

MMIP 7

CO₂-vrije industriële energiehuishouding



Reviewed door:

Martijn van Essen (DNV)
Kees Biesheuvel (Dow)
Hans van der Spek (FME)
Mark Smith (IQ),
Jesse in't Veld (IQ);
Matthijs Damm (IQ)
Annita Westenbroek (ISPT)
Arend de Groot (TNO);
Jaap Vente (TNO)

Ruud van Ommen (TUD; e-Refinery)
Maryam AlimoradiJazi (TUD; e-refinery)
Sikke Klein (TUD; Nobian)
Richard van de Sanden (TUE)
Andreas ten Cate (TKI Energie & Industrie)
Eric Appelman (Brightlands)
Marit van Lieshout (HS Rotterdam)
Brendon de Raad (HS Rotterdam)

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	4
2 Innovatieopgave 2.1 Missie C	6
2.1.1 Ontwikkeling van de energiebehoefte in de industrie in Nederland	6
2.1.2 Doelen van MMIP 7	7
2.2 Deelprogramma structuur onder MMIP 7	7
2.2.1 Deelprogramma 1: Re-duce energieafhankelijkheid	9
2.2.2 Deelprogramma 2: Re-use energie	10
2.2.3 Deelprogramma 3: Replace energiedragers	11
2.2.4 Deelprogramma 4: Elektrolytische productie van waterstof	12
3 Innovatie-onderwerpen: uitwerking subthema's en Nederlandse inzet	15
3.1 Toelichting	15
3.2 Deelprogramma 1: Reduce energieverbruik	15
3.2.1 Efficiency van processen	15
3.2.2 Radicaal efficiëntere concepten en apparaten	17
3.2.3 Behoeften en randvoorwaarden	18
3.3 Deelprogramma 2: Re-use energie	19
3.3.1 Systeemconcepten voor warmte en koude	19
3.3.2 Randvoorwaarden	21
3.4 Deelprogramma 3: Replace energiedragers	22
3.4.1 Elektrificatie in het industriële energiesysteem	22
3.4.2 Nieuwe elektrische processen en technieken	24
3.4.3 Inzet van klimaatneutrale brandstoffen	26
3.4.4 Randvoorwaarden	26
3.5 Deelprogramma 4: Produce - elektrolytische productie van waterstof.	27
3.5.1 Elektrolytische productie van H ₂	27
3.5.2 Randvoorwaarden	29
3.6 Doorsnijdende innovatieonderwerpen	30
3.6.1 Digitale productie- en ketenondersteuning	30
4 Nederlandse innovatie-activiteiten	31
4.1 Deelprogramma 1: Reduce energieverbruik	31
4.2 Deelprogramma 2: Re-use energie	31
4.3 Deelprogramma 3: Replace energiedragers	31
4.4 Deelprogramma 4: Produce: Elektrolytische productie van waterstof	32
5 Stakeholders/actoren	33
6 Omgevingsanalyse en -factoren	35
6.1 Digitalisering	35
6.2 Human Capital Agenda (HCA)	36
6.3 Omgevingsanalyse en -factoren reduce (energie efficiëntie)	37
6.4 Omgevingsanalyse en -factoren re-use van energie	37
6.5 Omgevingsanalyse en -factoren replace (elektrificatie)	37
6.6 Omgevingsanalyse en -factoren produce (waterstof)	37
7 Communicatie, leren en disseminatie	38
8 Appendix A Financiering, instrumentering en randvoorwaarden in beleid	39

Samenvatting

De Nederlandse industrie speelt een belangrijke rol in onze economie en samenleving. Tegelijk is zij verantwoordelijk voor ongeveer veertig procent van de uitstoot van broeikasgassen in ons land. Het is de maatschappelijke opgave om te transformeren naar een duurzame en inclusieve industrie, die een brede maatschappelijke welvaart levert en zo bijdraagt aan de kwaliteit van leven, de werkgelegenheid en de concurrentiepositie van Nederland, nu en in de toekomst.

Het klimaatakkoord en coalitieakkoord geven richting aan deze industriële transformatie: in 2050 is de industrie circulair en stoot ze vrijwel geen broeikasgas meer uit. De fabrieken draaien dan op duurzame elektriciteit uit zon en wind of energie uit aardwarmte, waterstof en biogas. De grondstoffen komen uit biomassa en reststromen en -gassen. De restwarmte gebruikt de industrie zelf of levert ze aan de tuinbouw of gebouwen en woningen. De industrie is dan naast gebruiker van energie ook producent en buffer van energie. In 2030 moet de industrie al flink minder CO₂ uitstoten. Dat is een tussenstap op weg naar volledige duurzaamheid.

Innovatie is noodzakelijk om deze ambitie te realiseren. Veel van de nieuwe manieren van produceren staan nog in de kinderschoenen en zijn nog niet marktrijp. Bedrijven investeren zelf in deze vernieuwing. Er zijn ook subsidie en overige instrumenten nodig om de ontwikkeling op gang te krijgen. Op die manier kan de industrie uitgroeien tot de meest CO₂-efficiënte industrie in Europa, en wel op een manier die de internationale concurrentiepositie niet in gevaar brengt.

Topconsortium voor kennis en innovatie Energie en Industrie (TKI Energie en Industrie) ontwikkelt als onderdeel van de Topsector Energie de innovatieprogramma's die gerichte en programmatische innovatie mogelijk maken. Dit zijn Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's). Elk MMIP schetst wat de verwachte bijdragen zijn aan de missies en welke kennis- en innovatieopgaven op korte termijn moeten worden opgepakt ten behoeve van onderzoek, ontwikkeling, demonstratie en implementatie. De missie voor de industrie is gedefinieerd als:

Missie C: Een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050.

De innovaties voor Missie C worden ingevuld in MMIP 6, 7 en 8, die complementair en onderling nauw verweven zijn:

- MMIP 6: Grondstoffen en producten voor circulariteit van koolstof
- MMIP 7: CO₂-vrije industriële energiehuishouding
- MMIP 8: Keten- en systeemaspecten

Hierbij richt MMIP 6 zich op het hergebruik van grondstoffen en producten en MMIP 7 op de energiehuishouding van de industrie. MMIP 8 is een programma dat integraal kijkt naar

energie en grondstoffen en daarbij ook aandacht heeft voor de (digitale) infrastructuur, transport en opslag.

MMIP 7: CO₂-vrije industriële energiehuishouding

Dit programma draagt bij aan de doelen van het Klimaatakkoord en coalitieakkoord om de broeikasgasemissies van de industrie in 2030 te verminderen met 19,4 Mton CO₂.

De innovatieopgave van dit MMIP ligt in het oplossen van knelpunten in vier deelprogramma's en de bijbehorende innovatiethema's:

- Reduce energieverbruik: vermindering van energieverbruik door efficiëntere processen.
- Re-use energie: hergebruik van energie (met name warmte) binnen en buiten de fabriek.
- Replace energiedragers: vervanging van fossiele energiedragers door met name elektriciteit.
- Produce: Elektrolytische productie van waterstof.

Het MMIP richt zich met deze thema's vooral op technische, maar met aandacht voor economische, ecologische, sociale en institutionele veranderingsvraagstukken. Verduurzaming van het industriële warmtesysteem tot 300 °C is hiervoor voor de korte en middellange termijn een belangrijk aandachtsgebied. Op de langere termijn zijn belangrijke thema's daarnaast warmtegebruik op hogere temperaturen, levering van flexibiliteit in het gebruik van duurzame elektriciteit, nieuwe CO₂-vrije productieroutes, scheidingsprocessen en concepten en de productie van duurzame waterstof tegen een concurrerende prijs.

Belangrijke ondersteunende succesfactoren voor dit MMIP liggen op het gebied van digitalisering en human capital. Daarnaast zijn er randvoorwaarden op het gebied van de beschikbaarheid van elektriciteit, potentie voor flexibel energiegebruik, wetgeving en financiële prikkels.

1. Inleiding

In het Klimaatakkoord zijn de doelen vastgesteld voor de CO₂-emissiereductie die de industrie in 2030 moet bereiken: 49% reductie ten opzichte van 1990. In de Europese Green Deal is dit aangescherpt tot 55%. Dit doel voor de korte termijn legt de focus op maatregelen die de emissies 'aan de schoorsteen' verminderen. Uitstoot later en elders (scope 3) en andere duurzaamheidsaspecten worden daarin minder meegenomen en een fundamentele transformatie van de industrie blijft uit.

Kijken we verder vooruit, naar 2050, dan ontstaat een perspectief van een industrie die klimaatneutraal én circulair is. Dit is de missie die centraal staat in het innovatiebeleid voor de industrie. Naar aanleiding van het klimaatakkoord is deze gedefinieerd als:

Missie C: Een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050.

