond dit onderwerp. Het inzicht leeft dat deze uitdagingen alleen succesvol kunnen worden geadresseerd door hier in gezamenlijkheid aan te werken. De bereidheid hiervoor is aanwezig!

Deze gezamenlijkheid is de crux van systeemintegratie. Dit onderwerp kan niet onder controle worden gekregen aan een enkele tafel, vanuit een enkel perspectief of vanuit een enkel schaalniveau. Er moet met focus, gestructureerd en samenhangend (programmatisch) aan dit onderwerp gewerkt worden. De aandacht voor het complexe onderwerp systeemintegratie moet expliciet zijn.

Inleiding

Dit document bevat de inhoudelijke informatie van de kennisroadmap “Ontwerp en Management van het Energiesysteem”. Deze kennisroadmap geeft antwoord op de vraag welke tools, concepten, kennis, afwegingskaders, etc. moeten worden ontwikkeld om het energiesysteem gedurende de energietransitie te kunnen ontwerpen en managen op een dusdanige wijze, dat de huidige normen op het gebied van stabiliteit, betaalbaarheid, veiligheid en acceptatie haalbaar blijven terwijl het energiesysteem tegelijk duurzaam en CO₂-neutraal wordt.

TNO-ECN heeft in de eerste helft van 2018, in opdracht van Topsector Energie – Systeemintegratie, deze vraag ingevuld. Dit heeft geleid tot het eindrapport “TNO Kennisroadmap management en ontwerp energiesysteem v1.0” (Emde, Maas, Jansen, Westerga, 30 juni 2018) en de bijbehorende samenvatting “Samenvatting TNO Kennisroadmap Ontwerp en Management van het Energiesysteem 1.0” (Emde, Maas, Jansen, Westerga, 4 juni 2018). De informatie die gebruikt is in deze documenten is beschreven in het voorliggende document. Het indeling van dit document is ook gebruikt voor de (uniforme) weergave van de informatie uit twee andere kennisroadmaps: “Warmtesystemen” (Menkveld, Van Loo, Bollwerk, De Boer, Clarijs, Dahlmann, Noorman, Bouw, Van Gemert 30 juni 2018) en “Roadmap Conversie en Opslag” (Rijkers *et al*, 29 juni 2018).

1 Visualisatie van de roadmap




Toekomstbeeld & Trends
in transitie naar het energiesysteem van de toekomst







Knelpunten
op weg naar toekomstbeeld











Onderzoeksagenda
met onderzoeksvragen voortkomend uit de knelpunten



EEN CO2-NEUTRAAL EN JURZAAM ENERGIESYSTEEM MET BEHOUD VAN

-  **Stabiliteit**
-  **Veiligheid**
-  **Betrouwbaarheid**
-  **Maatschappelijke acceptatie**

-  **Sturing op CO₂ reductie**
-  **Mondige & wijze burgers**
-  **Decentrale en minder stuurbare opwek**
-  **Verandering energiebronnen en -dragers**
-  **Flexibiliteit**
-  **Elektrisch vervoer**
-  **Intelligente laadinfrastructuur**
-  **Digitalisering**

GOVERNANCE & SOCIAAL

Top down beleid vs. bottom-up realisatie

Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten

Onduidelijke mandaatstructuur

Niet one size fits all

Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijk

Rol bestaande gasinfrastructuur?

Informatievoorziening niet helder

Onduidelijk beleid (energie-drager)

Verandernelheid vs. Innovatiebehoefte

Verdeling kosten/baten

Investerings-onzekerheid

Tijdelijke oplossing is niet eind-oplossing

Verplaatsings-effecten

Sub-optimale netwerkbenutting

Schone technologieën leiden toch nog tot CO₂

ECONOMISCH

Internationale harmonisatie nodig

Merit order levert prijs=0, dus geen business case

P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand

Schaarste flexibiliteit




Dure/risicovolle nieuwe technologie

Elektrificatie leidt tot congestie/kosten

Meer volatiliteit leidt tot problemen balans-handhaving

Zonder centrales geen fysiek mechanisme voor 50 Hz

TECHNISCH

KORTE TERMIJN	MIDDELLANGE TERMIJN	LANGE TERMIJN
De onderzoeksvragen zijn ingedeeld in drie soorten initiatieven:		
 TRANSITIEPRINCIPES		
 ACUTE VRAGEN		
 EXPERIMENTEN		
7 THEMA'S		
➤ Samen Beslissen		
➤ Markt-mechanismen		
➤ Bestendige investeringen		
➤ Digitalisering		
➤ Keuze Energiedrager		
➤ Infrastructuur		
➤ Flexibiliteit		

Tweystra ©

2 Toekomstbeeld

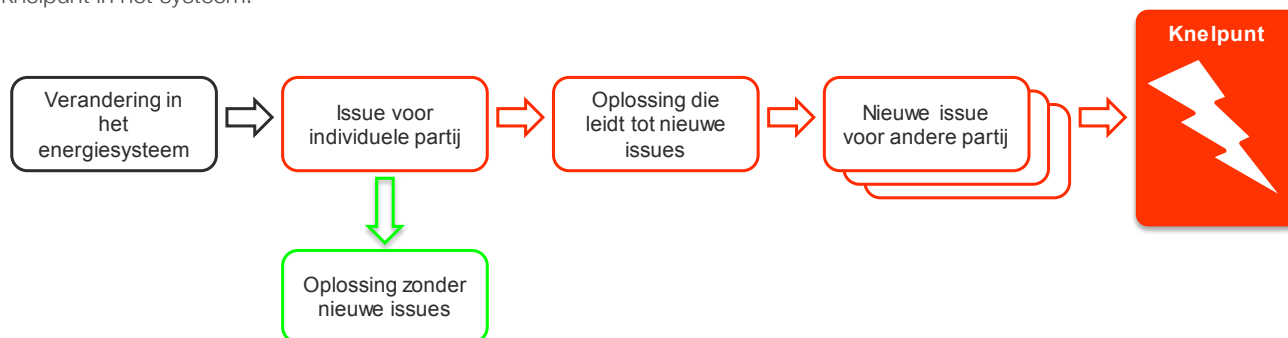
Deze roadmap is niet tot stand gekomen door te redeneren vanuit scenario's en toekomstbeelden. De roadmap is echter wel geformuleerd in termen van klimaatdoelen voor 2050 en 2030.

A	Titel Toekomstbeeld	Een CO₂-neutraal en duurzaam energiesysteem
B	Samenvatting toekomstbeeld	In 2050 is het energiesysteem CO ₂ -neutraal met behoud van maatschappelijk acceptabele normen voor veiligheid, betaalbaarheid en stabiliteit.
C	Aannames	95% CO ₂ -reductie in 2050 t.o.v. 1990 met behoud van de huidige betrouwbaarheid, veiligheid en betaalbaarheid en tevens een maatschappelijke acceptatie van het nieuwe systeem. 49% CO ₂ -reductie in 2030 t.o.v. 1990.
D	Beschrijving van het toekomstbeeld met aandacht voor meervoudig kijken vanuit systeemintegratieperspectief	In 2050 is het energiesysteem CO ₂ -neutraal met behoud van acceptabele normen voor veiligheid, betaalbaarheid en stabiliteit. Dat betekent voor burgers en gebruikers dat het ze het energiesysteem als betaalbaar, veilig en betrouwbaar blijven zien.
	X. Bril maatschappelijke impact: Sociaal-maatschappelijk, ruimtelijk-planologisch	Het energiesysteem is georganiseerd vanuit systeemperspectief, waarbij afwegingen worden gemaakt vanuit maatschappelijk, economisch, ecologisch, bestuurlijk en technisch perspectief en waarbij afhankelijkheden tussen schaalniveaus, partijen en deelsystemen in acht worden genomen.
	Y. Bril technisch, economisch	
	Z. Bril juridisch/bestuurlijk: wettelijk, politiek/bestuurlijk, organisatorisch/governance	
E	Stakeholders	In eerste instantie zullen huidige spelers tegen grenzen aanlopen door veranderingen om tot een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem te komen. Dit zijn de huidige producenten, leveranciers, infrastructuurproviders, gebruikers, overheden en andere spelers die op dit moment een belangrijke rol spelen in het energiesysteem. Er zullen daarnaast nieuwe partijen komen met nieuwe rollen en belangen.
F	Belangrijkste consequenties voor systeemintegratie	De belangrijkste consequenties van dit toekomstbeeld is, dat de aanvullende eisen ten aanzien van CO ₂ -uitstoot ontwikkelingen met zich mee brengen die zorgen voor issues bij de (huidige) stakeholders waarbij doelstellingen voor bijvoorbeeld betaalbaarheid en stabiliteit niet meer verenigbaar zijn, en waarbij het oplossen van deze issues niet mogelijk is zonder dat dit tot nieuwe issues leidt bij andere partijen – een knelpunt dus. Stabiliteit, veiligheid en betaalbaarheid zijn niet meer vanzelfsprekend als het huidige systeem CO ₂ -neutraal moet worden. Dit vergt een gezamenlijke aanpak.

3 Issues en knelpunten

Link tussen toekomstbeelden en issues

Vanuit de klimaatdoelen zijn trends geïdentificeerd. Deze trends leiden tot issues bij betrokken spelers. Het oplossen van deze issues voor de individuele spelers leidt tot nieuwe issues bij andere partijen. Deze causale keten leidt tot een knelpunt in het systeem.



De geïdentificeerde trends en issues zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Trend	Betrokken spelers	Issue
Elektrisch vervoer	Leverancier E, DSO E, Lokale Overheid, Consument	<ul style="list-style-type: none"> • Meer congestie in het netwerk (hoge kosten) • Onduidelijkheid in voorspelling hoeveelheid elektrisch vervoer • Consument stelt aanschaf elektrische auto uit
Decentrale opwekking	Leverancier E, DSO E, Lokale Overheid, Consument, TSO E	<ul style="list-style-type: none"> • Meer congestie in het netwerk (hoge kosten) • Minder omzet leverancier • Lokale regie voor keuze opwekkers • Betrouwbaarheid en leveringszekerheid
Flexibiliteit tegen congestie	Leverancier E, DSO E, Consument, Industrie	<ul style="list-style-type: none"> • Regelgeving niet op ingericht • Klantinteractie is nog niet ingericht
Minder aardgas	Leverancier G, Leverancier W, DSO G, Lokale Overheid, Consument, Industrie, TSO G	<ul style="list-style-type: none"> • Betaalbaarheid gasvoorziening • Onzekerheid over toekomst gasgebruik • Business gasbedrijven verdwijnt
Elektrificatie	Leverancier G, Leverancier W, DSO E, DSO G, Lokale Overheid, Consument, TSO E	<ul style="list-style-type: none"> • Meer congestie in het netwerk (hoge kosten)
Digitalisering	Alle stakeholders	<ul style="list-style-type: none"> • Acceptatie en privacy • Kans: Meer inzicht in het gedrag van het systeem • Kans: Gemakkelijkere communicatie
Andere gassen in het energiesysteem	Leverancier G, DSO G, Consument, TSO G, Industrie	<ul style="list-style-type: none"> • Kans: Nieuwe business voor gasbedrijven • Onzekerheid over geschiktheid infrastructuur • Betrouwbaarheid en leveringszekerheid
Meer (rest)-warmtebronnen	Leverancier W, Industrie	<ul style="list-style-type: none"> • Betrouwbaarheid en leveringszekerheid • Kosten voor ontsluiten van warmtebronnen • Juiste stimulans voor warmtebronnen (CO₂)
Waterstof als energiedrager	Producent Duurzame Energie, TSO G, Consument	<ul style="list-style-type: none"> • Betrouwbaarheid en leveringszekerheid • Onzekerheid over geschiktheid infrastructuur
Mondige en wijze burgers	Lokale Overheid, Consument	<ul style="list-style-type: none"> • 'Geloof' prevaleert boven 'feiten'.
Sturing op CO ₂ reductie	Industrie, DSO, Overheid, Consument, Producent	<ul style="list-style-type: none"> • Sturing op CO₂ levert hogere kosten • Verkeerde incentives • Versterking van andere trends (elektrificatie, warmte)
Toename warmtenetten	Industrie, Leverancier W	<ul style="list-style-type: none"> • Onduidelijkheid invullen rol systeemverantwoordelijke • Lange termijn investering leidt tot lock-in
Andere brandstoffen voor mobiliteit	Consument, Laad- en infraprovider	<ul style="list-style-type: none"> • Onduidelijkheid welke brandstof te kiezen • Onduidelijkheid geschiktheid infrastructuur

Trend	Betrokken spelers	Issue
Meer duurzame energie opwekking	TSO E, DSO E, Producent E	<ul style="list-style-type: none"> Betrouwbaarheid en leveringszekerheid Betaalbaarheid energievoorziening Beschikbare capaciteit transmissienet Ruimtelijke inpassing Meer onzekerheid in het aanbod
Intelligente laadinfrastructuur	Laadinfra provider, Consument, DSO	<ul style="list-style-type: none"> Privacy Kans: Inzetten van laadinfrastructuur voor flexibiliteit
Fossiel verdwijnt	Producent, DSO, TSO, Consument	<ul style="list-style-type: none"> Uitstel van investeringen in benodigde capaciteit Onduidelijkheid over verstandige alternatieven
Flexibiliteit krijgt waarde	Lokale Overheid, Consument, Industrie	<ul style="list-style-type: none"> Onduidelijkheid wie diensten mag aanbieden voor flexibiliteit Kans: aanbieders van flexibiliteit verbeteren business case

Deze trends zijn bij het opstellen van de kennisroadmap gebruikt als tussenresultaat om te komen tot systeemknelpunten.

Overkoepelende knelpunten

Knelpunten die voortkomen uit issues

Onduidelijke mandaatstructuur	Top down beleid vs. bottom-up realisatie	Verdeling kosten/baten	Dure/risicovolle nieuwe technologie	P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand
Onduidelijk beleid (energiedrager)	Schaarste flexibiliteit	Verandersnelheid vs. innovatiebehoefte	Elektrificatie leidt tot congestie/kosten	Zonder centrales geen fysiek mechanisme 50 Hz
Suboptimale netwerkbenutting	Informatievoorziening niet helder	Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijk	Schone technologieën leiden nog tot CO ₂	Merit order levert prijs=0, onduidelijke business case
Investeringsonzekerheid	Verplaatsings-effecten	Internationale harmonisatie nodig	Meer volatiliteit leidt tot problemen balanshandhaving	
Tijdelijke oplossing is niet eindoplossing	Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten e-sys	Niet one size fits all	Rol bestaande gasinfrastructuur?	

Deze systeemknelpunten zijn hieronder uitgewerkt.

A	Titel issue/knelpunt	1 Onduidelijke mandaatstructuur. Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten. Verplaatsingseffecten.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Er is geen heldere governance/mandaatstructuur waardoor niemand kan besluiten voor een bepaalde richting of keuze. Ook de gemeente mist daarbij de wettelijke taak en instrumenten.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Geen enkele partij heeft het mandaat om te besluiten voor een bepaalde richting of keuze, terwijl er meerdere partijen met meerdere belangen zijn. Hierdoor komt de transitie niet op gang en kunnen systeem-brede beslissingen (op verschillende schalen) niet genomen worden. Veel stakeholders wachten op een besluit, bijvoorbeeld over alternatief voor aardgas per regio, gemeente, buurt. Zij leggen die verantwoordelijkheid bij de gemeente, maar de gemeente heeft hiervoor niet de verantwoordelijkheid of het mandaat. Daarnaast ontstijgen keuzes in het energiesysteem het tijdsbestek van de politiek of zelfs van generaties (vergelijk de deltawerken), terwijl de mandaatstructuur voor die langere termijn op dit moment ontbreekt.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	2 Investeringsonzekerheid. Dure/risicovolle nieuwe technologie. Tijdelijke oplossing is niet eindoplossing. Verandersnelheid vs. Innovatiebehoefte.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Om de verandering van het energiesysteem mogelijk te maken is een transitie nodig waarin geïnvesteerd wordt in tijdelijke oplossingen en no-regret oplossingen. Deze oplossingen moeten bijdragen aan de transitie, maar tegelijk ondanks hun tijdelijke aard leiden tot een zo efficiënt mogelijk resultaat uit de benodigde investering.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Onzekerheid over en onbekendheid met het uiteindelijke energiesysteem zorgen voor risico's die het doen van benodigde investeringen tegenwerkt. Dit belemmert de energietransitie en kan leiden tot suboptimale inrichting van het energiesysteem. Businesscases voor optimale energie-oplossingen zijn nu financieel nog niet haalbaar vanwege ontbreken van schaal, tempo en vanwege complexiteit.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	3 Onduidelijk beleid (energiedrager).
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Een CO ₂ -neutraal energiesysteem gaat uit van andere energiedragers dan in het huidige systeem. Er is onduidelijkheid over beleid en welke duurzame energiedragers het best gekozen kunnen worden voor welke toepassingen
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem
D	Impact op systeem	De keuze van energiedrager heeft impact op (het realiseren van) infrastructuur, energieproductie en eindgebruik. Beslissingen die afhankelijk zijn van de keuze van de energiedrager worden niet genomen of uitgesteld. Nieuwe oplossingen komen niet vanzelf tot stand. Daarnaast zijn er gevolgen voor de verschillende deelsystemen binnen het energiesysteem. De keuze van energiedragers vereist een integrale afweging. Keuzes voor energiedragers op lokaal niveau kunnen leiden tot sub-optimalisatie en bottlenecks terwijl het maken van globale keuzes die het hele systeem optimaliseren de transitie vertragen. Om genoeg CO ₂ -neutrale energie te realiseren moet de duurzame energieproductie worden versneld. Met de huidige versnippering en onduidelijkheid verloopt dit niet snel genoeg.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	4 Verdeling kosten en baten.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Gewenste baten van benodigde investeringen komen niet altijd voldoende ten goede aan de partij die hiervoor moet investeren.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem
D	Impact op systeem	Deze investeringen worden niet vanzelfsprekend (of vanzelfsprekend niet) gedaan. Dit vormt een belemmering voor de transitie.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	5 Top-down beleid vs. Bottom-up realisatie.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Beleid wordt top-down opgesteld, terwijl veel besluiten bottom-up genomen worden.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Beleid en praktijk zijn niet automatisch met elkaar in lijn.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Keuzes op lokaal niveau kunnen leiden tot sub-optimalisatie en bottlenecks terwijl het maken van globale keuzes die het hele systeem optimaliseren de transitie vertragen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	6 Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijk. Niet one size fits all.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Lokale en individuele afwegingen van actoren zijn onderling afhankelijk.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem
D	Impact op systeem	Een besluit dat voor de ene actor positief is kan voor de andere negatief uitvallen. Besluiten worden vaak genomen vanuit een enkel perspectief (economisch, technisch, sociaal) terwijl meerdere perspectieven relevant zijn. Het is voor partijen, burgers moeilijk om de (complexe, samenhangende) consequenties van een besluit te overzien. De beste invulling van het energiesysteem in een regio of voor een specifiek geval hangt af van de context en de toepassing. Dit maakt het optimaliseren op systeemniveau lastig of onmogelijk.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	7 Informatievoorziening niet helder.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Het energiesysteem is een groot en complex netwerk dat steeds meer digitaal en slimmer wordt. De digitale infrastructuur wordt daarmee een vitale infrastructuur die ook zelf gemanaged moet worden.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Data en digitalisering zijn nodig voor het regelen van het energiesysteem bestaande uit steeds meer spelers en elementen die gemanaged moeten worden. Digitalisering is een voorwaarde voor het opschalen van het nieuwe duurzame hybride energiesysteem. Deze vitale digitale infrastructuur wordt op dit moment niet op systeemniveau ontworpen en gemanaged. Er missen systeem-brede data- en IT-architecturen en standaarden. Voor het afgestemd managen van het energiesysteem is het essentieel dat data en informatie tussen (een steeds groter aantal) partijen in de keten worden gedeeld. Het is niet duidelijk om welke data dit precies gaat, van welke partijen de data is en wat de rechten en plichten zijn rond het delen van data. Digitale infrastructuur wordt vitale infrastructuur, maar wordt momenteel niet als zodanig beschermd. Internet-of-Things ontwikkelingen rond (o.a.) in-huis apparatuur geeft de gelegenheid tot autonome ontwikkeling die positieve of negatieve impact kan hebben op het energiesysteem. De praktische invulling van digitalisering is op dit moment niet helder en wordt momenteel ad hoc aangepakt.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	8 Internationale harmonisatie nodig.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Het energiesysteem is op internationale schaal gekoppeld. Keuzes hebben op internationale schaal invloed en internationale keuzes hebben invloed op het nationale energiesysteem.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Voor een stabiel energiesysteem in Nederland moeten beslissingen op landsniveau in lijn zijn met beleid van andere landen en de EU.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Nederland dient strategische beslissingen te nemen ten aanzien van haar positionering hierin.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	9 Rol bestaande gasinfrastructuur.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Gebruik van aardgas zal drastisch verminderen. De warmtevraag dient anders ingevuld te worden. Daarvoor zal mogelijk nieuwe infrastructuur aangelegd moeten worden. De bestaande gasinfrastructuur biedt kansen voor andere doeleinden dan transport van aardgas.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Een aardgasloze samenleving betekent dat de huidige rol van aardgas voor verwarming en als grondstof anders ingevuld moet worden. Het anders invullen van de warmtevraag vereist een aanpassing van de infrastructuur en apparaten bij eindgebruikers. Dit leidt mogelijk ook tot andere rollen voor de huidige infrastructuurbeheerders en/of ruimte voor nieuwe partijen. De kosten van de gasinfrastructuur worden thans gesocialiseerd over de aangesloten klanten. Als de infrastructuur minder gebruikt wordt zullen deze kosten per aansluiting gaan oplopen. De bestaande gas infrastructuur biedt kansen voor transport van andere gassen (bijvoorbeeld biogas/H ₂) en de lokale/nationale inzet voor opslag en voor conversie, bijvoorbeeld voor het bieden van flexibiliteit. Deze toepassingen hebben impact op de rest van het energiesysteem, de lokale inpassing en vergen technische aanpassingen aan het netwerk en aanpassingen aan de regelgeving.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	10 Meer volatiliteit leidt tot problemen balanshandhaving. Elektrificatie leidt tot congestie/kosten. Suboptimale netwerkbenutting.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Toenemende elektrificatie en duurzame productie van elektriciteit zorgen voor toenemende vraag, een wijzigend vraagpatroon en een variabel aanbodpatroon.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Dit zorgt voor een uitdaging om vraag en aanbod op alle tijdschalen te matchen. Dit geldt zowel voor het balanceren van volumes als voor het zorgen voor voldoende transport- en distributie-capaciteit. Deze uitdagingen spelen op zowel het niveau van de regionale als de nationale netbeheerder. Deze problematiek dient daarom gezamenlijk aangepakt te worden. De elektrische infrastructuur wordt steeds meer het samenspel van lokale, regionale en (inter) nationale deelsystemen. De transities op deze schaalniveaus beïnvloeden elkaar. Voor keuzes ten aanzien van het ontwerp en de inrichting van de elektrische infrastructuur zijn integrale afwegingen nodig die rekening houden met onderlinge afhankelijkheden en gekozen transitiepaden. Elektrificatie vergt capaciteitsuitbreidingen in de infrastructuur die aanzienlijke extra kosten moet zich mee brengen en aanzienlijke tijdsdruk vanwege personeelstekort. De huidige werkwijze van en regelgeving voor netbeheerders past niet in alle gevallen bij het nieuwe energiesysteem, waardoor de infrastructuur niet altijd optimaal benut wordt.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	11 Schaarste flexibiliteit.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Flexibiliteit is nodig voor het praktisch en betaalbaar matchen van vraag en aanbod voor elektriciteit en is daarmee randvoorwaardelijk voor een werkend elektriciteitssysteem. Daarnaast biedt flexibiliteit mogelijkheden om pieken in de belasting van de infrastructuur te verlagen waardoor minder capaciteit in de infrastructuur nodig is. Om deze flexibiliteit aan te wenden zijn nog belangrijke keuzes te maken en is meer inzicht en slimheid van het netwerk vereist.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	<p>Inzicht in enerzijds de behoefte aan flexibiliteit (tijdschaal, locatie, patroon) en anderzijds de mogelijkheden (technologieën, omvang/potentieel, locatie, partijen die kunnen/willen leveren), is nodig om onderbouwde keuzes te maken die optimaal bijdragen aan het systeem en bij het ontwerp van het systeemmechanisme voor flexibiliteit. Dit inzicht ontbreekt nog.</p> <p>Flexibiliteit kan worden geleverd door elke aangesloten partij, maar voor elke partij zijn de belangen anders, evenals de bijbehorende business case. Het business model en de bijbehorende governance met nieuwe of bestaande actoren is nog niet helder.</p> <p>Flexibiliteit kan worden ingezet door te handelen op de handelsmarkt voor energie, maar kan ook ingezet worden in de vorm van systeemdiensten met eveneens een groot maatschappelijk belang. De wisselwerking/spanning tussen deze belangen moet worden geadresseerd bij de vaststelling van het systeemmechanisme voor flexibiliteit.</p> <p>Op dit moment is er geen marktmechanisme dat rekening houden met lokaliteit van vraag een aanbod waardoor deze niet bij (kunnen) dragen aan congestie management, aangezien congestie een lokale aangelegenheid is.</p> <p>Er mist een marktmechanisme waarmee vraag en aanbod van flexibiliteit geregeld kunnen worden met de juiste afweging tussen toepassing voor balancering en congestiemanagement en zonder dat daarbij ongewenste (of perverse) prikkels worden veroorzaakt.</p> <p>Om op het juiste moment benodigde en beschikbare flexibiliteit aan te kunnen sturen en hierop te kunnen vertrouwen zijn vooruitzicht, inzicht, control en monitoring nodig voor vraag, aanbod, netwerkbelasting en flexibiliteit.</p>
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	12 Zonder centrales geen fysiek mechanisme 50Hz.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	De huidige fossiele centrales leveren een inherent fysiek mechanisme (draaiende massa) dat de 50Hz netfrequentie levert.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Het afnemende aandeel van traditionele centrales in de productie van elektriciteit levert op termijn uitdagingen op voor de frequentiestabiliteit van het elektriciteitssysteem, zelfs als vraag en aanbod in balans zijn.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

A	Titel issue/knelpunt	13 Merit order levert prijs=0, onduidelijke business case. P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand. Schone technologieën leiden nog tot CO₂.
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Een deel van de huidige marktmechanismen zijn niet houdbaar gedurende de energietransitie en sturen niet naar de optimale situatie in termen stabiliteit, betaalbaarheid, acceptatie en sturing op CO ₂ -neutraal en duurzaam.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Een CO ₂ -neutraal en duurzaam energiesysteem.
D	Impact op systeem	Het merit-order systeem voor de wholesale elektriciteitsprijs werkt niet als praktisch alle productie verwaarloosbare marginale kosten hebben. Een deel van de marktmechanismen vormen een drempel voor de energietransitie en dragen niet bij aan een optimale energieketen. Er mist een duurzaam keten-marktmechanisme. Fiscaliteit leidt op dit moment niet of nauwelijks tot juiste prikkels bij gebruikers.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Zie uitwerking programmalijnen.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Zie uitwerking programmalijnen.

De vragen die beantwoord moeten worden om de knelpunten aan te pakken zijn geclusterd in 8 thema's:

Keuze energiedrager	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke energiedrager zetten we waarvoor in? ▶ Hoe komen we tot overall de beste keuzes? (Exergie) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Waar komt de energie van de gekozen energiedragers vandaan?
Bestendig investeren	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe houden we investering en risico in evenwicht? ▶ Hoe kan de risicovolle periode overbrugd worden? ▶ Hoe zorgen we ervoor dat beslissingen bestendig zijn (los van politiek)? ▶ Hoe komen we tot een haalbare business case voor alle relevante partijen? ▶ Hoe regelen we de financiering rond bestendig investeren? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe zorgen we voor duurzame keuzes of tijdelijke no-regret keuzes? ▶ Hoe zorgen we voor gelijk oplopen vraag en aanbodontwikkelingen? ▶ Hoe regelen we de governance? ▶ Welke mandaten zijn nodig voor elke partij? ▶ Welke regelgeving is nodig ten aanzien van beleid en (lokale) keuzes?
Samen beslissen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe stemmen we op verschillende schaalniveaus beleid en lokale keuzes met elkaar af? ▶ Hoe brengen we onderling afhankelijke lokale en individuele afwegingen bij elkaar? ▶ Hoe zorgen we voor herhaalbare en opschaalbare lokale oplossingen? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe komen we tot een haalbare business case voor alle relevante partijen? ▶ Welke governance is nodig rondom gezamenlijk besluiten? ▶ Welke informatie is nodig voor het globale besluitvormingsproces? ▶ Hoe zorgen we voor NL/EU regelgeving en harmonisatie? ▶ Hoe regelen we de verdeling van kosten en baten?
Infrastructuur: elektrisch	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe ontwerpen we onze infrastructuur optimaal, stabiel, betaalbaar, tijdig? ▶ Welke regelgeving en governance is nodig t.a.v. infrastructuur? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe regelen we 50Hz frequentie? ▶ Hoe wordt de financiering ingericht voor elektrische infrastructuur?
Flexibiliteit	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe zorgen we ervoor dat volatilititeit in aanbod en beschikbare flexibiliteit in balans zijn? ▶ Hoe bepalen we flexibiliteit beschikbaar/nodig. Welke keuzes moeten we hier nog maken? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe kan dit geoperationaliseerd worden? ▶ Welke governance is nodig rond flexibiliteit? ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. flexibiliteit?
Infrastructuur: algemeen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hoe zetten we de gasinfra in en wat is hier voor nodig? ▶ Welke nieuwe infrastructuur is nodig (H₂/HVO/warmte/...) ▶ Hoe wordt de financiering ingericht voor gas- en andere infrastructuur? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke governance is nodig voor gas- en andere infrastructuur? ▶ Welke regelgeving is nodig voor de toekomstige inzet van gasinfrastructuur?
Marktmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke zaken kunnen/moeten via marktmechanismen geregeld worden op elke tijdschaal? ▶ Welke marktmechanismen zijn nodig? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke governance is nodig rond markten? ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. marktmechanismen?
Digitalisering	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke informatievoorziening is voor elk doel nodig? ▶ Hoe richten we dit in? ▶ Hoe garanderen we de cybeveiligheid van het energiesysteem? 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welke governance is nodig rondom digitalisering? ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. informatievoorziening?

Deze thema's vormen de programmalijnen van de kennis- en innovatieagenda.

5 Kennis- en innovatieagenda

De kennis- en innovatieagenda voor Management en Ontwerp van het Energiesysteem is opgesteld aan de hand van de geformuleerde thema's. Per thema volgen hieronder een korte beschrijving, de kennis- en beleidsvragen en de kwesties die geadresseerd dienen te worden, de zaken die ontwikkeld moeten worden, de tijdslijnen voor deze ontwikkelingen en een lijst met stakeholders die betrokken moeten worden bij deze onderwerpen.

Voor de te ontwikkelen resultaten binnen de thema's wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten ontwikkeling:

- *Activiteiten rond transitieprincipes* (in geel weergegeven op de tijdslijn): Dit zijn activiteiten die vanuit een holistische en/of "green field" gedachte basisprincipes ten aanzien van het energiesysteem en de energietransitie uitwerken. De uitkomsten van deze activiteiten zijn typisch van invloed op veel andere vraagstukken en keuzes in het energiesysteem en/of leveren verhelderende nieuwe inzichten op.
- *Acute vragen* (in rood weergegeven op de tijdslijn): Dit zijn activiteiten die specifieke vragen die op dit moment leven onder stakeholders rond een bepaald onderwerp adresseren en waarbij door de stakeholders gezamenlijk naar een antwoord wordt gezocht. De uitkomsten van deze activiteiten zijn typisch direct toepasbaar en toetsbaar in pilots/experimenten.
- *Experimenten* (in grijs weergegeven op de tijdslijn): In experimentele activiteiten wordt proefondervindelijk gezocht naar antwoorden op (acute) vragen die niet eenvoudig zijn te adresseren door bijvoorbeeld theoretisch onderzoek of simulatie - zoeken naar oplossingen door het gewoon te doen. Daarnaast kunnen in experimentele activiteiten (deel) oplossingen die in eerdere activiteiten zijn ontwikkeld geïntegreerd en in de praktijk getoetst worden (praktijk-proef). Ten slotte kan een experimenteel initiatief gebruikt worden om oplossingen uit te proberen die in het huidige energiesysteem niet uitgeprobeerd kunnen worden (vanwege bijvoorbeeld regelgeving of technische obstakels).

Bij ieder resultaat is tussen haakjes aangeduid welke soort ontwikkeling nodig is.

Thema 1 Keuze Energiedrager

Voor een CO₂-neutraal energiesysteem is een transitie naar nieuwe energiedragers van essentieel belang. De mogelijkheden voor CO₂-neutrale energiedragers zijn elektriciteit, moleculen en warmte. Voor een CO₂-neutrale energiedrager is het nodig dat er voldoende CO₂-neutrale energieproductie is.

Te adresseren binnen dit thema

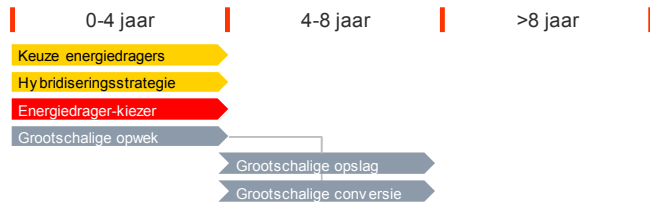
- Een CO₂-neutraal energiesysteem gaat uit van andere energiedragers dan in het huidige systeem. Er is onduidelijkheid over beleid en welke duurzame energiedragers het best gekozen kunnen worden voor welke toepassingen.

- De keuze van energiedrager heeft impact op (het realiseren van) infrastructuur, energieproductie en eindgebruik. Daarnaast zijn er gevolgen voor de verschillende deelsystemen binnen het energiesysteem. De keuze van energiedragers vereist een integrale afweging.
- Keuzes voor energiedragers op lokaal niveau kunnen leiden tot sub-optimalisatie en bottlenecks terwijl het maken van globale keuzes die het hele systeem optimaliseren de transitie vertragen.
- Om genoeg CO₂-neutrale energie te realiseren moet de duurzame energieproductie worden versneld. Met de huidige versnippering, lokale initiatieven, inspraakprocedures verloopt dit niet snel genoeg.
- Om het systeem betrouwbaar te houden bij een groter aandeel duurzame energieproductie is lange termijn opslag nodig.
- Het integreren van nieuwe energiedragers in het energiesysteem vereist conversie technologie en aanpassing van regelgeving.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Integrale analyse/toekomstbeeld/roadmap als input voor beleid t.a.v. de inzet van welke energiedrager voor welke toepassing om het CO₂-neutrale energiesysteem te realiseren. Rekening houdend met de impact van keuzes op verschillende deelsystemen, op (het realiseren van) infrastructuur, energieproductie en eindgebruik, met inachtneming van ontwikkelingen in Europa/omliggende landen.
- Hybridiseringsstrategie voor het bepalen van de optimale wijze om het fossiele energiesysteem via gemengd fossiel/duurzaam stapsgewijs te veranderen naar duurzaam.
- Energiedrager-kiezer die op verschillende schaalniveaus afwegingskaders biedt voor het maken keuzes t.a.v. energiedragers. De energiedrager-kiezer optimaliseert op basis de combinatie van de lokale situatie én het integrale toekomstbeeld en verandert conform roadmap.
- Nationale programma's grootschalige duurzame opwek op basis van integrale en nationale afweging voor grootschalige opwek, bijbehorende marktmechanismen en wet- en regelgeving. Deze programma's versnellen de duurzame energieproductie.
- Nationale programma's grootschalige opslag en conversie op basis van integrale en nationale afweging voor grootschalige opslag en conversie. Deze programma's geven invulling aan het toekomstbeeld voor energiedragers door in te spelen op behoefte aan lange termijn opslag en conversie tussen energiedragers.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- TSO's
- DSO's
- Energieleveranciers
- Producenten
- Installateurs
- Technologie leveranciers
- Consumenten
- Industrie
- Overheid (lokaal, regionaal en landelijk)
- Programma Verantwoordelijken

Thema 2 Samen Beslissen

Keuzes in het energiesysteem zijn lastig omdat het een complex systeem betreft (system of systems) waarbij keuzes die goed lijken op de ene plek of voor de ene partij aanzienlijke negatieve gevolgen kunnen hebben op de andere plek of voor de andere partij. Dit thema maakt samen beslissen mogelijk.

Te adresseren binnen dit thema

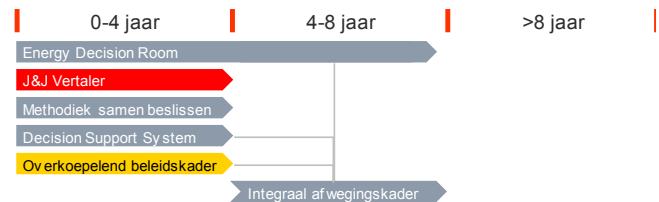
- Er is geen heldere governance/mandaatstructuur waardoor niemand kan besluiten voor een bepaalde richting of keuze.
- Lokale en individuele afwegingen van actoren zijn onderling afhankelijk, een besluit dat voor de ene actor positief is kan voor de andere negatief uitvallen.
- Besluiten worden vaak genomen vanuit een enkel perspectief (economisch, technisch, sociaal) terwijl meerdere perspectieven relevant zijn.
- Beleid wordt top-down opgesteld, terwijl veel besluiten bottom-up genomen worden. Beleid en praktijk zijn daarmee niet automatisch met elkaar in lijn.
- Onzekerheid over en onbekendheid met het uiteindelijke energiesysteem belemmert het nemen van weloverwogen doelgerichte beslissingen om stappen te maken in de transitie c.q. om beslissingen te nemen die leiden tot een stabiel systeem.
- Het is voor partijen, burgers moeilijk om de (complexe, samenhangende) consequenties van een besluit te overzien.
- Beslissingen op landsniveau moeten in lijn zijn met beleid van andere landen en de EU.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Energy Decision Room voor inbrengen en ontwikkelen van interdisciplinaire kennis en best practices om de lokale en regionale energietransitie te steunen. (experiment)
- Jip & Janneke vertaler met voorbeeldenboek en visualisaties om de complexiteit van het energiesysteem en de consequenties van keuzes in heldere en begrijpelijke taal uit te leggen zodat diverse investeerders keuzes durven maken. (acute vraag)

- Decision Support System dat inzicht geeft in wederzijdse afhankelijkheden en effecten van maatregelen analyseert inclusief gevolgen voor andere partijen (experiment)
- Overkoepelend beleidskader waarin motivaties en belangen (bijv. kosten vs. Stabiliteit vs. Duurzaamheid vs. Comfort vs. autonomie) tegen elkaar afgewogen worden en dat als leidraad kan dienen voor beleidskeuzes. (transitieprincipes)
- Integraal afwegingskader om keuzes op het ene schaalniveau af te wegen tegen en/of in lijn te brengen met keuzes op andere schaalniveaus (internationaal/landelijk/regionaal/lokaal/ individueel) vanuit verschillende perspectieven (economisch/sociaal/technisch/ecologisch). (experiment)
- Methodiek om samen tot afgewogen besluiten te komen die, ondanks de verschillende belangen voor alle stakeholders acceptabel zijn en die vanuit de verschillende schaalniveaus en perspectieven tot het gewenste effect leiden. (experiment)

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- Lokale ecosystemen
- Bewoners
- Gemeentes
- Provincies
- Rijksoverheid
- DSO's
- TSO's
- Financiers
- Industrie/grootgebruikers
- Producenten
- Leveranciers
- Investeerders
- Woningcorporaties

Thema 3 Bestendig Investeren

Om tot een duurzaam hybride energiesysteem te komen zijn aanzienlijke investeringen nodig die vanwege onduidelijkheid en verschillende belangen niet vanzelf op gang komen. Dit thema ontwikkelt instrumenten om investeringen te stimuleren, bestendig te maken en om belemmeringen op te lossen.

Te adresseren binnen dit thema

- De transitie van het energiesysteem vraagt om investeringen in tijdelijke oplossingen en no-regret-oplossingen. Deze oplossingen moeten bijdragen aan de transitie, maar tegelijk ondanks hun tijdelijke aard leiden tot een zo efficiënt mogelijk resultaat uit de benodigde investering.
- Gewenste baten van benodigde investeringen komen niet altijd voldoende ten goede aan de partij die hiervoor moet investeren, waardoor deze investering niet vanzelfsprekend (of vanzelfsprekend niet) gedaan wordt. Dit vormt een belemmering voor de transitie.

- Onzekerheid over en onbekendheid met het uiteindelijke energiesysteem zorgen voor risico's die het doen van investeringen belemmert.
- De keuzes in het energiesysteem ontstijgen het tijdsbestek van de politiek of zelfs van generaties (vergelijk de deltawerken), terwijl de mandaatstructuur voor die langere termijn op dit moment ontbreekt.
- Businesscases voor optimale energie-oplossingen zijn nu financieel nog niet haalbaar vanwege ontbreken van schaal, tempo en vanwege complexiteit.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Scenario-gebaseerde ontwikkeling, schets en roadmap organisatie, financiering en wetgeving rond het toekomstige energiesysteem. Beredeneerd vanuit het huidige systeem én vanuit een denkbeeldige green field situatie.
- Uitwerking van rol, taken en verantwoordelijkheden en instrumentarium van een 'deltacommissaris energie' met mandaat die integrale afweging maakt o.b.v. langere termijn behoefte, los van de (tijdelijke) belangen van stakeholders en politiek.
- Ontwikkelen en in de praktijk valideren van innovatieve samenwerkingsvormen die tot andere marktwerking, participatie en schaalniveau van oplossing leiden. Met opties voor waardering van flexibiliteit.
- Ontwikkelen van principes en mechanismen voor collectieve businesscases om vanuit de collectieve maatschappelijke afweging te investeren in plaats van op individuele basis om investeringsprojecten met split incentives mogelijk te maken.
- Rekeninstrument en methodiek waarmee lasten en baten evenredig verdeeld kunnen worden over partijen en waarmee tot gezamenlijke afspraken gekomen kan worden.
- Onderzoek naar de mogelijkheden en randvoorwaarden voor subsidies die verduurzaming stimuleren vanuit een integraal maatschappelijk belang zonder perverse prikkels.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- DSO's
- TSO's
- Min Fin
- Min EZ
- Industrie
- Provincie/gemeente
- Energieproducenten
- Energieleveranciers
- Bewoners
- Financiers
- Investeerders

Thema 4 Infrastructuur: Algemeen

Gebruik van aardgas zal drastisch verminderen. De warmtevraag dient anders ingevuld te worden. Daarvoor zal mogelijk nieuwe infrastructuur aangelegd moeten worden. De bestaande gasinfrastructuur biedt kansen voor andere doeleinden dan transport van aardgas.

Te adresseren binnen dit thema

- Een aardgasloze samenleving betekent dat de huidige rol van aardgas voor verwarming en als grondstof anders ingevuld moet worden (thema keuze energiedrager). Het anders invullen van de warmtevraag vereist een aanpassing van de infrastructuur en apparaten bij eindgebruikers. Dit leidt mogelijk ook tot andere rollen voor de huidige infrastructuurbeheerders en/of ruimte voor nieuwe partijen.
- De kosten van de gasinfrastructuur worden thans gesocialiseerd over de aangesloten klanten. Als de infrastructuur minder gebruikt wordt zullen deze kosten gaan oplopen.
- De bestaande gas infrastructuur biedt kansen voor transport van andere gassen (bijvoorbeeld biogas/H₂) en de lokale/nationale inzet opslag en conversie, bijvoorbeeld voor het bieden van flexibiliteit. Deze toepassingen hebben impact op de rest van het energiesysteem, de lokale inpassing en vergen technische aanpassingen aan het netwerk en aanpassingen aan de regelgeving.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Governance-model voor de rolverdeling, verantwoordelijkheden en rechten en plichten voor netbeheer en systeembeheer waarmee netbeheer van bestaande en nieuwe infrastructuur optimaal kan worden ingevuld in het nieuwe energiesysteem, en waarbij nieuwe energiedragers, opslag en conversie en flexibiliteit optimaal benut kunnen worden.
- Kostenverdeling voor de aanleg en onderhoud van de infrastructuur in het gehele energiesysteem (elektra, gas en anders) op basis van bijvoorbeeld "ketenbeprijzing", waarbij het daadwerkelijke beslag op het energiesysteem in acht wordt genomen zodanig dat het toekomstige energiesysteem betaalbaar, betrouwbaar en bereikbaar blijft voor iedereen.
- Studie en scenario's voor het inpassen van alternatief gas in de bestaande infrastructuur en de technische, economische en regulatorische haalbaarheid daarvan. Hierbij wordt gekeken naar het potentieel en de waarde van alternatieve gassen in het bestaande aardgasnet en wat de impact is voor netbeheerders, gebruikers en producenten.
- Een strategie voor het inpassen van conversie en opslag in de gasinfrastructuur. Hiermee wordt gekeken naar de meest kansrijke technologieën en de locatie waar deze het beste toe te passen zijn. Er wordt een integrale afweging voor de impact op de rest van het energiesysteem gemaakt.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- TSO's
- DSO's
- Andere infrastructuurproviders (o.a. warmte)
- Energieleveranciers
- Producenten
- Consumenten
- Industrie
- Overheid (lokaal, regionaal en landelijk)
- Programma Verantwoordelijken
- Aggregators
- Opslag- en conversie-partijen
- Bewoners

Thema 5 Infrastructuur: Elektrisch

Elektrificatie van de energievraag en verduurzaming van het energieaanbod heeft grote impact op de elektrische infrastructuur. Technische innovaties, slimmer gebruik van infrastructuur en maatschappelijke keuzes zijn nodig voor een infrastructuur die stabiel is, maar ook betaalbaar blijft.

