

# Technologie radar

Welke disruptieve technologieën gaan impact hebben op ons energiesysteem?

TNO 2025 R10049 – 2 mei 2025  
**Technologie radar**

Welke disruptieve technologieën gaan impact hebben op ons energiesysteem?

Auteurs	Aart Kooiman Marianne van Tuyl
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Bijlagen	TNO Public
Aantal pagina's	85 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	4

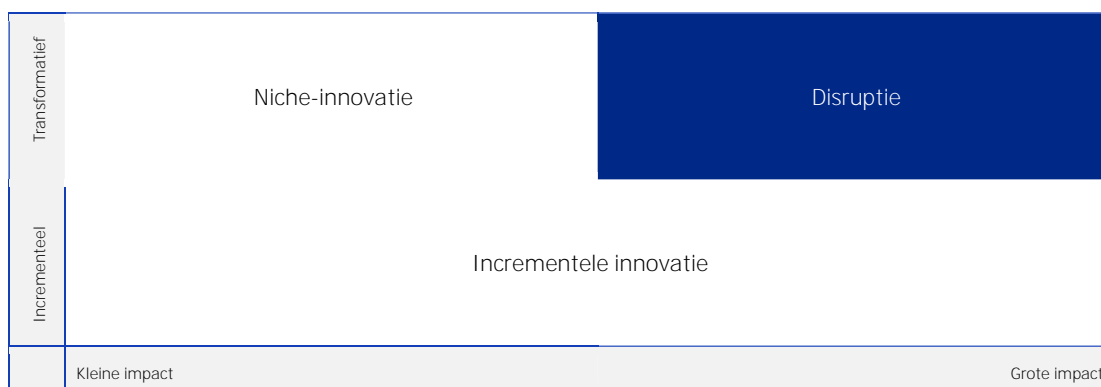
**Alle rechten voorbehouden**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

# Management summary

De Technologie Radar is ontwikkeld om disruptieve technologieën in het energiesysteem te identificeren. Disrupties onderscheiden zich van incrementele innovaties door hun transformatieve karakter. Ze veranderen de status quo, zowel van de huidige stand van technologie als het voorziene ontwikkelpad (Figuur S.1.1). Disrupties hebben een grote impact, bijvoorbeeld door een geheel ander energiesysteem te creëren, toepassingen op een nieuwe manier van energie te voorzien, de kosten van het systeem te veranderen, of andere systeemvoordelen te bieden. In deze context worden disrupties gedefinieerd als innovaties die op lange termijn (10-30 jaar) een transformatieve en substantiële impact op het energiesysteem hebben. De beoordeling van disrupties is grotendeels gebaseerd op de vraag: 'Als de technologie een succes wordt, hoe disruptief is deze dan?'



**Figuur S.1.1:** Schematische weergave van onderscheid tussen disrupties en andere innovaties

## Onderzoekslimitering

Doel van het onderzoek is geweest om een eerste inzicht te bieden in disrupties in het energiesysteem, om als zodanig richting te kunnen geven aan vervolgonderzoek. Dat indachtig is het onderzoek uitgevoerd met een beperkt budget en een brede scope, namelijk alle innovaties in het energiesysteem. Hierdoor moesten keuzes worden gemaakt in de focus van het onderzoek. Enerzijds is geprobeerd zo veel mogelijk aan te sluiten bij de kans op disrupties, anderzijds bij de onderwerpen die de interesse hebben van de opdrachtgever (Topsector Energie Systeemintegratie). Binnen het beschikbare budget was het mogelijk een partiële literatuurstudie te doen en voor ieder van de vijf geselecteerde onderwerpen twee experts te spreken. Een bredere set aan literatuur en experts zou de validiteit, robuustheid en het draagvlak voor de resultaten ten goede komen. Voor een volgende technologieradar raden wij aan om breder te inventariseren bij kennisinstellingen, universiteiten, start-ups, scale-ups en investeerders. Dit kan de lijst met disrupties completer maken en inzicht geven in de sterke punten van het Nederlandse innovatielandschap, om zo prioriteiten te kunnen stellen.

## Onderzoeksmethodiek

Het onderzoek is opgezet aan de hand van drie opeenvolgende analyses.

- **TRANSFORM 2050:** Één van de voorwaarden voor een disruptie is het maken van veel impact op het energiesysteem. De eerste analyse is er daarom op gericht onderwerpen te identificeren die een grote impact op het energiesysteem hebben. ADAPT en TRANSFORM zijn de toekomstbeelden van TNO om toekomstige energiesysteem te onderzoeken. Binnen deze studie is een analyse gemaakt van het eindbeeld in TRANSFORM, het scenario dat het meest leunt op een fundamentele systeemverandering.
- **Analyse ETP (Energy Technology Perspectives) Clean Energy Technology Guide:** Deze IEA-database bevat 534 innovaties. Voor dit rapport zijn 180 innovaties geselecteerd op basis van voorgaande analyse en prioriteiten van de Topsector Energie Systeemintegratie. Deze zijn geanalyseerd op hun werkingsmechanisme en invloed op het energiesysteem.
- **Workshop met experts:** Voor de onderwerpen elektriciteit, industrie, mobiliteit, gebouwde omgeving en warmte is een workshop georganiseerd met experts van TNO en de Topsector Energie. Innovaties uit voorgaande analyse zijn gerangschikt op hun transformativiteit en impact op het energiesysteem om zo disrupties te identificeren. Ook hebben experts aanvullende innovaties uit de praktijk ingebracht.

## Impactvolle onderwerpen binnen de energietransitie

In Figuur S.1.2 is het resultaat van de analyse van het toekomstbeeld TRANSFORM weergegeven. De volgende onderwerpen komen als belangrijke bouwblokken van het toekomstige systeem naar voren:

- **Elektriciteit.** Elektriciteit speelt een cruciale rol in het toekomstige energiesysteem. Dit omvat de opwekking van elektriciteit door wind- en zonne-energie, kernenergie en de bijbehorende infrastructuur. De transitie naar een elektriciteitsgedreven systeem vereist aanzienlijke investeringen in netwerken en opslagcapaciteit om de variabiliteit van hernieuwbare energiebronnen op te vangen.
- **Brandstoffen.** Naast elektriciteit zijn enkele andere brandstoffen van belang, zoals groene waterstof en synthetische luchtvaartbrandstoffen. Groene waterstof kan dienen als een schone energiedrager en opslagmedium, terwijl synthetische brandstoffen een duurzame oplossing bieden voor sectoren waar elektrificatie moeilijk is, zoals de luchtvaart.
- **Mobiliteit en Gebouwde Omgeving.** Deze sectoren zijn eveneens belangrijk voor het energiesysteem. Mobiliteit omvat de transitie naar elektrische voertuigen en slimme laadoplossingen, terwijl de gebouwde omgeving zich richt op energie-efficiëntie en duurzame verwarmings- en koelingssystemen. Deze sectoren spelen ze een sleutelrol in de energietransitie, maar komen ook naar voren omdat deze kapitaalsintensief zijn.
- **Industrie.** Verschillende industriële sectoren, zoals chemie en voeding, zijn van belang. De transitie in deze sectoren kan variëren van het gebruik van duurzame grondstoffen tot de implementatie van energie-efficiënte processen. De mate waarin de hele fabriek of alleen specifieke onderdelen worden meegenomen, kan de impact op het energiesysteem beïnvloeden.

		Jaarlijkse CAPEX in het zichtjaar		
		<100 MEUR	100-1000 MEUR	> 1000 MEUR
Jaarlijkse energieverbruik in het zichtjaar	<10 PJ			
	10-100 PJ			Elektrisch vrachtvervoer CCS infrastructuur Warmtenetten
	>100 PJ		Chemische industrie Voedingsindustrie Wind op land Luchtvaartbrandstoffen	Gebouwegebonden investeringen gebouwen Gebouwegebonden investeringen woningen Warmtepompen voor huishoudens Elektrisch personentransport Zeescheepvaart Infrastructuur elektriciteit Kernenergie Wind op zee Zon-PV Raffinage Groene waterstof

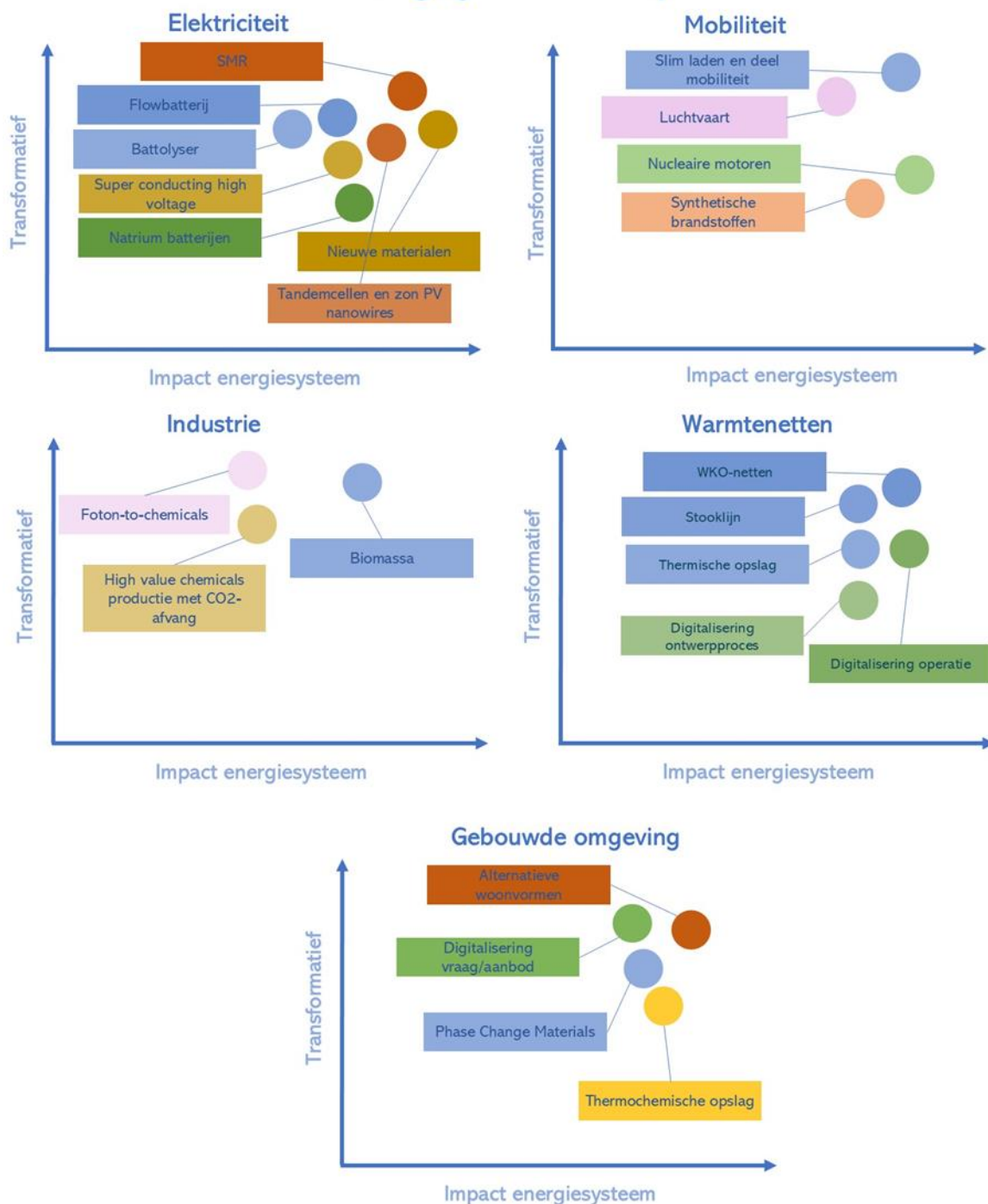
Figuur S.1.2: Categoriëring van Transform 2050 categorieën naar impact op het energiesysteem

## Geïdentificeerde disrupties

In Figuur S.1.3 staan de innovaties weergegeven die als disruptie zijn geïdentificeerd, omdat ze zowel impactvol als transformatief werden gescoord in de expertsessie. De uitkomsten zijn specifiek per energieketen of gebruikersgroep. Toch zijn onderstaande doorsnijdende trends erin te onderscheiden:

- **Inpassing in toekomstig systeem:** Het toekomstige energiesysteem wordt in grotere mate decentraal en aanbodgericht – zeker waar het de gebouwde omgeving en agrarische sector betreft. Dit betekent dat energie lokaal wordt opgewekt en verbruikt, wat de afhankelijkheid van centrale energiebronnen vermindert. Veel technieken richten zich op de slimme inpassing van energie om een dergelijk systeem mogelijk te maken. Dit omvat bijvoorbeeld de integratie van hernieuwbare energiebronnen, lokale opslagoplossingen en demand response technologieën.
- **Digitalisering:** Een sterke digitale component is essentieel voor het toekomstige energiesysteem. Slimme aansturing en communicatie tussen systemen, evenals nieuw onderzoek met AI-technologie, spelen een cruciale rol. Digitale oplossingen kunnen helpen bij het optimaliseren van energieverbruik, het voorspellen van energiebehoeften en het verbeteren van de efficiëntie van energieopslag en -distributie.
- **Basisbouwstenen:** Zon-PV, kernenergie, biomassa en synthetische brandstoffen spelen een grote rol in een carbonneutraal systeem. Binnen die bronnen zijn nog disrupties mogelijk. Tandemcellen en nanowires kunnen zon-PV veel efficiënter maken. Small modular reactors (SMR's) hebben de potentie om de kostprijs van kernenergie te verlagen, en thoriumreactoren de potentie om lang levend kernafval te vermijden en de afhankelijkheid van grondstoffen te minimaliseren. Via biomassa en synthetische brandstoffen kunnen brandstoffen worden geproduceerd die ook geschikt zijn voor toepassingen die zeer moeilijk via andere routes duurzaam te maken zijn.

## Belangrijkste disrupties



Figuur S.1.3: Belangrijkste disrupties voor de vijf geselecteerde onderwerpen; Kleurstelling verwijst naar sectorindeling in hoofdstuk 4 'Duiding experts'

## Toekomstig onderzoek

Vervolgonderzoek naar disrupties in het energiesysteem is nodig, zowel om bij te dragen aan de lange termijn voortgang van de energietransitie in Nederland als om Nederland te laten profiteren van onze kennis en innovatiepositie. Deze studie geeft hiervoor een richting, maar wij adviseren een veel gedegener aanpak van technology scouting middels een gecombineerde bottom-up en top-down aanpak.

Een dergelijke aanpak zou moeten bestaan uit het nauwgezet in kaart brengen van het innovatielandschap in Nederland, bijvoorbeeld door informatie in te winnen bij kennisinstellingen, universiteiten, start-ups, scale-ups en investeerders. Dit omvat ook het analyseren van de kennis- en innovatieagenda's van de topsectoren. Daarnaast is een internationale analyse van het energie-innovatielandschap waardevol, door middel van het bekijken van innovatie databases en specifieke technologie routekaarten. Zo kunnen we zien of we ergens innovaties missen of sterk achterlopen. Het is ook belangrijk om de verwachtingen van de rol van innovaties in het energiesysteem te analyseren.

Het doel van dit onderzoek zou moeten zijn om het innovatielandschap effectiever in te richten. De voorziene studie helpt ons te identificeren waar we sterke vooruitgang boeken, waar we ons op minder relevante gebieden richten en op welke plekken we kansen missen. Een diepgravender studie, een bredere scope en een breder scala aan bronnen en experts zullen ons in staat stellen om concrete uitspraken te doen over welke activiteiten opgeschaald moeten worden. De huidige studie biedt een overzicht van de belangrijke disrupties voor de Nederlandse energietransitie. Een uitgebreidere studie zal ons in staat stellen om veel concretere uitspraken te doen en het innovatielandschap effectief te sturen.

# Inhoudsopgave

Management summary .....	4
1 Inleiding .....	4
1.1 Wat is een disruptie?.....	4
1.2 Scope van het onderzoek.....	4
1.3 Leeswijzer en onderzoeksopzet.....	4
1.4 Bijlagen.....	5
2 Transform 2050 .....	6
2.1 Methodiek.....	6
2.2 Resultaten .....	6
3 ETP Clean Energy Technology guide .....	8
3.1 Methodiek.....	8
3.2 Resultaten .....	9
4 Duiding experts .....	29
4.1 Elektriciteit.....	30
4.2 Industrie .....	34
4.3 Mobiliteit .....	37
4.4 Gebouwde omgeving.....	40
4.5 Warmtenetten .....	43
Referenties .....	47
Bijlagen	
Bijlage A: Resultaat analyse TRANSFORM 2050 per keten of verbruikssector	53
Bijlage B: Volledige inventarisatie Clean Tech Guide	55
Bijlage C: Deelnemende experts voor de workshops	79
Bijlage D: Analyse van de database ‘Dealroom’	80

# 1 Inleiding

De Technologie Radar is ontwikkeld om disruptieve technologieën in het energiesysteem te identificeren. Deze vraag is uitgezet door de Topsector Energie Systeemintegratie van de Topsector Energie, met de volgende doelen:

- Het verkennen van mogelijke blind spots in het innovatiebeleid door het inventariseren van unknown-unknowns.
- Het neerzetten van een startpunt voor technologie scouting, om te kunnen bepalen waar Nederland op het gebied van innovatiebeleid kan excelleren.
- Het geven van basisinformatie voor de eigen programmering voor 2026 en verder.

## 1.1 Wat is een disruptie?

Disrupties onderscheiden zich van incrementele innovaties door hun transformatieve karakter. Ze veranderen de status quo, zowel van de huidige stand van technologie als het voorziene ontwikkelpad. Disrupties hebben een grote impact, bijvoorbeeld door een geheel ander energiesysteem te creëren, toepassingen op een nieuwe manier van energie te voorzien, de kosten van het systeem te veranderen, of andere systeemvoordelen te bieden. In deze context worden disrupties gedefinieerd als innovaties die op lange termijn (10-30 jaar) een transformatieve en substantiële impact op het energiesysteem hebben. De beoordeling van disrupties is grotendeels gebaseerd op de vraag: 'Als de technologie een succes wordt, hoe disruptief is deze dan?'

## 1.2 Scope van het onderzoek

De scope van dit onderzoek is breed: het gehele energiesysteem – van winning en omzetting van energiebronnen tot het voorzien in de energiefunctie, zoals verwarmen mobiliteit of een industrieel proces- valt onder de scope van dit onderzoek. Daarmee vallen alle energieconversies- en transporten binnen scope van dit onderzoek. Ook het gebruik van koolwaterstoffen als grondstof voor de industrie valt binnen de scope.

Om dit onderzoek te structureren en richting te geven, hebben wij gebruik gemaakt van de energieketens (elektriciteit, koolstof, waterstof en warmte) en verbruikssectoren (gebouwde omgeving, industrie, mobiliteit en landbouw) uit het Nationaal Plan Energiesysteem. Bij het selecteren van innovaties is gekeken naar innovaties die een impact maken op klimaatmitigatie. Hieronder vallen zowel energetische emissies als procesemissies van de industrie. Niet-energetische emissies van landbouw en landgebruik zijn buiten de scope van dit onderzoek gelaten.

## 1.3 Leeswijzer en onderzoeksopzet

Dit project is uitgevoerd met beperkte middelen. Daardoor hebben wij bewust moeten prioriteren op welke onderdelen van de energietransitie wij in meer detail inzoomen. Om dit te kunnen doen, zijn wij gestart met een analyse van het energiescenario TRANSFORM. Op

basis hiervan hebben wij gebieden geselecteerd die kansrijk zijn om disrupties te bevatten, omdat de impact op het energiesysteem van deze gebieden groot is. De resultaten hiervan staan in hoofdstuk 2.

Het onderzoek is vervolgd met een inventarisatie van innovaties. Deze inventarisatie is gebaseerd op de ETP Clean Energy Technology Guide – een database van het IEA met 534 innovaties in de energietransitie. Op basis van technology readiness level en een prioritering van onderwerpen o.b.v. impact en interesse van de Topsector Energie Systeemintegratie zijn 180 van deze innovaties binnen het kader van dit onderzoek nader onderzocht op hun werking en de manier waarop ze impact op het systeem maken. De resultaten hiervan staan in hoofdstuk 3.

Tot slot zijn de innovaties binnen de onderwerpen elektriciteit, industrie, mobiliteit, gebouwde omgeving en warmte behandeld in een workshop met twee experts per sector (totaal 10 experts). Deze hebben de inventarisatie aangevuld uit eigen ervaring. Daarnaast hebben ze de innovaties gerangschikt op transformativiteit en mate van impact – om zo de disrupties te identificeren. De resultaten hiervan staan beschreven in hoofdstuk 4.

## 1.4 Bijlagen

Een aantal bijlagen zijn onderdeel van dit rapport:

- A. Resultaat analyse TRANSFORM 2050 per keten of verbruikssector.
- B. Volledige inventarisatie Energy Technology Perspectives Clean Energy Technology Guide.
- C. Deelnemende experts voor de workshops.
- D. Analyse van de database 'Dealroom'.

Deze analyse geeft een getalsmatige orde-grootte van de hoeveelheid investeringen in start- en scale-ups in Nederland per onderwerp. Een nadere inkleuring van deze resultaten viel buiten de scope van dit project, waardoor deze weinig toevoegt aan de conclusies uit dit rapport. Als zodanig is besloten dit onderdeel naar de bijlage te verplaatsen.

## 2 Transform 2050

### 2.1 Methodiek

Het doel van deze analyse is om onderdelen van het energiesysteem te identificeren die kansrijk zijn om disruptieve technologieën te bevatten. Deze zullen in de rest van de studie als leidraad gebruikt worden om te prioriteren welke zaken in nader detail onderzocht worden.

Hiervoor is gebruik gemaakt van bestaande scenarioanalyses van TNO. TNO publiceert op eigen initiatief de scenariostudie 'ADAPT en TRANSFORM' (TNO, 2024). Binnen deze scenariostudie zijn voor twee scenario-beelden kosten-geoptimaliseerde energiesystemen berekend. In beide beelden worden de klimaatdoelen gehaald, zoals het broeikasgasneutraal zijn in 2050. De manier waarop deze doelen gehaald worden verschillen echter. Binnen ADAPT streeft de Nederlandse maatschappij naar het handhaven van de huidige levensstijl en behoud van bestaande economische structuren. In TRANSFORM zijn Nederlandse en Europese burgers bereid omwille van het reduceren van uitstoot hun gedrag en wensen aan te passen. Ook wordt er geïnvesteerd in nieuwe productieprocessen die gebruik maken van hernieuwbare energie en duurzame en gerecyclede grondstoffen.

Binnen deze studie is gekozen het TRANSFORM-scenario als basis te nemen. De focus ligt immers op het identificeren van disruptieve veranderingen, welke het beste passen binnen het TRANSFORM-wereldbeeld. Daarnaast is gekozen om 2050 als richtjaar te nemen. De focus ligt immers op innovaties die op de lange termijn (10-30 jaar) impact op het systeem maken.

Het scenario-beeld is opgebouwd uit 500 technologieopties. Op basis van de randvoorwaarden uit het scenario kan het gebruikte model ieder van deze opties al dan niet gebruiken om de energievoorziening in te vullen. Deze technologieopties zijn ingedeeld in categorieën technologieën, en deze zijn weer toegewezen aan de vraagsectoren en ketens uit het nationaal plan energiesysteem (NPE) (RVO, 2023).

Om te identificeren welke innovaties mogelijk impactvol zijn, is gekeken naar het belang van verschillende technologieën in het systeem. Hierbij zijn twee typen impact geïdentificeerd. Enerzijds kan een technologie impactvol zijn omdat er een groot economisch belang mee gemoeid is. Als parameter hiervoor is de jaarlijkse CAPEX genomen die er aan een technologie wordt uitgegeven. Anderzijds kan een technologie een belangrijke rol spelen in het energiesysteem. Hiervoor is de energieconsumptie van een technologie als parameter genomen.

### 2.2 Resultaten

Uit de analyse volgt prioritering van technologieën (zie Figuur 2.1 hieronder, zie ook in bijlage A voor de ordening per keten/verbruikssector). Deze prioritering geeft aan hoe groot de impact van technologieën zijn op het toekomstige energiesysteem. Rechts staan technologieën met een grote economische impact, en onderin technologieën met een grote

energetische impact. Logischerwijs staan rechtsonder dus de technologieën met een grote energetische én economische impact. Een grote economische en/of energetische impact maakt de kans groter dat er ook disrupties zijn. Dat is dus een reden om deze onderwerpen te prioriteren in de rest van de studie.

Technologieën binnen de gebouwde omgeving (gebouw gebonden investeringen en warmtepompen) en mobiliteit (elektrisch personentransport en zeescheepvaart) staan rechtsonder. Daarnaast zijn investeringen in de keten elektriciteit daar vertegenwoordigd (infrastructuur, kernenergie, wind op zee en zon-PV). Ook raffinaderijen en groene waterstof zijn zowel groot in CAPEX als in energie-intensiteit.

		Jaarlijkse CAPEX in het zichtjaar		
		<100 MEUR	100-1000 MEUR	> 1000 MEUR
Jaarlijkse energieverbruik in het zichtjaar	<10 PJ	Zoutcavernes	Batterijen 24-uurs opslag (CAES en flow batterijen)	
	10-100 PJ	ICT-industrie Kunstmest-industrie Groen gas productie	Warmtevoorziening voor huishoudens (overige) Warmtevoorziening voor gebouwen (overige) Staalindustrie Gastuinbouw Landbouw Elektriciteitscentrales Geothermie Overige warmtetechnieken (vergisting en solar thermal)	Elektrisch vrachtvervoer CCS infrastructuur Warmtenetten
	>100 PJ		Chemische industrie Voedingsindustrie Wind op land Luchtvaartbrandstoffen	Gebouwegebonden investeringen gebouwen Gebouwegebonden investeringen woningen Warmtepompen voor huishoudens Elektrisch personentransport Zeescheepvaart Infrastructuur elektriciteit Kernenergie Wind op zee Zon-PV Raffinage Groene waterstof

Figuur 2.1: Categorisering van Transform 2050 categorieën naar impact op het energiesysteem

Bij bovenstaande resultaat moet worden opgemerkt dat het slechts één van de mogelijke perspectieven is. Zo komen mobiliteitsoplossingen altijd als kapitaalsintensief naar voren, omdat in het gebruikte model het gehele vervoersmiddel als een personenauto of vrachtwagen als investering wordt meegenomen. Daarnaast zijn renovaties van gebouwen ook altijd kapitaalsintensief - of deze nu duurzaam zijn of niet. Flexibiliteitsoplossingen (waterstofopslag in zoutcavernes, batterijen en 24-uursopslag (bijv. CAES of flow batterijen)) krijgen binnen deze analyse een lage score. Echter is bekend dat het systeem meer gebouwd zal worden op variabele bronnen, en deze technologieën een onmisbare balansfunctie gaan vervullen. Binnen deze studie nemen we deze prioritering mee als een richtsnoer, maar niet te stringent om belangrijke innovaties niet te missen.

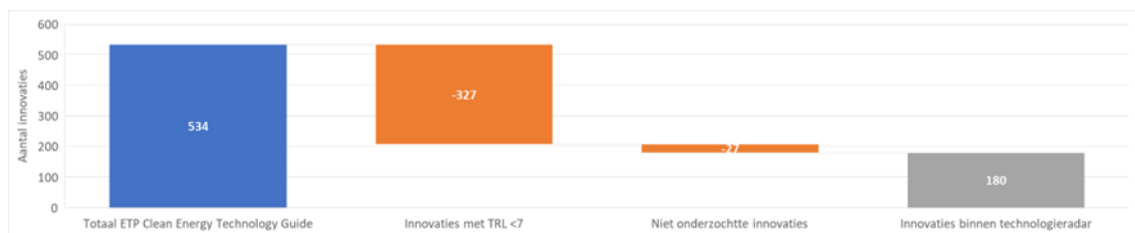
# 3 ETP Clean Energy Technology guide

## 3.1 Methodiek

Een waardevolle bron voor informatie over huidige ontwikkeling van schone energietechnologieën is de Energy Technology Perspectives (ETP) Clean Energy Technology Guide, ontwikkeld door het International Energy Agency (IEA, 2025). Deze interactieve database bevat bijna 600 technologische ontwerpen en componenten die het gehele energiesysteem omvatten en bijdragen aan de doelen voor netto-zero. De gids biedt gedetailleerde informatie over de ontwikkelingsstatus (Technology Readiness Level, TRL <sup>7</sup>), ontwikkelingsplannen, kosten, prestaties en belangrijke spelers in het veld. De IEA werkt de lijst regelmatig bij om ervoor te zorgen dat alle relevante informatie up-to-date blijft. Op dit moment zijn er 534 technologieën in de lijst opgenomen.

Het doel van dit project is om technologieën te identificeren die over tien jaar op de markt kunnen komen en een significante impact kunnen hebben op ons energiesysteem. Daarom richten wij ons op technologieën met een Technology Readiness Level (TRL) van zeven of lager. Hoger betekent dat de technologie zo ver is dat deze hoogstwaarschijnlijk al binnen enkele jaren op de markt komt en een impact kan hebben. Binnen de lijst zijn 207 technologieën met een TRL lager dan 7.

Binnen dit onderzoek is op voorhand de inschatting gemaakt dat van het aantal categorieën het niet waarschijnlijk is dat deze disrupties bevatten, bijvoorbeeld omdat deze sterk gestoeld zijn op fossiele brandstoffen of een niche-onderdeel van het energiesysteem beslaan. Het grootste deel van de technologieën is wel in deze inventarisatie beschouwd.



**Figuur 3.1:** Selectie van innovaties uit de ETP Clean Energy Guide die gebruikt zijn voor deze technologieradar

Binnen de rest van het hoofdstuk presenteren we de hoofdbevindingen van deze inventarisatie – langs de lijnen van de ketens en verbruikssectoren in het NPE. In dit hoofdstuk staan de belangrijkste bevindingen op het gebied van de werking en de mogelijke

<sup>7</sup> De IEA gebruikt een TRL indeling met 12 niveaus in plaats van degene met 9 niveaus die ooit door de NASA is ontwikkeld. De uitgebreide IEA TRL-schaal voegt extra niveaus toe om de overgang naar volledige commerciële exploitatie en stabiliteit van technologieën beter te kunnen beoordelen. Dit biedt een gedetailleerder inzicht in de laatste stadia van technologische ontwikkeling en integratie. Voor de toepassing in dit rapport maakt het geen verschil, omdat de eerste 9 niveaus identiek zijn.

impact op het energiesysteem. In Bijlage C staan alle technologieën weergegeven met hun TRL, beschrijving en impact in tabellen.

## 3.2 Resultaten

### 3.2.1 Gebouwde omgeving

#### 3.2.1.1 Constructie en renovatie

De volgende innovaties bij constructie en renovatie voor de gebouwde omgeving hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Funicular floor system
- Thin shelled concrete
- Vapour permeable walls
- Fibre-optic daylighting
- Building integrated phase change materials
- Additive manufacturing for building materials
- Building integrated heat and moisture exchange panel
- Radiative reflective roof
- Trombe wall
- Open automated demand response
- Direct current buildings system.

De innovaties omtrent de constructie en renovatie van gebouwen dragen vooral bij aan de vermindering in het gebruik van bouw materiaal en in het gebruik van energie voor verwarming, koeling of verlichting.

Door meer gestroomlijnde vormen in het ontwerp van een vloer of een dak kan het gebruik van bouwmaterialen sterk verminderd worden (*Funicular floor system, Thin shelled concrete*). Daarnaast kan het direct op de bouwplaats kunnen printen het proces van constructie efficiënter maken (*Additive manufacturing for building materials*).

Het gebruik van glasvezel om meer natuurlijk zonlicht door te laten (*Fibre-optic daylighting*), het toelaten van warmte-overdracht binnen de muren van een gebouw (*Vapour permeable walls, Building integrated phase change materials, Building integrated heat and moisture exchange panel*) of het reflecteren van meer warmte terug naar de atmosfeer (*Radiative reflective roof*) zijn innovaties die bijdragen aan vermindering in het directe energiegebruik voor verlichting, verwarming en koeling. Daarnaast is de *Trombe wall* (een innovatie bij de TU Delft onder andere aan gewerkt wordt) een interessante uitvinding die wel 70-80% van het zonlicht kan omzetten in warmte en koeling, wat ook leidt tot minder energieverbruik.