Met Missie C wordt ook een bijdrage geleverd aan het doel van het Nationaal Programma Circulaire Economie, dat wil zeggen: volledig circulair in 2050, waarbij gebruik van virgin grondstoffen niet hoger is dan mogelijk binnen planetaire grenzen. In 2050 zijn waardeketens circulair en duurzaam, zoals geformuleerd in het grondstoffenakkoord en uitgewerkt in de vier transitieagenda's circulaire economie. Hieronder wordt

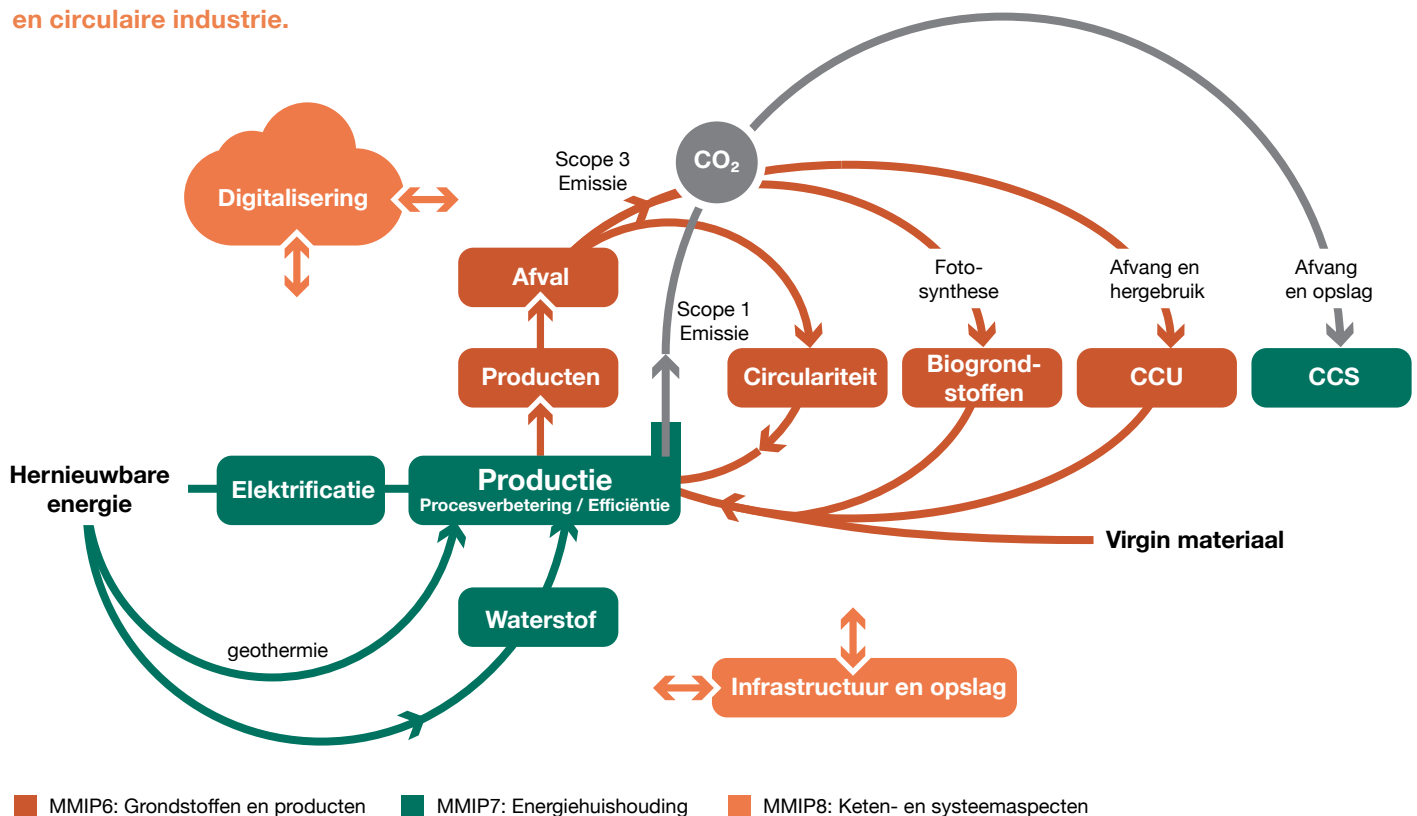
verstaan dat in deze ketens:

- Grondstoffen hoogwaardig worden benut;
- De productie van afval wordt geminimaliseerd;
- Er zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van duurzaam verkregen biograndstoffen;
- Alle gebruikte energie duurzaam wordt opgewekt.

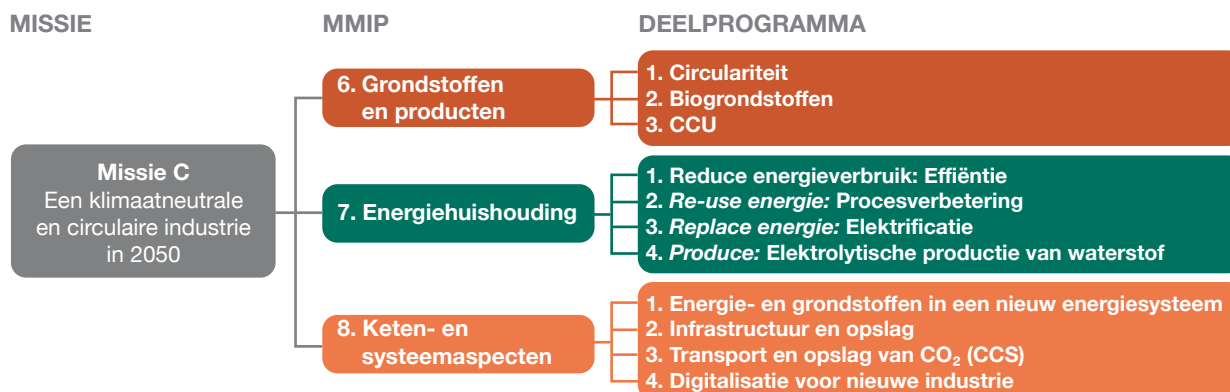
Om Missie C te bereiken zullen er fundamentele keuzes gemaakt moeten worden over hoe de industrie omgebouwd gaat worden tot een intrinsiek duurzame industrie, die niet meer gevoed wordt met fossiele grondstoffen maar met duurzame bronnen. Schematisch is dit weergegeven in figuur 1.

Een duurzame industrie vraagt om duurzame ketens van grondstoffen en producten, om een duurzame energievoorziening en om integratie van en tussen ketens. Dit zijn de onderwerpen van de drie Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's) die bijdragen aan missie C. Elk MMIP schetst wat de verwachte bijdragen zijn aan de missies en welke kennis- en innovatieopgaven op korte termijn moeten worden opgepakt ten behoeve van onderzoek, ontwikkeling, demonstratie en implementatie. De grondstoffen- en energietransitie staan centraal in respectievelijk MMIP 6 en MMIP 7. De integratie tussen ketens en binnen het industriële grondstoffen- en energiesysteem is het onderwerp van MMIP 8.

Figuur 1: Inrichting van toekomstige duurzame ketens van grondstoffen en energie voor een klimaatneutrale en circulaire industrie.



Figuur 2: Missie C met indeling naar innovatieprogramma's en deelprogramma's.



Figuur 2 toont deze innovatieprogramma's met de bijbehorende deelprogramma's. Daarmee zijn alle hoofdthema's voor de missie afgedekt.

Het voorliggende document, MMIP 7, beschrijft de innovatieopgaven voor de industriële energiehuishouding. In deze beschrijving wordt een overzicht gegeven van de innovaties die momenteel relevant zijn en wordt ingegaan op wat de status is van de diverse innovaties in Nederland en hoe deze kunnen bijdragen aan de CO₂-reductie- en circulariteitsdoelen. Het is de bedoeling dat dit document gebruikt wordt bij en richting geeft aan onderzoeks-calls zoals deze in het kader van deze missie worden uitgezet.

Het volgende hoofdstuk, **hoofdstuk 3**, beschrijft de opbouw van MMIP 7: de doelen, de deelprogramma's en de innovatieonderwerpen die daaronder vallen op hoofdlijnen. **Hoofdstuk 4** gaat dieper in op de innovatieonderwerpen en is met name gericht op inhoudelijk specialisten. **Hoofdstuk 5** beschrijft de belangrijkste innovatieactiviteiten die de komende jaren nodig zijn en waar dit MMIP op inzet. **Hoofdstuk 6, 7 en 8** beschrijven respectievelijk de belangrijkste stakeholders en actoren binnen het innovatielandschap, de omgeving waarbinnen innovatie plaatsvindt (met nadruk op digitalisering en human capital) en de beoogde methoden om opgedane kennis te dissemineren.

Nieuw in deze herijking

Dit document is onderdeel van de herijking van de MMIP's in 2023. De MMIP's zijn oorspronkelijk in 2019 opgesteld. Vanwege maatschappelijke ontwikkelingen, verschuivingen in de doelen en prioriteiten en vooruitgang in innovatie worden de MMIP's periodiek herijkt. In de hernieuwde MMIP 7 zijn de oorspronkelijke MMIP 7 en MMIP 8 samengevoegd omdat elektrificatie onlosmakelijk is verbonden met warmtesystemen, een CO₂ vrije energievoorziening en energie-efficiency. Hoewel verbeterde systeemcomponenten een doelstelling blijfty betreft het doorsnijdende zwaartepunt in alle programma's het ontwerp en de bouw van flexibele, robuuste energiesystemen die efficiënt kunnen omgaan met een variabel aanbod aan elektriciteit.

2. Innovatieopgave

2.1 Missie C

Missie C is afgeleid van de originele doelstellingen van het Klimaatakkoord en streeft naar *een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050*.

De Nederlandse industrie stootte in 2020 47,5 MT CO₂ uit en daarnaast 6.6 MT CO₂-equivalent aan andere broeikasgassen. Deze uitstoot komt vooral op rekening van de warmtebehoefte en deels vanuit productie van kunstmest en waterstof uit aardgas. Veruit het grootste deel – rond 80% – van de totale energiebehoefte in de industrie betreft warmte, de rest zit vooral in (stoom)aandrijvingen. Van deze warmtebehoefte ligt ongeveer 40% onder de 200 °C.

In het klimaatakkoord staat dat 14,3 Mton CO₂ reductie tussen 2015 en 2030 wordt voorzien bovenop de 5,1 Mton CO₂ reductie die nog openstond voor de industrie over die periode. Er dus netto sprake is van een doelstelling van 59% CO₂-reductie in 2030 ten opzichte van 1990, oplopend tot 95% in 2050. In het kader van het Europese "Fit for 55" initiatief is de doelstelling voor 2030 in de Klimaatwet verder verhoogd.