Te adresseren binnen dit thema

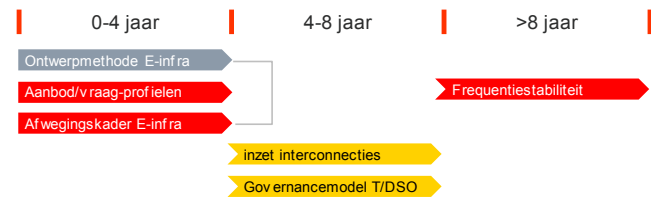
- De elektrische infrastructuur wordt steeds meer het samenspel van lokale, regionale en (inter)nationale deelsystemen. De transitie op deze schaalniveaus beïnvloeden elkaar. Voor keuzes ten aanzien van het ontwerp en de inrichting van de elektrische infrastructuur zijn integrale afwegingen nodig die rekening houden met onderlinge afhankelijkheden en gekozen transitiepaden.
- Toenemende elektrificatie zorgt voor een wijzigend vraagpatroon en een variabel aanbodpatroon. Dit zorgt voor een uitdaging om vraag en aanbod op alle tijdschalen te matchen. Dit geldt zowel voor het balanceren van volumes als voor het zorgen voor voldoende transport- en distributiecapaciteit. Deze uitdagingen spelen op zowel het niveau van de regionale als de nationale netbeheerder. Deze problematiek dient daarom gezamenlijk aangepakt te worden.
- Elektrificatie vergt capaciteitsuitbreidingen in de infrastructuur die aanzienlijke extra kosten moet zich mee brengen en aanzienlijke tijdsdruk vanwege personeelstekort.
- Het afnemende aandeel van traditionele centrales in de productie van elektriciteit levert op termijn uitdagingen op voor de frequentiestabiliteit van het systeem door het verdwijnen van roterende massa (generatoren) als mechanisme.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Integrale ontwerpmethodologie voor lokale elektriciteitsinfrastructuur. Deze methodologie nemen onderlinge afhankelijkheden van het systeem in acht en bepalen de optimale inrichting van lokale systemen. Mogelijk vergt optimalisatie verruiming van regelgeving.
- Toekomstige aanbod en vraagprofielen voor elektriciteit die inzicht geven in welke vraag en welk aanbod op welk moment op welke tijdschaal gematcht moeten worden. Dit bepaalt keuzes ten aanzien van balancering en transportcapaciteit.

- Afwegingskader voor keuzes in de elektriciteitsinfrastructuur. Holistische toetsing van keuzes o.b.v. impact op klimaat, behoefte, maatschappelijke passing, interregionale optimalisatie en randvoorwaarden zoals de beschikbaarheid van human capital.
- Studie voor nationale positionering en strategische keuzes ten aanzien van de het nationale systeem en de (mate van) afhankelijkheid en integratie van het internationale systeem (interconnecties).
- Een toekomstgericht governance model voor samenwerking tussen regionale en nationale netbeheerder om de stabiliteitshandhaving te faciliteren en te bevorderen.
- Technische oplossingen voor het handhaven van de frequentiestabiliteit (los van balancering) als het aandeel traditionele centrales afneemt, waarbij ook "out-of-the-box" naar een andere invulling zou kunnen worden gekeken (bijv. DC).

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- DSO-E's
- TSO-E (NL/Internationaal)
- Leveranciers
- Producenten
- Programmaverantwoordelijken
- Corporaties
- Industrie
- Consumenten
- Overheid

Thema 6 Flexibiliteit

Flexibiliteit is nodig voor het praktisch en betaalbaar matchen van vraag en aanbod voor elektriciteit en is daarmee randvoorwaardelijk voor een werkend elektriciteitssysteem. Daarnaast biedt flexibiliteit mogelijkheden om pieken in de belasting van de infrastructuur te verlagen waardoor minder capaciteit in de infrastructuur nodig is. Om deze flexibiliteit aan te wenden zijn nog belangrijke keuzes te maken en is meer inzicht en slimheid van het netwerk vereist.

Te adresseren binnen dit thema

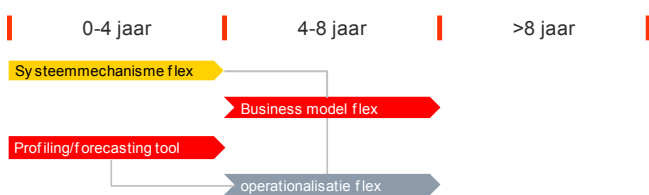
- Inzicht in enerzijds de behoefte aan flexibiliteit (tijdschaal, locatie, patroon) en anderzijds de mogelijkheden (technologieën, omvang/potentieel, locatie, partijen die kunnen/willen leveren), is nodig om onderbouwde keuzes te maken die optimaal bijdragen aan het systeem en bij het ontwerp van het systeemmechanisme voor flexibiliteit. Dit inzicht ontbreekt nog.
- Flexibiliteit kan worden geleverd door elke aangesloten partij, maar voor elke partij zijn de belangen anders, evenals het bijbehorende business case. Het business model en de bijbehorende governance met nieuwe of bestaande actoren is nog niet helder.

- Flexibiliteit kan worden ingezet door te handelen op de handelsmarkt voor energie, maar kan ook ingezet worden in de vorm van systeemdiensten met eveneens een groot maatschappelijk belang. De wisselwerking/spanning tussen deze belangen moet worden geadresseerd bij de vaststelling van het systeemmechanisme voor flexibiliteit.
- Om op het juiste moment benodigde en beschikbare flexibiliteit aan te kunnen sturen zijn en hierop te kunnen vertrouwen zijn vooruitzicht, inzicht, control en monitoring nodig voor vraag, aanbod, netwerkbelasting en flexibiliteit.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Een systeemmechanisme voor flexibiliteit waarbij, vanuit een macroscopische analyse van behoefte en potentiële beschikbaarheid aan flexibiliteit en inzicht in wanneer flexibiliteit op welke tijdschaal nodig is, wordt bepaald welke flexibiliteitsbronnen/technologieën (industrie, huishoudens, ...) in welke mate worden aangesproken en welke afspraken nodig zijn.
- Flexprofiling en -forecasting tools dat op nationaal en lokaal niveau inzicht geeft in flexpotentie (waar is mogelijk flexibiliteit te creëren), te verwachten vraag en aanbod (bijv. o.b.v. weer, tijd van de dag, tijd van het jaar, ...) en te verwachten beschikbaarheid van flex (idem) als input voor strategische, tactische en operationele beslissingen in het elektriciteitssysteem.
- Business modellen, business cases en incentives voor flexibiliteit in verschillende sectoren die nodig zijn om het genoemde systeemmechanisme voor stakeholders haalbaar te maken. Aandachtspunt hierbij is de verhouding tussen flexibiliteit inzetten op de handelsmarkt en ten behoeve van systeemdiensten. Hierbij wordt ook gekeken naar transformaties van het ecosysteem en het ontstaan van nieuwe rollen en governance structuren.
- Operationele inrichting van het systeemmechanisme waarmee de ontsluiting en de aansturing van flexibiliteit het juiste inzicht (ICT) en vooruitzicht (forecasting) mogelijk wordt.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- Eindgebruikers vanuit alle sectoren
- DSO
- TSO
- Overheid
- Aggregators
- Installateurs
- Producenten
- Leveranciers
- Programmaverantwoordelijken
- Overheden

Thema 7 Marktmechanismen

Marktmechanismen zijn een middel voor het management van het energiesysteem. Binnen dit thema worden marktmechanismen ontwikkeld die sturen op een duurzaam en CO₂-vrij energiesysteem en die de transitie stimuleren met behoud van betaalbaarheid, acceptatie en stabiliteit.

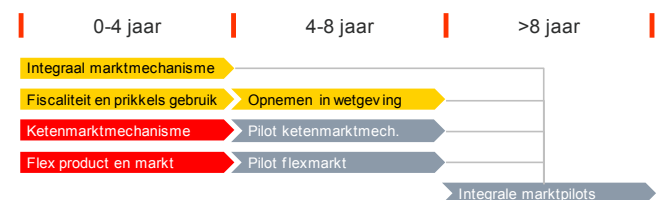
Te adresseren binnen dit thema

- Een deel van de huidige marktmechanismen sturen niet naar de optimale situatie in termen stabiliteit, betaalbaarheid, acceptatie en sturing op CO₂-neutraal en duurzaam.
- Een deel van de marktmechanismen vormen een drempel voor de energietransitie en dragen niet bij aan een optimale energieketen. Er mist een duurzaam keten-marktmechanisme.
- Fiscaliteit leidt op dit moment niet of nauwelijks tot juiste prikkels bij gebruikers.
- Op dit moment is er geen marktmechanisme dat rekening houden met lokaliteit van vraag een aanbod waardoor deze niet bij (kunnen) dragen aan congestie management, aangezien congestie een lokale aangelegenheid is.
- Er mist een marktmechanisme waarmee vraag en aanbod van flexibiliteit geregeld kunnen worden met de juist afweging tussen toepassing voor balancering en congestie-management en zonder dat daarbij ongewenste (of perverse) prikkels worden veroorzaakt
- Er zijn en komen allerlei initiatieven rond marktmechanismen die geïntegreerd en opgeschaald moeten worden.

Te ontwikkelen binnen dit thema

- Toekomstbeeld van integraal marktmechanisme op basis van integrale "kostenindex" waarin de verschillende KPI's (stabiliteit/kosten/acceptatie/duurzaamheid) in de juiste verhouding zijn meegenomen
- Uitgewerkte en via simulaties getoetste ketenmarktmechanisme dat geanalyseerde drempels voor de transitie wegneemt en dat beter stuurt op CO₂-uitstoot en kostenveroorzaking en dat internationaal afgestemd is.
- Uitgewerkte fiscale wetgeving die de prikkels bij gebruikers oplevert richting minder verbruik, meer gebruik van duurzame energie en flexibel vraag en aanbod, inclusief beeld van (zo minimaal mogelijk) effect op de schatkist.
- Productspecificaties voor flexibiliteit ten behoeve van balancering en congestie-management en bijbehorende flex-marktmechanisme waarin lokaliteit van energievraag en -aanbod en flexibiliteit worden meegenomen én dat de gewenste prijsprikkels oplevert, getoetst op impact in de markt (simulatie).
- Operationele pilot voor opschaling, integratie van marktmechanismen waarin haalbaarheid en effecten worden getoetst.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- Leveranciers
- BRP
- TSO
- DSO
- Aggregators
- Overheid
- Bewoners
- Industrie/grootgebruikers

Thema 8 Digitalisering

Het energiesysteem is een groot en complex netwerk dat steeds meer digitaal en slimmer wordt. De digitale infrastructuur wordt daarmee een vitale infrastructuur die ook zelf gemanaged moet worden. Binnen dit thema wordt een robuuste en veerkrachtige digitale infrastructuur ontwikkeld.

Te adresseren binnen dit thema

- Data en digitalisering is nodig voor het regelen van het energiesysteem bestaande uit steeds meer spelers en elementen die gemanaged moeten worden. Digitalisering is een voorwaarde voor het opschalen van het nieuwe duurzame hybride energiesysteem. Deze vitale digitale infrastructuur wordt op dit moment niet op systeemniveau ontworpen en gemanaged. Er missen systeem-brede data- en IT-architecturen en standaarden.
- Voor het afgestemd managen van het energiesysteem is het essentieel dat data en informatie tussen (een steeds groter aantal) partijen in de keten worden gedeeld. Het is niet duidelijk om welke data dit precies gaat, van welke partijen de data is en wat de rechten en plichten zijn rond het delen van data.
- Digitale infrastructuur wordt vitale infrastructuur, maar wordt momenteel niet als zodanig beschermd.
- Internet-of-Things ontwikkelingen rond (o.a.) in-huis apparatuur geeft de gelegenheid tot autonome ontwikkeling die positieve of negatieve impact kan hebben op het energiesysteem.
- De praktische invulling van digitalisering is op dit moment niet helder en wordt momenteel ad hoc aangepakt.
- Te ontwikkelen binnen dit thema
- Raamwerk voor digitale infrastructuur die het regelen (monitoren/aansturen/afrekenen) en het opschalen van het nieuwe energiesysteem op uniforme wijze mogelijk maakt bestaande uit a) IT-architecturen, b) benodigde standaarden/interoperabiliteit voor informatie-uitwisseling tussen energiebedrijven en voor informatie over of data voor de aansturing van infrastructuur en in-huis apparatuur en c) centrale/decentrale datasystemen. Daarbij worden kansen/bedreigingen door autonome ontwikkelingen als IoT geadresseerd. Te toetsen in praktische casussen.
- Regelgeving, beleid, rollenmodel, standaarden en technische invulling voor het doelgericht (welke data moet/mag/mag niet gedeeld worden en wie mag erbij?), eenvoudig, veilig, controleerbaar en acceptabel (hoe?) data delen tussen partijen in het energiesysteem. Te toetsen aan de hand van praktijkcasus met verschillende stakeholders.

- Praktijktoets integrale digitale infrastructuur waarbij in de praktijk wordt getoetst of de ontwikkelde systemen/architecturen/standaarden/mechanismen/rollenmodellen bruikbaar en doelmatig zijn. In deze praktijktoets worden iteratief verbeterlagen aangebracht in de ontwikkelde instrumenten.

Tijdslijn van deze ontwikkelingen



Te betrekken stakeholders bij deze ontwikkelingen

- Netbeheerders (E/G/W)
- Laadinfraproviders
- Leveranciers
- Producenten
- Aggregators
- Grootverbruikers
- Datadienst leverancier
- Telecom provider
- Nieuwe spelers/ dienstontwikkelaars
- OEM's (mobiliteit, in-huis apparatuur/infrastructuur elementen).
- Overheid

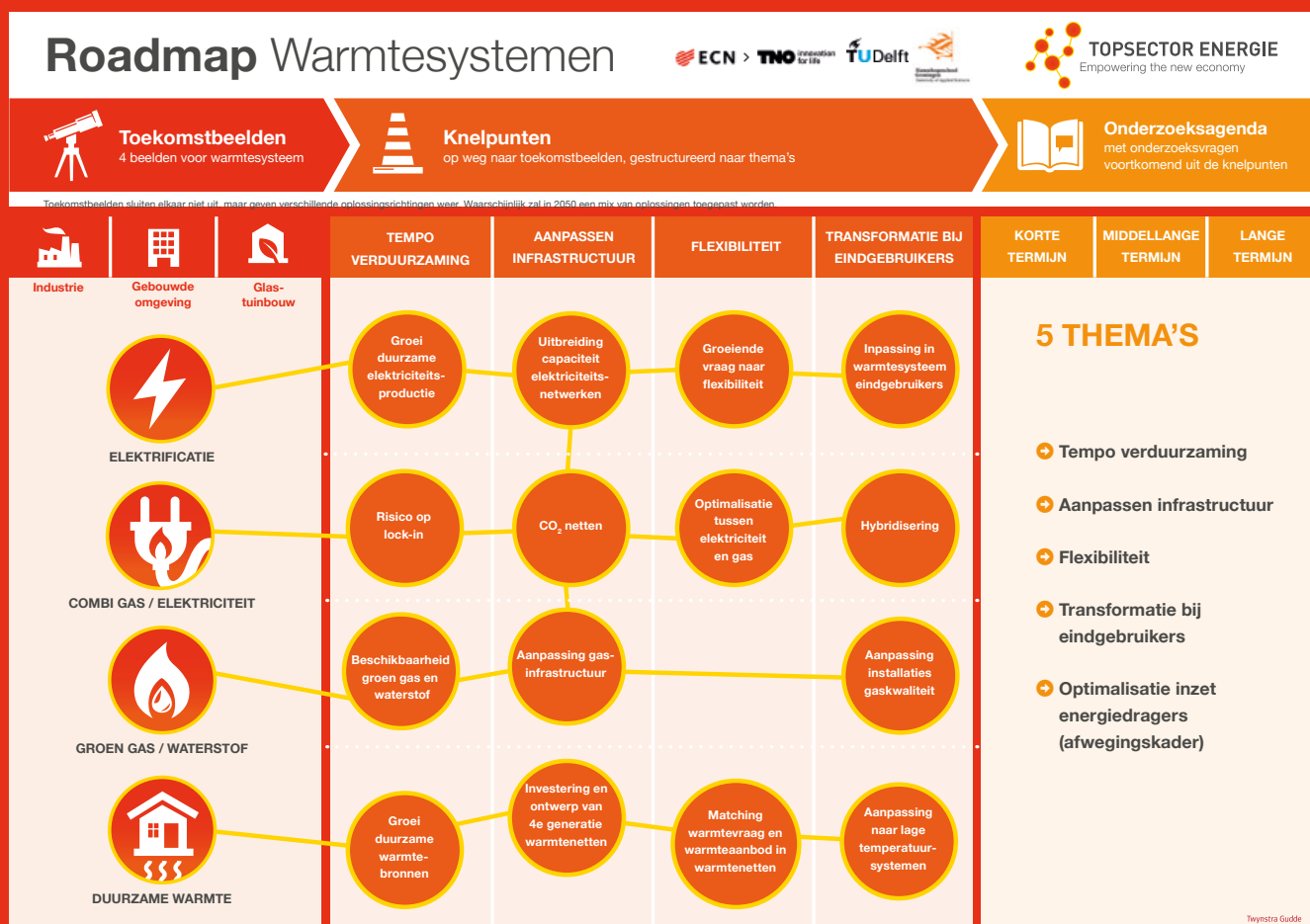
Kennis-Innovatie-Agenda Ontwerp en management van geïntegreerde duurzame warmtesystemen

Auteurs:

ECN-TNO
 Marijke Menkveld
 Sjaak van Loo
 Robert de Boer
 Martijn Clarijs
 Sigrid Bollwerk

TU Delft: Anke Dahlmann

Hanzehogeschool
 Groningen: Klaas Jan Noorman
 Kathelijne Bouw
 Wim van Gemert



1 Inleiding

1.2 Visie op de opdracht

Met deze roadmap warmtesystemen leggen we de basis voor de manier waarop de warmtetransitie, die de komende jaren versneld tot uitvoering gebracht moet worden, door middel van kennisontwikkeling en innovatie ondersteund kan worden. De transitie van aardgas naar duurzame warmte is een bijzonder urgent onderdeel van de energietransitie. Binnen 12 jaar moeten we overgeschakeld zijn van Gronings aardgas op (duurzame) alternatieven. Deze urgentie zet extra druk op het toch al complexe proces van de warmtetransitie. Systeemintegratie biedt veel kansen en mogelijkheden maar zorgt tevens ook voor een grote complexiteit. Wanneer we het hebben over systeemintegratie bedoelen we de integratie over:

1. Tijd: Fases van transitie en verschillende typen beslissingen op verschillende momenten in het transitieproces;
2. Sectoren: verbinding tussen de gebouwde omgeving, industrie en glastuinbouw ten behoeve van optimalisatie en efficiency van bronnen en systemen;
3. Energiedragers: Integraal energiesysteem met gas, warmte en elektriciteit;
4. Schaalniveaus: Integratie in de ruimte, op individueel, wijk en regionaal niveau en tussen collectieve en individuele systemen.

Open innovatie

Op deze complexe opgave aan te pakken, is een proces van open innovatie nodig, waarin alle stakeholders betrokken worden en zich betrokken voelen. Daarbij moeten wij bijzondere aandacht hebben voor degenen die nu nog niet in beeld zijn. In dit open innovatieproces staat het gezamenlijk ontwikkelen en delen van kennis centraal. Facilitering ervan is cruciaal voor een succesvolle warmtetransitie.

Maatschappelijke motor

We beschouwen de energietransitie als een complexe maatschappelijke opgave. We werken daarom 'van buiten naar binnen'. Dit betekent dat maatschappelijke vragen aan de basis staan van onderzoek. Maatschappelijke vragen bepalen ook de richting waarin projecten worden ontwikkeld. Bij de ontwikkeling van projecten en uitvoering van onderzoek worden maatschappelijke partners betrokken en staat de impact in de praktijk centraal. Zij helpen om de complexiteit van de vraag te doorgronden en anderzijds door de dynamiek in ruimte en tijd aan het licht te brengen.

Kennis en innovatieagenda

De kennis- en innovatieagenda dient recht te doen aan de complexiteit en integraliteit van de warmtetransitie. Aan de basis van de agenda ligt het besef ten grondslag dat er een grote rijkdom aan mogelijkheden is (zie routes voor verduurzaming warmtevoorziening gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie), waarin over een langere periode verschillende soorten keuzes gemaakt moeten worden. Een belangrijk uitgangspunt van de agenda is het inrichten en faciliteren van

dit keuzep proces. In werkelijkheid zijn er veel meer eindbeelden dan de vier die in deze roadmap worden gepresenteerd. De dynamiek van de warmtetransitie vraagt om een kennis- en innovatieagenda die met grote regelmaat aan de actualiteit getoetst zal moeten worden.

De kennis- en innovatieagenda heeft verder de volgende kenmerken:

- Adresseert de behoefte aan kaders en methodieken die recht doet aan de complexiteit van de transitie;
- Adresseert het omgaan met dynamiek in het systeem, zodanig dat het systeem zowel robuust (lange termijn-dynamiek) als flexibel (korte termindynamiek) is;
- Houdt rekening met een rijkdom aan mogelijkheden (routes) waartussen op verschillende tijdsschalen, en door verschillende stakeholders, in en tussen verschillende sectoren, keuzes gemaakt moeten worden;
- Heeft bijzondere aandacht voor gebied specifiek maatwerk;
- Adresseert transitiepaden in de tijd, niet gericht op één eindoplossing, maar ook de weg ernaartoe (incl. tussenoplossingen);
- Adresseert de noodzaak voor het faciliteren van open innovatieprocessen met interactie tussen stakeholders.

1.3 Aanpak

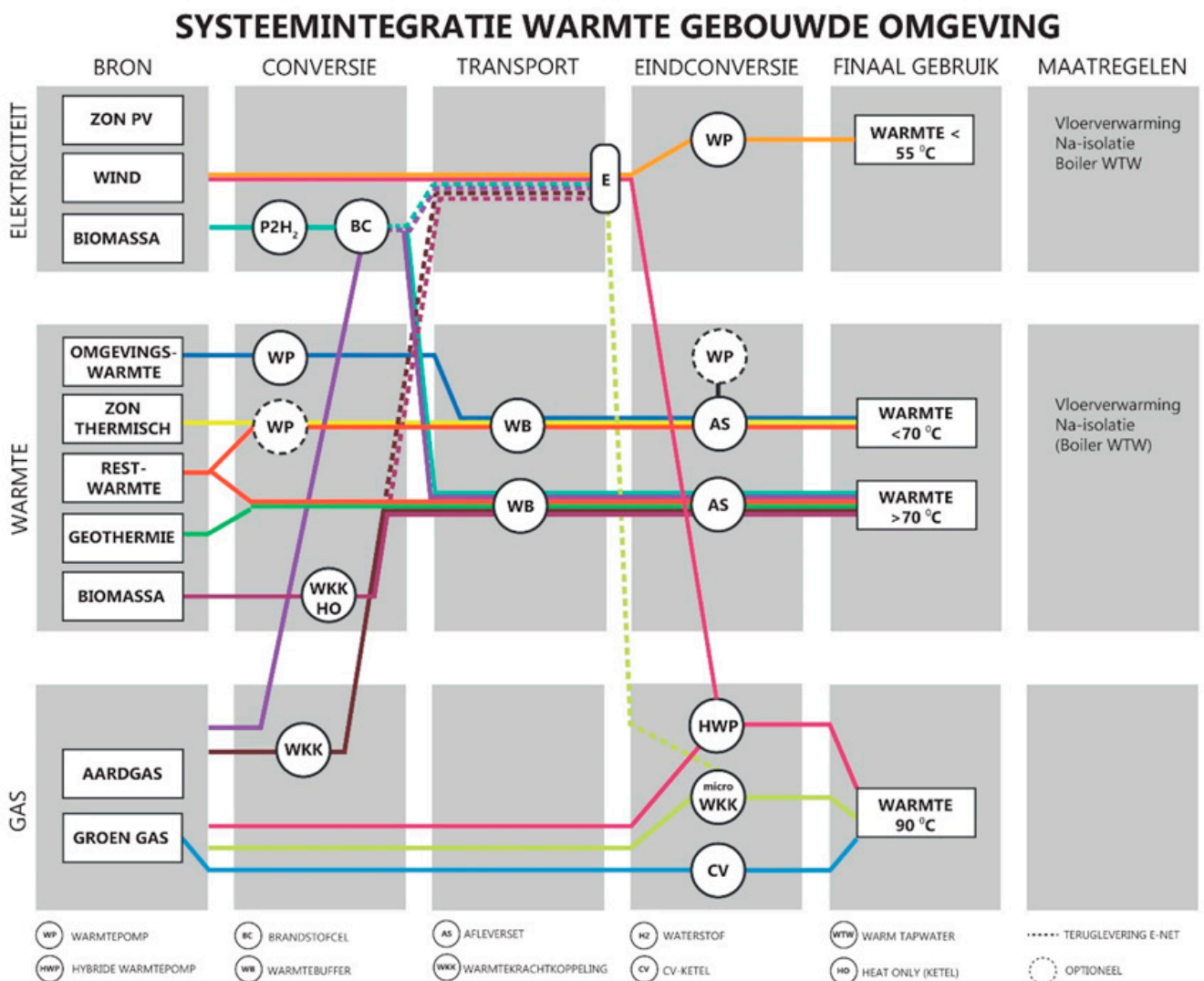
Het consortium heeft verschillende routes die er zijn om de warmtevoorziening in de industrie, glastuinbouw en gebouwde omgeving te verduurzamen in kaart gebracht (zie figuren in hoofdstuk 2). Deze routes zijn samengevat in 4 toekomstbeelden (zie hoofdstuk 3).

Vervolgens is een inventarisatie gemaakt van de issues en knelpunten die op weg naar die toekomstbeelden een rol spelen. Daarbij is gekeken vanuit systeemintegratieperspectief. Het consortium verstaat onder systeemintegratie de keuze van energiedragers, schaalniveau van opslag en conversie naar warmte, waarbij optimalisatie naar keten-efficiency en maatschappelijk businesscase leidend zijn. Ook consequenties voor net-infrastructuur en integratie in het maatschappelijk systeem waarbij rollen van stakeholders veranderen, horen daarbij. Bij ieder issue/knelpunt is in kaart gebracht welke kennis en informatie nodig is om dit issue op te lossen.

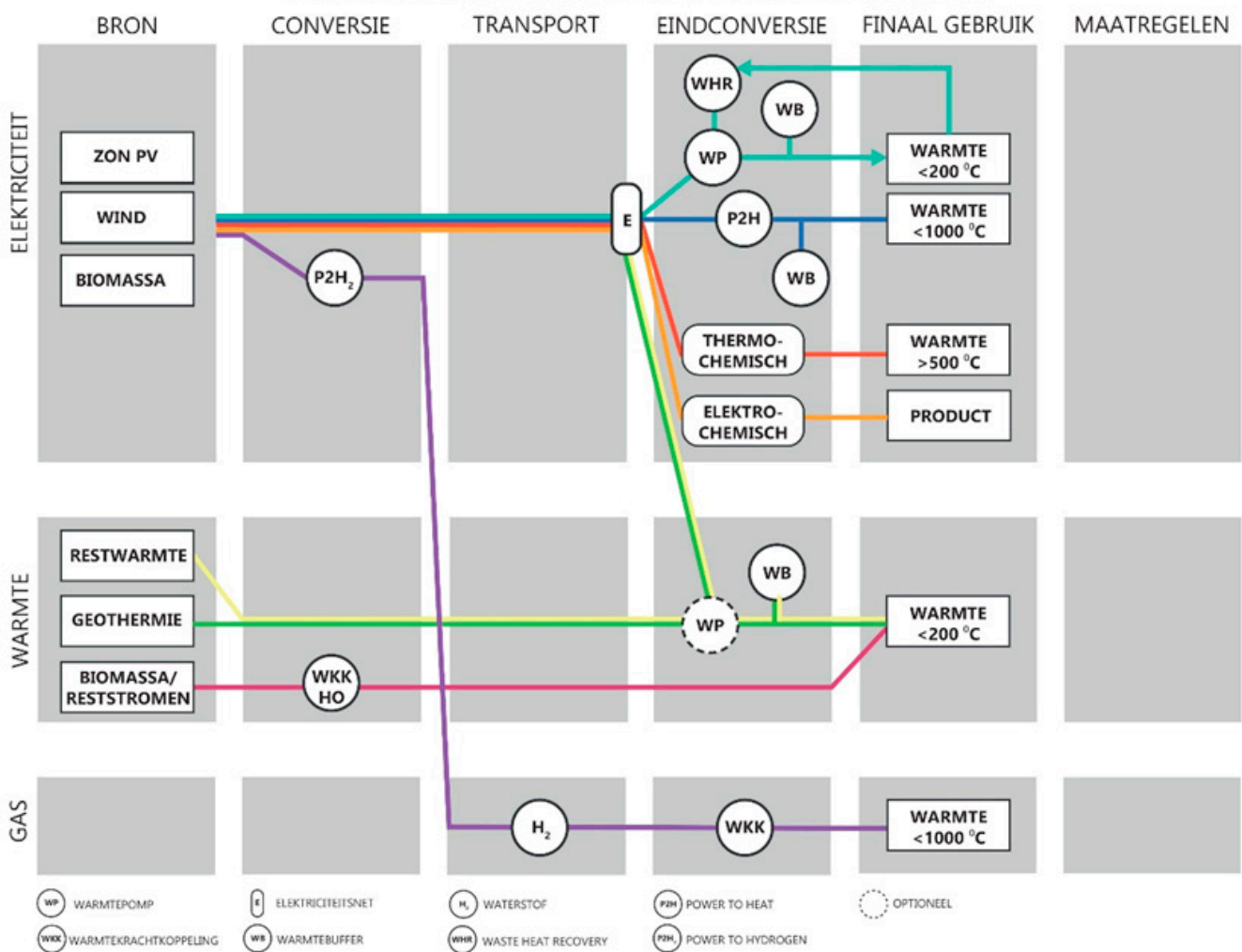
De issues en knelpunten worden besproken in hoofdstuk 4. In de issues en knelpunten bij de 4 toekomstbeelden zien we dezelfde thema's terugkomen. Deze thema's vormen de basis voor de kennisagenda. De kennisagenda is verder uitgewerkt in kennisvragen. Zowel de issues als de kennisvragen zijn in workshops met stakeholders besproken.

De kennisagenda wordt besproken in hoofdstuk 5.

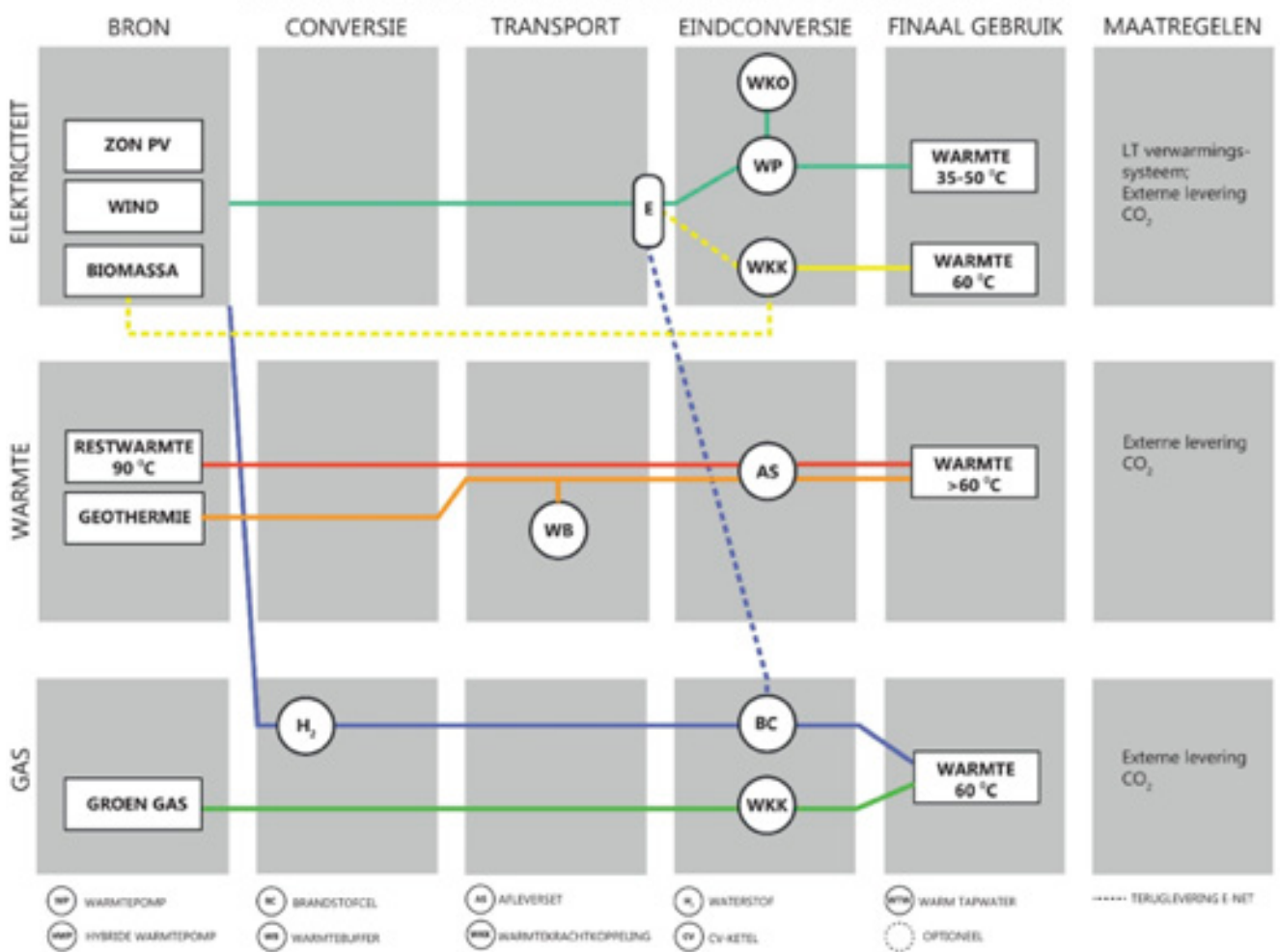
2 Routes voor verduurzaming van de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie



SYSTEEMINTEGRATIE WARMTE INDUSTRIE



SYSTEEMINTEGRATIE WARMTE GLASTUINBOUW



3 Toekomstbeelden

Het consortium heeft eerst nagedacht over de verschillende routes die er zijn om de warmtevoorziening in de industrie, glastuinbouw en gebouwde omgeving te verduurzamen. Deze routes zijn samengevat in 4 toekomstbeelden:

1. Elektrificatie
2. Duurzame warmte
3. Groen gas en waterstof
4. Combinatie van gas en elektriciteit

De toekomstbeelden sluiten elkaar niet uit, maar geven verschillende oplossingsrichtingen weer. Waarschijnlijk zal in 2050 een mix van oplossingen toegepast worden.

Dit hoofdstuk beschrijft deze 4 toekomstbeelden.

A	Titel Toekomstbeeld	Elektrificatie
B	<p>Samenvatting toekomstbeeld</p> <p>In dit toekomst beeld wordt de warmtevraag met duurzaam opgewekte elektriciteit ingevuld.</p> <p>Voor de gebouwde omgeving en de glastuinbouw betreft dat de all-electric route met elektrische warmtepompen. In dit eindbeeld vervalt in de gebouwde omgeving en glastuinbouw de aansluiting op een (aard) gasnet en houden woningen en gebouwen alleen een aansluiting op het elektriciteitsnet. Elektrische warmtepompen worden gebruikt voor de omzetting van elektriciteit in warmte. Verwarmingssystemen moeten daarvoor op lagere temperaturen worden bedreven dan nu omdat het rendement van warmtepompen dan beter is. Een lage temperatuursysteem levert alleen comfort als de woning of het gebouw goed geïsoleerd is, waarmee ook de warmtevraag wordt verlaagd. In de glastuinbouw is voor de CO₂ bemesting (voorheen uit rookgas) een netwerk voor de distributie van CO₂ uit industrie of elektriciteitscentrales noodzakelijk.</p> <p>In de industrie worden in dit eindbeeld voor de warmtevraag in het temperatuursegment tot 200°C warmtepompen ingezet. De warmtepompen hergebruiken de restwarmte uit processen om die op te waarden naar bruikbare temperatuurniveaus (waste heat recovery). Door het hogere rendement van een warmtepomp ten opzichte van het huidige gasgestookt proces treedt er een besparing op primair energiegebruik op. Voor hogere temperaturen wordt er een mix van power-to-heat, en power-to-hydrogen (elektrolyse) en power-to-chemicals ingezet. Bij inzet van power-to-heat kunnen processen grotendeels ongewijzigd worden bedreven en wordt alleen de warmtebron veranderd van gasgestookt naar elektrisch. De inzet van elektrolyse voor H₂-productie zal de zeer energie-intensieve reformer in de ammoniak- en methanolproductie vervangen en leidt daarmee tot een sterke vermindering van de warmtevraag en verandering van temperatuurniveau. De volgende stap is power-to-chemicals, dat betekent dat chemicaliën via elektrische weg worden geproduceerd, en dat naast de reformer ook andere reactoren die op extreem hoge temperaturen en drukken worden bedreven (bijvoorbeeld stoomkrakers), zullen worden vervangen. Dit leidt tot een significant lagere warmtevraag, op lagere temperatuurniveaus dan nu.</p>	
C	<p>Aannames</p>	<p>Alle toekomstbeelden gaan uit van 95% CO₂-reductie in 2050 tov 1990.</p>
D	<p>Beschrijving van het toekomstbeeld met aandacht voor meer-voudig kijken vanuit systeem-integratieperspectief</p> <p>X. Bril maatschappelijke impact: Sociaal-maatschappelijk, ruimtelijk-planologisch</p> <p>Y. Bril technisch, economisch</p> <p>Z. Bril juridisch/bestuurlijk: wettelijk, politiek/bestuurlijk, organisatorisch/governance</p>	<p>Dit toekomstbeeld vereist een grote groei van duurzame elektriciteitsproductie die ook in het landschap zichtbaar zal zijn: veel zon PV op daken van woningen en gebouwen, grote windparken op land en op zee en zonneweides. Elektriciteitsnetten zijn verzwaard, er zijn extra hoogspanningstrajecten om alle wind op zee over Nederland te verspreiden. De vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt is gegroeid, er moet immers ook warmte worden geleverd op windstille winterdagen. Die flexibiliteitsvraag wordt ingevuld met buffering en vraagsturing via variabele tarieven. Om woningen, gebouwen en kassen met warmtepompen te verwarmen is de warmtevraag fors gereduceerd. Woningen en gebouwen zijn fors na-geïsoleerd, eigenaren hebben daarvoor een lening afgesloten. In de industrie worden geheel nieuwe productieprocessen toegepast die door elektriciteit worden gedreven. De industrie levert een bijdrage aan de vraag naar flexibiliteit door haar productie terug te regelen op momenten van weinig elektriciteitsproductie.</p>

E Stakeholders	Belangrijkste stakeholders in dit toekomstbeeld zijn producenten en leveranciers van duurzame elektriciteit en de netbeheerders van elektriciteitsnetten vanwege het grote vraagstuk rond flexibiliteit en onbalans. Maar ook de eindgebruikers spelen in dit beeld een belangrijke rol omdat zij zelf in grotere mate elektriciteit gaan opwekken en hun warmtevoorziening met heel andere installaties gaan invullen. In de industrie betekent elektrificatie niet alleen een heel andere inrichting van processen, met aandacht voor waste heat recovery en verandering van gasgestookt naar elektrisch gestookt, maar ook innovatie naar andere processen zoals elektrolyse en elektrochemie. In de industrie kan elektrische verwarming in combinatie met warmteopslag worden ingezet in batch-processen om het elektriciteitsnet te balanceren. Dat betekent dat de rol van de industrie verandert van (voornamelijk) afnemer van warmte naar afnemer, producent en leverancier van flexibiliteit. Op kleinere schaal zou dat ook in de glastuinbouw kunnen.
F Belangrijkste consequenties voor systeemintegratie	Elektrificatie leidt tot een veel grotere vraag naar elektriciteit met veel meer variatie van de elektriciteitsvraag in de tijd (dag/nacht en seizoen) dan nu. Om die elektriciteitsvraag duurzaam in te vullen zal een zeer forse groei nodig zijn van elektriciteitsproductie uit duurzame bronnen zoals zon en wind. Deze bronnen zijn meer volatiel en laten forse fluctuaties zien in de productie op allerlei tijdschalen. Dus groeit ook de vraag naar flexibiliteit om de fluctuaties in vraag en aanbod met elkaar te matchen. Dat kan met opslag, maar ook met vraagsturing. Voor deze elektrificatie is een forse verzwaring van de capaciteit van de elektriciteitsnetten nodig. Doordat eindgebruikers zelf hun elektriciteitsvraag invullen met zon PV, verandert de rol van de energieleveranciers steeds meer, het net wordt niet langer gebruikt voor levering maar voor matching van vraag en aanbod.

A Titel Toekomstbeeld	Duurzame warmte
B Samenvatting toekomstbeeld	<p>In dit toekomstbeeld wordt de warmtevraag ingevuld met duurzame warmtebronnen, zoals geothermie of warmte uit biomassa, aquathermie, zonthermie of restwarmte. Daarbij is een grote rol weg gelegd voor warmteopslag.</p> <p>In de gebouwde omgeving wordt de aansluiting op een gasnet vervangen door een aansluiting op een warmtenet die gevoed wordt met verschillende duurzame bronnen.</p> <p>In de glastuinbouw wordt gekozen voor geothermie voor grote bedrijven of clusters van bedrijven of restwarmtebenutting vanuit de industrie of andere lokale warmtebron en levering van die warmte via een warmtenet. In de glastuinbouw is voor de CO₂ bemesting (voorheen uit rookgas) een netwerk voor de distributie van CO₂ noodzakelijk.</p> <p>Voor de industrie betekent dit toekomstbeeld de inzet van geothermie voor de warmtevraag tot 200°C en de benutting van restwarmte van andere bedrijven en de inzet van biomassa voor warmte. Daarbij wordt in dit toekomstbeeld gebruik gemaakt van nieuwe (4^e) generatie warmtenetten¹: slimme netwerken waarin meerdere decentrale bronnen met onvoorspelbare warmtelevering warmte leveren aan een netwerk, dat vaak geïntegreerd is met een andere energie-infrastructuur, bijvoorbeeld wanneer lage temperatuur warmte wordt opgewaardeerd met elektriciteit. Deze warmtenetten leveren warmte aan verschillende (type) afnemers, onder aansturing van controllers die flexibiliteit in vraag, aanbod en opslag van energie benutten.</p>
C Aannames	Alle toekomstbeelden gaan uit van 95% CO ₂ -reductie in 2050 tov 1990.
D Beschrijving van het toekomstbeeld met aandacht voor meervoudig kijken vanuit systeemintegratieperspectief	<p>Woningen en gebouwen krijgen warmte geleverd uit warmtenetten die gevoed worden door meerdere duurzame bronnen, in combinatie met warmteopslag. De warmtenetten leveren lage temperatuur warmte, deze wordt bij eindgebruikers of centraal met elektrische warmtepompen opgewaardeerd naar hogere temperaturen. Bij het aardgasvrij maken van wijken is collectief gekozen voor warmtenetten. De industrie maakt gebruik van geothermie voor lage temperaturen en biomassa voor hogere temperaturen. Grote industrie is er alleen nog in het westen van Nederland, dichtbij de kust voor de aanvoer van biomassa.</p> <p>X. Bril maatschappelijke impact: Sociaal-maatschappelijk, ruimtelijk-planologisch</p> <p>Y. Bril technisch, economisch</p> <p>Z. Bril juridisch/bestuurlijk: wettelijk, politiek/bestuurlijk, organisatorisch/governance</p>

1 H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund and B. Vad Mathiesen, in Energy, vol. 68, 2014: "4th Generation District Heating (4GDH), Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems".