Als laatste zijn er ook innovaties die meer systemische oplossingen bieden voor een betere integratie in het energienetwerk of minder energieverlies. Zo richt het *Open automated demand response*-systeem zich op automatisering van informatie-uitwisseling tussen vraag en aanbod van het energiesysteem. *Direct current buildings system* is een systeem die gebruik vanuit een PV-stroom toelaat zonder gebruik te maken van AC/DC conversie.

### 3.2.1.2 Warmtepompen

De volgende innovaties bij warmtepompen voor de gebouwde omgeving hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Integrated heat pump with storage for cooling
- Integrated heat pump with storage for heating and cooling
- Membrane heat pump
- Thermo-acoustic heat pump
- High-temperature heat pump
- Hydrogen-enriched natural gas heat pump
- Metal hydride heat pump
- Vuilleumier heat pump
- Flexible operation of heat pumps.

De meeste innovaties omtrent warmtepompen leiden tot betere efficiëntie. Dit wordt bereikt door onder andere betere compressoren of nieuwe technologieën. Zo kan door een hogere efficiëntie het elektriciteitsverbruik 30-50% verminderen met een *Vuilleumier heat pump*. De Vuilleumier-warmtepomp kan een hogere efficiëntie bereiken door factoren zoals het gebruik van helium als werkvloeistof bij het inzetten van een thermisch aangedreven machine voor gascompressie en -expansie. Een andere innovatie zorgt ervoor dat hogere temperaturen haalbaar zijn door extra toevoer van warmte vanaf hoge temperatuur bronnen (*High-temperature heat pump*). Ook is een betere systeemintegratie van verwarming, koeling en opslag een manier om meer gebruik te kunnen maken van hernieuwbare energie (*Integrated heat pump with storage for heating and cooling*). Een innovatie zoals *Flexible operation of heat pumps* is interessant doordat een IT-systeem flexibele werking tussen het net en de warmtepomp toestaat, waardoor meer gebruik gemaakt kan worden van flexibele energieprijzen om netbelasting te verlagen.

Daarnaast maken veel innovaties het gebruik van schadelijke koelmiddelen overbodig door gascompressie en -expansie toe te passen.

Een paar nieuwe technologieën verbetert de levensduur, geluidsoverlast en efficiëntie van de warmtepompen, onder andere door het overbodig maken van een compressor:

- Akoestische golven die een gas (zoals helium) verwarmen waardoor mechanisch werk wordt gegenereerd. Hierbij een 3-4 x hogere efficiëntie haalbaar en zijn geen koelvloeistoffen nodig (*Thermo-acoustic heat pump*).
- Membraantechnologie met drie vloeistoffen voor betere warmteoverdracht die gasgebruik met 45% vermindert (*Membrane heat pump*).

### 3.2.1.3 Overige verwarmings- en koelsystemen

De volgende innovaties bij warmte en koeling voor de gebouwde omgeving (m.u.v. warmtepompen) hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Quad-generation
- Evaporative cooling coupled with permeable membrane
- Liquid or solid desiccant evaporative cooling system
- Barocaloric cooling
- Elastocaloric cooling
- Electrocaloric cooling
- Active latent heat storage
- Shape-stabilised phase change material (ss-PCM)

- Phase Change Materials (PCMs)
- Thermo-chemical storage
- Magnetocaloric cooling
- Active control systems for heating and cooling.

Een paar innovaties gaan over het gebruik van speciale materialen die warmte kunnen opnemen en afgeven bij verandering van druk, elasticiteit, elektrische spanning, faseverandering of door een chemische reactie in verwarming en koelingssystemen (*Barocaloric cooling, Elastocaloric cooling, Electrocaloric cooling, Active latent heat storage, Shape-stabilised phase change material (ss-PCM), Thermo-chemical storage, Magnetocaloric cooling*). Deze innovaties verminderen energieverbruik door een hogere efficiëntie dan conventionele systemen en kunnen daarbij ook werken met hernieuwbare energie.

Bij **Phase Change Materials (PCMs)** maakt gebruik van faseovergangsmaterialen. Wanneer de temperatuur stijgt, smelt het PCM en slaat het energie op. Dit proces gebeurt zonder dat de temperatuur van het materiaal significant verandert. Wanneer de temperatuur daalt, stolt het PCM en geeft het de opgeslagen energie weer vrij. Op deze manier kan overtollig energie opgeslagen worden.

Twee innovaties rondom koeltechnologieën zijn daarnaast in de ontwikkeling. De innovatie *Evaporative cooling coupled with permeable membrane* is een verbetering van conventionele dampcompressietechnologieën in efficiëntie en gebruikt daarbij geen koelmiddelen door het gebruik van een membraansysteem. De innovatie *Liquid or solid desiccant evaporative cooling system* gebruikt lage-temperatuur warmte en kan het energieverbruik significant verminderen door betere efficiëntie en het gebruiken van hernieuwbare energiebronnen.

Daarnaast kan integratie van elektriciteitsopwekking met verwarmen en koelen met aardgas en opvangen van CO<sub>2</sub> bij *Quad-generation* bijdragen aan energie en uitstoot vermindering, maar gebruikt daarbij wel nog gas. Deze toepassing staat gecategoriseerd als ‘gebouwde omgeving’ is de database van het IEA, maar lijkt daarmee vooral toepasbaar op plekken waar een afzet voor de CO<sub>2</sub> mogelijk is. Het projectvoorbeeld gaat over toepassing bij een viskwekerij, en dus niet bij woning- of utiliteitsbouw.

De laatste innovatie *Active control systems for heating and cooling* is een control system die betere integratie tussen warmteopslag en warmtepompen kan reguleren en zo flexibiliteit met het net toelaat.

### 3.2.2 Mobiliteit

Binnen het beschikbare budget is gekozen mobiliteit te scopen tot alleen wegtransport en scheepvaart. Hoewel luchtvaart wel beschreven was binnen de ETP Clean Energy Technology guide, is deze buiten de scope van deze inventarisatie gelaten. Binnen hoofdstuk 4 is luchtvaart wel opgenomen op basis van input van de experts. De productie van hernieuwbare brandstoffen staat niet beschreven in deze paragraaf, maar in de paragraaf 4.2.3, omdat er in de regel weinig aan het mobiliteitssysteem verandert hoeft te worden.

### 3.2.2.1 Wegtransport

De volgende innovaties voor wegtransport binnen de mobiliteit sector hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Li-Air battery
- Multivalent ion battery
- Li-S battery
- Zinc-manganese oxide battery
- Inductive (charging)
- Smart charging.

De bovenste vier technologieën, **Li-Air battery**, **Multivalent ion battery**, **Li-S battery** en **Zinc-manganese oxide battery**, zijn in ontwikkeling om de energiedichtheid te verhogen en de batterijen goedkoper te maken. De laatste is daarbij vooral in ontwikkeling als gebruik voor nettoepassingen. Bij Li-Air battery wordt zuurstof uit de lucht als kathode gebruik en lithium als anode, wat een vergelijkbare energiedichtheid als vloeibare brandstoffen oplevert. Li-S battery gebruikt in tegenstelling juist zwavel als kathode en kan zo een zeer hoge energiedichtheid opleveren. Multivalent ion battery gebruikt actieve ionen die meer dan één elektron kunnen afgeven. Hiervoor worden als ionen onder andere magnesium, calcium en aluminium onderzocht. De zinc-manganese oxide battery gebruikt een water als elektrolyt waardoor de veiligheid omhoog gaat. Daarnaast is deze batterij goedkoper door het gebruik van zink in plaats van lithium en kobalt, waardoor de productie kosten onder 100 USD/kWh kunnen komen bij productie op grote schaal.

De laatste twee richten zich op het efficiënter opladen van elektrische voertuigen om zo net-belasting te verminderen. Zo kan bij **Inductive charging** een voertuig stilstaand maar ook tijdens het rijden opgeladen worden, door inductiespoelen onder het wegdek. Het heeft vrij hoge kosten en een lage efficiëntie, maar kan flexibiliteit en adoptie van elektrische voertuigen vergroten. **Smart charging** ontwikkelt een IT-systeem dat ervoor zorgt dat het opladen van elektrische voertuigen beter gestuurd kan worden, zodat het opladen plaatsvindt op momenten die voordelig zijn voor het energiesysteem.

### 3.2.2.2 Scheepvaart

De volgende innovaties voor scheepvaart binnen de mobiliteitssector hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- High temperature proton exchange membrane fuel cell
- Methanol fuel cell electric ship
- Automated and connected ship
- Fast charging
- Molten carbonate fuel cell
- Solid oxide fuel cell
- Kite.

De technologieën die worden ontwikkeld binnen de scheepvaart richten zich vooral op het vinden van alternatieve motoren en het elektrificeren van de scheepvaart. Zo zijn drie verschillende nieuwe brandstofcellen in de ontwikkeling die werken op verschillende brandstofsoorten, hogere efficiëntie hebben en geen uitstoot: **High temperature proton exchange membrane fuel cell**, **Molten carbonate fuel cell**, **Solid oxide fuel cell**. Echter komen deze wel gepaard met hoge kosten, een gelimiteerde levensduur en een vermogen die alleen bruikbaar is voor kleine en middelgrote afstandsschepen. Een andere nieuwe

brandstofcel die ontwikkeld is, is *Methanol fuel cell electric ship*. Dit is een brandstofcel die op methanol werkt die een hogere energiedichtheid heeft dan vloeibaar waterstof, maar daarentegen wel een lagere efficiëntie.

*Automated and connected ship* is een technologie die geautomatiseerde schepen maakt waardoor optimaal de energie gebruikt wordt door efficiëntere routes, vaarsnelheid en informatie-uitwisseling met andere schepen. Hierdoor gaat het energieverbruik omlaag in vergelijking met door mensen-bestuurde schepen.

*Fast charging* betreft het toepassen van snellaadtechnologieën, bedraad en draadloos, in de scheepvaart. Dit maakt elektrische scheepvaart beter mogelijk.

De laatste technologie is *Kite*: een grote vlieger wordt, als de omstandigheden gunstig zijn, geautomatiseerd tot wel 100 meter de lucht in gelanceerd. Hier kan deze wind met hoge snelheden opvangen die bijdragen aan de voortstuwing van het schip. Hiermee kan wel 15% aan brandstof bespaard worden.

## 3.2.3 Koolstofketen

### 3.2.3.1 Biobrandstoffen en raffinage

De volgende innovaties binnen de sector 'biofuels' binnen de koolstofketen hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Biomass gasification and catalytic methanation (biomethane)
- Biomass gasification and biological methanation (biomethane)
- Gasification and Fischer-Tropsch without CCUS
- Gasification and hydrogen enhancement and Fischer-Tropsch
- Gasification and Fischer-Tropsch with CCUS
- Biomass gasification and methanation with CCUS (biomethane)
- Hydrotreating (biodiesel)
- Transesterification (biodiesel)
- Anaerobic digestion and biological methanation with hydrogen (biomethane)
- Enzymatic fermentation with CCUS (lignocellulosic bioethanol)
- Pyrolysis and upgrading (biodiesel)
- Alcohol-to-jet (biokerosene)
- Synthetic Iso-Paraffins
- Hydrothermal liquefaction and upgrading (biodiesel).

De eerste reeks technologieën is gebaseerd op vergassing. Bij vergassing wordt droge biomassa tot hoge temperatuur verhit in afwezigheid van zuurstof. Hierdoor valt de biomassa uiteen in kleinere moleculen (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> en andere kleine koolwaterstoffen). Dit mengsel heet syngas. De innovaties zitten in wat er vervolgens met dit syngas gebeurt. Bij *cathalitic methanisation* wordt er methaan van gemaakt als alternatief voor aardgas. Bij het *Fischer-Tropsch proces (FT)* worden uit syngas langere koolwaterstoffen zoals diesel, kerosine of nafta gemaakt. Een optie is om hieraan waterstof toe te voegen (*hydrogen enhancement*). Voor het FT-proces wordt waterstof toegevoegd aan het syngas om de CO<sub>2</sub> om te zetten in CO en water. De CO wordt als bouwblok gebruikt, waardoor een groter deel van de koolstof wordt omgezet in nuttige producten.

Een alternatief voor katalytische methanisering is *biological methanisation*, waarbij de omzetting naar methaan met microben plaatsvindt.

Er zijn drie innovaties waarbij een biologisch proces gebruikt wordt om biomassa in producten om te zetten. Twee processen maken gebruik van lipides (vetachtige, niet-wateroplosbare stoffen) door gebruik te maken van micro-algen. Middels *hydrotreating* worden deze lipides vervolgens omgezet in HVO-diesel (hydrotreated vegetable oil). Een alternatief is om de lipides met methanol via *transesterification* om te zetten in Fatty Acid Methyl Ester-biodiesel (FAME) en glycerine. Door *anearobic digestion* (anaerobe vergisting) en *biological methanisation with hydrogen* te combineren wordt biomethaan geproduceerd met een volledig biologisch proces.

Ook zijn er nog vier innovaties waarbij een ander synthetisch proces dan vergassing gebruikt wordt. *Pyrolysis* is een techniek waarbij moleculen op lagere temperaturen worden afgebroken dan bij vergassing (400-500 graden). Het eindproduct -pyrolyseolie- heeft daardoor langere moleculen en is vloeibaar. Bij *alcohol-to-jet* worden alcoholen als basisproduct gebruikt om een drop-in vervanger van kerosine te maken. Bij *synthetic iso-paraffins* worden suikers omgezet in koolwaterstoffen als diesel en luchtvaartbrandstoffen. Hiervan bestaat een biologisch en een synthetisch proces. Voordeel van dit proces is dat het kwalitatief hoogwaardige producten maakt. Bij *hydrothermal liquefaction and upgrading* wordt biomassa gesplitst op lagere temperatuur (250-450 graden), maar bij hoge druk (150-350 bar) en in aanwezigheid van een alkaline katalysator.

Tot slot is het mogelijk om CCUS toe te passen op verschillende biogene processen. Voordeel hiervan is dat CO<sub>2</sub> vaak makkelijker af te vangen is dan bij een verbrandingsproces (geen verdunning met stikstof) en het leidt tot negatieve emissies wanneer deze voor de lange termijn worden opgeslagen of vastgelegd. Deze mogelijkheid bestaat bij *enzymatic fermentation*, *cathalitic methanisation* en het *FT-proces*.

### 3.2.3.2 Raffinage

De volgende innovaties binnen de sector 'raffinage' binnen de koolstofketen hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Oxy-fuelling carbon capture (cracking)
- Post-combustion carbon capture (cracking)
- CCUS using post-combustion capture (process heater)

Alle drie de innovaties omvatten het afvangen van CO<sub>2</sub> in raffinaderijen. Dit zou alleen een significante impact op ons energiesysteem hebben als dit wordt gevolgd door het blijven gebruiken van olieraffinaderijen en of stoomketels en andere warmte-processen die op CO<sub>2</sub>-uitstotende brandstoffen werken.

### 3.2.3.3 Synthetische brandstoffen

De volgende innovaties binnen de sector 'synthetische brandstoffen' hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Direct CO<sub>2</sub> to dimethyl ether
- Concentrating solar fuels
- CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O co-electrolysis
- CO<sub>2</sub> reduction
- Biological CO<sub>2</sub> methanation
- Chemical methanation

Deze innovaties zetten allen CO<sub>2</sub> om in een nieuwe brandstof die gebruikt kan worden in sectoren waar elektrificatie moeilijk is. Zo worden bij de innovaties *Direct CO<sub>2</sub> to dimethyl ether*, *Concentrating solar fuels, CO<sub>2</sub>* en *H<sub>2</sub>O co-electrolysis, CO<sub>2</sub> reduction* nieuwe organische en synthetische vloeibare koolwaterstofbrandstoffen geproduceerd. Zo wordt bij direct CO<sub>2</sub> to dimethylether CO<sub>2</sub> samen met waterstof omgezet naar dimethylether. De techniek ‘concentrating solar fuels’ gebruikt zonne-energie om vloeibare koolwaterstof-brandstoffen te synthetiseren uit water en CO<sub>2</sub> via een hoge temperatuur thermochemische cyclus. Deze nieuwe brandstof heeft hierbij de potentie hogere efficiëntie te bereiken. De laatste twee technieken maken gebruik van het Fischer-Tropsch-synthese van het syngas bestaande uit CO<sub>2</sub>, CO en water, om zo vloeibare koolwaterstoffen te produceren.

Ook worden er technologieën ontwikkeld, namelijk *Biological CO<sub>2</sub> methanation* en *Chemical methanation*, waarbij CO<sub>2</sub> wordt opgevangen en in methaan wordt omgezet. Dit wordt gedaan met behulp van een methanogene micro-organismen of een chemische katalysator.

## 3.2.4 Elektriciteitsketen

### 3.2.4.1 Opwekking

De volgende innovaties rondom de opwekking van elektriciteit hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Ocean thermal
- Salinity gradient (ocean power)
- Ocean (cross-cutting)
- Offshore renewable hydrogen production
- Ammonia turbine
- Co-firing of ammonia in gas turbines
- Post-combustion: membranes polymeric (coal with CCUS)
- Oxy-fuelling (coal)
- Pre-combustion: physical absorption (coal with CCUS)
- Pre-combustion: physical absorption (biomass with CCUS)
- Hybrid hydrogen fuel cell-gas turbine system
- Linear Fresnel reflector (solar)
- Enhanced geothermal systems

Innovaties in de elektriciteitsopwekking richten zich op het benutten van nieuwe energiebronnen, zoals oceaanenergie en geothermische energie. Daarnaast wordt er gekeken naar het gebruik van ammoniak in energiecentrales en het CO<sub>2</sub>-neutraal opwekken van energie met steenkool.

Er zijn vier offshore innovaties benoemd die zich richten op het winnen van energie uit de zee of oceaan.

- **Ocean thermal** is een innovatie die zich richt op het gebruik van oceanische thermische energieomzetting (OTEC), waarbij gebruik wordt gemaakt van de temperatuurverschillen op verschillende diepten in de oceaan. Opgepompt water kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor zeewater-airconditioning (SWAC) en ontzilting. SWAC is aantrekkelijk voor het koelen van gebouwen en datacenters in Europa. Een uitdaging is het ontwikkelen van materialen die bestand zijn tegen de corrosieve omstandigheden van de oceaan.

- **Salinity gradient (ocean power)** richt zich op het opwekken van energie door de osmotische druk tussen zeewater en zoetwater te benutten. Osmotische druk ontstaat door het drukverschil tussen twee oplossingen met verschillende concentraties, veroorzaakt door osmose via een halfdoorlatend membraan. Zoutgradiëntenergie kan worden benut bij riviermondingen met technieken zoals druk-vertraagde osmose (PRO) en omgekeerde elektrolyse (RED).
- **Ocean (cross-cutting)** is een verzameling van technologieën om energie te winnen uit de zee of oceaan. Deze richt zich naast de boven genoemde technologieën ook op het winnen van energie uit de kinetische energie, namelijk golf-, getijden- en oceaanstroomenergie.
- **Offshore renewable hydrogen production** richt zich op het direct produceren van waterstof bij windmolens op zee. Dit heeft een voordeel dat energietransport door leidingen naar de kust kan plaatsvinden wat kostenefficiënter is ten opzichte van kabels. Hierbij kan eventueel gebruik gemaakt worden van oude gasleidingen. Wel zit hier nog een grote uitdaging in het ontwikkelen van het juiste elektrolyse- en ontziltingsstelsel die toepasbaar is op zee.

In **ammonia turbine** wordt ammoniak direct gebruikt als brandstof bij microgasturbines met een vermogen tot 50 kW. Er zijn nog technische uitdagingen voor hogere vermogens. **Co-firing of ammonia in gas turbines** gebruikt het verbranden van ammoniak bij aardgas. Ammoniak is een interessante drager om groene waterstof over de wereld te transporteren en verhandelen. Bij de verbranding van ammoniak wordt geen CO<sub>2</sub> uitgestoten. Echter ontstaan er meer NO<sub>x</sub>-emissies waar rekening mee gehouden moet worden.

Drie innovaties gebruiken fossiele brandstoffen voor de opwekking van elektriciteit. Dit is dus geen duurzame technologie, omdat zowel de voorraden fossiele brandstoffen als de mogelijkheden om CO<sub>2</sub> op te slaan op termijn uitgeput raken. Daarnaast heeft kolenmijnbouw een sterk negatief effect op het milieu.

**Post-combustion: membranes polymeric (coal with CCUS)** gebruikt membranen om CO<sub>2</sub> af te vangen van de gasstromen bij kolengestookte energiecentrales. Bij **oxy-fuelling (coal)** wordt steenkool verbrand met bijna pure zuurstof, waardoor de afvalgassen vooral waterdamp en CO<sub>2</sub> bevatten. Door de waterdamp vervolgens te verwijderen wordt een pure CO<sub>2</sub> stroom verkregen. Bij **pre-combustion: physical absorption (coal with CCUS)** wordt steenkool omgezet in synthesegas (waterstof en koolmonoxide). Dit gas wordt via een water-gas-shift reactie omgezet in extra waterstof en kooldioxide waarbij de CO<sub>2</sub> wordt afgevangen door adsorptie. De overgebleven waterstof wordt verbrand in een gecombineerde-cyclus gasturbine om elektriciteit op te wekken.

De laatste innovaties omvatten het slim gebruiken van biomassa, brandstof, zonne-energie of geothermische energie.

- Bij **pre-combustion: physical absorption (biomass with CCUS)** wordt biomassa omgezet in synthesegas (waterstof en koolmonoxide), dat via een water-gas-shift reactie extra waterstof en kooldioxide produceert. De CO<sub>2</sub> wordt afgevangen door adsorptie, en de overgebleven waterstof wordt verbrand in een gecombineerde-cyclus gasturbine om elektriciteit op te wekken.
- Bij de innovatie **hybrid hydrogen fuel cell-gas turbine system** wordt brandstof in een vaste-oxide brandstofcel (SOFC) omgezet in elektriciteit. Vervolgens worden de uitlaatgassen, rijk aan onder andere waterstof, koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en waterdamp, in een gasturbine verbrand om zo extra elektriciteit te produceren. Oxy-verbranding met zuurstof levert een zuivere CO<sub>2</sub>-stroom voor opslag of hergebruik. Alternatieve CO<sub>2</sub>-verwijderingsmethoden zijn mogelijk, maar minder efficiënt.

- **Linear Fresnel reflectors (LFR's)** kunnen ervoor zorgen dat zonlicht efficiënter gebruikt kan worden in de productie van elektriciteit. Met behulp van platte spiegels wordt zonlicht naar een ontvanger gecentreerd, waar water in stoom veranderd en zo elektriciteit via een turbine opwekt.
- **Enhanced geothermal systems** gebruikt warmte van de aarde op locaties waar onvoldoende warmtewisselend oppervlak direct in de aarde aanwezig is. Het richt zich op het creëren van grote warmtewisselingsgebieden in heet gesteente door het verbeteren van de doorlaatbaarheid door bestaande scheuren te openen en/of nieuwe scheuren te creëren. De kosten zijn echter een grote onzekerheid bij deze technologie.

### 3.2.4.2 Opslag

De volgende innovaties rondom de opslag van elektriciteit hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Solid-state storage battery
- Sodium-ion storage battery
- Liquid CO<sub>2</sub>
- Liquid air energy storage
- Gravity-based storage

De innovaties betreffen nieuwe batterijontwerpen met een hogere energiedichtheid of veiligheid, methoden zoals vloeibare CO<sub>2</sub>- en luchtenergieopslag en zwaartekracht gebaseerde opslag.

In een **solid-state storage battery** wordt de vloeibare (brandbare) elektrolyt vervangen door een vaste. Dit leidt tot een hogere energie dichtheid en verbeterde veiligheid. Echter zijn er nog uitdagingen zoals volume- en drukverandering tijdens het gebruik van de batterij.

**Sodium-ion storage battery** gebruikt natrium in plaats van lithium. Natrium is veel goedkoper dan lithium, echter is de energiedichtheid en de levensduur wel lager.

Bij **liquid CO<sub>2</sub>** wordt CO<sub>2</sub> onder druk vloeibaar gemaakt en opgeslagen in een drukvat (laden van energie). Bij ontlading wordt de vloeistof verwarmd om weer gas te worden, en terwijl de CO<sub>2</sub> uitzet van vloeistof naar gas, drijft het een turbine aan om elektriciteit te genereren (ontladen van energie).

**Liquid air energy storage** gebruikt elektriciteit om lucht samen te persen en af te koelen tot -196°C, waarna de vloeibare lucht in een geïsoleerde tank wordt opgeslagen. Wanneer stroom nodig is, wordt de vloeibare lucht naar hoge druk gepompt, verwarmd en uitgezet om gasvormige lucht te produceren. Deze lucht drijft een zuigermotor of turbine aan om elektriciteit te genereren.

**Gravity-based storage** wordt met behulp van elektriciteit een object, zoals water of een betonnen blok, opgetild en slaat energie op als zwaartekrachtpotentiële energie. Wanneer elektriciteit nodig is, wordt het object neergelaten, waarbij de potentiële energie via een dynamo in elektriciteit wordt omgezet.

### 3.2.4.3 Infrastructuur

Voor de infrastructuur van elektriciteit zijn er twee opkomende innovaties met een TRL<7.

**Transactive energy** draagt bij aan een betere distributie van lokaal opgewekte energie door consumenten onderling energie te laten uitwisselen binnen een bestaand elektriciteitssysteem. Dit wordt gedaan door digitale monitoring en controle technieken. Het biedt een kans voor betere netstabiliteit en beter gebruik van hernieuwbare energie.

**Superconducting high-voltage** is een innovatie die ervoor zorgt dat bij hoogspanning grotere hoeveelheden stroom met minimale verliezen getransporteerd kunnen worden. Door dat ze minder ruimte innemen dan conventionele kabels en grotere efficiëntie hebben zij een lagere milieu-impact.

## 3.2.5 Waterstofketen

### 3.2.5.1 Groene waterstof

De volgende innovaties rondom groene waterstof hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Anion exchange membrane electrolyser
- Waste water electrolysis
- Seawater electrolysis
- Nuclear (water splitting)
- Solar (water splitting)

Een *Anion Exchange Membrane (AEM)* is een alternatief voor het op dit moment gebruikelijke Proton Exchange membrane (PEM). In dit geval worden OH<sup>-</sup>-deeltjes in plaats van H<sup>+</sup>-deeltjes door het membraan gaan. Het membraan maakt gebruik van goedkopere niet-edele materialen, waardoor dit type membraan potentieel goedkoper is. Daarnaast heeft het een grotere tolerantie voor onzuiverheden. Nadeel is dat met dit type membraan waterstof met een lagere zuiverheid wordt geproduceerd.

Twee van de onderzochte innovaties gaan over het gebruik van een ander type water om minder afhankelijk te zijn van schaars zoet water, namelijk *waste water electrolysis* (afvalwater) en *seawater electrolysis* (zeewater).

De resterende twee innovaties betreffen het met een katalysator thermochemisch splitsen van water. Dit maakt het mogelijk om (ook) warmtebronnen te gebruiken, zoals warmte uit een kerncentrale of een zon-thermische cel. In theorie kan dit een energetisch efficiënt proces zijn.

### 3.2.5.2 Overige waterstofproductie

De volgende innovaties rondom overige waterstofproductie hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Aluminum oxidation
- Biological splitting
- Biomass-waste gasification without CCUS
- Biomass-waste gasification with CCUS
- Biomass-waste pyrolysis
- Chemical looping with CCUS
- Single reformer (methane)
- With gas heated reformed (methane)

- Catalytic decomposition (methane)
- Sorption enhanced steam reforming with CCUS (methane)
- Underground reforming with CCUS
- Natural hydrogen extraction
- High capture rates (coal gasification)

**Aluminum oxidation** is een technologie om waterstof te produceren door aluminium met water te laten reageren. Het is een reactie die bij de productie van waterstof exotherm is, waardoor je met dit proces niet afhankelijk bent van de locatie waar duurzame energie wordt geproduceerd. De grondstoffen zijn ruim voorradig, en het is op termijn mogelijk het proces met zout in plaats van zoetwater te laten plaatsvinden.

Daarnaast zijn er een aantal innovaties die gebruik maken van biologische processen of grondstoffen. Bij **biological splitting** wordt een biologisch proces als donkere fermentatie, groene algengroei, cyanobacterien of electro-actieve microorganismen gebruikt om biomassa in waterstof om te zetten. Bij **biomass-waste gasification** en **-pyrolyse** wordt gebruik gemaakt van respectievelijk vergassing en pyrolyse om biobased afval om te zetten in syngas (waterstof en koolstofmonoxide). Dit proces is eveneens beschreven in paragraaf 4.2.3, maar hier betreft het afval als grondstof.

Ook zijn er verschillende innovaties op het gebied van blauwe waterstof: het afvangen van CO<sub>2</sub> bij reformers op fossiele brandstoffen. Er zijn verschillende andere typen reformers, zoals **chemical looping** (gebaseerd op het gebruik van pure zuurstof en het reduceren van een metaaloxide), een **single reformer** (gebaseerd op het gebruik van een auto thermal reformer (ATR) met pure zuurstof) of een **gas heated reformer** (een doorontwikkeld ATR concept). Bij **cathalytic decomposition** wordt waterstof gesplitst bij hoge temperaturen en met een katalysator. Tot slot is er **Sorption enhanced steam reforming**, waarbij de CO<sub>2</sub> in het proces zelf (in situ) wordt afgevangen met een carbonaat in plaats van achteraf. Deze technieken kunnen in potentie tegen lagere kosten en/of met lager energieverbruik CO<sub>2</sub> afvangen.

Tot slot zijn er 2 innovaties die gebruik maken van de geologische ondergrond. Bij **Natural hydrogen extraction** wordt er gezocht naar natuurlijke bronnen van waterstof. Bij **Underground reforming with CCUS** vindt een reformingproces plaats in bestaande geologische holtes, waardoor CO<sub>2</sub> direct reageert met gesteenten ondergronds en geen bovengrondse installaties nodig zijn.

### 3.2.5.3 Transport en opslag

De volgende innovaties rondom transport en opslag hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Fast-cycling salt cavern storage
- Lined hard rock cavern storage
- Depleted gas fields storage
- Ammonia cracking
- Hydrogen deblending
- Hydrogen turbo compressors

Met betrekking tot waterstofopslag zijn er drie innovaties bekeken. Opslag van waterstof in een zoutcaverne is een inmiddels bestaande technologie, naast bovengrondse opslag in tanks. Bij een **fast-cycling salt cavern storage** wordt gekeken of deze opslag ook geschikt is

om de opslagfaciliteit sneller te vullen en legen dan gebruikelijk. Bij een *lined hard rock cavern storage* wordt een caverne gegraven uit harde ondergrondse rotsformaties. Dit maakt het mogelijk waterstofopslag ook te creëren op plekken waar geen zout in de ondergrond zit. Tot slot richt *depleted gas fields storage* zich op het opslaan van waterstof in lege gasvelden.

Ammoniak kan een belangrijke drager van waterstof worden om het wereldwijd te kunnen verhandelen. Bij *ammonia cracking* wordt gekeken of het proces om ammoniak te kraken naar pure waterstof op lagere temperaturen beschikbaar te maken. In een conventioneel proces kost het kraken, door de hoge temperaturen, ca. 30% van de energiewaarde van de geproduceerde waterstof.

Tot slot zijn er twee technologieën met betrekking tot de transport van waterstof. *Turbo compressoren* maken het mogelijk om grote hoeveelheden waterstof tot 200 bar te comprimeren. Dit is bestaande technologie, maar nog niet toegepast op waterstof. *Hydrogen deblending* richt zich op het scheiden van waterstof uit een aardgasstroom met een membraan of een pressure swing absorber (PSA). Dit maakt het mogelijk waterstof te mengen in het aardgasnetwerk en aan de gebruikerszijde alleen de waterstof of methaan af te nemen.