Dit MMIP richt zich zowel op de procesindustrie met hogetemperatuurprocessen (en warmteoverschot), als op de overige relevante energiegebruikers zoals fijnchemie, voedings- en papierindustrie, afvalverwerking, fijnmetaal, glas en keramiek. De grotere gebruikers zijn geconcentreerd in vijf industrieclusters: Rotterdam/Moerdijk, Geleen, Vlissingen/Terneuzen, Delfzijl/Eemshaven en Noordzeekanaalgebied. De kleinere procesindustrie is vaak binnen regionale industriecluster te vinden ook wel het "6e cluster" genoemd. Vanwege de omvang van de CO₂-emissies in de vijf clusters (ongeveer 60% van de industriële uitstoot) biedt deze de kans op snelle adoptie, schaalvergroting door samenwerking en dus impact. Tegelijk wordt aansluiting gezocht bij de kleinere industriegebieden, niet vanwege de CO₂ uitstoot – die is relatief gering – maar omdat juist daar vaak de innovatieve maakindustrie te vinden is.

Verduurzaming van het industriële warmtesysteem tot 300 °C is voor de korte- en middellange termijn een belangrijk aandachtsgebied. Elektrificatie is hiervoor essentieel maar volledige verduurzaming van de industrie behoeft daarnaast nieuwe technologieën die zoals CO/CO₂ hergebruik, kosteneffectieve CCS, duurzame waterstofproductie en het gebruik van biograndstoffen.

2.1.1 Ontwikkeling van de energiebehoefte in de industrie in Nederland

De voornaamste energiebronnen van de toekomst zullen zon en wind zijn met elektriciteit als voornaamste energiedrager. In tegenstelling tot wat de industrie gewend was - stabiele, op afroep beschikbare energie, zal in de toekomst - ondanks de vele infrastructurele plannen die op stapel staan – moeten worden geanticipeerd op duurzame energie die van tijd tot

tijd schaars of zelfs helemaal afwezig zijn, dan wel periodiek (te) overvloedig aanwezig. Daarnaast zal de uitfasering van fossiele grondstoffen (zie ook MMIP 6) de behoefte aan energie en met name elektriciteit sterk vergroten. De in de toekomst nog florerende industrie heeft een aantal kenmerken die via innovatieprogramma's moeten worden bereikt:

- Efficiënt energiegebruik
- Gebruik van duurzame elektriciteit als primaire energiedrager
- Koppeling en afstemming met andere sectoren
- Ver doorgevoerde digitalisatie van processen

Vanwege de gelijktijdige grondstoffentransitie en de verwachte concurrentie op alle duurzame energiedragers is afstemming met MMIP 6 van groot belang. Een mogelijk neveneffect van elektrificatie in de industrie is namelijk het vrijkomen van energiehoudende restgassen. Te denken valt hierbij ook aan ethyleenkrakers. De restgassen uit dit proces worden nu nog vooral ingezet als energiebron maar zullen op termijn als grondstof moeten worden ingezet om te helpen aan de toekomstige koolstofvraag te kunnen voldoen als een energetisch gunstige route naar circulaire grondstoffen.

Bovenstaande is voor 2050 kort samen te vatten in het beeld van een vrijwel CO₂ vrij industrieel warmtesysteem met daarbij productieprocessen die klimaatneutraal en maximaal geëlektrificeerd zijn. Het is hierbij het streven om de warmtevraag voor processen waar thermodynamisch mogelijk te reduceren en de resterende vraag via radicaal innovatieve processen zoveel mogelijk te verminderen en de resterende vraag duurzaam in te vullen, bijvoorbeeld vanuit inzet van elektriciteit. Voldoende flexibiliteit in afname die door radicaal innovatieve processen mogelijk gemaakt kan worden zal een belangrijke voorwaarde zijn. De industrie zal een rol spelen in de levering van grondstoffen voornamelijk via recycling van producten en bij-producten. Tenslotte zal de industrie een onderdeel vormen van de warmtevoorziening van andere sectoren in de maatschappij.

Het hierboven geschetste beeld vereist een omslag in de omgang met warmte en aandrijving in de industrie. We gaan namelijk niet langer van warmte naar elektriciteit maar zullen beginnen vanuit elektriciteit en zullen streven deze op de best mogelijke wijze in te zetten. We gaan af van het concept dat we afhankelijk zijn van verbranding/brandstoffen om de vereiste conversies naar gewenste producten te kunnen laten verlopen.

2.1.2 Doelen van MMIP 7

Om het hiervoor beschreven toekomstbeeld voor de industrie te bereiken, zijn er een aantal discrete maar samenhangende doelen gedefinieerd, die via de deelprogramma's onder MMIP 7 nagestreefd worden:

- Verduurzaming warmtebehoefte van < 300°C met 20 MT CO₂ reductie potentieel
- Verduurzaming warmtebehoefte van > 300°C met 12 MT CO₂ reductie potentieel
- Levering van flexibiliteit in het gebruik van duurzame elektriciteit
- Nieuwe CO₂-emissievrije productieroutes, scheidingsprocessen en concepten
- Productie van duurzame waterstof tegen een concurrerende prijs

Om de warmtebehoefte en aandrijving te verduurzamen zal naast efficiency-verbeteringen en nieuwe procesroutes de rol van elektrificatie volgens de Routekaart Elektrificatie in de Industrie een cruciale zijn. De potentiële totale warmtebehoefte voor de huidige Nederlandse industrie zal door een zekere mate van krimp in de brandstoffensector en energiebesparing mogelijk dalen van 155 TWh in 2018 naar zo'n 130 TWh in 2050. Deze kan grotendeels door directe of indirecte elektrificatie worden geleverd met daarnaast een belangrijke rol voor energieopslag en waterstof voor flexibiliteit, stabilisering en als grondstof. Rond 2030 is mogelijk al tussen de 30-80 TWh aan industriële elektrificatie plausibel, doorgroeiend naar mogelijk 130 TWh in 2050.

Op de relatief korte termijn ligt de focus op nuttig (her)gebruik van lagere temperatuur warmte in industriële processen. Hiervoor zijn warmtepompen en -transformatoren, warmteopslag en integratie van processtappen die warmte gebruiken, essentieel. De implementatie van deze, meestal elektrisch aangedreven, opties vraagt om een systeemperspectief op industriële warmtesystemen voor hoge én lage temperatuur en bijbehorende energie-infrastructuur tot op het niveau van industrieclusters. De laatste jaren hebben warmtepompen (tot 150 °C) , geïntegreerd in scheidingsprocessen, warmteopslag en geothermie een sterke ontwikkeling doorgemaakt. De benodigde componenten hebben reeds een acceptabel technisch risicoprofiel . De innovatieopgave betreft dan ook vooral de ontwikkeling van effectieve, veilige, betrouwbare, beschikbare en betaalbare systemen.

De ontwikkelingen van power-to-heat oplossingen voor de lagere temperatuursregimes kan in het gunstigste geval gepaard gaan met een CO₂-emissiereductie van 20 Mton. Enerzijds door een afnemende warmtebehoefte door de combinatie van procesefficiency en sectorkrimp. Anderszijds door de inzet van nieuwe energiezuinige elektrisch aangedreven apparaten. De totale energiebehoefte daalt in dat geval met 30% of meer - bij gelijkblijvende productie.

De verdere verduurzaming van de hogere temperatuur warmtebehoefte vereist complexere aanpassingen aan fornuizen en geheel nieuwe processen. Hier zit een verder potentieel van efficiencyverbetering en innovatieve oplossingen van 12 Mton in 2040 (e-fornuizen en e-krakers) en 12 Mton in 2050 (dit laatste vooral in de staalproductie via Direct Reduced Iron).

De rol van groene waterstof is evident in het hele plaatje van industriële elektrificatie. Naast de hierboven beschreven opgave tot CO₂-reductie via inzet van diverse innovatieve oplossingen is dus de productie van waterstof een essentieel onderzoeksterrein. Concreet liggen in MMIP 7 de doelen voor water elektrolyse apparatuur vooral bij het reduceren van de investeringskosten. Hierbij is het doel om bij te dragen aan een waterstofprijs die concurrerend is met de huidige grijze en blauwe vormen. Dit geeft een ontwikkelingsdoel aan de investeringskosten voor grootschalige water elektrolyse.

2.2 Deelprogramma structuur onder MMIP 7

De hierboven beschreven doelen worden binnen MMIP 7 uitgevoerd in samenhang met MMIP 6 (met focus op grondstoffen) en 8 (met focus op grootschalige industriesystemen). CO₂-emissiereductie vereist het afbouwen van fossiele energiedragers en op termijn ook grondstoffen. Het uiteindelijk uitfaseren van fossiele energiedragers (en grondstoffen) zal in Nederland vooral gebeuren door inzet van duurzaam opgewekte elektriciteit, eventueel aangevuld met (geïmporteerde) duurzame grond- en brandstoffen. De focus in deze transitie ligt in de industrie voor een belangrijk deel bij de ontwikkeling van technologie die zorgdraagt voor maximale benutting van deze duurzame elektriciteit.

Het huidige MMIP 7 kent vier deelprogramma's:

- Deelprogramma 1 *Reduce* energieafhankelijkheid
- Deelprogramma 2 *Re-use* energie
- Deelprogramma 3 *Replace* energiedragers
- Deelprogramma 4 *Produce* elektrolytische productie van waterstof

De relatie tussen de doelen voor MMIP 7, de deelprogramma's en subthema's staan vermeld in onderstaande tabel.