E Stakeholders	<p>Belangrijke stakeholders in dit toekomstbeeld zijn de investeerders in en beheerders van duurzame warmtebronnen, warmtenetten, en warmteopslag. Dat kunnen marktpartijen zijn of publiek gefinancierde partijen. Ook een multi-stakeholder proces met coöperatief georganiseerde warmtenetten van burgers met overheid behoren bv ook tot de mogelijkheden. Bij die keuze voor het ene of andere marktmodel speelt de overheid een rol. Zolang eindgebruikers door aansluiting op een warmtenet een gebonden klant blijven, is tariefregulering noodzakelijk. Voor de industrie en de landbouw betekent dit toekomstbeeld versterkte samenwerkingsverbanden voor restwarmte-uitwisseling met de gebouwde omgeving.</p> <p>De eindgebruiker krijgt te maken met de toepassing van lage temperatuurnetten en opwaardering met elektriciteit. Afhankelijk van het gekozen (markt) model, heeft de eindgebruiker min of meer keuzevrijheid in aanbieder en/of warmtebron.</p> <p>Bij de invulling van de hoge temperatuurwarmtevraag in de industrie zijn spelers op de (wereldwijde) biomassamarkt van belang.</p>
F Belangrijkste consequenties voor systeemintegratie	<p>Dit toekomstbeeld vereist forse investeringen in nieuwe warmtenetten, verduurzaming van bestaande warmtenetten en warmte-opslag. Voor eigenaren van warmtenetten en warmteleveranciers kunnen de kosten van infrastructuur en primaire energie aanzienlijk lager uitvallen door toepassing van verschillende innovaties. Door lage temperatuur warmtenetten, met opwaardering van temperatuur met warmtepompen bij eindgebruikers, inzet van verschillende warmtebronnen en warmteopslag kan de pieklast in het net verminderen en leiden tot dunnere leidingen met minder pompenergie en lagere warmteverliezen.</p> <p>Demand-supply matching kan sterk verbeteren op korte operationele tijdschalen als bekend is hoe de warmtevraag als functie van de tijd varieert. Technieken en strategieën voor opslag van warmte zijn hierbij essentieel, zowel voor real-time operationele aansturing als grootschalig bij seizoensopslag. Hiermee wordt flexibiliteit (in zowel ruimte als tijd) in het systeem gebracht; innovatieve smart thermal grids of multi-commodity controllers zijn vervolgens beter in staat om deze flexibiliteit te exploiteren in de aansturing van 4e generatie warmtenetten. Open warmtenetten met concurrentie tussen aanbieders van warmte is een wens vanuit de keuzevrijheid van de klant, vanuit het idee dat concurrentie de efficiency verbeterd, de kosten drukt en de dienstverlening verbeterd. De consequentie is dat er andere markt- en businessmodellen nodig zijn, vanuit een multistakeholder perspectief met meerdere aanbieders. Dat is voor warmtenetten nog allemaal toekomstmuziek. De vraag is of open warmtenetten met concurrentie tussen aanbieders van warmte mogelijk is, hoe kun je dat organiseren en leidt het echt tot voordelen voor de klant?</p> <p>De verwachting is dat meerdere duurzame bronnen tegelijkertijd gaan invoeden op een netwerk, en dat kleinere lokale netwerken gekoppeld worden aan een regionale "backbone". Dit kan zorgen voor redundantie en verminderde afhankelijkheid van één aanbieder of warmtebron, maar vereist ook intrinsieke flexibiliteit van het systeem, waarbij vraag en aanbod continu op elkaar afgestemd worden. De ontwikkeling in de tijd (wat als het kleine netje er eerst is?) is daarbij ook van belang. Bij opwaardering van warmte met elektrische warmtepompen wordt daarbij de koppeling met de elektriciteitsmarkt een feit.</p> <p>In de industrie zijn er in dit toekomstbeeld vrijwel geen alternatieven om voor hoge temperatuur warmtevraag boven de 200 °C een duurzame warmtebron in te zetten. De industrie lijkt dan aangewezen op de inzet van biomassa. De beschikbaarheid van biomassa zou een probleem kunnen zijn, zeker als er veel vraag naar biomassa is voor verduurzaming van transport (lucht- en scheepvaart) met biobrandstoffen.</p>

A	Titel Toekomstbeeld	Groen gas en waterstof
B	Samenvatting toekomstbeeld	<p>In dit toekomstbeeld wordt de warmtevraag ingevuld met gasvormige energiedragers, groen gas of waterstof. Dit betekent dat de gasinfrastructuur in verschillende sectoren in stand blijft en de verduurzaming op centraal niveau plaats vindt via de productie van groen gas en/of waterstof.</p> <p>Groen gas van aardgaskwaliteit wordt geproduceerd via vergisting en vergassing van biomassa(rest)stromen. Dat kan vergisting zijn van mest, zuiveringsslib en gras en (op termijn van 2030) ook speciaal voor dit doel geteelde zeewier.</p> <p>Uit zon en wind geproduceerde duurzame elektriciteit wordt via elektrolyse omgezet in groene waterstof. Op korte termijn in een transitiefase kan ook uit aardgas met CCS (CO₂ afvang en opslag) blauwe waterstof worden geproduceerd.</p> <p>Productie van groen gas en waterstof vindt niet noodzakelijk in Nederland plaats, import behoort ook tot de mogelijkheden, denk bijvoorbeeld aan productie van waterstof uit zonneparken in de Sahara.</p>
C	Aannames	Alle toekomstbeelden gaan uit van 95% CO ₂ -reductie in 2050 tov 1990.
D	Beschrijving van het toekomstbeeld met aandacht voor meervoudig kijken vanuit systeemintegratieperspectief X. Bril maatschappelijke impact: Sociaal-maatschappelijk, ruimtelijk-planologisch Y. Bril technisch, economisch Z. Bril juridisch/bestuurlijk: wettelijk, politiek/bestuurlijk, organisatorisch/governance	<p>In dit toekomstbeeld worden woningen en gebouwen, kassen en industrie ook in 2050 nog steeds met gasgestookte ketels verwarmd. Langzaam maar zeker is de CO₂-footprint van het gas verlaagd door bijmenging van groen gas en waterstof. Branders in ketels en fornuizen zijn vervangen door branders die verschillende gaskwaliteiten aan kunnen. Op grote schaal wordt groen gas geproduceerd uit zeewierfarms voor de kust.</p>
E	Stakeholders	De belangrijkste rol in dit toekomstbeeld is weggelegd voor de producenten van groen gas of waterstof. De vraag is welke stakeholders die taak op zich gaan nemen. Daarnaast spelen netbeheerders en gasleveranciers en eindgebruikers een rol in de aanpassingen aan een andere gaskwaliteit. Bij wisselende gaskwaliteit in de productie spelen gasleveranciers een rol in de monitoring en regeling van gaskwaliteit.
F	Belangrijkste consequenties voor systeemintegratie	Dit toekomstbeeld vereist het in stand houden van de gasinfrastructuur, maar eventueel wel met een aanpassing aan andere gaskwaliteiten. Daarnaast moeten ook de stookinstallaties en fornuizen bij eindverbruikers aan andere gaskwaliteit worden aangepast. De grootste verandering is de verduurzaming aan de aanbodzijde: de productie van groen gas en waterstof. Wanneer de waterstof productie binnenlands gebeurt via elektrolyse ontstaat een koppeling tussen de gasmarkt en de elektriciteitsmarkt. Voor de elektriciteitsmarkt kan deze power-to-gas optie een belangrijke flexibiliteitsoptie bieden.

A Titel Toekomstbeeld	Combinatie gas/elektriciteit
B Samenvatting toekomstbeeld	<p>In dit toekomst beeld wordt nadrukkelijk gekozen voor een hybride warmtesysteem bij eindgebruikers, die elektrificatie combineert met de inzet van duurzame gasvormige energiedragers groen gas en waterstof in het eindbeeld. In een transitiefase kan tijdelijk nog aardgas worden ingezet.</p> <p>Voor de gebouwde omgeving en de glastuinbouw betekent dat een keuze voor hybride warmtepompen, een elektrische warmtepomp met een gasgestookte ketel voor pieklast. De ketel kan worden gestookt op groen gas of waterstof, maar in een transitiefase zal dat tijdelijk ook nog aardgas zijn.</p> <p>In de industrie betekent dit een combinatie van groen gas met elektrificatie of - in de transitiefase - het gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met CCS/CCU. De vraag is hoeveel CO₂ in producten kan worden gebruikt (CCU) en hoeveel CO₂ daadwerkelijk opgeslagen moet worden (CCS). Inzet van CCS in de industrie zal leiden tot een extra warmtevraag</p>
C Aannames	<p>Alle toekomstbeelden gaan uit van 95% CO₂-reductie in 2050 tov 1990.</p>
D Beschrijving van het toekomstbeeld met aandacht voor meervoudig kijken vanuit systeemintegratieperspectief X. Bril maatschappelijke impact: Sociaal-maatschappelijk, ruimtelijk-planologisch Y. Bril technisch, economisch Z. Bril juridisch/bestuurlijk: wettelijk, politiek/bestuurlijk, organisatorisch/governance	<p>In dit toekomstbeeld worden ketels in woningen, gebouwen, kassen en industrie vervangen door hybride warmtepompen of hybride installaties. De productie van duurzame elektriciteit is fors gestegen. Om in een groeiende flexibiliteitsvraag te voorzien worden de hybride installaties flexibel bedreven en zijn op afstand bedreven door energieleveranciers of netwerkbedrijven. Eindverbruikers krijgen een vergoeding voor het afschakelen van het elektrische deel van hun installatie. Langzaam maar zeker is de CO₂-footprint van het gas verlaagd door bijmenging van groen gas en waterstof. Branders in ketels en fornuizen zijn vervangen door branders die verschillende gaskwaliteiten aan kunnen. Waterstof wordt soms geproduceerd uit duurzame elektriciteit bij overschotten op de elektriciteitsmarkt en soms uit aardgas met CCS.</p>
E Stakeholders	<p>Een belangrijke rol in dit toekomstbeeld wordt gespeeld door de leveranciers van hybride verwarmingssystemen. Netbeheerders van elektriciteitsnetten spelen een rol in de verzwaring van elektriciteitsnetten. Producenten en leveranciers van elektriciteit spelen een rol in verduurzaming van de elektriciteitsvraag. De industrie heeft – in de transitiefase - een grote uitdaging in de toepassing van CO₂-opslag en CCU, zolang zij fossiele brandstoffen willen blijven gebruiken. Er zijn mogelijk nieuwe stakeholders nodig die CO₂-netten gaan aanleggen en beheren. De integratie tussen de industrie en het energiesysteem is in dit toekomstbeeld groter dan bij de andere toekomstbeelden: de industrie vraagt flexibiliteit van en kan flexibiliteit bieden aan elektriciteits- en gasnetten. Vraagsturing (demand response) is in dit toekomstbeeld belangrijk, maar de vraag is welke eindgebruikers daartoe een bijdrage kunnen en willen leveren.</p>
F Belangrijkste consequenties voor systeemintegratie	<p>Dit toekomstbeeld vereist het in stand houden van de gasinfrastructuur, en op lange termijn aanpassing aan andere gaskwaliteiten en het gelijktijdige verzwaren van de elektriciteitsnetten vanwege gedeeltelijke elektrificatie. Tevens is er nieuwe infrastructuur nodig om CO₂ op te slaan. Door het hybride karakter van dit toekomstbeeld zullen de elektriciteit- en gasmarkt met elkaar gaan interacteren, voor de vraag naar flexibiliteit kan worden geoptimaliseerd tussen elektriciteit en gas. De mogelijkheden voor vraagsturing zijn in dit toekomstbeeld groot, de rol van warmteopslag daardoor kleiner dan bij toekomstbeelden met maar één energiedrager.</p>

4 Issues en knelpunten

Issues en knelpunten bij het toekomstbeeld 1 Elektrificatie:

- A. Groei duurzame elektriciteitsproductie
- B. Uitbreiding capaciteit elektriciteitsnetwerken
- C. Groeiende vraag naar flexibiliteit
- D. Inpassing in warmtesysteem eindgebruikers:
lage temperatuur verwarmingssystemen en
nieuwe processen industrie

A	Titel issue/knelpunt	1A Groei duurzame elektriciteit
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Verduurzaming van de warmtevraag via elektrificatie heeft alleen zin als die elektriciteit ook duurzaam wordt opgewekt. Als elektrificatie van de warmtevraag niet alleen plaats vindt in de gebouwde omgeving maar ook in glastuinbouw en industrie dan neemt de vraag naar duurzame elektriciteit fors toe. Als ook de mobiliteitsvraag elektrisch wordt ingevuld en power-to-products ook groeit, dan neemt de elektriciteitsvraag nog verder toe. Elektriciteitsproductie capaciteit uit zon en wind zal fors moeten groeien maar de ruimtelijke inpassing zal daarbij een beperkende voorwaarde zijn. Hoe kunnen we het opwekpotentieel maximaliseren? En wanneer zijn alternatieven voor elektrificatie aantrekkelijker (toch maar dat warmtenet want...).
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld elektrificatie maar ook aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit. In beide scenario's zal elektriciteit gebruikt worden om in de warmtevraag te voorzien.
D	Impact op systeem	Stel dat in verschillende sectoren voor elektrificatie wordt gekozen, maar de verduurzaming van de elektriciteitsproductie blijft achter bij de groei van de elektriciteitsvraag, dan neemt de CO ₂ -uitstoot toe.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	De toename van de productie van duurzame elektriciteit moet gelijke tred houden met de keuze voor de inzet van elektriciteit voor nieuwe toepassingen zoals warmte.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Er zijn scenariostudies nodig die de groei van het potentieel van duurzame elektriciteitsproductie in de tijd vergelijken met de groeiende elektriciteitsvraag door elektrificatie voor warmte in samenhang met een groeiende elektriciteitsvraag voor andere functies zoals mobiliteit en feedstock. Daartoe moet ook de ontwikkeling van de warmtevraag in de industrie beter in kaart worden gebracht. Wat is het effect van systeemveranderingen (in bijvoorbeeld raffinaderijen en kunstmestsector) op de warmtevraag? In hoeverre kan de warmtevraag worden beperkt door minder energie-intensieve processen? Welk deel van de huidige warmtevraag kan worden vervangen door elektriciteit en welk deel door andere energiedragers (bijvoorbeeld H ₂)?

A Titel issue/knelpunt	1B Uitbreiding capaciteit elektriciteitsnetwerken
B Korte beschrijving issue / knelpunt	Sterke mate van elektrificatie van de warmtevraag vraagt om een forse uitbreiding van de netcapaciteit van elektriciteitsnetten. De benodigde capaciteit van het netwerk hangt af van de piekbelasting die mede wordt bepaald door hoeveel aandacht is besteed aan vraagreductie. Welke mate van reductie van de warmtevraag is rendabel of noodzakelijk vanuit maatschappelijk perspectief? De reductie van de warmtevraag kan goedkoper zijn dan verzwaren van netinfrastructuur. Zullen eindgebruikers ook uit eigen belang dit niveau nastreven?
C Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld elektrificatie maar ook aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit. In beide scenario's zal elektriciteit gebruikt worden om in de warmtevraag te voorzien.
D Impact op systeem	Zodra elektrificatie van de warmtevraag bij eindgebruikers wordt gerealiseerd is lokaal meer netcapaciteit nodig. De omvang van de warmtevraag en de piekvraag bepaalt de capaciteit van netinfrastructuur. De reductie van de warmtevraag is een urgent issue. Reductie van de warmtevraag vraagt actie bij eindgebruikers en is daarom een omvangrijke operatie, die een lange periode nodig heeft voor realisatie. en kan investeringen in net-infrastructuur besparen.
E Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	De omvang van de warmtevraag en de piekvraag bepaalt de capaciteit van netinfrastructuur. De reductie van de warmtevraag is een urgent issue. Reductie van de warmtevraag vraagt actie bij eindgebruikers en is daarom een omvangrijke operatie, die een lange periode nodig heeft voor realisatie. en kan investeringen in net-infrastructuur besparen.
F Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Er is informatie nodig over de piekbelasting die optreedt bij elektrificatie van de warmtevraag in verschillende sectoren. Daarbij moet onderzocht worden hoe die piekbelasting kan worden verminderd door reductie van de warmtevraag en de inzet van piekbuffers. Daarna kunnen de maatschappelijke kosten en baten van netverzwaren, opslag en vraag reductie tegen elkaar worden afgewogen. Tevens moet onderzocht worden hoe de samenhang is met andere ontwikkelingen die ook hun invloed hebben op de netcapaciteit, zoals bijvoorbeeld PV en elektrische auto's op distributienetten in de gebouwde omgeving. Voor de industrie kan ook ruimtelijke ordening een rol spelen, als industrie toch moet investeren in nieuwe productieprocessen dan maar direct bij de aanlanding van wind op zee.

A Titel issue/knelpunt	1C Groeiende vraag naar flexibiliteit
B Korte beschrijving issue / knelpunt	De groei van de vraag naar duurzame energiedragers met hun eigen soms onzekere aanbodprofiel die in warmtevraag moet voorzien die over de verschillende tijdschalen (uur, dag, seizoen) fluctueert, vraagt om het vergroten van de flexibiliteit in de warmtevraag via vraagsturing en opslag. Hoeveel vraagsturing is mogelijk en acceptabel voor eindgebruikers: hoe flexibel is het gedrag achter de meter? Welke leveringszekerheid is acceptabel, wat zijn de kosten van 'zekerheid'? Welke rol kan energieopslag spelen in de warmtevoorziening? Op welk niveau en op welke plek kan buffering optimaal worden ingezet tussen energiedragers (voor/achter de meter, rekening houdend met collectief domein en niet-collectief domein, etc.)? Wie regelt die flexibilisering en volgens welk principe? Ook de industrie en glastuinbouw kan flexibiliteit bieden aan elektriciteits-, gas en warmtenetten. Hoe communiceren verschillende sectoren met elkaar? Welke uitwisseling moet hiervoor georganiseerd worden?
C Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld elektrificatie maar ook aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit. In beide scenario's zal elektriciteit gebruikt worden om in de warmtevraag te voorzien.
D Impact op systeem	Als er mismatch optreedt tussen vraag en aanbod in het elektriciteitssysteem dan kan dat leiden tot de noodzaak van curtailment (het afschakelen/stilzetten van windmolens of zon-PV) of tot stroomstoringen vanwege overbelasting van het net.
E Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	De Flexnet studie ² heeft laten zien dat de totale jaarlijkse vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt verdubbeld tussen 2015 en 2030 en verder toeneemt (met een factor 3) tussen 2030 en 2050.
F Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	De groei van de vraag naar duurzame energiedragers met hun eigen soms onzekere aanbodprofiel die in warmtevraag moet voorzien die over de verschillende tijdschalen (uur, dag, seizoen) fluctueert, vraagt om het vergroten van de flexibiliteit in de warmtevraag via vraagsturing en opslag. Hoeveel vraagsturing is mogelijk en acceptabel voor eindgebruikers: hoe flexibel is het gedrag achter de meter? Welke leveringszekerheid is acceptabel, wat zijn de kosten van 'zekerheid'? Welke rol kan energieopslag spelen in de warmtevoorziening? Op welk niveau en op welke plek kan buffering optimaal worden ingezet tussen energiedragers (voor/achter de meter, rekening houdend met collectief domein en niet-collectief domein, etc.)? Wie regelt die flexibilisering en volgens welk principe? Ook de industrie en glastuinbouw kan flexibiliteit bieden aan elektriciteits-, gas en warmtenetten. Hoe communiceren verschillende sectoren met elkaar? Welke uitwisseling moet hiervoor georganiseerd worden?

1

2 <https://www.ecn.nl/nl/flexnet/>

A Titel issue/knelpunt	1D Inpassing in warmtesysteem eindgebruikers
B Korte beschrijving issue / knelpunt	<p>In de industrie betekent elektrificatie niet alleen een heel andere inrichting van processen, met aandacht voor waste heat recovery en verandering van gasgestookt naar elektrisch gestookt, maar ook transitie naar andere processen zoals elektrolyse en elektrochemie en uiteindelijk de overgang van fossiele naar elektrisch gedreven processen. Daarvoor moet nog veel technologie worden ontwikkeld.</p> <p>In de gebouwde omgeving en glastuinbouw moeten gasgestookte ketels worden vervangen door elektrische warmtepompen maar ook de temperatuur van verwarmingssystemen moet worden verlaagd.</p> <p>Het proces van elektrificatie vergt tijd en kent belemmeringen in de vorm van onrendabele toppen, onzekerheid over voldoende netcapaciteit en overheidsinstrumentarium (nettarieven, energiebelasting).</p>
C Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	<p>Aan het toekomstbeeld elektrificatie maar ook aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit. In beide scenario's zal elektriciteit gebruikt worden om in de warmtevraag te voorzien.</p>
D Impact op systeem	<p>Als het industrie niet lukt om de omslag te maken naar andere processen dan vindt de elektrificatie niet plaats die nodig is om de warmtevoorziening van de industrie te verduurzamen.</p> <p>Als warmtepompen in de gebouwde omgeving en glastuinbouw worden toegepast zonder lage temperatuursystemen en isolatie dan kan dat leiden tot een hoog elektriciteitsverbruik, een hoge energierekening en comfortklachten of lagere opbrengsten in de glastuinbouw.</p>
E Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	<p>Zodra elektrificatie van de warmtevraag plaats vindt (of plaats zou moeten vinden) is inpassing in het warmtesysteem bij eindgebruikers een issue.</p>
F Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	<p>De industrie heeft kennis nodig van waste heat recovery, power to heat, power-to-H₂ (elektrolyse), power to chemicals (bijv. elektrochemie) en van elektrische (scheidings)processen. Ook is kennis nodig hoe deze transformatie in de industrie op een optimale manier door te voeren. In de gebouwde omgeving en glastuinbouw is kennis nodig van de toepassing van warmtepompen in samenhang met lage temperatuur warmtesystemen en de noodzaak tot isolatie.</p> <p>Hoe kan met beleid het proces van elektrificatie worden versneld?</p>

Issues en knelpunten bij het toekomstbeeld 2 Duurzame warmte

- Wie gaan er investeren in warmtenetten, -bronnen en opslag? Welke partijen doen het aanleg en beheer?
- Groei duurzame warmtebronnen
- Matching vraag en aanbod duurzame warmtebronnen
- Ontwerp van 4e generatie warmtenetten

A Titel issue/knelpunt	2A Wie gaan er investeren in warmtenetten, -bronnen en opslag? Welke partijen doen het aanleg en beheer?
B Korte beschrijving issue / knelpunt	<p>Inzet van duurzame warmte vraagt een forse investering in warmtenetten, duurzame warmtebronnen en warmteopslag. Daar waar de aanleg van gasnetten en elektriciteitsnetten een gereguleerde taak is van netbeheerders, wordt de aanleg van warmtenetten nu overgelaten aan marktpartijen. Het financieren van deze investeringen is een struikelblok door het volloopriscio: de kosten voor het transportnet worden gemaakt ruim voordat de distributienetten worden aangesloten. Dit drukt zwaar op individuele businesscases en de risico's voor financiers zijn groot. De vraag is of de financiële drempels en risico's kunnen worden weggenomen door warmtenetten (deels) vanuit een transitiefonds te financieren of te kiezen voor een andere marktordening waarbij de aanleg en beheer van warmtenetten in publieke handen komt bijv. bij netbeheerders.</p>
C Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	<p>Aan het toekomstbeeld duurzame warmte waarin warmtenetten een belangrijke rol spelen.</p>
D Impact op systeem	<p>Zonder investeringen in warmtenetten kan het potentieel van duurzame bronnen zoals geothermie en aquathermie niet worden benut.</p>
E Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	<p>Dit issue is nu al relevant voor investeringen in nieuwe warmtenetten in het kader van aardgasvrije wijken.</p>
F Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	<p>Er is informatie nodig over de rentabiliteit van de aanleg van nieuwe warmtenetten. Marktonderzoek is nodig om te weten onder welke voorwaarden marktpartijen bereid zijn in nieuwe warmtenetten te investeren.</p>

A	2B Groei duurzame warmtebronnen
B Korte beschrijving issue / knelpunt	<p>Verduurzaming van de warmtevraag via warmtenetten vereist dat die warmte duurzaam wordt geproduceerd. Het is de bedoeling dat duurzame bronnen (bijv. geothermie) de huidige fossiele restwarmte (afvalverbranding, energiecentrales) gaan vervangen in warmtenetten. Het geothermisch potentieel is in vele regio's van Nederland nog onbekend en de kosten en het financieel en maatschappelijk risico van het boren zijn een serieuze hindernis. Opwaardering van geothermische warmte die uit ondiepere aardlagen is gewonnen kan een alternatief zijn, zeker in combinatie met opslag en aansluiting op een warmtenet. Welke bijdrage kan zonthermie spelen voor verduurzaming van de warmtevraag? Hoe regel je piek- en basislast in de toekomst? Blijft er restwarmte van de industrie beschikbaar voor de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving of landbouw of wordt deze restwarmte via waste heat recovery gebruikt voor industriële processen?</p> <p>Dit toekomstbeeld kan voor hoge temperatuur warmtevraag in de industrie (boven de 200 °C) alleen maar ingevuld worden met biomassa. De vraag is of er voldoende biomassa beschikbaar is om die hoge temperatuur warmtevraag in te vullen. Is niet alle biomassa al nodig voor andere toepassingen, zoals biobrandstoffen in transport. Voor lagere temperaturen is het potentieel van ultra diepe geothermie van belang.</p>
C Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	<p>Aan het toekomstbeeld duurzame warmte waarin duurzame warmtebronnen in de vraag naar warmte voorzien.</p>
D Impact op systeem	<p>Zonder groei van duurzame warmtebronnen zal uitbreiding van warmtenetten gevoed worden uit fossiele restwarmte uit AVI's of elektriciteitscentrales, die daardoor minder elektriciteit kunnen produceren en productie van die gedeelde elektriciteit elders tot extra CO₂-emissie leidt.</p>
E Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	<p>In het kader van verduurzaming van bestaande warmtenetten en aardgasvrije wijken is de groei van duurzame warmtebronnen een urgent issue.</p>
F Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	<p>Er is informatie nodig over het potentieel van geothermie en de kansen op succesvolle boring, risico's op aardbevingen en draagvlak van omwonenden. Daarnaast is er kennis en ervaring nodig over hoe een bron kan worden geëxploiteerd, bijvoorbeeld kan deze in de zomer worden uitgezet als er geen of weinig warmtevraag is? Ook verduurzaming van hulpwarmteketels vraagt om een oplossing bijvoorbeeld met biomassa gestookte ketels.</p> <p>Er is kennis nodig van de ontwikkeling van het aanbod van restwarmte uit de industrie bij elektrificatie, de toepassing van warmtepompen en waste heat recovery en bij CO₂ afvang. De maatschappelijke kosten en baten van waste heat recovery voor eigen processen zou moeten worden vergeleken met levering van restwarmte uit de industrie aan de gebouwde omgeving of glastuinbouw.</p> <p>Ook is er informatie nodig over de ontwikkelingen op de biomassa markt, zoals de beschikbaarheid van biomassa via import en de vraag naar biomassa voor andere functies dan warmte. Denk daarbij aan de transportsector, waarbij ook moet worden meegenomen dat de scheepvaart en luchtvaart mogelijk in de toekomst ook een beroep op biobrandstoffen zullen doen.</p> <p>Voor de industrie is ook de ontwikkeling van ultradiepe geothermie van belang, daar is kennis voor nodig van diepere lagen in de ondergrond en ervaring met dit type projecten.</p>

A	Titel issue/knelpunt	2C Matching vraag en aanbod duurzame warmtebronnen
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	De verwachting is dat meerdere duurzame bronnen tegelijkertijd gaan invoeden op een warmtenetwerk, en dat kleinere lokale netwerken gekoppeld kunnen worden aan een regionale backbone met opslagcapaciteit. Dit kan zorgen voor redundantie en verminderde afhankelijkheid van één aanbieder, maar vereist ook intrinsieke flexibiliteit van het systeem, waarbij vraag en aanbod continu op elkaar afgestemd worden. Als er bronnen of afnemers zijn van warmte op verschillende temperatuurniveaus, biedt een warmtenet met een lage aanvoertemperatuur mogelijkheden voor (decentrale) opwaardering met duurzame elektriciteit (naar het door de eindgebruiker gewenste temperatuurniveau). Koppeling met de elektriciteitsmarkt, voor opwaardering van warmte, wordt dan ook belangrijk. Hoe gaat de elektriciteitsmarkt interacteren met de warmtemarkt, en hoe wordt flexibiliteit in/over beide markten verdeeld?
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld duurzame warmte waarin warmtenetten een belangrijke rol spelen.
D	Impact op systeem	Zonder een betere match tussen vraag en aanbod van meerdere bronnen in warmtenetten, zijn de kosten voor piekcapaciteit hoog of komt leveringszekerheid in gevaar.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Bij verduurzaming van bestaande warmtenetten is dit nu al een issue, omdat één grote fossiele warmtebron moet worden vervangen door meerdere duurzame warmtebronnen met een beperkte capaciteit en een specifiek aanbodpatroon.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Warmtenetten kunnen zodanig worden ontworpen dat de piekflow afneemt waardoor de buizen kleiner kunnen worden gedimensioneerd als beter bekend is hoe de warmtevraag in de tijd varieert. Demand-supply matching kan dan sterk verbeteren op kortere tijdschalen door innovatieve smart thermal grid controllers. Buffers voor warmteopslag in het netwerk kunnen dit verder faciliteren, en verschillende strategieën moeten op hun merites worden onderzocht. Ook op de tijdschaal van seizoenen is dit relevant, waar opslagtechnologieën zoals BTES/STES en ATES flexibiliteit (in zowel ruimte als tijd) in het systeem brengen.

A	Titel issue/knelpunt	2D Ontwerp van 4e generatie warmtenetten
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	De bestaande warmtenetten in Nederland hebben doorgaans één hoge temperatuur bron waarmee warmte wordt geleverd aan vele afnemers. De structuur van het netwerk is hiërarchisch met een transport- en distributienet, en laat zich goed ontwerpen en ontwikkelen met bestaande tools en technieken: hierbij wordt vaak op pieklast en worst-case scenario's ontworpen, wat leidt tot relatief hoge CAPEX en OPEX: grote diameters van leidingen in netwerkinfrastructuur met de daarbij behorende pompvermogens voor transport en warmteverliezen. Met name de hoge kosten van de infrastructuur vormen een belemmering voor een gezonde business case. Tegelijkertijd bieden nieuwe 4e generatie warmtenetten goede kansen om de voordelen van netten te behouden en de nadelen weg te nemen en/of te verkleinen. Deze 4e generatie warmtenetten gevoed vanuit meerdere duurzame bronnen, ontworpen op lage temperatuur en met elektrische warmtepompen om bij de eindgebruiker de temperatuur op het gewenste niveau te brengen. Deze warmtenetten gebruiken innovatieve technieken en warmteopslag voor de matching van vraag en aanbod. Het voordeel is dat met zo'n ontwerp de piekbelasting in het warmtenet wordt beperkt, waardoor dunnere warmteleidingen kunnen worden aangelegd, minder pompenergie nodig is en warmteverliezen verminderen. Deze warmtenetten zijn daardoor efficiënter en goedkoper in exploitatie. Daarvoor moeten wel de huidige ontwerpmethoden op de schop en zijn verschillende innovaties nodig.
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld duurzame warmte waarin warmtenetten een belangrijke rol spelen.
D	Impact op systeem	Zonder investeringen in warmtenetten kan het potentieel van duurzame bronnen zoals geothermie en aquathermie niet worden benut.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Dit issue is urgent omdat in het kader van aardgasvrije wijken op korte termijn nieuwe warmtenetten zullen worden ontworpen en aangelegd.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Er moeten nieuwe ontwerptools worden gemaakt. Marktpartijen die warmtenetten ontwerpen moeten vertrouwd raken met deze nieuwe ontwerptools en nieuwe technieken. Marktpartijen die investeren in warmtenetten moeten overtuigd worden van de voordelen door pilots in de praktijk met 4e generatie warmtenetten.

Issues en knelpunten bij toekomstbeeld 3 groen gas en waterstof:

- A. Beschikbaarheid groen gas en waterstof
- B. Aanpassing gasinfrastructuur en installaties bij eindgebruikers

A	Titel issue/knelpunt	3A Beschikbaarheid groen gas en waterstof
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	In een toekomstbeeld met inzet van gasvormige energiedragers is de vraag hoeveel biomassa beschikbaar is voor de productie van groen gas. Zijn dat alleen binnenlandse reststromen of gaan we biomassa of groen gas importeren? Staat dat niet een duurzame ontwikkeling elders op de wereld in de weg? Wordt die biomassa niet al gebruikt voor biobrandstoffen of groene feed stocks? Ook de productie van waterstof is met onzekerheden omgeven. Hoeveel waterstof kan gemaakt worden uit (een overschot van) duurzame elektriciteit op enig moment? Wat kost de productie van waterstof uit aardgas met CCS en welke mogelijkheden zijn er voor kostendaling? Is er draagvlak voor CCS en het produceren van deze blauwe waterstof? Wat kosten de infrastructuur voor waterstof en CCS?
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld groen gas en waterstof waarin deze gasvormige energiedragers aardgas vervangen.
D	Impact op systeem	Als niet voldoende groen gas en waterstof beschikbaar is dan kunnen gasvormige energiedragers geen grote rol spelen in de warmtevoorziening.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Met de beperkte groen gas productie in Nederland en de huidige rol van waterstof lijkt dit toekomstbeeld alleen kans van slagen te hebben op langere termijn. Het transitievraagstuk rond warmte vraagt om duidelijkheid op welke termijn en waarmee die termijn kan worden beïnvloed.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Er zijn scenario's nodig die een duidelijk beeld geven van de mogelijke groei van groen gas en waterstof productie in Nederland en wereldwijd. Die scenario's moeten rekening houden met een groeiende vraag naar biomassa vanwege andere doeleinden, zoals groene feedstocks en biobrandstoffen in wegtransport maar ook in lucht- en scheepvaart. Ook de routekaart hernieuwbaar gas vermeldt: " Het is wenselijk dat een visie op de rol van gasvormige energiedragers ook voor de Nederlandse situatie wordt uitgewerkt en gekwantificeerd".

A	Titel issue/knelpunt	3B Aanpassingen gas-infrastructuur en gaskwaliteit eindgebruikers
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	De vraag is in hoeverre het bestaande aardgasnet geschikt is voor de gaskwaliteit van biogas of waterstof. Welke aanpassingen zijn nodig en mogelijk? Als biogas wordt opgewerkt tot aardgaskwaliteit spreken we van groen gas dat in het aardgasnet kan worden ingevoed. Maar wegen de kosten van het opwerken tot aardgaskwaliteit op tegen de kosten van aanpassing van het net? Tot welk percentage kunnen biogas of waterstof worden bijgemengd in het bestaande aardgasnet? Volgens een praktijkproef op Ameland bleek tot 20% waterstof in het bestaande gasnet te kunnen worden bijgemengd, maar volgens de huidige regelgeving is dat niet toegestaan. Ook apparaten als ketels en fornuizen zijn alleen geschikt voor aardgaskwaliteit, hoe kun je die geschikt maken voor bijv. waterstof?
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld groen gas en waterstof waarin deze gasvormige energiedragers aardgas vervangen.
D	Impact op systeem	Als niet voldoende groen gas en waterstof beschikbaar is dan kunnen gasvormige energiedragers geen grote rol spelen in de warmtevoorziening.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Met de beperkte groen gas productie in Nederland en de huidige rol van waterstof lijkt dit toekomstbeeld alleen kans van slagen te hebben op langere termijn. Het transitievraagstuk rond warmte vraagt om duidelijkheid op welke termijn en waarmee die termijn kan worden beïnvloed.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Er zijn scenario's nodig die een duidelijk beeld geven van de mogelijke groei van groen gas en waterstof productie in Nederland en wereldwijd. Die scenario's moeten rekening houden met een groeiende vraag naar biomassa vanwege andere doeleinden, zoals groene feedstocks en biobrandstoffen in wegtransport maar ook in lucht- en scheepvaart. Ook de routekaart hernieuwbaar gas vermeldt: " Het is wenselijk dat een visie op de rol van gasvormige energiedragers ook voor de Nederlandse situatie wordt uitgewerkt en gekwantificeerd".

Issues en knelpunten bij toekomstbeeld 4 combinatie gas en elektriciteit:

- A. Vergroening fossiele deel en risico op lock-in
- B. Optimalisatie tussen elektriciteit en gas

Daarnaast zijn issues en knelpunten van belang die ook spelen bij het toekomstbeeld Elektrificatie: groei duurzame elektriciteit, aanpassing netinfrastructuur elektriciteit, groeiende vraag naar flexibiliteit, inpassing warmtesysteem eindgebruikers. Ook de issues en knelpunten die horen bij het toekomstbeeld groen gas en waterstof zijn relevant.

A	Titel issue/knelpunt	4A Vergroening fossiele deel en risico op lock in
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	De verduurzaming van de warmtevoorziening met hybride oplossingen biedt voordelen. Er kan gestart worden met elektrificatie, maar voor pieklast wordt nog steeds aardgas gebruikt. De installaties bij eindgebruikers zullen daarvoor veel goedkoper en makkelijker inpasbaar zijn en de aanpassingen aan het elektriciteitsnet beperkt. Als voor een hybride warmtevoorziening wordt gekozen met inzet van aardgas, maar de verduurzaming van de gasinzet lukt niet, leidt de keuze voor een hybride warmtevoorziening dan niet tot een lock-in?
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit.
D	Impact op systeem	Als niet voldoende groen gas en waterstof beschikbaar is dan kunnen gasvormige energiedragers geen grote rol spelen in de duurzame warmtevoorziening voor de toekomst.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Ruim voor 2030 moet helder zijn of een hybride warmtevoorziening met een combinatie van de duurzame elektriciteit en de inzet van duurzame gasvormige energiedragers in 2050 tot de mogelijkheden behoort, omdat vanaf dat moment nog 20 jaar over is voor de vervanging van hybride door volledig elektrische installaties.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Monitoring van de vergroening van de gasvoorziening en elektriciteitsvoorziening is nodig en zicht op de verwachte ontwikkeling daarvan. Ook de routekaart hernieuwbaar gas vermeldt: "Het is wenselijk dat een visie op de rol van gasvormige energiedragers ook voor de Nederlandse situatie wordt uitgewerkt en gekwantificeerd." Daarbij moeten hybride oplossingen niet worden vergeten.

A	Titel issue/knelpunt	4B Optimalisatie tussen elektriciteit en gas
B	Korte beschrijving issue / knelpunt	Een hybride warmtevoorziening betekent dat ingezet wordt op de toepassing van installaties bij eindgebruikers die zowel met elektriciteit als gasgestookt kunnen worden bedreven. Bij eindgebruikers worden hybride warmtepompen geïnstalleerd die vanuit een specifieke regeltechniek gasgestookt dan wel elektrisch worden bedreven. In de industrie wordt power to heat gecombineerd met gasgestookte processen. Wat is in een hybride scenario een optimale mix tussen de inzet van elektriciteit en gasvormige energiedragers? Wat bepaalt de optimale mix: de capaciteit van de aansluiting, de prijs van gas en elektriciteit op de markt, de mate van groei van duurzame energiedragers? In hoeverre is vraagsturing mogelijk?
C	Aan welke toekomstbeeld(en) relateert dit issue?	Aan het toekomstbeeld combinatie gas en elektriciteit.
D	Impact op systeem	Hybride installaties kunnen een belangrijke rol spelen in de oplossing van het flexibiliteitsvraagstuk op de elektriciteitsmarkt.
E	Wanneer moet dit issue opgelost zijn?	Optimalisatie tussen het gasgestookte en elektrische deel van hybride installaties speelt bij iedere toepassing van hybride warmtepompen en ontwerp van een hybride installatie in de industrie een rol.
F	Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?	Inzicht in verschillende regelstrategieën van hybride warmtepompen en de daarbij behorende consequenties voor capaciteit en energievraag, kosten en businesscase van de eindgebruiker. Inzicht in ontwerpprocessen rond elektrificatie en hybride installaties in de industrie en de mogelijkheden van vraagsturing.

In de verschillende toekomstbeelden komen dezelfde issues terug, die we kunnen bundelen tot een thema:

Thema	1 Elektrificatie	2 Duurzame warmte	3 Groen gas en waterstof	4 Combinatie gas/ elektriciteit
Tempo verduurzaming	Groei duurzame elektriciteit	Groei duurzame warmte	Beschikbaarheid groen gas en waterstof	Risico lock in
Infrastructuur aanpassing	Uitbreiding capaciteit elektriciteitsnet	Ontwerp en financiering 4 ^e generatie warmtenetten	Aanpassing gasinfrastructuur	Zie onder 1 en 3
Flexibiliteit	Groeiende vraag flexibiliteit	Matching warmtevraag en aanbod		Optimalisatie tussen gas en elektriciteit
Transformatie bij eindgebruikers	Inpassing in systeem eindgebruiker Nieuwe processen bij industrie	Inpassing in systeem eindgebruiker	Aanpassing installaties eindgebruiker	

5 Kennis- en innovatieagenda

Naast de thema's die volgen uit de inventarisatie van issues in de toekomstbeelden, is er de vraag hoe de afweging tussen oplossingsrichtingen het beste kan worden gemaakt. Daarmee komen we tot 5 thema's:

1. Tempo verduurzaming
2. Optimale inzet energiedragers (afwegingskader)
3. Aanpassing infrastructuur
4. Flexibiliteit
5. Transformatie bij eindgebruikers

Thema 1 Tempo verduurzaming

Is het tempo van verduurzaming van de warmtevoorziening in balans met het tempo van verduurzaming van energiedragers?

Te adresseren kennisvragen:

- Hoeveel duurzame elektriciteit, duurzame warmte en groen gas/H₂ is er beschikbaar voor de warmtevoorziening in samenhang met andere energiefuncties in 2030 en 2050?
- Welke factoren zijn bepalend voor de balans tussen het tempo van verduurzaming van de warmtevraag en het tempo van verduurzaming van energiedragers en hoe kunnen deze worden beïnvloed? Bijvoorbeeld:
 - Hoeveel import van duurzame energiedragers is mogelijk?
 - Hoeveel kan de warmtevraag worden gereduceerd?
 - Wat is de omvang en timing van elektrificatie van de warmtevraag?

Te ontwikkelen:

Een kwantitatieve visie

De beantwoording van deze kennisvragen start met het analyseren van bestaande scenario's en routekaarten om de aanbodkant in beeld te brengen. Dat kunnen studies zijn die binnen de TKI's zijn uitgevoerd of daarbuiten. Het gaat dan om beelden van de groei van windenergie op zee, op land en van zon-PV en productie van duurzame elektriciteit en warmte uit biomassa tot 2030 en verder. Daarnaast is de verwachte groei van duurzame warmte uit geothermie en aquathermie en de verwachte groei van productie van groen gas en waterstof van belang. Daarbij moet in kaart worden gebracht welke factoren bepalend zijn voor hoeveelheid beschikbare duurzame elektriciteit, warmte en gas in 2030 en verder. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om kostenontwikkelingen, rendementsverbeteringen, financiële ondersteuning van het Rijk, ruimtelijke inpassing in concurrentie met andere functies als natuur en drinkwater en de import van energiedragers. Doordat verschillende factoren worden meegenomen, zullen de scenario's een bandbreedte aan mogelijk beschikbare duurzame energie laten zien.

Om een kwantitatieve visie te ontwikkelen op de vraag in hoeverre er voldoende duurzame energiedragers zijn om de warmtevoorziening in Nederland in te vullen, moeten ook ontwikkelingen aan de vraagkant in beeld worden gebracht. Het gaat dan om een goed zicht op de ontwikkeling van de

warmtevraag in industrie, glastuinbouw en gebouwde omgeving richting 2030 en verder. Welke reductie van de warmtevraag is mogelijk of zal naar verwachting plaats vinden? Welke efficiencywinst is er door andere conversie-technieken? Welk deel van de warmtevraag van de industrie kan met elektriciteit worden ingevuld en welk deel met andere energiedragers zoals waterstof? Welke structurele veranderingen in de sector industrie vinden er plaats, denk aan de toekomst van de raffinagesector, kunstmestproductie? Welke veranderingen worden verwacht in de glastuinbouw qua verschillende teelten met verschillende energie-intensiteit op termijn van 2030? Bij het in beeld brengen van de vraagkant moet qua warmtevraag rekening worden gehouden met verschillende temperatuurniveaus. Ook uitwisseling van warmte tussen sectoren is van belang: In hoeverre is restwarmte uit de industrie ook in de toekomst beschikbaar voor andere sectoren of wordt deze via waste heat recovery en industriële warmtepompen in de industrie zelf benut? In welke mate is cascadering van warmte mogelijk?

Bij het ontwikkelen van een kwantitatieve visie zijn niet alleen de ontwikkeling van de warmtevraag van belang, maar ook de ontwikkeling van andere energiefuncties, zoals de elektriciteitsvraag voor kracht/licht en mobiliteit. Het gaat dan bijvoorbeeld om de vraag in hoeverre de elektriciteitsvraag voor kracht/licht door verdere efficiencyverbeteringen kan dalen en of de groei van elektrische auto's of de inzet van biobrandstoffen voor scheep- en luchtvaart.

Tijdslijn:

Er is vanuit systeemintegratieperspectief veel behoefte aan een kwantitatief beeld van het tempo van verduurzaming, die gedragen wordt door betrokken stakeholders. Het verdient dan ook aanbeveling op korte termijn (komende 4 jaar) bestaande bronnen en scenariostudies te inventariseren, om vervolgens kennislacunes in kaart te brengen. Eventueel moeten afzonderlijke studies worden uitgevoerd om de afhankelijkheden rond specifieke bronnen, functies, of vraagsectoren in kaart te brengen.

Stakeholders:

Een dergelijke beeld moet worden ontwikkeld in samenspraak met stakeholders uit bedrijfsleven, overheid en kennisinstellingen door een partij die het hele energiesysteem overziet en kennis heeft van scenario's.

Thema 2 Optimale inzet energiebronnen en energiedragers, technieken en infrastructuur (afwegingskader)

Op welke wijze kunnen afwegingen in de warmtetransitie worden onderbouwd?

Te adresseren kennisvragen:

- Wat bepaalt de optimale inzet van energiedragers vanuit maatschappelijk perspectief? Hierbij is een aantal subvragen essentieel:

- Wat is een juiste manier om tot een merit order te komen van de inzet van energiedragers naar functie en sector in de warmtevoorziening en breder in het energiesysteem, waarbij betaalbaarheid, duurzaamheid, uitvoerbaarheid en betrouwbaarheid (beschikbaarheid/flexibiliteit etc.) de onderscheidende criteria zijn?
- Wat zijn de mogelijkheden ook op lange termijn van energie-uitwisseling tussen sectoren, bijv. warmte van de industrie naar de gebouwde omgeving? In hoeverre is cascadering nog mogelijk bij een sterke reductie van industriële restwarmte?
- Hoeveel ruimte we willen besteden aan het opwekken van duurzame energie en beschikbare ruimte voor andere functies zoals natuur en waterwinning.
- Hoe kan extra duurzame warmtelevering worden afgewogen tegen reductie van de warmtevraag? Wanneer is het een, wanneer het ander de betere optie?
- Welke input levert de beantwoording van de hierboven geschetste kennisvragen aan een afwegingskader op lokaal niveau voor lokale overheden of eindgebruikers? Worden keuzes in de verduurzaming van de warmtevoorziening collectief of individueel gemaakt?

Te ontwikkelen:

Onderzoek vergelijking toepassingen energiedragers

Het potentieel aan duurzame bronnen en energiedragers dat beschikbaar is voor warmte volgt uit de kwantitatieve inventarisatie die onder thema 1 wordt ontwikkeld. Om de vraag naar de optimale inzet van energiedragers naar functie en sector te beantwoorden is het van belang verschillende toepassingen van bijvoorbeeld biomassa, duurzame elektriciteit en warmte uit geothermie naast elkaar te zetten. Waar leveren duurzame energiedragers de meeste CO₂-reductie? Waar is die toepassing het meest kosteneffectief in euro's per ton vermeden CO₂ voor de BV Nederland? Hoe is de businesscase voor de investeerder en de eindgebruiker? Leidt die business case door marktordening, regulering en belastingen tot andere keuzes dan vanuit maatschappelijk perspectief wenselijk zou zijn?

Onderzoek collectieve/individuele keuzes infrastructuur in gebouwde omgeving

Wanneer worden afwegingen voor een duurzame warmtevoorziening collectief of individueel gemaakt? Is het noodzakelijk om collectief te kiezen vanwege hoge infrastructuurkosten? Is het mogelijk woning- en gebouwdegenaren een vrije keuze te geven? Wegen de extra kosten van aanpassingen van infrastructuur die in dat geval worden gemaakt op tegen de waarde van keuzevrijheid?

Input lokale afwegingskaders

Beantwoording van deze kennisvragen geeft richting aan een afwegingskader dat gebruikt kan worden in regionale energiestrategieën of warmteplannen voor de keuze tussen alternatieven in aardgasvrije wijken. Regionale energiestrategieën vragen om een regionale scope, zo zijn in de regio Rotterdam andere energiedragers voor handen dan in de provincie Limburg. Gemeenten en provincies zullen de komende jaren dergelijk strategieën maken en hebben behoefte aan ondersteuning bij het kwantificeren van die strategieën en het helder in kaart brengen van keuzemogelijkheden.