## 3.2.6 Industrie

### 3.2.6.1 Chemicaliën en kunststoffen

De volgende innovaties rondom de productie van chemicaliën en kunststoffen hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Biomass gasification (ammonia)
- Physical adsorption (ammonia)
- Lignocellulosic gasification (ethylene)
- Steam cracker electrification (high value chemicals)
- Lignin (biomass) (benzene, toluene and xylenes)
- Solvent dissolution for PET
- Cryogenic capture (ammonia)
- Methanol-based (benzene, toluene and xylenes)
- Hydrothermal upgrading
- Chemical absorption (high value chemicals)
- Physical absorption (high value chemicals)
- Synthetic hydrogen-based fuels in a conventional steam cracker (high value chemicals)
- Physical absorption (methanol)
- CO<sub>2</sub>- and electrolytic hydrogen-based produced with variable renewables (methanol)
- Methane pyrolysis (methanol)

De innovaties richten zich op het verduurzamen van de productie van ammoniak, BXT-aromaten, hoogwaardige chemicaliën, methanol en ethyleen.

Enkele innovaties zijn gericht op het verduurzamen van de waterstofproductie, die essentieel is voor de productie van ammoniak (meer over innovaties voor duurzame waterstofproductie: zie Sectie 4.6 (Waterstofketen)). Een belangrijk aspect hiervan is het efficiënt opvangen van CO<sub>2</sub>. De waterstof wordt vervolgens via het Haber Bosch proces met stikstof samengevoegd tot ammoniak.

- **Biomass gasification (ammonia)**, waar synthetisch gas, rijk aan waterstof, wordt geproduceerd door biomassa te vergassen. Dit is anders dan de conventionele methode waarbij stoom-methaanreforming wordt toegepast voor de productie van waterstof.
- **Physical adsorption (ammonia)** is een techniek waarbij moleculen, zoals CO<sub>2</sub>, zich hecht aan het oppervlak van selectieve materialen (adsorbenten). Door drukschommelingen of vacuümschommelingen wordt de CO<sub>2</sub> losgelaten en zo opgevangen bij de productie van waterstof. Fysische absorptie, waarbij de stof wordt opgenomen in een adsorbent, wordt al gebruikt in de productie van ammoniak, maar adsorptie nog niet.
- Bij **cryogenic capture (ammonia)** wordt de CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van waterstof voor ammoniak via stoom-methaanreforming opgevangen door het gasmengsel af te koelen tot een temperatuur waarbij CO<sub>2</sub> bevroert en vervolgens verwijderd kan worden.

Twee andere innovaties betreffen de verduurzaming van de productie van BTX-aromaten. Bij **lignin (biomass) (benzene, toluene and xylenes)** worden BTX-aromaten, essentiële bouwstenen voor de chemische industrie, uit lignine, een bestanddeel van planten, gemaakt. Dit kan op verschillende manieren, zoals door chemische reacties of filtratieprocessen.

**Methanol-based (benzene, toluene and xylenes)** wordt via een katalytisch proces uit methanol aromaten zoals benzeen, toluen en xylenen (BTX) geproduceerd. Het gebruik van methanol met een lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk kan fossiele grondstoffen vervangen bij de productie van aromaten. Hoewel er momenteel voldoende aromaten worden geproduceerd, gebeurt dit voornamelijk uit fossiele bronnen.

De volgende innovaties richten zich op de verduurzaming van de productie van hoogwaardige chemicaliën (HVC's).

**Steam cracker electrification (high value chemicals)** is een innovatie waarbij fossiele brandstoffen voor het verhitten van stoomkrakers wordt vervangen door elektriciteit. Een stoomkraker is een industriële installatie die grote koolwaterstofmoleculen (nafta) afbreekt tot kleinere moleculen die belangrijke grondstoffen zijn voor de chemische industrie.

**Chemical absorption (high value chemicals; HVCs)** richt zich op het efficiënter maken van het conventionele CO<sub>2</sub>-afvangproces voor de productie van HVC's. In het proces reageert CO<sub>2</sub> met een chemisch oplosmiddel, zoals amines. Bij temperaturen tussen 120-150 °C wordt de CO<sub>2</sub> weer vrijgegeven en het oplosmiddel geregenereerd voor hergebruik. Zo kan CO<sub>2</sub> worden afgevangen en hergebruikt voor industriële processen.

Bij **physical absorption (high value chemicals)** wordt door een vloeibaar oplosmiddel CO<sub>2</sub> uit rookgassen met hoge CO<sub>2</sub>-concentratie geabsorbeerd, zonder chemische reactie. Veel gebruikte fysische oplosmiddelen zijn Selexol (dimethylethers) en Rectisol (methanol).

Bij **synthetic hydrogen-based fuels in a conventional steam cracker (high value chemicals)** worden brandstoffen, geproduceerd uit CO<sub>2</sub> en waterstof, direct geïntegreerd in de bestaande stoomkraker. Het innovatieve aspect is dat dit proces kan worden geïmplementeerd zonder grote aanpassingen aan de bestaande infrastructuur, dankzij het gebruik van de huidige stoomkrakers.

De volgende drie innovaties betreffen methoden voor de verduurzaming van methanolproductie.

**Methane pyrolysis (methanol)** breekt methaan af in waterstof (H<sub>2</sub>) en vaste koolstof met een katalysator, wat CO<sub>2</sub>-vrije waterstof oplevert. Dit kan synthesesgas genereren zonder CO<sub>2</sub>-uitstoot voor methanolproductie.

**Physical absorption (methanol)** gebruikt een vloeibaar oplosmiddel om CO<sub>2</sub> uit rookgassen te absorberen zonder chemische reactie. Veelgebruikte oplosmiddelen zijn Selexol en Rectisol.

**CO<sub>2</sub>- and electrolytic hydrogen-based production (methanol)** produceert synthesesgas uit methaan, waarbij CO en waterstof samen methanol vormen. Dit proces gebruikt waterstof uit water-elektrolyse en afgevangen-CO<sub>2</sub> om de methanolopbrengst te verhogen.

Twee innovaties richten zich op het recyclen van plastic. Beide innovaties hebben de uitdaging dat een relatief schone inputstroom nodig is, en daarmee afhankelijk van een goede afvalscheiding of extra voorbewerking.

**Hydrothermal upgrading** gebruikt water onder superkritische omstandigheden (zeer hoge druk en temperatuur) om koolstofbindingen in afgedankt plastic te breken, waardoor polymeren worden afgebroken tot kortere koolwaterstofketens. Dit maakt het mogelijk om plastic effectief te recyclen naar hoogwaardige kwaliteit, waardoor minder nieuwe grondstoffen nodig zijn.

**Solvent dissolution for PET** gebruikt een oplosmiddel om plastic afval te zuiveren zonder het volledig af te breken. Het verwijdert kleur, geur en andere verontreinigingen, waardoor het gerecyclede plastic dezelfde eigenschappen heeft als nieuw plastic.

De laatste innovatie is lignocellulosic gasification (ethylene), waarbij ethyleen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) wordt geproduceerd uit bio-ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) via dehydratieprocessen. Bio-ethanol wordt geproduceerd uit houtige biomassa (bijv. houtgewassen en landbouwresiduen) via productie van syngas met behulp van vergassing. Hierna wordt dit omgezet in ethanol via fermentatie of katalytische conversie.

### 3.2.6.2 Elektrische verwarmingstechnieken

De volgende innovaties rondom het bewerken van materialen hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Electric arc and plasma arc furnaces (high temperature heating)
- Radio waves (high temperature heating)
- Microwaves (high temperature heating)
- Ultra-violet (high temperature heating)
- Electric heating with thermochemical storage (high temperature heating)
- Direct heat from variable renewables (high temperature heating)
- Rotary compression heater (high temperature heating)
- Ammonia (low temperature heating)
- X-ray transmission for recycling
- Molten oxide electrolysis
- Folding-shearing
- Ring rolling with variable wall thickness

Innovaties in materiaalbewerking richten zich op het vervangen van processen die verwarmd worden met fossiele brandstoffen door elektrische alternatieven. Processen worden verduurzaamd als deze elektriciteit van hernieuwbare bronnen komt.

- **Electric arc en plasma arc furnaces** gebruiken krachtige elektrische stroom door gassen zoals argon om temperaturen tot 5000°C te bereiken. Deze ovens worden gebruikt voor het verwerken van gevaarlijk afval en metalen zoals titanium en wolfram, en kunnen worden aangepast voor toepassingen zoals staal-, cement- en aluminiumproductie.
- **Radio waves** maken gebruik van radiogolven tussen elektroden (1-100 MHz) om niet-geleidende materialen te verwarmen door moleculaire excitatie. Dit systeem is

goedkoper dan microwaves, maar minder geschikt voor onregelmatige vormen. Het wordt toegepast voor drogen, sinteren, calcineren, koken, uitharden, voorverwarmen en het versnellen van chemische reacties, vooral bij lage tot middelhoge temperaturen.

- **Microwaves** genereren warmte intern in niet-geleidende materialen door moleculaire opwinding (100-10,000 MHz). Voordelen zijn snelle warmteoverdracht, geen verbrandingsproducten en snelle inschakeling. Een toepassing is de productie van koolstofvezel met een lagere CO<sub>2</sub>-footprint, doordat het een efficiënter proces betreft.
- **Ultra-violet (UV)** licht verwarmt objecten via fotochemische processen en wordt al toegepast in industriële processen zoals de productie van auto-onderdelen, drukwerk, voedselverpakking en elektronica. Het is echter beperkt toepasbaar voor hoge temperaturen.
- **Electric heating with thermochemical storage** gebruikt chemische reacties om warmte op te slaan (exotherm) en vrij te geven (endotherm). Extra hernieuwbare elektriciteit start de reactie, en later wordt de opgeslagen warmte vrijgegeven voor industriële processen.
- **Direct heat from variable renewables** richt zich op het gebruik van warmte direct van hernieuwbare energie, zoals geconcentreerde zonne-energie (CSP) die zonnestraling omzet in hoge temperatuurwarmte. Dit kan worden gebruikt in industriële processen die hoge temperaturen vereisen, zoals de behandeling van niet-metallische deeltjes en klinkerproductie.
- Een **rotary compression heater** gebruikt roterende turbines en elektriciteit om gassen snel te versnellen en vertragen, waardoor hun temperatuur stijgt. Een voorbeeld is de RotoDynamic Heater (RDH) van Coolbrook, die temperaturen tot 1700°C kan bereiken. Deze technologie is toepasbaar in industriële sectoren zoals de chemische industrie en cementproductie.
- **Ammonia (low temperature heating)** richt zich juist op het bereiken van lage temperatuur warmte in de industrie op een duurzame manier door ammoniak te gebruiken in industriële ovens in plaats van gas. Verbranding van ammoniak heeft geen CO<sub>2</sub>-uitstoot, maar wel hogere NO<sub>x</sub>-emissies.

### 3.2.6.3 Overige industrie

Daarnaast zijn er technologieën die zich richten op het terugwinnen en winnen van materialen, evenals het verminderen van verspilling. Deze innovaties dragen uiteindelijk bij aan een lager energieverbruik en minder uitstoot.

**X-ray transmission for recycling** scheidt ferrometalen van non-ferrometalen door hun magnetische eigenschappen en dichtheid. Röntgenstralen worden geabsorbeerd afhankelijk van de dichtheid van het materiaal, waardoor het apparaat materialen kan herkennen en sorteren, zelfs zeer kleine deeltjes. Dit maakt het proces zeer efficiënt voor recyclingdoeleinden.

**Molten oxide electrolysis (MOE)** is een elektro-metallurgisch proces dat vloeibaar metaal direct uit geoxideerde grondstoffen produceert. Elektronen fungeren als reductiemiddelen, en de reactieproducten zijn puur metaal en zuurstof. Deze technologie kan waardevolle metalen terugwinnen uit mijnbouwafval, wat bijdraagt aan duurzaamheid en efficiëntie in de mijnbouwsector.

**Folding-shearing** past de mechanica van spinnen toe op plaatmetaalvorming. Het proces begint met het vouwen van een metalen plaat langs zijn as, waarna de plaat wordt uitgetrokken om de breedte te verminderen zonder de dikte te verkleinen. In plaats van materiaal weg te snijden, zoals bij traditionele methoden, wordt bij metaalspinnen het hele

metalen schijfje gebruik. Dit kan het metaalafval bij autoproductie met twee-derde verminderen.

**Ring rolling with variable wall thickness** gebruikt controle van roloeningen en snelheden om variabele wanddiktes van metalen ringen te bereiken. Dit kan het materiaalverlies met ongeveer de helft verminderen in vergelijking met conventionele processen. Toepassingen zijn onder andere luchtvaartmotoren, roterende machines, lagers en pijpen. Deze technologie biedt aanzienlijke voordelen in termen van materiaalbesparing en efficiëntie.

### 3.2.6.4 IJzer en staal

De volgende innovaties rondom de productie van ijzer en staal hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Based on 100% electrolytic hydrogen (DRI)
- Using ammonia as reductant (DRI)
- Based on biogenic reduction gas (DRI)
- Physical adsorption (DRI)
- Conversion of steel offgases to chemicals (blast furnace)
- Electrolytic hydrogen partially replacing injected coal (blast furnace)
- Chemical absorption - Process gas hydrogen enrichment and CO<sub>2</sub> removal for use or storage (blast furnace)
- Low temperature electrolysis
- High temperature molten oxide electrolysis
- Carbon recycling through thermochemical coupling
- Reduction via alkali metal looping
- Smelting reduction based on hydrogen plasma
- Charge and Injection carbon substitution with biomass sources
- Hydrogen for high-temperature heat for ancillary steelmaking processes
- Plasma torches for iron ore pelletisation
- CCUS (smelting)

Vier innovaties richten zich op het Direct Reduced Iron (DRI) proces. In het DRI-proces wordt ijzererts gereduceerd tot ijzer. Dit zorgt voor een efficiënter en ook schoner proces dan de conventionele methode en elimineert het gebruik van fossiele brandstoffen geheel of gedeeltelijk.

- **Based on 100% electrolytic hydrogen (DRI)** richt zich op het direct reduceren van ijzererts tot ijzer, met behulp van 100% groene waterstofgas in plaats van aardgas of kolen. Dit proces kan hoogwaardig erts gebruiken dat is gevormd tot directe reductie pellets, of varianten die technologieën zoals gefluidiseerde bedden gebruiken om ijzerertsfijn te verwerken.
- **Using ammonia as reductant (DRI)** houdt in dat ammoniak direct wordt gebruikt om ijzererts te reduceren tot staal, zonder dat het eerst moet worden omgezet in waterstof.
- **Based on biogenic reduction gas (DRI)** maakt gebruik van een reductiemiddel van biologische oorsprong dat de fossiele CO<sub>2</sub>-uitstoot bij de ijzerproductie elimineert.
- **Physical adsorption (DRI)** richt zich op het verminderen van CO<sub>2</sub>-uitstoot bij direct gereduceerde ijzer (DRI) installaties, waar ijzererts wordt gereduceerd tot ijzer zonder te smelten met aardgas of kolen. Fysische adsorptie-gebaseerde CO<sub>2</sub>-afvang houdt in dat CO<sub>2</sub>-moleculen worden opgevangen op het oppervlak van selectieve materialen, zogenaamde adsorbenten. Het vrijmaken van CO<sub>2</sub> van het oppervlak kan worden bereikt door drukschommelingsadsorptie (PSA) bij hoge druk, of vacuümschommelingsadsorptie (VSA) bij normale druk. Er bestaat ook een hybride configuratie, bekend als

vacuümdrukschommelingsadsorptie (VPSA). Het voordeel van DRI ten opzichte van hoogovens, zelfs bij het gebruik van fossiele brandstoffen, is dat het nog steeds de CO<sub>2</sub>-uitstoot vermindert.

Drie innovaties richten zich specifiek op het verduurzamen van hoogovens die vooral op kolen werken. Ze zorgen niet dat het gebruik van kolen verdwijnt, maar dat het proces schoner verlopen kan worden.

- **Conversion of steel offgases to chemicals (blast furnace)** is een innovatie die het recyclen van afvalgasen uit staalfabrieken, zoals hoogovengas en cokesovengas (die o.a. CO, CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> bevatten), beter maakt. Dit wordt gedaan door ze om te zetten in chemicaliën. Hierdoor kan de CO<sub>2</sub> twee keer gebruikt worden en wordt de uitstoot vertraagd.
- **Electrolytic hydrogen partially replacing injected coal (blast furnace)** heeft betrekking tot het gedeeltelijk vervangen van geïnjecteerde kolen (kolen die in poedervorm of als gas in een hoogoven worden geïnjecteerd) door groene waterstof in hoogovens.
- De derde innovatie, **Chemical absorption - Process gas hydrogen enrichment and CO<sub>2</sub> removal for use or storage**, omvat het verwerken van de proces/afgassen door de CO<sub>2</sub> af te vangen en de gassen te verrijken met waterstof. Procesgassen worden opnieuw verwarmd en teruggevoerd naar de hoogoven, terwijl CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en opgeslagen of omgezet voor hergebruik. Deze technologie kan als retrofit op bestaande hoogovens worden toegepast.

Twee innovaties maken gebruik van elektriciteit om metaal direct uit grondstoffen te produceren. Ze kunnen zo ontworpen worden om te reageren op de belasting van het elektriciteitsnet of te reageren op de beschikbaarheid van variabele hernieuwbare energiebronnen.

- **Low temperature electrolysis** maakt gebruik van hernieuwbare elektriciteit om ijzeroxiden (de grondstof voor staal) om te zetten in zuiver staal. Dit gebeurt bij lage temperaturen (<110°C) en in een waterige oplossing. Deze innovatie bevindt zich in een veel eerder ontwikkelingsstadium vergeleken met andere technologieën voor staalproductie met lage emissies.
- **High temperature molten oxide electrolysis** maakt gebruik van gesmolten oxide-elektrolyse (MOE), is een elektrometallurgisch proces waarbij vloeibaar metaal direct uit oxidegrondstoffen wordt geproduceerd. Elektronen fungeren als reductiemiddelen, en de producten van de reactie zijn puur metaal en zuurstof. Het staalproductieproces vereist zeer hoge temperaturen tot 2000 °C.

Verder zijn er verschillende innovatieve technologieën die bijdragen aan een duurzamere staalproductie. Deze technologieën richten zich op het verminderen van CO<sub>2</sub>-uitstoot en het efficiënter gebruik van grondstoffen.

**Carbon recycling through thermochemical coupling** vangt koolstofdioxide op die vrijkomt bij het verbranden van cokes en splitst deze in koolstofmonoxide en zuurstof met behulp van warmte. Het koolstofmonoxide kan opnieuw worden gebruikt in het staalproductieproces, wat de behoefte aan nieuwe cokes vermindert en de uitstoot van koolstofdioxide verlaagt.

**Reduction via alkali metal looping** gebruikt alkalimetalen zoals natrium of kalium in plaats van koolstof om ijzer uit ijzererts te halen. Deze metalen scheiden de zuurstof van het ijzer en worden vervolgens gerecycled, waardoor het proces opnieuw kan beginnen in een gesloten kringloop.

**Smelting reduction based on hydrogen plasma** gebruikt waterstof in een plasmatoestand om ijzeroxiden om te zetten in zuiver staal. Dit gebeurt door een elektrische straal te creëren tussen een speciale elektrode en het vloeibare ijzeroxide. Deze technologie bevindt zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium.

**Charge and Injection carbon substitution with biomass sources** vermindert de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij het gebruik van een elektrische boogoven door biogene koolstofbronnen zoals biomassa te gebruiken in plaats van traditionele koolstofbronnen. Biomassa kan de fossiele CO<sub>2</sub>-emissies die vrijkomen, verminderen of vermijden.

**Hydrogen for high-temperature heat for ancillary steelmaking processes** gebruikt waterstof om hoge temperaturen te leveren voor ondersteunende processen in de staalproductie, zoals afwerkingsprocessen en materiaal-voorverwarming, en vervangt de kleine hoeveelheid aardgas in elektrische boogovens.

**Plasma torches for iron ore pelletisation** gebruikt elektrische energie via een gasontlading om een plasma te vormen, dat vervolgens de energie overdraagt aan het te verwarmen product. Plasmatoortsen kunnen hoge temperaturen genereren en worden ingezet om geëlektrificeerde warmte te leveren in ijzererts-pelletisatieovens.

**CCUS (smelting)** richt zich op een nieuwe zuurstofrijke smeltreductie voor de productie van staal. Hierbij wordt ijzererts bovenin een reactor geïnjecteerd en poederkool onderin. De poederkool reageert met het gesmolten erts om vloeibaar ijzer te produceren. Het gebruik van zuivere zuurstof zorgt voor een hoge concentratie CO<sub>2</sub>-afvalgassen die via één schoorsteen afgevangen kunnen worden. Na afvang kan deze CO<sub>2</sub> worden opgeslagen of hergebruikt.

### 3.2.6.5 Pulp en papier

De volgende innovaties rondom de productie van pulp en papier hebben in 2024 een TRL van 7 of lager gekregen:

- Supercritical CO<sub>2</sub> drying
- Water removal without evaporation
- Mild repulping technologies
- Paper making without water
- Reduction of water in size press
- Superheated steam
- Deep eutectic solvent
- Lignin extraction-Organic solvent
- Boilers with CCUS
- Compression refining
- Innovative mechanical dewatering technologies
- Heat pumps.

De opkomende technologieën dragen bij aan een duurzamere papierproductie door het energie- en waterverbruik te verminderen. Traditionele methoden verbruiken veel energie en water, maar deze innovaties richten zich op efficiëntere processen. Ze maken gebruik van minder of zelfs geen water, biomassa en duurzamere warmtebronnen. Daarnaast zorgen sommige technologieën voor het opvangen van CO<sub>2</sub>, wat bijdraagt aan een lagere uitstoot en een milieuvriendelijker productieproces.

**Supercritical CO<sub>2</sub> drying** maakt gebruik van de unieke eigenschappen van superkritische CO<sub>2</sub> (onder hoge druk en temperatuur), dat zowel de dichtheid van een vloeistof als de diffusie-eigenschappen van een gas heeft. Dit proces vervangt stoomverwarmde cilinders door superkritisch CO<sub>2</sub> in het extractie-droogproces, waardoor water uit producten kan worden verwijderd zonder hun structuur te beschadigen.

**Water removal without evaporation** richt zich op het verwijderen van water uit papier zonder de gebruikelijke faseverandering naar verdamping. Door gebruik te maken van elektrische krachten zoals elektro-osmose, kan tot 90% van de droogenergie worden bespaard.

**Mild repulping technologies** verbeteren het repulpen van droog pulp of papier voor recycling. Door mildere technologieën te gebruiken, kan het energieverbruik tijdens het repulpen worden verminderd en wordt vezelschade beperkt, wat leidt tot minder waterretentie en lagere droogenergie. Bovendien kunnen vezelverliezen worden verminderd.

**Paper making without water** richt zich op het elimineren van water in het papiermaakproces, wat de behoefte aan drogen en daarmee het energieverbruik aanzienlijk vermindert. Het grootste probleem bij het maken van papier zonder water is het verkrijgen van sterke bindingen tussen de vezels en het droog defibreren van pulp of papier voor recycling zonder de vezels te beschadigen. Innovaties zoals het gebruik van waterig schuim in plaats van water en de productie van drooggevormde vezels zijn nog in ontwikkeling.

**Reduction of water in size press** richt zich op het verminderen van het watergehalte in de strijkmiddelen die worden gebruikt bij het maken van papier. Momenteel worden geprepareerde papierproducten eerst gedroogd en vervolgens opnieuw bevochtigd in het strijkproces, wat een tweede droogstap vereist.

**Superheated steam** wordt gebruikt in droogprocessen waarbij alleen stoom (zonder lucht) wordt gebruikt, wat volledige terugwinning van thermische energie mogelijk maakt voor gebruik in volgende processen. In plaats van hete lucht of verbrandingsgassen te gebruiken, maakt super verhitte stoom gebruik van stoom die boven zijn kookpunt is verhit. Dit zorgt voor een efficiënter droogproces omdat de warmte volledig kan worden teruggewonnen en hergebruikt. De uitdaging is om het stoomcondensatiesysteem te combineren met het natte papier/waterdampsysteem, wat geavanceerde stoomreinigingstechnologieën en oplossingen vereist om stoomlekkage te voorkomen.

**Deep eutectic solvent** maakt gebruik van zijn unieke eigenschappen om hout efficiënter te verwerken. Dit vloeibare mengsel van twee componenten heeft een ongewoon laag vriespunt en hoge oplosbaarheid van lignine, wat het geschikt maakt als nieuw oplosmiddel voor het pulpproces. Het kan pulp produceren bij lage temperaturen en atmosferische druk, wat de energiebehoefte aanzienlijk vermindert in vergelijking met traditionele chemische pulpprocessen.

**Lignin extraction-Organic solvent** richt zich op het isoleren van lignine, een bijproduct tijdens de productie van papier, uit houtpulp, wat kan worden gebruikt voor nieuwe industriële producten zoals chemicaliën of als biobrandstof in ketels of kalkovens. Een van de onderzochte methoden is oplosmiddel-gebaseerd pulpen, wat efficiënter en duurzamer is.

**Boilers with CCUS** (Carbon Capture, Utilization, and Storage) kunnen worden toegepast in de pulp- en papierindustrie om emissies van ketels die stoom produceren, evenals emissiestromen van andere ondersteunende eenheden, op te vangen. Aangezien de

industrie aanzienlijke hoeveelheden bio-energie gebruikt, is er een groot potentieel voor BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage), wat compensatie mogelijk maakt voor andere CO<sub>2</sub>-emissies. Ook kunnen afgevangen emissies worden vastgelegd in hergebruik.

**Compression refining** wordt gebruikt om vezels te verfijnen en zo voldoende vezeloppervlak te creëren voor binding, wat de sterkte van papier verhoogt. Door de schuifkrachten te verminderen met compressie-verfijning, wordt de vezelschade beperkt en de energie-efficiëntie verbeterd.

**Innovative mechanical dewatering technologies** omvatten methoden zoals ultrasoon ondersteunde ontwatering, vacuümgestuurd persen, impulsontwatering, verplaatsingspersen, stalen banden en luchtondersteunde vorming. Door slechts 1% meer water te verwijderen in de perssectie, kan het energieverbruik voor het drogen met minstens 3% worden verminderd.

**Heat pumps** omvatten hogetemperatuur-warmtepompen die efficiënter warmte kunnen leveren door gebruik te maken van afvalwarmte uit industriële processen. Om deze technologie effectief te maken in de papierindustrie, moeten zowel de warmtepompen als het maakproces van papier worden aangepast. Aanpassingen betreffen het verminderen van de hoeveelheid lucht in de droogkap om het dauwpunt te verhogen en het verlagen van de startdrukken voor stoom en dientengevolge extra stappen om de stoomdruk te verhogen tot het niveau dat nodig is in de verschillende droogsecties.

## 4 Duiding experts

De analyse van de ETP Clean Energy Technology Guide (zie hoofdstuk 3) heeft een overzicht van innovaties opgeleverd, met als doel de disruptieve innovaties te selecteren. Disrupties worden in deze context gedefinieerd als innovaties die op lange termijn (10-30 jaar) een transformatieve en substantiële impact op het energiesysteem hebben.

Voor het beoordelen van de disruptieve innovaties zijn twee assen gehanteerd: de impact op het energiesysteem en de mate van transformativiteit. Hieronder worden de vragen voor beide assen toegelicht.

### Vragen voor experts om te helpen de innovaties te scoren

Impact op het energiesysteem:

- Zal de innovatie in de toekomst op veel plekken worden toegepast als deze succesvol is?
- Heeft de innovatie een grote impact op het energiesysteem, bijvoorbeeld door veranderingen in energiestromen, lagere energiebehoefte, of verlegging van energiestromen?
- Heeft de innovatie een grote impact op de kosten, zoals lagere investeringskosten of goedkopere gebruikskosten?
- Beïnvloedt de innovatie andere systeemaspecten, zoals ruimtegebruik of kritieke materialen?
- 

Mate van transformativiteit:

- Leidt de innovatie tot echt nieuwe toepassingen ten opzichte van de huidige situatie of verwachte ontwikkelingen?
- Leidt de innovatie tot andere prestaties en toepassingen dan verwacht?
- Is de innovatie slechts een incrementele verbetering van bestaande technologie?

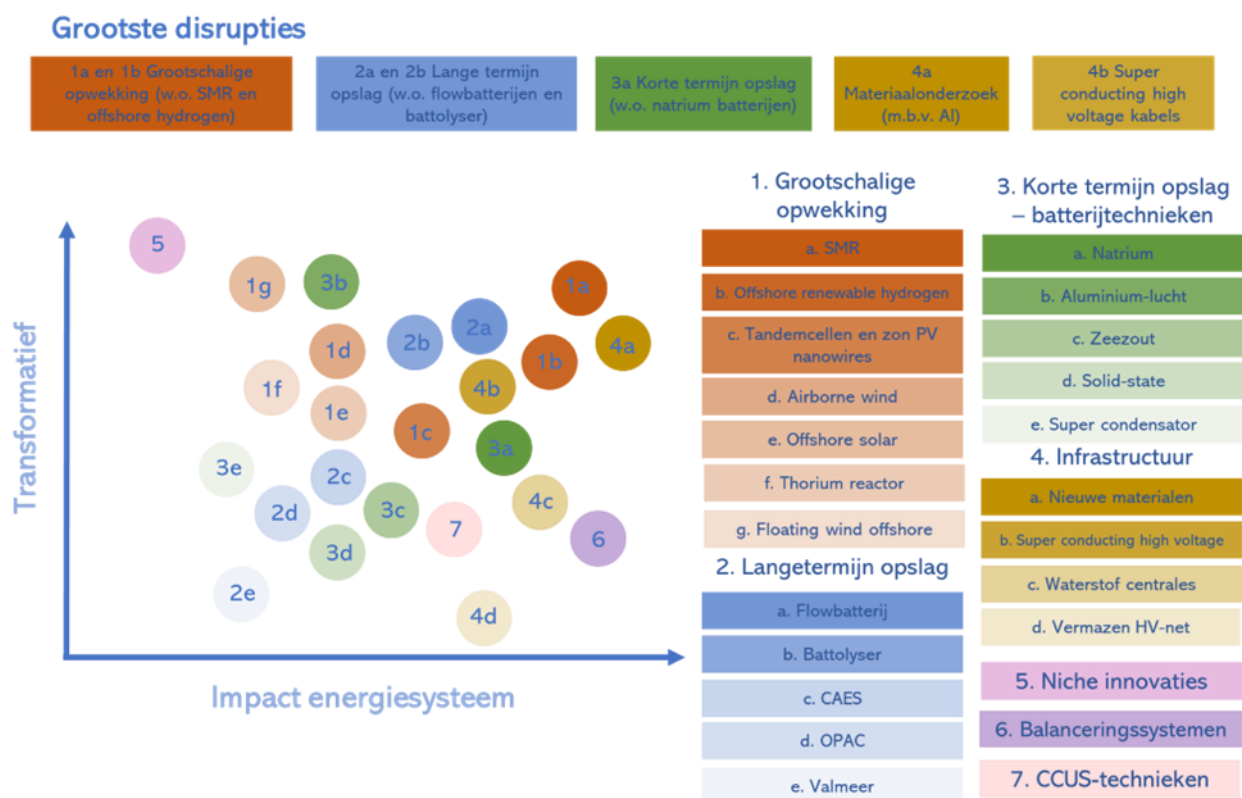
De sleutel tot het identificeren van disrupties is de beoordeling van de impact op het energiesysteem en de transformatieve aard van de innovaties. Deze beoordeling vond plaats in een workshop, waarbij experts van TNO en de Topsector Energie de innovaties hebben gerangschikt (zie bijlage C voor deelnemende experts). Daarnaast kregen de experts de mogelijkheid om het overzicht op basis van de ETP Clean Energy Technology Guide aan te vullen met innovaties uit eigen ervaring.

De workshops zijn gestructureerd langs de ketens en eindverbruikssectoren uit het Nationaal Plan Energiesysteem. Op basis van de analyse van TRANSFORM 2050 (zie hoofdstuk 2), het overzicht uit hoofdstuk 3, en de aansluiting bij de toekomstige onderzoeksagenda van TKI systeemintegratie, zijn de volgende onderwerpen geselecteerd:

- Elektriciteit
- Industrie
- Mobiliteit
- Gebouwde omgeving
- Warmte

## 4.1 Elektriciteit

In de workshop Elektriciteit zijn de opkomende technologieën en innovatieve thema's gescoord op mate van transformatie en impact op het energiesysteem. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.1. De belangrijkste technologieën en thema's zijn onderverdeeld in de categorieën lange termijn opslag, korte termijn opslag – batterijtechnieken, CCUS-technieken, niche innovaties, grootschalige opwekking, infrastructuur en balanceringsystemen. Iedere categorie wordt verder toegelicht in de rest van het hoofdstuk



**Figuur 4.1:** Resultaten ordening disrupties op mate van transformativiteit en impact op het energiesysteem van de workshop elektriciteit.