Tabel 1: Industrie doelen en samenhangende MMIP 7 deelprogramma's

MMIP 7- doelen	Deelprogramma's	Belangrijkste bijdragende subthema's
Verduurzaming warmtebehoefte van < 300°C met 20 Mton CO₂-reductie potentieel	<ul style="list-style-type: none"> • Re-duce energieafhankelijkheid • Re-use energie 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficiency van processen • Radicaal nieuwe efficiënte productie concepten en apparaten • Digitale productie- en ketenondersteuning • Elektrificatie in het industriële energiesysteem • Systeemconcepten voor warmte en koude
Verduurzaming warmtebehoefte van > 300 oC met 12 Mton CO₂-reductie potentieel	<ul style="list-style-type: none"> • Re-duce energieafhankelijkheid • Re-place energiedragers • Produce - Elektrolytische productie van waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficiency van processen • Nieuwe elektrische processen en technieken • Digitale productie- en ketenondersteuning • Elektrificatie in het industriële energiesysteem • Inzet van klimaatneutrale brandstoffen
Levering van flexibiliteit in het gebruik van duurzame elektriciteit	<ul style="list-style-type: none"> • Re-place energiedragers • Produce - Elektrolytische productie van waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Nieuwe elektrische processen en technieken • Digitale productie- en ketenondersteuning • Elektrificatie in het industriële energiesysteem • Inzet van klimaatneutrale brandstoffen • Elektrolyse systemen
Nieuwe CO₂ emissie-vrije productieroutes, scheidingsprocessen en concepten	<ul style="list-style-type: none"> • Re-duce energieafhankelijkheid • Re-place energiedragers • Produce - Elektrolytische productie van waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficiency van processen • Radicaal nieuwe efficiënte productie concepten en apparaten • Digitale productie- en ketenondersteuning • Elektrificatie in het industriële energiesysteem • Elektrolyse systemen
Productie van duurzame waterstof tegen een concurrerende prijs	<ul style="list-style-type: none"> • Re-place energiedragers • Produce - Elektrolytische productie van waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale productie- en ketenondersteuning • Inzet van klimaatneutrale brandstoffen • Elektrolyse systemen

De focus van de deelprogramma's is voor een belangrijk deel gelegd op maximale benutting van duurzame elektriciteit in de industrie. Dit stelt vanwege de verwachte schaarste eisen aan efficiency van processen en aan optimale systeemconfiguraties. Vanwege de grilligheid van het toekomstige elektriciteitsaanbod is er behoefte aan flexibiliteit en opslag in de vorm van in niet-fossiele energiedragers (waterstof, e-fuels en andere duurzame brandstoffen), warmte en/of elektriciteit. Daarnaast biedt de directe inzet van elektriciteit een potentieel voor nieuwe directe conversieroutes naar gewenste producten zoals elektrochemie, elektrisch kraken of plasmachemie. Via de productie van duurzame(re) waterstof komen daarnaast ook indirecte conversieroutes zoals synthesegaschemie meer in beeld. Deze zullen samen de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en grondstoffen steeds verder verminderen. De acceptatie van nieuwe technologieën zal niet alleen afhangen van betaalbaarheid maar ook van de kans om deze op een veilige en betrouwbare manier te integreren in de operatie en het energiesysteem.

De onderzoeksopgave voor MMIP 7 is gestructureerd volgens een aantal deelprogrammaliijnen zoals aangegeven in onderstaande tabel. De gedefinieerde deelprogramma's zijn individueel stuurbaar maar de onderliggende subthema's passen vaak onder meerdere programma's. Tabel 2 illustreert deze onderlinge verbondenheid van alle subthema's voor innovatie.

Een aantal subthema's raakt zondermeer alle deelprogramma's. Zo zal proces-efficiency als drijfveer voorlopig de komende jaren nog van groot belang blijven - ook als drijfveer bij ontwikkeling van (radicaal) nieuwe processen en ontwikkeling van elektrolyzers. De beste business cases halen namelijk zoveel mogelijk verdienvermogen uit zo min mogelijk grondstoffen en energie via een efficiënt productieproces. De innovatie verloopt op dit terrein naar verwachting via incrementele innovaties voor ontwerp van systemen, versnelling van marktacceptatie, integratie in omgeving, betrouwbaarheid en veiligheid en digitale ondersteuning. Dit neemt niet weg dat er om de doelen te halen ook radicaal nieuwe principes nodig

zijn zoals spinning disc reactoren, alternatieven voor stoom krakers en vormen van (scheidings)proces intensificatie.

Ook de rol van systeemintegratie en flexibiliteit zullen voor meerdere programmalijnen belangrijk zijn bij een steeds grotere inzet van duurzame bronnen en schaarste van base-load levering.

Tabel 2: Indeling MMIP 7 deelprogramma's. De zwarte kruizen geven aan dat een subthema relevant is voor het deelprogramma, de rode kruizen geven het zwaartepunt aan binnen een deelprogramma.

MMIP 7 - CO2 vrije industriële energiehuishouding				
Deelprogramma/ subthema	<i>Reduce energie- afhankelijkheid</i>	<i>Re-use energie</i>	<i>Replace fossiele energiedragers</i>	<i>Produce Elektrolytische productie van H₂</i>
Efficiency van processen	X	X		X
Radicaal nieuwe efficiënte processen en technieken	X		X	X
Digitale productie- en ketenondersteuning	X	X	X	X
Systeemconcepten voor warmte en koude		X		X
Elektrificatie in het industriële energiesysteem	X	X	X	
Nieuwe elektrische processen en technieken			X	
Inzet van klimaatneutrale brandstoffen			X	
Elektrolyse systemen			X	X
Randvoorwaarden (o.a. economisch, duurzaamheid, LCA, juridisch)				

De diverse deelprogramma's worden hieronder verder beschreven.

2.2.1 Deelprogramma 1: Re-duce energieafhankelijkheid

Het is te verwachten dat energie-beschikbaarheid - ook van duurzame energie - voor langere tijd gelimiteerd zal zijn, zodat volop aandacht voor reductie in het gebruik nodig blijft. Dit geldt zowel voor bestaande processen als nieuwe conversieroutes – die vooral energie-efficiency en flexibiliteit als voornaamste drijfveren hebben. Flexibiliteit betekent een tijdelijke reductie van het gebruik in geval van schaarste en het kunnen opschakelen bij tijdelijke overschotten van elektriciteit.

Tabel 3: innovatieopgave voor deelprogramma Reduce waarbij voor het relevante subthema de ambitie en de benodigde activiteiten zijn benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Efficiency van processen	Vermindering van de benodigde proceswarmte voor zowel lage als hoge temperaturen in bestaande processen.	<ul style="list-style-type: none"> In 2030 per kg product 30% minder energie gebruik dan in 2020. Een aantal grootschalige (warmtepomp)systemen in gebruik.
Radicaal efficiëntere concepten en apparaten	Ontwikkeling van nieuwe efficiënte directe en indirecte elektrochemische conversie routes, procesintensificatie en scheidingen.	<ul style="list-style-type: none"> In 2030 een aantal pilot/demo schaal concepten toonbaar. Warmtepompen > 150 °C beschikbaar.
Digitale productie- en ketenondersteuning	Acceptatie en bekendheid vergroten.	In 2030 vele toepassingen van Digitale productie- (en flex) ondersteuning.
Elektrificatie in het industriële energiesysteem (incl. nieuwe processen en technieken)	<ul style="list-style-type: none"> Uitwerken van concepten pilot/demo schaal. Flexibele systemen praktisch testen. Inpasbaarheid in infrastructuur. 	<ul style="list-style-type: none"> In 2030 demo-units voor elektrisch kraken en andere hoge temperatuur toepassingen/fornuizen. Spinning disc reactoren om bijvoorbeeld hydrogeneringsprocessen netto energieleverend i.p.v. energie kostend te laten zijn.
Randvoorwaarden	<ul style="list-style-type: none"> Voldoende elektriciteit. Flexibele operaties industrie. Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels. Beloning voor levering van restwarmte aan anderen. 	<ul style="list-style-type: none"> Ontwikkeling van realistische infra plannen samen met producenten en Netbeheerders. Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

2.2.2 Deelprogramma 2: Re-use energie

In vele gevallen worden processen op hoge temperatuur bedreven en worden de producten daarna afgekoeld voor verdere bewerking, opslag of transport.

De warmte die (na cascadering) bij die afkoeling vrijkomt vertegenwoordigt een grote energiestroom op een lagere temperatuur. Het hergebruik van deze warmte binnen de fabriekspoort of daarbuiten kan een grote impact hebben op de vraag naar primaire energie.

Tabel 4: innovatieopgave voor deelprogramma Re-use waarbij voor het relevante subthema de ambitie en de benodigde activiteiten zijn benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Systeemconcepten voor warmte en koude	Praktische commerciële en operationele de-risking van systemen met naar believen warmtepompen, geothermie, e-boilers en energie opslagvormen.	Opwek van lagetemperatuurwarmte (stoomsystemen) in 2030 grotendeels vanuit warmte-integratie, hergebruik en e-boilers.
Digitale productie- en keten- ondersteuning	Ontwikkeling van meet, regel en optimalisatiesoftware voor betrouwbare en rendabele systemen.	Onderdeel van lage temperatuur warmte opwek (stoom systemen) in 2030 grotendeels vanuit integratie, hergebruik en e-boilers.
Elektrificatie in het industriële energiesysteem	Acceptatie en bekendheid e-boilers en warmtepompen vergroten.	Lage temperatuurwarmte opwek (stoom systemen) in 2030 grotendeels vanuit integratie, hergebruik en e-boilers.
Randvoorwaarden	<ul style="list-style-type: none"> Voldoende elektriciteit. Flexibele operaties in industrie. Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels. Voldoende beloning voor levering van warmte aan anderen. 	<ul style="list-style-type: none"> Ontwikkeling van realistische infra plannen samen met producenten en Netbeheerders. Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

2.2.3 Deelprogramma 3: Replace energiedragers

Na *reduce* en *re-use* zal er nog een resterende primaire energievraag overblijven. Hiervoor zullen de huidige fossiele energiedragers vervangen moeten worden. Duurzaam opgewekte elektriciteit zal in de industrie een cruciale rol gaan vervullen voor het leveren van warmte, mobiliteit en aandrijving.