Tijdslijn:

De kennisvragen die hier geadresseerd worden zijn urgent vanwege de warmteplannen die gemeenten in de komende jaren gaan maken voor aardgasvrije wijken en de regionale energiestrategieën van provincies. Daarbij vereist dit thema wel input van thema 1. De vraag rond collectieve dan wel individuele keuzes en de invloed daarvan op aanpassing van infrastructuur kan tegelijkertijd met de uitwerking van thema 1 worden uitgewerkt. Ook kan ondertussen de vergelijking van verschillende toepassingen van energiedragers zoals biomassa, duurzame elektriciteit en warmte uit geothermie worden gemaakt met aandacht voor emissiereductie, kostenefficiëntie en businesscase.

Stakeholders:

Het ontwikkelen van afwegingskaders vraagt in het bijzonder betrokkenheid van diegenen die de afweging moeten maken, gemeenten, provincies en het Rijk. Daarnaast zullen de consequenties van collectieve dan wel individuele keuzes en de kosten voor aanpassingen van infrastructuur in samenwerking met netwerkbedrijven en warmteleveranciers onderzocht moeten worden. Kennisinstellingen kunnen door analyse en het ontwikkelen van methodiek bijdragen aan het proces om tot breed gedragen beslissingen te komen.

Thema 3 Aanpassing net-infrastructuur

Welke consequenties zijn verbonden aan de benodigde aanpassing van de (net-) infrastructuur voor een duurzame warmtevoorziening?

Te adresseren kennisvragen:

- Hoeveel moeten elektriciteitsnetten verzwakt worden bij elektrificatie van de warmtevoorziening, wat zijn de kosten daarvan en hoe worden die kosten verdeeld? Wat is de ruimtelijke impact van de verzwaring van elektriciteitsnetten?
- Hoe komen we tot 4^e generatie warmtenetten? Wie investeert hierin? en hoe gaan we die financieren? Vraagt dit een aangepaste marktordening? Hoe kunnen grote en kleine warmtebronnen naast elkaar worden ingepast? Hoe gaan we om met "pro-sumers"?
- Wat is er nodig om het bestaande aardgasnet geschikt te maken voor bijmenging van substantiële hoeveelheden biogas of waterstof? Wat zijn de kosten hiervan? Wie investeert?
- Welke uitbreiding van CO₂- en H₂-infrastructuur (transport en opslag) is nodig en wat zijn de kosten voor de aanleg ervan? Hoe zit het met veiligheidsissues, publieke acceptatie?
- Wat is de rol voor lokale duurzame warmteoplossingen zonder grote netaanpassingen?

Beantwoording van deze vragen geeft inzicht in hoe aanpassingen van net-infrastructuur uitwerken op: kosten, ruimtelijke impact, ontwerp/integratie/uitrol (fasering) en het stakeholderproces: organisatie, governance, financiering en marktordening.

Te ontwikkelen:

Onderzoek netverzwaring elektriciteit in samenhang met systeemkeuzes

De verzwaring van elektriciteitsdistributienetten in de gebouwde omgeving is nu een taak van de regionale netbeheerders.

De kosten daarvan worden gesocialiseerd en verdeeld over alle aansluitingen zodat iedere kleinverbruiker dezelfde netwerktarieven betaalt. Dit mechanisme draagt niet bij aan het voor de maatschappelijke discussie en afwegingskaders noodzakelijke inzicht in de werkelijke kosten voor netverzwaring die netwerkbedrijven maken. Hoeveel elektriciteitsnetten moeten worden verzwaard hangt onder andere af van het temperatuurniveau van de warmtevraag, de warmtebron die de warmtepomp gebruikt en de capaciteit van opslag in een boiler. De afhankelijkheden tussen systeemkeuzes en piekvraag moeten in kaart worden gebracht. De kosten van netverzwaring door elektrificatie bij industrie en glastuinbouw worden wel direct door individuele eindgebruikers betaald en spelen direct een rol in de business case van elektrificatie. Wanneer de kosten van elektrificatie voor de industrie in beeld worden gebracht, zijn ook de kosten van netverzwaring een onderdeel daarvan. De mogelijkheden om de piekvraag te reduceren zijn daarom ook van belang.

Ontwikkeling ontwerptools en pilot 4^e generatie warmtenetten

Verwacht wordt dat bij nieuwe warmtenetten een trend zal ontstaan naar warmtenetten gevoed vanuit meerdere duurzame bronnen, ontworpen op lage temperatuur en met elektrische warmtepompen om bij de eindgebruiker de temperatuur op het gewenste niveau te brengen. Warmteopslag zal bij de inpassing van duurzame bronnen in warmtenetten een grotere rol spelen. Het voordeel is dat met zo'n ontwerp de piekbelasting in het warmtenet wordt beperkt, waardoor dunnere warmteleidingen kunnen worden aangelegd en de warmteverliezen verminderen. Deze warmtenetten zijn daardoor goedkoper qua aanleg en in exploitatie. Voor het ontwerp van deze 4e generatie warmtenetten zijn nieuwe ontwerptools nodig die op basis van vraagpatronen het warmtenet op lagere pieklast kan dimensioneren. Vergelijking van het ontwerp van deze 4e generatie warmtenetten met het ontwerp van bestaande warmtenetten moet de voordelen in kaart brengen en warmteleveranciers overtuigen deze nieuwe ontwerpmethodes toe te passen in nieuwe warmtenetten.

Onderzoek marktordening warmtenetten

De aanleg van warmtenetten is nu geen taak van regionale netbeheerders maar van marktpartijen waarbij ieder project op zichzelf een rendabele businesscase moet zijn. In de afgelopen jaren zijn veel projecten alleen tot stand gekomen met inmenging van lokale overheden. Mogelijk vormt deze marktordening een belemmering voor uitbreiding van warmtenetten. De vraag is of een andere marktordening met een rol van regionale netbeheerder waardoor en gelijk spelveld tussen verschillende infrastructuren (gas, elektriciteit en warmte) ontstaat een meerwaarde biedt. Anderzijds kunnen subsidies en fiscale maatregelen de onrendabele top van warmtenetten wegnemen. Marktonderzoek is nodig om te weten onder welke voorwaarden marktpartijen bereid zijn in nieuwe warmtenetten te investeren.

Versnellen onderzoek bijmenging groen gas en waterstof in bestaande gasnet

Onderzoek naar de mogelijkheden voor bijmenging van groen gas en waterstof in het aardgasnet gebeurt al bij netbeheerders, maar kan mogelijk versneld worden met ondersteuning vanuit de Topsector.

Onderzoek naar CO₂ en H₂ netten

Onderzoek naar hoeveel uitbreiding van CO₂- en H₂-netten en -opslag nodig is op welke termijn in industrie en glastuinbouw. Welke marktpartijen willen dat realiseren en onder welke randvoorwaarden is dat mogelijk?

Ontwikkeling concepten zonder netaanpassing

Naast aandacht voor de aanpassing aan net-infrastructuur moet er ook aandacht zijn voor lokale duurzame warmteoplossingen zonder aanpassingen aan net-infrastructuur. Ontwikkeling van concepten om woningen, gebouwen, kassen en industrie qua energie zelfvoorzienend te maken zijn een alternatief voor infrastructuraanpassingen. Als dit soort concepten zich beperken tot een nichemarkt van tiny houses of zich beperken tot nieuwbouw, dan is de impact voor de bestaande gebouwde omgeving beperkt. Worden er innovatieve oplossingen ontworpen voor renovatie dan zou dat veel effect sorteren. In de glastuinbouw wordt in het programma 'Kas als energiebron' al gewerkt aan innovatieve kasconcepten die minder energie gebruiken.

Tijdslijn:

Op korte termijn is het helder in beeld brengen van de consequenties van netaanpassingen bij verduurzaming van de warmtevoorziening het belangrijkste. Pas daarna kan de discussie over kostenverdeling worden gevoerd. Voor warmtenetten moeten ontwerptools voor 4e generatie warmtenetten inclusief warmteopslag worden ontwikkeld. Het gebruik van die ontwerptools kan in een pilot worden getoetst. Het onderzoek naar bijmenging groen gas en waterstof, CO₂ en H₂ netten en concepten zonder netaanpassingen kunnen wachten tot midden lange termijn (4-8 jaar)

Stakeholders:

Het ligt voor de hand deze kennisvragen samen met netwerkbedrijven te adresseren. Voor het ontwerp van de 4e generatie warmtenetten moeten de huidige warmteleveranciers worden betrokken, maar ook nieuwe spelers op de warmtemarkt. Kennisinstellingen kunnen netwerkenaanpassingen in beeld brengen. Ook kunnen zij i.s.m. de sector ontwerptools ontwikkelen.

Thema 4 Flexibiliteit

Hoe matchen we vraag en aanbod in een duurzaam warmtesysteem?

Te adresseren kennisvragen:

- **ONTWERP EN INRICHTING:** Gegeven de verwachting dat de vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt toeneemt, hoe kunnen we met het juiste ontwerp van warmtesystemen inspelen op deze flexibiliteitsbehoefte?
- **BEHEER:** Hoe kun je de flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt vergroten door vraagsturing binnen het warmtesysteem, de aansturing van warmtebronnen, en het management en inzet van warmteopslag. Welke rol speelt de conversie naar andere energiedragers of producten in dit vraagstuk?
- Welke rol kan vraagsturing, flexibel vermogen en warmteopslag spelen in het beheer van warmtenetten gevoed met duurzame bronnen? Hoe kunnen we deze aspecten optimaliseren? Hoe ontwerp je een efficiënt smart (heat)

grid, waarop gemakkelijk nieuwe bronnen en eindverbruikers kunnen worden aangesloten?

- Welke veranderingen zijn er nodig in tariefstructuur en marktordening om flexibiliteit van vraag en aanbod te vergroten (zowel elektriciteits- als warmtemarkt)?

Te ontwikkelen:

Beantwoording van deze vragen draagt bij aan inzicht in maatregelen om tot een betrouwbare duurzame warmtevoorziening te komen. Dit vraagt om verdere conceptontwikkeling d.m.v. design research, participatief actieonderzoek³ en, experimenten en pilots.

Conceptueel kader flexibiliteit verbeteren

Conceptueel vraagstuk is hoe je de vraag naar flexibiliteit in het energiesysteem en de invulling daarvan met verschillende flexopties in kaart brengt. Daarbij is van belang onderscheid te maken naar verschillende schaalniveau's (internationaal, nationaal, regionaal lokaal, individueel), tijdschalen (maanden, weken, dagen, uren), ruimtelijke inpassing en de rol van stakeholders.

Bij ruimtelijke inpassing denken we bijvoorbeeld aan het volgende voorbeeld: Waterstofproductie via elektrolyse (P2G) vindt meestal plaats in een industriële omgeving. De productie van H₂ gaat gepaard met de productie van warmte. Overwogen kan worden om de productie van H₂ te lokaliseren in de buurt van een grote warmtevraag, bijvoorbeeld in de gebouwde omgeving. Voor de Eemsdelta regio kan dit betekenen dat de omzetting van offshore elektriciteit in H₂ niet in de Eemshaven plaatsvindt maar in de omgeving van de stad Groningen. De warmte kan dan makkelijk via warmtenetten worden benut in de gebouwde omgeving.

Onderzoek update groeiende vraag flexibiliteit op elektriciteitsmarkt 2030 en verder

De groeiende vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt is reeds in kaart gebracht⁴. Afhankelijk van de afspraken in het klimaatakkoord zullen de verwachtingen rond elektrificatie tot en met 2030 en verder mogelijk anders worden ingeschat of leiden tot een kleinere bandbreedte in de verschillende scenario's die zijn geschetst. In 2019 zou daarom een update van de verwachte vraag naar flexibiliteit kunnen worden gemaakt. Bij het opnieuw in kaart brengen van de vraag naar flexibiliteit is het wenselijk meer onderscheid te maken naar de flexibiliteitsvraag op verschillende tijdschalen (bijvoorbeeld minuten, uren, dagen, weken, maanden) en ruimtelijke schaalniveaus.

Onderzoek vergelijking flexopties

De groeiende vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt kan op verschillende manieren worden ingevuld. Er is behoefte aan vergelijking van die flexopties. Op welke tijdschaal kan een optie flexibiliteit geven en in welke omvang? Wat zijn de kosten

van die flexoptie? Bij flexopties denken we niet alleen aan flexibel inzetbare elektriciteitsproductievermogen of interconnectiecapaciteit, maar juist aan opties aan de vraagzijde van het energiesysteem. De industrie kan een grote bijdrage leveren aan flexibiliteit wanneer zij beschikt over regelbare hybride warmtesystemen of bij vraagsturing in het geval van power to products waarbij productie tijdelijk kan worden teruggezegeld en de voorraad "products" de buffer vormt. Tevens moeten de opties worden verkend voor vraagsturing in andere sectoren dan de industrie, de glastuinbouw en de gebouwde omgeving. Daarnaast is de vraag in hoeverre de batterij van elektrische auto's gebruikt kan worden als flexoptie. Tot slot moeten mogelijkheden voor collectieve en individuele opties voor elektriciteitsopslag of warmteopslag in de vergelijking van verschillende opties worden betrokken. Voor de vergelijking van flexopties moeten mogelijk nieuwe rekentools worden ontwikkeld. Mocht blijken dat de kenmerken van flexopties nog onduidelijk zijn dan zullen deze nog conceptueel moeten worden uitgewerkt en in de praktijk getest.

Pilot regelbare hybride installatie industrie

Omdat de industrie een grote bijdrage kan leveren aan flexibiliteit wanneer zij beschikt over regelbare hybride warmtesystemen, zou al op korte termijn een pilot kunnen plaatsvinden om op kleine schaal ervaringen met deze flexoptie te genereren.

Onderzoek flexopties warmtenetten

Een warmtenet op basis van duurzame bronnen kan alleen voldoende capaciteit leveren door de inzet van buffers. Warmte die wordt geproduceerd op momenten van minder vraag moet worden opgeslagen; daarmee kan de efficiency van het systeem worden geoptimaliseerd. Verschillende typen buffers kunnen een verschillende flexibiliteit leveren op verschillende schaalniveaus, bijvoorbeeld thermo-chemical materials (TCM) en phase-change materials (PCM) voor kleinschalige opslag, en aquifer-thermal storage (ATES, WKO) voor grootschalige opslag. Het inzetten van buffers op de juiste plek in het systeem vergroot zowel de flexibiliteit als de robuustheid in het systeem. In warmtenetten waar warmteproductie plaats vindt met meerdere kleinere duurzame bronnen en lage temperaturen (4de generatie warmtenetten) wordt de warmte met warmtepompen opgewaardeerd. Afhankelijk van het ontwerp kan de het aansturen van deze warmtepompen ook als flexoptie worden ingezet.

Pilot grootschalige warmteopslag in gebouwde omgeving

Een pilot met warmteopslag in een warmtenet, bijvoorbeeld in een waterbassin zoals dat in Denemarken gebeurt, moet duidelijk maken wat de mogelijkheden zijn voorgrootschalige opslag over langere tijdsperioden. Daarbij is ook ruimtelijke inpassing in de wijk een aandachtspunt.

Onderzoek wijziging tariefstructuur en wetgeving

Willen we flexopties uit vraagsturing benutten dan kan dat door eindverbruikers zelf of door installaties bij eindverbruikers die op afstand aangestuurd kunnen worden. De vraag is hoe je dat wilt organiseren. Dat vraagt technische aanpassingen, maar ook wijzigingen in tariefstructuur en wetgeving.

3 Participatief actieonderzoek speelt zich af in een real-life situatie. Onderzoek en actie zijn in participatief actieonderzoek met elkaar verbonden. In participatief actieonderzoek werken de deelnemers (onderzochten) en onderzoekers samen aan het onderzoek. In co-creatie wordt praktische kennis gegenereerd om daarmee individueel of collectief handelen en/of de situatie waarin dat handelen plaatsvindt te veranderen.

4 Zie bijvoorbeeld de Flexnet studie.

Tijdslijn:

Op korte termijn is het conceptueel uitwerken van het begrip flexibiliteit van belang, een up to date inschatting van de flexibilitetsvraag op de elektriciteitsmarkt en een vergelijking van verschillende opties om aan die vraag te voldoen.

Voor warmtenetten moeten ontwerp tools voor 4e generatie warmtenetten inclusief warmteopslag worden ontwikkeld.

Ook aansturing van installaties bij eindgebruikers moet op korte termijn (in een pilot/demoproject/living lab) onderzocht worden.

Op midden lange en lange termijn zullen pilots met verschillende flexopties volgen, zodat een steeds beter beeld ontstaat van wat in de praktijk mogelijk is.

Stakeholders:

Het ligt voor de hand deze kennisvragen samen met alle betrokkenen (netwerkbedrijven, energieleveranciers en eindverbruikers) op te pakken. Voor het ontwerp van de 4^e generatie warmtenetten moeten de huidige warmteleveranciers worden betrokken, maar ook nieuwe spelers op de warmtemarkt. Het ontwerp van warmteopslag heeft ook de interesse van partijen als Bodemenergie.NL. Kennisinstellingen onderzoeken nieuwe concepten en ontwerp tools voor het realiseren van flexibiliteit en de vergelijking van verschillende opties. Ook doen zij onderzoek naar de vraag welke andere tariefstructuur of marktordening eventueel nodig is om de flexibiliteit te realiseren (policy analysis, agent-based modeling).

Thema 5 Transformatie bij eindgebruikers

Hoe past een duurzame warmtevoorziening in het warmtesysteem van eindgebruikers? Hoe krijgen we eindgebruikers mee in de energietransitie?

Te adresseren Kennisvragen:

- Wat zijn de mogelijkheden in de industrie voor energy efficiency, waste heat recovery, power-to-heat, power-to-H₂ (elektrolyse), power-to-chemicals en van elektrische scheidingsprocessen? Welke randvoorwaarden zijn daarbij voor de industrie van belang?
- In de gebouwde omgeving is kennis nodig van de toepassing van lage temperatuur warmtesystemen en de noodzaak tot isolatie. Hoeveel isolatie is nodig voor welk temperatuurniveau? Wat kost dat en wie gaat dat betalen? Hoe krijgen we woningeigenaren mee?
- Voor de glastuinbouw hebben kennisvragen meer betrekking op hoe de piekvraag moet worden ingevuld en hoe warmtevraagreductie kan bijdragen in verlagen van die piekvraag.

Te ontwikkelen:

Beantwoording van deze kennisvragen helpt bij het identificeren van de mogelijkheden en barrières bij eindgebruikers in de transitie naar een duurzame warmtevoorziening.

Disseminatie kennis en ervaringen elektrificatie in industrie Voor elektrificatie van de warmtevraag in de industrie geldt dat power to heat (elektrische verwarming) een bestaande technologie is, maar alle overige power to X processen (zoals industriële warmtepompen, elektrolyzers en power-to-products) bevinden zich nog in de ontwikkelingsfase. Daarvoor zijn R&D en pilots nodig (zie roadmap grootschalige conversie en opslag).

Power to heat (elektrische verwarming) wordt in Nederland in de industrie ook nog nauwelijks toegepast op een enkele pilot na, maar in Duitsland en Scandinavische landen wel. Om draagvlak te krijgen voor deze technologie is het van belang dat ervaringen uit het buitenland worden gedeeld en de consequenties van toepassing van power to heat helder zijn en in de Nederlandse praktijk getoetst. Het gaat dan om het technisch functioneren (bijvoorbeeld efficiency), maar ook de investeringskosten en exploitatiekosten. Het kan helpen als kennisinstellingen de en met power to heat installaties in het buitenland en Nederlandse pilots in kaart brengen en beschikbaar maken voor industrie die overwegen de techniek toe te passen. Daarbij moet oog zijn voor de manier waarop het management binnen de industrie de techniek beoordeeld, welke invloed de investering heeft op parameters die voor aandeelhouders belangrijk zijn (bijvoorbeeld effect op de financiële balans of de CO₂ footprint).

Power to heat in de vorm van efficiënte warmtepomptechniek draagt bij aan energiebesparing in processen. De toepassing van warmtepompen in de industrie vraagt vaak om aanpassingen in de processen om tot een optimale integratie van de warmtepomp met het proces te verkrijgen. Ook hierbij geldt dat het verzamelen en delen van ervaringen met pilots en demo's tussen diverse industriële eindgebruikers bijdraagt aan de verdere implementatie ervan.

Pilot regelbare hybride installatie industrie

Wanneer de industrie hybride installaties neerzet, waarbij naast power to heat ook gasgestookte processen in stand worden gehouden, kan zij een bijdrage leveren aan flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt. De vergoeding voor regelbaar vermogen kan de rentabiliteit van elektrificatie verbeteren. Onderzocht moet worden hoe snel hybride installaties op- of afgeschakeld kunnen worden en hoe dit past in het productieproces van de industrie. Naast het ontwerp van regelbare hybride concepten zijn hiervoor ook pilots nodig.

Onderzoek noodzaak isolatie gebouwde omgeving/ concepten goedkope aanpassing bestaande CV systeem

Bij elektrificatie in de gebouwde omgeving is kennis nodig van lage temperatuur verwarmingssystemen en de daarvoor benodigde toepassing van isolatie. Als in het kader van aardgasvrije wijken een bestaande woning all-electric wordt verwarmd, dan moet het bestaande verwarmingssysteem worden aangepast naar lage temperatuur. Hoe kunnen we huidige radiatorsystemen goedkoper aanpassen aan lage temperatuurwarmte? Welke aanpassingen aan de woningschil zijn dan noodzakelijk of wenselijk vanuit comfort? Hoeveel draagt reductie van de warmtevraag bij aan reductie van de piekvraag? Dergelijke vragen kunnen met gebouwssimulaties en in pilots/living labs technisch in kaart worden gebracht. Dat vraagt rekenmodellen die overweg kunnen met vraagpatronen op uurbasis, maar die ook getoetst zijn aan werkelijk energieverbruik in de praktijk. Er zijn ook pilots nodig met goedkopere renovatieconcepten voor woningen en utiliteitsgebouwen. Sociale innovatie speelt eveneens een grote rol. Er moeten naast de technische aspecten ook de wensen van de gebruiker worden meegenomen in het ontwerp.

Pilot duurzame invulling en reductie piekvraag glastuinbouw

In het programma “Kas als energiebron” worden voor de glastuinbouw de mogelijkheden van lage temperatuur systemen al onderzocht. Bij de toepassing van duurzame warmtesystemen zoals geothermie of warmtepompen blijft de belangrijkste vraag hoe de piekvraag duurzaam kan worden ingevuld. Tevens is de vraag hoe de piekvraag kan worden verminderd door efficiency maatregelen. Nieuw te ontwikkelende concepten moeten met vraagpatronen kunnen worden doorgerekend in daarvoor geschikte ontwerptools en in de praktijk in pilots worden getest.

Tijdslijn:

Op korte termijn kan gestart worden met het beschikbaar maken van ervaringen met power to heat en ondersteuning van nieuwe pilots en demo's. Onderzoek en pilots rond de inzet van hybride installaties in de industrie als flexoptie is ook op korte termijn wenselijk. Op midden lange en lange termijn zullen meer pilots met power to products mogelijk zijn. Onderzoek en conceptontwikkeling rond lage temperatuursystemen in bestaande woningen is urgent vanwege het “aardgas vrij ready” maken van de gebouwde omgeving. Het ontwikkelen van warmte concepten voor kassen met een lagere piekvraag kan ook op korte termijn worden gestart in overleg met het programma Kas als energiebron.

Stakeholders:

Dit thema vraagt om uitwerking in samenwerking met eindgebruikers en andere innovatieprogramma's die zich al op die eindgebruikers richten, zoals het TKI Energie&industrie en het TKI Urban Energy. Kennisinstanties kunnen een rol spelen bij het maken van rekenmodellen en ontwerptools die geschikt zijn voor dynamische analyses met vraagpatronen. Door beleidsanalyse, social cost-benefit analyse (MKBA) en d.m.v. een aanpak van maatschappelijk-verantwoord innoveren (MVI) kunnen zij bijdragen aan het ontwikkelen van nieuwe technologische oplossingen die duurzaam kunnen worden geïmplementeerd.

Kennis en Innovatie Agenda Grootschalige opslag en conversie

Auteurs:

VoltaChem

(TNO/ECN):

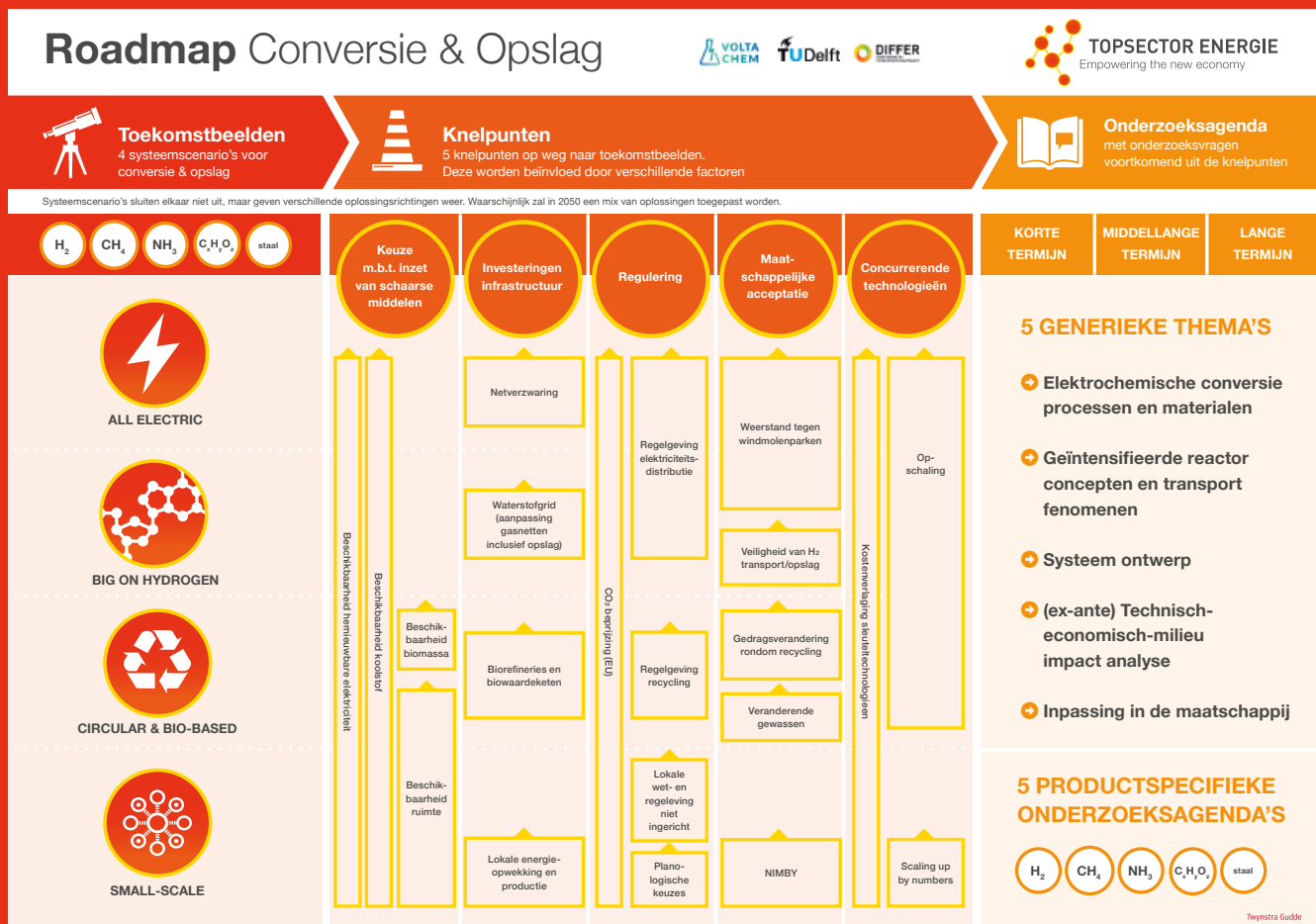
Monique Rijkers

TU Delft:

Bernard Dam

Differ:

Richard van de Sande



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De grote uitdaging voor het duurzame energiesysteem tijdens en na de energietransitie is deze betrouwbaar, veilig en betaalbaar te houden. Dit is een zeer complexe opgave omdat het energiesysteem en haar omgeving, zoals de industrie, gebouwde omgeving en logistiek en transport ook in transitie zijn. Een toekomstig duurzaam energiesysteem kan alleen efficiënt en effectief opereren als het in staat is energie grootschalig op te slaan en/of te converteren. Een naar verwachting kansrijke aanpak voor grootschalige opslag van energie is z.g. chemische opslag, waarbij vermogen (uit duurzame bron) wordt omgezet naar een gas of vloeistof. Momenteel zijn deze technieken nog onvoldoende ontwikkeld, of niet rendabel. Deze conversie en opslagtechnieken zijn ook van groot belang bij de verduurzaming (decarbonisatie) van de industrie. Een gezamenlijke aanpak, vanuit het perspectief van de industrie met als doel de productie van duurzame grondstoffen, en vanuit het perspectief van de energievoorziening met als doel de opslag van duurzame energie, ligt dan ook voor de hand.

Het programma Systeemintegratie van de Topsector Energie richt zich, als doorsnijdend thema, op de systeemveranderingen die essentieel zijn om de transitie naar een geïntegreerd en flexibel energiesysteem van de toekomst mogelijk te maken. Systeemintegratie onderzoekt hierbij welke technologische innovaties in het energiesysteem nodig zijn en welke niet-technische aspecten hier een rol bij spelen.

1.2 Probleemstelling

Momenteel wordt er, vaak in een specifieke context, vraagstuk of gebruiker naar diverse opslag en conversie componenten gekeken. Een integrale meerjarige visie en aanpak ontbreekt. Daartoe wil het Programma Systeemintegratie het voortouw nemen in de ontwikkeling van een nationaal meerjarig innovatieprogramma, waarbij alle kennis van en over dit domein wordt samengebracht. Dit programma moet zijn gebaseerd op een uitgewerkt, hoogwaardig en breed gedragen roadmap die aandacht besteedt aan oplossingen die zowel op korte als lange termijn operationeel kunnen zijn. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) heeft gevraagd om samen met stakeholders uit het veld een nationale roadmap te ontwikkelen voor RVO, Ministerie van EZK en Topsector Energie Systeemintegratie. De centrale vragen daarbij zijn:

- Welke grootschalige chemische conversie en opslagconcepten van duurzame energie naar “groene moleculen” zijn (vanuit technisch en economisch perspectief) mogelijk op korte, middellange en lange termijn?
- Welke innovatiestappen zijn nog nodig, gezien vanuit een geïntegreerde visie op de productie van grondstoffen en energie?

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project is een roadmap tot 2050 te ontwikkelen en een bijbehorende kennisagenda voor de komende 4-8 jaar voor de conversie en opslag van groene energie in moleculen.

Deze roadmap bestaat uit:

- Een analyse van de relevante producten (moleculen) die illustreren wat de uitdagingen zijn voor het op grote schaal converteren en opslaan elektriciteit in groene moleculen en de impact op de daarbij behorende sectoren.
- Systeemscenario's rondom deze producten in 2050.
- Randvoorwaarden en knelpunten gerelateerd aan deze scenario's.
- Onderzoeksagenda voor de komende 4-8 jaar die deze randvoorwaarden en knelpunten adresseren voor korte, middellange en lange termijn.

1.4 Scope

Het bereiken van het 95% CO₂ emissiereductie einddoel behelst een flinke bijdrage van (industriële) sectoren en processen om (grootschalig) brandstoffen en chemicaliën te maken. In de Energietransitie tot 2050 en daarna zullen schone, circulaire brandstoffen en chemicaliën een steeds prominenter rol gaan spelen voor seizoensopslag en langeafstand transport van duurzame energie, als hoge- dichtheid energiedragers voor mobiliteit, en als grondstoffen voor (chemische) industrie.

Deze roadmap bouwt voort op reeds bestaande roadmaps en onderzoeken (zoals ECCM en VNCI). Ook beschouwen we in deze agenda circulaire processen.

Gezien de omvang van de reductiedoelstelling veronderstelt deze roadmap behoefte aan grootvolume productie of beschikbaarheid van brandstoffen en chemicaliën. We bekijken systemen zowel gericht op scale-up als scale-out. ‘Vernieuwende’ duurzame technologie-opties zullen zich de komende decennia moeten benchmarken aan processen die fossiele grondstoffen gebruiken én gekoppeld zijn aan CCS, gezien de afgesproken reductie in CO₂ uitstoot.

1.5 Aanpak

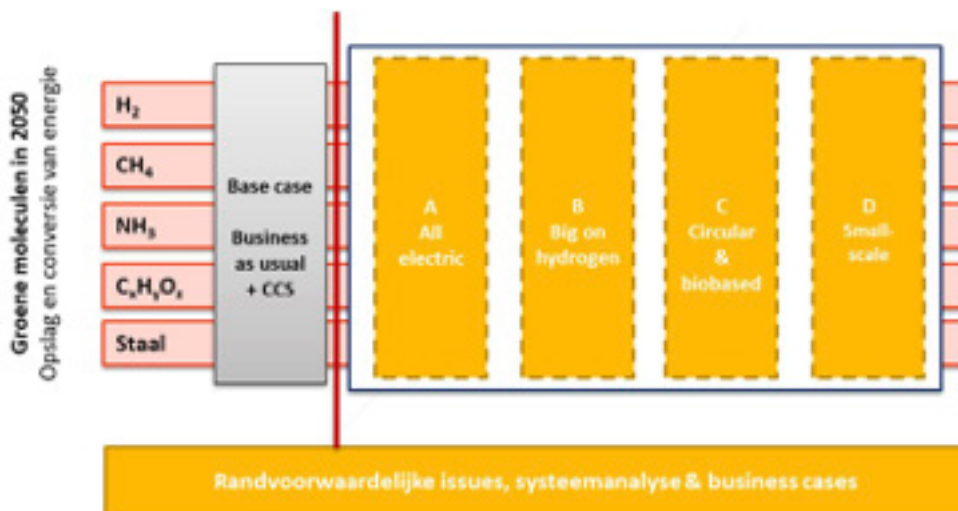
Deze roadmap is tot stand gekomen door:

- Analyse bestaande relevante nationale en internationale rapporten.
- Eerste ronde tafel bijeenkomst ter identificatie van de relevante producten en uitdagingen.
- Uitwerking producten, systeemscenario's, bottlenecks en onderzoeksagenda.
- Tweede ronde tafel voor verdieping en reflectie.
- Definitief maken roadmap en Kennis- en Innovatieagenda.

De betrokken stakeholders zijn stakeholders uit de staal-, energie-, chemie- en apparatenbouw; NGO's; Topsectoren; en brancheorganisaties.

2 Systeemsenario's

Om te bepalen welk onderzoek er nodig is om de klimaatdoelstellingen van 2050 te behalen is een aantal scenario's opgesteld. Deze scenario's zijn als extremen neergezet opdat de onderzoeksvragen zich daarmee helder presenteren. Op basis van bestaand onderzoek en rapporten onderkennen we een base-case en de volgende vier scenario's. Deze scenario's, en de implicatie van de scenario's op conversie en opslag in groene moleculen wordt vervolgens beschreven.



Afbeelding 1: Systeemsenario's 2050 gebaseerd op bestaand onderzoek

2.1 Base case + CCS

2.1.1 Korte omschrijving Business as usual maar met Carbon Capture & Storage

Highlights	Gebruik van fossiele energie en feedstock (base case), maar met Carbon Capture & Storage (CCS)
Infrastructuur	Bestaand + CCS, zowel uit puntbronnen als uit de lucht
Economisch	Investeren in CCS
Belangrijkste stakeholder	Gas- en petrochemische industrie
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Geen (N.B. Grootschalige CCS opties voorhanden, wellicht (elektro)chemisch van aard)
Feedstock	Fossiele grondstoffen (aandacht voor maatschappelijke en geopolitieke aspecten)
Energievorm	Fossiele grondstoffen (aandacht voor maatschappelijke en geopolitieke aspecten)
Beperking	CCS technologie (m.n. kosten) en opslag capaciteit; maatschappelijke acceptatie

Tabel 1.1: Systeemsenario's 2050 gebaseerd op bestaand onderzoek

2.1.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen

Geen noodzaak voor groene moleculen, mits fossiele grondstoffen voor handen zijn binnen maatschappelijk en geopolitiek kader. Wel noodzaak in de uitrol van grootschalige CCS opties, waar innovatie noodzakelijk is voor ontwikkeling van nieuwe (elektro)chemische processen en materialen. Zowel voor afvang uit puntbronnen en direct uit de lucht, gezien de disperse emissies.

2.2 Scenario A: All electric

2.2.1 Korte omschrijving

Alle energie wordt in elektrische vorm geleverd, feedstock moleculen moeten gewonnen worden (met elektriciteit)

Highlights	Gebruik van elektriciteit als energiebron in industriële processen en transport.
Infrastructuur	Elektriciteitsinfrastructuur grootschalig beschikbaar. Infrastructuur nodig voor duurzame feedstock moleculen voor chemische industrie (bron van "C,N,O,H")
Economisch	Grootschalige chemische fabrieken moeten veranderen, qua feedstock en energiegebruik, bijvoorbeeld op grote schaal zelf voorzien in (electrochemisch) H ₂
Belangrijkste stakeholder	Energiesector (DC grid).
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Rechtstreekse elektrochemische conversie van CO ₂ , stikstof en ijzererts naar basis chemicaliën en ijzer
Feedstock	Elektriciteit; CO ₂ uit Direct Air Capture (DAC); water; Elektriciteit
Energievorm	Veel elektriciteit, verzwaring van het grid en opslag van elektriciteit nodig
Beperking	CCS technologie (m.n. kosten) en opslag capaciteit; maatschappelijke acceptatie

Tabel 1.2: Highlights All Electric

2.2.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen

Elektriciteit is de energiedrager. Dat leidt tot een grote behoefte aan opslag en conversie. Lokale (grootschalige) productie van waterstof uit elektriciteit speelt een rol, maar door het ontbreken van een uitgebreide infrastructuur met name als grondstof in de chemie. Ook andere infrastructuur, zoals die voor aardgas is grotendeels vervangen door een verzwaard elektriciteitsnet.

Basis chemicaliën (zoals methanol, ammonia) worden gemaakt op basis van energie uit elektriciteit. Op korte termijn ligt de ontwikkeling op indirecte routes (met waterstof als tussenstap die decentraal wordt geproduceerd). Op de langere termijn zullen directe conversie processen voor bijvoorbeeld syn-gas, ammonia van belang worden. Integratie met CO₂ bronnen (bijvoorbeeld direct air capture) zal noodzakelijk zijn.

IJzer zal geproduceerd worden oftewel met waterstof die op locatie wordt gemaakt met behulp van electrolyzers of te wel op basis van de directe (elektrochemische) reductie van ijzererts.

2.3 Scenario B: Big on hydrogen

2.3.1 Korte omschrijving

Waterstof is de energiedrager (d.w.z. alle elektriciteit wordt omgezet naar H₂)

Highlights	Waterstof is de energiedrager voor transport en energie (feedstock en fuel)
Infrastructuur	Grootschale infrastructuur voor het leveren van H ₂ als commodity. Nodig bron van "C, N, O"-atomen voor in vervolgschemie
Economisch	Grootschalige industrie blijft, met verandering energieverbruik
Belangrijkste stakeholder	Gassector (H ₂ grid)
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	<ul style="list-style-type: none">• Grootschalige uitrol van electrolyzers• Productie van koolwaterstoffen en ammoniak door activering van CO₂ en stikstof via waterstof• Productie van ijzer door waterstof gebaseerde reductie van ijzererts
Feedstock	H ₂ ; CO ₂ uit Direct Air Capture (DAC) , N ₂
Energievorm	H ₂ (op grote schaal gemaakt door direct alle elektriciteit om te zetten)
Beperking	Transport grid en opslag/buffering van H ₂ nodig

Tabel 1.3: Highlights Big on hydrogen

2.4 Scenario C: Circular & Bio-based

2.4.1 Korte omschrijving

Circulaire brandstoffen zijn de energiedrager (d.w.z. biomassa, dan wel alle elektriciteit wordt direct geconverteerd naar moleculen)

Highlights	Circulaire koolwaterstoffen (o.a. biomassa) voorzien in energie en feedstock
Infrastructuur	Grootschalige infrastructuur gefocust op circulaire processen; biologische en kunstmatige processen, en ook infrastructuur voor recycling
Economisch	Nieuwe business modellen verschijnen, waarbij producten ontworpen zijn om langer gebruikt te worden en geschikt zijn voor hergebruik dan wel terugwinning van de elementaire bouwstenen
Belangrijkste stakeholder	Leveranciers en verwerkers van biomassa
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	<ul style="list-style-type: none">• Productie van brandstoffen en chemicaliën op basis van (elektrochemische) conversie van circulaire grondstoffen• Gebruik van elektrochemische processen voor het opwerken van afvalstromen
Feedstock	CO ₂ uit (bio-)CCS en DAC; biomassa
Energievorm	Groene methaan
Beperking	Grote volumes van biomassa nodig

Tabel 1.4: Highlights Circular & bio-based

2.4.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen

De koolstofcyclus wordt in dit systeemscenario gevoed door koolstof uit bijvoorbeeld biomassa en recycling. Conversie van biomassa en reststromen gebeurt deels door thermische conversies in grootschalige complexen. Ook het gebruik van vloeibare koolwaterstoffen speelt nog een rol.

Doordat de koolstofcyclus deels nog uit vaste en vloeibare producten bestaat, is de noodzaak om duurzame elektriciteit om te zetten naar chemicaliën t.b.v. opslag geringer dan bij andere scenario's.

Technologische uitdagingen liggen in dit systeem in de selectieve conversie van een grote variëteit aan grondstoffen. Elektrisch gedreven conversies en scheidingen spelen een belangrijke rol bij het verwerken van biomassa tot een scala aan specifieke producten.

2.5 Scenario D: Small-scale

2.5.1 Korte omschrijving

Lokale, compacte productie van moleculen (d.w.z. geen groot-schalige processen)

Highlights	Local-for-local. De afstand tussen grondstof en energieopwekking, productie en gebruik is kort
Infrastructuur	Lokale, kleinschalige infrastructuur
Economisch	Huidige bedrijfsprocessen zullen ingrijpend veranderen.
Belangrijkste stakeholder	Gassector (H ₂ grid)
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Eindgebruiker
Feedstock	Autonome (elektrochemisch) conversie systemen
Energievorm	Groene methaan, elektriciteit, H ₂
Beperking	Geen gebruik van schaalgrootte en bestaande installaties; planologische keuzes

Tabel 1.5: Highlights Small-scale

2.5.2 Implicatie op conversie en opslag in groene moleculen

Ook oplossingen voor de mismatch tussen energievraag en -aanbod worden in dit scenario op lokale schaal gevonden. Lokale netwerken (elektriciteit, warmte, waterstof) in combinatie met een mix aan technologie (warmtepompen, brandstofcellen) leveren de gewenste finale energie. Ook op het gebied van chemie zijn de grootschalige complexen vervangen door lokale productieprocessen.

Technologiebehoefte m.b.t. productie van groene moleculen richt zich met name op decentrale productie met directe elektrochemische en elektrisch gedreven conversie en scheidingprocessen.

Op middellange termijn richt zich de ontwikkeling met name op geïntensiveerde processen die minder gevoelig zijn voor de "economy-of-scale", bijvoorbeeld door toepassing van integratie van scheiding- en conversie stappen en waarbij logistieke aspecten voordelen oplevert voor productie op lokaal/ decentraal niveau.

Op de lange termijn zijn vooral direct elektrisch gedreven conversieprocessen nodig. Hoge selectiviteit en de ontwikkeling van elektrisch gedreven scheidingsprocessen (ter vervanging van huidige thermische processen) zullen noodzakelijk zijn.

3 Issues en knelpunten

3.1 Toekomstscenario's als uitkomst van keuze en gebeurtenissen

Elk van de genoemde scenario's geeft een mogelijke beeld van de toekomst weer. Of een van deze scenario's werkelijkheid wordt, hangt af van beslissingen die worden genomen en keuzes die worden gemaakt op de korte en middellange termijn. Deze keuzes kunnen expliciet zijn (het aanleggen van een warmtenet), maar ook impliciet, bijvoorbeeld als er niet wordt gekozen te investeren of tot regelgeving te komen. De "keuze" kan ook liggen in externe ontwikkelingen die bepaalde paden afsluiten. Daarbij kan gedacht worden aan geopolitieke factoren zoals de keuze van landen om schaarse goederen ten behoeve van eigen bevolking of industrie in te zetten.

Beslissingen en keuzes kunnen om verschillende redenen worden gemaakt:

- Maatschappelijke keuzes met betrekking tot inzet van schaarse middelen (bijvoorbeeld biomassa, concurrentie van windparken op zee met andere economische factoren zoals visserij en scheepvaart).
- Het als dan niet investeren van private of publieke middelen in infrastructuur
- Maatschappelijke acceptatie van technologie of oplossingen
- Regulering van (energie-) markten als bepalende factor voor nieuwe business modellen
- Concurrerende technologieën en het actief aansturen op innovatie omtrent groene moleculen in Nederland

Onderstaande tabel is een samenvatting van de knelpunten met hun specifieke raakvlakken met de systeemscenario's. Deze knelpunten worden vervolgens toegelicht.

	Keuze inzet schaarse middelen	Investeringen in infrastructuur	Regulering	Maatschappelijke acceptatie	Concurrerende technologieën
All Electric	Beschikbaarheid <ul style="list-style-type: none"> • Hernieuwbare elektriciteit • Koolstof 	Netverzwaring	CO ₂ beprijzing (EU) Regelgeving elektriciteits-distributie	Weerstand tegen windmolenparken	Opschaling
Big on Hydrogen	Beschikbaarheid <ul style="list-style-type: none"> • Hernieuwbare elektriciteit • Koolstof 	Waterstofgrid (aanpassing gasnetten inclusief opslag)	CO ₂ beprijzing (EU) Regelgeving elektriciteits-distributie	Weerstand windmolenparken Veiligheid van H ₂ transport/opslag	Kostenverlaging sleutel technologieën Opschaling
Circular & bio	Beschikbaarheid <ul style="list-style-type: none"> • Biomassa • Ruimte 	Biorefineries en biowaardeketen	CO ₂ beprijzing (EU) Regelgeving recycling	Gedragsverandering rondom recycling Veranderende gewassen	Kostenverlaging sleutel technologieën Opschaling
Small scale	Beschikbaarheid <ul style="list-style-type: none"> • Ruimte • Hernieuwbare elektriciteit • Koolstof 	Lokale energieopwekking en productie	CO ₂ beprijzing (EU) Inrichting lokale wet- en regelgeving Planologische keuzes	NIMBY	"Scaling up by numbers"

Tabel 2.1: Verkort overzicht issues en knelpunten

3.2 Korte beschrijvingen issues / knelpunten

3.2.1 Schaarse middelen

Schaarse middelen zijn in dit geval de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit, grondstoffen (zoals biomassa) en (mogelijk) CO₂ oogst- en opslagcapaciteit. Bij de schaarse middelen geldt met name dat de inzet van groene grondstoffen concurreert met de voedselvoorziening.