### 4.1.1 Grootschalige opwekking

*SMR's* (Small Modular Reactors) worden beschouwd als de meest transformatieve en impactvolle technologie binnen de energietransitie. Hoewel ze niet onder hernieuwbare energie vallen, hebben ze het potentieel om ons energiesysteem en de productie ervan aanzienlijk te veranderen. Echter zijn deze nog niet in de markt beschikbaar.

De ontwikkelingen rondom *thoriumreactoren* zijn ook ter sprake gekomen als transformatief en impactvol. Thoriumreactoren zijn geavanceerde kernreactoren die verschillende voordelen bieden, zoals een vrijwel onuitputtelijke brandstofvoorraad, een laag veiligheidsrisico en minder langlevend radioactief afval.

Innovaties die zonne-energie efficiënter omzetten in elektriciteit kunnen eveneens een grote impact hebben. *Tandemcellen*, die in feite 'dubbele' zonnepanelen zijn, en zon-PV nanowires, ultradunne draden van fotovoltaïsche materialen die zonlicht omzetten in elektriciteit, behoren tot deze innovaties. Beide technologieën zijn efficiënter dan traditionele zonnecellen. Tandemcellen kunnen verschillende lagen van materialen gebruiken om een breder spectrum van zonlicht te absorberen, wat leidt tot een hogere energieopbrengst. *Zon-PV nanowires* kunnen door hun kleine formaat meer licht absorberen en omzetten, wat resulteert in een verhoogde efficiëntie en flexibiliteit in toepassingen.

Een technologie die impactvol en transformatief beschouwd werd, is *airborne wind*. Hierbij wordt luchtwindenergie direct gebruikt voor de opwekking van elektriciteit door middel van een vliegersysteem. Airborne wind is zeer transformatief, maar er is nog veel te winnen op het gebied van efficiëntie en duurzaamheid. Slijtage vormt ook een groot probleem. Deze technologie staat in concurrentie met conventionele windenergieoplossingen.

Vervolgens werden drie innovaties rondom offshore-energieproductie op de kaart gezet: offshore hernieuwbare waterstof, drijvende windenergie en offshore zonne-energie. Nederland is minder actief bezig met *drijvende windenergie*, omdat de Noordzee relatief ondiep is. Drijvende windenergie is vooral interessant voor diepe zeeën. *Offshore hernieuwbare waterstof* kan voordelig zijn doordat windenergie direct wordt omgezet in waterstof. Dit kan gebruikmaken van gaspijpleidingen in plaats van kostenintensieve elektriciteitskabels, en zo de infrastructuurkosten verlagen. *Offshore zonne-energie* biedt een extra mogelijkheid voor de energietransitie en heeft het potentieel om zeer groot te worden. Ruimtelijk gezien zou dit haalbaar zijn, en er is een synergie met de kabels die toch al aangelegd moeten worden voor offshore windenergie. Belangrijk is dat de energiesystemen op zee zelfstandig moeten kunnen functioneren, zonder dat er voortdurend mensen naartoe moeten. Voor al de bovenstaande technologieën geldt dat offshore apparatuur snel slijt.

## 4.1.2 Lange termijn opslag

Lange termijn opslag in deze context is het type opslag dat tussen seizoensopslag (1 of enkele cycli per jaar) en korte termijn opslag (bijna dagelijkse cyclus) in zit. Het belang van deze meerdaagse opslag en de realisatie hiervan is cruciaal voor onze energietransitie, omdat dit goed aansluit bij het aanbodprofiel van windenergie. Op momenten dat hernieuwbare energie in overvloed wordt geproduceerd, moeten we deze kunnen opslaan om een buffer te creëren en tekorten te voorkomen. Conventionele batterijen kunnen bij langere periodes van overschotten of tekorten niet in deze behoefte voorzien. Toch zijn er vijf technologieën geïdentificeerd als potentieel impactvol die dit wel kunnen.

Twee technologieën zijn als meest disruptief geïdentificeerd. *Flowbatterijen* kunnen grote hoeveelheden energie opslaan en zijn ideaal voor grootschalige energieopslag. Door de grootte van de tanks aan te passen, kan de verhouding tussen opslagcapaciteit en vermogen relatief kosteneffectief worden aangepast, waardoor de opslagcapaciteit geschikt wordt voor enkele dagen. *Battolysers* combineren elektriciteitsopslag en waterstofproductie in één systeem, waardoor overtollige energie direct in waterstof kan worden omgezet.

Daarnaast werd *CAES (Compressed Air Energy Storage)* genoemd, waarbij lucht wordt gecomprimeerd in een vat om energie op te slaan. Ook *OPAC (Ondergronds Pomp Accumulatie Centrale)*, een grootschalig ondergronds valmeer voor elektrische energie,

werd benoemd. Het voordeel van dit systeem is dat het grotendeels ondergronds opereert en dus een beperkte ruimtelijke component bovengronds heeft.

Tot slot werd het concept van een *Valmeer* besproken. Hoewel er twijfel bestaat over de haalbaarheid hiervan in Nederland, biedt het wel mogelijke oplossingen.

### 4.1.3 Korte termijn opslag

In de batterijenindustrie lopen we tegen verschillende uitdagingen aan, zoals de behoefte aan veiligheid, de beschikbaarheid van grondstoffen en hogere energiedichtheden (bij mobiliteitstoepassingen). *Natriumbatterijen* hebben een lagere energiedichtheid dan lithiumbatterijen, maar kunnen een grote impact hebben omdat natrium veel beter beschikbaar is, waardoor de batterijen goedkoper kunnen worden. De potentie van *zeezoutbatterijen* is om dezelfde reden benoemd; zeezout is in grote hoeveelheden beschikbaar en deze batterij is meer ecologisch en veiliger dan traditionele lithium-ion batterijen, omdat ze geen zware metalen bevatten. Deze technologie bevindt zich echter al lange tijd in de pilotfase.

Voor stationaire toepassingen en systeembatterijen gelden vaak andere eisen met betrekking tot energiedichtheid. Juist daarom kunnen deze innovaties interessant zijn voor deze toepassingen. Hoewel natriumbatterijen en zeezoutbatterijen een lagere energiedichtheid hebben, bieden ze voordelen zoals betere beschikbaarheid van grondstoffen, lagere kosten en verbeterde veiligheid, wat ze aantrekkelijk maakt voor stationaire energieopslag.

*Solid-state batterijen* nemen veiligheidsrisico's weg bij lithiumbatterijen en zouden een grote verbetering kunnen zijn voor elektriciteitssystemen. Ze hebben een grotere energieopslagcapaciteit dan natriumbatterijen, maar zijn momenteel wel duurder. Ook de supercondensator werd gezien als een technologie die een grotere rol kan spelen in korte termijn opslag. Deze biedt verliesvrij opladen en ontladen van grote vermogens, vergelijkbaar met een batterij, maar met weinig energie-inhoud en kan in één keer volledig ontladen.

Daarnaast werd de ontwikkeling van *aluminium-lood* batterijen besproken. Deze batterijen hebben een hogere energiedichtheid dan traditionele loodzuuraccu's, wat betekent dat ze meer energie kunnen opslaan per volume-eenheid. Ze zijn relatief goedkoop te produceren, vooral in vergelijking met lithium-ion batterijen, en hebben een lange levensduur.

### 4.1.4 Infrastructuur

Op het gebied van infrastructuur zijn er twee innovaties die in de toekomst een disruptieve invloed kunnen hebben.

*Super conducting high voltage-kabels* zouden het mogelijk maken om langere kabelverbindingen te leggen zonder energieverlies – en daarmee continentaal of zelfs interncontinentale uitwisseling mogelijk maken. Het zou een radicale ontwikkeling zijn als deze zo ontwikkeld kunnen worden dat ze betaalbaar worden. Dit zou de integratie van duurzame energie op een heel ander geografisch niveau mogelijk maken.

Het *vermazen van hoogspanningsnetwerken*, waarbij meerdere energiesystemen in één land worden geïntegreerd, is een complexe maar veelbelovende innovatie. Duitsland is al bezig met het implementeren van dergelijke systemen, wat kan leiden tot een stabiel en efficiënter elektriciteitsnet.

## 4.1.5 Niche innovaties

Onder niche innovaties vallen drie technologieën die niet vaak op de radar komen in de energietransitie: thermo-elektriciteit, DC-microgrids en hybride waterstof brandstofcel-turbinesystemen.

*Thermo-elektriciteit* verwijst naar het proces waarbij warmte direct wordt omgezet in elektriciteit door gebruik te maken van het thermo-elektrisch effect. Dit effect treedt op wanneer er een temperatuurverschil ontstaat tussen twee verschillende materialen, wat een elektrische stroom genereert. Met de huidige ontwikkelingen wordt het rendement van deze technologie steeds aantrekkelijker.

*DC-microgrids* bieden aanzienlijke voordelen. Zo kan lokaal opgewekte zonne-energie direct worden gebruikt om bijvoorbeeld een lamp aan te zetten. Nadelen van DC (direct current) zijn echter de veiligheid, het spanningsverlies bij te veel afname en de gevoeligheid voor storingen. AC (alternate current)-netwerken hebben daarentegen energieverlies en communicatieproblemen via het net zelf, waarbij de frequentie daalt als er te veel wordt afgenomen. Voor DC is het noodzakelijk om de infrastructuur, vooral in huizen, aan te passen.

Bij *hybride waterstof brandstofcel-turbinesystemen* wordt brandstof in een vaste-oxide brandstofcel (SOFC) omgezet in elektriciteit. Deze technologie is al 15 jaar onderwerp van gesprek. De grote vraag die hierbij speelt, is hoe we betaalbare elektrolyzers kunnen verkrijgen om waterstof te produceren.

## 4.1.6 Balanceringsystemen

Systemen die de balans van ons elektriciteitsnet kunnen optimaliseren, zijn van groot belang. Een *Energie Management Systeem (EMS)* is een combinatie van hardware en software die wordt gebruikt om het energieverbruik van een gebouw, industriële installatie of huishouden te meten, te analyseren en te optimaliseren. Door gegevens te verzamelen en te analyseren, helpt een EMS bij het identificeren van inefficiënt energieverbruik en stelt het gebruikers in staat om gerichte maatregelen te nemen om dit te verbeteren.

*Transactive energy* draagt bij aan een betere distributie van lokaal opgewekte energie door consumenten onderling energie te laten uitwisselen binnen een bestaand elektriciteitssysteem. Dit wordt gedaan door middel van digitale monitoring en controle technieken, waardoor een dynamische en efficiënte uitwisseling van energie mogelijk wordt. Deze aanpak biedt een kans voor betere netstabiliteit en een optimaal gebruik van hernieuwbare energiebronnen.

*Waterstofcentrales* hebben het potentieel om groot en impactvol te zijn. Ze kunnen een belangrijke rol spelen in de productie van opslagen hernieuwbare energie, waardoor de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen vermindert en de CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt verlaagd.

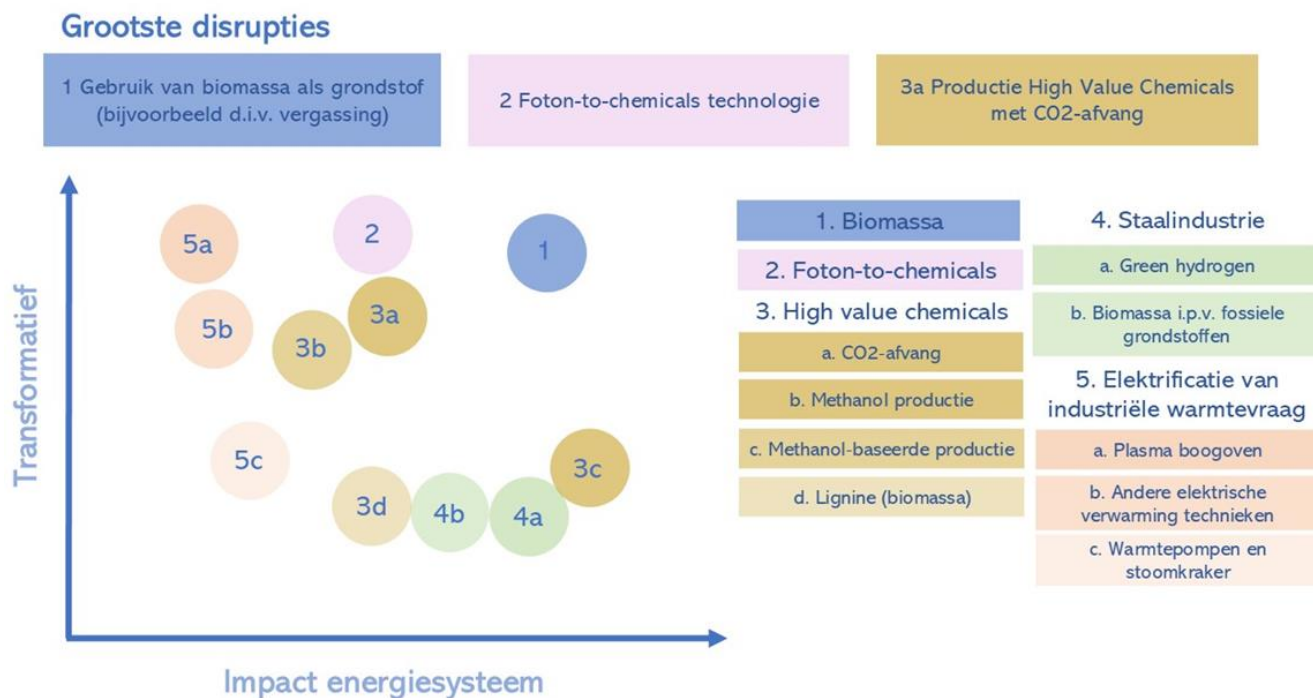
### 4.1.7 Overige

Het gebruik van *nieuwe materialen* kan een grote rol spelen in onze energietransitie. Onze afhankelijkheid van bepaalde schaarse materialen is ongunstig voor een stabiel energiesysteem. Materiaalonderzoek is in de regel arbeidsintensief, omdat het doen van labtests tijdsrovend is. AI-modellen zouden een veelbelovende en impactvolle innovatie kunnen zijn om veel sneller nieuwe materialen te ontwikkelen.

Om onze klimaatdoelen te behalen, is er een interesse in *CCUS-technologieën* (Carbon Capture, Utilization, and Storage). Deze technologieën kunnen worden gecombineerd met biomassa, maar ook met fossiel gestookte energiecentrales. Ook buiten de elektriciteitssector kan CCUS worden toegepast. Op korte termijn kan CCSUS zeer impactvol zijn. Efficiëntere technieken zijn hierbij van groot belang. Volgens experts is het essentieel om CCUS op grotere schaal toe te passen om onze klimaatdoelen te bereiken. De IEA heeft verschillende technologieën genoemd die veelbelovend zijn voor ons energiesysteem, zoals pre-combustion fysieke absorptie, post-combustion polymeer membranen en oxyfueling.

## 4.2 Industrie

In de workshop Industrie zijn de opkomende technologieën en innovatieve thema's gescoord op mate van transformatie en impact op het energiesysteem. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.2. De belangrijkste technologieën en thema's zijn onderverdeeld in de categorieën biomassa, staalindustrie, high value chemicals, elektrificatie van warmtevraag en foton to chemicals. Iedere categorie wordt verder toegelicht in de rest van het hoofdstuk.



**Figuur 4.2:** Resultaten ordening disrupties op mate van transformativiteit en impact op het energiesysteem van de workshop industrie

Tijdens de workshop werd benadrukt dat sommige innovaties vooral als tussenstappen dienen op weg naar een echt duurzame oplossing, maar dat maakt ze niet minder waardevol. Tussenstappen zijn zeker nodig in de industrie, die momenteel afhankelijk is van fossiele brandstoffen, en er kunnen al grote winsten worden behaald met deze oplossingen.

## 4.2.1 Biomassa

Biomassa speelt een cruciale rol in het verduurzamen van de industrie, hoewel het momenteel nog beperkt wordt gebruikt. Biomassa bevat zowel koolstof als waterstof, wat het geschikt maakt voor brandstofproductie. Het verhogen van het gebruik van biomassa in de industrie kan een aanzienlijke invloed hebben op ons energiesysteem door de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen. Dit vereist echter nog veel ontwikkelingen in de aanvoerketen van biomassa om het aanbod te vergroten en de kosten te verlagen.

*Vergassing van biomassa* wordt als de belangrijkste route geïdentificeerd. Hoewel dit proces energie-intensiever is dan andere methoden, zoals pyrolyse of solvolyse, biedt het een robuustere oplossing voor verontreinigingen in de biomassa. Twee veelbelovende innovaties richten zich op de voorbereiding van biomassa om de grondstof geschikt te maken voor vergassing:

- **Torrefactie:** Dit thermochemisch proces verhit biomassa, zoals hout of landbouwafval, tot temperaturen tussen 200 en 400°C in een zuurstofvrije omgeving om bio-kool te produceren.
- **TORWASH:** Deze technologie maakt gebruik van hydrothermale carbonisatie (HTC) om natte biogene grondstoffen om te zetten in hoogwaardige vaste brandstoffen zonder een energie-intensieve droogstap.

Een andere veelbelovende technologie is *hydrothermal upgrading (HTU)*, waarbij biomassa wordt omgezet in biocrude, een viskeuze vloeistof die lijkt op zware stookolie. Dit proces vindt plaats onder hoge temperatuur (ongeveer 330°C) en druk (150-180 bar) in aanwezigheid van water.

## 4.2.2 Foton to chemicals

De technologie van *foton to chemicals* maakt gebruik van fotonen (lichtdeeltjes) om chemische reacties te stimuleren zonder dat er een koolwaterstofbron of CO<sub>2</sub> nodig is om warmte te genereren. Dit proces is efficiënter dan elektrolyse omdat het direct energie uit licht gebruikt om chemische reacties te laten plaatsvinden. Innovatieve toepassingen van foton to chemicals kunnen worden gebruikt in verschillende industriële processen, zoals de productie van methanol en andere high-value chemicals, wat helpt bij het ontwikkelen van duurzamere productiemethoden en het verminderen van de afhankelijkheid van traditionele energiebronnen. TNO is onder andere bezig met de ontwikkeling van deze technologie.

## 4.2.3 High value chemicals

High-value chemicals zijn chemische bouwstenen die specifieke functies vervullen en essentieel zijn voor diverse industriële toepassingen. Ze dragen bij aan innovatie, economische waarde en milieuvriendelijkheid door hun unieke eigenschappen en

veelzijdigheid. Deze chemicaliën worden gebruikt in de productie van hoogwaardige materialen, zoals kunststoffen, farmaceutische producten en schoonmaakmiddelen. Innovaties richten zich erop om de benodigde procesenergie CO<sub>2</sub>-vrij te leveren, en om over te schakelen op duurzame grondstoffen. Innovaties rondom het *afvangen van CO<sub>2</sub>* bij de productieprocessen hiervan kunnen impactvol zijn, maar vereisen enige transformatie. Technieken die hierbij worden genoemd zijn *fysische absorptie* en *chemische absorptie*.

Daarnaast is er een innovatie die de productie van HVC's verduurzaamt door het gebruik van methanol. *Methanol* als basisstof in de industrie wordt gezien als een mooie oplossing door de experts, omdat deze geproduceerd kan worden uit biomassa of uit CO<sub>2</sub> en groene waterstof. Een innovatie gebruikt methanol om andere high-value chemicals zoals aromaten (o.a. benzeen, toluen en xylenen) te produceren via een *katalytisch proces*. Ook het gebruik van *lignine*, een bestanddeel van planten, om aromaten te produceren via een chemische reactie of filtratieproces kan een belangrijke oplossingsroute zijn.

## 4.2.4 Staalindustrie

Het belang van het verduurzamen van de staalindustrie is duidelijk. Staal blijft een essentieel materiaal. Daarnaast wordt het in het huidige geopolitieke tijdsgewricht belangrijker om deze industrie in Europa te behouden. Het recyclen van staal kan aanzienlijk worden verbeterd en een belangrijke rol gaan spelen. Er blijft echter vraag naar vergin staal, omdat er ook vraag is naar hoogwaardig staal – wat niet uit gerecycled staal kan worden vervaardigd, zoals in de auto-industrie. Ook is er niet voldoende scrap materiaal beschikbaar. Daarom is het noodzakelijk om het productieproces van staal zo schoon mogelijk te maken. De belangrijkste route om de staalindustrie structureel te verduurzamen is daarom het gebruik van een *directe reductie installatie (DRI)*, waarbij ijzererts met waterstof wordt gereduceerd in plaats van met steenkool. Het *invoeden van biomassa* kan een belangrijke rol spelen in het verduurzamen van de huidige hoogoveninstallaties – als tussenoplossing tot alle installaties op waterstof werken. Daarnaast zijn kleine hoeveelheden koolstof nodig om de staal haar materiaaleigenschappen te geven – hetgeen ook in biogene koolstof kan worden voorzien.

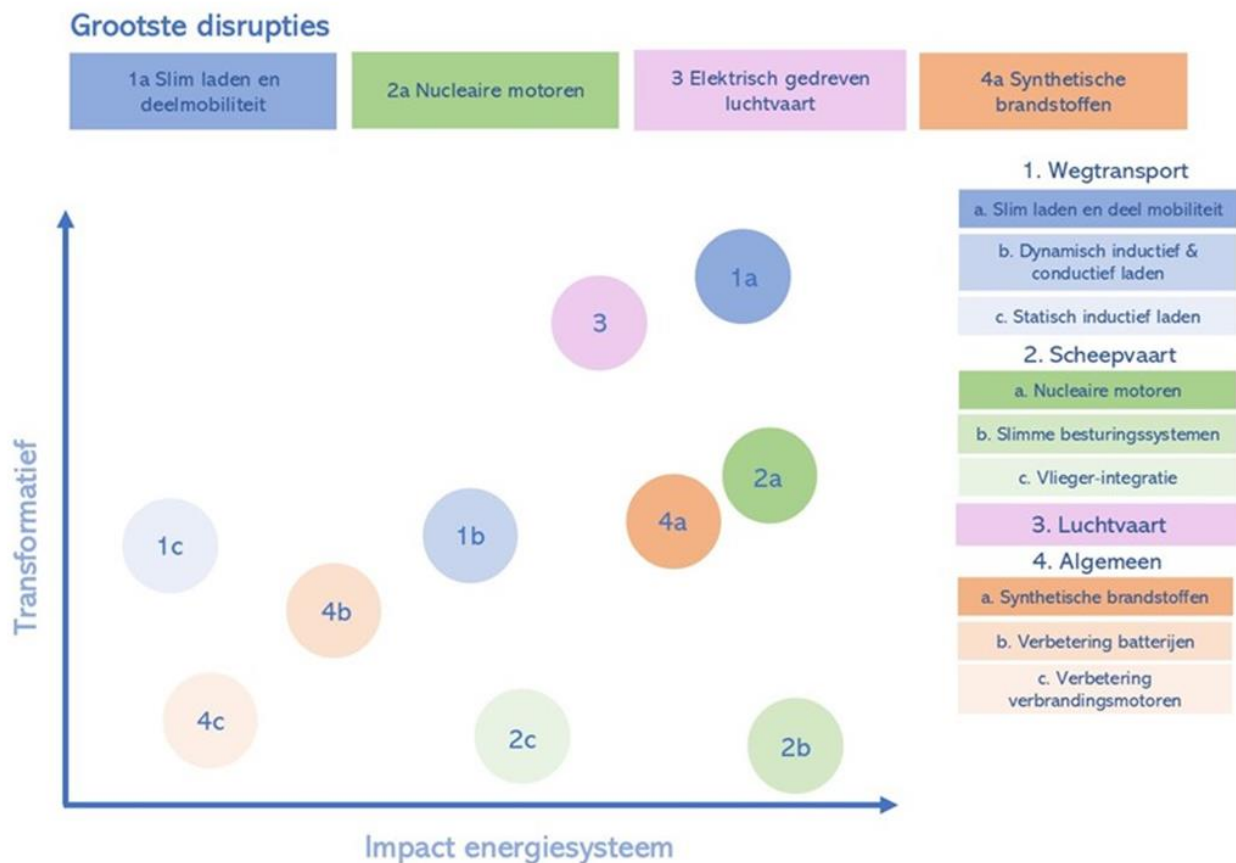
## 4.2.5 Industriële warmtevraag

Tijdens de workshop werd het belang van elektrificatie van de industriële warmtevraag benadrukt. Momenteel is ongeveer 80% van de energievraag in de industrie gericht op warmte. Innovaties zoals *warmtepompen*, die temperaturen tussen de 200-350 graden Celsius kunnen bereiken, zijn mogelijke oplossingen. Ook het *elektrificeren van stoomkrakers* werd besproken als een belangrijke tussenstap naar een fossielvrije industrie, totdat duurzame koolstof uit biomassa de rol van nafta, een bijproduct van olie, overneemt. Het elektrificeren van *plasma-ovens*, die temperaturen tot wel 5000 graden Celsius kunnen bereiken, kan eveneens een positieve impact hebben. Gezien de enorme warmtevraag in de industrie is de ontwikkeling van andere elektrische verwarmingsmethoden ook cruciaal. Elektrificatie van de warmtevraag vereist wel transformatie, maar kan een belangrijke tussenstap zijn naar een duurzame industrie.

Een alternatieve route voor het verduurzamen van de industriële warmtevraag is via kernenergie, en in het bijzonder *SMR's*. Naast het produceren van elektriciteit kunnen deze ook worden ingericht voor het leveren van industriële warmte, of voor beide in de vorm van een flexibele warmte-kracht koppeling.

## 4.3 Mobiliteit

De resultaten van de workshop ‘Mobiliteit’ zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.3. De technologieën en thema’s zijn onderverdeeld in de categorieën wegtransport, scheepvaart, luchtvaart en algemeen, waarbij ‘algemeen’ van toepassing is op alle drie de categorieën.



**Figuur 4.3:** Resultaten ordening disrupties op mate van transformativiteit en impact op het energiesysteem van de workshop mobiliteit.

Tijdens de besprekingen zijn enkele belangrijke trends in mobiliteit naar voren gekomen. Deze trends omvatten elektrificatie, diversiteit in vervoersmodaliteiten, deelmobiliteit, sociale cohesie en circulaire economische en logistieke processen. Elk van deze trends speelt een cruciale rol in het waarborgen van de energietransitie en een stabiele mobiliteit in de toekomst.

### 4.3.1 Wegtransport

De ontwikkelingen op het gebied van slim laden en deelmobiliteit voor wegtransport worden beschouwd als de meest transformatieve en impactvolle innovaties in de mobiliteit. Een belangrijk voorbeeld hiervan is de door de IEA benoemde technologie ‘smart charging’. Deze technologie integreert IT-systemen in elektrische voertuigen om het opladen gecoördineerd

en beheerd te laten verlopen, waarbij rekening wordt gehouden met de balans van het elektriciteitsnet. Hierdoor kan piekbelasting worden vermeden door op te laden wanneer er voldoende aanbod is. Slimme laadmethoden kunnen een grote bijdrage leveren aan ons energiesysteem, aangezien elektrische voertuigen een aanzienlijk deel van de elektriciteitsvraag uitmaken. Dit vereist veranderingen in zowel besturingssystemen als gebruikersgedrag. Hoewel deze technologie ook toepasbaar is bij elektrische schepen, zal slim laden vanwege de lage elektrificatiesnelheid in de scheepvaart momenteel het meest disruptief zijn voor wegtransport.

Daarnaast zullen ontwikkelingen in systemen die deelmobiliteit bevorderen in de toekomst essentieel zijn om mobiliteit te waarborgen. Initiatieven zoals de '15-minutenstad', die als doel heeft om alles binnen 15 minuten bereikbaar te maken, en 'smart cities', die zich richten op slimme infrastructuur en digitaal verbonden voertuigen, zullen in de toekomst een grote impact hebben en veranderingen vereisen in de huidige manier van transport. Er wordt steeds meer aandacht besteed aan 'connected automated mobility', waarbij vrachtwagens met elkaar en met het elektriciteitsnet worden verbonden. Dit maakt het mogelijk om vrachtwagens op gunstige momenten te laten stoppen en te laten opladen, wat de efficiëntie en coördinatie verbetert. Deelmobiliteit, de 15-minutenstad en smart cities streven naar een efficiënt gebruik van transportmiddelen, wat de vraag naar energie vermindert door de vraag naar mobiliteit te verminderen.

Daarnaast werd de rol van inductief laden besproken. De door de IEA benoemde technologie 'inductive charging' omvat deze ontwikkelingen. Inductief laden, oftewel draadloos opladen, kan zowel statisch als dynamisch worden toegepast. Inductief laden vergt het aanleggen van nieuwe oplaadpunten, maar kan het opladen van elektrische voertuigen vergemakkelijken en versnellen. Dynamisch laden kan zelfs een grotere impact hebben dan statisch laden, omdat voertuigen tijdens het rijden kunnen worden opgeladen door integratie van laadtechnologie in de wegen. ERS (electric road systems) conductief dynamisch laden werd door de experts ook genoemd als een ontwikkeling waarbij mobiele voertuigen tijdens het rijden verbonden zijn met leidingen om opgeladen te worden.

## 4.3.2 Scheepvaart

Een belangrijke verduurzamingsroute voor de scheepvaart zijn biobased en synthetische brandstoffen. De productie hiervan wordt besproken binnen valt in het kader van deze studie in de koolstofketen, en dus buiten de scope van de workshops.

Het belang van nucleaire motoren in de scheepvaartindustrie en de potentie ervan wordt benadrukt als een belangrijke ontwikkeling. Verschillende partijen zijn begonnen met onderzoek naar deze technologie, geïnspireerd door het gebruik van nucleaire motoren in onderzeeërs. Hoewel veiligheid en langlevend kernafval belangrijke aandachtspunten zijn, zou de toepassing van nucleaire motoren een grote impact kunnen hebben op de scheepvaart. Dit komt doordat schepen vaak krachtige motoren nodig hebben voor lange afstanden, hetgeen lastig in te vullen is met elektrische motoren.

Het consortium NuclearDrive, waar TNO bij aangesloten is, kijkt niet alleen naar de aandrijving van schepen, maar ook naar toepassingen op platforms. Dit biedt een breed scala aan mogelijkheden voor het gebruik van kernenergie in de maritieme sector. Bij kernreactoren wordt de aandrijving gerealiseerd met stoom- of gasturbines, wat een efficiënte en krachtige oplossing biedt voor zowel schepen als platforms. Kernreactoren

worden immers vaak geassocieerd met elektriciteitsproductie, maar hun potentieel reikt verder.

Daarnaast kan de integratie van nieuwe besturingssystemen in schepen, die zorgen voor constantere snelheden, weersomstandigheden in acht nemen en efficiëntere routes plannen, leiden tot een lager energieverbruik. De IEA heeft hiervoor de technologie 'automated and connected ship' benoemd, wat wordt gezien als een impactvolle en relatief eenvoudig te implementeren innovatie voor de scheepvaart.

Een andere door de IEA benoemde technologie is de 'kite', waarbij grote vliegers worden geïntegreerd bij grote schepen om meer gebruik te maken van windenergie en zo energie te besparen. Omdat het gebruik van vliegers bij schepen al bekend is, kan deze technologie op een laagdrempelige manier bijdragen aan energiebesparing.

### 4.3.3 Luchtvaart

Een belangrijke verduurzamingsroute voor de luchtvaart zijn biobased en synthetische brandstoffen. De productie hiervan wordt besproken binnen valt in het kader van deze studie in de koolstofketen, en dus buiten de scope van de workshops.