Dit behoeft, gezien de dynamiek van deze energievorm, veel aandacht voor flexibiliteit in gebruik. Er zullen daarnaast echter nog in zekere mate andere energiedragers nodig blijven zoals bijvoorbeeld waterstof, synthetische brandstoffen (met in de productie daarvan een belangrijke rol voor waterstof) en bio-brandstoffen.

Tabel 5: innovatieopgave voor Replace - waarbij voor het relevante subthema de ambitie en de benodigde activiteiten zijn benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Elektrificatie in het industriële energiesysteem	<ul style="list-style-type: none"> • Focus op hogetemperatuurtoepassingen. • Uitwerken van concepten pilot/demo schaal. • Flexibele systemen. • Inpasbaarheid in infrastructuur site en omgeving. 	<ul style="list-style-type: none"> • In 2030 demo-units voor elektrisch kraken en andere hogetemperatuurfornuizen. • Branders voor duurzame brandstoffen klaar (evt voor hybride gebruik).
Nieuwe elektrische processen en technieken	Ontwikkeling van nieuwe efficiënte directe en indirecte elektrochemische conversie routes en scheidingen.	<ul style="list-style-type: none"> • In 2030 een aantal pilot/demo schaal concepten toonbaar. • Wärmtepompen > 150 °C beschikbaar.
Inzet van klimaatneutrale brandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling van flexibele branders. • NOX-emissies laag. 	<ul style="list-style-type: none"> • Branders voor duurzame brandstoffen klaar (evt voor hybride gebruik) in 2030.
Digitale productie- en ketenondersteuning	Modellen en regelsoftware ontwikkelen om betrouwbaar te opereren binnen de nieuwe dynamische energiesystemen.	<ul style="list-style-type: none"> • In 2030 een aantal pilot smart-grids met industriële participatie. • Toepassingen van digitale productie- ondersteuning in flexibele geëlektrificeerde warmtesystemen.
Elektrolytische productie van H2	Flexibele inzet van elektrolyzers.	In 2030 bewezen als commercieel flexmiddel.
Randvoorwaarden	<ul style="list-style-type: none"> • Voldoende elektriciteit. • Flexibele operatie industrie. • Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels. • Voldoende beloning voor levering van warmte aan anderen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling van realistische infrastructuurplannen samen met producenten en Netbeheerders. • Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

2.2.4 Deelprogramma 4: Elektrolytische productie van waterstof

Naast de bovengenoemde deelprogramma's die vooral gaan over *gebruik* van energie, geven we in MMIP 7 aandacht aan de industriële productie van waterstof. Er is een sterke relatie tussen het derde deelprogramma *Replace* en het gebruik van duurzame elektriciteit voor de elektrolytische productie van duurzame waterstof (hierbij hoort tevens onderzoek naar waterstofdragers, opslag en inzet). Naast gebruik als grondstof

biedt waterstof mogelijkheden voor buffering, het leveren van flexibel vermogen en inzet als brandstof (als waterstof of een afgeleide daarvan zoals NH_3). Dit vierde deelprogramma verdient vanwege de evidente importantie een zelfstandige behandeling. Waterstof is nauw verbonden met de introductie en inpassing van duurzame elektriciteit als hoofdenergiedrager omdat het naast gebruik als grondstof mogelijkheden biedt voor buffering, het leveren van flexibel vermogen en inzet als brandstof (als waterstof of afgeleiden daarvan zoals methanol, mierzuur en ammoniak).

Tabel 6: innovatieopgave voor Elektrolytische productie van waterstof - waarbij voor het relevante subthema de ambitie en de benodigde activiteiten zijn benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Elektrolytische productie van H ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibele inzet van elektrolyzers. • Kostenreductie. • Efficiency. • Materialenintensiteit. 	<ul style="list-style-type: none"> • In 2030 AEL bewezen als commercieel haalbaar. • Demo's voor PEM/SOE.
Systeemconcepten voor warmte en koude	Gebruik van bijproducten zuurstof en warmte.	In 2030 integratie van industriële AEL met de omgeving.
Nieuwe elektrische processen en technieken	<ul style="list-style-type: none"> • Waterstof als CCU-grondstof ontwikkelen. • Interesse wekken voor indirecte elektrochemie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bijdragen aan demo CCU-unit (via MMIP 6) o.b.v. groene waterstof en duurzame CO₂.
Digitale productie- en ketenondersteuning	Inpassing in (dynamisch) elektriciteitsnet en andere infrastructuur.	In 2030 toepassing van Digitale productie- (en flex) ondersteuning in een commerciële elektrolyzer.
Randvoorwaarden	<ul style="list-style-type: none"> • Voldoende elektriciteit. • Flexibele operaties industrie. • Beloning waterstofgebruik. • Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels. • Voldoende beloning voor levering van warmte aan anderen. • Beloning voor CO₂-emissiereductie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling van realistische infrastructuurplannen samen met producenten en netbeheerders. • Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

Naast incrementele verbeteringen zijn voor de middellange en lange termijn (resultaten beschikbaar in de periode tot 2040/50) grotere, meer radicale innovaties nodig voor verdere kostenreductie en de inpasbaarheid in het energiesysteem en omgeving.

Voor de keuze van projecten die in bovenstaande structuur kunnen floreren zijn er een aantal generieke en soms impliciete criteria bij alle *technology readiness levels* (TRL's). Deze zijn:

- Impact op het halen van de klimaatdoelen, korte termijn en lange termijn
- Reductie van operationele en veiligheids risico's, betrouwbaarheid en kosten
- Versnelling van marktacceptatie
- Adressering van niet-technische risico's
- Flexibiliteit en inpassing in productie- en energie systemen

Intermezzo: overkoepelende uitdagingen bij de industriële energiehuishouding

De energietransitie gaat een grondige herziening van de infrastructuur vereisen: van vooral aardgas met wat elektriciteit naar veel elektriciteit (met daarbij waterstof) en een bijrol voor methaan. Deze overgang heeft vele ruimtelijke-, maatschappelijke-, juridische-, tijds- en financiële barrières die via diverse trajecten kunnen worden aangevlogen. De inzet van elektriciteit in de industrie vereist tijdige aanleg van de benodigde infra – dit zal kritisch zijn. Gegeven de benodigde tijd om dit te realiseren zal elektrificatie in de industrie dienen te helpen de vereiste overgang te faciliteren. Hieronder staan de hoofdprioriteiten beschreven:

- reductie van het energiegebruik;
- inpassing in en ontwikkeling van systemen;
- balancering – via flexibiliteit in vraag en door integratie/buffering van warmte/koude;
- digitale technologie;
- keten- en sectorkoppeling; en
- elektrochemische routes.

De ontwikkeling van betrouwbare systemen zal hierin leidend zijn met daarnaast een rol voor nieuwe (elektrisch gedreven) vormen van productie van grondstoffen (waaronder waterstof) en product zuivering en scheiding. De ontwikkelingen dienen te verlopen zonder andere zaken zoals water, ruimte, geluid en visuele aspecten te verwaarlozen.

Reductie van het energiegebruik

Allereerst blijft reductie van het energiegebruik essentieel en attractief – zeker gezien de naar verwachting blijvend hoge kosten voor fossiele energie. Daarbij zal de aandacht zich vooral gaan richten op ontwikkeling van nieuwe systemen en integratie van oplossingen binnen bestaande energie- en productie systemen. Er is inmiddels een flinke toolkit beschikbaar aan benodigde apparaten en technieken via diverse nationale en internationale aanbieders. Hoewel de oplossingen vaak nog beperkt zijn tot enkele MW, zijn industriële warmtepompen beschikbaar net als compressoren voor Mechanical Vapor Recompressie. Ook worden de eerste e-boilers geïmplementeerd en wordt opslag van warmte reeds in diverse vormen (fase-overgang, materialen met hoge warmtecapaciteit) via diverse aanbieders commercieel aangeboden – hoewel dit eveneens nog op beperkte toepassingschaal is. Lange termijn opslag, bijvoorbeeld voor seizoenoverbrugging, in de vorm van chemische opslag is nog in een pril stadium. Ook kan bij een mogelijk (tijdelijk) tekort aan elektriciteit alternatieve brandstoffen worden aangesproken. Naast een veranderend industrieel energiesysteem is er toenemend potentieel om met name scheidings- en droogprocessen te ontwikkelen die (gedeeltelijk) wegbewegen van de traditionele puur thermische routes zoals drogen met lucht en destillatie. Een uitzondering

betreft het drogen met super-heated stoom in plaats van lucht, dit biedt een goede mogelijkheid om warmte efficiënt terug te winnen. Membranen en mechanisch ontwateren kunnen echter een grote rol spelen als voorbewerking en/of verrijking van stromen (inclusief verbrandingslucht).