3.2.2 Infrastructuur

Realisatie van specifieke toekomstbeelden vergt investeringen in infrastructuur. Duidelijk is dit bij "All Electric" en "Big on Hydrogen". Grote investeringen maken het risico van lock-in groot. Hoge investeringen in infrastructuur om CO₂ onder de

grond te stoppen of in warmtenetten verkleinen de kans op toekomstbeelden die andere infrastructuur vergen.

3.2.3 Maatschappelijke acceptatie

Maatschappelijke acceptatie kan op verschillende manieren de keuze voor een toekomstbeeld bepalen. Duidelijk is dat maatschappelijk weerstand tegen CCS of biomassa de ontwikkeling van bepaalde toekomstbeelden kan bemoeilijken of zelfs onmogelijk maken. Maar ook positieve acceptatie in andere sectoren kan gevolgen hebben voor het toekomstbeeld. Denk bijvoorbeeld aan de massale adoptie van warmtepompen in de gebouwde omgeving en de gevolgen daarvan op beschikbaarheid van duurzame elektriciteit en de benodigde investeringen in het elektriciteitsnetwerk.

3.2.4 Regulering

Hoe duidelijker het kader van de toekomstige regulering van de energiemarkten is, hoe robuuster business cases die stakeholders kunnen ontwikkelen. Natuurlijk is de regulering van CO₂ emissies één van de belangrijkste factoren. De onzekerheid die ontstaat met name doordat een internationaal level playing field nodig is, kan betekenen dat er wel of niet geïnvesteerd wordt in technologieën die kritisch zijn voor een bepaald toekomst beeld. Ook ander vormen van stimulering, zoals de RED II voor brandstoffen³ hebben impact op de kans dat specifieke toekomstbeelden werkelijkheid worden. Ook regulering rond het gebruik van infrastructuur is nodig om bepaalde toekomstbeelden te bereiken. Met name daar waar een veelheid aan afnemers en leveranciers gebruik maken van infrastructuur vergt dit een goed ontwerp van de regulering. Dit geldt met name voor een waterstofinfrastructuur die gebouwde omgeving, mobiliteit, en industrie verbind.

Maar ook de toekomstige veranderingen in de regulering van het elektriciteitsnet m.b.t. toenemend variabel aanbod en verantwoordelijkheden voor levering en afname.

3.2.5 Concurrerende technologieën

Tenslotte zijn er steeds meerder technologische oplossingen mogelijk voor een probleem. Hoewel in sommige gevallen verschillende oplossing naast elkaar bestaansrecht hebben, zal er over het algemeen sprake zijn van concurrerende technologieën met winnaars en afvallers. Met name doordat kostendaling van technologie het resultaat is van grootschalige toepassing, zullen technologieën die eenmaal een groot marktaandeel hebben bereikt niet snel vervangen worden door nieuwe technologie met incrementele voordelen.

3.3 Aan welke toekomstbeelden relateren de issues en knelpunten?

All electric	
Inzet schaarse middelen	<ul style="list-style-type: none"> Ruime beschikbaarheid van duurzame elektriciteit, ondanks mogelijke groei van de vraag in andere sectoren (mobiliteit, warmte pompen gebouwde omgeving)
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> Grote investeringen in infrastructuur om CO₂ te transporteren en op te slaan komen niet van de grond Significante netverzwaring dient gerealiseerd te worden
Maatschappelijke acceptatie	<ul style="list-style-type: none"> Verzet tegen CCS van burgers en NGO's zorgt er voor dat blauwe waterstof en elektriciteitsopwekking met CCS beperkte rol spelen.
Regulering	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ prijs stijgt door Europese en internationale verdragen
Concurrerende technologieën	<ul style="list-style-type: none"> Verhouding tussen kosten van duurzame elektriciteit en fossiele energie ontwikkelen zich gunstig Oplossingen voor sturen van de E-vraag, zoals hybride systemen, zijn beschikbaar Chemie handhaaft zich in NL ondanks veel lagere omzet raffinaderijsector

Tabel 2.2: Implicatie issues en knelpunten op All electric

Big on hydrogen	
Inzet schaarse middelen	<ul style="list-style-type: none"> Ruime beschikbaarheid van duurzame elektriciteit, ondanks mogelijke groei van de vraag in andere sectoren (mobiliteit, warmte pompen gebouwde omgeving) "Kick-starten" via blauwe waterstof (fossiel + CCS) leidt tot versnelde opbouw infrastructuur.
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> Waterstofinfrastructuur is beschikbaar om de synergie tussen de sectoren te benutten. Gastransport en - distributie via pijpleiding vormt de ruggengraat van een dergelijk systeem.
Maatschappelijke acceptatie	<ul style="list-style-type: none"> De publieke perceptie dat waterstof ook in de gebouwde omgeving en mobiliteit een acceptabel risico vormen.
Regulering	<ul style="list-style-type: none"> Regulering van het gebruik van waterstofinfrastructuur vergelijkbaar met huidige regelgeving aardgas- en elektriciteitsdistributie. CO₂ prijs stijgt door Europese en internationale verdragen.
Concurrerende technologieën	<ul style="list-style-type: none"> Mobiliteit op waterstof dringt in aantal segmenten Substantiële kostenverlaging sleutel technologieën (o.a. elektrolyse, brandstofcellen)

Tabel 2.3: Implicatie issues en knelpunten op Big on hydrogen⁵

⁵ EU renewable energy directive.

Circular & Bio-based	
Inzet schaarse middelen	<ul style="list-style-type: none"> • Voldoende beschikbaarheid van biomassa
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • Logistieke ketens voor biobrandstof worden ontwikkeld inclusief transparante methodieken om footprint van de biomassa te garanderen
Maatschappelijke acceptatie	<ul style="list-style-type: none"> • Burgers werken mee aan recycling uit maatschappelijk verantwoordelijke
Regulering	<ul style="list-style-type: none"> • Regelgeving op gebied van recycling, b.v. voor plastics, leidt tot hoge mate van recyclen van koolstof • Effectieve regulering met betrekking tot CO₂ beprijzing en de productcyclus (hoe lang is de koolstof vastgelegd in het product)
Concurrerende technologieën	<ul style="list-style-type: none"> • Vraag naar biomassa voor brandstoffen voor scheepvaart en luchtvaart blijft beheersbaar doordat ook andere oplossingen voor mobiliteit worden ontwikkeld.

Tabel 2.4: Implicatie issues en knelpunten op Circular & bio-based

Small-scale	
Inzet schaarse middelen	<ul style="list-style-type: none"> • Beschikbaarheid van ruimte, hernieuwbare elektriciteit en koolstof
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • Sterke nadruk op lokale oplossingen (opslag, distributie) voor energievraag en -aanbod, grootschalige infrastructuur neemt in belang af.
Maatschappelijke acceptatie	<ul style="list-style-type: none"> • Burgers, collectieven, lokale overheden spelen actieve rol in energievoorziening • Veiligheids- en milieuaspecten op lokaal niveau zullen verhoogde aandacht krijgen
Regulering	<ul style="list-style-type: none"> • Regelgeving op gebied van elektriciteitsdistributie vormt geen barrière voor business case lokale opwekking (b.v. kosten voor distributie niet in vorm van "vast recht", maar op basis van daadwerkelijk gebruik van netwerk.
Concurrerende technologieën	<ul style="list-style-type: none"> • Sterkere (verdere) kostendaling decentrale opwekking (m.n. zon en kleine windturbines) • Decentrale productietechnologie breekt economy-of- scale (bijvoorbeeld ammoniaproductie is economisch op klein schaal).

Tabel 2.5: Implicatie issues en knelpunten op Small-scale

3.4 Wanneer gaat dit issue spelen?

De systeemscenario's geven de extremen weer. Uiteindelijk zal niet één scenario volledig gerealiseerd worden, maar zullen elementen uit de verschillende scenario's samenkomen in het uiteindelijke systeem. Investeringsbeslissingen zullen leiden tot convergentie op één of meerdere scenario's. Investeringsvergen echter enige mate van zekerheid. Daarnaast zit er tussen de (eerste) serieuze investeringen en de realisatie van een scenario of beeld een tijdverloop. Extra vertraging treedt op na de investeringsbereidheid doordat er ook sprake is van investeringscycli. Dit alles zorgt ervoor dat de boven beschreven issues, die de onzekerheid in de investeringen vertegenwoordigen, op een gegeven tijdstip opgelost moeten zijn.

3.4.1 Inzet van schaarse middelen (biomassa, duurzame elektriciteit)

De onzekerheid met betrekking tot beschikbaarheid van grondstoffen is complex doordat het niet alleen gaat om het technische potentieel maar een vaak een vraagstuk is van concurrentie en marktforming (internationaal, tussen sectoren, etc.). Aangezien technologieontwikkeling, maatschappelijke acceptatie, regulering pas versnellen als er zicht is op een reëel potentieel, is de urgentie hier hoog. Zowel voor biomassa als voor duurzame elektriciteit moet op de korte tot middellange termijn (5-10 jaar) zicht zijn op een

reëel potentieel. Bij biomassa gaat het met name de beschikbaarheid van gecertificeerd duurzame biomassa in voldoende hoeveelheden stromen.

3.4.2 Investerings in infrastructuur

Investerings in infrastructuur zijn deels het resultaat van de convergentie op de specifieke toekomstbeelden. Als zodanig kan bijvoorbeeld infrastructuur voor waterstoftransport en -distributie in de periode 2030-2035 nog leiden tot de realisatie van het toekomstbeeld Big on Hydrogen in 2050. De business cases die ten grondslag liggen aan de investeringen moeten daar in tegen en de periode daarvoor met voldoende mate van zekerheid bekend zijn. Dat wil zeggen dat deze business cases uiterlijk in de periode 2020-2025 moeten uitkristalliseren.

3.4.3 Maatschappelijke acceptatie van technologie of oplossingen

In tegenstelling tot de bovengenoemde processen, kan maatschappelijke acceptatie op een veel korter termijn veranderen. Vertrouwen komt te voet en gaat te paard. Vroegtijdig onderkennen van de mogelijke maatschappelijke weerstanden is daarom een continu proces in elke transitie. Duidelijk is wel dat een gebrek aan maatschappelijk draagvlak zich met name op de keuzemomenten in het proces van convergentie naar bepaalde toekomstbeelden zichtbaar zal worden.

3.4.4 Regulering van (energie-) markten

Ook hier is met het vertrouwen in de uitkomst en de daadwerkelijke implementatie van de regulering niet hetzelfde. CO₂-beprijzing en de transparante regulering van transport en distributie zijn essentieel voor de business cases en de investeringen. Het vertrouwen in een oplossing (een CO₂ kosten toerekeningssysteem met internationaal kader, regulering van energietransport en -distributie die mogelijkheid biedt voor het ontwikkelen van nieuwe business modellen) is noodzakelijk voor de periode 2020-2030. Dat betekent dat in deze periode heldere visies moeten zijn ontwikkeld hoe werkbare regulering er uitziet. Daadwerkelijke implementatie kan daarop na-ijlen (2025-2035).

3.4.5 Concurrerende technologieën

Verkleinen van technologische onzekerheden en selectie van technologieën is een geleidelijk proces waarbij nieuwe technologieën worden opgeschaald van lab tot demonstratie. Meerdere (concurrerende) technologieën op verschillende TRL niveau vormen daarbij een portofolio van mogelijke oplossingen. Fundamenteel en toegepast onderzoek en demonstraties zijn instrumenten om technologie richting implementatie te krijgen. De cyclus van fundamenteel onderzoek naar implementatie betekent wel dat om impact te hebben in de periode 2030-2035, er een goede balans moet zijn tussen het fundamenteel en toegepast onderzoek en de aandacht voor ondersteuning van demonstraties.

3.5 Welke informatie/kennis is er nodig om dit issue te kunnen tackelen?

Technologieontwikkeling is een voorwaarde om tot een duurzamer energiesysteem te komen en specifiek om opslag en conversie te realiseren. Technologie zal daarom in de onderzoeksagenda een belangrijke rol spelen, waarbij een te vroege keuze voor één van de systeemscenario's een risico is. Wat bovenstaande issues wel duidelijk maken, is dat de onzekerheid rond de inrichting van het energiesysteem nog heel groot zijn. Hoewel er in het publieke domein veel (internationale) studies zijn waarin aspecten van het energiesysteem worden geëvalueerd en besproken, ontbreekt het aan methodieken om juist om te gaan met de complexiteit van de ontwikkelingen. Systeemintegratie en systeemontwerp zijn nog onderbelicht.

4 Kennis en Innovatie Agenda (KIA)

4.1 Introductie

De situatie in 2050 wordt waarschijnlijk een combinatie van de extreme scenario's die hierboven toegelicht zijn. Dit wordt bepaald door keuzes van de regering en industrie die gemaakt worden op basis van hoe verschillende technologieën ontwikkelen en worden geëvalueerd wat betreft hun bijdraag aan de klimaatdoelstellingen in 2030 en 2050 in combinatie met maatschappelijke aspecten. Het is verwacht dat onafhankelijk van deze keuzes, vijf industriële producten gaan belangrijke rollen spelen in de kader van energie opslag en conversie. Dit betreft producten met groot volume en grote impact op CO₂ emissies. De producten zijn illustratief voor het soort onderzoek dat nodig is om de klimaatdoelstellingen in 2030 en 2050 te behalen.

Hoe de markt voor elk product ontwikkelt is wel afhankelijk van de (combinatie van) scenario's die gerealiseerd worden. De verwachtingen per (extreem) scenario zijn als volgt:

All electric - De vraag voor waterstof en methaan voor toepassing als warmte bronnen wordt sterk verminderd; duurzaam waterstof wordt een belangrijker grondstof in plaats van waterstof om methaan, koolwaterstoffen, en ammoniak te produceren (met aandacht voor de 'bronnen van de C, N, O' atomen). De markten van deze secundaire producten zijn beïnvloed door de technologie ontwikkelingen rond direct elektrochemische processen; staal maakt ook veel gebruik van elektriciteit binnen het productie proces.

Big on hydrogen - De markt voor waterstof wordt erg groot. Het vraagt om (electrochemische) technologie opties om op grote schaal H₂ beschikbaar te maken als commodity product; H₂ wordt gebruikt om methaan, koolwaterstoffen, en ammoniak te produceren. De markten van deze secundaire producten zijn beïnvloed door de technologie ontwikkelingen rond de processen met H₂ als grondstof; H₂ speelt ook een grote rol in staal productie. Circulair en bio-based Groene methaan wordt een belangrijke form als warmte bron en grondstof in thermochemische processen; de markten voor waterstof, koolwaterstoffen, en ammoniak veranderen niet veel van "business as usual".

Small scale - De markt voor decentrale electrolyzers groeit om lokaal waterstof te maken en gebruiken op kleinere schaal; de markten voor de andere producten ontwikkelen op basis van de technologie ontwikkeling rond flexibel en modulair processen. Staal productie wordt meer flexibel door gebruik van elektriciteit.

De Kennis en Innovatie Agenda is opgesteld op basis van de onderzoek dat plaats moet vinden met betrekking tot ieder product dat hierboven genoemd is. Omdat het industriële landschap en technologieën allebei in ontwikkeling zijn, worden de onderzoeksonderwerpen niet per scenario benoemd maar per termijn (kort, middellange, lang).

De resultaten van het onderzoek dat plaats vindt heeft invloed op hoe de toekomstbeelden in de komende jaren zullen ontwikkelen. De programmalijnen en onderzoeksagenda die een toekomstbeeld mogelijk maken zijn hieronder beschreven.

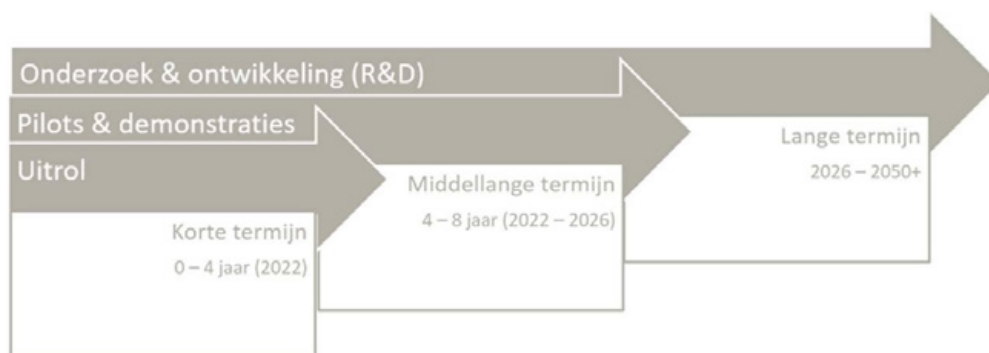
4.2 Beschrijving van programmalijnen

De kennis- en innovatieagenda is opgebouwd rond een vijftal programmalijnen. Deze programmalijnen komen als generiek beeld naar voren na analyse van de kennis- en innovatievragen rondom vijf specifieke eindproducten en -processen (d.w.z. waterstof, methaan, koolwaterstoffen, ammoniak en staal). Deze producten zijn illustratief voor de rol en inzet van 'groene moleculen' in 2050 en de daaruit voortkomende uitdagingen. Hieronder staan de programmalijnen kort beschreven.

1. Elektrochemische conversie processen en materialen
Fundamentele kennis met betrekking tot materiaal- en structureigenschappen relevant voor het ontwikkelen van innovatieve electrode en membraan materialen.
2. Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen
Fundamentele kennis rond massa en energietransport relevant voor geïntensifieerde elektrochemische reactoren
3. Systeem ontwerp
Generieke methodologie voor de integratie van elektrochemische processen met zowel de materiaal- en energieaanvoer als de opwerkingstechnologie en afvoer van producten
4. (Ex-ante) technisch-economisch-milieu impact analyse
Geavanceerde evaluatie en sturingsmodellen die ex-ante gebruikt kunnen worden om innovatieve elektrochemische processen te evalueren zowel op economische als duurzaamheidscriteria. De modellen kunnen gebruikt worden in een zogenaamde "orchestrating innovation" context.
5. Inpassing in de maatschappij
Onderzoek naar niet technologische innovatie, juridische en economisch context en communicatie

4.3 Generieke onderzoeksagenda

In de generieke onderzoeksagenda staan fundamentele aspecten centraal die overkoepelend zijn voor de producten waarop deze gebaseerd is. Belangrijke aspecten zijn enerzijds onderzoeksvragen met betrekking tot massa energie transport op de verschillende schalen en de daarbij horende vragen rond het vertalen van de knowhow rond transportverschijnselen naar materialen en systemen ontwerp. Anderzijds het analyseren van hoe de technologie ingepast kan worden in de maatschappij (o.a. juridisch, regelgeving), het vergroten van de maatschappelijk draagvlak, en de infrastructurele aspecten. De onderzoeksagenda is gebaseerd op de volgende tijdsvakken.



Figuur 3.1: Tijdsvlakken Kennis en Innovatie Agenda

De onderstaande tabel geeft in kort de generieke onderzoeksagenda weer. Onderliggend aan de onderzoeksagenda is de analyse van een vijftal producten/moleculen die een belangrijke rol vervullen in het Nederlandse productielandschap in 2050. De genoemde producten / moleculen zijn: waterstof, methaan, ammoniak, koolwaterstoffen ($C_xH_yO_z$) en staal. Deze producten zijn indicatief voor het soort onderzoeksvragen dat beantwoord moet worden

	Kort	Middellang	Lang
Elektrochemische conversie processen en materialen	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen van massa en energie transfer modellen toepasbaar voor onder andere multi-fase gestructureerde elektrochemische materialen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling van stabiele en efficiënte elektrodes en membranen • Ontwikkelen en demonstreren van innovatieve elektrochemische processen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwerp en selectie van toepasbare elektrochemische materialen mede gebaseerd op voorspellende simulaties • Ontwikkelen van analyse methodieken voor elektrochemische processen
Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen van procesintegratie concepten (i.e. met electrolysers, andere H_2 bronnen/buffers, CCS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstratie geïntensifieerde reactor concepten incl. opwerking • Ontwikkelen van (elektrochemische) reactoren voor extreme condities (temperatuur/druk etc.) • Ontwikkelen van (flexibele) procesintensificatie concepten 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen van (elektrochemische) reactoren voor extreme condities (temperatuur/druk/plasma etc.) • Ontwikkelen van proces integratie concepten geïntegreerd met direct air capture • Ontwikkelen van proces control systemen voor productie onder intermitterende condities
Systeem ontwerp	<ul style="list-style-type: none"> • Systeem analyse inclusief warmte en massa transport analyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen sector koppeling filosofie (inclusief decentrale flexibele productie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Totale systeem ontwerp Nederland integratie power-to-X met circulaire economie
(ex-ante) Technisch-economisch-milieu impact analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Model constructie voor technisch-economisch analyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Life cycle analysis tool development 	<ul style="list-style-type: none"> • Systeem integratie tool ontwikkeling

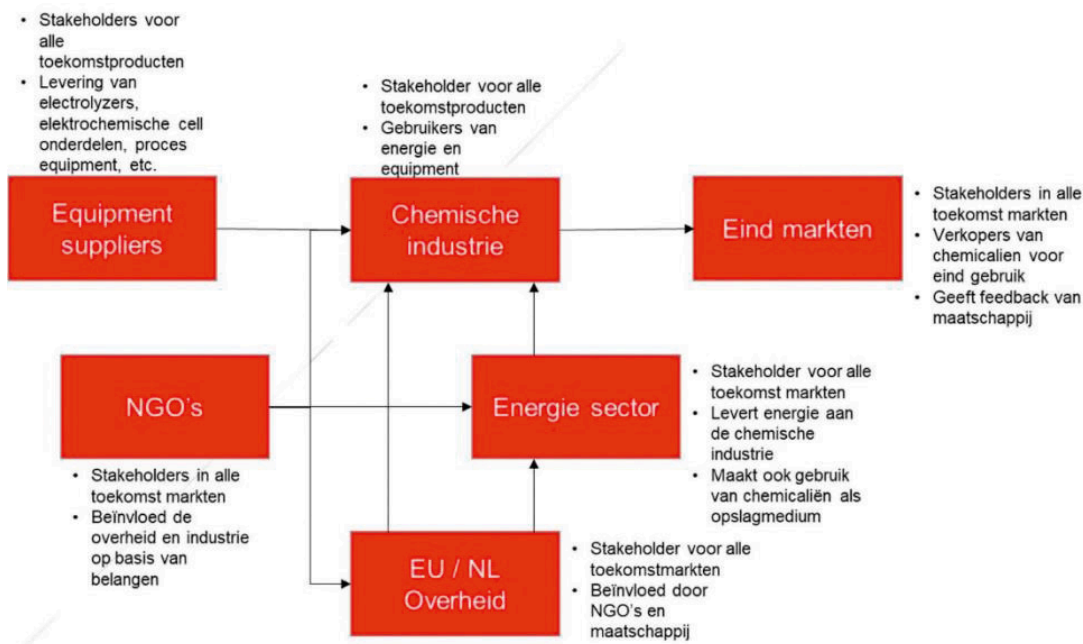
Tabel 3.1: Generieke onderzoeksagenda

4.4 Betrekken van stakeholders

Om de klimaatdoelstellingen te behalen is het zaak om de onderzoeksonderwerpen in de Kennis- en Innovatie Agenda zo snel mogelijk te gaan verdiepen.

Universiteiten en onderzoeksinstituten spelen daarin een kernrol. Daarnaast bestaat een breder stakeholderveld dat betrokken moet zijn om de uitkomsten van onderzoek ook daadwerkelijk gestalte te geven.

Onderstaand figuur toont de relevante stakeholders.



Figuur 3.2: Stakeholder map

4.5 Producten / moleculen die ten grondslag liggen aan de KIA

De All-Electric, Big on Hydrogen, Circular & Biobased en Small-Scale scenario's zijn eigenlijk slechts accentverschuivingen binnen een verzameling aan kenmerken die niet los van elkaar te beschouwen zijn.

Daarom moet er een beeld gevormd worden welke bulk basisgrondstoffen er in de toekomst altijd nodig zijn om het huidige productenpakket en de productie- infrastructuur te bestendigen. Op basis van hiervan is gekozen voor waterstof, methaan, ammoniak, koolwaterstoffen en staal. Dit zijn in de laatste twee gevallen generieke begrippen: er zijn meerdere 'koolwaterstoffen' die als feedstock aan een chemisch proces kunnen worden gevoed voor de benodigde grondstoffen, en ook 'staal' staat natuurlijk mutatis mutandis voor aluminium, koper, ijzer, etc. Voorts zijn deze grondstoffen te fabriceren via de directe en indirecte elektrochemische route: synthese aan de elektrode, respectievelijk via synthese gebruikmakend van bijvoorbeeld groene waterstof. Hierbij is de ontwikkeling naar grootschalige productie, vergelijkbaar met de huidige, conventionele, processen, het hogere doel.

In de volgende paragrafen worden de toekomstbeelden van de producten / moleculen die ten grondslag liggen aan de KIA toegelicht.

4.4.1 Toekomstbeeld Waterstof (H₂)

4.4.1.1 Samenvatting:

In 2050 wordt waterstof niet alleen als basismateriaal in de chemie ingezet, maar speelt ook een rol als energiedrager. Waterstof verbindt daardoor verschillende sectoren. Waterstofproductie is voor een groot deel gebaseerd op omzetting van duurzame elektriciteit d.m.v. elektrolyse, waardoor de specifieke CO₂ emissie meer dan 95% lager is dan de huidige emissies, zonder dat daarbij gebruik wordt gemaakt van CCS. Andere grondstoffen, zoals fossiel met CCS, biomassa, en afval, spelen wel nog belangrijke rollen als bronnen van H atomen.

4.4.1.2 Algemene trends en ontwikkelingen

In de toekomst wordt waterstof een commodity voor de procesindustrie én energiedrager. Er is geen sprake van verschillende infrastructuren voor waterstof in de procesindustrie, in de energiesector en in de mobiliteit. In tegendeel, waterstof maakt gebruik van één volledig geïntegreerde infrastructuur, waardoor optimaal gebruik wordt gemaakt van de synergie. Dit betekent dat het systeem zodanig wordt ingericht dat de kosten van opslag, van productie en van distributie worden geminimaliseerd. Een mix van grootschalige en kleinschalige productie wordt mogelijk gemaakt door een grootschalig transport en fijnmazig distributie systeem. Opslag voor verschillende tijdschalen wordt aan deze infrastructuur zodanig gekoppeld dat de meerkosten voor opslag minimaal zijn.

Doordat waterstof een energiedrager wordt, zoals nu elektriciteit en aardgas, wordt levering en productie gereguleerd. Nieuwe stakeholders verzorgen de daarbij behorende functies zoals leveringszekerheid aan de afnemers en maken gebruik van de kansen die de infrastructuur biedt voor het uitvoeren van diensten.

In 2050 wordt waterstof als commodity bij een aantal processen waar nu andere energiedragers zoals aardgas en kolen worden gebruikt, bijvoorbeeld in de productie van staal (bv. bij Tata Steel). Bij andere (huidige) gebruikers van waterstof, zoals Yara en industrie in de Haven Rotterdam, zal waterstof uit fossiele bron zijn vervangen door het gebruik van groene waterstof. Daarnaast biedt waterstof oplossingen voor energievraag naar in andere sectoren, denk aan: mobiliteit, huishoudens.

4.4.1.3 Specifieke trends en ontwikkelingen

Tegenwoordig wordt waterstof op grote schaal voornamelijk geproduceerd door stoom reforming van aardgas, met als co-product CO_2 . De energietransitie houdt in dat dit proces vervangen wordt door alternatieven met lagere CO_2 emissies, waarbij in 2050 elektrolyse de belangrijkste route naar koolstofarme waterstof is.

In de transitie spelen meerdere technologieën een rol. Beschikbaarheid van voldoende duurzame elektriciteit, beschikbaarheid van infrastructuur voor waterstoftransport en -distributie betekent dat grijze (uit fossiele bron) en blauwe waterstof (met CCS) een rol spelen. Dit proces vergt een goede regie. Voorlopig goedkopere grijze en blauwe waterstof kan worden gebruikt om de infrastructuur tegen de laagste kosten te ontwikkelen. Lock-in effecten, waardoor uitfaseren van fossiele waterstof bemoeilijkt wordt, moeten worden voorkomen.

Ontwikkeling en kostenreductie leidt tot opschaling van de inzet van duurzame, circulaire processen (d.w.z. zonder netto CO_2 uitstoot) voor H_2 productie. Het gaat om doorontwikkeling van conventionele en state-of-the-art technologieën (zoals elektrolyse) en ontwikkeling van potentieel disruptieve processen.

Uitgaande van elektronen:

- Elektrolyse van water via conventioneel alkaline, PEM of SOFC-based electrolyzers,
- Andere (disruptieve) processen zoals plasma, metaal spons,

Uitgaande van fotonen:

- fotolyse van water

N.B. Opkomst van directe elektrolyse met/in water als methode om zonder H_2 als tussenstap chemische producten te maken, zal zorgen in minder Hv gebruik (gedeeltelijke afname van Hv vraag en dus productie noodzaak)

4.4.1.4 Belangrijkste uitdagingen/opgaven/issues

Ontwikkeling van de infrastructuur en verlaging van de kosten van sleuteltechnologieën zoals elektrolyse, brandstofcellen en transport en distributie van waterstof zijn de belangrijkste uitdagingen voor de introductie van waterstof als energiedrager.

Het ontwikkelen van processen die instaat zijn om te gaan met een variërend waterstofaanbod is nodig om vanuit de waterstofinfrastructuur een oplossing te bieden voor de intermittency in het duurzame energie aanbod. De belangrijkste uitdagingen zijn:

- Hoe kan op deze grote schaal H_2 worden geleverd en door wie?
- Hoe zijn de H_2 productieprocessen op te schalen en compatibel te maken met intermittency?
- Hoe zijn H_2 productieprocessen effectief in te passen in het ecosysteem, inclusief H_2 transport en (tijdelijke) opslag?
- Hoe kunnen de (systeem)kosten omlaag gebracht worden?

De bovenstaande uitdagingen leiden tot de volgende onderzoeksdoelstellingen die te onderscheiden zijn in vier algemene velden:

- *Systeemintegratie*: a) Noodzaak om het energiesysteem integraal te bekijken waarbij schaarste (aan duurzame elektriciteit, aan opslag van CO_2 , aan emissie ruimte) bepalend is voor de invulling. Welke routes, welke transitiepaden? b) Integratie van waterstofproductieprocessen met de chemische processen (bv hoge temperatuur elektrolyse – warmte integratie)
- *Flexibilisering* van (chemische) processen om te kunnen werken met variabele input: a) Bufferen van stroom vs. direct omgaan met variabiliteit; b) Kleinschalige vs. groot-schalige reactorconcepten; c) Centrale vs. decentrale productie en gebruik.
- *Circulariteit* (minder gebruik van zeldzame grondstoffen, terugwinning): a) Elektrolyse en plasma twee belangrijke lijnen, naast biomassa gebruik; b) In het geval van elektrochemie uit H_2O : doe ook wat met de zuurstof.
- *Verlaging kosten/verhogen* van de efficiency van productie routes: a) Kostenverlaging/efficiency van de technologie als onderzoekslijn is duidelijk; b) Belang van efficiency is duidelijk, maar een goedkoper, minder efficiënt proces kan wellicht kosteneffectieve zijn.

4.4.1.5 Beschrijving met aandacht voor meervoudig kijken

Maatschappelijk/planologisch

- Bij het scenario Big on Hydrogen speelt waterstof een grote rol in vele sectoren, maar blijft ook belangrijk in de andere scenario's. De benodigde infrastructuur is enorm en vraagt aan veranderingen op verschillende niveaus. Dit behelst een complexe analyse van de wisselwerking tussen enerzijds de sectoren/gebruikers die naar (grootschalig) waterstofverbruik kunnen/willen/moeten overstappen en anderzijds in ogenschouw nemende wat het verwachte potentieel van waterstofproductie in Nederland is of import van (duurzaam) waterstof kan bieden. Een deel hiervan is een analyse van 'grondstoffen voor H atomen' naast water, zoals biomassa, fossiel en afval. Het impact van deze onderwerpen is groter gemaakt doordat 2050 is maar één (industriële) investeringsronde van nu verwijderd en de realiteit van wat nu opgeschaald kan worden in onduidelijk.

- In het landschap kan er wel veranderingen plaatsvinden die merkbaar worden voor de maatschappij. Dit komt door de maximale voorzieningen van windmolenparken en andere hernieuwbaar energiesystemen in de Noordzee en andere locaties om de vraag voor elektriciteit te voldoen. Tegelijkertijd wordt de uitstoot van energiecentrales minder en de koppeling met CCS beter geaccepteerd i.v.m. de gunstig gebruik van CO₂ in combinatie met H₂.

Economisch

- Dit beeld betekent voor burgers dat ze misschien gebruik kunnen maken van meer flexibele energieprijzen of transport mogelijkheden die gebaseerd zijn op waterstof of elektriciteit, maar de impact ten opzichte van wat er in de industrie gebeurt is verwacht relatief klein te zijn.

Juridisch /bestuurlijk

- In de transitie is er een veel grotere variëteit aan technologieën en ketens, wat én-én denken vraagt (i.p.v. of-of) in de industrie en overheid bestuur. Het wordt belangrijk om 'verborgen aannames' in het denken te identificeren, benoemen, en veranderen waar nodig. Voorbeelden hiervan zijn 'in 2050 is alles circulair' en 'CCS = CO₂ afvang en onder de grond stoppen'. In dezelfde kader moet de gebruik van fossiel grondstoffen sterk niet-technologische vragen oproepen, gerelateerd aan de draagvlak voor CCS, geopolitieke afhankelijk in de levering van fossiel methaan, de milieu- impact van fossiele winning e.d.

4.4.2 Toekomstbeeld Bulk chemicaliën en brandstoffen C_xH_yO_z

4.4.2.1 Samenvatting

In 2050 wordt 95% CO₂-emissie reductie in industrie bereikt. Grootschalig chemicaliën en brandstoffen worden gemaakt uit CO₂ en water met gebruik van elektriciteit in plaats van olie en gas. Processen zijn zowel centraal als decentraal en maken direct gebruik van elektriciteit om CO₂ te reduceren of indirect via de duurzaam waterstof route. Bronnen van CO₂ worden circulaire processen (inclusief CCS), Direct Air Capture (DAC), en biogas.

4.4.2.2 Algemene trends en ontwikkelingen

Elektrificatie van de productie van chemicaliën en brandstoffen kan gezien worden als een goede kans om de concurrentiepositie van de industrie te versterken in de context van vermindering afhankelijkheid van fossiele grondstoffen. Met ambitieuze klimaatdoelen en de decarbonisatie van de transport sector neemt de interesse voor deze processen sterk toe.

De mogelijkheden voor processen die in dit toekomstbeeld passen zijn heel breed. Voorbeeld producten waar er nu interesse ligt zijn CO (syngas) alcoholen (methanol/ethanol), en mierenzuur. Deze producten hebben dubbel functies als materialen en energiedragers en zijn dus breed toepasbaar. Van belang bij grootschalig gebruik als energie carrier (korte cyclisch CO₂) om grote investeringen te doen in direct air capture ("closing the cycle").

Naast integratie met CO₂ bronnen is de koppeling met waterstof infrastructuur van belang. Voor processen die gebruik maken van H₂ in plaats van H₂O (zie volgende rij) in combinatie met CO₂, is een meer stabiel stroom van H₂ nodig om hoge efficiency te realiseren. Buffer systemen zijn één mogelijkheid hiervoor en andere mogelijkheid is om processen flexibel in te richten.

Relevante processen zijn nog in de ontwikkelingsfase met een TRL van 1 tot en met 6. Onderzoek is voor het meest gedaan binnen samenwerkingsprojecten met gebruik van nationale en internationale subsidie bronnen. Systeemintegratie, flexibilisering, maatschappelijke acceptatie en uitrekenen van business cases zijn belangrijke onderwerpen naast technologie ontwikkelingen. Hierdoor wordt de link tussen de energie en chemicaliën sectoren sterker terwijl discussie over risico verdeling en verdien modellen moet plaats vinden.

4.4.2.3 Specifieke trends en ontwikkelingen

Er zijn twee te onderscheiden technologie richtingen om de voorgestelde toekomstbeeld te bereiken: gebruik van H₂ commodity samen met CO₂ en rechtstreeks elektrochemische conversie met CO₂. De specifieke trends en ontwikkelingen zijn hieronder per lijn benoemd:

Gebruik van H₂ commodity samen met CO₂

- H₂ wordt gebruikt samen met CO₂ door de koppeling van de reverse water-gas shift proces en een Fischer-Tropsch proces. Met de eerste stap wordt CO gemaakt die in de tweede stap naar brandstoffen en hogere keten moleculen omgezet wordt. Optimalisatie van katalysatoren, integratie en proces intensificatie zijn belangrijke aspecten.
- De productie van methanol op basis van H₂ en CO₂ gebeurt door een thermokatalytische proces. De methanol kan vervolgens onder andere gebruikt worden als grondstof voor olefinen, transport brandstoffen en aromaten.
- Optimalisatie van katalysatoren, integratie en proces intensificatie zijn belangrijke aspecten.
- Biologische conversie van CO₂ met H₂ als energie bron wordt ook onderzocht tegenwoordig. Specifieke bacterie kunnen genetisch gemodificeerd worden om chemicaliën zoals alcoholen en zuren te produceren. Integratie en verbetering van de biologische systemen zijn hierbij de belangrijkste aandachtspunten.

Rechtstreeks gebruik van CO₂

- Hoge temperatuur directe conversie van CO₂ in zogenaamde Solid Oxide Electrolyzers (SOEC) volgens het co-elektrolyse principe is een mogelijkheid wanneer temperatuur integratie mogelijk is. De product van deze omzetting is syn-gas. Deze syn-gas kan vervolgens via conventionele technieken omgezet worden naar transport brandstoffen. Onderzoeksaspecten zijn met name gerelateerd aan materiaal robuustheid en efficiëntie, naast systeem integratie.
- Lage temperatuur directe conversie van CO₂ is met name gericht op waterige systemen waarbij een reeks van producten mogelijk zijn onder andere CO, mierenzuur, ethyleen, methaan. Met name onderzoek naar selectieve, efficiënte elektrode materialen, elektrolyten en systeem ontwerp staan centraal. Het onderzoek naar conversie van CO₂ in niet waterige systemen gaat meer aandacht krijgen.

Katalysatoren zijn ontwikkeld op basis van nieuwe structuren en combinaties van materialen. Het focus van veel onderzoek is de vermijden van waterstof productie (en dus hogere opbrengst van de gewenste product).

4.4.2.4 Belangrijkste uitdagingen/opgaven/issues

Op dit moment is de productie van brandstoffen en andere bulk chemicaliën uit CO₂ en H₂O te duur om in de markt op grote schaal gerealiseerd te worden. Een belangrijke uitdaging is dus de verlaging van de kosten. De grootste deel van de kosten zijn investeringskosten. Deze kunnen om laag door verhoging van de stroomdichtheid, goedkoper materialen, en betere selectiviteit. De operationele kosten zijn gerelateerd aan de elektriciteitsprijs. Deze kunnen gereduceerd worden door hogere selectiviteit en flexibilisering.

Een tweede uitdaging is de integratie met het CO₂ afvangst proces. Het verkrijgen van puur CO₂ uit diffuse bronnen (bijv rookgas, lucht) is een relatief duur proces. Derhalve integratie van het elektrochemisch proces met het afvangst proces kan leiden tot significante kosten verbetering.

Voor indirect conversie (via H₂ commodity), naast kostenverbetering door proces verbetering, is de integratie met waterstof productie een mogelijke uitdaging voor continue proces voering. Waterstof netwerken en buffersystemen zijn wellicht nodig. Echter, hoe zo'n netwerk er uit kan zien en functioneren dient nog bepaald te worden.

4.4.2.5 Beschrijving met aandacht voor meervoudig kijken

Maatschappelijk / planologisch

- Dit toekomstbeeld is sterk verbonden met de ontwikkelingen en aspecten geschreven onder Toekomstbeeld Waterstof. De bedrijven die koolwaterstoffen produceren uit CO₂ via H₂ zijn gebruikers van de waterstof infrastructuur die voorzien is. Die grote toename in hernieuwbare energie systemen in de Noordzee en lokaal die enabled is door een waterstof infrastructuur en de impact daarvan is ook relevant voor C_xH_yO_x producten, ofschoon op een kleinere schaal. Er is industriële symbiose (ketenkoppeling) nodig tussen partijen waar business- en verdienmodellen en risico verdeling moeten nog uitgezocht worden.
- Door het gebruik van veel CO₂ wordt ook de maatschappelijk acceptatie van CCS en CCU heel belangrijk. De issues rond CO₂ opslag, vooral onder land, zijn goed bekend en hebben geleiden tot een negatieve perceptie van CO₂ in het algemeen. Dus de eventueel gebruik van CO₂ om brandstoffen en andere producten te maken moet goed uitgelegd worden, tijdig en op de juiste manier. CCU wordt een enabler tijdens de transitie om de relevante processen in de industrie te realiseren die misschien nodig gaan zijn om de maatschappelijke levensstandaard en comfort te houden, ook als fossiele grondstoffen niet meer gebruikt zijn.

Economisch

- Producten die waarschijnlijk belangrijk gaan worden zijn syngas, methanol, en mierenzuur. Syngas is zeer relevant en interessant want het is in te pluggen in de huidige industrie met een huidige grote vraag en er is geen downstream verandering nodig om de huidige producten nog steeds te kunnen nog maken. Methanol is een potentiële toekomstige transportbrandstof voor scheepvaart, trucks, en luchtvaart maar zou een flinke uitbreiding van infrastructuur nodig hebben. Mierenzuur kan disruptief worden als brandstof omdat het een waterstofdrager is, echter is de energiedichtheid laag, of als "vloeiende" CO carrier, wat is interessant voor materialen in plaats van brandstof.
- Specifiek voor dit toekomstbeeld is de afhankelijkheid van CO₂ die beschikbaar moet zijn in grote volumes en voor een acceptabel prijs. Tijdens het energietransitie is CCS verwacht nog een rol te spelen en wordt de hoofd bron van CO₂ voor CCU processen. Echter, na de transitie wordt CCS veel meer beperkt in capaciteit en moeten andere bronnen, zoals DAC en biogas, genoeg CO₂ opleveren voor deze producten. Als dit kan is nu niet zeker en vraagt aandacht en politieke keuzes om nu al te zorgen dat de juiste technologieën ontwikkeld worden, door onder andere CO₂ beprijzing schema's en subsidie programma's. De combinatie van scenario's die uiteindelijk gerealiseerd is heeft hier veel invloed op.

4.4.3 Toekomstbeeld Ammoniak (NH₃)

4.4.3.1 Samenvatting

In 2050 wordt ammoniak niet alleen als grondstof voor de kunstmest productie gebruikt, maar speelt ook een rol als energiedrager bij grootschalige import van koolstofvrije brandstof. Ammoniak productie is voor een groot deel gebaseerd op omzetting van duurzame elektriciteit d.m.v. elektrolyse in combinatie met een geoptimaliseerd Haber-Bosch proces, waardoor de specifieke CO₂ emissie meer dan 95% lager is dan de huidige emissies, zonder gebruik te maken van CCS.

4.4.3.2 Algemene trends en ontwikkelingen

Ammoniak wordt in 2050 een CO₂ neutrale commodity voor het maken van kunstmest en een koolstofvrije brandstof. Om aan de grote vraag naar CO₂ vrije elektriciteit te voldoen wordt ammoniak als energiedrager geïmporteerd uit landen waar veel en goedkoop duurzame elektriciteit wordt geproduceerd, zoals Australië en Saudi Arabië. In Nederland wordt het dan vervolgens voor langere duur opgeslagen worden om flexibel ingezet te kunnen worden als koolstofvrije brandstof voor elektriciteitscentrales wanneer er geen of weinig aanbod is van CO₂ vrije elektriciteit uit zon en wind.

Grootschalige opslag en import van duurzame elektriciteit is nodig om de CO₂ reductie doelstellingen te halen. Voor toepassing in de energiesector en de mobiliteit wordt ammoniak voor een groot deel omgezet naar waterstof en via de bestaande Nederlandse waterstofinfrastructuur verder gedistribueerd. Voor een enkele toepassing zoals in de scheepvaart (grote carriers en binnenvaart) wordt ammoniak direct ingezet als koolstofvrije brandstof. Wanneer ammoniak duurzaam

geproduceerd wordt, zal het worden gebruikt als energiedrager om CO₂ vrije elektriciteit op te slaan. Door de relatief hoge efficiency van elektriciteit naar elektriciteit, energie dichtheid en lage stikstof kosten is ammoniak geschikt voor energieopslag. Ammoniak wordt ingezet als koolstofvrije brandstof in groot-schalige toepassingen zoals gasgestookte elektriciteitscentrales. Hiervoor wordt ammoniak eerst omgezet naar waterstof en stikstof middels kraken en het waterstof wordt gebruikt als brandstof in gasturbines die aangepast zijn voor brandstoffen met hoge concentraties waterstof. Voor directe verbranding van ammoniak zijn nieuwe grotere turbines nodig met een lage NO_x emissie.

De bestaande grootschalige ammoniak productie fabrieken worden aangepast of vervangen en worden voor een groot deel gebaseerd op omzetting van duurzame elektriciteit d.m.v. elektrolyse in combinatie met een geoptimaliseerd Haber-Bosch proces. In landelijke regio's waar een surplus aan duurzame elektriciteit wordt opgewekt, komen kleinschalige ammoniak productie fabrieken te staan o.b.v. waterelektrolyse, die de lokale boeren voorzien van kunstmest. Supermarktke-tens en de voedingssector gaan, onder druk van de consu-ment, overstappen op landbouwproducten, die geteeld zijn met kunstmest met een lage CO₂ footprint. Afhankelijk van de CO₂ footprint wordt er voor geïmporteerde ammoniak en kunstmest een importheffing, zodat er een level playing field is ontstaan voor de Europese ammoniak produ-centen.