De ontwikkelingen richting een duurzame luchtvaart worden als essentieel beschouwd voor het toekomstige mobiliteitssysteem. Veel commerciële partijen, zoals Amazon, zijn al bezig met de integratie van drones voor pakketbezorging. Dit kan een grote impact hebben op ons energiesysteem, vooral als het gebruik maakt van duurzame energie en efficiënt is (niet afhankelijk van wegen). Dit vereist echter een grote transformatie in onze maatschappij: van bestelwagens naar bezorgdrones. Daarnaast worden de opties voor elektrisch en hybride vliegen in de toekomst gezien als impactvolle transformaties. Op dit gebied is het geen gegeven dat dit wenselijke ontwikkelingen zijn, bijvoorbeeld met het oog op energie-efficiëntie, het aanjagen van consumptie en extra transport en het geluidsoverlast (in het geval van bezorgdrones). Ook is het geen gegeven dat elektrisch vliegen ook voor grotere vliegtuigen en langere afstanden beschikbaar komt.

### 4.3.4 Algemeen

Binnen de drie bovengenoemde categorieën zijn er enkele ontwikkelingen die voor alle categorieën relevant zijn. In de gehele mobiliteitssector worden een aantal hoofdrends als zeer transformatief beschouwd.

Elektrificatie is een belangrijke transformatie die nu al een grote rol speelt. Daarnaast zijn de diversiteit in modaliteiten en de trend van deelmobiliteit cruciaal binnen de nieuwe technologieën die worden ontwikkeld, evenals het beleid en de aanpassingen in de infrastructuur.

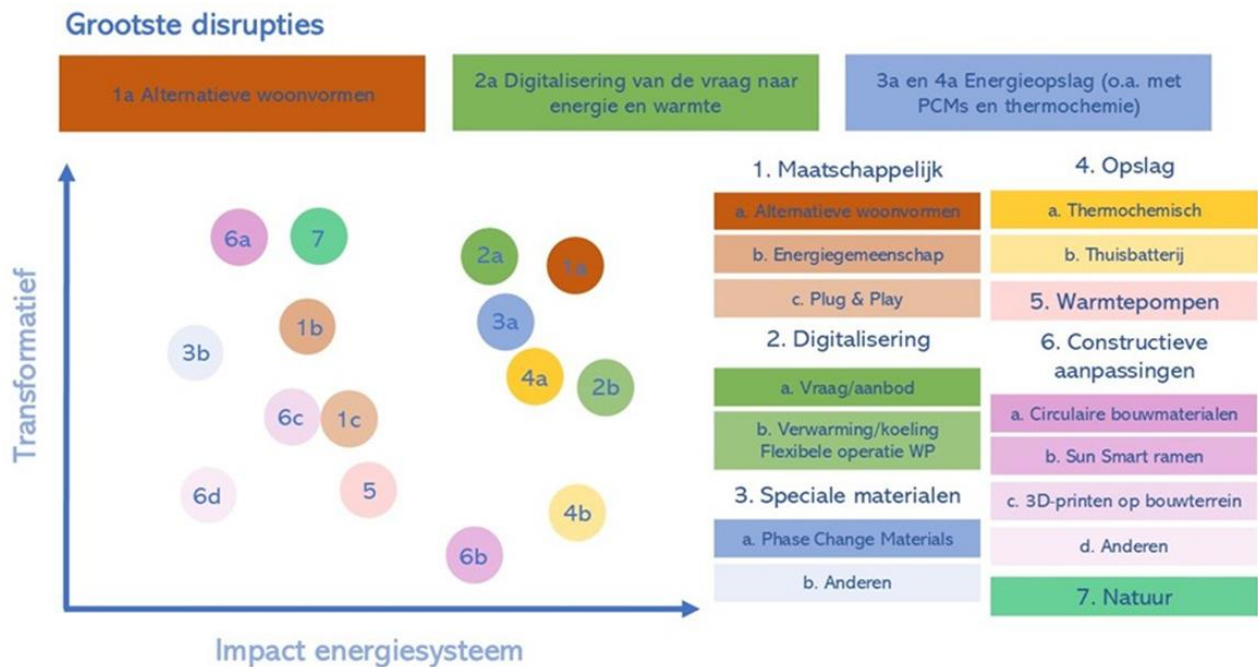
Synthetische brandstoffen, ook wel e-fuels genoemd, en biobased brandstoffen kunnen een grote impact hebben op de luchtvaart en scheepvaart. Als deze brandstoffen op grote schaal en tegen lage kosten geproduceerd kunnen worden met een vergelijkbare of hogere efficiëntie, zouden ze op korte termijn de voorkeur kunnen krijgen boven elektrificatie. Dit komt omdat elektrificatie bij grote en langeafstandsvoertuigen nog niet vanzelfsprekend is.

Technologieën die zich richten op de ontwikkeling van nieuwe batterijen worden als transformatief en impactvol beschouwd, zij het in gematigde mate. Naast de door de IEA benoemde technologieën wordt ook de solid-state lithiumbatterij genoemd, vanwege de hogere energiedichtheid en grotere veiligheid in vergelijking met huidige batterijen. Het is belangrijk om verschillende batterijtechnologieën te ontwikkelen om de variëteit in grondstoffen te behouden en niet afhankelijk te worden van één enkele bron. Echter gaan zij niet een disruptieve rol spelen voor ons toekomstige energiesysteem, omdat door de ontwikkelingen in het afgelopen decennium de belangrijkste toepassingen al geëlektrificeerd kunnen worden.

Daarentegen worden de door de IEA genoemde technologieën rondom verbrandingsmotoren als nog minder disruptief voor de toekomst gezien. Veel sectoren zitten al op een verbrandingsmotor, en verbeteringen hieraan zijn incrementele verbeteringen.

## 4.4 Gebouwde omgeving

In de workshop Gebouwde omgeving zijn de opkomende technologieën en innovatieve thema's gescoord op mate van transformatie en impact op het energiesysteem. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.4. De belangrijkste technologieën en thema's zijn onderverdeeld in de categorieën digitalisering, opslag, maatschappelijk, speciale materialen, constructieve aanpassingen, warmtepompen en natuur. Iedere categorie wordt verder toegelicht in de rest van het hoofdstuk.



**Figuur 4.4:** Resultaten ordening disrupties op mate van transformativiteit en impact op het energiesysteem van de workshop gebouwde omgeving.

## 4.4.1 Maatschappelijk

Een paar maatschappelijke concepten werden ook besproken. Zo werd alternatieve woonvormen hoog op de transformatief-as maar ook impact-as gezet. Hierbij is de achterliggende gedachte het efficiënter gebruik maken van woonruimte, zoals meer mensen per woning of intergenerationeel wonen waarbij jongeren en ouderen bij elkaar intrekken. Hiermee kunnen zowel sociale als economische uitdagingen worden aangepakt. Dit vermindert niet alleen woningtekorten, maar helpt ook bij het bestrijden van energiarmoede, omdat gedeelde woonruimtes leiden tot lagere energiekosten per persoon.

Ook energiegemeenschappen kunnen een impact hebben en een rol spelen in de toekomst. Het concept draait om lokale energie-uitwisseling, waarbij woningen gezamenlijk functioneren als energiehubbs die duurzame energie opwekken, opslaan en delen. Dit verhoogt de energie-efficiëntie en vermindert afhankelijkheid van het centrale net. Succesvolle implementatie vereist actieve samenwerking en betrokkenheid van bewoners.

Als laatste werd het belang en impact naar simpele 'Plug & Play' installaties op de kaart gezet. Het idee van Plug & Play-oplossingen is dat duurzame technologieën zoals zonnepanelen, batterijen en warmtepompen makkelijker en sneller te installeren zijn. Dit vermindert de afhankelijkheid van gespecialiseerde vakmensen en versnelt de energietransitie.

## 4.4.2 Digitalisering

Digitalisering optimaliseert vraag en aanbod binnen het energiesysteem door slimme algoritmes en realtime data-analyse. Dit vermindert piekbelasting en benut hernieuwbare energie efficiënter. Geautomatiseerde systemen voorspellen temperatuurbehoeften en optimaliseren verwarming en koeling op basis van weersomstandigheden en energieprijzen. Warmtepompen reageren flexibel op vraag en aanbod, waardoor ze energie verbruiken op gunstige momenten.

De transformatieve impact van digitalisering in de gebouwde omgeving zorgt voor een grote verandering in energiebeheer. Gebouwen worden actieve schakels in een dynamisch energienetwerk, wat de integratie van hernieuwbare energie bevordert en de veerkracht van het energiesysteem versterkt. Dit versnelt de overgang naar een efficiënter, duurzamer en flexibeler energiesysteem.

## 4.4.3 Speciale materialen

Innovaties met phase change materials (PCM) worden in de gebouwde omgeving als zeer impactvol en transformatief gezien. De Trombe-wall, een passief verwarmingssysteem dat warmte opslaat en geleidelijk afgeeft, is hier een voorbeeld van. De potentie van PCM's te integreren voor thermische opslag en koeling in gebouwen kan de energie-efficiëntie verhogen en afhankelijkheid van actieve verwarmings- en koelsystemen verminderen.

Naast PCM's worden andere geavanceerde materialen onderzocht, zoals elastocalorische, barocalorische en magnetocalorische koeling, evenals vloeistofkoeling. Deze technologieën hebben potentie om energie-efficiënte koeling mogelijk te maken, maar hun nu nog onzekere beschikbaarheid en efficiëntie beperken vooralsnog de impact. Hoewel verdere ontwikkeling nodig is, kunnen ze op lange termijn bijdragen aan duurzamere

koelingsoplossingen in de gebouwde omgeving. Hun mate van transformativiteit is voorlopig beperkt, maar doorbraken in materialen en kostenreductie kunnen dit veranderen.

#### 4.4.4 Opslag

Warmte- en energieopslag in gebouwen voorkomt dat overtollige opgewekte energie verloren gaat. Dit verlaagt de vraag naar fossiele energiebronnen en vermindert piekbelasting op het elektriciteitsnet. Bovendien optimaliseert opslag het energiegebruik voor verwarming en koeling, wat leidt tot lagere energiekosten en een duurzamer gebouwbeheer. De innovaties rondom thermochemische opslag en betere thuisbatterijen kwamen ter sprake.

Thermochemische opslag maakt gebruik van chemische reacties om warmte langdurig zonder verlies op te slaan, wat een grote rol kan spelen bij seizoensopslag. Hiermee kunnen gebouwen in de zomer overtollige warmte opslaan en deze in de winter benutten, wat de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen sterk vermindert.

Daarnaast zorgen goedkopere en efficiëntere thuisbatterijen ervoor dat huishoudens zonnestroom beter kunnen opslaan en gebruiken, waardoor de druk op het elektriciteitsnet afneemt. In combinatie met digitalisering kunnen deze batterijen slim worden aangestuurd en gekoppeld worden aan vraagsturing en net-balancing.

#### 4.4.5 Warmtepompen

De IEA identificeerde verschillende warmtepomptechnologieën in ontwikkeling, zoals de high-temperature heat pump, die hogere temperaturen kan leveren en daardoor geschikt is voor industriële toepassingen en oudere gebouwen met bestaande radiatoren. De thermo-akoestische warmtepomp gebruikt geluidsgolven om warmte over te dragen en kan efficiënter en duurzamer zijn dan traditionele compressiewarmtepompen. De warmtepomp met opslag voor verwarming en koeling integreert energieopslag om piekbelasting te verminderen en het gebruik van hernieuwbare energiebronnen te optimaliseren. De Vuilleumier-warmtepomp, gebaseerd op een thermodynamische cyclus, kan warmte efficiënter opwekken met minder bewegende delen, wat onderhoudskosten verlaagt. In tegenstelling tot een thermo-mechanische cyclus, die gebruik maakt van mechanische compressie en expansie van een gas met behulp van compressoren, werkt de thermodynamische cyclus door het veranderen van druk en temperatuur van een werkmedium zonder veel bewegende onderdelen. Daarnaast werd de ventilatiewarmtepomp benoemd door de experts, die restwarmte uit ventilatielucht hergebruikt om de energie-efficiëntie van gebouwen te verhogen.

Deze warmtepomp technologieën hebben een lage transformativiteit omdat ze grotendeels een optimalisatie zijn van bestaande systemen in plaats van een fundamentele verandering in het energiesysteem. Ze maken warmtepompen breder inzetbaar en verhogen de efficiëntie waardoor de impact op het energiesysteem positief is, maar niet disruptief.

#### 4.4.6 Constructieve aanpassingen

In de gebouwde omgeving kan er nog veel geïnnoveerd worden wat betreft het gebruik van circulaire bouwmaterialen. Hergebruik aan het einde van de levensduur van materialen en

technologieën kan in de toekomst transformatief zijn als dit al tijdens het ontwerp wordt meegenomen. Door betere organisatie, ondersteuning en financiële prikkels kan hoogwaardig hergebruik worden gestimuleerd, wat grondstoffengebruik en afval vermindert. Dit heeft een positieve impact op het energiesysteem door lagere energiebehoefte bij materiaalproductie en recycling. Echter, vergeleken met andere innovaties heeft het een minder directe invloed op energie-efficiëntie en netbelasting. Hierdoor werd de impact op het energiesysteem laag gescoord, ondanks de verminderde materiaalbehoefte, energiebehoefte en CO<sub>2</sub>-emissies

Sun Smart-ramen hebben een hoge impact doordat ze energieverbruik voor verwarming en koeling verminderen en een lage transformativiteit scoren omdat ze eenvoudig in bestaande gebouwen kunnen worden geïntegreerd zonder ingrijpende aanpassingen. TNO is onder andere bezig met de ontwikkeling van deze ramen.

Direct 3D-printen op bouwplaatsen kan impactvol zijn vanwege de besparing op bouwmaterialen, kortere productieketens en efficiënter gebruik van grondstoffen. Dit kan de voetafdruk van de bouwsector verkleinen en bijdragen aan efficiënter bouwen.

Andere bouwinnovaties kunnen impact hebben, maar worden lager ingeschat in vergelijking met andere besproken technologieën. Enkele door de IEA benoemde ontwikkelingen, zoals fibre-optic daylighting, thin-shelled concrete, vapour-permeable walls, funicular floor systems, building-integrated heat and moisture exchange panels en radiative reflective roofs, dragen bij aan energie-efficiëntie en duurzaamheid. Hun impact werd echter beperkter ingeschat, vooral omdat hun brede adoptie nog onzeker is en de schaalvoordelen niet altijd even groot zijn als bij andere transformatieve innovaties in de gebouwde omgeving.

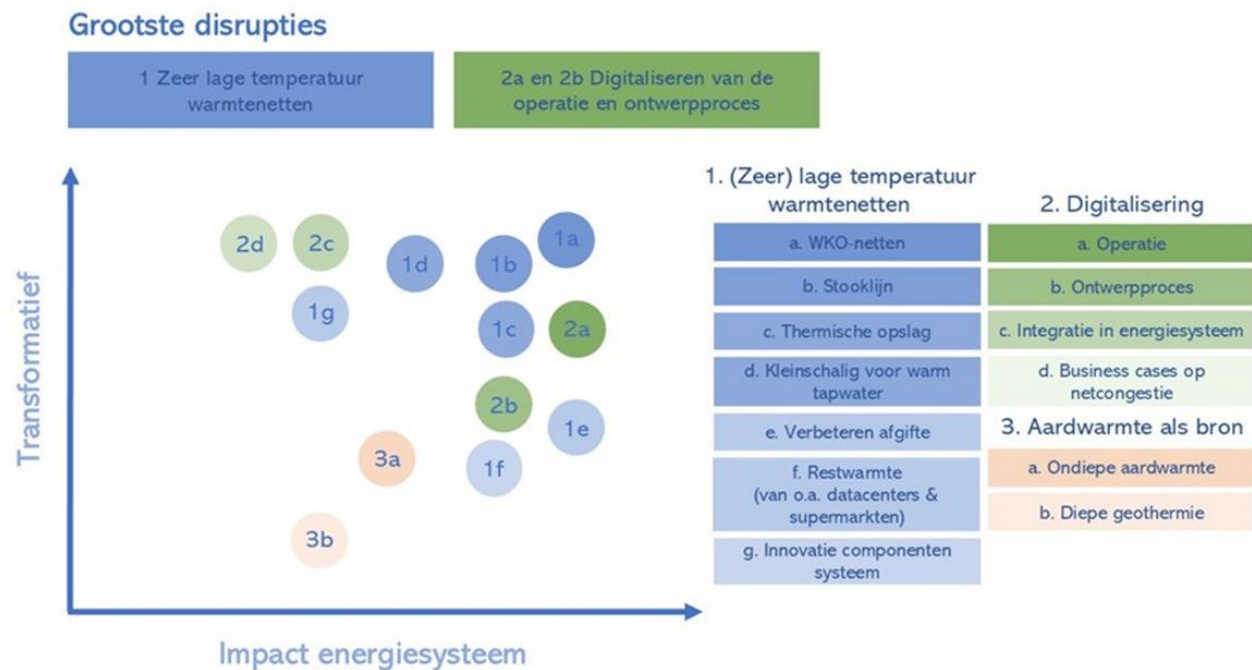
#### 4.4.7 Natuurlijke materialen

In de gebouwde omgeving kunnen natuurlijke oplossingen, zoals biobased isolatie en andere nature-based solutions, een grotere rol spelen in het verduurzamen van gebouwen. Natuurlijke materialen bieden duurzame isolatieopties met een lage milieu-impact en kunnen de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de bouwsector verminderen. Groene daken en gevels dragen daarnaast bij aan klimaatadaptatie door oververhitting te verminderen en regenwater op te vangen.

Deze oplossingen hebben een hoge transformativiteit, omdat ze verandering brengen in materiaalgebruik en bouwmethoden, weg van fossiele en milieubelastende grondstoffen. De impact op het energiesysteem is positief, vooral door lagere energievraag voor verwarming en koeling en voor materiaal bewerking, maar blijft relatief beperkt in vergelijking met technologieën die direct inspelen op energieopwekking, opslag en netbeheer.

### 4.5 Warmtenetten

In de workshop Warmtenetten zijn de opkomende technologieën en innovatieve thema's rondom warmtenetten gescoord op mate van transformatie en impact op het energiesysteem. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.5. De belangrijkste technologieën en thema's zijn onderverdeeld in de categorieën (zeer) lage temperatuur warmtenetten, digitalisering en aardwarmte als bron. Iedere categorie wordt verder toegelicht in de rest van het hoofdstuk.



**Figuur 4.5:** Resultaten ordening disrupties op mate van transformativiteit en impact op het energiesysteem van de workshop warmtenetten.

### 4.5.1 (Zeer) lage temperaturen warmtenetten

(Zeer) lage temperatuur warmtenetten kunnen een belangrijke rol spelen in onze toekomst. Deze warmtenetten hebben een lage aanvoertemperatuur van minder dan 35 graden, wat leidt tot een geheel ander energieconcept waarin verschillende innovatieve technologieën een rol spelen.

Het is essentieel dat alle gebouwen goed geïsoleerd zijn, en er komt steeds meer (Europese) regelgeving om dit af te dwingen. Door de toename van isolatie in gebouwen neemt de potentie en het gebruiksgemak van lage temperatuur warmtenetten aanzienlijk toe. Echter, een beter geïsoleerde woning heeft een lagere warmteafzet per woning, wat nadelig kan zijn voor de businesscase van warmtenetten. De trend is nu dat toepassing van warmtenetten vaak samengaat met woningen die minder vergaand geïsoleerd worden. Dit betekent dat er vooral geïnvesteerd wordt in de warmtenetten zelf, en minder in gebouwrenovatie. Om deze netten effectief te integreren en efficiënt te laten functioneren, zijn innovaties gericht op het verbeteren van de warmteafgifte in gebouwen van groot belang. Dit omvat het ontwikkelen van efficiëntere, ruimtebesparende, gemakkelijk aanpasbare en eenvoudig te repareren onderdelen.

Huizen krijgen ook steeds meer een koelvraag. Door de stooklijn aan te passen (in de zomer lage aanvoertemperatuur, waardoor overtollige warmte kan worden teruggeleverd), kan een (zeer) lage temperatuur warmtenet deze koelvraag als warmtebron dienen. Ook kunnen aangesloten gebouwen met een koelvraag als warmtebron dienen. Het optimaal benutten van restwarmte kan een positieve impact hebben op lage temperatuur netten. Datacenters

vormen een belangrijke bron van warmte en kunnen op lange termijn een waardevolle bijdrage leveren. Ook supermarkten genereren veel warmte, die effectief kan worden ingezet. Dit vereist echter veel samenwerking tussen verschillende partijen om succesvol te zijn.

Het is belangrijk om de tapwatervraag bij individuele woningen in te vullen, aangezien de warmte uit het net een te lage temperatuur heeft en in de zomer niet beschikbaar is. Innovaties zoals individuele losse tapwatersystemen in woningen of boostersystemen op de lage temperatuurwarmte uit het net kunnen hierbij helpen. Innovaties voor kleinere warmteopslag, specifiek voor tapwater, kunnen ook een verschil maken. Bij lage temperatuur warmtenetten hebben gebouwen vaak een booster warmtepomp nodig om warm tapwater te verkrijgen. Kleine thermische opslag zou hier een win-winsituatie kunnen bieden.

Thermische opslag is in dit concept essentieel voor het flexibel benutten van warmte. WKO-netten (Warmte-Koude Opslag) worden als impactvol beschouwd omdat ze zowel verwarming als koeling combineren. Hoewel er nog innovaties nodig zijn, kunnen deze transformatief en impactvol zijn voor een duurzaam verwarmingssysteem.

## 4.5.2 Digitalisering

Het digitaliseren van de operatie van warmtenetten kan aanzienlijke voordelen opleveren. Door de interactie tussen verschillende warmtebehoefte te digitaliseren en het meten van de operatie tot in de woning, kunnen bestaande netten veel duurzamer worden gemaakt. Dit zorgt voor een efficiënter en nauwkeuriger beheer van warmteverdeling.

Daarnaast zou het digitaliseren en standaardiseren van het ontwerpproces het aanleggen van warmtenetten vergemakkelijken. Dit maakt de netten eenvoudiger toepasbaar en beter te monitoren. Het digitaliseren van de integratie in het energiesysteem zou ook bijdragen aan een efficiënter gebruik van energiebronnen en een betere afstemming tussen vraag en aanbod.

Businesscases gericht op congestie van de elektriciteitsnetten zijn eveneens van belang. Om dit te realiseren is het integreren van hoge temperatuur opslag belangrijk, zodat elektriciteit kan worden afgenomen op dat moment dat het gunstig is voor het elektriciteitssysteem. Deze maatregelen kunnen niet alleen een grote impact hebben, maar zijn ook zeer transformatief voor het elektriciteitssysteem.

## 4.5.3 Aardwarmte als bron

Het beter benutten van ondiepe aardwarmte kan aanzienlijke voordelen opleveren. Innovaties op het gebied van diepe geothermie kunnen eveneens een grote impact hebben. Aardwarmte op dieptes van minder dan 1500 meter levert temperaturen rond de 25 graden op, wat aantrekkelijk kan zijn voor lage temperatuur warmtenetten of om opgewaardeerd te worden voor middentemperatuur netten. Er is echter nog veel onbekendheid over geothermie tussen 200 en 1000 meter diepte, terwijl we al veel weten over de lagen tussen 0 en 200 meter en op grotere diepten. Er loopt op dit moment een gericht onderzoeksprogramma met boringen in die ondergrond om deze onzekerheid weg te nemen op locaties waar warmtenetten zijn, of een logische oplossing lijken.

Er zijn diverse programma's die zich richten op de ontwikkeling van boortechnologieën en putinnovaties. Als de regelgeving wordt aangepast om boren tot grotere dieptes mogelijk te maken, kan dit de benutting van aardwarmte aanzienlijk verbeteren. De innovaties rondom boortechnologieën spelen hierbij een cruciale rol. Echter moet rekening gehouden worden met het feit dat boren op grotere diepten ook bovengronds grotere installaties behoeft, en dus ruimtelijke impact heeft.

# Referenties

IEA (2025): [ETP Clean Energy Technology Guide](#)

RVO (2023): [Nationaal plan energiesysteem](#) (NPE)

TNO (2025): [Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050](#)

# Bijlage A

## Resultaat analyse

### TRANSFORM 2050 per keten of verbruikssector

Keten/ sector	Categorie	Energie- consumptie	CAPEX	Level
1. Gebouwde omgeving	Gebouwgebonden investeringen gebouwen	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Gebouwgebonden investeringen woningen	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Warmtepompen voor huishoudens	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Warmtevoorziening voor gebouwen	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	Warmtevoorziening voor huishoudens	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	Warmtepompen voor gebouwen	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
2. Industrie	Chemische industrie	> 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	3
	Voedingsindustrie	> 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	3
	Staalindustrie	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	ICT-industrie	10 - 100 PJ	< 100 MEUR/JR	1
	Kunstmest-industrie	10 - 100 PJ	< 100 MEUR/JR	1
3. Mobiliteit	Elektrisch personenvervoer	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Zeescheepvaart	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Elektrisch vrachtvervoer	10 - 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	3

Keten/ sector	Categorie	Energie- consumptie	CAPEX	Level
4. Land bouw	Glastuinbouw	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	Landbouw	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
5. Elektriciteit	Infrastructuur elektriciteit	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Kernenergie	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Wind op zee	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Zon-PV	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Wind op land	> 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	3
	Elektriciteitscentrales	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	Batterijen	< 10 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	1
	24-uurs opslag (CAES en flow batterijen)	< 10 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	1
6. Koolstof	Raffinage	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	CCS infrastructuur	10 - 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	3
	Luchtvaartbrandstoffen	> 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	3
	Groen gas productie	10 - 100 PJ	< 100 MEUR/JR	1
7. Water stof	Groene waterstof	> 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	4
	Zoutcavernes	< 10 PJ	< 100 MEUR/JR	0
8. Warmte	Warmtenetten	10 - 100 PJ	> 1000 MEUR/JR	3
	Geothermie	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2
	Overige warmtetechnieken (vergisting en solar thermal)	10 - 100 PJ	100 - 1000 MEUR/JR	2

## Bijlage B

# Volledige inventarisatie Clean Tech Guide

## B.1 Gebouwde omgeving

### B.1.1 Constructie en renovatie

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Funicular floor system	Door een gekromde schaal structuur die met verticale verstevigingen versterkt wordt blijft de vloer stabiel. Er wordt gebruik gemaakt van natuurlijke krachtstromen.	Gebruikt tot wel 70% minder beton dan traditionele betonnen vloeren.	4
Thin shelled concrete	Dubbel gekromde betonnen sandwichstructuur die gescheiden zijn door isolatie blokken en verbonden door een raster. Wordt gebruik gemaakt van flexibele bekisting.	De flexibele bekisting vermindert kosten en verspilling die gepaard gaan met productie van eenmalige mallen.	4
Vapour permeable walls	Door poriën in bouwmaterialen voor muren te hebben kan de luchtkwaliteit en vochtigheid in gebouwen beter gereguleerd worden. Warme lucht die door de poriën stoomt verliest warmte aan of wint warmte van het basismateriaal, waardoor er natuurlijk gekoelde of verwarmde frisse lucht binnenstroomt.	Door gebruik van warmte van inkomende lucht wordt minder energie verbruikt voor verwarmen of koelen van binnenruimte.	4
Fibre-optic daylighting	Door gebruik van glasvezel kan natuurlijk zonlicht dieper gebouwen in geleid worden naar plekken die normaal niet goed verlicht zijn door daglicht.	Verlaagt overdag elektriciteitsverbruik voor verlichting.	6
Building integrated phase change materials	Latente warmte-opslag door PCM materialen integreren in bouwmaterialen verbeteren de gebouwen hen thermische prestatie: in beton, tussen elementen, in isolatie of geïntegreerd met PV systemen.	Kan overal energie verbruik voor warmte en koeling verminderen.	6
Additive manufacturing for building materials	Het 3D-printen van betonnen-constructie onderdelen voor gebouwen kan gelijk op het bouwterrein gedaan worden.	Vermindert koste die gerelateerd zijn voor arbeid en ruw materiaal en kan de vraag naar materialen voor 50% verminderen door het meer effectievere proces.	7
Building integrated heat and moisture exchange panel	Ventilatie en isolatie wordt gecombineerd in één systeem in een paneel. De panelen hebben poriën die lucht en vocht doorlaten die warmte opneemt of afgeeft aan het basismateriaal van het paneel.	Energiebesparing door combinatie van ventilatie en isolatie en zo warmteterugwinning.	7
Radiative reflective roof	Door speciale reflectieve coating wordt meer zonlicht gereflecteerd en minder warmte opgenomen via het dak. Daarnaast wordt er ook	Minder energievraag naar koeling van gebouwen.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	nog warmte terug naar de atmosfeer gereflecteerd.		
Trombe wall	Een muur van PCM materialen die zonlicht absorbeert met een glazen paneel ervoor. In de nacht of bij koudere periodes geeft de muur opgeslagen warmte langzaam af aan de binnenkant van het gebouw. In zomer kan de muur ook helpen bij koeling door ventilatieopeningen te gebruiken om warme lucht af te voeren.	Kan 70-80% van zonlicht omzetten in bruikbare warmte (efficiënter dan zonnepanelen) plus daarbij energieverbruik voor warmte en koeling verminderen.	7
Open automated demand response	Een informatie-uitwisselingsmodel om vraagrespons te beheren voor nutsbedrijven en aggregators, die zo beter de energievraag kunnen afstemmen met het aanbod.	Door de automatisering van de energiemarkt kan dit model zorgen voor net-stabiliteit en lage energie prijzen.	7
Direct current buildings system	DC micro-net die energie krijgen van PV systemen met batterij opslag en die gelijk DC-aangepaste systemen energie kan geven, zonder nog DC/AC conversie. Ze kunnen ook alsnog een AC/DC connector krijgen.	Door geen DC/AC conversie nodig te hebben na zonne-energie te hebben opgewekt, kun je meer energieverlies voorkomen.	7

## B.1.2 Warmtepompten

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Integrated heat pump with storage for cooling	Integratie van een warmtepomp met opslag en geoptimaliseerde besturing.	Door betere systeemprestaties en meer controle is de netintegratie beter. Omdat de innovatie gericht is op meer gebruik van hernieuwbare energie zoals zonne-energie, hoeft er minder energie uit het energiesysteem te worden gebruikt. Daarnaast zullen de kosten voor de eindgebruikers dalen.	3
Integrated heat pump with storage for heating and cooling	Integratie van een warmtepomp met opslag en geoptimaliseerde besturing. Kan ook met integratie van ijsopslag. Gebruikt hierbij natuurlijke koelmiddelen.	Door betere systeemprestaties en meer controle is de netintegratie beter. Omdat de innovatie gericht is op meer gebruik van hernieuwbare energie zoals zonne-energie, hoeft er minder energie uit het energiesysteem te worden gebruikt. Daarnaast zullen de kosten voor de eindgebruikers dalen. Tot slot zullen natuurlijke koelmiddelen leiden tot minder watervervuiling.	4
Membrane heat pump	Maakt gebruik van membraan technologie voor efficiënte warmte- en massaoverdracht.	Er is nog steeds gas nodig. Het gasverbruik kan tot 45% worden verminderd.	5
Thermo-acoustic heat pump	Met gebruik van akoestische golven wordt een gas heet en koud, waardoor er in de motor compressie en expansie optreedt en zo wordt mechanisch werk gegenereerd.	Beter dan het gebruik van gas- en olietels en in staat om hogere en lagere temperaturen te bereiken dan normale warmtepompen, en er zijn geen koelmiddelen nodig. Het is onduidelijk of ze meer elektriciteit nodig hebben, maar het lijkt dezelfde hoeveelheid te zijn (3-4 keer efficiënter). Daarnaast is het geluid van de warmtepomp verminderd omdat er minder bewegende delen zijn door het gebruik van duurzaam gas.	6
High-temperature heat pump	Door het gebruik maken van efficiëntere compressoren met minder energieverlies kunnen	Hogere efficiëntie daar waar hoge temperaturen nodig zijn in de industrie.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	hogere temperaturen bereikt worden.		
Hydrogen-enriched natural gas heat pump	Thermisch gedreven warmtepomp, aangedreven door waterstof verrijkt gas.	Kan worden aangedreven door waterstof wanneer aangesloten op een waterstofnetwerk. Daarom is er geen gas of elektriciteit nodig, maar waterstof.	7
Metal hydride heat pump	Gebruikte elektrische spanning om waterstof (of andere koelmiddelen) op te pompen zonder bewegende delen en waterstof zorgt voor efficiëntere warmte overdracht.	Tot 45% energiebesparing vergeleken met traditionele systemen door hogere efficiëntie en het gebruik van duurzame koelmiddelen. Gebruikt elektriciteit en waterstof. Ook minder slijtage van de pomp door minder bewegende delen.	7
Vuilleumier heat pump	Gebruikt helium als gas die goeie thermodynamische eigenschappen heeft.	De efficiëntie blijft hoog bij lage temperaturen (conventionele warmtepompen verliezen efficiëntie in koud klimaat), wat kan leiden tot minder energieverbruik (30-50%). Gebruikt helium als gas, wat minder schadelijk is voor het klimaat en zowel koelen als verwarmen in één is.	7
Flexible operation of heat pumps	Warmt water op op strategische tijdstippen, dat dan gebruikt wordt later. Zo makkelijker hernieuwbare energie in het net integreren. Lastige: afhankelijk van energie prijzen die het IT-systeem moet weten.	Gemakkelijkere integratie van hernieuwbare energie dankzij de flexibiliteit van de warmtepompen.	7-8