Inpassing in en ontwikkeling van systemen

Het schort hem dus op dit moment niet aan de diverse veelbelovende en/of bewezen componenten. De aandacht om een maximaal potentieel te behalen zal zich dan ook dienen te richten op de inpassing van op zichzelf beproefde oplossingen zoals warmtepompen in bestaande systemen en apparaten (bijvoorbeeld drogers) en ontwikkeling en demonstratie van vlekkeloos en stabiel opererende nieuwe systemen zoals hybride warmte-opwek samen met gebruik van energieopslagvormen. Deze gaan helpen bij de betrouwbare inzet van duurzame elektriciteit en hergebruik van warmte zodat optimale besparing bereikt kan worden. Deze trend betekent niet dat verdere verbetering van componenten onnodig wordt, denk hierbij aan verdere opschaling, dynamische inzetbaarheid, recyclebaarheid van apparaten, integratie in de leefomgeving (visuele aspecten), geluidniveau en geleidelijke prestatieverbeteringen – maar deze ligt meer bij de OEM's.

Balancering – via flexibiliteit in vraag en door integratie/buffering van warmte/koude

Naast energiebesparing is de rol van systemen ook essentieel voor de balancering van het energiesysteem. Samenwerkende combinaties van technologieën zoals een warmtepomp met warmteopslag gaan een grote rol spelen in het creëren van balans door flexibiliteit in het energiesysteem. Hier liggen dynamische uitdagingen maar deze systemen zullen aan de energie -opwek en -leveringskant van groot belang zijn om toekomstige pieken en dalen op te vangen. Gezien de behoefte aan zoveel mogelijk stabiel energieaanbod tegen een toenemende grilligheid in opwek en bestaande gebruiksprofielen (dag-nacht, seizoenseffecten) zal de rol van opslagsystemen een grote worden, naast een toenemende aandacht voor flexibele industriële productie. Waterstofproductie kan weliswaar voor een deel de flexibiliteitsrol opvangen, maar tegen (voorlopig) flinke kosten – die voor grondstofgebruik acceptabeler zijn dan als energiedrager. Een belangrijk alternatief, zeker omdat het industriële energiegebruik voor 80 procent warmte betreft, is de ontwikkeling van grootschalige warmteopslag – vanuit overtollige elektriciteit of beschikbare restwarmte in de zomer - die al dan niet in combinatie met de intrinsiek efficiënte warmtepompen naar behoefte kan worden ingezet in diverse industrieën en andere sectoren.

Naast ontwikkeling van opslagsystemen kan een tijdelijk tekort worden opgevangen via import. Te denken valt aan waterstofdragers zoals Liquid Organic Hydrogen Carriers, ammoniak en een aantal andere lagere TRL oplossingen met

voordelen voor veiligheid en duurzaamheid. Ontwikkelingen om Ammoniak in te zetten als brandstof, dan wel waterstof of zelfs eventueel als reductiemiddel in de staalindustrie zijn in volle gang. Dit zijn gebieden waar nog wel het een en ander moet worden uitgezocht (emissie van NO_x , toxiciteit, veiligheid, flexibiliteit van branders etc).

Digitale technologie

Flexibele systemen vereisen snelle interactie tussen de diverse systeemcomponenten onderling alsmede de wereld daarbuiten (anticipatie op weercondities, interactie met netbeheerders en meer samenwerking in ketens en clusters). De rol van goed beveiligde digitale technologie en modelleerkennis en -kunde is hierbij essentieel. De impact en betrouwbaarheid van flexibele systemen zal op voldoende grote schaal moeten worden gedemonstreerd, aangevuld met grondige studies bijvoorbeeld met aandacht voor exergieanalyses of pinch-analyses voor uitgebreide systemen – binnen en buiten de fabriekspoort - waarin ook de economische haalbaarheid kan worden bepaald. Daarnaast zal de verwachte toename in componenten de toegankelijkheid voor onderhoud bemoeilijken en zal er een rol zijn voor remote monitoring met daaraan gekoppeld proactief onderhoud.

Keten- en sectorkoppeling

Het eerder genoemde hergebruik van warmte heeft veel potentieel, dit zal zich in eerste instantie moeten richten op koppeling tussen apparaten binnen de fabriekspoort of soms (bij een overschot als gevolg van exotherme processen) met naburige bedrijven. De dan nog resterende industriële warmte zal vaak rond 40-80 °C zijn en kan wellicht voor andere sectoren een rol spelen. Een voorbeeld is de restwarmte die vrijkomt bij grote elektrolyzers die prima inzetbaar kan zijn voor kassen en/of woonwijken – zelfs in de zomer voor bijvoorbeeld de kweek van nieuwe gewassen in Nederland. Ook de inzet van restwarmte in de zomer om koelmachines aan te drijven is een serieuze optie. Dit soort ontwikkelingen wordt ondersteund door toepassing van informatie-uitwisseling en digitale technieken. De individuele technologische aspecten van vele oplossingen zijn inmiddels goed bekend en bewezen - maar er blijft behoefte aan innovatie in businesscases en allocatie van credits in het geval van CO_2 emissiereductie en/of flexibiliteitsvoordelen. Begrip van ketens, organisaties, maatschappelijke bewegingen en dynamiek zijn erg belangrijk voor het slagen van projecten. Het is bijvoorbeeld van belang om bij de nieuwe systemen aandacht te schenken aan collectief geluidsniveau en inpassing in de omgeving.

Elektrochemische routes

Bovenstaande ontwikkelingen zijn allemaal nodig voor het vormen van een backbone voor de huidige industriële activiteiten in de nieuwe energie-setting. De komst van elektriciteit biedt daarnaast de kans aan nieuwe vormen van procesintensificatie,

scheidingen, maakprocessen en reactiemechanismen.

Net als bij (scheidings)processen kunnen vele traditioneel thermisch gedreven reacties theoretisch worden vervangen door elektrochemische reacties. Dit is nog laag in TRL en vergt in veel onderzoek aandacht voor efficiency, selectiviteit, betrouwbaarheid, robuustheid, veiligheid, kosten etc., maar deze routes hebben vanwege de rol van elektriciteit de laatste jaren aan aandacht gewonnen. Het meest voor de hand liggende en actuele voorbeeld is uiteraard de productie van waterstof via elektrolyse, maar ook de productie van e-fuels voor lastig te decarboniseren sectoren is volop in ontwikkeling. De onderliggende concepten zijn al vele jaren bewezen, maar de grootschaligheid die ons te wachten staat maakt verdere ontwikkelingen in efficiency, kostenniveau, flexibiliteit (turn-up en -down) en betrouwbaarheid/veiligheid van groot maatschappelijk belang. Bouwend op de kennisontwikkeling van water-elektrolyse zijn diverse alternatieve toepassingen in ontwikkeling met name in CCU, zoals bijvoorbeeld de elektrochemische productie van synthese gas uit CO_2 eventueel in co-elektrolyse samen met stoom. Ook de productie van synthese gas uit CO_2 en methaan wordt onderzocht (dry reforming).

Daarnaast dienen de zogenaamde meer hybride elektrische routes – thermisch gedreven, maar met elektriciteit als efficiënte energiebron – niet uit het oog verloren te worden. Het belangrijkste voorbeeld hiervan zijn elektrische fornuizen en andere hoge temperatuur verwarmingsconcepten (zoals via shockwaves) voor gebruik in ethyleenkrakers en bijvoorbeeld cement, glas- en keramiek. Ook ontwikkeling van plasmachemie en (micro)waves kan zeker een rol van betekenis spelen in nieuwe processen, mits ze bijdragen aan een efficiënt en flexibel gebruik van elektriciteit en CO_2 vrij hun producten leveren.

3. Innovatie-onderwerpen: uitwerking subthema's en Nederlandse inzet

3.1 Toelichting

In dit hoofdstuk worden de in het vorige hoofdstuk besproken deelprogramma's en subthema's in meer detail uitgewerkt. Deze lijst is niet compleet. De scope van MMIP 7 is namelijk erg breed: de hele energiehuishouding van de industrie. Er is gekeken naar de meest in het oog springende en impactvolle innovatieonderwerpen welke prioriteit moeten hebben gebaseerd op passendheid bij de geformuleerde innovatiedoelstellingen voor Missie C. Daarnaast betreft het onderwerpen met een grote impact op de geformuleerde innovatiedoelstellingen van MMIP 7. Gezamenlijk dekken deze subthema's het overgrote deel van de innovatiebehoefte voor het bereiken van een CO₂-vrije industriële energiehuishouding.

De subthema's zijn grotendeels ontleend aan de vorige versies van MMIP 7 en 8. Ze zijn herbeoordeeld naar impact en huidige relevantie na het raadplegen van diverse experts en studies zoals project 6-25, RKIE en diverse andere onderzoeken die sinds 2019 hebben plaatsgevonden.

Het is niet mogelijk om de subthema's een-op-een in deelprogramma's te plaatsen. Binnen deze thema's liggen mogelijke projecten die de doelen van meerdere deelprogramma's adresseren. Voor de leesbaarheid wordt elk subthema maar één keer uitgewerkt, bij het deelprogramma waar die het best bij past. Bij de andere deelprogramma's wordt verwezen naar die uitwerking.

Vanwege de grote variëteit aan onderwerpen en vele recente ontwikkelingen is er in dit document slechts beperkt gekeken naar het Nederlandse innovatie-ecosysteem voor de geïdentificeerde onderwerpen en waarom Nederland hier een internationaal vooraanstaande kennispositie heeft.