4.4.3.3 Specifieke trends en ontwikkelingen

Ammoniak wordt op dit moment op grote schaal geprodu-ceerd via reforming van aardgas dat een mengsel van waterstof en stikstof levert dat vervolgens in de ammoniak synthese (Haber-Bosch proces) wordt omgezet via een exotherme reactie naar ammoniak. De energie transitie houdt in dat dit proces vervangen moet worden door alternatieven met lagere CO₂ emissies, waarbij in 2050 ammoniak productie met waterstof uit elektrolyse een belangrijke route naar koolstof arme ammoniak is. Als basisgrondstof voor de productie van de kunstmest is de trend een verschuiving van de kunstmest productie naar alternatieven met een lagere CO₂ footprint.

In de transitie spelen meerdere technologieën een rol. Beschikbaarheid van voldoende duurzame elektriciteit, beschikbaarheid van infrastructuur (electriciteit, H₂ en CO₂) en vervanging van huidige assets betekent dat CCS en aanpas-singen aan de huidige plants een rol spelen. Ook de ontwikke-lingen met betrekking tot waterstof in andere sectoren hebben hier invloed op.

Ontwikkeling en kostenreductie leidt tot de inzet van duurza-me, circulaire processen (d.w.z. zonder netto CO₂ uitstoot) voor NH₃ productie. Tot 2050 zal het overgrote deel van de groene ammoniak geproduceerd worden door elektrolyse van water via conventionele elektrolyse en integratie met een geoptimaliseerd Haber-Bosch proces. Hierbij wordt de stikstof via een luchtscheidingsunit aangeleverd. Deze units gebruiken al elektriciteit. Naast verbeteringen aan het Haber-Bosch proces (efficiëntie en CO_v footprint) en energie-efficiënte luchtscheiding speelt ook de integratie van H₂ productie met

het Haber-Bosch proces hierbij een grote rol. Hiernaast kunnen disruptieve technologieën een rol spelen in 2050 maar deze zijn op dit moment te laag in TRL om hun toekomstige ontwikkeling te voorspellen. Deze zijn onder andere:

- Direct elektrochemisch: Electro synthese uit N₂ of lucht en water (of ander protisch oplosmiddel).
- Plasma, metaal spons
- Elektrochemische scheiding van N₂ uit lucht

N.B. Opkomst van directe elektrolyse met/in water zal zorgen voor minder H₂ gebruik (afname van H₂ productie noodzaak)

4.4.3.4 Belangrijkste uitdagingen/opgaven/issues

Naast het creëren van een positieve publieke perceptie met betrekking tot ammoniak zijn ontwikkeling van de infrastruc-tuur en verlaging van de kosten van sleuteltechnologieën zoals elektrolyse, turbines, brandstofcellen en transport en distributie van ammoniak de belangrijkste uitdagingen voor de introductie van ammoniak als energiedrager. Het ontwikkelen van een ammoniak productie proces dat instaat is om te gaan met een variërend waterstofaanbod is nodig voor het omgaan met intermittency in het duurzame energie aanbod.

Deze uitdagingen leiden tot de volgende onderzoeksdoelstel-lingen:

- Verbetering van efficiëntie en capaciteit van productie en gebruik van ammoniak.
- Reductie van het gebruik en volledige recycling van zeldzame materialen (bv. in brandstofcellen, elektrolyse)
- Systeemintegratie en -optimalisatie:
 - Welke opslagtechnologieën spelen een rol?
 - Welke transitiepaden leiden tot de laagste kosten, welke transitiepaden leiden tot lock-in?
 - Regulering: Welke beperkingen leggen bescherming van de afnemers op aan eigendomsverhoudingen. Waar liggen verantwoordelijkheden voor de continuïteit? Hoe vindt prijsvorming plaats?
- Technische en bedrijfseconomische limiteringen aan intermitterende inzet van Power-2-NH₃ technologie

4.4.3.5 Beschrijving met aandacht voor meervoudig kijken

Maatschappelijk / planologisch

- De maatschappelijke impact in het toekomstbeeld van NH₃ is verwacht relatief klein te zijn, naast wat er al gebeurt voor waterstof als commodity product. Door het gebruik van groene waterstof in plaats van het SMR proces en het geoptimaliseerd Haber-Bosch proces, worden de CO₂ emissies sterk omlaag gebracht. Dit draagt sterk aan de klimaatdoelen en de voordelen daarvan. Maar voor de levensstandaard en comfort van de mensen zal niet veel merkbaar zijn.

Economisch

- De veranderingen die worden ervaren in de ammoniak-industrie zijn zeer verbonden aan de combinatie van scenario's die gerealiseerd zijn in 2050; samen met hoe de andere toekomst producten zich ontwikkelen. Op dit moment is het nog onduidelijk wat de rol van ammoniak en het energie/grondstoffen systeem gaat worden. Een deel

van dit is de vraag van wat de comparatieve voordelen van NL zijn om lokaal NH₃ te produceren. Hier zijn marktanalyses nodig voor de identificatie van niche markten die het transitiepad vergemakkelijken.

- Verder gaat de aandacht naar de realisatie van de energie behoefte van het Haber-Bosch proces zonder CO₂emissies (elektrisch verwarmen, H₂ stoken) en de integratie van het Haber-Bosch proces met de H₂ productie. Dit vraagt voor dezelfde soort ketenkoppeling als met de productie van brandstoffen en bulk chemicaliën uit CO₂ en H₂ (zie toekomstbeeld C_xH_yO_z). Businessmodellen tussen partijen en wisselwerkingen rond de gebruik van H₂ met intermitterende productie maar grote vraag (~ 1 GW) moeten nog uitgezocht worden. Systemstudies samen met invloed van juridische regelingen hebben hier veel invloed op. De pure elektrochemische productie van NH₃ is nog ver weg, maar is een game-changer met deze aspecten en die dient nu al onderzocht te zijn.

4.4.4 Toekomstbeeld Methaan (CH₄)

4.4.4.1 Samenvatting

In 2050 zal het gebruik van methaan niet leiden tot een netto CO₂ uitstoot. Door de opkomst van waterstof als energiedrager ter vervanging van aardgas, wordt het totaal verbruik van methaan sterk gereduceerd en wordt duurzaam methaan beoogd voor die toepassingen die moeilijk te elektrificeren of op waterstof om te zetten zijn. Wanneer methaan wel gebruikt wordt is de CO₂ circulair ingezet. De hoeveelheid van methaan die gebruikt is in 2050 is sterk gekoppeld aan de scenario die gerealiseerd wordt.

4.4.4.2 Algemene trends en ontwikkelingen

Het huidige aardgasgebruik in Nederland wordt dominant vervangen door waterstof als energiedrager. De toepassingen en processen die in 2050 methaan als grondstof of energiedrager gebruiken, gebruiken CO₂ neutraal 'groen gas' die gemaakt kan zijn uit kunstmatige Power-to-X processen, uit biomassa of (gedurende de transitie en fossiel gebruik) uit aardgas met CCS. Wat de verdeling tussen waterstof als energiedrager en methaan als energie drager wordt is nu niet bekend en is sterk verbonden met de ontwikkelingen van de waterstof infrastructuur (of gebruik van de methaan infrastructuur voor waterstof) en de snelheid van de transitie.

In de diverse studies wordt met name de rol voor 'groen gas' benoemd:

- Gebouwde omgeving: groen gas wordt gebruikt voor verwarming op die koude dagen, wanneer warmtepompen en warmtenetten niet in warmtevraag kunnen voldoen en warmte bijstook nodig is via hulpketels.
- Industrie: aardgas als primaire energiebron is verdwenen in 2050 en vervangen door waterstof, m.n. voor hoog-temperatuur warmte processen. Lokale productie van waterstof uit aardgas (zoals huidige petrochemische industrie) wordt vervangen door levering van H₂ als commodity.
- Transport: zwaar transport zal in transitie naar 2050 gebruik maken van groen gas, aardgas of LNG.
- Elektriciteitsproductie: duurzaam methaan als opslagmedium wordt beoogd voor verduurzaming van huidige energiecentrales, waar de geproduceerde CO₂ direct

afgevangen wordt (en bijvoorbeeld later in tijden van elektriciteit overschot naar methaan wordt geconverteerd).

De trend lijkt dat de bestaande aardgasinfrastructuur grotendeels en waar mogelijk geschikt gemaakt wordt voor H₂. Echter methaan is eenvoudiger (vloeibaar) te transporteren dan waterstof. Bovendien is Synthetic Natural Gas (SNG) over het algemeen zuiverder dan aardgas en daardoor makkelijker en goedkoper vloeibaar te maken.

Ook vraagt de productie van koolwaterstoffen in 2050 een duurzame bron van koolstof vereist, bijvoorbeeld in de vorm van 'groen gas' dat eenvoudig te transporteren is in bestaande infrastructuur.

4.4.4.3 Specifieke trends en ontwikkelingen

Huidige levering van methaan met als bron aardgas moet worden vervangen door duurzame productie van methaan. Productie van methaan via kunstmatige en biologische processen en met specifieke aandacht voor de bron van CO₂, d.w.z. afvang van puntbronnen (tijdens uitfaseren van fossiel en voor bewerkstelligen negatieve emissie) en direct uit de lucht (bijv. sluiten cyclus van zwaar transport op SNG).

De ontwikkeling en opschaling van duurzame, circulaire processen (d.w.z. zonder netto CO₂ uitstoot) voor CH₄ productie gebeurt via twee hoofdlijnen:

Bestaande processen

- Gebruik van aardgas, maar met CCS: dit proces leidt tot bijna nul CO₂ emissies door alle uitstoot af te vangen, maar heeft nog een lage energie efficiency en hoge kosten; wel geschikt voor grote volumes.
- Sabatier proces (H₂ + CO₂): inefficiënt waterstof gebruik en lage conversie rate, maar een bekend proces; geschikt voor grote volumes wanneer grote bronnen H₂ en CO₂ beschikbaar zijn.
- Vergisting / vergassing van biomassa: energy efficiënt proces die nog in ontwikkeling is, maar heeft vaak subsidie nodig om economisch rendabel te zijn; kan op kleinere en grotere schalen gebeuren.
- Innovatieve processen
- Directe (photo)elektrochemie vanuit H₂O en CO₂: processen zijn nog op lagere TRLs en moet verder ontwikkeld worden om economisch te zijn; op dit moment voor kleinere volumes CO₂.

Innovatieve technologie voor CH₄ productie: disruptieve technologieën zoals plasma en microwave processen kunnen in de toekomst de kosten en efficiency sterk verbeteren, maar de kansen en tijdslijnen zijn nog niet goed bekend.

4.4.4.4 Belangrijkste uitdagingen opgaven/issues

Het benodigd onderzoek betreft de hele keten van materiaal tot proces en geld en is beïnvloed door de scenario (of combinatie ervan) die gezien is in 2050.

Afhankelijk van dit scenario wordt de gebruik van methaan drastisch verminderd of hetzelfde als nu, maar dan circulair. Met waterstof als commodity product alleen kan de gebruik van methaan 30% minder worden door de vervanging van SMR units met groene waterstof. SMR units zijn een grote oorzaak van de huidige methaanconsumptie waarbij methaan

wordt omgezet in waterstof voor hydrotreatment van brandstoffen en voor ammoniak productie. Andere factoren zijn de CO₂ bron (door CCS or Direct Air Capture (DAC)) en de realisatie van een positieve business case door procesontwikkeling. Deze aspecten leiden tot de volgende lijst van onderzoeksdoelstellingen:

- Techno-economische studie naar CH₄ gebruik in 2050
- Verbeteren van het Sabatier proces: vereist H₂ als commodity
 - Efficiënt gebruik van exotherme warmte (sectorkoppeling)
 - Andere katalysatoren met hogere activiteit en selectiviteit
- Optimaliseren biomassa gasificatie voor CH₄ productie
- Methodes voor koolstofafvang uit puntbronnen en de lucht
- Fundamenteel onderzoek rond DAC (zeer relevant Na 2050 is Direct Air Capture & conversion zeer relevant, maar daar is nog uitermate veel fundamenteel onderzoek voor nodig. En CO₂ prijs moet naar 100 EUR/ton.
- Wat zijn de concurrerende technologieën en hoe kies je?
- Directe conversie vs. indirecte conversie (via waterstof): Wanneer komt de businesscase rond en wat moet daar nog voor gebeuren?

4.4.4.5 Beschrijving met aandacht voor meervoudig kijken

Maatschappelijk & planologisch:

- Maatschappelijke acceptatie CCS
- CCS: beperkte capaciteit om het afgevangen CO₂ onder de grond op te slaan
- Wat is de totale milieu-impact (LCA) en hoe verhoudt die zich met andere routes? Is dit te beschouwen als circulair en hoe zet je regelgeving en standaarden op?
- Economisch
- Welke rol krijgt CH₄ in het energie/grondstoffen systeem?
- CO₂-beprijzing en CCS kosten (ook energetisch)
- Waar komt de CO₂ vandaan? Centraal/decentraal of vanuit biomassa processen? Er is enorm veel CO₂ nodig? Wie produceert dat en hoe krijgen we dat op één plek?
- Hoe elektriciteit, waterstof, CO₂, product te vervoeren? Buffering? AC vs.
- DC infrastructuur en onshore/offshore bottlenecks?
- Hoe om te gaan met bestaande (afgeschreven) assets?

Juridisch

- Afweging bestaande infrastructuur omzetten naar waterstof, of juist waterstof naar methaan en bestaande infrastructuur gebruiken.
- Hoe verzorgen we de aansluiting op de grondstof (bijvoorbeeld CO₂ bron), energiebron (elektriciteitsnet) en klant (vrager naar het product)? Wat is het verdienmodel?
- Ownership CO₂, subsidies
- Monitoring Opslag CO₂

4.4.5 Toekomstbeeld staal / ijzer

4.4.5.1 Samenvatting

In 2050 wordt 95% CO₂ emissie reductie bereikt voor het produceren van ijzer uit ijzererts en gerecycleerde ijzer. Nieuwe processen maken gebruik van waterstof als brandstof en “carbon looping” om afhankelijk van fossiele brandstoffen te worden terwijl alternatieve technologieën, zoals de electric arc furnace, worden ook geïmplementeerd. Kostenefficiëntie is verhoogd door koppelingen met andere industrieën te maken.

4.4.5.2 Algemene trends en ontwikkelingen

Ijzer en staal processen zijn verantwoordelijk voor circa 6 procent van de totale CO₂-uitstoot. Dit komt neer op ongeveer 25% van de totale CO₂ emissie door de industrie. Per ton staal is de CO₂ emissie ongeveer 1,3 ton. Het grootschalig recycleren heeft geleid tot een significant emissie reductie. Nieuwe technologie wordt nu geëvalueerd om verdere energiebesparingen te verkrijgen (o.a. het Hlsarna proces).

Op dit moment is de focus voornamelijk op de brandstof, maar alternatieve processen moeten ook onderzocht worden, b.v. ex. Electric arc furnace. Trends gaan in de richting van hoge temperaturen bereiken zonder fossiele brandstoffen met technologieën zoals Carbon Looping en gebruik van H₂ als brandstof.

Reststromen kunnen belangrijker worden, maar moeten gesorteerd worden en vraagt dan voor meer procesontwikkeling.

Door de bovengenoemde ontwikkelingen wordt de beschikbaarheid van enorme gasvolumes een nieuwe uitdaging. De processen rond de staal productie moeten constant draaien om efficiënt te blijven en kunnen niet zomaar uitgezet worden. Om de koppeling te maken met intermitterend grondstof (e.g. waterstof) productie zal er significante opslag capaciteit zijn (rechtstreeks in de vorm van waterstof of in de vorm van een andere energiedrager). Dit voegt een extra stap toe aan het proces wat leidt tot verdere integratie mogelijkheden. Naast de bovengenoemde oplossingsrichtingen kan elektriciteit ook rechtstreeks gebruikt worden om ijzererts te reduceren naar ijzer.

De aspecten die hier beschreven zijn gelden ook voor de rest van de energie-intensieve industrie in Nederland.

4.4.5.3 Specifieke trends en ontwikkelingen

Om te komen tot een netto CO₂ reductie van 95 % zonder CCS zijn er de volgende routes:

1. Gebruik van biomassa of afval al dan niet in combinatie met het omzetten van CO naar nuttige producten. Biomassa en afval (bijvoorbeeld plastic) kunnen gebruikt worden als reductant in een zogenaamde blast furnace. De rookgassen kunnen relatief veel CO bevatten, deze CO kan vervolgens omgezet worden naar transportbrandstoffen of bulk chemicaliën.
2. Grootschalig gebruik van CO/CO₂ als grondstof voor transportbrandstoffen of chemicaliën. Door het gebruik van bijvoorbeeld het Hlsarna proces komt er relatief een pure CO₂ stroom vrij bij hoge temperatuur. Deze CO₂ kan met behulp van duurzame waterstof of via elektriciteit omgezet kunnen worden naar nuttige producten. In geval van CO rijke afvalstromen zoals in blast furnace gas, kan de CO worden omgezet naar nuttige grondstoffen.

3. Gebruik van waterstof.

IJzer erts kan gereduceerd worden met waterstof. Het proces hiervoor is al gedemonstreerd in de vorige eeuw. Essentieel is de aanwezigheid van grote hoeveelheden duurzaam waterstof.

4. Rechtstreekse reductie van ijzer erts met behulp van elektriciteit.

Het rechtstreeks reduceren van ijzer erts met behulp van elektriciteit is enkel bewezen op labschaal. Verschillende routes zijn er mogelijk.

4.4.5.4 Belangrijkste uitdagingen/opgaven/issues

Route 1: Benodigd onderzoek:

- Publieke perceptie
- Beschikbaarheid biomassa en geschikt afval
- Ontwerp hoogovens
- Conversie technologie (katalysator, reactor, scheidingstechnologie)
- Systeem ontwerp

Route 2: Benodigd onderzoek:

- Publieke perceptie
- Opschaling Hlsarna proces
- Conversie technologie (katalysator, reactor, scheidingstechnologie)
 - Solid oxid electrolyser (SOEC) materialen en reactor ontwerp
 - CO₂ reductie door waterstof (met name katalysator, reactor ontwerp en proces intensificatie)
 - Rechtstreekse reductie van CO₂ (zie voor uitdagingen bij lijn C_xH_yO_z)
 - CO scheiding en conversie technologie
- Systeem ontwerp

Route 3: Benodigd onderzoek:

- Integratie met waterstof productie en tijdelijke opslag
- Reactor ontwerp
- Integratie binnen het totale staal proces

Route 4: Benodigd onderzoek betreft de hele keten van materiaal tot proces!:

- Mechanistische studies
- Electrode materiaal en geometrie
- Reactor design
- Integratie binnen het totale staal proces

4.4.5.5 Beschrijving met aandacht voor meervoudig kijken Maatschappelijk/planologisch:

- De productie van staal en ijzer, naast andere energie-intensieve industrie, moet sterk ontwikkelen om de klimaatdoelen te bereiken. Naast de technologische verbeteringen kan de industrie baat hebben bij het maken van koppelingen met elkaar. Dit kan door verschillende industrieën naast elkaar te zetten of door pijplijnen. Ook verwerking van afvalstromen kan een rol spelen.
- Welke behoefte gaat er zijn aan staal?
- Is CCS een maatschappelijk geaccepteerde oplossing (zie ook: C_xH_yO_z)

Economisch:

Bekijk en evalueer technologieopties en bereken haalbaarheid onder verschillende scenario's (b.v. CO₂ beprijzing), inclusief mondiale verschillen en trends. Het strekt de aanbeveling zo vroeg mogelijk veldtesten uit te voeren.

Juridisch/bestuurlijk:

Centrale vraag is hoe zeker gesteld kan worden dat de meest efficiënte technologieën ontwikkeld zullen worden en onder welke omstandigheden dit gaat gebeuren. Hiervoor dient goede monitoring ingeregeld te worden rondom kernvraagstukken als planning van infrastructuur (pijplijnen) en het sluiten van de keten met gasstromen (gekoppeld met H₂).

5 Referenties

- 1) Offerteaanvraag 'Ontwikkeling roadmap voor grootschalige conversie en opslag meerjarig missie gedreven nationaal onderzoeks- en innovatieprogramma' d.d. 16 november 2017.
- 2) Nota van Inlichtingen meervoudig onderhandse procedure 'Offerteaanvraag Ontwikkeling roadmap voor grootschalige conversie en opslag meerjarig missie gedreven nationaal onderzoeks- en innovatieprogramma', referentie TSE1707004, Datum: 30 november 2017
- 3) 'Empowering the chemical industry: opportunities for electrification', TNO en ECN, mei 2016.
- 4) 'Grootschalige energieopslag', FME visiedocument, 2017.
- 5) 'European energy storage technology development roadmap, 2017 update', EASE en EERA, 2017.
- 6) 'Renewable energy for industry: from green energy to green materials and fuels', Cédric Philibert, OECD/IEA, 2017.
- 7) 'Elektrochemische conversie & materialen: naar een CO₂-neutrale energievoorziening in 2050', Topsector Energie, Holland High Tech, Topsector Chemie, september 2017.
- 8) 'Electrification in the Dutch process industry. In-depth study of promising transition pathways and innovation opportunities for electrification in the Dutch process industry.' Berenschot, februari 2017.
- 9) 'Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry', DECHEMA, july 2017.
- 10) 'NWA route Energietransitie', Nationale Wetenschapsagenda, juni 2016.
- 11) 'Deep decarbonisation of the Dutch heavy industry through electrification of the production of basic materials and transportation fuels', Toon van Harmelen, Clemens Schneider, Yvonne van Delft, Robert de Kler, Mathieu Baas, Vincent Kamphuis, TNO (May 2018)
- 12) 'Chemistry for Climate - Acting on the need for speed, Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050', Berenschot / Ecofys / VNCI, 2018.
- 13) 'Grootschalige energieopslag', ESNL / FEM
- 14) 'Gasunie verkenning 2050', editie

Dit is een publicatie van:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Croeselaan 15 | 3521 BJ Utrecht

Postbus 8242 | 3503 RE Utrecht

T +31 (0) 88 042 42 42

E klantcontact@rvo.nl

www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van
Topsector Energie

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | Augustus 2018

Publicatienummer: RVO-148-1801/BR-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) stimuleert
duurzaam, agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen.

Met subsidies, het vinden van zakenpartners, kennis en het
voldoen aan wet- en regelgeving. RVO.nl werkt in opdracht
van ministeries en de Europese Unie.

RVO.nl is een onderdeel van het ministerie van Economische
Zaken en Klimaat.

Deze publicatie is met grote zorgvuldigheid samengesteld.

Er kunnen geen rechten worden ontleend.

*Topsector Energie / RVO.nl zijn niet aansprakelijk voor
de gevolgen van het gebruik ervan.*

Ontwerp en management van het energiesysteem

Kennisroadmap

Michel Emde

Amersfoort 5 juli 2018

 **ECN** › **TNO** innovation
for life

 **TOPSECTOR ENERGIE**
Empowering the new economy

Te weinig netcapaciteit in Groningen en
Drenthe voor alle geplande zonneparken

**Arbeidsmarkt dreigt probleem te
worden bij energietransitie**

**Dalende CO2-uitstoot in rijke landen is
slechts papieren werkelijkheid**

Klokken lopen achter door internationale ruzie

Laadpaal slurpt stroom uit Volkswagen-accu

**ENERGIESYSTEEM VAN DE TOEKOMST
DRAAIT ROLLEN OM**

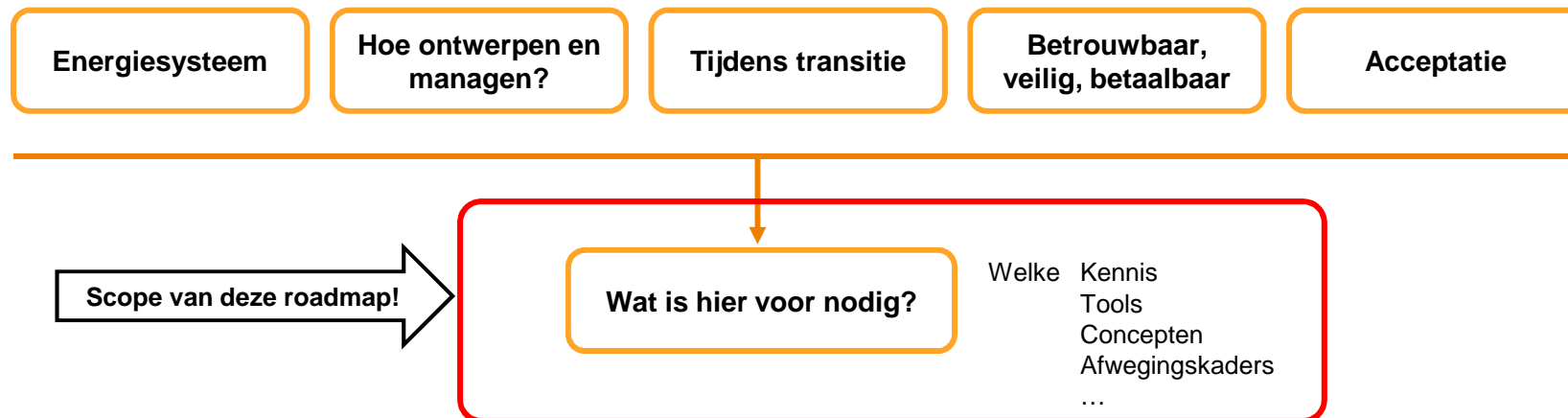
Flexibiliteit sluitstuk voor energietransitie



Centrale vraag

Hoe ontwerpen en managen we het veranderende energiesysteem

Kennisroadmap voor waarin kennis, tools, concepten, afwegingskaders ontwikkeld worden om deze vraag in te vullen



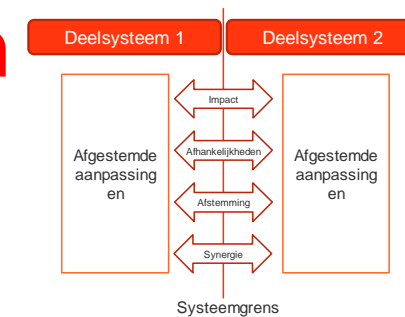
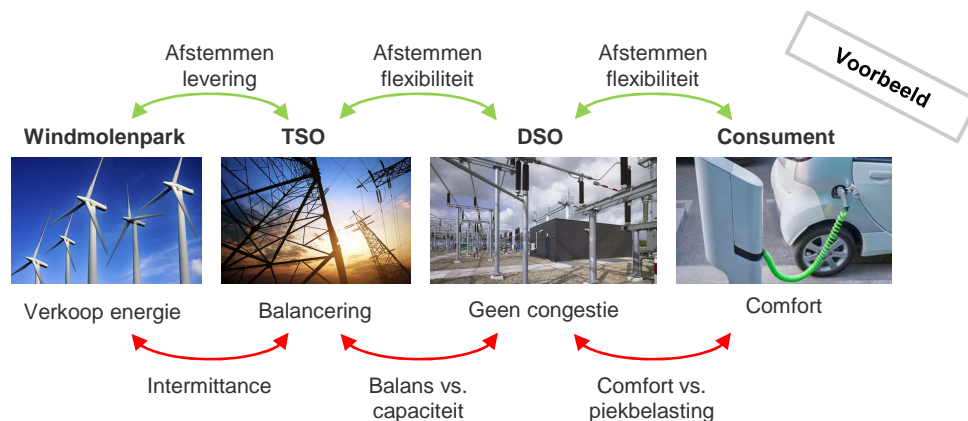
Onderdeel van de KIA Systemintegratie, ten behoeve van (de uitkomsten van) de klimaattafels

De kennisroadmap is gebaseerd op discussie met sectorpartijen

- ▶ Allego
- ▶ DAF Trucks
- ▶ Eneco
- ▶ Enexis
- ▶ Engie
- ▶ EnNatuurlijk
- ▶ Gasunie
- ▶ Gemeente Den Haag
- ▶ Gemeente
- ▶ GroningenLEVE/HAN
- ▶ Liander
- ▶ LTO Glaskracht
- ▶ Milieudefensie
- ▶ Min BZK
- ▶ Min EZK
- ▶ Min IenW
- ▶ NWO
- ▶ Provincie Zuid-Holland
- ▶ Rijkswaterstaat
- ▶ Gemeente Rotterdam
- ▶ RUG
- ▶ RVO
- ▶ Scholt Energy
- ▶ Stedin
- ▶ Tata Steel
- ▶ TenneT
- ▶ TKI Urban Energy
- ▶ TSE Systeemintegratie
- ▶ TU Eindhoven
- ▶ TU Delft
- ▶ Vestia

Deze legt daarmee een goede en gedragen basis voor de KIA Systeemintegratie. Deze roadmap is niet bedoeld als “in beton gegoten”. Bij de invulling van de KIA is ruimte voor relevante toevoegingen vanuit deelnemende partijen.

Management energiesysteem = Management van systeemgrenzen



- ▶ Het Energiesysteem is een “system of systems”
- ▶ Management van het energiesysteem is het management van de samenwerking tussen deelsystemen op de grensvlakken.
- ▶ Tussen deelsystemen bestaan afhankelijkheden.
- ▶ De energietransitie brengt veranderingen in deelsystemen die deze afhankelijkheden onder spanning zullen zetten.
- ▶ Dit vergt interactie, afstemming, besluiten en maatregelen aan weerszijden van deze grensvlakken.

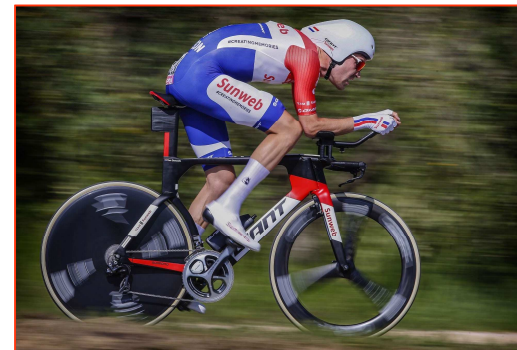
Het Huidige energiesysteem zal tegen grenzen aanlopen

Huidige energiesysteem



- ▶ Traditionele maatstaven
- ▶ Huidige energiesysteem is stabiel, betaalbaar, veilig en geaccepteerd
- ▶ Huidige rolverdeling, mechanismes, sturing werken goed

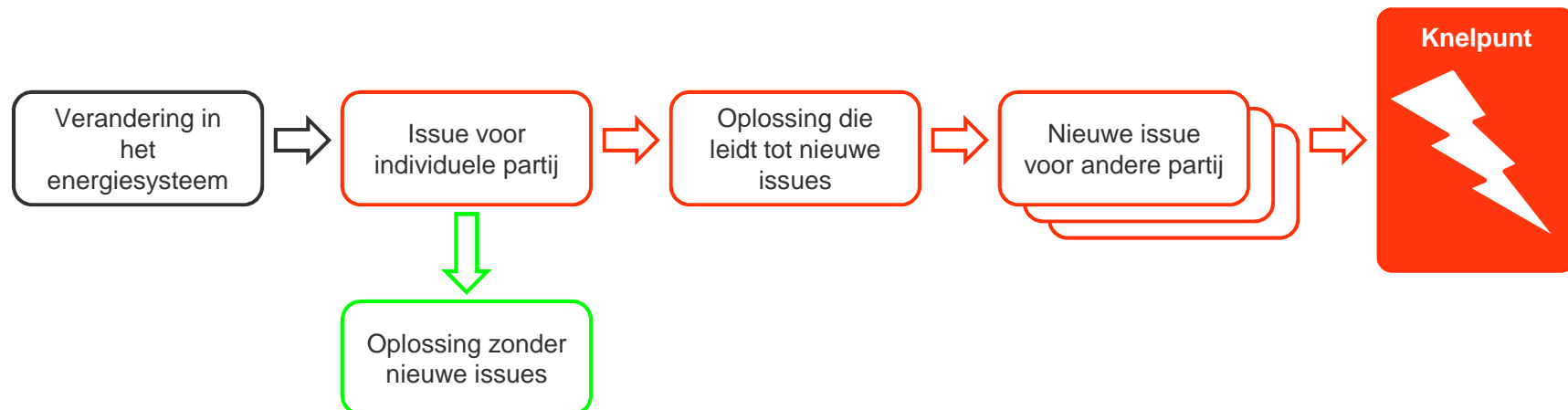
Toekomstige energiesysteem



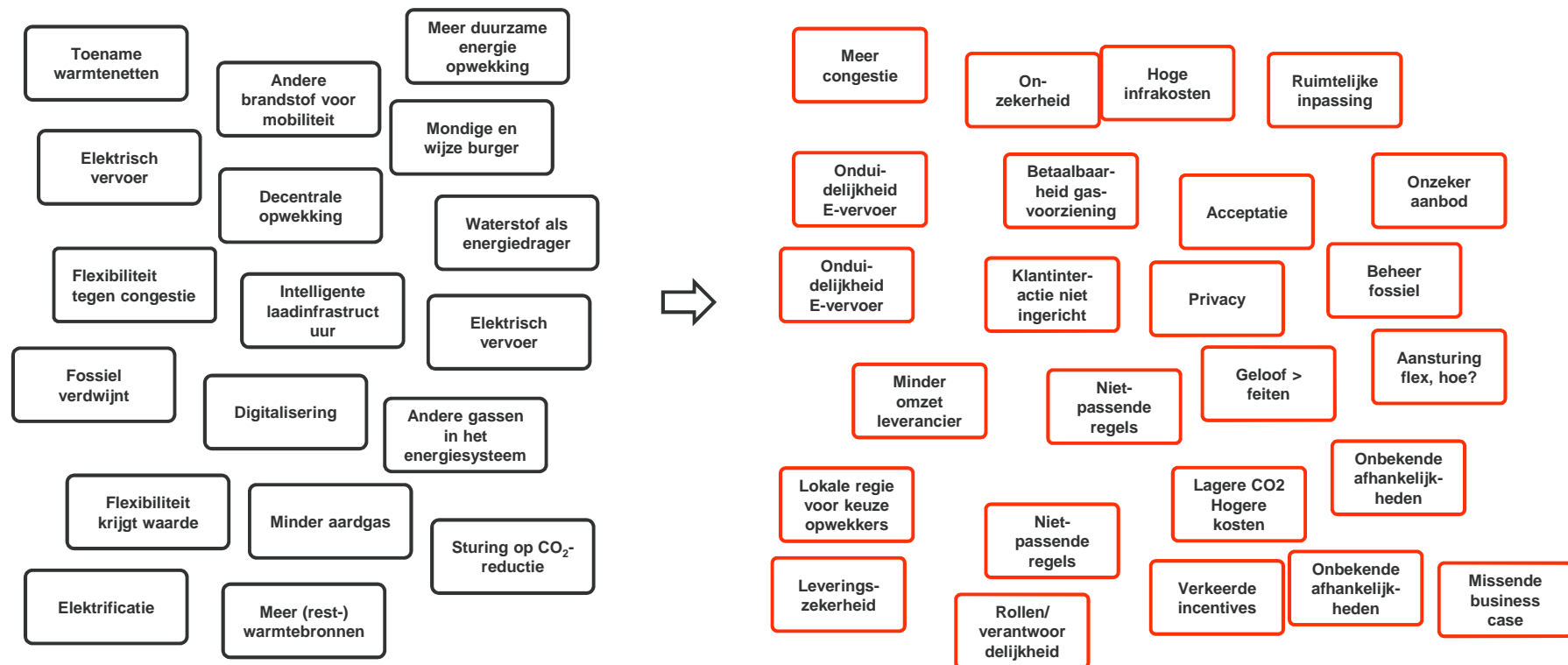
- ▶ Traditionele maatstaven + **CO₂-neutraal** + **duurzaam**
- ▶ Huidige systeem is niet meer vanzelfsprekend stabiel, betaalbaar, veilig en acceptabel
- ▶ **In eerste instantie zullen huidige spelers tegen grenzen aanlopen.**

Issues!

Combinaties van deze issues leiden tot systeemknelpunten



Trends leiden tot issues



Systemeknelpunten

Een aantal van de issues uit de vorige slides zijn niet oplosbaar zonder impact op andere partijen. Dit zijn systeemknelpunten. Daarnaast zijn er een aantal overkoepelende knelpunten geïdentificeerd.

Overkoepelende knelpunten	Knelpunten die voortkomen uit issues			
Onduidelijke mandaatstructuur	Top down beleid vs. bottom-up realisatie	Verdeling kosten/baten	Dure/risicovolle nieuwe technologie	P2G en G2P komen niet vanzelf tot stand
Onduidelijk beleid (energiedrager)	Schaarste flexibiliteit	Verandersnelheid vs. innovatiebehoefte	Elektrificatie leidt tot congestie/kosten	Zonder centrales geen fysiek mechanisme 50 Hz
Suboptimale netwerkbenutting	Informatievoorziening niet helder	Keuzes in ene wijk hebben impact op andere wijk	Schone technologieën leiden nog tot CO ₂	Merit order levert prijs=0, onduidelijke business case
Investeringsonzekerheid	Verplaatsings-effecten	Internationale harmonisatie nodig	Meer volatiliteit leidt tot problemen balanshandhaving	
Tijdelijke oplossing is niet eindoplossing	Gemeente mist wettelijke taak en instrumenten e-sys	Niet one size fits all	Rol bestaande gasinfrastructuur?	

Thema's en kennisvragen



De vragen die beantwoord moeten worden om de knelpunten aan te pakken zijn geclusterd in 8 thema's

Keuze energiedrager

- ▶ Welke energiedrager zetten we waarvoor in?
- ▶ Hoe komen we tot overall de beste keuzes? (Exergie)
- ▶ Waar komt de energie van de gekozen energiedragers vandaan?

Bestendig investeren

- ▶ Hoe houden we investering en risico in evenwicht?
- ▶ Hoe kan de risicovolle periode overbrugd worden?
- ▶ Hoe zorgen we ervoor dat beslissingen bestendig zijn (los van politiek)?
- ▶ Hoe komen we tot een haalbare business case voor alle relevante partijen?
- ▶ Hoe regelen we de financiering rond bestendig investeren?
- ▶ Hoe zorgen we voor duurzame keuzes of tijdelijke no-regret keuzes?
- ▶ Hoe zorgen we voor gelijk oplopen vraag en aanbodontwikkelingen?
- ▶ Hoe regelen we de governance?
- ▶ Welke mandaten zijn nodig voor welke partijen?
- ▶ Welke regelgeving is nodig ten aanzien van beleid en (lokale) keuzes?

Samen beslissen

- ▶ Hoe stemmen we op verschillende schaalniveaus beleid en lokale keuzes met elkaar af?
- ▶ Hoe brengen we onderling afhankelijke lokale en individuele afwegingen bij elkaar?
- ▶ Hoe zorgen we voor herhaalbare en opschaalbare lokale oplossingen?
- ▶ Hoe komen we tot een haalbare business case voor alle relevante partijen?
- ▶ Welke governance is nodig rondom gezamenlijk besluiten?
- ▶ Welke informatie is nodig voor het globale besluitvormingsproces?
- ▶ Hoe zorgen we voor NL/EU regelgeving en harmonisatie?
- ▶ Hoe regelen we de verdeling van kosten en baten?

Infrastructuur:elektrisch

- ▶ Hoe ontwerpen we onze infrastructuur optimaal, stabiel, betaalbaar, tijdig?
- ▶ Welke regelgeving en governance is nodig t.a.v. infrastructuur?
- ▶ Hoe regelen we 50Hz frequentie?
- ▶ Hoe wordt de financiering ingericht voor elektrische infrastructuur?

Flexibiliteit

- ▶ Hoe zorgen we ervoor dat volatiliteit in aanbod en beschikbare flexibiliteit in balans zijn?
- ▶ Hoe bepalen we flexibiliteit beschikbaar/nodig. Welke keuzes moeten we hier nog maken?
- ▶ Hoe kan dit geoperationaliseerd worden?
- ▶ Welke governance is nodig rond flexibiliteit?
- ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. flexibiliteit?

Infrastructuur: algemeen

- ▶ Hoe zetten we de gasinfra in en wat is hier voor nodig?
- ▶ Welke nieuwe infrastructuur is nodig (H2/HVO/warmte/...)
- ▶ Hoe wordt de financiering ingericht voor gas- en andere infrastructuur?
- ▶ Welke governance is nodig voor gas- en andere infrastructuur?
- ▶ Welke regelgeving is nodig voor de toekomstige inzet van gasinfrastructuur?

Markt-mechanismen

- ▶ Welke zaken kunnen/moeten via marktmechanismen geregeld worden op welke tijdschaal?
- ▶ Welke marktmechanismen zijn nodig?
- ▶ Welke governance is nodig rond markten?
- ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. marktmechanismen?

Digitalisering

- ▶ Welke informatievoorziening is voor welk doel nodig?
- ▶ Hoe richten we dit in?
- ▶ Hoe garanderen we de cybeveiligheid van het energiesysteem?
- ▶ Welke governance is nodig rondom digitalisering?
- ▶ Welke regelgeving is nodig t.a.v. informatievoorziening?

Thema's en te ontwikkelen resultaten



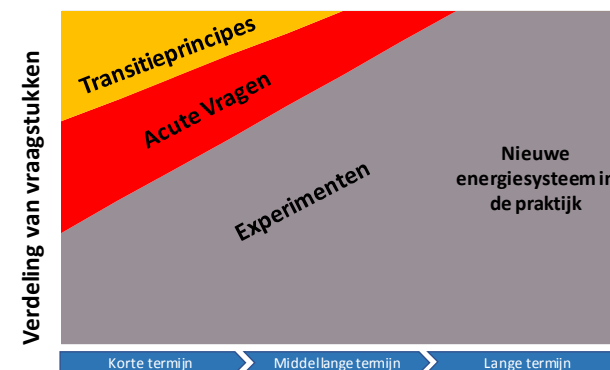
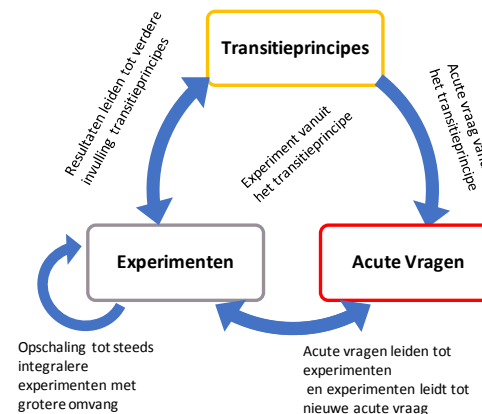
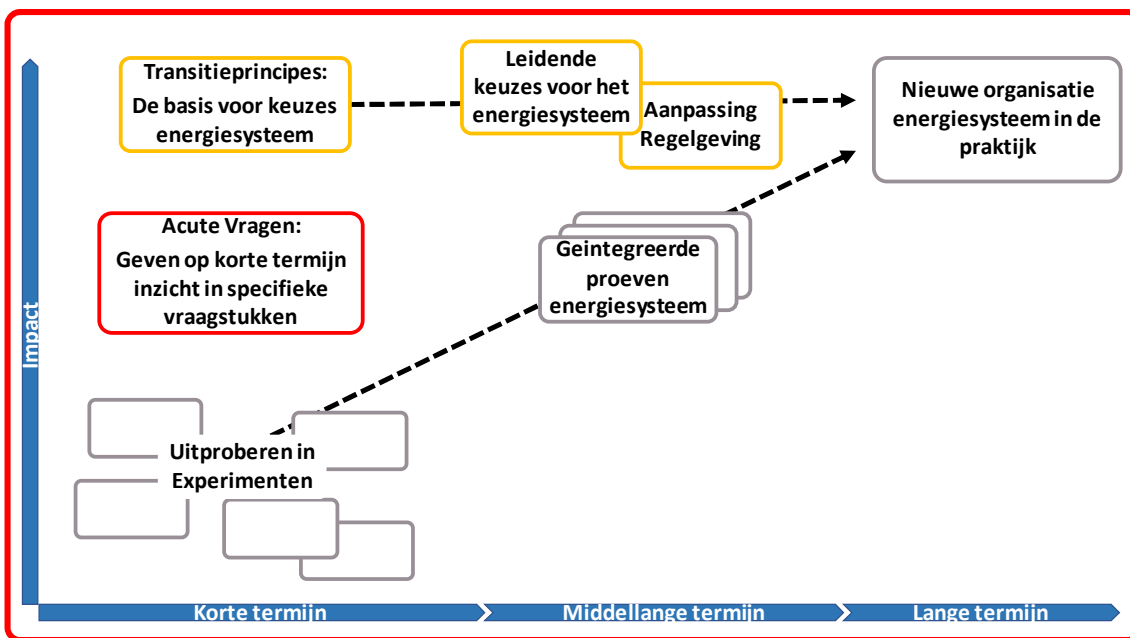
Drie soorten activiteiten voor drie soorten vraagstukken

Activiteiten rond transitieprincipes (geel): Dit zijn activiteiten die vanuit een holistische en/of “green field” gedachte basisprincipes ten aanzien van het energiesysteem en de energietransitie uitwerken. De uitkomsten van deze activiteiten zijn typisch van invloed op veel andere vraagstukken en keuzes in het energiesysteem en/of leveren verhelderende nieuwe inzichten op.

Acute vraag (rood): Dit zijn activiteiten die specifieke vragen die op dit moment leven onder stakeholders rond een bepaald onderwerp adresseren en waarbij door de stakeholders gezamenlijk naar een antwoord wordt gezocht. De uitkomsten van deze activiteiten zijn typisch direct toepasbaar en toetsbaar in pilots/experimenten.

Experiment (grijs): In experimentele activiteiten wordt proefondervindelijk gezocht naar antwoorden op (acute) vragen die niet eenvoudig zijn te adresseren door bijvoorbeeld theoretisch onderzoek of simulatie - zoeken naar oplossingen door het gewoon te doen. Daarnaast kunnen in experimentele activiteiten (deel)oplossingen die in eerdere activiteiten zijn ontwikkeld geïntegreerd en in de praktijk getoetst worden (praktijkproef). Ten slotte kan een experimenteel initiatief gebruikt worden om oplossingen uit te proberen die in het huidige energiesysteem niet uitprobeerbaar kunnen worden (vanwege bijvoorbeeld regelgeving of technische obstakels).

Soorten activiteiten veranderen in de loop van de tijd



Thema Keuze Energiedrager

Voor een CO₂-neutraal energiesysteem is een transitie naar nieuwe energiedragers van essentieel belang. De mogelijkheden voor CO₂-neutrale energiedragers zijn elektriciteit, moleculen en warmte. Voor een CO₂-neutrale energiedrager is het nodig dat er voldoende CO₂-neutrale energieproductie is.