### B.1.3 Overige verwarmings- en koelingssystemen

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Quad-generation	Een technologie die elektriciteit genereren, verwarmen, koelen en CO <sub>2</sub> -opvangen combineert. Het verbruikt natuurlijke gas om elektriciteit te genereren. Het gebruikt water als koelmiddel. Het systeem vangt daarbij CO <sub>2</sub> op en hergebruikt dit in industriële processen.	Het systeem heeft het hele jaar door aardgas nodig. Hoewel het de uitstoot van broeikasgassen vermindert en kosten bespaart, zal het niet leiden tot een gasvrije samenleving.	3
Evaporative cooling coupled with permeable membrane	De lucht wordt verkoeld door verdampingskoeler wat de luchtvochtigheid verhoogt. Het membraansysteem verwijdert het overtollige waterdamp waardoor de luchtvochtigheid afneemt.	Hogere efficiëntie dan normale dampcompressietechnologieën (zoals te zien in warmtepompen en airconditioning), dus minder energieverbruik. Gebruikt geen koelmiddelen. Minder CO <sub>2</sub> -uitstoot door het gebruik van natuurlijke processen en minder waterverbruik.	4
Liquid or solid desiccant evaporative cooling system	De technologie gebruikt lage-temperatuur warmte (zoals zonne-energie en restwarmte) voor koeling, ontvochtiging, verwarming, warmteterugwinning en ventilatie.	Verwacht wordt dat het energieverbruik met 30-90% zal verminderen vergeleken met de meest geavanceerde koeltechnologieën. Daarnaast kan het de CO <sub>2</sub> -uitstoot met 70-80% verminderen door het gebruik van hernieuwbare warmtebronnen.	4

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Barocaloric cooling	Gebruikt barocalorische materialen die warmte vrijgeven en absorberen bij verschillende drukken (goedkope en niet toxische materialen).	Vermindert het energieverbruik door hogere efficiëntie dan conventionele airconditioning en warmtepompen. De productiekosten kunnen bij massaproductie gelijk zijn aan die van dampcompressie.	4
Elastocaloric cooling	Gebruikt elastorische materialen die warmte absorberen bij uitrekking, waardoor het koelt, en de geabsorbeerde warmte weer afgeeft als he naar zijn oorspronkelijke vorm gaat (goedkope en niet toxische materialen). De elastische materialen bestaan uit polymeren.	De efficiëntie is hoger dan conventionele systemen, wat leidt tot minder energieverbruik. Daarnaast is er een betere betrouwbaarheid van de koelsystemen. De productiekosten kunnen bij massaproductie gelijk zijn aan die van dampcompressie.	4
Electrocaloric cooling	Bij aanwezigheid van elektrisch veld veranderen elektrocalorische materialen van temperatuur, waardoor geen koelmiddelen nodig zijn. Toepasbaar op plekken waar microkoeling nodig is (zoals in elektronica).	Energie-efficiëntie is hoger dan die van andere koelsystemen (60%). Gebruikt geen koelmiddelen, wat leidt tot minder vervuiling. Kan worden gebruikt voor microkoeling (zoals nodig in elektronica).	4
Active latent heat storage	Gebruikt een schroefwarmtewisselaar om de faseovergang van een faseovergangsmateriaal te realiseren. Deze materialen kunnen latente warmteopslag realiseren (absorbeert warmte zonder dat de temperatuur van het materiaal verandert). De warmteoverdracht is in dit systeem gescheiden van de warmteopslag. Deze systemen zijn onafhankelijk van elkaar. Zo kan een wenselijke ruimtetemperatuur gewaarborgd worden.	Hogere efficiëntie dan conventionele warmte opslag systemen, wat ervan kan zorgen dat er minder energie gebruikt hoeft te worden.	4
Shape-stabilised phase change material (ss-PCM)	Een beter materiaal dan andere fase veranderende-materialen (PCM) die in PV systemen en batterijen als koeling kan gebruikt worden en als thermische energie opslag (kan tot vijf keer meer energie opslaan dan andere PCMs). Fase veranderende materialen hebben de eigenschap van vaste stof naar vloeistof warmte op te slaan en deze vrij te laten wanneer ze terug naar een vaste stof gaan.	Tot vijf keer hogere efficiëntie in het opslaan van thermische energie dan andere PCMs.	4
Thermo-chemical storage	Warmte opslag door chemische reactie bij AB waardoor componenten A en B ontstaan die weer warmte vrijlaten bij vormen van AB. Kan gebruikt worden in combinatie met PV systemen bij huizen.	Kan de overstap van zonne-energie naar warmtepomp naar warmte overslaan door direct zonne-energie warmte op te slaan door hoge energiedichtheid. Brengt flexibiliteit in opslaan van zonne-energie.	4
Magnetocaloric cooling	Het gebruik van magnetische materialen om anders verloren warmte te verplaatsen kan energieverbruik met 50% verminderen. Deze magnetische materialen nemen warmte op of geven af onder invloed van magnetische velden. Proces bevat het aan en uit schakelen van een magnetisch veld.	Efficiëntie 25% hoger in vergelijking met conventionele koelsystemen. Er zijn wel limitaties aan permanent magnetische applicaties, zoals hoge kosten, prestaties variëren snel van magnetocalorische materialen (betrouwbaarheid en levensduur erg variabel).	5
Active control systems for heating and cooling	Control systeem die warmtepompen en warmteopslag kunnen reguleren met betrekking tot net-congestie en zo de flexibiliteit verhogen.	Verhoogt flexibiliteit van elektriciteitsvraag bij gebruik van warmtepompen.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Phase Change Materials (PCMs)	Latente warmte (energie die tijdens een faseverandering wordt geabsorbeerd of vrijgegeven) wordt opgeslagen met behulp van faseovergangsmaterialen (PCMs) die gebruik maken van de latente warmte die gepaard gaat met een faseovergang, meestal van vast naar vloeibaar en omgekeerd. Deze materialen zijn aantrekkelijk vanwege hun hoge energiedichtheid.	Kan als een vervanging van lithium batterijen in energie opslag een rol spelen.	7

## B.2 Mobiliteit

### B.2.1 Wegtransport

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Li-Air battery	Een batterijconcept waarbij zuurstof uit de lucht als kathode en lithium als anode wordt gebruikt. Dit biedt een theoretische energiedichtheid vergelijkbaar met vloeibare brandstoffen. Hoewel veelbelovend, zijn er nog aanzienlijke technische uitdagingen en moet de praktische haalbaarheid nog worden aangetoond. Hergebruik en recycling van batterijen zijn essentieel voor duurzaamheid.	Hogere energiedichtheid en lagere materiaal kosten dan gebruikelijke batterijen.	2
Multivalent ion battery	Het gebruik van actieve ionen die meer dan één elektron kunnen afgeven. Veel bestudeerde elementen zijn magnesium, calcium en aluminium. Zij bieden een potentie voor zeer hoge energiedichtheid en verminderen de afhankelijkheid van lithium en andere schaarse materialen.	Hogere energiedichtheid en lagere materiaal kosten dan bij gebruikelijke batterijen.	3
Li-S battery	Deze batterij gebruikt lithium als anode en zwavel als kathode. Dit concept biedt een zeer hoge energiedichtheid en vereist geen dure kathodematerialen, omdat zwavel goedkoop en overvloedig is. Hoewel de technologie al lang in ontwikkeling is, worden de inspanningen voor commerciële toepassingen in mobiliteit nu opgevoerd. Prototypen hebben energiedichtheden boven 400 Wh/kg bereikt, maar de belangrijkste uitdagingen liggen in het verbeteren van de cyclische prestaties en het realiseren van nog hogere energiedichtheden. Hergebruik en recycling van batterijen zijn essentieel voor duurzaamheid.	Hogere energiedichtheid en lagere materiaal kosten dan bij gebruikelijke batterijen.	4
Zinc-manganeze oxide battery	Zinc-mangaanoxidebatterijen (Zn-MnO <sub>2</sub> ) gebruiken een alkalische elektrolyt en worden ontwikkeld als een kosteneffectieve opslagtechnologie voor nettoepassingen. Deze batterijen zijn gericht op grootschalige energieopslag vanwege hun hoge theoretische energiedichtheid (~400 Wh/L), relatief veilige waterige elektrolyt, gevestigde toeleveringsketen	Hoge energiedichtheid en zijn veiliger door het gebruik van een waterige elektrolyt. Goedkoper door het gebruik van zink in plaats van kobalt en lithium.	4

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	en geschatte kosten onder USD 100/kWh op schaal. Het gebruik van water als elektrolyt maakt ze aanzienlijk veiliger dan andere elektrochemische cellen, omdat ze niet in brand vliegen zoals lithium-ion batterijen. Zink is goedkoper dan kobalt en lithium. Zink-mangaanoxidebatterijen (Zn-MnO <sub>2</sub> ) worden gemaakt door meerdere lagen geleidende materialen, actieve materialen en elektrolyten op een substraat, zoals papier of plastic, te printen.		
Inductive (charging)	Inductief laden voor elektrische voertuigen (EV's) biedt zowel statische als dynamische opties. Statisch laden gebeurt op parkeerplaatsen, terwijl dynamisch laden onderweg plaatsvindt via inductiespoelen onder het wegdek. Dit kan EV's tijdens het rijden opladen, waardoor kleinere en lichtere batterijen mogelijk zijn.	Hoewel het lagere efficiëntie en hogere kosten heeft, kan het de flexibiliteit en adoptie van EV's vergroten.	5
Smart charging	Smart charging houdt in het gecoördineerd en beheerd opladen van batterijen in elektrische voertuigen, zodat piekbelasting of congestie op het net wordt vermeden. Hoewel er geen heel andere infrastructuur voor nodig is, is innovatie vereist om IT en OT (Operationele Technologieën) te integreren, zoals remote sensing en big data-analyse.	Zorgt voor minder extreme net belastingen door elektrische voertuigen en bevordert op deze manier elektrificatie.	7

## B.2.2 Scheepvaart

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
High temperature proton exchange membrane	Het zijn brandstofcellen die minder gevoelig zijn voor onzuiverheden vanwege hun hoge operationele temperatuur (150-120 graden C). Ze zijn goedkoper dan andere brandstofcel technieken voor scheepvaart en kunnen tot 30 kW vermogen hebben. De levensduur is echter onduidelijk.	Lager energieverbruik door hogere efficiëntie dan andere brandstofcel technologieën voor scheepvaart en hebben geen uitstoot. Daarbij kan het opereren op meerdere brandstoffen (maar de membraan materialen zijn schaars daarentegen). Wel alleen voor kleine scheepvaart door klein vermogen.	6
Methanol fuel cell electric ship	Een brandstof cel die stroom genereert op methanol die meer waterstof per volume bevat dan vloeibaar waterstof.	Lage efficiëntie, maar gebruikt methanol als brandstof die hogere energiedichtheid heeft dan vloeibare waterstof.	6
Automated and connected ship	Door de automatisering van schepen kunnen geoptimaliseerde routes gevaren worden, varen met een constante snelheid en door connectie met andere schepen waardoor informatie uitgewisseld wordt, kunnen zij zich aanpassen en efficiëntie maximaliseren. Dit zorgt ook voor minder menselijke fouten.	Lager energiegebruik door geoptimaliseerde vaarprestatie.	6
Fast charging	Snelladen is nodig voor het opladen van batterijen van elektrische vaarvoertuigen. Dit kan met een stopcontact of draadloos.	Gebruik van elektriciteit voor de scheepvaart gaat omhoog. Bevordert elektrische scheepvaart.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Molten carbonate	Brandstofcellen die werken met gesmolten carbonaatzouten. Zijn minder gevoelig voor onzuiverheden en flexibel met brandstofkeuze. Ze kunnen vermogen hebben tot wel 500 kW en lange levensduur. Efficiëntie kan met warmte opvang wel 85% zijn. Het is wel een dure technologie.	Minder energiegebruik door betere efficiëntie dan conventionele verbrandingsmotoren voor zeevaart en stoten geen schadelijke stoffen uit. Wel nog steeds gelimiteerde vermogen, en gebruikelijker voor korte of gemiddelde afstandsschepen.	7
Solid oxide	Brandstofcellen die werken met zuurstof in vaste vorm. Zijn minder gevoelig voor onzuiverheden en flexibel met brandstofkeuze. Ze kunnen werken onder zeer hoge temperaturen (500-1000 graden C) Ze hebben een gematigde levensduur. Efficiëntie kan met warmte opvang wel 85% zijn. Het is wel een dure technologie.	Minder energiegebruik door betere efficiëntie dan conventionele verbrandingsmotoren voor zeevaart en stoten geen schadelijke stoffen uit. Wel nog steeds gelimiteerde vermogen, en gebruikelijker voor korte of gemiddelde afstandsschepen.	7
Kite	Grote kites zijn met touwen aan schepen vastgemaakt die winden wel 100 m boven het schip opvangen. Zo wordt bijgedragen aan de voortstuwing van het schip. Dit is een geautomatiseerd systeem (zonder extra mankracht).	Kan het brandstofgebruik van schepen tot wel 15% verminderen (neemt wel extra ruimte op een schip in beslag en kan niet alle tijden gebruikt worden).	7

## B.3 Keten koolstof

### B.3.1 Biobrandstoffen en raffinage

#### B.3.1.1 Biobrandstoffen

Van de biobrandstoffen is geen tabel beschikbaar. De inhoud is te vinden in de teksten in paragraaf 4.3.2.1.

#### B.3.1.2 Raffinage

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Oxy-fuelling carbon capture (cracking)	Het gebruik van oxy-combustie om CO <sub>2</sub> uit rookgassen van FCC-eenheden te concentreren en af te vangen. Oxy-combustie vervangt lucht door zuivere zuurstof, wat resulteert in een rookgas met een hogere CO <sub>2</sub> -concentratie, waardoor de CO <sub>2</sub> -afvang efficiënter wordt. Dit helpt om de aanzienlijke CO <sub>2</sub> -uitstoot van FCC-eenheden te verminderen.	Vermindert de CO <sub>2</sub> uitstoot in het productie proces van olieraffinage.	5
Post-combustion carbon capture (cracking)	Het toepassen van post-combustie CO <sub>2</sub> -afvangtechnologieën in raffinaderijen, specifiek voor de fluid catalytic cracking (FCC) eenheid. Hoewel deze technologie beschikbaar is en CO <sub>2</sub> kan afvangen uit rookgassen met een CO <sub>2</sub> -concentratie van 10-20%, is het nog niet gedemonstreerd in een raffinaderijcontext. Het doel is om de aanzienlijke CO <sub>2</sub> -uitstoot van FCC-eenheden effectief te verminderen door deze technologie toe te passen.	CO <sub>2</sub> opvangen bij raffinaderijen, wat zorgt voor minder CO <sub>2</sub> -uitstoot.	3-4
CCUS using post-combustion capture (process heater)	Het toepassen van CO <sub>2</sub> -afvangtechnologieën in raffinaderijen, vergelijkbaar met die in de energieopwekking. Hoewel CO <sub>2</sub> -afvang bij waterstofproductie op commerciële schaal is aangetoond, is het nog niet toegepast in raffinaderijen. Het doel is om CO <sub>2</sub> -uitstoot van	CO <sub>2</sub> opvangen bij raffinaderijen, wat zorgt voor minder CO <sub>2</sub> -uitstoot.	3-4

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	procesverwarmers, boilers en nutsvoorzieningen, die 30-60% van de totale uitstoot van een raffinaderij uitmaken, effectief te verminderen.		

### B.3.2 Synthetische brandstoffen

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Direct CO <sub>2</sub> to dimethyl ether	De innovatie van directe omzetting van CO <sub>2</sub> met waterstof naar dimethylether (DME) maakt gebruik van CO <sub>2</sub> als hernieuwbare bron om een schone brandstof te produceren.	Kan brandstoffen vervangen op plekken waar elektrificatie moeilijk is en daarbij ook als chemische grondstof en wordt geproduceerd uit lage-emissiebronnen.	3
Concentrating solar fuels	Gebruikt geconcentreerde zonne-energie om vloeibare koolwaterstofbrandstoffen te synthetiseren uit water en CO <sub>2</sub> via een hoogtemperatuur thermochemische cyclus. Het proces omvat de thermische reductie van redoxmaterialen zoals ceriumoxide bij ongeveer 1500°C, gevolgd door de reductie van CO <sub>2</sub> en water om syngas te produceren.	De innovatie van geconcentreerde zonnebrandstoffen maakt gebruik van geconcentreerde zonne-energie om synthetische brandstoffen te produceren uit water en CO <sub>2</sub> . Deze synthetische brandstof kan een hogere efficiëntie bereiken, wat vooral nuttig is voor moeilijk te elektrificeren sectoren zoals langeafstandsscheepvaart en luchtvaart.	4
CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O co-electrolysis	Synthetische koolwaterstoffen worden gemaakt door co-elektrolyse van CO <sub>2</sub> en water, gevolgd door Fischer-Tropsch-synthese. Dit produceert syngas en diverse koolwaterstoffen zoals benzine en diesel, afhankelijk van de katalysatoren.	In sectoren die moeilijk te elektrificeren zijn, zoals langeafstandsscheepvaart en luchtvaart, zullen synthetische brandstoffen een van de weinige alternatieven zijn voor decarbonisatie, gezien de beperkte beschikbaarheid van duurzame biobrandstoffen. De efficiëntie is daarbij wellicht wel lager.	6
CO <sub>2</sub> reduction	Synthetische vloeibare koolwaterstoffen worden geproduceerd via Fischer-Tropsch-synthese van CO en waterstof, waarbij CO <sub>2</sub> wordt omgezet naar CO via de RWGS-reactie. De katalysator moet geschikt zijn voor beide reacties. De belangrijkste uitdagingen zijn de thermische stabiliteit van CO <sub>2</sub> en de efficiëntie van het proces. Tijdens de Fischer-Tropsch-synthese kunnen verschillende koolwaterstoffen worden geproduceerd, afhankelijk van de katalysatoren.	In sectoren die moeilijk te elektrificeren zijn, zoals langeafstandsscheepvaart en luchtvaart, zullen synthetische brandstoffen een van de weinige alternatieven zijn voor decarbonisatie, gezien de beperkte beschikbaarheid van duurzame biobrandstoffen. Efficiëntie is daarbij wellicht wel lager.	6
Biological CO <sub>2</sub> methanation	Biologische CO <sub>2</sub> -methanatie zet CO <sub>2</sub> om in methaan met behulp van methanogene micro-organismen, zonder chemische katalysatoren. Dit proces werkt bij een gematigde temperatuur en druk en is toleranter voor variaties in grondstoffen en onzuiverheden. Een belangrijke verbetering is dat het minder gevoelig is voor fluctuaties in de toevoer, hoewel het grotere reactoren nodig heeft vanwege de lage waterstofgas-vloeistof massatransfer.	Verlaagt CO <sub>2</sub> in de lucht door deze te gebruiken in de brandstof. Kan hernieuwbare energie omzetten in methaan met behulp van biologische micro-organismen.	7
Chemical methanation	CO en CO <sub>2</sub> worden omgezet naar methaan door hydrogenering met een chemische katalysator, zoals nikkel.	CO <sub>2</sub> die anders in de lucht wordt vrijgelaten of er al in zit, wordt omgezet in brandstof.	7

## B.4 Keten Elektriciteit

### B.4.1 Opwekking

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Pre-combustion: physical absorption (biomass with CCUS)	Biomassa omgezet in een synthesegas, bestaande uit waterstof en koolmonoxide. Dit synthesegas wordt vervolgens omgezet in extra waterstof en kooldioxide via een water-gas-shift (WGS) reactie. De CO <sub>2</sub> wordt afgevangen met behulp van fysieke scheidingsprocessen, zoals adsorptie. De overgebleven waterstof wordt daarna verbrand in een gecombineerde-cyclus gasturbine die elektriciteit opwekt.	CO <sub>2</sub> opvangen en energie genereren zonder extra uitstoot, daarvoor een schone manier voor het genereren van elektriciteit.	3
Ammonia turbine	Ammoniak wordt direct gebruikt als brandstof in microgasturbines met een vermogen tot 50 kW. Bij grotere gasturbines zijn er echter nog technische uitdagingen, zoals de langzame reactie van ammoniak met lucht, vlamstabiliteit en NO <sub>x</sub> -emissies, die momenteel worden onderzocht.	Gebruik van ammoniak als brandstof zorgt voor geen CO <sub>2</sub> uitstoot. Echter groot vermogen gasturbines is nog een uitdaging.	4
Ocean (cross-cutting)	Oceaantechnologieën omvatten verschillende ontwerpen om elektriciteit op te wekken uit energie in de zee, zoals golf- en getijdenenergie. Getijdenenergie benut de kracht van getijden, vergelijkbaar met windenergie. Oceanische thermische energieomzetting (OTEC) haalt thermische energie uit de diepe oceaan en zet deze om in elektriciteit. Zoutgradiëntenergie wordt geproduceerd door het verschil in zoutconcentratie tussen zoet en zout water, wat kan worden benut bij riviermondingen. Twee technologieën, druk-vertraagde osmose (PRO) en omgekeerde elektrolyse (RED), worden ontwikkeld om deze energie om te zetten in elektriciteit. Ten slotte kan oceaanstroomtechnologie energie oogsten uit zeestromen die altijd in één richting stromen.	Het zijn nieuwe vormen van hernieuwbare energie. Ze kunnen bijdragen aan een gevarieerdere mix van stroomvoorziening waardoor er minder behoefte kan zijn aan de balans van ons net. Energie uit de zee is zoals getijden is daarnaast geheel voorspelbaar.	4
Salinity gradient (ocean power)	Maakt gebruik van de osmotische druk tussen zeewater en zoet water om energie op te wekken. Osmotische druk is het drukverschil dat tussen twee oplossingen van verschillende concentraties ontstaat ten gevolge van osmose (diffusie van oplosmiddel uitsluitend plaats door een halfdoorlatend membraan).	Nieuwe bron van hernieuwbare energie die kan helpen de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen en de CO <sub>2</sub> -uitstoot te verlagen. Het kan een betrouwbaardere en stabielere energievoorziening zijn dan wind en zon.	4
Offshore renewable hydrogen production	Door de productie van waterstof op zee met behulp van offshore windenergie, wordt waterstof offshore geproduceerd en via pijpleidingen naar de kust getransporteerd. Dit is kostenefficiënter en betrouwbaarder dan elektriciteitskabels. Daarnaast vereist het proces een ontziltingsinstallatie voor zeewater. Verschillende benaderingen worden onderzocht, zoals het aanpassen van elektrolyzers op olie- en gasplatforms, het gebruik van kunstmatige eilanden of nieuwe platforms dicht bij windparken, en de integratie van elektrolyzers en ontziltingsinstallaties in	Pijpleidingen kunnen grotere hoeveelheden energie verplaatsen met waterstof dan kabels. Gas pijpleidingen kunnen ook hiervoor gebruikt worden. Een belangrijke uitdaging is nog het ontwikkelen van elektrolyse- en ontziltingssystemen die offshore gebruikt kunnen worden.	5

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	windturbines.		
Co-firing of ammonia in gas turbines	Een grote hoeveelheid vloeibare ammoniak wordt direct in de verbrandingskamer van aardgasgestookte turbines gespoten om de CO <sub>2</sub> -uitstoot tijdens het verbrandingsproces te verminderen. Dit kan echter leiden tot hogere NO <sub>x</sub> -emissies, die beheersingstechnologieën vereisen.	Ammoniak is een drager om groene waterstof over de wereld te vershippen en verhandelen. Door ammoniak te gebruiken in gasturbines, kunnen we de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen verminderen en de CO <sub>2</sub> -uitstoot verlagen. Echter zijn er nog technische uitdagingen met betrekking tot NO <sub>x</sub> -emissies.	5
Ocean thermal	Oceanische thermische energieomzetting (OTEC), inclusief zeewater-airconditioning (SWAC), maakt gebruik van temperatuurverschillen op verschillende diepten in de oceaan. Deze technologie kan ook worden gebruikt voor SWAC en ontzilting. Naast energieproductie is SWAC commercieel concurrerend voor koeling van commerciële gebouwen en datacenters in Europa. Een uitdaging is het ontwikkelen van materialen die bestand zijn tegen de corrosieve omstandigheden van de oceanen.	Nieuwe bron van hernieuwbare energie die kan helpen de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen en de CO <sub>2</sub> -uitstoot te verlagen.	5
Post-combustion: membranes polymeric (coal with CCUS)	CO <sub>2</sub> wordt gescheiden van de rookgassen met behulp van membranen. Deze membranen zijn polymeerfilms die als een selectieve barrière fungeren om CO <sub>2</sub> van een gasstroom te scheiden. Ze kunnen ook als contactmiddel dienen tussen de gasstroom en het vloeibare oplosmiddel (membranaire absorptie). Innovatief is het gebruik van membranen om CO <sub>2</sub> af te vangen.	CO <sub>2</sub> kan opgevangen worden bij kolengestookte energiecentrales. Gebruik van membranen bij CO <sub>2</sub> opvang kan een alternatieve methode zijn voor de meer gebruikelijke chemische absorptie. Membranen kunnen efficiënter en mogelijk goedkoper zijn, hoewel ze nog minder ontwikkeld zijn dan chemische absorptie.	6
Hybrid hydrogen fuel cell-gas turbine system	Brandstof wordt omgezet in een vaste-oxide brandstofcel (SOFC) naar elektriciteit. De uitlaatgassen van de SOFC, die nog brandstof en onverbrande waterstof bevatten, worden vervolgens verbrand in een gasturbine om extra elektriciteit te produceren. Bij gebruik van zuurstof in plaats van lucht (oxy-verbranding) kan een zuivere CO <sub>2</sub> -stroom worden verkregen voor opslag of hergebruik. Alternatieve methoden voor CO <sub>2</sub> -verwijdering zijn ook mogelijk, maar kunnen lagere afvangpercentages opleveren.	Maakt gebruik van natuurlijk aardgas of syngas, maar biedt een schonere optie hiervan door CO <sub>2</sub> op te vangen.	6
Linear Fresnel reflector (solar)	Linear Fresnel reflectors (LFR's) gebruiken rijen platte of licht gebogen spiegels om zonnestralen naar een vaste ontvanger te reflecteren. Deze ontvanger bevat water die door het zonlicht verwarmt wordt, waardoor stoom ontstaat. Deze stoom drijft vervolgens een turbine aan die elektriciteit opwekt. Hun eenvoudige ontwerp verlaagt de kosten en maakt directe stoomgeneratie mogelijk zonder extra vloeistoffen of warmtewisselaars. Ze zijn echter minder efficiënt dan trogsystemen en moeilijker te combineren met opslagcapaciteit.	Mogelijk lagere investeringskosten dan troggen, maar moeilijkere integratie van thermische opslag.	7
Oxy-fuelling (coal)	Steenkool wordt verbrand met bijna pure zuurstof in plaats van lucht. Dit resulteert in rookgassen die	CO <sub>2</sub> opvangen bij kolencentrales op een effectieve manier. Echter	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	voornamelijk bestaan uit CO <sub>2</sub> en waterdamp. Door de waterdamp te verwijderen, kan een hoog zuivere CO <sub>2</sub> -stroom worden verkregen. Zuurstof wordt meestal commercieel geproduceerd via lage-temperatuur lucht-scheiding. Het verlagen van het energieverbruik en de kosten voor zuurstofproductie en het oxy-fuelling proces zijn cruciaal om de kosten van CO <sub>2</sub> -afvang te verminderen.	kosten voor pure zuurstof-productie is nog hoog en te energie intensief.	
Pre-combustion: physical absorption (coal with CCUS)	Steenkool wordt omgezet in een synthesegas, bestaande uit waterstof en koolmonoxide. Dit synthesegas wordt vervolgens omgezet in extra waterstof en kooldioxide via een water-gas-shift (WGS) reactie. De CO <sub>2</sub> wordt afgevangen met behulp van fysieke scheidingsprocessen, zoals adsorptie (i.p.v. absorptie). De overgebleven waterstof wordt daarna verbrand in een gecombineerde-cyclus gasturbine die elektriciteit opwekt.	CO <sub>2</sub> -uitstoot van kolencentrales verminderen	7
Enhanced geothermal systems	Warmte van de aarde wordt gebruikt op locaties waar onvoldoende stoom of heet water direct uit de aarde aanwezig is. Het richt zich op het creëren van grote warmtewisselingsgebieden in heet gesteente. Het proces omvat het verbeteren van de doorlaatbaarheid door bestaande scheuren te openen en/of nieuwe scheuren te creëren.	Het opent de mogelijkheid om een veel groter deel van thermische energie te benutten (hernieuwbare energie), maar er is onzekerheid over de toekomstige kosten.	6-7

## B.4.2 Opslag

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Solid-state storage battery	Een verbetering van de huidige lithium-ion batterijen: de vloeibare (brandbare) elektrolyt wordt vervangen door een vaste elektrolyt. Dit kan leiden tot hogere energiedichtheid en verbeterde veiligheid, omdat vaste elektrolyten niet brandbaar zijn. Er zijn echter nog uitdagingen, zoals de noodzaak van hoge stapeldruk en het "ademen" van de cel (volumeverandering tijdens gebruik).	Deze innovatie kan een hogere energiedichtheid bieden, wat vooral belangrijk is voor de elektrificatie van transport, inclusief middelzware en zware vrachtwagens.	6
Liquid CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> wordt onder druk vloeibaar gemaakt en opgeslagen in een drukvat. Bij ontlading wordt de vloeistof verwarmd om weer gas te worden, en terwijl de CO <sub>2</sub> uitzet van vloeistof naar gas, drijft het een turbine aan om elektriciteit te genereren. Dit lijkt op energieopslag met gecomprimeerde lucht, maar CO <sub>2</sub> kan bij 31°C onder druk vloeibaar worden, waardoor grotere hoeveelheden energie kunnen worden opgeslagen in een relatief klein drukvat zonder specifieke geologische reservoirs. Het systeem kan een efficiëntie van 75% behalen.	Het biedt een nieuwe manier om energie op te slaan zonder afhankelijk te zijn van specifieke topografische of geologische omstandigheden.	6
Sodium-ion storage battery	Natrium-ion batterijen, gebruikt natrium in plaats van lithium (overvloed aan natrium). Ze hebben een kathode van natrium-gebaseerd materiaal, een anode (niet noodzakelijk van	Omdat ze goedkoper zijn dan lithium-ion batterijen en natrium overvloedig aanwezig is, kunnen ze helpen om de kosten van energieopslag te verlagen.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	natrium) en een vloeibare elektrolyt met natriumzouten en kleine hoeveelheden toevoegingen. Tijdens het opladen bewegen natriumionen van de kathode naar de anode, terwijl elektronen door het externe circuit bewegen. Het omgekeerde gebeurt tijdens het ontladen. Echter heeft het een lage energiedichtheid en een korte levensduur.	Echter hebben ze wel een lage energiedichtheid en meer geschikt voor stationaire opslag of korte-afstand mobiliteit.	
Gravity-based storage	Elektriciteit wordt gebruikt om een object, zoals water (zie pompwateropslag) of een betonnen blok, op te tillen. Energie wordt opgeslagen in het object als zwaartekrachtpotentiële energie. Wanneer elektriciteit nodig is, wordt het object neergelaten om de potentiële energie om te zetten in elektriciteit via een turbine.	In tegenstelling tot andere methoden zoals pompwateropslag, is deze technologie niet beperkt door geografische of geologische omstandigheden.	7
Liquid air energy storage	Elektriciteit wordt gebruikt om lucht samen te persen en af te koelen tot cryogene temperaturen (-196°C). De vloeibare lucht wordt vervolgens opgeslagen in een geïsoleerde tank bij lage druk. Wanneer er stroom nodig is, wordt de vloeibare lucht uit de tank gehaald, naar hoge druk gepompt, opnieuw verwarmd (door blootstelling aan omgevingslucht of met restwarmte van industriële processen of de vorige compressiefase) en uitgezet. Gasvormige lucht wordt zo geproduceerd, die een zuigermotor of een turbine aan kan drijven om elektriciteit te genereren. Het plaatsen van het systeem naast een bron van ongebruikte koude (om het energieverbruik in het vloeibaarmakingsproces te verminderen) of ongebruikte warmte (voor het verdampingsproces) verhoogt de algehele efficiëntie van het opslagsysteem.	In tegenstelling tot andere opslagmethoden zoals waterkrachtcentrales, is deze technologie niet beperkt door de geografische locatie. Dit betekent dat het op veel meer plaatsen kan worden toegepast.	7

### B.4.3 Infrastructuur

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Transactive energy	De technologie maakt het mogelijk voor consumenten om energie onderling uit te wisselen binnen een bestaand elektriciteitssysteem. Dit wordt mogelijk gemaakt door gedistribueerde energiebronnen en geavanceerde digitale monitoring- en controletechnieken. Hoewel het uitdagingen met zich meebrengt door de intermitterende aard van bronnen zoals zonne-energie, biedt het ook kansen voor snellere adoptie van hernieuwbare energie en betere netstabiliteit.	Draagt bij aan netstabiliteit. Daarbij versnelt het de adoptie van gedistribueerde energiebronnen en variabele hernieuwbare energie.	4
Superconducting high-voltage	Supergeleidende hoogspanning kan grote hoeveelheden stroom over korte afstanden met minimale verliezen transporteren. Supergeleidende draden kunnen meer dan	Supergeleidende kabels transporteren efficiënt grote hoeveelheden stroom met	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	150 keer de stroom geleiden van koper- of aluminiumdraden van dezelfde afmetingen. Dit vereist koeling, omdat materialen supergeleidend worden bij zeer lage temperaturen. Hoog temperatuur-supergeleiders (HTS) werken bij temperaturen boven 77 Kelvin (-196,2°C), wat het gebruik van vloeibare stikstof mogelijk maakt.	minimale verliezen en nemen minder ruimte in beslag en hebben daardoor een lagere milieu-impact dan conventionele kabels.	