3.2 Deelprogramma 1: Reduce energieverbruik

De bestaande industrie in Nederland had in 2020 een warmtebehoefte van ongeveer 560 PJ ofwel ongeveer 80% van de totale energiebehoefte van de industrie. Hiervan is 40% als lage temperatuur te kwalificeren (< 200 °C). Energiebesparing gaat dus vooral over de verlaging van de warmtevraag die o.a. is benodigd voor de chemische reacties, in de daaropvolgende scheidingen, droogprocessen en het vloeibaar maken van materialen ten behoeve van vormgeving. Binnen de industrie zijn de processen in te delen in verschillende temperatuurgebieden. De hoogste temperaturen van >1200°C zijn nodig in de productie van staal, glas en cement of producten die hiervan gemaakt zijn, dit betreft ongeveer 20% van de totale industriële warmtevraag. Het temperatuur gebied 600 - 1100°C betreft

ongeveer 25% van de warmtevraag en heeft toepassingen zoals het reformeren van methaan, stoomkraken van nafta voor de chemische industrie en kunstmest. Het middengebied van 300 - 600 °C (ruim 20% van de warmtevraag) is vooral van belang in de sectoren chemie en raffinage, voor bijvoorbeeld het fractioneren, converteren en ontzwellen van brandstoffen. De resterende ongeveer 35% van de vraag betreft het gebied van 100 - 300 °C, die veelal wordt geleverd via stoom- en hotoil systemen. Deze is nodig voor diverse processen in de papier- en voedselsectoren alsmede voor vele scheidingsstappen in de chemie.

Veel van de vraagvermindering lijkt vanwege de reeds beschikbare technologie op de kortere termijn vooral te behalen in het lagere temperatuurgebied (< 300 °C). Dit geldt met name op plekken waar geen combinatie met hogere temperatuurprocessen mogelijk is, omdat in dat geval geen warmte van hoge naar lage temperatuur cascadeert die in het geval van besparing "fataal" zou kunnen worden. Voor dit soort geïntegreerde sites zijn verandering van grondstoffen of fundamenteel nieuwe processen bij lagere temperatuur of drastische reductie van hoge-temperatuur warmtebehoefte nodig, om de toepassing van innovaties op lagere temperaturen te faciliteren.

Voor dit deelprogramma 1 zijn vijf subthema's van belang:

- Efficiency van processen
- Radicaal efficiëntere concepten en apparaten
- Digitale productie- en ketenondersteuning: beschreven bij doorsnijdende onderwerpen (sectie 2.5)*
- Elektrificatie in het industriële energiesysteem beschreven bij deelprogramma 3 (sectie 2.3.1)*
- Randvoorwaarden

3.2.1 Efficiency van processen

Innovatieopgave: Vermindering van de benodigde proceswarmte voor zowel lage als hoge temperaturen in bestaande processen.

- Ambitie: In 2030 per kg product 30% minder energie gebruik dan in 2020.*
- Ambitie: Een aantal grootschalige (warmtepomp)systemen in gebruik.*
- Ambitie: Een aantal toepassingen van membranen als vervanging van destillatie*
- Ambitie: Een aantal toepassingen van efficiëntere reactor/ scheidings-concepten in gebruik*

Proces efficiency op het niveau van (bestaande) unit operations is een belangrijk ingrediënt voor een duurzame industrie omdat hiermee de totale warmte- en aandrijf behoefte wordt

verminderd. Het betreft voor warmte veelal innovaties op het gebied van specifiek energiegebruik (per kg product bijvoorbeeld) van veelgebruikte scheidings- en droogprocessen. Daarnaast is opwaardering middels warmtepompen van restwarmte voor hergebruik in het proces een belangrijk thema (circulaire warmte) met name in het lagere temperatuursinterval (100-300°C) die goed is voor ruim 200 PJ jaarlijks gebruik. Voor hoge temperatuur warmte kan ook de vervanging van warmte door directe inzet van elektriciteit een rol spelen als dat exergetisch gunstiger is. Inzet van digitaliseringstechnieken met gebruik van diverse sensoren en sturing met algoritmes als de belangrijkste onderdelen kan veel energieverbruik reduceren in processen zoals bijvoorbeeld in de flexibele inzet van pompen en compressoren.

Hieronder zijn als voorbeeld een aantal specifieke mogelijkheden uitgewerkt, maar dit betekent geenszins dat deze lijst compleet is. Daarnaast is het belangrijk te weten dat de MMIP aanpak is bedoeld voor langere programma's en er is dus een grote kans dat er ook significant andere processen opkomen die dezelfde uitdaging oplossen.

Membraan-toepassingen ter vervanging van destillatie

Verduurzaming van scheidingsprocessen kan via elektrificatie van het warmtesysteem voor verdamping en het terugwinnen van de condensatiewarmte. Er ligt echter een (hernieuwde) rol in het verschiet voor het gebruik van membranen. Deze werken op druk- en concentratieverschillen, zijn efficiënt en zijn tevens een vorm van elektrificatie. Bij de tegenhanger van deze technologie, destillatie, wordt vloeistof verdampt op hoge temperatuur en weer gecondenseerd op een lagere om een bepaalde scheiding te laten plaatsvinden. Dit geldt met name als het te scheiden mengsel een zogenaamde azeotroop is, waarbij de vloeistof en de dampfase dezelfde samenstelling hebben wat scheiding via destillatie enorm bemoeilijkt. De traditionele oplossingen hiervoor zoals als destilleren onder verschillende drukken, of gebruik te maken van een hulpstof leiden tot zeer energie intensieve processen. Membraanprocessen kunnen tevens een rol vervullen in hybride vorm bijvoorbeeld als voorscheiding van conventionele destillatie. Belangrijke onderzoeksthema's zijn: permeabiliteit, selectiviteit, sterkte en vervuiling.

Procesintensificatie

Vele chemische reacties worden belemmerd door een geringe conversie per reactie stap. Dit komt door intrinsieke thermodynamische factoren, door beperkte selectiviteit van katalysatoren en door ongunstige reactieomstandigheden. Traditioneel wordt hiervoor een economische optimalisatie gezocht met vaak een rol voor recycle van reactanten. Door de combinatie van reactie en scheiding toe te passen in één vat kunnen de thermodynamische belemmeringen worden omzeild en kan de conversie sterk worden verhoogd. Dit

leidt vervolgens tot een verandering in de totale procesgang waarbij lagere reactie temperaturen, minder recycle, verminderde scheidingskosten en hogere productiviteit een grote rol gaan spelen. De integratie van membranen en/of sorbenten in reactoren verdient hiervoor speciale aandacht. Een goed voorbeeld is het SEWGS systeem om de waterstof productie uit aardgas te optimaliseren met directe afvang van geconcentreerde CO₂ of de moeilijke CO/N₂ scheiding. Een veelbelovend voorbeeld van procesintensificatie is de spinning disc reactor. Deze combineert efficiency, flexibiliteit en het gebruik van elektriciteit als aandrijving.

Warmtepompen als systeemcomponenten

Nederland heeft een lange historie in de ontwikkeling van industriële warmtepompen. De laatste jaren zijn voor warmtepompen < 150 °C grote stappen gezet richting standaardisatie en vraagbundeling, door kennispartijen, innovatieve maakbedrijven en eindgebruikers. Na succesvolle piloting van compressiewarmtepompen, zijn nu kostenverlaging, standardisatie en marktcreatie voor warmtepompen de bepalende stappen. Er zijn reeds voorbeelden van grote MW schaal projecten waarbij deze technologie een belangrijke rol speelt. Dit zijn aspecten die door grote (vaak buitenlandse) warmtepompleveranciers worden opgepakt.

Voor warmtepompen die rendabel warmte leveren op een temperatuur van > 150 °C is echter nog verdere ontwikkeling vereist. Bij dit temperatuurbereik is bijvoorbeeld stoom als medium (ook in een kleiner gesloten systeem) zeer goed denkbaar – de benodigde compressoren die de karakteristieken van stoom aankunnen bestaan reeds. Gezien de relatieve technische rijpheid worden verdere ontwikkelingen het beste aan de normale verbeteraanpak van bekende leveranciers overgelaten op basis van ervaring en marktfeedback.

De innovatie zit nu vooral in het opzetten van betrouwbare, veilige en betaalbare systemen (zie ook deelprogramma 2) die flexibel en efficiënt met beschikbare duurzame elektriciteit omgaan. De dynamische interactie tussen opslag en vraaggestuurd beschikbaar maken van energie moet nog gedemonstreerd worden. Daarnaast zijn er mogelijk grootschalige toepassingen in (collectieve) industriële circulaire stoomsystemen of warmtenetten. In dergelijke collectieve systemen spelen naast technologische uitdagingen diverse commerciële en contractuele vraagstukken een rol rond inkoop en verkoop van warmte. Er spelen diverse organisatievraagstukken en rollen van bedrijven in de keten moeten worden gedefinieerd.

Nieuwe onderhoudstechnieken

Warmtewisselaars spelen een cruciale rol in warmteintegratie. Gedurende het proces vindt vaak vervuiling plaats in deze

apparaten, waardoor de efficiency achteruit gaat. Het onderhoud is een tijdsroevende, veelal handmatige klus en zal in het algemeen plaatsvinden gedurende shutdowns. Technieken die vervuiling van warmteoverdrachts componenten verminderen, effectief on-stream mitigeren of onderhoud versnellen kunnen een belangrijke rol spelen. Er is hier tevens een belangrijke rol voor on-line condition monitoring.

3.2.2 Radicaal efficiëntere concepten en apparaten

Innovatieopgave: Ontwikkeling van nieuwe efficiënte directe en indirecte elektrochemische conversie routes, procesintensificatie en scheidingen.