Te adresseren

- ▶ Een CO₂-neutraal energiesysteem gaat uit van **andere energiedragers** dan in het huidige systeem. Er is **onduidelijkheid** over **beleid** en welke **duurzame energiedragers** het best gekozen kunnen worden voor welke **toepassingen**.
- ▶ De keuze van energiedrager heeft impact op (het realiseren van) **infrastructuur, energieproductie** en **eindgebruik**. Daarnaast zijn er gevolgen voor de verschillende **deelsystemen** binnen het energiesysteem. De keuze van energiedragers vereist een **integrale** afweging.
- ▶ Keuzes voor energiedragers op lokaal niveau kunnen leiden tot **sub-optimalisatie** en **bottlenecks** terwijl het maken van globale keuzes die het hele systeem optimaliseren de transitie vertragen.
- ▶ Om genoeg CO₂-neutrale energie te realiseren moet de **duurzame energieproductie** worden versneld. Met de huidige versnippering, lokale initiatieven, inspraakprocedures verloopt **dit niet snel genoeg**.
- ▶ Om het systeem **betrouwbaar** te houden bij een groter aandeel duurzame energieproductie is **lange termijn opslag** nodig.
- ▶ Het integreren van **nieuwe energiedragers** in het energiesysteem vereist **conversie technologie** en **aanpassing van regelgeving**.

Tijdslijn



Te ontwikkelen

- ▶ **Integrale analyse/toekomstbeeld/roadmap** als input voor **beleid** t.a.v. de **inzet van welke energiedrager voor welke toepassing** om het CO₂-neutrale energiesysteem te realiseren. Rekening houdend met de impact van keuzes op verschillende **deelsystemen**, op (het realiseren van) **infrastructuur, energieproductie** en **eindgebruik**, met inachtneming van ontwikkelingen in **Europa/omliggende landen**.
- ▶ **Hybridiseringsstrategie** voor het bepalen van de optimale wijze om het fossiele energiesysteem via gemengd fossiel/duurzaam stapsgewijs te veranderen naar duurzaam.
- ▶ **Energiedrager-kiezer** die op verschillende schaalniveaus afwegingskaders biedt voor het maken keuzes t.a.v. energiedragers. De energiedrager-kiezer **optimaliseert** op basis de combinatie van de **lokale situatie** én het **integrale toekomstbeeld** en verandert conform **roadmap**.
- ▶ **Nationale programma's grootschalige duurzame opwek** op basis van integrale en nationale afweging voor grootschalige opwek, bijbehorende marktmechanismen en wet- en regelgeving. Deze programma's versnellen de **duurzame energieproductie**.
- ▶ **Nationale programma's grootschalige opslag en conversie** op basis van integrale en nationale afweging voor grootschalige opslag en conversie. Deze programma's geven **invulling** aan het **toekomstbeeld voor energiedragers** door in te spelen op behoefte aan **lange termijn opslag** en **conversie** tussen energiedragers.

Stakeholders

- ▶ TSO's
- ▶ DSO's
- ▶ Energieleveranciers
- ▶ Producenten
- ▶ Installateurs
- ▶ Technologie leveranciers
- ▶ Consumenten
- ▶ Industrie
- ▶ Overheid (lokaal, regionaal en landelijk)
- ▶ Programma Verantwoordelijken

Thema Samen Beslissen

Keuzes in het energiesysteem zijn lastig omdat het een complex systeem betreft (system of systems) waarbij keuzes die goed lijken op de ene plek of voor de ene partij aanzienlijke negatieve gevolgen kunnen hebben op de andere plek of voor de andere partij. Dit thema maakt samen beslissen mogelijk.

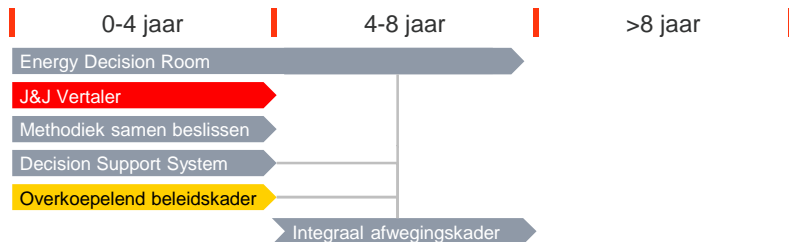
Te adresseren

- ▶ Er is geen heldere **governance/mandaatstructuur** waardoor niemand kan besluiten voor een bepaalde richting of keuze.
- ▶ **Lokale** en **individuele** afwegingen van actoren zijn onderling **afhankelijk**, een besluit dat voor de ene actor positief is kan voor de andere negatief uitvallen.
- ▶ Besluiten worden vaak genomen vanuit een enkel perspectief (economisch, technisch, sociaal) terwijl **meerdere perspectieven** relevant zijn.
- ▶ **Beleid** wordt **top-down** opgesteld, terwijl veel **besluiten bottom-up** genomen worden. Beleid en praktijk zijn daarmee **niet automatisch met elkaar in lijn**.
- ▶ **Onzekerheid** over en **onbekendheid** met het uiteindelijke energiesysteem belemmert het nemen van weloverwogen doelgerichte beslissingen om stappen te maken in de transitie c.q. om beslissingen te nemen die leiden tot een stabiel systeem.
- ▶ Het is voor partijen, burgers moeilijk om de (complexe, samenhangende) consequenties van een besluit te overzien.
- ▶ Beslissingen op landsniveau moeten in lijn zijn met beleid van andere landen en de EU.

Te ontwikkelen

- ▶ **Energy Decision Room** voor inbrengen en ontwikkelen van interdisciplinaire kennis en best practices om de lokale en regionale energietransitie te steunen.
- ▶ **Jip & Janneke vertaler** met **voorbeeldenboek** en **visualisaties** om de **complexiteit** van het energiesysteem en de **consequenties** van keuzes in heldere en **begrijpelijke taal** uit te leggen zodat diverse investeerders keuzes durven maken.
- ▶ **Decision Support System** dat inzicht geeft in wederzijdse afhankelijkheden en effecten van maatregelen analyseert inclusief gevolgen voor andere partijen
- ▶ **Overkoepelend beleidskader** waarin **motivaties** en **belangen** (bijv. kosten vs. Stabiliteit vs. Duurzaamheid vs. Comfort vs. autonomie) tegen elkaar **afgewogen** worden en dat als **leidraad** kan dienen voor **beleidskeuzes**
- ▶ **Integraal afwegingskader** om keuzes op het ene **schaalniveau** af te **wegen** tegen en/of in **lijn** te brengen met keuzes op andere **schaalniveaus** (internationaal/landelijk/regionaal/lokaal/ individueel) vanuit **verschillende perspectieven** (economisch/sociaal/technisch).
- ▶ **Methodiek** om **samen** tot afgewogen **besluiten** te komen die, ondanks de verschillende belangen voor alle stakeholders acceptabel zijn en die vanuit de verschillende schaalniveaus en perspectieven tot het gewenste effect leiden.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Lokale ecosystemen
- ▶ Bewoners
- ▶ Gemeentes
- ▶ Provincies
- ▶ Rijksoverheid
- ▶ DSO's
- ▶ TSO's
- ▶ Financiers
- ▶ Industrie/grootgebruikers
- ▶ Producenten
- ▶ Leveranciers
- ▶ Investeerders
- ▶ Woningcorporaties
- ▶ ..

Thema Bestendig Investeren

Om tot een duurzaam hybride energiesysteem te komen zijn aanzienlijke investeringen nodig die vanwege onduidelijkheid en verschillende belangen niet vanzelf op gang komen. Dit thema ontwikkelt instrumenten om investeringen te stimuleren, bestendig te maken en om belemmeringen op te lossen.

Te adresseren

- ▶ De transitie van het energiesysteem vraagt om investeringen in **tijdelijke oplossingen** en **no-regret-oplossingen**. Deze oplossingen moeten bijdragen aan de transitie, maar tegelijk ondanks hun tijdelijke aard leiden tot een zo **efficiënt** mogelijk resultaat uit de benodigde investering.
- ▶ **Gewenste baten** van benodigde investeringen komen **niet** altijd voldoende **ten goede** aan de **partij die hiervoor moet investeren**, waardoor deze investering niet vanzelfsprekend (of vanzelfsprekend niet) gedaan wordt. Dit vormt een belemmering voor de transitie.
- ▶ **Onzekerheid** over en onbekendheid met het uiteindelijke energiesysteem zorgen voor risico's die het doen van **investeringen belemmert**.
- ▶ De keuzes in het energiesysteem **ontstijgen het tijdsbestek** van de politiek of zelfs van generaties (vergelijk de deltawerken), terwijl de **mandaatstructuur** voor die langere termijn op dit moment ontbreekt.
- ▶ **Businesscases** voor optimale energie-oplossingen zijn nu financieel nog niet haalbaar vanwege ontbreken van schaal, tempo en vanwege complexiteit.

Te ontwikkelen

- ▶ Scenario-gebaseerde ontwikkeling, schets en roadmap **organisatie, financiering en wetgeving** rond het toekomstige energiesysteem. Beredeneerd vanuit het huidige systeem én vanuit een denkbeeldige green field situatie.
- ▶ Uitwerking van **rol, taken en verantwoordelijkheden** en **instrumentarium** van een **'deltacommissaris energie'** met mandaat die integrale afweging maakt o.b.v. langere termijn behoefte, los van de (tijdelijke) belangen van stakeholders en politiek.
- ▶ Ontwikkelen en in de praktijk valideren van innovatieve **samenwerkingsvormen** die tot andere **marktwerking, participatie** en **schaalniveau van oplossing** leiden. Met opties voor **waardering van flexibiliteit**.
- ▶ Ontwikkelen van principes en mechanismen voor **collectieve businesscases** om vanuit de collectieve maatschappelijke afweging te investeren in plaats van op individuele basis om investeringsprojecten met split incentives mogelijk te maken.
- ▶ **Rekeninstrument** en **methodiek** waarmee **lasten en baten evenredig verdeeld** kunnen worden over partijen en waarmee tot gezamenlijke **afspraken** gekomen kan worden.
- ▶ Onderzoek naar de **mogelijkheden** en **randvoorwaarden** voor **subsidies** die verduurzaming stimuleren vanuit een integraal maatschappelijk belang zonder perverse prikkels.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ DSO's
- ▶ TSO's
- ▶ Min Fin
- ▶ Min EZ
- ▶ Industrie
- ▶ Provincie/gemeente
- ▶ Energieproducenten
- ▶ Energielieferanciers
- ▶ Bewoners
- ▶ Financiers
- ▶ Investeerders

Thema Infrastructuur: Algemeen

Gebruik van aardgas zal drastisch verminderen. De warmtevraag dient anders ingevuld te worden. Daarvoor zal mogelijk nieuwe infrastructuur aangelegd moeten worden. De bestaande gasinfrastructuur biedt kansen voor andere doeleinden dan transport van aardgas.

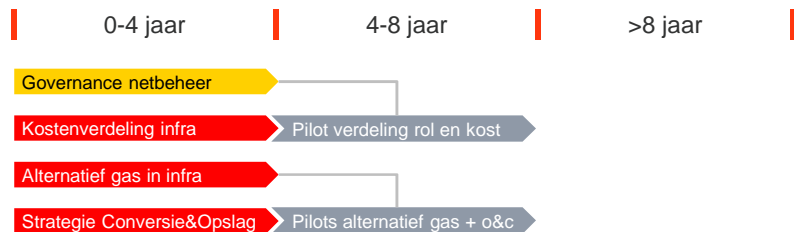
Te adresseren

- ▶ Een **aardgasloze samenleving** betekent dat de huidige rol van aardgas voor **verwarming** en als **grondstof** anders ingevuld moet worden (*thema keuze energiedrager*). Het anders invullen van de warmtevraag vereist een aanpassing van de **infrastructuur** en **apparaten bij eindgebruikers**. Dit leidt mogelijk ook tot **andere rollen voor de huidige infrastructuurbeheerders** en/of ruimte voor **nieuwe partijen**.
- ▶ De **kosten** van de gasinfrastructuur worden thans **gesocialiseerd** over de aangesloten klanten. Als de infrastructuur minder gebruikt wordt zullen deze **kosten gaan oplopen**.
- ▶ De bestaande gas infrastructuur biedt kansen voor transport van andere gassen (bijvoorbeeld biogas/H₂) en de lokale/nationale inzet **opslag en conversie**, bijvoorbeeld voor het bieden van **flexibiliteit**. Deze toepassingen hebben impact op de rest van het **energiesysteem**, de **lokale inpassing** en vergen **technische aanpassingen** aan het netwerk en aanpassingen aan de **regelgeving**.

Te ontwikkelen

- ▶ **Governance-model** voor de **rolverdeling, verantwoordelijkheden** en **rechten** en **plichten voor netbeheer** en **systeembeheer** waarmee netbeheer van bestaande en nieuwe infrastructuur optimaal kan worden ingevuld in het nieuwe energiesysteem, en waarbij nieuwe energiedragers, opslag en conversie en flexibiliteit optimaal benut kunnen worden.
- ▶ **Kostenverdeling** voor de aanleg en onderhoud van de **infrastructuur in het gehele energiesysteem** (elektra, gas en anders) op basis van bijvoorbeeld "**ketenbeprijzing**", waarbij het daadwerkelijke beslag op het energiesysteem in acht wordt genomen zodanig dat het toekomstige energiesysteem betaalbaar, betrouwbaar en bereikbaar blijft voor iedereen.
- ▶ **Studie en scenario's** voor het inpassen van **alternatief gas in de bestaande infrastructuur** en de technische, economische en regulatorische haalbaarheid daarvan. Hierbij wordt gekeken naar het **potentieel** en de waarde van alternatieve gassen in het bestaande aardgasnet en wat de **impact** is voor netbeheerders, gebruikers en producenten.
- ▶ Een **strategie** voor het inpassen van **conversie en opslag** in de gasinfrastructuur. Hiermee wordt gekeken naar de meest kansrijke technologieën en de **locatie** waar deze het beste toe te passen zijn. Er wordt een integrale afweging voor de impact op de rest van het energiesysteem gemaakt.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ TSO's
- ▶ DSO's
- ▶ Andere infrastructuurproviders (o.a. warmte)
- ▶ Energieleveranciers
- ▶ Producenten
- ▶ Consumenten
- ▶ Industrie
- ▶ Overheid (lokaal, regionaal en landelijk)
- ▶ Programma Verantwoordelijken
- ▶ Aggregators
- ▶ Opslag- en conversie-partijen
- ▶ Bewoners

Thema Infrastructuur: Elektrisch

Elektrificatie van de energievraag en verduurzaming van het energieaanbod heeft grote impact op de elektrische infrastructuur. Technische innovaties, slimmer gebruik van infrastructuur en maatschappelijke keuzes zijn nodig voor een infrastructuur die stabiel is, maar ook betaalbaar blijft.

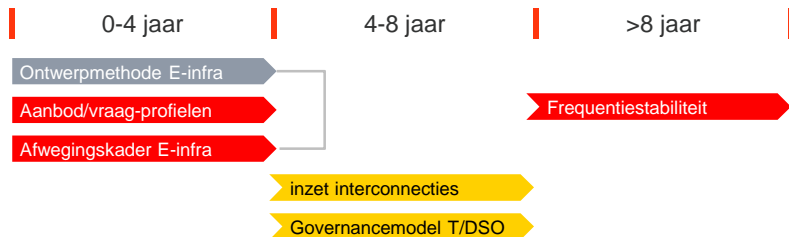
Te adresseren

- ▶ De elektrische infrastructuur wordt steeds meer het **samenspel** van lokale, regionale en (inter)nationale **deelsystemen**. De transities op deze schaalniveaus beïnvloeden elkaar. Voor keuzes ten aanzien van het ontwerp en de inrichting van de elektrische infrastructuur zijn **integrale afwegingen** nodig die rekening houden met onderlinge **afhankelijkheden** en gekozen **transitiepaden**.
- ▶ Toenemende elektrificatie zorgt voor een wijzigend vraagpatroon en een variabel aanbodpatroon. Dit zorgt voor een uitdaging om **vraag en aanbod op alle tijdschalen te matchen**. Dit geldt zowel voor het **balanceren van volumes** als voor het zorgen voor voldoende **transport- en distributiecapaciteit**. Deze uitdagingen spelen op zowel het niveau van de regionale als de nationale netbeheerder. Deze problematiek dient daarom **gezamenlijk** aangepakt te worden.
- ▶ Elektrificatie vergt **capaciteitsuitbreidingen** in de infrastructuur die aanzienlijke extra **kosten** moet zich mee brengen en aanzienlijke **tijdsdruk** vanwege **personeelstekort**.
- ▶ Het afnemende aandeel van traditionele centrales in de productie van elektriciteit levert op termijn uitdagingen op voor de **frequentiestabiliteit** van het systeem door het verdwijnen van roterende massa (generatoren) als mechanisme.

Te ontwikkelen

- ▶ **Integrale ontwerpmethod**e voor **lokale elektriciteitsinfrastructuur**. Deze methoden nemen **onderlinge afhankelijkheden** van het systeem in acht en bepalen de optimale inrichting van lokale systemen. Mogelijk vergt optimalisatie verruiming van regelgeving.
- ▶ Toekomstige **aanbod en vraagprofielen** voor elektriciteit die inzicht geven in welke vraag en welk aanbod op welk moment op welke tijdschaal gematcht moeten worden. Dit bepaalt keuzes ten aanzien van **balancing** en **transportcapaciteit**.
- ▶ **Afwegingskader** voor keuzes in de elektriciteitsinfrastructuur. Holistische toetsing van keuzes o.b.v. impact op klimaat, behoefte, maatschappelijke passing, interregionale optimalisatie en randvoorwaarden zoals de beschikbaarheid van human capital.
- ▶ Studie voor nationale positionering en strategische keuzes ten aanzien van de het **nationale systeem** en de (mate van) afhankelijkheid en integratie van het **internationale systeem** (interconnecties).
- ▶ Een toekomstgericht **governance model** voor **samenwerking** tussen regionale en nationale netbeheerder om de **stabiliteitshandhaving** te faciliteren en te bevorderen.
- ▶ **Technische oplossingen** voor het handhaven van de **frequentiestabiliteit** (los van balancing) als het aandeel traditionele centrales afneemt, waarbij ook "out-of-the-box" naar een andere invulling zou kunnen worden gekeken (bijv. DC).

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ DSO-E's
- ▶ TSO-E (NL/Internationaal)
- ▶ Leveranciers
- ▶ Producenten
- ▶ Programmamaverantwoordelijken
- ▶ Corporaties
- ▶ Industrie
- ▶ Consumenten
- ▶ Overheid

Thema Flexibiliteit

Flexibiliteit is nodig voor het praktisch en betaalbaar matchen van vraag en aanbod voor elektriciteit en is daarmee randvoorwaardelijk voor een werkend elektriciteitssysteem. Daarnaast biedt flexibiliteit mogelijkheden om pieken in de belasting van de infrastructuur te verlagen waardoor minder capaciteit in de infrastructuur nodig is. Om deze flexibiliteit aan te wenden zijn nog belangrijke keuzes te maken en is meer inzicht en slimheid van het netwerk vereist.

Te adresseren

- ▶ **Inzicht** in enerzijds de **behoefte** aan flexibiliteit (tijdschaal, locatie, patroon) en anderzijds de **mogelijkheden** (technologieën, omvang/potentieel, locatie, partijen die kunnen/willen leveren), is nodig om **onderbouwde keuzes** te maken die optimaal bijdragen aan het systeem en bij het ontwerp van het systeemmechanisme voor flexibiliteit. Dit inzicht ontbreekt nog.
- ▶ Flexibiliteit kan worden geleverd door elke aangesloten partij, maar voor elke partij zijn de belangen anders, evenals het bijbehorende **business case**. Het **business model en de bijbehorende governance** met nieuwe of bestaande actoren is nog niet helder.
- ▶ Flexibiliteit kan worden ingezet door te handelen op de **handelsmarkt voor energie**, maar kan ook ingezet worden in de vorm van **systeemdiensten** met eveneens een groot **maatschappelijk belang**. De wisselwerking/spanning tussen deze belangen moet worden geadresseerd bij de vaststelling van het systeemmechanisme voor flexibiliteit.
- ▶ Om op het juiste moment benodigde en beschikbare flexibiliteit aan te kunnen sturen zijn en hierop te kunnen vertrouwen zijn **vooruitzicht, inzicht, control** en **monitoring** nodig voor vraag, aanbod, netwerkbelasting en flexibiliteit.

Te ontwikkelen

- ▶ Een **systeemmechanisme** voor flexibiliteit waarbij, vanuit een macroscopische analyse van behoefte en potentiële beschikbaarheid aan flexibiliteit en inzicht in wanneer flexibiliteit op welke tijdschaal nodig is, wordt bepaald **welke** flexibiliteitsbronnen/technologieën (industrie, huishoudens, ...) **in welke mate** worden aangesproken en welke **afspraken** nodig zijn.
- ▶ **Flexprofilering en -forecasting tools** dat op nationaal en lokaal niveau inzicht geeft in **flexpotentie** (waar is mogelijk flexibiliteit te creëren), te **verwachten vraag en aanbod** (bijv. o.b.v. weer, tijd van de dag, tijd van het jaar, ...) en te **verwachten beschikbaarheid** van flex (idem) als input voor strategische, tactische en operationele **beslissingen** in het elektriciteitssysteem.
- ▶ **Business modellen, business cases** en **incentives** voor flexibiliteit in verschillende sectoren die nodig zijn om het genoemde systeemmechanisme voor stakeholders **haalbaar** te maken. Aandachtspunt hierbij is de verhouding tussen flexibiliteit inzetten op de handelsmarkt en ten behoeve van systeemdiensten. Hierbij wordt ook gekeken naar transformaties van het ecosysteem en het ontstaan van nieuwe rollen en governance structuren.
- ▶ Operationele inrichting van het systeemmechanisme waarmee de ontsluiting en de aansturing van flexibiliteit het juiste inzicht (ICT) en vooruitzicht (forecasting) mogelijk wordt.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Eindgebruikers vanuit alle sectoren
- ▶ DSO
- ▶ TSO
- ▶ Overheid
- ▶ Aggregators
- ▶ Installateurs
- ▶ Producenten
- ▶ Leveranciers
- ▶ Programmaveerantwoordelijken
- ▶ Overheden

Thema Marktmechanismen

Marktmechanismen zijn een middel voor het management van het energiesysteem. Binnen dit thema worden marktmechanismen ontwikkeld die sturen op een duurzaam en CO₂-vrij energiesysteem en die de transitie stimuleren met behoud van betaalbaarheid, acceptatie en stabiliteit.

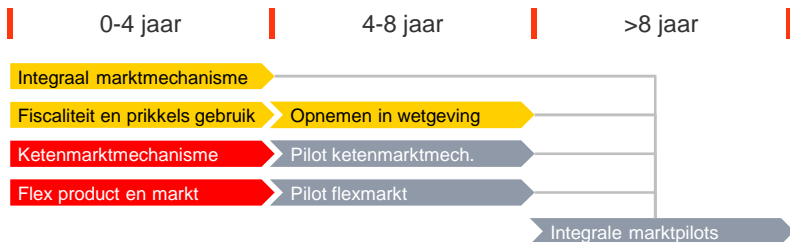
Te adresseren

- ▶ Een deel van de huidige marktmechanismen sturen niet naar de optimale situatie in termen stabiliteit, betaalbaarheid, acceptatie en sturing op CO₂-neutraal en duurzaam.
- ▶ Een deel van de marktmechanismen vormen een drempel voor de energietransitie en dragen niet bij aan een optimale energieketen. Er mist een duurzaam keten-marktmechanisme.
- ▶ Fiscaliteit leidt op dit moment niet of nauwelijks tot juiste prikkels bij gebruikers.
- ▶ Op dit moment is er geen marktmechanisme dat rekening houden met lokaliteit van vraag een aanbod waardoor deze niet bij (kunnen) dragen aan congestie management, aangezien congestie een lokale aangelegenheid is.
- ▶ Er mist een marktmechanisme waarmee vraag en aanbod van flexibiliteit geregeld kunnen worden met de juist afweging tussen toepassing voor balancering en congestiemanagement en zonder dat daarbij ongewenste (of perverse) prikkels worden veroorzaakt
- ▶ Er zijn en komen allerlei initiatieven rond marktmechanismen die geïntegreerd en opgeschaald moeten worden.

Te ontwikkelen

- ▶ Toekomstbeeld van integraal marktmechanisme op basis van integrale "kostenindex" waarin de verschillende KPI's (stabiliteit/kosten/acceptatie/duurzaamheid) in de juiste verhouding zijn meegenomen
- ▶ Uitgewerkte en via simulaties getoetste ketenmarktmechanisme dat geanalyseerde drempels voor de transitie wegneemt en dat beter stuurt op CO₂-uitstoot en kostenveroorzaking en dat internationaal afgestemd is.
- ▶ Uitgewerkte fiscale wetgeving die de prikkels bij gebruikers oplevert richting minder verbruik, meer gebruik van duurzame energie en flexibel vraag en aanbod, inclusief beeld van (zo minimaal mogelijk) effect op de schatkist.
- ▶ Productspecificaties voor flexibiliteit ten behoeve van balancering en congestiemanagement en bijbehorende flex-marktmechanisme waarin lokaliteit van energievraag en -aanbod en flexibiliteit worden meegenomen én dat de gewenste prijsprikkels oplevert, getoetst op impact in de markt (simulatie).
- ▶ Operationele pilot voor opschaling, integratie van marktmechanismen waarin haalbaarheid en effecten worden getoetst.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Leveranciers
- ▶ BRP
- ▶ TSO
- ▶ DSO
- ▶ Aggregators
- ▶ Overheid
- ▶ Bewoners
- ▶ Industrie/grootgebruikers

Thema Digitalisering

Het energiesysteem is een groot en complex netwerk dat steeds meer digitaal en slimmer wordt. De digitale infrastructuur wordt daarmee een vitale infrastructuur die ook zelf gemanaged moet worden. Binnen dit thema wordt een robuuste en veerkrachtige digitale infrastructuur ontwikkeld.

Te adresseren

- ▶ **Data en digitalisering** is nodig voor het regelen van het energiesysteem bestaande uit steeds meer **spelers** en **elementen** die gemanaged moeten worden. Digitalisering is een voorwaarde voor het **opschalen** van het nieuwe duurzame hybride energiesysteem. Deze **vitale digitale infrastructuur** wordt op dit moment niet op systeemniveau ontworpen en gemanaged. Er missen systeem-brede data- en IT-architecturen en standaarden.
- ▶ Voor het afgestemd managen van het energiesysteem is het essentieel dat data en informatie tussen (een steeds groter aantal) partijen in de keten worden gedeeld. Het is niet duidelijk om welke data dit precies gaat, van welke partijen de data is en wat de **rechten en plichten zijn rond het delen van data**.
- ▶ Digitale infrastructuur wordt **vitale infrastructuur**, maar wordt momenteel niet als zodanig **beschermd**.
- ▶ Internet-of-Things ontwikkelingen rond (o.a.) in-huis apparatuur geeft de gelegenheid tot **autonome ontwikkeling** die positieve of negatieve **impact** kan hebben op het energiesysteem.
- ▶ De **praktische invulling** van digitalisering is op dit moment niet helder en wordt momenteel **ad hoc aangepakt**.

Te ontwikkelen

- ▶ **Raamwerk voor digitale infrastructuur** die het regelen (monitoren/aansturen/afrekenen) en het opschalen van het nieuwe energiesysteem op uniforme wijze mogelijk maakt bestaande uit a) **IT-architecturen**, b) benodigde **standaarden/interoperabiliteit voor informatie-uitwisseling** tussen energiebedrijven en voor informatie over of data voor de aansturing van infrastructuur en in-huis apparatuur en c) centrale/decentrale **datasystemen**. Daarbij worden kansen/bedreigingen door **autonome ontwikkelingen** als IoT geadresseerd. Te toetsen in praktische casussen..
- ▶ **Regelgeving, beleid, rollenmodel, standaarden en technische invulling** voor het doelgericht (welke data moet/mag/mag niet gedeeld worden en wie mag erbij?), eenvoudig, veilig, controleerbaar en acceptabel (hoe?) **data delen** tussen partijen in het energiesysteem. Te toetsen aan de hand van praktijkcasus met verschillende stakeholders.
- ▶ **Praktijktoets integrale digitale infrastructuur** waarbij in de praktijk wordt getoetst of de ontwikkelde systemen/architecturen/standaarden/mechanismen/rollenmodellen bruikbaar en doelmatig zijn. In deze praktijktoets worden iteratief verbeterlagen aangebracht in de ontwikkelde instrumenten.

Tijdslijn



Stakeholders

- Netbeheerders (E/G/W)
- Laadinfraproviders
- Leveranciers
- Producenten
- Aggregators
- Grootverbruikers
- Datadienst leverancier
- Telecom provider
- Nieuwe spelers/ dienstontwikkelaars
- OEM's (mobiliteit, in-huis apparatuur/infrastructuur elementen.
- Overheid

Meer informatie?

Neem gerust contact op!

Michel Emde
michel.emde@tno.nl





 **ECN** › **TNO** innovation
for life



TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy

Roadmap Conversie en Opslag

Programma Systeemintegratie

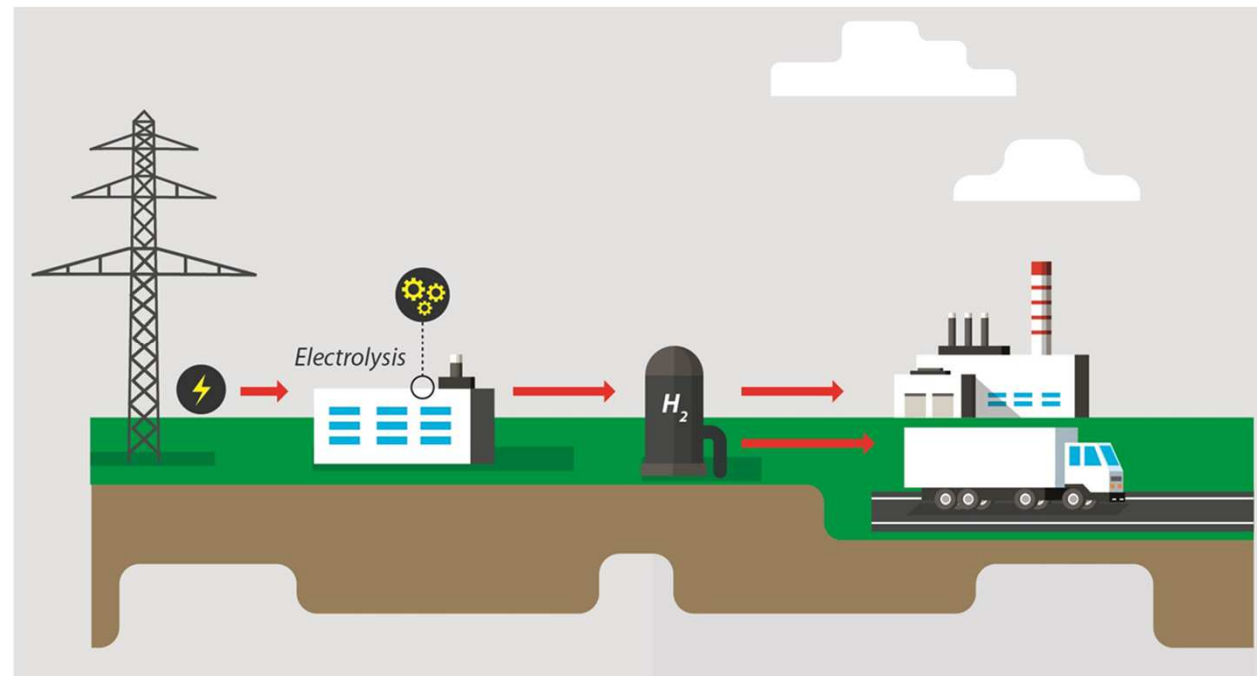
5 juli 2018

Monique Rijkers



TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy

Welkom



Het bereiken van 95% CO₂ emissiereductie in 2050 behelst een flinke bijdrage van de industrie

- De roadmap beantwoordt twee centrale vragen:
 - Welke grootschalige chemische conversie en opslagconcepten van duurzame energie naar “groene moleculen” zijn (vanuit technisch en economisch perspectief) mogelijk op korte, middellange en lange termijn?
 - Welke innovatiestappen zijn nodig, gezien vanuit een geïntegreerde visie op de productie van grondstoffen en energie?

Een integrale visie op conversie en opslag van groene energie in moleculen ontbreekt

- De doelstelling van het project is een roadmap tot 2050 te ontwikkelen en een bijbehorende kennisagenda voor de komende 4-8 jaar voor de *conversie en opslag van groene energie in moleculen*.
- Deze roadmap bestaat uit:
 - Relevante producten (moleculen) voor grote schaal conversie en opslag van groene elektriciteit en de daarbij behorende sectoren.
 - Systeemszenario's rondom deze producten in 2050.
 - Randvoorwaarden en key bottlenecks gerelateerd aan deze scenario's.
 - Onderzoeksagenda voor de komende 4-8 jaar die deze randvoorwaarden en key bottlenecks adresseren voor korte, middellange en lange termijn.

De roadmap is tot stand gekomen in vijf stappen

1. Analyse
bestaande
relevante
nationale en
internationale
rapporten.

Eerste ronde tafel
bijeenkomst ter
identificatie van de
relevante
producten en
eerste beeld van
de uitdagingen.

1. Eerste
uitwerking
producten,
systeemsenario's
, bottlenecks en
onderzoeks-
agenda.

1. Tweede ronde
tafel voor
verdieping en
reflectie.

1. Definitief maken
roadmap en
onderzoeks-
agenda.

De betrokken stakeholders zijn stakeholders uit de staal-, energie-, chemie- en apparatenbouw; NGO's; Topsectoren; Brancheorganisaties

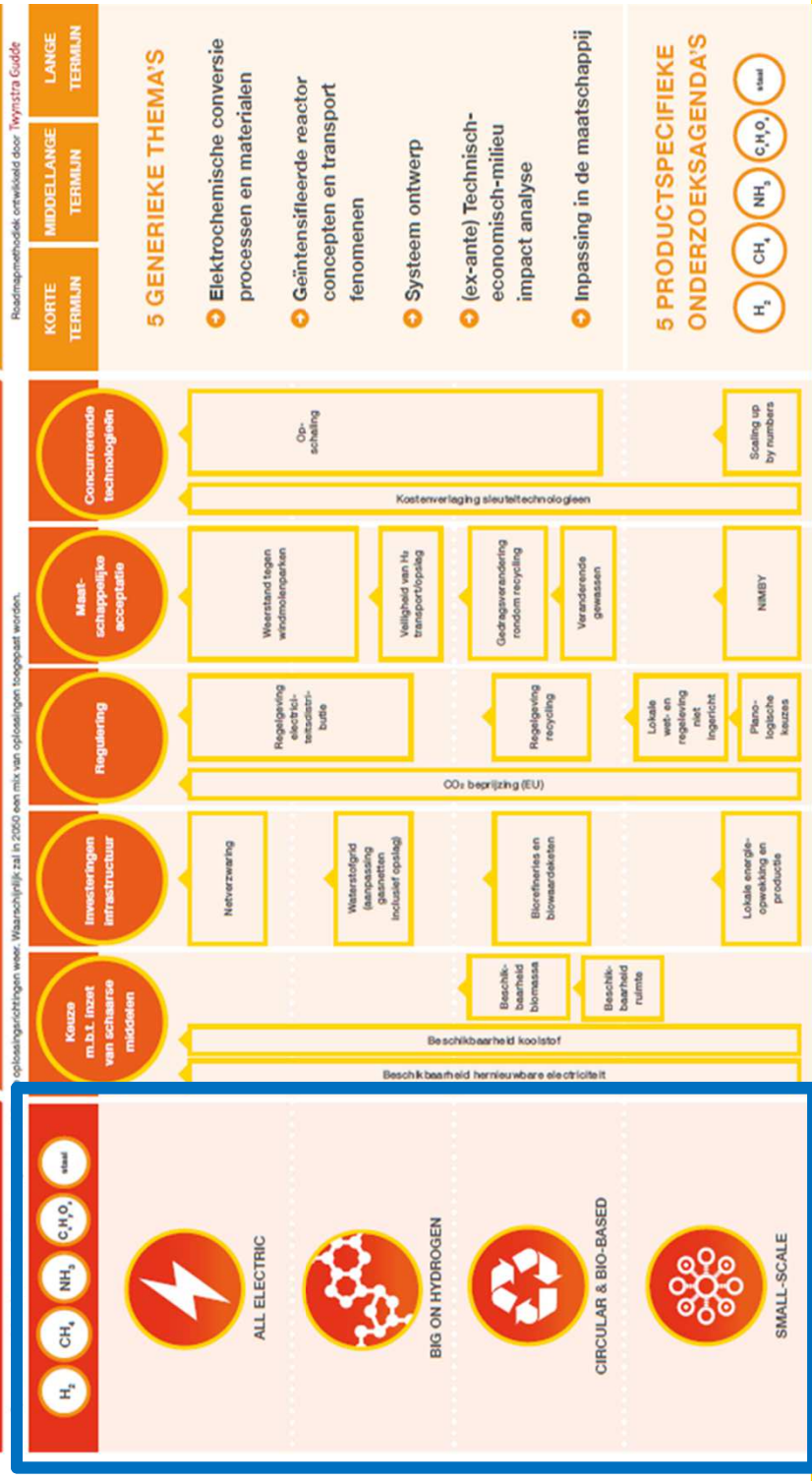
Roadmap Conversie & Opslag



Toekomstbeelden
4 systeemscenari's voor conversie & opslag

Knelpunten
5 knelpunten op weg naar toekomstbeelden. Deze worden beïnvloed door verschillende factoren

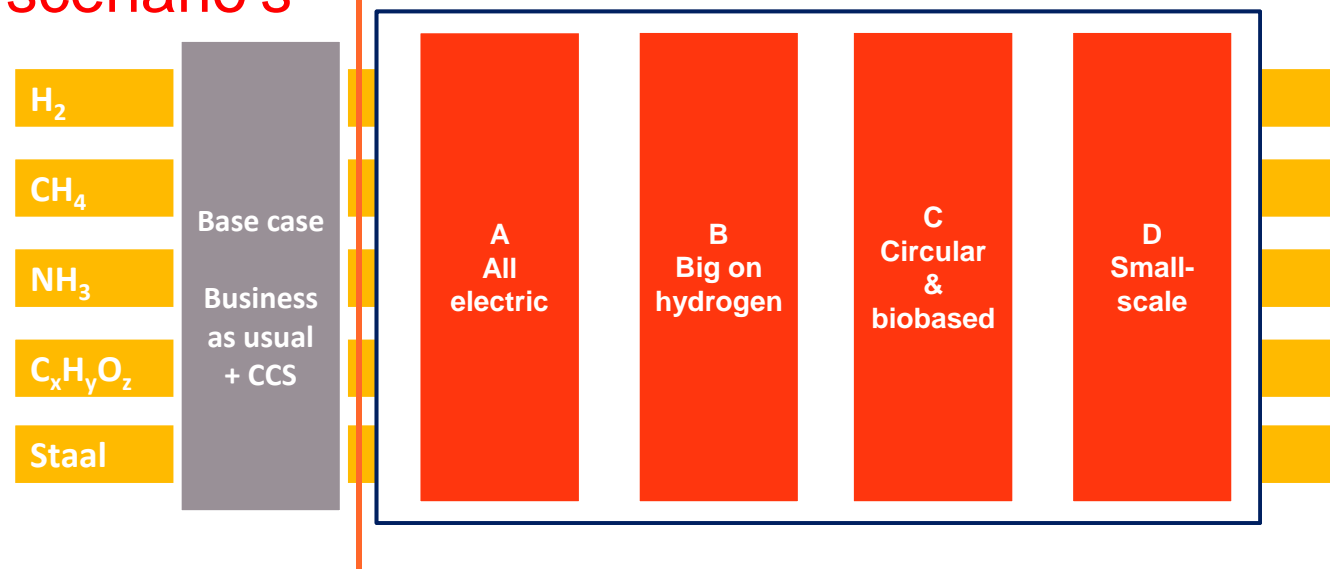
Onderzoeksagenda
met onderzoeksvragen voortvloeiend uit de knelpunten





We schetsen de toekomst aan de hand van 4 extreme scenario's

Groene moleculen in 2050
Opslag en conversie van energie



Randvoorwaardelijke issues, steemanalyse & business cases





Base Case: Business as usual + CCS

Business as usual maar met Carbon Capture & Storage

Korte omschrijving	Gebruik van fossiele energie en feedstock (base case), maar met Carbon Capture & Storage (CCS)
Infrastructuur	Bestaand + CCS, zowel uit puntbronnen als uit de lucht
Economisch	Investeren in CCS
Belangrijkste stakeholder	Gas- en petrochemische industrie
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Geen (N.B. Grootschalige CCS opties voorhanden, wellicht (elektro)chemisch van aard)
Feedstock	Fossiele grondstoffen (aandacht voor maatschappelijke en geopolitieke aspecten)
Energievorm	Fossiele grondstoffen (aandacht voor maatschappelijke en geopolitieke aspecten)
Beperking	CCS technologie (m.n. kosten) en opslag capaciteit; maatschappelijke acceptatie



Systeemsценario A: All Electric

Alle energie wordt in elektrische vorm geleverd, feedstock moleculen moeten gewonnen worden (met elektriciteit)

Korte omschrijving	Gebruik van elektriciteit als energiebron in industriële processen en transport.
Infrastructuur	Elektriciteitsinfrastructuur grootschalig beschikbaar. Infrastructuur nodig voor duurzame feedstock moleculen voor chemische industrie (bron van "C,N,O,H")
Economisch	Grootschalige chemische fabrieken moeten veranderen, qua feedstock en energiegebruik, bijvoorbeeld op grote schaal zelf voorzien in (elektrochemisch) H ₂
Belangrijkste stakeholder	Energiesector (DC grid).
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Rechtstreekse elektrochemische conversie van CO ₂ , stikstof en ijzererts naar basis chemicaliën en ijzer
Feedstock	Elektriciteit; CO ₂ uit Direct Air Capture (DAC) ; water;
Energievorm	Elektriciteit
Beperkingen	Veel elektriciteit, verzwaring van het grid en opslag van elektriciteit nodig



Systeemsценario B: Big on hydrogen

Waterstof is de energiedrager (d.w.z. alle elektriciteit wordt omgezet naar H₂)

Korte omschrijving	Waterstof is de energiedrager voor transport en energie (feedstock en fuel)
Infrastructuur	Grootschale infrastructuur voor het leveren van H ₂ als commodity. Nodig bron van "C, N, O"-atomen voor in vervolgchemie.
Economisch	Grootschalige industrie blijft, met verandering energieverbruik.
Belangrijkste stakeholder	Gassector (H ₂ grid)
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	<ul style="list-style-type: none">• Grootschalige uitrol van electrolyzers• Productie van koolwaterstoffen en ammoniak door activering van CO₂ en stikstof via waterstof• Productie van ijzer door waterstof gebaseerde reductie van ijzererts
Feedstock	H ₂ ; CO ₂ uit Direct Air Capture (DAC) , N ₂
Energievorm	H ₂ (op grote schaal gemaakt door direct alle elektriciteit om te zetten)
Beperkingen	Transport grid en opslag/buffering van H ₂ nodig



Systemscenario C: Circular & biobased

Circulaire brandstoffen zijn de energiedrager (d.w.z. biomassa, dan wel alle elektriciteit wordt direct geconverteerd naar moleculen)

Korte omschrijving	Circulaire koolwaterstoffen (o.a. biomassa) voorzien in energie en feedstock
Infrastructuur	Grootschalige infrastructuur gefocust op circulaire processen; biologische en kunstmatige processen, en ook infrastructuur voor recycling.
Economisch	Nieuwe business modellen verschijnen, waarbij producten ontworpen zijn om langer gebruikt te worden en geschikt zijn voor hergebruik dan wel terugwinning van de elementaire bouwstenen.
Belangrijkste stakeholder	Leveranciers en verwerkers van biomassa
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	<ul style="list-style-type: none">• Productie van brandstoffen en chemicaliën op basis van (elektrochemische) conversie van circulaire grondstoffen• Gebruik van elektrochemische processen voor het opwerken van afvalstromen
Feedstock	CO ₂ uit (bio-)CCS en DAC; biomassa
Energievorm	Groene methaan
Beperkingen	Grote volumes van biomassa nodig



Systeemsценario D: Small Scale

Lokale, compacte productie van moleculen (d.w.z. geen grootschalige processen)

Korte omschrijving	Local-for-local. De afstand tussen grondstof en energieopwekking, productie en gebruik is kort.
Infrastructuur	Lokale, kleinschalige infrastructuur
Economisch	Huidige bedrijfsprocessen zullen ingrijpend veranderen.
Belangrijkste stakeholder	Eindgebruiker
Implicaties m.b.t. elektrochemische processen	Autonome (elektrochemisch) conversie systemen
Energievorm	Groene methaan, elektriciteit, H ₂
Beperkingen	Geen gebruik van schaalgrootte en bestaande installaties; planologische keuzes

Roadmap Conversie & Opslag



Toekomstbeelden
4 systeemscenario's voor conversie & opslag

Systeemscenario's zullen elkaar niet uit, maar geven vandaar



ALL ELECTRIC



BIG ON HYDROGEN



CIRCULAR & BIO-BASED



SMALL-SCALE



Knelpunten
5 knelpunten op weg naar toekomstbeelden. Deze worden beïnvloed door verschillende factoren

Systeemscenario's zullen elkaar niet uit, maar geven vandaar



ALL ELECTRIC



BIG ON HYDROGEN



CIRCULAR & BIO-BASED



SMALL-SCALE



Onderzoeksagenda
met onderzoeksvragen voortvloeiend uit de knelpunten

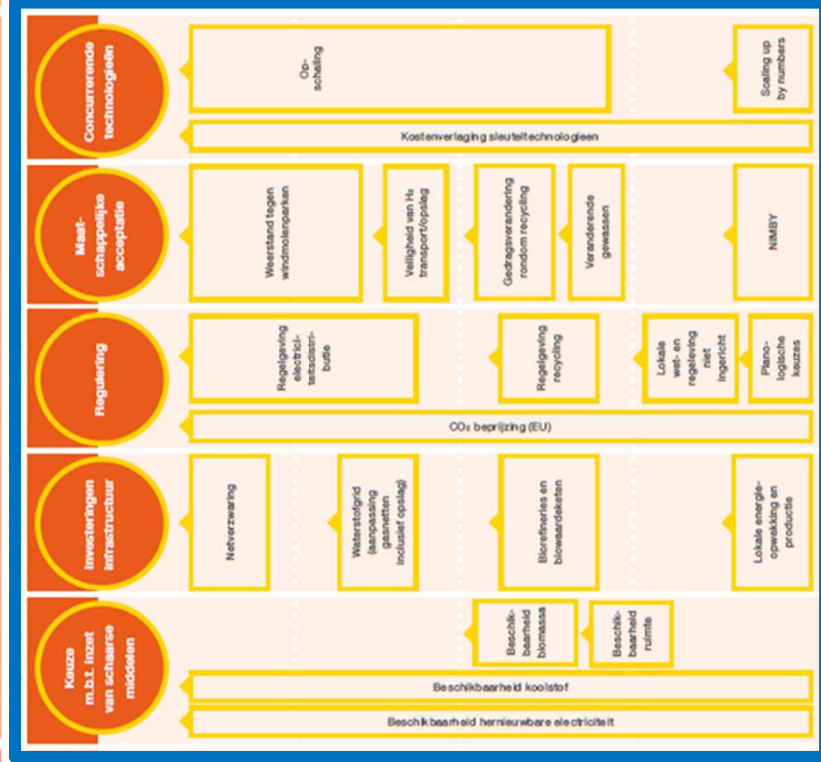
Roadmapmethode ontwikkeld door Topsector Gas



5 GENERIEKE THEMA'S

- Elektrochemische conversie processen en materialen
- Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen
- Systeem ontwerp
- (ex-ante) Technisch-economisch-milieu impact analyse
- Inpassing in de maatschappij

5 PRODUCTSPECIFIEKE ONDERZOEKSAGENDA'S



Concurrerende technologieën

Maatschappelijke acceptatie

Regulering

Investeren in infrastructuur

Kuize m.b.t. inzet van schaarse middelen

Netverzwaring

Waterstof (aanpassing gasnetten industriele opslag)

Biorefineries en biomethaan

Beschikbaarheid biomassa

Beschikbaarheid ruimte

CO2 beprijzing (EU)

Regelgeving recycling

Lokale wet- en regelgeving niet ingericht

Planologische keuzes

NMBY

Scaling up by numbers

Kostenverlaging sleuteltechnologieën

Op-schaling

Wet- en regelgeving rondom recycling

Veranderende gewoonten

Veiligheid van H₂ transportopslag

Wet- en regelgeving windmillingen



Knelpunten: Impliciete en expliciete keuzes bepalen of een scenario werkelijkheid wordt

	Keuze inzet schaarse middelen	Investerings in infrastructuur	Regulering	Maatschappelijke acceptatie	Concurrerende technologieën
All Electric	<ul style="list-style-type: none">Beschikbaarheid hernieuwbare electriciteitBeschikbaarheid koolstof	<ul style="list-style-type: none">Netverzwaring	<ul style="list-style-type: none">CO₂ beprijzing (EU)Regelgeving electriciteitsdistributie	<ul style="list-style-type: none">Weerstand tegen windmolenparken	<ul style="list-style-type: none">Kostenverlaging sleutel technologieënOpschaling
Big on Hydrogen	<ul style="list-style-type: none">Beschikbaarheid hernieuwbare electriciteitBeschikbaarheid koolstof	<ul style="list-style-type: none">Waterstofgrid (aanpassing gasnetten inclusief opslag)	<ul style="list-style-type: none">CO₂ beprijzing (EU)Regelgeving electriciteitsdistributie	<ul style="list-style-type: none">Weerstand tegen windmolenparkenVeiligheid van H₂ transport/opslag	<ul style="list-style-type: none">Kostenverlaging sleutel technologieënOpschaling
Circular & biobased	<ul style="list-style-type: none">Beschikbaarheid biomassaBeschikbaarheid ruimte	<ul style="list-style-type: none">Biorefineries en biowaardeketen	<ul style="list-style-type: none">CO₂ beprijzing (EU)Regelgeving recycling	<ul style="list-style-type: none">Gedragsverandering rondom recyclingVeranderende gewassen	<ul style="list-style-type: none">Kostenverlaging sleutel technologieënOpschaling
Small Scale	<ul style="list-style-type: none">Beschikbaarheid ruimteBeschikbaarheid hernieuwbare electriciteitBeschikbaarheid koolstof	<ul style="list-style-type: none">Lokale energieopwekking en productie	<ul style="list-style-type: none">CO₂ beprijzing (EU)Lokale wet- en regelgeving niet ingerichtPlanologische keuzes	<ul style="list-style-type: none">NIMBY	<ul style="list-style-type: none">“Scaling up by numbers”

Roadmap Conversie & Opslag



Toekomstbeelden
4 systeemscenari's voor conversie & opslag

Systeemscenari's zullen elkaar niet uit, maar geven verschillende oplossingsrichtingen weer. Waarschijnlijk zal in 2050 een mix van oplossingen toegepast worden.