## B.5 Keten Waterstof

Van de waterstofketen is geen tabel beschikbaar. De inhoud is te vinden in de teksten in paragraaf 4.2.5.

## B.6 Industrie

### B.6.1 Chemicaliën en kunststoffen

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Biomass gasification (ammonia)	Synthetische gas rijk aan waterstof wordt geproduceerd met behulp van biomassa om zo uiteindelijk via het conventionele Haber-Bosch proces, waarin dit gecombineerd wordt met stikstof, gebruikt wordt voor de productie van ammoniak. Dit is anders dan de conventionele methode waar stoom-methaan reforming wordt gebruikt voor de waterstof productie.	Geen fossiele brandstof nodig bij de productie van ammoniak. Echter is het afhankelijk van de voorraad duurzame biomassa. Het wordt hierdoor ook erg kostbaar.	5
Physical adsorption (ammonia)	Productiemethode voor groene waterstof als input voor het Haber-Bosch proces. Fysische adsorptie is een techniek waarbij moleculen aan het oppervlak van selectieve materialen (adsorbenten) wordt opgevangen. Door drukschommeling kan CO <sub>2</sub> opgevangen worden (of door vacuüm schommelingen). Fysische adsorptie wordt al gebruikt in de productie van ammoniak, maar adsorptie nog niet.	Methode kunnen zijn om CO <sub>2</sub> -neutraal ammoniak te produceren, maar dat is nog niet bewezen.	5
Lignocellulosic gasification (ethylene)	Ethyleen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) kan worden geproduceerd uit bio-ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O) via dehydratieprocessen. Bio-ethanol kan worden geproduceerd uit houtige biomassa (bijv. houtgewassen, landbouwresiduen) door vergassing om een syngas te produceren, gevolgd door omzetting in ethanol via fermentatie of katalytische conversie.	Fossiele brandstoffen worden niet gebruikt bij deze techniek voor de productie van bioethanol. Namelijk via houtige vergassing wordt de biomassa omgezet naar bio-ethanol en zo vervolgens bio-ethyleen. Echter is de technologie nog niet ver ontwikkeld en kostintensief.	5
Steam cracker electrification (high value chemicals)	Stoomkraken is een proces waarbij lange-keten koolwaterstoffen worden afgebroken tot eenvoudigere verbindingen, zoals het splitsen van nafta in olefinen en aromaten voor verdere verwerking. Vanwege de hoge temperatuureisen worden stoomkrakers momenteel aangedreven door fossiele brandstoffen. Er wordt echter	Meer gebruik van elektriciteit en niet van fossiele brandstoffen.	5

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	onderzoek gedaan naar het gebruik van elektriciteit voor stoomkrakers.		
Lignin (biomass) (benzene, toluene and xylenes)	BTX-aromaten zijn belangrijke chemische stoffen die uit lignine, een bestanddeel van planten, kunnen worden gemaakt. Dit kan op verschillende manieren, zoals door chemische reacties of filtratieprocessen. Het voordeel is dat er geen fossiele brandstoffen nodig zijn, wat beter is voor het milieu. Maar het nadeel is dat het proces veel geld en energie kost, en dat er niet altijd genoeg duurzame biomassa beschikbaar is. Hierdoor kan het duurder zijn dan andere methoden om dezelfde stoffen te maken.	Deze productieroute vermijdt het directe gebruik van fossiele brandstoffen bij de productie van aromaten	6
Solvent dissolution for PET	Een oplosmiddel wordt gebruikt om plastic afval te zuiveren zonder het volledig af te breken in de vloeistoffase. Het verwijdert kleur, geur en andere verontreinigingen, zodat het gerecyclede plastic net zo goed is als nieuw plastic	Verbeterde recycling zou de behoefte aan nieuwe productie kunnen verminderen en down-cycling kunnen verminderen, waarbij een materiaal wordt gerecycled tot een product van lagere waarde. Er moeten echter ook gedragsbarrières worden overwonnen om de inzamelingspercentages van plastic te verhogen, en secundaire productie zal waarschijnlijk nooit volledig de behoefte aan primaire productie vervangen.	6
Cryogenic capture (ammonia)	De CO <sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van waterstof voor ammoniak via stoom methaan-reforming kan worden opgevangen door het gasmengsel af te koelen tot een temperatuur waar CO <sub>2</sub> bevriest en vervolgens verwijderd kan worden.	Het kan kosteneffectieve vorm zijn van CO <sub>2</sub> opvangen bij de productie van ammoniak. Het maakt daarnaast nog steeds gebruik van fossiele brandstoffen bij de productie.	7
Methanol-based (benzene, toluene and xylenes)	Aromaten die uit methanol worden geproduceerd met behulp van een katalytisch proces in plaats vanuit nafta.	Minder behoefte aan fossiele brandstoffen en CO <sub>2</sub> uitstoot wordt verminderd mits de methanol duurzaam wordt geproduceerd. Echter eist het grote hoeveelheden methanol wat het duur maakt en de noodzaak is laag omdat aromaten nog steeds beschikbaar zijn uit raffinaderijen en stoomkrakers.	7
Hydrothermal upgrading	Dit proces maakt gebruik van water onder superkritische omstandigheden (zeer hoge druk en temperatuur) om koolstofbindingen in afgedankt plastic te breken, waardoor polymeren worden afgebroken tot kortere koolwaterstofketens.	Minder grondstoffen nodig door plastic effectief te recyclen naar hoge kwaliteit plastic. Uitdaging: mensen moeten beter plastic recyclen.	7
Chemical absorption (high value chemicals)	Richt zich op het efficiënter maken van het gebruikelijke proces om CO <sub>2</sub> op te vangen bij de productie van HVC's. In het proces reageert CO <sub>2</sub> met een chemisch oplosmiddel, zoals amines. Bij temperaturen tussen 120-150 °C wordt de CO <sub>2</sub> weer vrijgegeven en het oplosmiddel	CO <sub>2</sub> uitstoot verminderen in de chemische industrie.	7

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	geregenereerd voor hergebruik. Zo kan CO <sub>2</sub> afgevangen worden en hergebruikt voor industriële processen. Deze innovatie is bijzonder nuttig voor de productie van hoogwaardige chemicaliën (HVC's).		
Physical absorption (high value chemicals)	Door een vloeibaar oplosmiddel wordt CO <sub>2</sub> uit rookgassen met hoge CO <sub>2</sub> concentratie geabsorbeerd, zonder chemische reactie. Veel gebruikte fysische oplosmiddelen zijn Selexol (dimethylethers) en Rectisol (methanol).	CO <sub>2</sub> uitstoot verminderen in de chemische industrie, vooral nuttig in industriële processen waar de rookgassen een hoge CO <sub>2</sub> concentratie hebben.	7
Synthetic hydrogen-based fuels in a conventional steam cracker (high value chemicals)	Synthetische brandstoffen, die worden geproduceerd met behulp van CO <sub>2</sub> en waterstof, worden direct in een conventionele stoomkraker geïntegreerd. Een stoomkraker is een industriële installatie die gebruikt wordt om grote koolwaterstofmoleculen af te breken tot kleinere moleculen die belangrijke grondstoffen zijn voor de chemische industrie. Innovatief is het gebruiken van synthetische brandstoffen die zijn geproduceerd uit waterstof en CO <sub>2</sub> , zonder grote veranderingen aan de bestaande infrastructuur door gebruik van bestaande stoomkrakers.	Vermindering van CO <sub>2</sub> -uitstoot en gebruik van de al bestaande stoomkrakers.	7
Physical absorption (methanol)	Vloeibaar oplosmiddel wordt gebruikt om CO <sub>2</sub> uit rookgassen met hoge concentratie CO <sub>2</sub> te absorberen, zonder dat er een chemische reactie plaatsvindt. Veelgebruikte fysische oplosmiddelen zijn Selexol (dimethylethers van polyethyleenglycol) en Rectisol (methanol).	In kolen-gebaseerde methanolproductie CO <sub>2</sub> effectief afvangen zonder chemische reacties.	7
CO <sub>2</sub> - and electrolytic hydrogen-based produced with variable renewables (methanol)	Synthesegas wordt geproduceerd dat voornamelijk bestaat uit koolmonoxide (CO) en waterstof. Dit gas wordt verkregen uit methaan. Onder specifieke omstandigheden reageren CO en waterstof samen om methanol te produceren. Dit proces maakt gebruik van waterstof die wordt geproduceerd door middel van water-elektrolyse. Door gebruik te maken van afgevangen CO <sub>2</sub> uit industriële processen, kan de opbrengst van methanol worden verhoogd.	Door gebruik van hernieuwbare elektriciteit voor productie van waterstof via elektrolyse en hergebruik van CO <sub>2</sub> uit industriële processen kan methanol geproduceerd worden, bijdragend aan vermindering van totale CO <sub>2</sub> -uitstoot.	7
Methane pyrolysis (methanol)	Methaanpyrolyse, ook wel methaansplitsing of -kraken genoemd, is een thermochemisch proces waarbij methaan wordt afgebroken in waterstof (H <sub>2</sub> ) en vaste koolstof met behulp van een katalysator. Dit proces genereert CO <sub>2</sub> -vrije waterstof, omdat de koolstof in het methaan wordt gescheiden als vaste koolstof die voor verschillende toepassingen kan worden gebruikt. In de methanolproductie kan methaanpyrolyse worden gebruikt om synthesegas te genereren zonder CO <sub>2</sub> -uitstoot, waarbij de daaropvolgende processtappen zoals methanolsynthese en destillatie vrijwel onveranderd blijven. Hoewel de productie van carbon black via methaanpyrolyse al commercieel wordt toegepast, werken verschillende projecten aan het gebruik van deze technologie om waterstof te produceren voor methanol- of ammoniakproductie.	Doordat de koolstof in vaste vorm vrij komt is deze makkelijk af te vangen, waardoor CO <sub>2</sub> -vrije waterstof geproduceerd wordt.	7

## B.6.2 Elektrische verwarmingstechnieken

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Electric arc and plasma arc furnaces (high temperature heating)	Plasma boogoven is een speciaal type elektrische oven die extreem hoge temperaturen, tot wel 5000 graden Celsius, kan bereiken. Dit kan door een krachtige elektrische stroom door bepaalde gassen, zoals argon, te sturen. Deze ovens worden momenteel gebruikt voor het verwerken van gevaarlijk afval en sommige metalen zoals titanium en wolfram. Ze kunnen worden aangepast voor verschillende toepassingen, zoals de productie van cement en aluminium, die momenteel moeilijk te elektrificeren zijn.	Door het gebruik maken van hernieuwbare elektriciteit kunnen ze grote potentie hebben brandstofgestookte ovens te vervangen en zo CO <sub>2</sub> -uitstoot bij industriële processen te verminderen.	3
Radio waves (high temperature heating)	Door radiogolven wordt warmte gegenereerd in niet-geleidende materialen. Een object wordt tussen twee elektroden geplaatst die verbonden zijn met een hoogfrequentiegenerator (werkfrequentie ligt tussen 1 en 100 MHz). Door de excitatie van de moleculen ontstaat er warmte binnenin het materiaal zelf. Dit zorgt voor een snelle warmteoverdracht, er zijn geen verbrandingsproducten en de systemen kunnen snel worden ingeschakeld. Hoewel het systeem goedkoper is dan microgolf-systemen, is het minder geschikt voor producten met onregelmatige vormen. Het kan worden toegepast voor drogen, sinteren, calcineren, koken, uitharden, voorverwarmen en het versnellen van chemische reacties. Het wordt nu commercieel gebruikt in verschillende toepassingen voor lage tot middelhoge temperaturen. Het onderzoek naar het gebruik voor hogere temperaturen lijkt tot nu toe relatief beperkt te zijn.	Door het gebruik maken van hernieuwbare elektriciteit kunnen ze grote potentie hebben brandstofgestookte ovens te vervangen en zo CO <sub>2</sub> -uitstoot bij industriële processen te verminderen.	3
Ultra-violet (high temperature heating)	Ultraviolet straling is een deel van het elektromagnetische spectrum met golflengtes tussen 40 en 400 nm, wat een hogere frequentie en meer energie heeft dan zichtbaar licht. UV-licht wordt gebruikt om objecten te verwarmen via een fotochemisch proces dat onderdelen kan vervormen of verharden. Een UV-lamp levert de stralingsenergie die nodig is om de polymerisatiereactie te stimuleren. Deze technologie wordt toegepast in verschillende industriële processen, zoals de productie van auto-onderdelen, drukwerk, voedselverpakking en elektronica. Wat deze technologie innovatief maakt, is de mogelijkheid om thermische processen op locatie te verduurzamen door een veel snellere en efficiëntere verwarmingsoplossing te bieden, zowel bij het opstarten als bij het uitschakelen.	Door gebruik te maken van hernieuwbare elektriciteit kan een CO <sub>2</sub> -vrij verwarmingsproces worden gegarandeerd. Hoewel het veel potentieel heeft voor toepassingen met middelhoge temperaturen, is het waarschijnlijk beperkt toepasbaar voor hoge temperaturen.	3
Ammonia (low temperature heating)	Het gebruik van ammoniak in industriële boilers in plaats van gas voor het bereiken van lage temperatuur warmte	Geen CO <sub>2</sub> -uitstoot bij het verbranden van ammoniak, maar wel NO <sub>x</sub> .	4-5
X-ray transmission for recycling	Het terugwinnen van kostbare materialen is complexer dan het scheiden van ferrometalen van non-ferrometalen (door magnetische eigenschappen), waarvoor röntgen-transmissie een oplossing kan zijn. Materialen worden op basis van hun dichtheid gesorteerd. Wanneer de röntgenstralen door een materiaal gaan, worden ze geabsorbeerd in verschillende	Draagt bij aan het meer en beter kunnen recyclen van metalen.	3

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	mate, afhankelijk van de dichtheid van het materiaal. Dichtere materialen absorberen meer röntgenstralen, terwijl minder dichte materialen minder absorberen. Op deze manier kan een apparaat het materiaal herkennen en zo sorteren. Ook zeer kleine deeltjes.		
Electric heating with thermochemical storage (high temperature heating)	Thermochemische warmteopslag chemische reacties gebruikt chemische reacties om warmte op te slaan (exotherm) en vrij te geven (endotherm). Wanneer er extra hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is, wordt deze energie gebruikt om een chemische reactie te starten die warmte opslaat in een speciaal materiaal. Later, wanneer er warmte op hoge temperatuur nodig is, wordt de reactie omgekeerd (door warmte of een katalysator toe te voegen) en komt de opgeslagen warmte vrij om te gebruiken voor industriële processen.	Moedigt gebruik van hernieuwbare energie toe door deze meer te kunnen opslaan. Kan ook gebruikt worden voor energie opslag voor het elektriciteitsnet.	4
Folding-shearing	De mechanica van het spinnen wordt toegepast op plaatmetaalvorming. Het proces begint met het vouwen van een metalen plaat langs zijn as, waarna de plaat wordt uitgetrokken op een manier die de breedte vermindert zonder de gemiddelde dikte te verkleinen. In plaats van het materiaal weg te snijden, zoals bij traditionele methoden, wordt hier het hele metalen schijfje gebruikt. Als deze technologie succesvol blijkt, kan het mogelijk het metaalafval bij processen zoals de productie van autocarrosserieën met wel twee-derde verminderen.	Verminderd metaalplaat afval.	4
Direct heat from variable renewables (high temperature heating)	Een geconcentreerde zonne-energiecentrale (CSP) gebruikt spiegels om zonnestraling te concentreren en om te zetten in hoge temperatuurwarmte. Deze warmte kan worden gebruikt in verschillende industriële processen die hoge temperaturen vereisen, zoals de behandeling van niet-metallische deeltjes en de productie van klinker.	Kan het gebruik van fossiele brandstoffen vervangen bij industriële processen. Daarbij kan het makkelijker zijn om toe te passen dan de elektrificatie van warmte.	6
Microwaves (high temperature heating)	Microwaveverwarming genereert warmte intern in niet-geleidende materialen. Het object wordt geplaatst tussen twee elektroden die zijn verbonden met een hoogfrequentiegenerator (werkfrequentie ligt tussen 100 en 10.000 MHz). Door de opwinding van de moleculen ontstaat er warmte binnenin het materiaal zelf. De voordelen zijn een snelle warmteoverdracht, de afwezigheid van verbrandingsproducten en de hoge snelheid waarmee de systemen kunnen worden ingeschakeld. Voor carbonisatie van koolstofvezel kan het een belangrijke rol spelen in het aanzienlijk verminderen van de uitstoot.	Kan brandstof gestookte ovens in verschillende processen vervangen door gebruik ook van hernieuwbare elektriciteit.	6
Rotary compression heater (high temperature heating)	Compressieverwarming maakt gebruik van roterende turbines, die gebruik maken van elektriciteit, die gassen snel versnellen en vertragen, waardoor hun temperatuur stijgt. Een voorbeeld hiervan is de RotoDynamic Heater (RDH) van Coolbrook, een type elektrische verwarming die temperaturen tot 1700°C kan bereiken. Deze technologie kan worden toegepast in verschillende industriële sectoren, zoals de chemische industrie en de cementproductie. Wat deze technologie innovatief	Door gebruik te maken van elektrische verwarming, kan compressieverwarming helpen om de CO <sub>2</sub> -uitstoot te verminderen en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verkleinen.	6

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	maakt, is het vermogen om zeer hoge temperaturen te bereiken zonder gebruik te maken van fossiele brandstoffen.		
Molten oxide electrolysis	Gesmolten oxide-elektrolyse (MOE) is een elektro metallurgisch proces dat wordt gebruikt om vloeibaar metaal direct uit oxidegrondstoffen te produceren. Elektronen fungeren als reductiemiddelen (is een stof die elektronen doneert aan een andere stof in een chemische reactie, waardoor die andere stof wordt gereduceerd), en de producten van de reactie zijn puur metaal en zuurstof. Deze technologie kan worden toegepast op mijnbouwafval om waardevolle metalen terug te winnen.	Mogelijkheid om metalen te winnen zonder de noodzaak van chemische reductiemiddelen zoals koolstof. Dit betekent dat er minder vervuiling en CO <sub>2</sub> -uitstoot is.	7
Ring rolling with variable wall thickness	Er wordt gebruik gemaakt van de controle van rolopeningen en snelheden om variabele wanddiktes van metalen ringen te bereiken. Dit kan het materiaalverlies met ongeveer de helft verminderen in vergelijking met conventionele processen, waarbij niet-asymmetrische ringen uit grotere ringen worden gesneden en tussen de 50 en 90% van het metaal verloren kan gaan. De technologie is toepasbaar op ringvormige componenten, zoals luchtvaartmotoren, roterende machines (bijv. stoom- en windturbines), lagers en pijpen. Het kan waarschijnlijk worden gebruikt voor de meeste gevormde metalen.	Door het verminderen van materiaalverlies wordt er minder energie verbruikt in het productieproces.	7

### B.6.3 IJzer en staal

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Using ammonia as reductant (DRI)	Het gebruik van ammoniak als reductiemiddel (DRI) houdt in dat ammoniak direct wordt gebruikt om ijzererts te reduceren tot staal, zonder dat het eerst moet worden omgezet in waterstof (die nu vaak het reductiemiddel is). Dit proces kan vooral nuttig zijn in landen zoals Japan, waar ammoniak wordt onderzocht als een manier om waterstof te importeren.	Het draagt bij aan de vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in de staalindustrie, wat een van de grootste bronnen van industriële CO <sub>2</sub> -uitstoot is.	2
Carbon recycling through thermochemical coupling	In de traditionele staalproductie wordt koolstofmonoxide, geproduceerd door het verbranden van cokes (soort steenkool), gebruikt om ijzererts om te zetten in staal. Dit proces stoot koolstofdioxide uit. De innovatieve technologie stelt voor om deze koolstofdioxide op te vangen en te splitsen in koolstofmonoxide en zuurstof met behulp van warmte. Het koolstofmonoxide kan dan opnieuw worden gebruikt in het staalproductieproces, wat de behoefte aan nieuwe cokes vermindert en de uitstoot van koolstofdioxide verlaagt.	Door koolstofdioxide te recyclen en opnieuw te gebruiken, wordt de staalproductie duurzamer en milieuvriendelijker.	3
Based on biogenic reduction gas (DRI)	Het gebruik van een reductiemiddel van biogene oorsprong zou de fossiele CO <sub>2</sub> -uitstoot bij de ijzerproductie elimineren. Dit betekent dat het reductiemiddel afkomstig is van biologische bronnen, zoals planten of biomassa, in plaats van fossiele brandstoffen.	Netto geen CO <sub>2</sub> -uitstoot bij gebruik van biogene reductiemiddelen.	3

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Low temperature electrolysis	Bij deze innovatie wordt gebruik gemaakt van hernieuwbare elektriciteit om ijzeroxiden (de grondstof voor staal) om te zetten in zuiver staal. Dit gebeurt bij lage temperaturen (<110°C) en in een waterige oplossing. Het kan worden ontworpen om te reageren op de belasting van het elektriciteitsnet om verdere variabele hernieuwbare energiebronnen voor stroomopwekking te integreren. Het bevindt zich in een veel eerder ontwikkelingsstadium vergeleken met andere technologieën voor staalproductie met lage emissies.	Het gebruik van hernieuwbare elektriciteit zou een volledig CO <sub>2</sub> -vrije productieroute voor staal openen en ongeveer 30% minder energie verbruiken in vergelijking met standaard staalproductie.	4-5
Reduction via alkali metal looping	In de traditionele staalproductie wordt ijzererts omgezet in staal door het gebruik van koolstof. Deze technologie gebruikt in plaats daarvan alkalimetalen (zoals natrium of kalium) om ijzer uit ijzererts te halen. Deze metalen scheiden de zuurstof van het ijzer en worden vervolgens gerecycled om de zuurstof weer vrij te maken, waardoor het proces opnieuw kan beginnen in een gesloten kringloop. Het proces vereist thermische energie en vindt plaats bij temperaturen van 300-900 °C, afhankelijk van het deel van de kringloop.	Het draagt bij aan de vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in de staalindustrie, wat een van de grootste bronnen van industriële CO <sub>2</sub> -uitstoot is.	4
Smelting reduction based on hydrogen plasma	Het smeltreductieproces op basis van waterstofplasma (HPSR) gebruikt waterstof in een plasmatoestand (een zeer hete en energierijke vorm van waterstof) om ijzeroxiden (de grondstof voor staal) om te zetten in zuiver staal. Dit gebeurt door een elektrische boog te creëren tussen een speciale elektrode en het vloeibare ijzeroxide. Het bevindt zich in een veel eerder ontwikkelingsstadium vergeleken met andere technologieën voor staalproductie met lage emissies.	Waterstof geproduceerd door hernieuwbare energie zou een CO <sub>2</sub> -vrije productie van staal betekenen.	4
Chemical absorption - Process gas hydrogen enrichment and CO <sub>2</sub> removal for use or storage (blast furnace)	Het omvat twee belangrijke stappen: het verwerken van de proces/afgassen door de CO <sub>2</sub> af te vangen en het verrijken van de gassen met waterstof. Bij waterstofverrijking worden procesgassen opgevangen, opnieuw verwarmd tot 900 °C, en teruggevoerd naar de hoogoven als reductiemiddel, waardoor de behoefte aan cokes en andere brandstoffen vermindert. CO <sub>2</sub> -afvang houdt in dat CO <sub>2</sub> uit rookgassen wordt opgevangen en vervolgens wordt getransporteerd voor opslag. Daarnaast kan CO <sub>2</sub> uit hoogovengas worden omgezet in CO en verrijkt met externe H <sub>2</sub> . Dit gas kan in de hoogoven of voor andere doeleinden kunnen worden gebruikt. Overtollige CO <sub>2</sub> kan worden opgeslagen. Het kan de koolstofinput van hoogovens aanzienlijk verminderen, waardoor tot 30% minder CO <sub>2</sub> -uitstoot wordt gegenereerd in vergelijking met een standaard hoogoven. Door integratie van CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) kan de totale CO <sub>2</sub> -uitstoot per ton staal zelfs met 55-60% worden verminderd. Hoewel deze technologie nog in een vroeg ontwikkelingsstadium verkeert en waarschijnlijk duurder is dan andere technologieën voor lage emissies, biedt het een groot voordeel: het kan worden toegepast als een retrofit op bestaande hoogovens.	De innovatie helpt bij het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en het bevorderen van een schonere staalproductie.	5

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Charge and Injection carbon substitution with biomass sources	Richt zich op het verminderen van CO <sub>2</sub> -uitstoot bij het gebruik van een elektrische boogoven door biogene koolstofbronnen, zoals biomassa, te gebruiken in plaats van traditionele koolstofbronnen. Koolstof is nodig om het koolstofgehalte van staal te verhogen en om gas te genereren dat zorgt voor schuimvorming van slakken (bijproduct tijdens smelten van ijzererts, bestaat voornamelijk uit vloeibare oxiden en andere onzuiverheden die niet worden gereduceerd tot metaal). Door biomassa te gebruiken, kunnen de CO <sub>2</sub> -emissies die hierbij vrijkomen, worden verminderd of vermeden.	Door gebruik van biomassa reduceert het CO <sub>2</sub> -uitstoot tijdens staal productie.	5
Physical adsorption (DRI)	Richt zich op het verminderen van CO <sub>2</sub> -uitstoot bij direct gereduceerde ijzer (DRI) installaties, waar ijzererts wordt gereduceerd tot ijzer zonder te smelten, meestal met aardgas of kolen. Fysische adsorptie-gebaseerde CO <sub>2</sub> -afvang houdt in dat CO <sub>2</sub> -moleculen worden opgevangen op het oppervlak van selectieve materialen, zogenaamde adsorbenten. Het vrijmaken van CO <sub>2</sub> van het oppervlak kan worden bereikt door drukschommelingsadsorptie (PSA) bij hoge druk, of vacuümschommelingsadsorptie (VSA) bij normale druk. Er bestaat ook een hybride configuratie, bekend als vacuümdrukschommelingsadsorptie (VPSA).	Het is potentieel minder kostbaar dan de huidige chemische absorptie. Hoewel de technologie veelbelovend is voor emissiereducties, is de toepassing waarschijnlijk beperkt tot regio's met een hoge beschikbaarheid van goedkoop aardgas. Daarnaast wordt nog steeds gebruik gemaakt van fossiele brandstoffen.	5
Hydrogen for high-temperature heat for ancillary steelmaking processes	Richt zich op het gebruiken van waterstof om hoge temperaturen te leveren voor ondersteunende processen in de staalproductie, zoals afwerkingsprocessen (bijv. walsen), materiaalvoorverwarming, en om de kleine hoeveelheid aardgas in elektrische boogovens te vervangen.	Gebruik maken van waterstof als een duurzame energiebron voor hoge-temperatuurprocessen in de staalindustrie in plaats van fossiele brandstoffen.	5
High temperature molten oxide electrolysis	Gesmolten oxide-elektrolyse (MOE), is een elektrometallurgisch proces waarbij vloeibaar metaal direct uit oxidegrondstoffen wordt geproduceerd. Elektronen fungeren als reductiemiddelen, en de producten van de reactie zijn puur metaal en zuurstof. Het staalproductieproces vereist zeer hoge temperaturen tot 2000 °C.	Het gebruik van hernieuwbare elektriciteit maakt een volledig CO <sub>2</sub> -vrije productieroute voor staal mogelijk, en het energieverbruik met ongeveer 30% vermindert vergeleken met standaard staalproductie. Bovendien kan het worden ontworpen om te reageren op de balans van het elektriciteitsnet, waardoor variabele hernieuwbare energiebronnen beter kunnen worden geïntegreerd.	5
Plasma torches for iron ore pelletisation	Bij een plasmatoorts wordt elektrische energie via een gasontlading overgedragen aan het plasma (geïoniseerd gas), dat vervolgens de energie weer overdraagt aan het te verwarmen product. Plasmatoortsen kunnen in veel industriële toepassingen worden gebruikt om hoge temperaturen te genereren. In ijzererts-pelletisatieovens kunnen ze worden ingezet om geëlektrificeerde warmte te leveren. Hoewel de technologie zich nog in een vroeg stadium bevindt, kan pelletisatie belangrijker worden met de opkomst van op waterstof gebaseerde DRI-staalproductie.	Draagt bij aan een schonere staalproductie.	5