Knelpunten
5 knelpunten op weg naar toekomstbeelden. Deze worden beïnvloed door verschillende factoren



Onderzoeksagenda
met onderzoeken voortkomend uit de knelpunten



ALL ELECTRIC



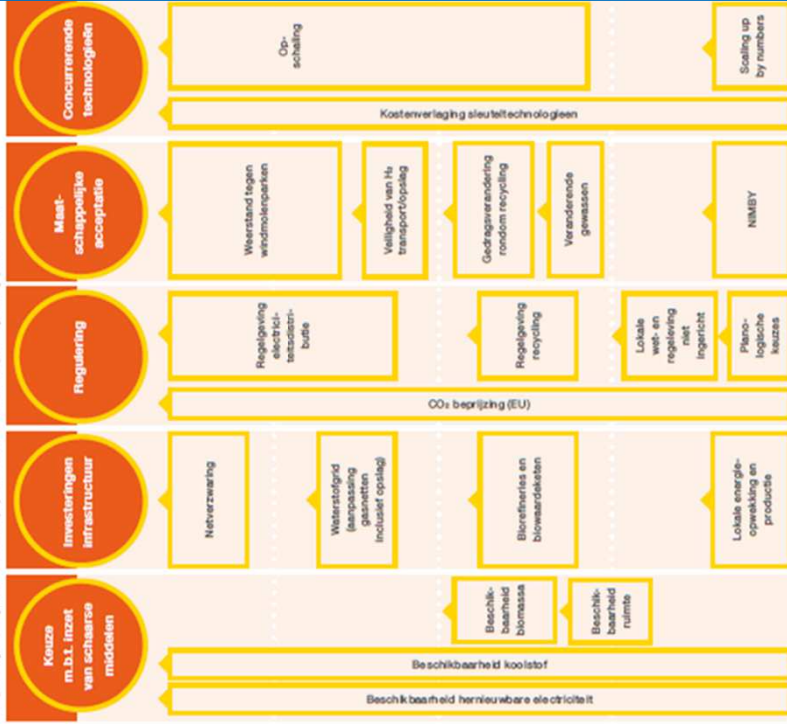
BIG ON HYDROGEN



CIRCULAR & BIO-BASED



SMALL-SCALE



KORTE TERMIJN

MIDDELLANGE TERMIJN

LANGE TERMIJN

5 GENERIEKE THEMA'S

- Elektrochemische conversie processen en materialen
- Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen
- Systeem ontwerp
- (ex-ante) Technisch-economisch-milieu impact analyse
- Inpassing in de maatschappij

5 PRODUCTSPECIFIEKE ONDERZOEKSAGENDA'S

H₂

CH₄

NH₃

C₂H₆

stroom



Groene moleculen in 2050
Opslag en conversie van energie

Een vijftal producten ligt ten grondslag aan de kennisagenda

H₂

CH₄

NH₃

C_xH_yO_z

Staal



Onderzoeksagenda

Specifieke Producten: Waterstof (H₂)



In 2050 wordt waterstof als **basismateriaal** in de chemie ingezet en speelt het een rol als **energiedrager**. Het verbindt daardoor verschillende sectoren en wordt als **commodity** geleverd.

Waterstofproductie is voor een groot deel gebaseerd op **omzetting van duurzame elektriciteit** d.m.v. elektrolyse, waardoor de specifieke CO₂ emissie meer dan 95% lager is dan de huidige emissies. In 2050 wordt **niet CCS** gebruik, wel gedurende de transitie.

- Hoe op grote schaal H₂ leveren en door wie?
 - Hoe de H₂ productie op te schalen en compatibel te maken met intermittency?
 - Hoe effectief inpassen in het ecosysteem, inclusief H₂ transport en (tijdelijke) opslag?
 - Hoe kunnen de (systeem)kosten omlaag gebracht worden?
- Katalysatoren, membranen, e.d. gebaseerd op niet-zeldzame, goedkope grondstoffen voor elektrolyse en innovatieve elektrochemie.
- Stysteemstudies naar productie en levering van H₂ in het ecosysteem



Onderzoeksagenda

Specifieke Producten: Methaan (CH₄)



In 2050 zal het gebruik van methaan niet leiden tot een netto CO₂ uitstoot. Door de opkomst van waterstof als energiedrager ter vervanging van aardgas, wordt het totaal **verbruik van methaan sterk gereduceerd** en wordt **duurzaam methaan** beoogd voor die toepassingen die moeilijk te elektrificeren of op waterstof om te zetten zijn.

Productie van methaan via **kunstmatige en biologische processen** en met specifieke aandacht voor de bron van CO₂, d.w.z. **afvang van puntbronnen** (tijdens uitfasen van fossiel en voor bewerkstelligen negatieve emissie) en **direct uit de lucht** (bijv. sluiten cyclus van zwaar transport op SNG).

- Techno-economische studie naar CH₄ gebruik in 2050
- Verbeteren Sabatier process (H₂ commodity, sectorkoppeling, andere katalysatoren, e.d.)
- Optimaliseren biomassa gasificatie voor CH₄ productie
- Methodes voor koolstofafvang uit puntbronnen en de lucht
- Nieuwe directe productiemethode voor CH₄ uit H₂O, CO₂ and electriciteit / energie



Onderzoeksagenda

Specifieke Producten: Ammoniak (NH₃)



In 2050 wordt ammoniak niet alleen als grondstof voor de **kunstmestproductie** gebruikt, maar speelt ook een rol als **energiedrager** bij grootschalige import van koolstofvrije brandstof.

Ammoniak productie is voor een groot deel gebaseerd op omzetting van duurzame elektriciteit d.m.v. **elektrolyse** in combinatie met een geoptimaliseerd **Haber Bosch proces**, eventueel in integratie met de H₂ productie

Alternatief productie van NH₃ door **directe activatie van N₂ en H₂O**, in combinatie met innovatieve electro-chemische **scheiding van N₂** uit lucht.

- Verbetering van efficiëntie en capaciteit van productie en gebruik van ammoniak.
- Nieuwe electrochemische conversie technologie voor directe productie van NH₃
- Reductie van het gebruik en volledige recycling van zeldzame materialen (bv. in brandstofcellen, elektrolyse)
- Systeemintegratie en -optimalisatie: opslag-technologieën, transitiepaden (kosten, lock-in), regulering (eigendom, prijsvorming)
- Technische en bedrijfseconomische limiteringen aan intermitterende inzet van P2X technologie



Onderzoeksagenda

Specifieke Producten: Koolwaterstof ($C_xH_yO_z$)



Grootschalig chemicaliën en brandstoffen worden gemaakt uit **CO₂ en H₂O** met gebruik van **elektriciteit** in plaats van olie en gas. Processen zijn zowel **centraal als decentraal** en waar mogelijk **geïntegreerd**.

Verduurzaming productie door:

- Gebruik van **H₂ als commodity** in reactie met CO₂
- Innovatieve processen die **direct CO₂ reduceren**

Bronnen van CO₂ worden **circulaire processen**, d.w.z. direct air capture (DAC) en biomassa.

- Opschalen van elektrochemische processen om C_xH_yO_z bulk chemicaliën te maken
 - Integratie met pre- en post-treatment processen
 - Proces intensificatie: kleinere, schonere, veiligere en efficiëntere processen
 - Integratie met grondstoffenvoorbereiding (bijv. integratie van CO₂-capture en H₂ productie)
- Ontwerp van reactor, proces en systeem, inclusief validatie en demonstratie.
- Systeembenadering en integratie: omgaan met onderbrekingen (energiebuffering, kleine / grote reactoren, e.d.)





Specifieke Producten: Staal

IJzer en staal zijn verantwoordelijk voor circa 6 procent van de totale CO₂-uitstoot (ongeveer 25% van de totale emissie door de industrie). Het **grootschalig recycleren** heeft geleid tot een significant emissie reductie. **Nieuwe technologie** wordt nu geëvalueerd om verdere **energiebesparingen** te verkrijgen (o.a. het Hlsarna proces).

Om te komen tot een netto CO₂ reductie van 95 % zonder CCS zijn er de volgende routes:

1. Gebruik van biomassa of afval, evt gecombineerd met het omzetten van CO naar producten
 2. Grootschalig gebruik van CO₂ als grondstof voor transportbrandstoffen
 3. Gebruik van waterstof (en CO) voor ijzer reductie
1. Rechtstreekse reductie van ijzererts met elektriciteit

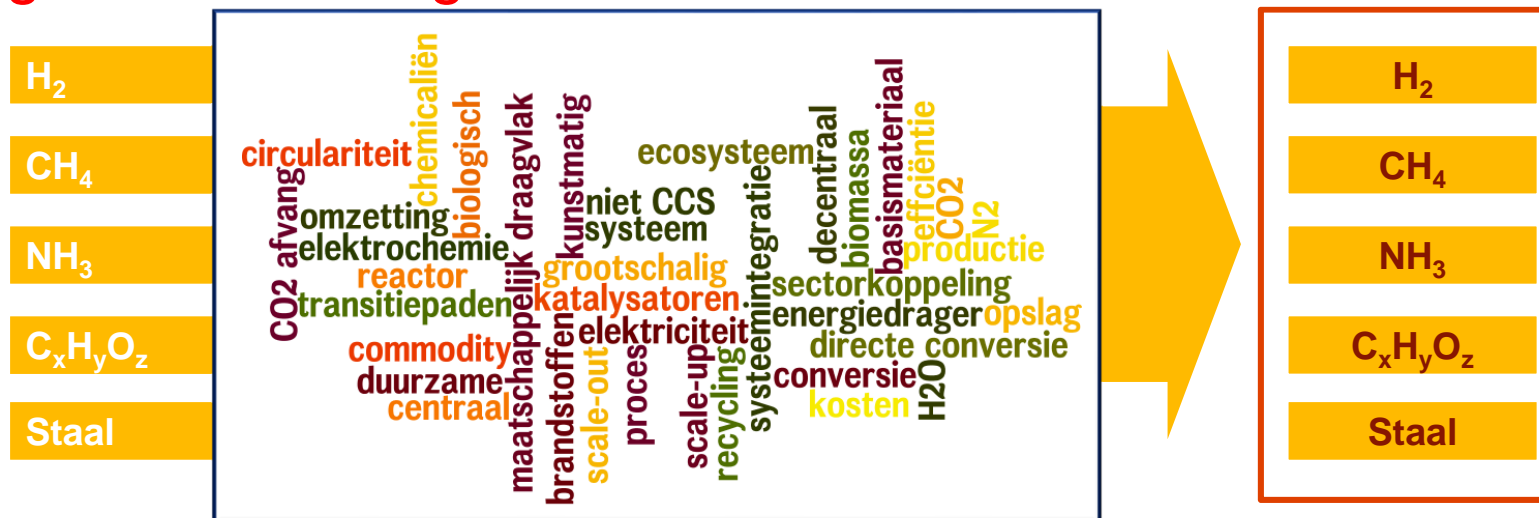
- CCS integratie in bestaande processen
- CO/CO₂/H₂ (hoogoven gas) omzetten naar nuttige producten
- CO₂ terug vormen naar CO via reversed water gas shift (circulair)
- System analyse (LCA en technische economische analyse)
- Reactor design en demonstratie (waterstof als reductant)



Analyse van vijf bulk grondstoffen geeft inzicht in generieke vraagstukken

specifiek onderzoek

Groene moleculen in 2050
Opslag en conversie van energie



generiek onderzoek

KIA Groene Moleculen



De knelpunten en productanalyse geven inzicht in benodigd onderzoek

1. Elektrochemische conversie processen en materialen

Fundamentele kennis met betrekking tot materiaal- en structureigenschappen relevant voor het ontwikkelen van innovatieve electrode en membraan materialen.

2. Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen

Fundamentele kennis rond massa en energietransport relevant voor geïntensifieerde elektrochemische reactoren

3. Systeem ontwerp

Generieke methodologie voor de integratie van elektrochemische processen met zowel de materiaal- en energieaanvoer als de opwerkingstechnologie en afvoer van producten

4. (Ex-ante) technisch-economisch-milieu impact analyse

Geavanceerde evaluatie en sturingsmodellen die ex-ante gebruikt kunnen worden om innovatieve elektrochemische processen te evalueren zowel op economische als duurzaamheidscriteria. De modellen kunnen gebruikt worden in een zogenaamde “orchestrating innovation” context.

5. Inpassing in de maatschappij

Onderzoek naar niet technologische innovatie, juridische en economisch context en communicatie



De Kennis- en Innovatieagenda bevat de relevante onderzoeksonderwerpen voor de komende 4-8 jaar

	Kort	Middellang	Lang
Elektrochemische conversie processen en materialen	<ul style="list-style-type: none">• Ontwikkelen van massa en energie transfer modellen toepasbaar voor onder andere multi-fase gestructureerde elektrochemische materialen	<ul style="list-style-type: none">• Ontwikkeling van stabiele en efficiënte electrodes en membranen• Ontwikkelen en demonstreren van innovatieve elektrochemische processen	<ul style="list-style-type: none">• Ontwerp en selectie van toepasbare elektrochemische materialen mede gebaseerd op voorspellende simulaties• Ontwikkelen van analyse methodieken voor elektrochemische processen
Geïntensifieerde reactor concepten en transport fenomenen	<ul style="list-style-type: none">• Ontwikkelen van procesintegratie concepten (i.e. met electrolyzers, andere H2 bronnen/buffers, CCS)• Ontwikkelen van procesintensificatie concepten	<ul style="list-style-type: none">• Demonstratie geïntensifieerde reactor concepten inclusief opwerking• Ontwikkelen van (elektrochemische) reactoren voor extreme condities (temperatuur/druk etc.)• Ontwikkelen van (flexibele) procesintensificatie concepten	<ul style="list-style-type: none">• Ontwikkelen van (elektrochemische) reactoren voor extreme condities (temperatuur/druk/plasma etc.)• Ontwikkelen van proces integratie concepten geïntegreerd met direct air capture• Ontwikkelen van proces control systemen voor productie onder intermitterende condities
Systeem ontwerp	<ul style="list-style-type: none">• Systeem analyse inclusief warmte en massa transport analyse	<ul style="list-style-type: none">• Ontwikkelen sector koppeling filosofie (inclusief decentrale flexibele productie)	<ul style="list-style-type: none">• Totale systeem ontwerp Nederland integratie power-to-x met circulaire economie
(ex-ante) Technisch-economisch-milieu impact analyse	<ul style="list-style-type: none">• Model constructie voor technisch – economisch analyse	<ul style="list-style-type: none">• Life cycle analysis tool development	<ul style="list-style-type: none">• Systeem integratie tool ontwikkeling
Inpassing in de maatschappij	<ul style="list-style-type: none">• Identificatie impact regulatoire voorwaarden	<ul style="list-style-type: none">• Economische stimulansen analyse	<ul style="list-style-type: none">• Onderzoek naar middelen om relevant maatschappelijk draagvlak te creëren

Roadmap Conversie & Opslag



Toekomstbeelden
4 systeemscenaria's voor conversie & opslag

Systeemscenaria's zullen elkaar niet uit, maar geven verschillende oplossingsrichtingen weer. Waarschijnlijk zal in 2050 een mix van oplossingen toegepast worden.



ALL ELECTRIC



BIG ON HYDROGEN



CIRCULAR & BIO-BASED



SMALL-SCALE



Knelpunten
5 knelpunten op weg naar toekomstbeelden. Deze worden beïnvloed door verschillende factoren

Roadmapprocedure ontwikkeld door Topstra Guide

Korte termijn

Middelrange termijn

Lange termijn

Concurrerende technologieën

Maatschappelijke acceptatie

Regulering

Investeringen infrastructuur

Kozenze m.b.t. inzet van schaarse middelen

Netverzwaring

Waterstofged (aanpassing gasnetten industrieel opslag)

Beschikbaarheid biomassa

Beschikbaarheid ruimte

Beschikbaarheid hernieuwbare elektriciteit

Beschikbaarheid koolstof

CO₂ beprijzing (EU)

Regelgeving recycling

Localisatie wet- en regelgeving niet ingericht

Planologische keuzes

Verandering rondom recycling

Veranderende gewassen

NIMBY

Scaling up by numbers

Op-schaling

Kostenverlaging sleuteltechnologieën

Geïntegreerde reactor concepten en transport fenomenen

Systeem ontwerp

(ex-ante) Technisch-economisch-milieu impact analyse

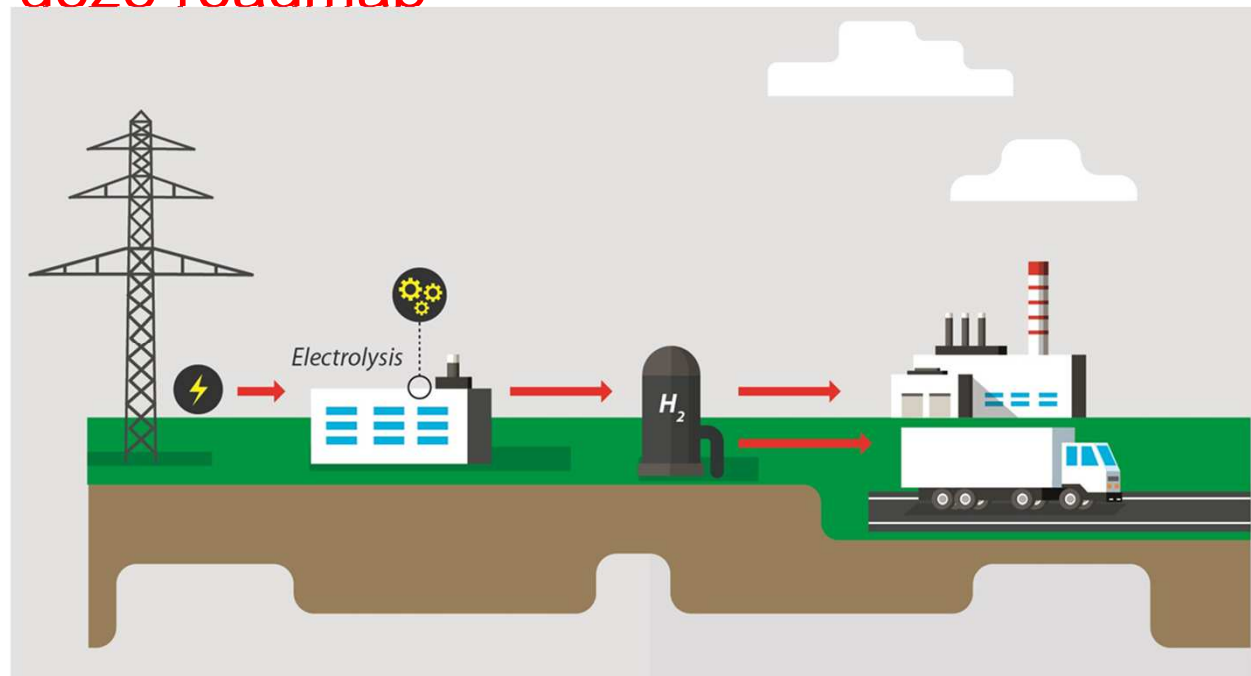
Inpassing in de maatschappij

5 GENERIEKE THEMA'S

5 PRODUCTSPECIFIEKE ONDERZOEKSAGENDA'S



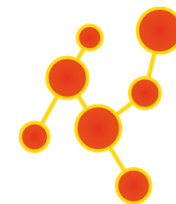
We praten graag met u verder om invulling te geven aan deze roadmap



Heel hartelijk dank voor uw aandacht!

Neem gerust contact op!

Monique Rijkers - Monique.Rijkers@TNO.nl



TOPSECTOR ENERGIE

Empowering the new economy

Roadmap warmtesystemen

ECN-TNO: Marijke Menkveld, Sjaak van Loo,
Sigrid Bollwerk, Robert de Boer, Martijn Clarijs

TU Delft: Anke Dahlmann

Hanzehogeschool Groningen: Klaas Jan
Noorman, Kathelijne Bouw , Wim van Gemert

5 juli 2018



Opdracht

- Hoe realiseren en beheren we in Nederland op korte en lange termijn, voor verschillende gebruiksgroepen en schaalniveaus, geïntegreerde **duurzame warmtesystemen** die effectief en efficiënt **alle relevante sectoren** en transitiepaden ondersteunen en slim gebruik maken van **alle beschikbare bronnen** (restwarme industrie, geothermie enz.) en **componenten voor transport, opslag, opwaardering en conversie**?
- Wat zijn kennisleemtes en innovatiebehoefte, zowel op technisch als niet technisch vlak (**Kennis- en innovatieagenda**)?
- De roadmap zal de basis gaan vormen voor een Meerjarig Missie gedreven Innovatie Programma (**MMIP**).

Visie op de opdracht

Warmtetransitie van aardgas naar duurzame warmte is een urgente en complexe opgave en vraagt een **open innovatie** proces met betrokkenheid van alle stakeholders.

Met systeemintegratie bedoelen we de integratie over:

- **Tijd:** Fases van transitie en verschillende typen beslissingen op verschillende momenten in het transitieproces;
- **Sectoren:** verbinding tussen de gebouwde omgeving, industrie en glastuinbouw ten behoeve van optimalisatie en efficiency van bronnen en systemen;
- **Energiedragers:** Integraal energiesysteem met gas, warmte en elektriciteit;
- **Schaalniveaus:** Integratie in de ruimte, op individueel, wijk en regionaal niveau en tussen collectieve en individuele systemen.

Aanpak

- Schetsen toekomstbeelden duurzame warmte
- Issues en knelpunten vanuit systeemintegratieperspectief.
- Welke kennis/informatie/innovatie is nodig om het knelpunt op te lossen?

Getoetst met stakeholders in 2 workshops in april en juni.



4 Toekomstbeelden

1 Elektrificatie



3 Groen gas en waterstof



2 Duurzame warmte



4 Combinatie gas en elektriciteit



Elektrificatie



In dit toekomst beeld wordt de warmtevraag met duurzaam opgewekte elektriciteit ingevuld.

Voor de gebouwde omgeving en de glastuinbouw betreft dat de all-electric route met elektrische warmtepompen.

In de industrie worden in dit eindbeeld voor de warmtevraag in het temperatuursegment tot 200 graden warmtepompen ingezet (waste heat recovery). Voor hogere temperaturen gaat het om een mix van: power-to-heat, power-to-hydrogen (elektrolyse) en power-to-chemicals.



Duurzame warmte



In dit toekomstbeeld wordt de warmtevraag ingevuld met duurzame warmtebronnen, zoals geothermie of warmte uit biomassa, aquathermie, zonthermie of restwarmte. Daarbij is een grote rol weggelegd voor warmteopslag.

De gebouwde omgeving wordt aangesloten op warmtenetten gevoed met duurzame bronnen.

In de glastuinbouw wordt geothermie toegepast voor grote bedrijven of clusters of zij hebben ook een aansluiting op een warmtenet.

Voor de industrie betekent dit toekomstbeeld de inzet van geothermie voor de warmtevraag tot 200 graden en de benutting van restwarmte van andere bedrijven en de inzet van biomassa voor hoge temperatuur warmte.

Groen gas en waterstof



In dit toekomstbeeld wordt de warmtevraag ingevuld met gasvormige energiedragers: groen gas of waterstof.

Dit betekent dat de gasinfrastructuur in stand blijft.

Groen gas wordt geproduceerd via vergisting en vergassing van biomassa(rest)stromen. Dat kan vergisting zijn van mest, zuiveringsslib en gras en (op termijn van 2030) ook speciaal voor dit doel geteelde zeewier.

Uit zon en wind geproduceerde duurzame elektriciteit wordt via elektrolyse omgezet in groene waterstof. Op korte termijn in een transitiefase kan ook uit aardgas met CCS (CO₂ afvang en opslag) blauwe waterstof worden geproduceerd.

Ook import groen gas of waterstof is mogelijk.

Combinatie gas en elektriciteit



In dit toekomst beeld wordt nadrukkelijk gekozen voor een hybride warmtesysteem bij eindgebruikers, die elektrificatie combineert met de inzet van duurzame gasvormige energiedragers groen gas en waterstof in het eindbeeld.

In een transitiefase kan tijdelijk nog aardgas worden ingezet.

Voor de gebouwde omgeving en de glastuinbouw betekent dat een keuze voor hybride warmtepompen, een elektrische warmtepomp met een gasgestookte ketel voor pieklast.

In de industrie betekent dit een combinatie van groen gas met elektrificatie of - in de transitiefase - het gebruik van aardgas in combinatie met CCS/CCU.

Issues en knelpunten Elektrificatie

In GO/glastuinbouw
warmtepompen en lage
temperatuur systemen

Heeft alleen zin als
elektriciteit duurzaam
is opgewekt

In industrie geheel
nieuwe processen

Vraagt forse
uitbreiding capaciteit
elektriciteitsnetwerken

Vraagt flexibiliteit
warmtevraag via
vraagsturing/opslag

Hoe in warmtevraag
voorzien op windstille
winterdagen?



Issues en knelpunten Duurzame warmte

Wie gaan er investeren
in warmtenetten,
bronnen en opslag?

Is er voldoende
biomassa voor HT
warmtevraag industrie?



Ontwerp 4^e generatie
warmtenetten op
lage temperatuur

Warmteopslag en
innovatieve
regeltechniek vereist

Hoe matchen aanbod
meerdere bronnen met
warmtevraag?

Issues en knelpunten Groen gas en

waterstof

Welke aanpassing installaties eindgebruiker andere gaskwaliteit?

Hoeveel biomassa beschikbaar voor groen gas?

Welke aanpassing bestaande aardgasnet vraagt groen gas/H₂?

Hoeveel waterstof uit overschot duurzame elektriciteit?

Is er draagvlak voor waterstof uit aardgas met CCS?

Wat kost waterstof uit aardgas met CCS?



Issues en knelpunten Combinatie gas en elektriciteit

Is vraagsturing hybride installaties mogelijk?

Hoeveel biomassa beschikbaar voor groen gas?

Wat is optimale mix aardgas versus elektriciteit?



Als onvoldoende groen gas leidt hybride dan tot een lock-in?

Wordt mix bepaald door capaciteit net, marktprijs of aanbod duurzaam?



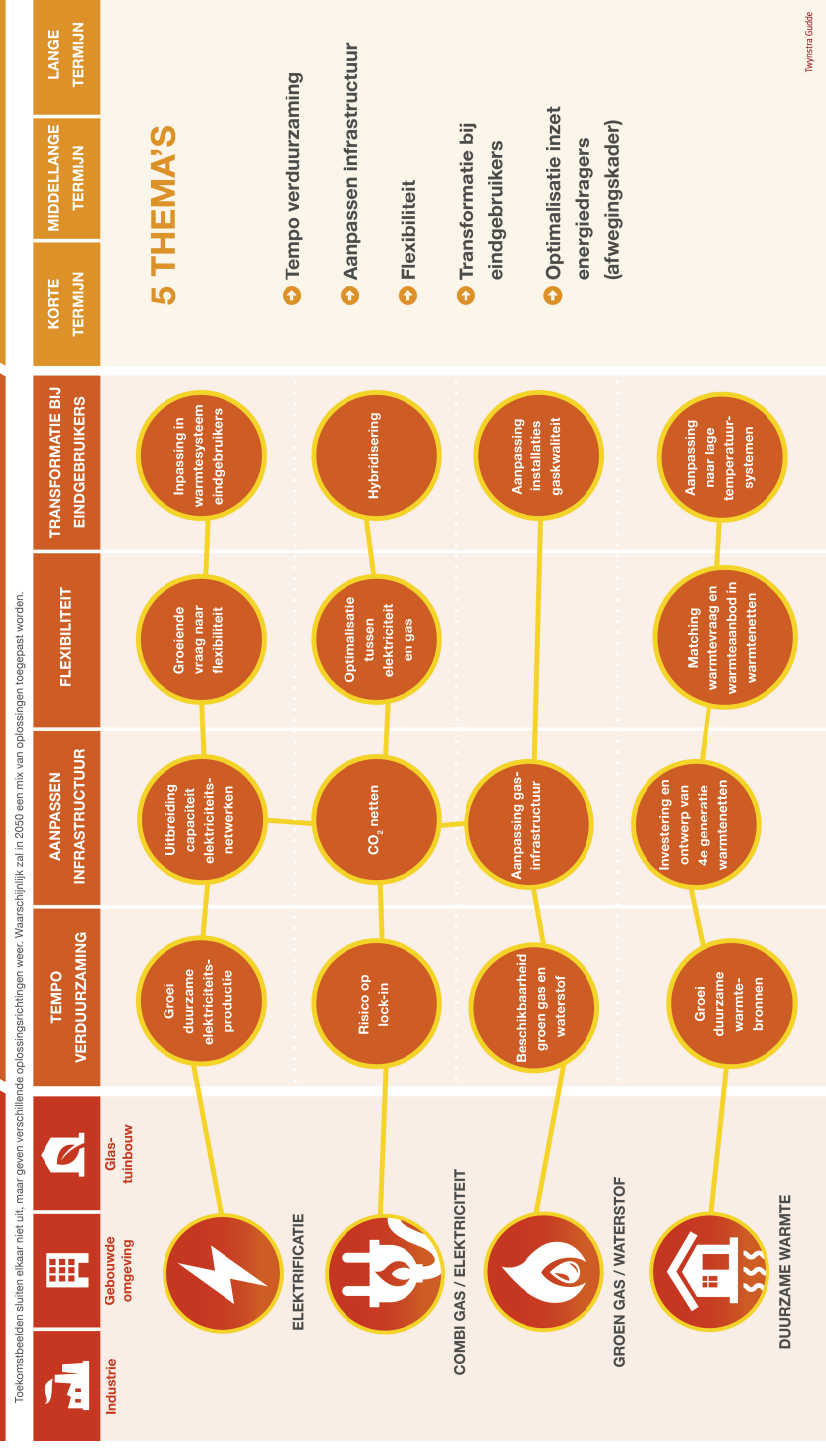
Roadmap Warmtesystemen



Toekomstbeelden
4 beelden voor warmtesysteem

Knelpunten
op weg naar toekomstbeelden, gestructureerd naar thema's

Onderzoekagenda
met onderzoeksvragen voortkomend uit de knelpunten



5 THEMA'S

- + Tempo verduurzaming
- + Aanpassen infrastructuur
- + Flexibiliteit
- + Transitie bij eindgebruikers
- + Optimalisatie inzet energiedragers (afwegingskader)

5 Thema's Kennisagenda Systeemintegratie warmte

Naast de thema's die volgen uit de inventarisatie van issues in de toekomstbeelden, is er de vraag hoe de afweging tussen oplossingsrichtingen het beste kan worden gemaakt. Daarmee komen we tot 5 thema's:

1. Tempo verduurzaming
2. Optimale inzet energiedragers (afwegingskader)
3. Aanpassing infrastructuur
4. Flexibiliteit
5. Transformatie bij eindgebruikers

Thema 1 Tempo verduurzaming

Is het tempo van verduurzaming van de warmtevoorziening in balans met het tempo van verduurzaming van energiedragers?

Te adresseren

- ▶ Hoeveel duurzame elektriciteit, duurzame warmte en groen gas/H₂ is er beschikbaar voor de warmtevoorziening in samenhang met andere energiefuncties in 2030 en 2050?
- ▶ Welke factoren zijn bepalend voor de balans tussen het tempo van verduurzaming van de warmtevraag en het tempo van verduurzaming van energiedragers en hoe kunnen deze worden beïnvloed? Bijvoorbeeld:
 - ▶ Hoeveel import van duurzame energiedragers is mogelijk?
 - ▶ Hoeveel kan de warmtevraag worden gereduceerd?
 - ▶ Wat is de omvang en timing van elektrificatie van de warmtevraag?

Te ontwikkelen

- ▶ **Kwantitatieve visie** op tempo verduurzaming op basis van analyse bestaande scenario's, routekaarten, doelstellingen en studies vraagsectoren. Afhankelijkheden in kaart brengen.

Tijdlijn



Stakeholders

- ▶ Overheid
- ▶ TKI's, marktpartijen

Thema 2 Optimale inzet energiedragers



Wat bepaalt de optimale inzet van energiedragers vanuit maatschappelijk perspectief?

Te adresseren

- ▶ Wat is een juiste manier om tot een merit order te komen van de inzet van energiedragers naar functie en sector, waarbij betaalbaarheid, duurzaamheid, uitvoerbaarheid en betrouwbaarheid de criteria zijn?
- ▶ Wat zijn de mogelijkheden ook op lange termijn van energie-uitwisseling tussen sectoren, bijv. warmte van de industrie naar de gebouwde omgeving?
- ▶ Hoe kan extra duurzame warmtelevering worden afwogen tegen reductie van de warmtevraag?
- ▶ Welke input levert dit aan een afwegingskader voor lokale overheden of eindgebruikers? Worden keuzes in de verduurzaming van de warmtevoorziening collectief of individueel gemaakt?

Te ontwikkelen

- ▶ **Onderzoek vergelijking verschillende toepassingen (functie, sector) energiedragers** zoals biomassa, duurzame elektriciteit en warmte uit geothermie, restwarmte, etc. naar CO2-reductie, euro's per ton vermeden CO2 voor de BV Nederland? Hoe is de businesscase voor de investeerder en de eindgebruiker? Leidt die business case door marktordening, regulering en belastingen tot andere keuzes dan vanuit maatschappelijk perspectief wenselijk zou zijn?
- ▶ **Onderzoek naar collectieve/individuele keuzes infrastructuur in gebouwde omgeving.** Is het mogelijk woningeigenaren een vrije keuze te geven? Wegen de extra kosten van aanpassingen van infrastructuur die in dat geval worden gemaakt op tegen de waarde van keuzevrijheid.
- ▶ **Input aan afwegingskaders** voor keuzes op lokaal niveau zoals warmteplannen aardgasvrije wijken en regionale energiestrategieën.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Overheid
- ▶ Gemeenten, provincies
- ▶ Netwerkbedrijven

Thema 3 Aanpassing net-infrastructuur

Welke consequenties zijn verbonden aan de benodigde aanpassing van de (net-) infrastructuur voor een duurzame warmtevoorziening?

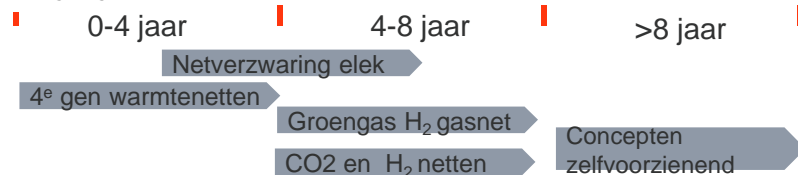
Te adresseren

- ▶ Hoeveel moeten elektriciteitsnetten verzaamd worden bij elektrificatie van de warmtevoorziening, wat zijn de kosten daarvan en hoe worden die kosten verdeeld? Wat is de ruimtelijke impact van de verzaming van elektriciteitsnetten?
- ▶ Hoe komen we tot 4e generatie warmtenetten? Wie investeert hierin? en hoe gaan we die financieren? Vraagt dit een aangepaste marktordening?
- ▶ Wat is er nodig om het bestaande aardgasnet geschikt te maken voor bijmenging van substantiële hoeveelheden biogas of waterstof? Wat zijn de kosten hiervan? Wie investeert?
- ▶ Welke uitbreiding van CO₂- en H₂- infrastructuur (transport en opslag) is nodig en wat zijn de kosten voor de aanleg ervan? Hoe zit het met veiligheidsissues, publieke acceptatie?
- ▶ Wat is de rol voor lokale duurzame warmteoplossingen zonder grote netaanpassingen

Te ontwikkelen

- ▶ **Onderzoek naar kosten netverzaming elektriciteit** bij elektrificatie gebouwde omgeving, industrie en landbouw en hoe die kosten verdeeld worden. De afhankelijkheden tussen systeemkeuzes en piekvraag moeten in kaart worden gebracht, zodat elektrificatie op middenlange termijn (4-8 jaar)niet tot nodeloos hoge kosten zal leiden.
- ▶ **Ontwikkelen ontwerp tool en pilot 4e generatie warmtenet** gebouwde omgeving.
- ▶ **Versnellen onderzoek** naar de mogelijkheden voor **bijmenging van groen gas en waterstof** in het aardgasnet op lange termijn (>8 jaar)
- ▶ **Onderzoek** naar hoeveel uitbreiding van CO₂- en H₂-netten en -opslag nodig is op welke termijn in industrie en glastuinbouw. Welke marktpartijen willen dat realiseren en onder welke randvoorwaarden is dat mogelijk?
- ▶ **Ontwikkeling van concepten** om woningen, gebouwen, en kassen qua energie zelfvoorzienend te maken.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Netwerkbedrijven
- ▶ Huidige warmteleveranciers
- ▶ Nieuwe spelers op de warmtemarkt
- ▶ Overheid
- ▶ Industrie, glastuinbouw
- ▶ Bouw/installatiesector

Thema 4 Flexibiliteit

Hoe matchen we vraag en aanbod in een duurzaam warmtesysteem?

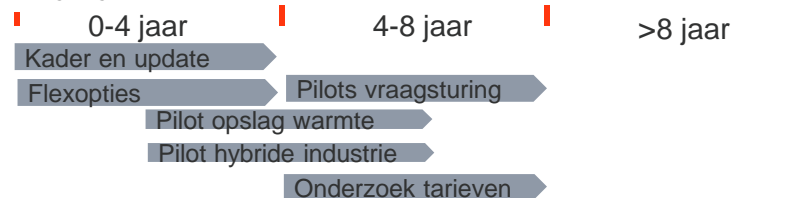
Te adresseren

- ▶ **ONTWERP EN INRICHTING:** Gegeven de verwachting dat de vraag naar flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt toeneemt, hoe kunnen we met het juiste ontwerp van warmtesystemen daarop inspelen?
- ▶ **BEHEER:** Hoe kun je de flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt vergroten door vraagsturing binnen het warmtesysteem, de aansturing van warmtebronnen, en het management en inzet van warmteopslag? Welke rol speelt de conversie naar andere energiedragers of producten in dit vraagstuk?
- ▶ Welke rol kan vraagsturing, flexibel vermogen en warmteopslag spelen in het beheer van warmtenetten gevoed met duurzame bronnen? Hoe kunnen we deze aspecten optimaliseren? Hoe ontwerp je een efficiënt smart (heat) grid, waarop gemakkelijk nieuwe bronnen en eindverbruikers kunnen worden aangesloten?
- ▶ Welke veranderingen zijn er nodig in tariefstructuur en marktordening om flexibiliteit van vraag en aanbod te vergroten (zowel elektriciteits- als warmtemarkt)?

Te ontwikkelen

- ▶ **Verbeteren conceptueel kader** hoe de vraag naar flexibiliteit in het energiesysteem en de invulling daarvan met verschillende flexopties analyseren (tijdschalen, van en naar commodity's, ruimtelijk, stakeholders).
- ▶ **Update inschatting** verwachte **flexibiliteitsvraag** op elektriciteitsmarkt richting 2030 en daarna.
- ▶ **Onderzoek naar vergelijking flexopties elektriciteitsmarkt:** interconnectie, hybridisering, flex vermogen, vraagsturing, warmteopslag, elektriciteitsopslag, power to products, etc. Gevolgd door **pilots vraagsturing en opslag**.
- ▶ **Idem warmtemarkt.**
- ▶ **Pilot seizoenopslag warmte** in de gebouwde omgeving met bijvoorbeeld een **waterbassin** voor een warmtenet met aandacht ruimtelijke inpassing
- ▶ **Pilot aansturing hybride installaties industrie als flexoptie.**
- ▶ **Onderzoek naar aanpassing wetgeving en tariefstructuren** voor vraagsturing installaties bij eindverbruikers (zowel elektriciteits- als warmtemarkt).

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Netwerkbedrijven
- ▶ Energieleveranciers
- ▶ Warmteleveranciers
- ▶ Industrie
- ▶ Overheid
- ▶ Bewoners

Thema 5 Transformatie eindgebruikers

Hoe past een duurzame warmtevoorziening in het warmtesysteem van eindgebruikers?
Hoe krijgen we eindgebruikers mee in de warmtetransitie?

Te adresseren

- ▶ Wat zijn de mogelijkheden in de industrie voor energy efficiency, waste heat recovery, power-to-heat, power-to-H₂ (elektrolyse), power-to-chemicals en van elektrische scheidingsprocessen? Welke randvoorwaarden zijn daarbij voor de industrie van belang?
- ▶ In de gebouwde omgeving is kennis nodig van de toepassing van lage temperatuur warmtesystemen en de noodzaak tot isolatie. Hoeveel isolatie is nodig voor welk temperatuurniveau? Wat kost dat en wie gaat dat betalen? Hoe krijgen we woningeigenaren mee?
- ▶ Voor de glastuinbouw hebben kennisvragen meer betrekking op hoe de piekvraag moet worden ingevuld en hoe warmtevraagreductie kan bijdragen in verlagen van die piekvraag.

Te ontwikkelen

- ▶ **Verzamelen ervaringen** en kennis delen rond **power tot heat** en **industriële warmtepompen** in de **industrie**.
- ▶ **Pilot** aansturing **hybride** installatie **industrie**, vergoeding regelbare vraag kan rentabiliteit voor power to heat verbeteren.
- ▶ **Onderzoek** naar **noodzaak isolatie bij lage temperatuursystemen** gebouwde omgeving
- ▶ **Ontwikkeling concepten goedkope aanpassing radiatorsystemen naar lage temperatuur in gebouwde omgeving**.
- ▶ **Pilot glastuinbouw piekvraag** reduceren en duurzaam invullen.

Tijdslijn



Stakeholders

- ▶ Netwerkbedrijven
- ▶ Energieleveranciers
- ▶ Bouw/installatiesector
- ▶ Industrie
- ▶ Glastuinbouw
- ▶ Bewoners
- ▶ Overheid