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Based on 100% electrolytic hydrogen (DRI)	Deze technologie richt zich op het direct reduceren van ijzererts tot ijzer zonder te smelten, met behulp van 100% groene waterstof in plaats van aardgas of kolen. Dit proces kan hoogwaardig erts gebruiken dat is gevormd tot directe reductie pellets, of varianten die technologieën zoals gefluidiseerde bedden gebruiken om ijzerertsfijn te verwerken. Hoewel concurrerende opties zoals smeltreductie met CCS verder ontwikkeld en waarschijnlijk goedkoper zijn, bieden ze een lagere emissiereductie.	Maakt gebruik van waterstof uit hernieuwbare elektriciteit, wat een CO <sub>2</sub> -reductie van 98% mogelijk maakt vergeleken met een traditionele hoogoven.	6
Conversion of steel offgases to chemicals (blast furnace)	Richt zich op het recyclen van afvalgassen uit staalfabrieken, zoals hoogovengas en cokesovengas (die o.a. CO, CO <sub>2</sub> en H <sub>2</sub> bevatten), door ze om te zetten in chemicaliën. Hierdoor wordt de CO <sub>2</sub> twee keer gebruikt en wordt de uitstoot vertraagd.	Kan de CO <sub>2</sub> -voetafdruk van de geproduceerde chemicaliën verminderen, afhankelijk van wat er wordt vervangen. De totale besparingen hangen af van het huidige gebruik van staalafvalgassen, zoals affakkelen versus energieopwekking, in vergelijking met hun gebruik als alternatieve grondstof in de chemische productie. Een bijkomend voordeel is dat deze technologie de integratie van variabele hernieuwbare energieopwekking kan vergemakkelijken door vraagflexibiliteit te bieden in chemische productie-installaties.	7
Electrolytic hydrogen partially replacing injected coal (blast furnace)	Richt zich op het gedeeltelijk vervangen van geïnjecteerde kolen (kolen die in poedervorm of als gas in een hoogoven worden geïnjecteerd) door groene waterstof in hoogovens, die momenteel voornamelijk op kolen en cokes draaien. Waterstof kan een deel van de geïnjecteerde kolen vervangen, waardoor de behoefte aan kolen vermindert.	Gebruikt waterstof in plaats van een deel van het kool en draagt zo bij aan CO <sub>2</sub> vermindering bij gebruik van hoogovens.	7
CCUS (smelting)	Richt zich op een nieuwe zuurstofrijke smeltreductie voor de productie van staal. Hierbij wordt ijzererts bovenin een reactor geïnjecteerd en poederkool onderin. De poederkool reageert met het gesmolten erts om vloeibaar ijzer te produceren, dat de basis vormt voor hoogwaardig staal. Het gebruik van zuivere zuurstof maakt het proces geschikt voor integratie van CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage), omdat het een hoge concentratie CO <sub>2</sub> -afvalgassen genereert en de emissies via één enkele schoorsteen worden afgevoerd, in tegenstelling tot een standaard staalfabriek met meerdere emissiepunten. CCUS kan ook worden toegepast op bestaande smeltreductietechnologieën, hoewel de afvalgassen nog aanzienlijke energie bevatten samen met CO <sub>2</sub> , waardoor afvang ook nodig zou zijn bij een energiecentrale die deze afvalgassen gebruikt om bijna-nul emissieniveaus te bereiken.	Zou een emissiereductie van 80% kunnen opleveren ten opzichte van conventionele hoogoven-cokesoven staalproductie	7

## B.6.4 Pulp en papier

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Supercritical CO2 drying	Superkritisch CO2 is een bijzondere toestand van koolstofdioxide waarbij het zowel de eigenschappen van een vloeistof als van een gas heeft. Dit betekent dat het kan doordringen in materialen zoals een gas, maar ook kan oplossen zoals een vloeistof. In het "extractie droogproces" kan superkritisch CO <sub>2</sub> worden gebruikt in plaats van stoom verwarmde cilinders. Dit proces maakt gebruik van de unieke eigenschappen van superkritisch CO <sub>2</sub> om vocht uit materialen te verwijderen, wat efficiënter en sneller kan zijn dan traditionele methoden.	Kan het energieverbruik voor het droogproces verminderen, omdat het minder warmte nodig heeft dan stoom.	2
Water removal without evaporation	Bij het drogen van materialen wordt water meestal verwijderd door verdamping, waarbij water van vloeibare naar gasvormige toestand overgaat. Dit proces kost veel energie. Door deze faseovergang te vermijden, kan er aanzienlijk energie worden bespaard. Een methode om dit te bereiken is elektro-osmose, waarbij elektrische krachten worden gebruikt om water uit materialen te verwijderen zonder het te verdampen. Dit kan leiden tot een energiebesparing tot wel 90% in vergelijking met traditionele droogmethoden.	Vermindert energie verbruik in droogprocessen van papier.	2
Mild repulping technologies	Bij het repulpen wordt droog pulp of papier voor recycling in water verspreid om de individuele vezels te isoleren. Traditioneel gebeurt dit met intensieve methoden die veel energie verbruiken en de vezels kunnen beschadigen. Mildere technologieën kunnen echter energie besparen tijdens het repulpen en de vezelschade verminderen. Dit leidt tot een lagere waterretentiewaarde, wat betekent dat de vezels minder water vasthouden en dus minder energie nodig is voor het drogen. Bovendien kunnen deze technologieën het verlies van vezels tijdens het proces verminderen.	Door energiezuinigere repulpmethoden te gebruiken, kan het totale energieverbruik in de papier- en pulpindustrie worden verminderd.	3
Paper making without water	Bij de papierproductie wordt ongeveer 70% van de benodigde energie gebruikt voor het drogen, waarbij warmte wordt toegepast om water te verwijderen. Als water geëlimineerd kan worden, is drogen niet meer nodig. De uitdaging is om de vezels onderling te laten binden en droog te defibreren zonder de vezels te beschadigen. Dit is moeilijk omdat papier zijn sterkte ontleent aan waterstofbruggen die tijdens het verwijderen van water worden gevormd. Bovendien worden deze waterstofbruggen bij het repulpen van droog pulp of papier voor recycling meestal licht verbroken wanneer water wordt toegevoegd.	Door het elimineren van de noodzaak voor drogen, kan er een enorme hoeveelheid energie worden bespaard.	4
Reduction of water in size press	Bij de productie van papier worden de producten eerst gedroogd voordat ze opnieuw worden bevochtigd in het sizing-proces, wat een tweede droogstap vereist. Door het watergehalte in het sizing-middel te verminderen, terwijl een lage viscositeit behouden blijft, kan het energieverbruik van de tweede droogfase aanzienlijk worden verminderd. Dit komt doordat er minder water hoeft te worden verwijderd, wat minder warmte en dus minder energie vereist.	Energieverbruik verminderen tijdens papier productie proces.	4

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
Superheated steam	Droging in een omgeving met alleen stoom (zonder lucht) maakt het mogelijk om alle thermische energie terug te winnen en te gebruiken in volgende processen. Dit betekent dat de warmte die tijdens het drogen wordt gebruikt, volledig kan worden hergebruikt, wat zeer efficiënt is. De uitdaging hierbij is om het stoomcondensatiesysteem te combineren met het natte papier/waterdampsysteem. Dit vereist geavanceerde stoomreinigingstechnologieën en oplossingen om te voorkomen dat stoom uit het systeem lekt.	Door de volledige terugwinning van thermische energie kan het energieverbruik in de papierproductie vermindert worden	4
Deep eutectic solvent	Een diep eutectisch oplosmiddel is een vloeibaar mengsel van twee componenten met een uitzonderlijk laag vriespunt en een hoge oplosbaarheid van lignine. Dit maakt ze geschikt als nieuwe pulp-oplosmiddelen. Het gebruik van deze oplosmiddelen kan aanzienlijk minder energie vergen voor het pulp-maken in vergelijking met traditionele chemische pulp-processen, omdat ze pulp kunnen produceren bij lage temperaturen en atmosferische druk. Ze werken door hout op te lossen in lignine, hemicellulose en cellulose.	Deze technologie kan de emissies bij het verwerken van pulp met 80% verminderen.	4
Lignin extraction-Organic solvent	Het isoleren van lignine, een bijproduct tijdens de productie van papier, uit houtpulp kan het mogelijk maken om lignine te gebruiken voor nieuwe industriële producten, zoals chemicaliën, of als biobrandstof in ketels of kalkovens. Een van de methoden die hiervoor wordt onderzocht, is oplosmiddel-gebaseerd pulp. Dit proces maakt gebruik van oplosmiddelen om lignine uit de houtpulp te halen, waardoor het kan worden hergebruikt in verschillende toepassingen.	Deze technologie kan extra bronnen van biomassa bieden voor gebruik in andere toepassingen.	5
Boilers with CCUS	CCS, oftewel koolstof afvang en -opslag, kan mogelijk worden toegepast in de pulp- en papiersector om de uitstoot van de ketels die stoom produceren, evenals de uitstoot van andere ondersteunende eenheden, op te vangen. Omdat de pulp- en papierindustrie aanzienlijke hoeveelheden bio-energie gebruikt, is er een grote capaciteit voor BECCS (bio-energie met koolstof afvang en -opslag) in deze sector. Dit maakt het mogelijk om de CO <sub>2</sub> -uitstoot van andere bronnen te compenseren.	Vermindert CO <sub>2</sub> -uitstoot in papier industrie.	5
Compression refining	Vezelraffinage is een belangrijke bewerking om voldoende vezeloppervlak te creëren voor binding, waardoor de sterkte van papier toeneemt. Echter, bij traditionele raffinage worden de vezels beschadigd, wat de efficiëntie van het ontwateren vermindert en de waterretentiewaarde van papier verhoogt. Door de schuifkrachten te verminderen via compressieraffinage, wordt de vezelschade verminderd en de energie-efficiëntie verbeterd.	Door de energie-efficiëntie te verbeteren en de vezelschade te verminderen, kan het totale energieverbruik in de papierproductie worden verlaagd.	5
Innovative mechanical dewatering technologies	Het verwijderen van 1% meer water in de perssectie (mechanische ontwatering) resulteert in een vermindering van minstens 3% van de benodigde droogenergie. Innovatieve mechanische ontwateringsmethoden kunnen onder andere ultrasoon ondersteunde ontwatering, vacuüm gecontroleerd persen, impulsontwatering, verplaatsingspersen, stalen	Vermindert energie verbruik in droogprocessen van papier.	5

Innovatie	Beschrijving	Impact	TRL
	banden en lucht ondersteunde vorming omvatten. Deze technologieën helpen om efficiënter water uit papier te verwijderen voordat het droogproces begint.		
Heat pumps	De duurzame toepassing van hoge temperatuur-warmtepompen in de papierindustrie vereist zowel speciale warmtepompen als aanpassingen in het papiermaakproces. Dit omvat een lager luchtgehalte in de droogkap om het dauwpunt te verhogen en daarmee de bron voor de warmtepomp te verbeteren. Daarnaast zijn lagere startdrukken voor stoom nodig, gevolgd door stoomcompressiestappen om de hogere stoomdrukken te bereiken die nodig zijn in de verschillende droogsecties.	Verminderd energie verbruik in droogprocessen van papier.	7

## Bijlage C

# Deelnemende experts voor de workshops

NPE keten / verbruikssector	Expert TNO	Expert Topsector energie
Mobiliteit	Richard Smokers	Rob de Groot
Industrie	Stephan Janbroers	Martijn Glass
Elektriciteit	Sebastiaan Hers	Robin Quax
Warmte	Maurice Hanegraaf	Robert-Jan van Egmond
Gebouwde omgeving	Vera Rovers	Robin Quax

## Bijlage D

# Analyse van de database 'Dealroom'

## D.1 Methodiek

Doel van deze analyse is om een beeld te krijgen van waar er afgelopen jaren al aan is gewerkt binnen start- en scale-ups in de energiesector in Nederland.

### D.1.1 Dealroom data

Voor deze analyse hebben wij gebruik gemaakt van de database van Dealroom. Dealroom heeft een database opgebouwd met investeringen vanuit de Venture Capital markt. Via venture capital wordt durfkapitaal geïnvesteerd in bedrijven die te risicovol zijn om via reguliere kanalen hun financiering te ontvangen. De investeringen in de database zijn onder andere gecategoriseerd met de naam van het bedrijf, omschrijving, de datum en de hoogte van de investering.

De data is beschikbaar met een lange historie. Binnen de scope van deze studie is gekozen te focussen op investeringen die na 2020 hebben plaatsgevonden. Als er na 2020 niet meer in een categorie (zie paragraaf D.1.2) is geïnvesteerd, is de kans klein dat deze nog relevant is voor het huidige landschap aan disruptieve technologieën.

De bedrijven zijn gecategoriseerd in verschillende levensfasen van start- en scale-ups. Dealroom hanteert hierbij vier levensfasen:

- **Seed Stage:** Dit is de vroegste fase waarin een bedrijf zich kan bevinden. Bedrijven in deze fase hebben meestal een concept of een minimum viable product (MVP) en genereren weinig tot geen inkomsten.
- **Early Growth:** In deze fase heeft het bedrijf al enige tractie en begint het te groeien. Het bedrijf heeft mogelijk al een product op de markt en begint inkomsten te genereren. De focus ligt op het opschalen van de activiteiten en het aantrekken van meer klanten.
- **Late Growth:** Bedrijven in deze fase hebben al een gevestigde positie in de markt en streven naar verdere groei en uitbreiding. Ze hebben vaak meerdere financieringsrondes doorlopen en richten zich op het vergroten van hun marktaandeel en het verbeteren van hun winstgevendheid.
- **Mature:** Dit zijn bedrijven die een stabiele en volwassen positie in de markt hebben bereikt. Ze hebben een consistente inkomstenstroom en zijn vaak winstgevend. De focus ligt op het behouden van hun marktpositie en het optimaliseren van hun bedrijfsvoering.

### D.1.2 Categoriseringsalgoritme

Veelal is het uitdagend om een goede doorsnede van investeringen in een bepaalde sector of sub-sector te krijgen, omdat de categorisering die vanuit Dealroom wordt aangeboden onvoldoende accuraat is. Daarom is binnen dit project gebruik gemaakt van een

categoriseringsalgoritme van Invest-NL. Invest-NL is de nationale ontwikkelingsbank van Nederland, en als zodanig de grootste VC-investeerder in de energietransitie. Zij heeft een op large language models gebaseerd categoriseringsalgoritme ontwikkeld. Dit algoritme bepaalt op basis van de omschrijving en bijvoorbeeld teksten op de website of een investering in de energietransitie is, en in welke sub-sector het bedrijf actief is.

De beschikbare sub-sectoren zijn mede toegespitst op de interesse vanuit de business development en investeringsactiviteiten van Invest-NL. Daardoor zijn ze op bepaalde vlakken granulairder dan op andere:

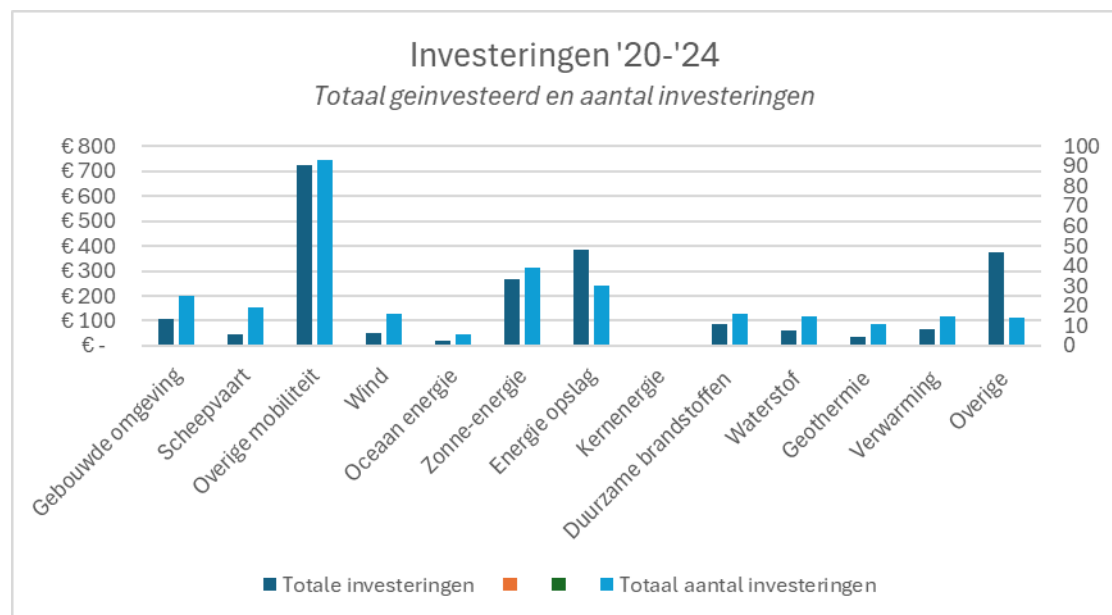
- Gebouwde omgeving
- Mobiliteit, gesplitst in scheepvaart en overige
- Keten elektriciteit, gesplitst in wind, zon, oceaan en opslag
- Keten koolstof c.q. hernieuwbare brandstoffen
- Keten waterstof
- Keten warmte, gesplitst in geothermie en overige warmte
- Overige

Voor de keten industrie en agricultuur is geen specifieke categorie gemaakt. Dit heeft er waarschijnlijk mee te maken dat er niet specifiek in de energieoplossing van een industrie of landbouwpartij wordt geïnvesteerd.

## D.2 Resultaten

### D.2.1 Overzicht

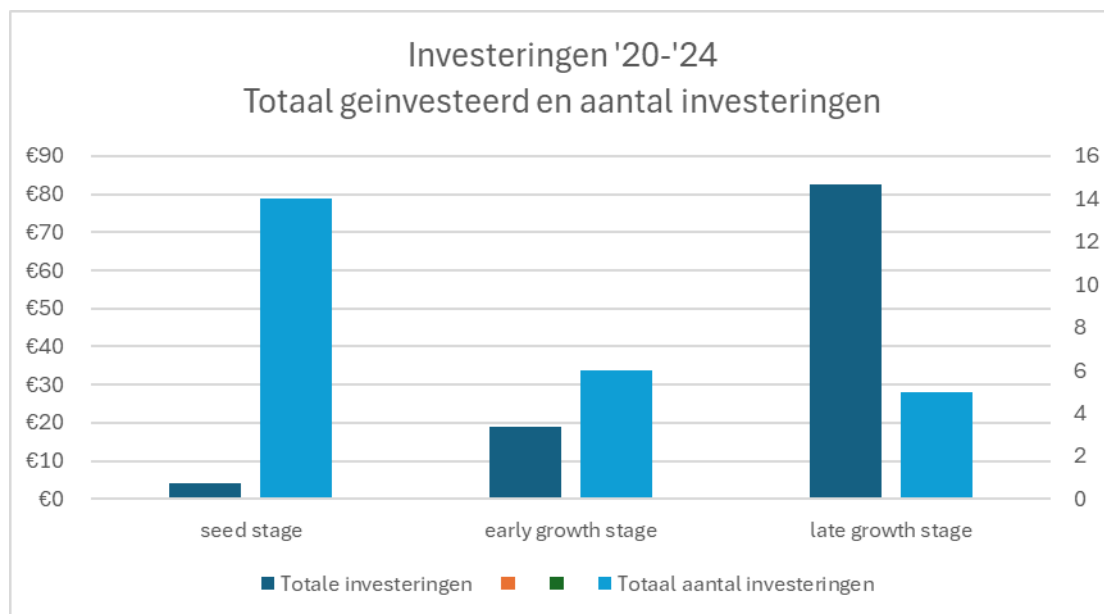
Er zijn tussen 2020 en 2024 303 VC-investeringen geïdentificeerd binnen de Dealroom database. In totaal is er binnen deze deals een bedrag van € 2.234 mln. geïnvesteerd in de Nederlandse energiesector. Hieronder is te zien hoe deze investeringen verdeeld zijn over de verschillende sectoren en sub-sectoren. Hieronder zullen wij per sector een nadere beschouwing doen.



Figuur D.1: Totale venture capital investeringen in de energiesector in '20-'24

## D.2.2 Gebouwde omgeving

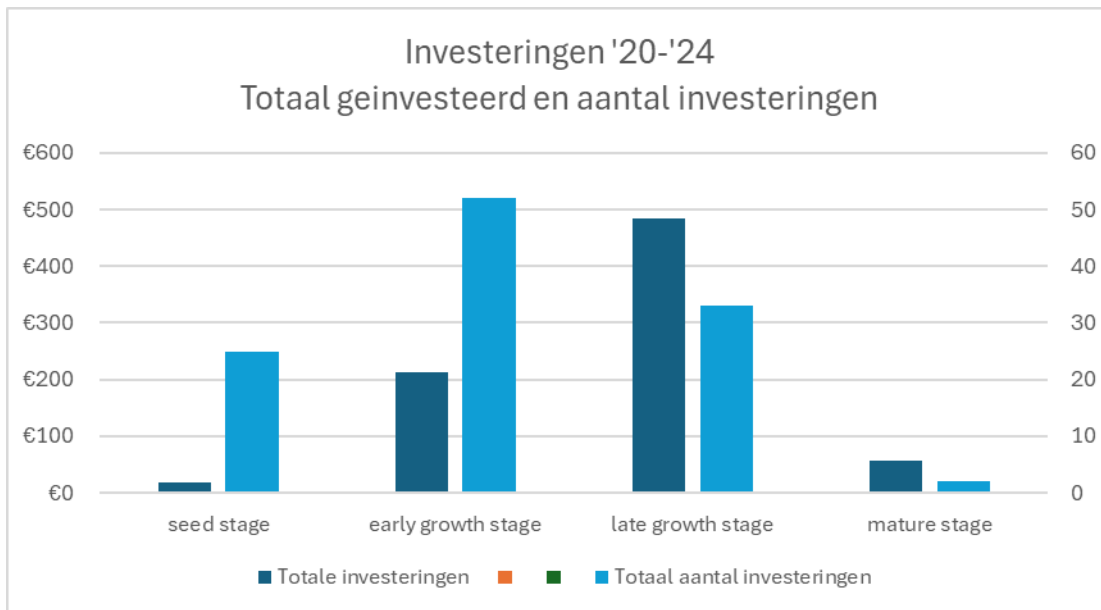
In de gebouwde omgeving is in totaal €106 mln. geïnvesteerd in 25 deals. Het grootste deel hiervan is gegaan naar 3 bedrijven met een investering groter dan €10 mln.: Sensorfact (energiebeheer en monitoring), Evoo (extra vierge olijfolie productie), en Triple Solar (fotovoltaïsche thermische warmtepompen).



Figuur D.2: Totale venture capital investeringen in de sector gebouwde omgeving in '20-'24

## D.2.3 Mobiliteit

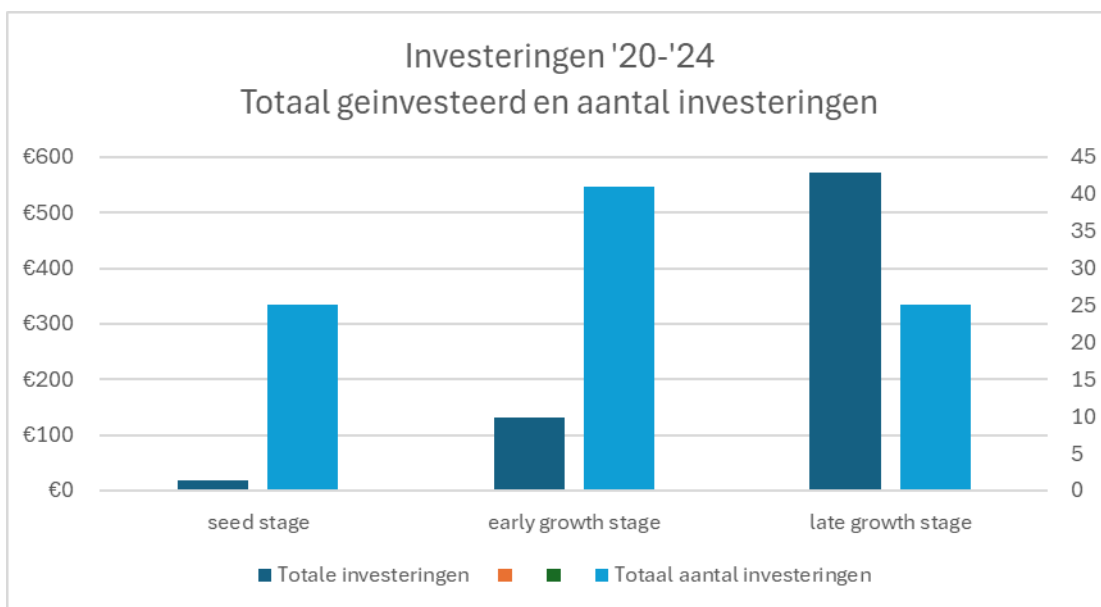
In de mobiliteit is in totaal €770 mln. geïnvesteerd in 112 deals. Te zien is dat er relatief veel deals in latere investeringsrondes (early growth en late growth) zijn. Daar ligt ook het zwaartepunt van het investeringsvolume (bijna €700 mln. in 85 deals).



Figuur D.3: Totale venture capital investeringen in de sector mobiliteit in '20-'24

## D.2.4 Elektriciteitsketen

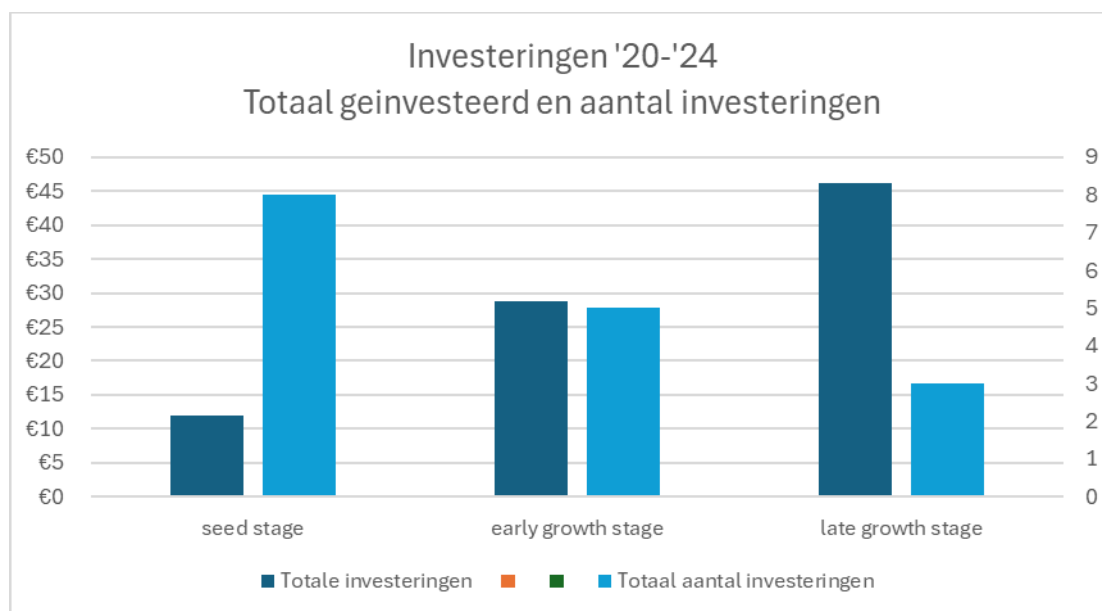
In de elektriciteitsketen is in totaal €87 mln. geïnvesteerd in 16 deals. Het zwaartepunt hiervan zit hem in de technologieën energie opslag (bijv. batterijen) (€386 mln. in 30 deals) en zonne-energie (€266 mln. in 39 deals). In de levensfase ligt het zwaartepunt van het investeringsvolume hem in de late growth deals (€571 mln.). Het aantal investeringen is gelijkmatig verdeeld over de levensfasen.



Figuur D.4: Totale venture capital investeringen in de elektriciteitsketen in '20-'24

## D.2.5 Koolstofketen

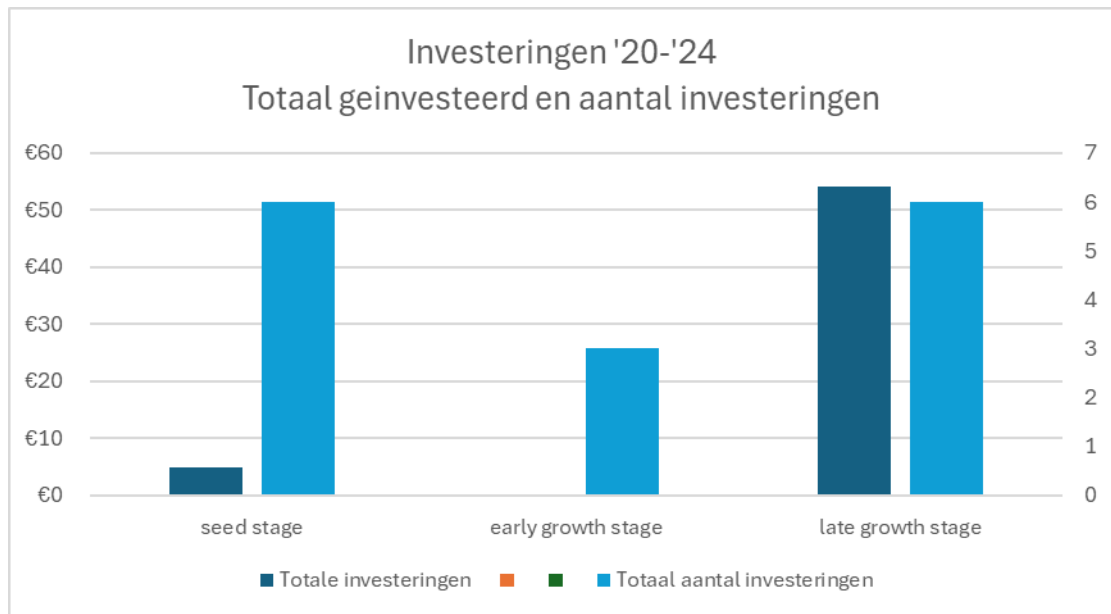
In de koolstofketen is in totaal €719 mln. geïnvesteerd in 91 deals. In de levensfase ligt het zwaartepunt van het investeringsvolume hem eveneens in de late growth deals (€46 mln.). Het zwaartepunt van het aantal investeringen ligt hem in de seed stage.



Figuur D.5: Totale venture capital investeringen in de koolstofketen in '20-'24

## D.2.6 Waterstofketen

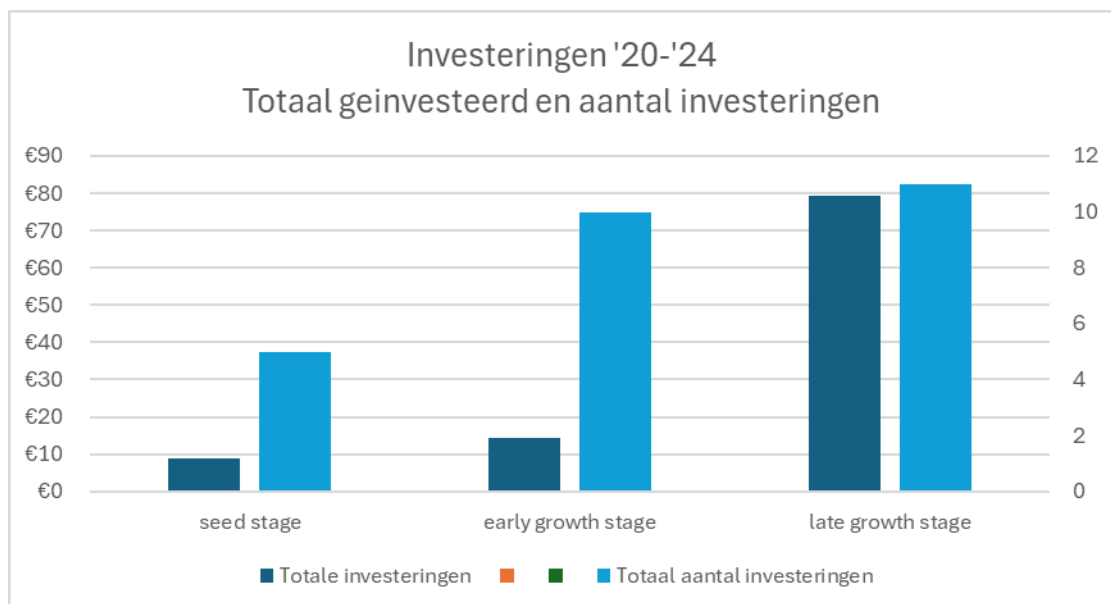
In de waterstofketen is in totaal €59 mln. geïnvesteerd in 15 deals. Het gros hiervan is uitgegeven aan investeringen in 3 bedrijven: Battolyser Systems (geïntegreerde batterij en elektrolyser), Dens (Hydrozine-generatoren), en Hygro (groene waterstofproductie en distributie).



Figuur D.6: Totale venture capital investeringen in de waterstofketen in '20-'24

## D.2.7 Warmteketen

In de warmteketen is in totaal €102 mln. geïnvesteerd in 26 deals. Het grootste deel hiervan (€66 mln.) zijn investeringen in warmteoplossingen als warmtepompen, warmtenetten en warmteopslag. Een kleiner deel (€36 mln.) is geïnvesteerd in geothermie.



Figuur D.7: Totale venture capital investeringen in de warmteketen in '20-'24

Energy & Materials Transition

Radarweg 60  
1043 NT Amsterdam  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life