- *Ambitie: In 2030 een aantal pilot/demo schaal concepten toonbaar.*
- *Ambitie: Warmtepompen > 150 °C beschikbaar.*
- *Ambitie: Een aantal veel efficiëntere droog- en/of ontwateringsconcepten in gebruik*

Naast het geleidelijk verduurzamen van bestaande conversie- en scheidings/opwerkings processen via incrementele stappen zijn voor verregaande CO₂-emissiereductie radicaal vernieuwde productieprocessen en apparaten nodig die intrinsiek energie- en/of grondstof-efficiënter en/of flexibeler zijn. Elektriciteit is de drijvende kracht bij veel van deze radicale vernieuwingen. Dit betekent dat dit subthema sterk samenhangt met deelprogramma 3. Het verschil is dat de nadruk hier ligt op het vergroten efficiëntie van processen, terwijl in deelprogramma 3 het vervangen van andere energiedragers door elektriciteit centraal staat. Vaak dragen innovaties aan beide doelen tegelijk bij.

Binnen MMIP 7 ligt de aandacht vooral op de potentiële verlaging van de kosten van productie (eventueel door het bieden van flexibiliteit) en verhoging van energetische rendementen. Het gaat hierbij vooral om de nieuwe routes naar basis-chemicaliën en synthetische brandstoffen. De komst van deze nieuwe conversieprocessen en de impact op MMIP 7 zal overleg vereisen met MMIP 6. Voor verduurzaming van de meer conventionele hoge temperatuurprocessen zoals naftakrakers, productie van keramiek en glas is nog veel innovatie nodig in specialistische elektrische fornuizen.

Naast het kernproces zal ook op het gebied van productscheiding efficiency-gedreven innovatie een rol gaan spelen. Een bekend voorbeeld hiervan is de hernieuwde aandacht voor toepassing van membraantechnologie als niet warmte-gedreven (voor)scheidingsproces al of niet in combinatie met bestaande scheidingsprocessen.

De vervanging van de huidige op zich nog goed voldoende processen die een doorbraak betekenen in energie-efficiency loopt nogal eens tegen CAPEX-beperkingen aan. De rol

van bijkomende OPEX van onderhoud en energieverbruik was zelden van doorslaggevende betekenis, omdat energie goedkoop, tijdig en betrouwbaar geleverd kon worden. Het concept van LCC (Life Cycle Costing) houdt rekening met de bijkomende non-capital kosten en gaat hopelijk meer vervangings projecten mogelijk maken.

Vanwege de prille staat van een flink aantal onderliggende activiteiten is het van belang om een innovatief ecosysteem te onderhouden waar samenwerking wordt gestimuleerd en ruimte wordt gecreëerd om te experimenteren met nieuwe ideeën op het grensgebied tussen verschillende disciplines. Dit is van belang voor snelheid, acceptatie en creativiteit waarmee nieuwe processen en concepten ontwikkeld worden.

Watervrije productie van papier

Een voorbeeld van een radicaal vernieuwende route betreft de ontwikkeling van de watervrije productie van cellulosevezels voor papier en pulp met deep eutectic solvents (DES). Het proces heeft het potentieel om CO₂ emissies in papierproductie significant te verminderen. Dit verkeert nog op een lager TRL-niveau, de inspanning hier betreft vooral ontwikkeling van de benodigde hulpstoffen en toepassingstechniek om aan de gewenste eindproductkwaliteiten te komen.

Drogen en ontwateren

Scheidings- en droogprocessen spelen vooral een grote rol in de papier- en voedingsindustrie, maar ook in bijvoorbeeld de polymerenindustrie zoals PVC en PE/PP moeten vast stof van oplosmiddelen en reactanten gescheiden worden. De standaardmethoden om gassen, vloeistoffen en vaste stoffen te drogen en te ontwateren zijn energie intensieve operaties via verdampen en uitcondenseren, destillatie of andere thermische processen. Meer efficiënte procesgangen zijn bijvoorbeeld drukgedreven processen, zoals nanofiltratie, centrifugeren, sorptie-drogen of drogen met behulp van een geïntegreerde warmtepomp. De route naar energie-efficiency hierbij is het bereiken van een hoger vaste stofgehalte door mechanisch te ontwateren, gevolgd door een verkleining of zelfs eliminatie van de droogluchtstroom. Dit laatste kan bijvoorbeeld via oververhitte stoom, die later wordt teruggewonnen in een geïntegreerd proces. Daarnaast speelt de verbetering van de warmteoverdracht van processen in het drooggedeelte eveneens een rol. Mogelijkheden hiertoe zijn bijvoorbeeld door middel van straling, infrarood en microgolf en optimalisatie van convectiestromen.

De overkoepelende innovatieopgave van de onderling sterk verschillende voorbeelden zoals hierboven zijn geïllustreerd is in essentie de (door)ontwikkeling van de technologie tot een niveau en een schaalgrootte waarop het concurrerend kan zijn met de heersende standaardtechnologie. Het verminderde energieverbruik moet opwegen tegen de (extra)CAPEX en betrouwbaarheid. Op laag TRL niveau wordt onderzoek gedaan

naar nieuwe technologische principes om water te verwijderen met behulp van elektrische krachten, zonder verdamping. Uitdaging is om deze principes te vertalen naar werkbare technieken.

De specifieke innovatiebehoefte van de opkomende technologieën verschilt onderling sterk, niet alleen vanwege de verschillen in aard maar ook vanwege de verschillen in TRL-niveau waarop de verschillende opties zich bevinden. Om de bestaande en toekomstige opgaven adequaat te adresseren is het essentieel dat er een sterk ecosysteem ontstaat waarin verschillende technische competenties, opbouw van deskundigheid, financiering, opschaaflabiliteit, etc. beschikbaar komen. Veel elementen daarvan zijn al deels aanwezig op universiteiten en innovatiecampussen maar ze zijn verre van compleet en versnipperd, de hoofdoopgave bestaat uit het adequaat financieren en het effectief completeren, concentreren en optimaliseren van de inspanningen.

3.2.3 Behoeften en randvoorwaarden

Innovatieopgave: Voldoende elektriciteit.

Ambitie: Ontwikkeling van realistische infrastructuurplannen samen met consumenten, producenten en Netbeheerders.

Innovatieopgave: Flexibel gebruik van elektriciteit industrie.

Innovatieopgave: Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels.

Ambitie: Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

Innovatieopgave: Beloning voor levering van restwarmte aan anderen

Diverse studies (bijv. FME; warmteplatform ISPT, CE Delft, Deltalinqs etc) hebben laten zien dat in de bestaande industrie verregaande energie-efficiency met name voor

voor de lagere temperaturen reeds mogelijk is met reeds beschikbare technieken. Zo suggereren diverse confidentiële studies gedaan in de Haven van Rotterdam zelfs 20-50% per kg product in bepaalde sectoren als warmtehergebruik ook wordt meegenomen. Implementatie stuit nog vaak op de te groot geachte economische en operationele risico's en het gebrek aan implementatie staf. Het wegnemen van deze risico-perceptie rechtvaardigt grote aandacht. Dit vereist niet alleen demonstratie van goed geïntegreerde energie-efficiënte systemen met daarin warmtepompen, opslag en e-boilers, maar ook inzet van digitale middelen en efficiëntere concepten voor (scheidings)operaties.

In het algemeen is energie-efficiency van processen goed te rijmen met business objectives. De beprijzing van CO₂ zal significant bijdragen aan een intensivering van de inzet. De industrie maakt echter regelmatig duidelijk dat een internationaal "level playing field" van belang zal zijn. Zeker omdat een flink aantal bedrijven over de wereld meerdere productielokaties heeft om uit te kiezen. Wanneer flink op nieuwe routes – die afwijken van de huidige processen – wordt ingezet dan speelt de risico-perceptie (veiligheid, betrouwbaarheid) een belangrijke rol. (Inter)nationale samenwerking om demonstratieprojecten te ontwikkelen is van groot belang. Zoals zo vaak zal beschikbaarheid van voldoende gekwalificeerd personeel essentieel zijn, niet alleen bij demonstratieprojecten, maar ook bij het ontwikkelen van bedrijfsspecifieke concepten (studies).

Het inbrengen van digitale technologie is meestal lager risico omdat er relatief makkelijk met een kleinschaliger pilot gewerkt kan worden. Een van de grootste issues is het accepteren van uitkomsten van diverse software en modelleringstools als de omgeving complex is. Ook het (deels) uitschakelen van de menselijke factor is een stap voor vele organisaties.

Tabel 7:

Item	Aandachtsgebied	Kennisingang	Budget voor:
Membranen	Vervanging distillatie voor tail-end verwijdering Voorscheiding	UTwente; TU-e; Shell	Materialenonderzoek Demo's
Proces intensificatie	Reactie en scheiding combineren; betrouwbaarheid	NL GUTS; TNO; PDC	Conceptontwerp Pilots Demo's
Warmtepompen	Inbedding in systemen	TNO, FME	Demo's
Watervrije papierproductie	CAPEX en betrouwbaarheid	ISPT	Pilot
Onderhouds-technieken	Effectiviteit	FME, NVDO	Demo's
Drogen en ontwateren	CAPEX en betrouwbaarheid	ISPT	Demo's
Digitaliseren	Impact, datadeling, security, samenwerking	Yokogawa; Siemens; TNO	Digital Twins Pilots Demo's

3.3 Deelprogramma 2: Re-use energie

Hergebruik van warmte komt in beeld als een warmtestroom tijdens het gebruik cascadeert van hoge temperatuur naar lage temperatuur. Als bij de lage temperatuur geen toepassing meer is binnen het bedrijf dan is het vaak gebruikelijk om via koeltorens of koelbanken de warme stroom verder af te koelen tot omgevingstemperatuur.

Deze lage temperatuurstroom kan nog steeds veel warmte bevatten, die via warmtepomp of warmtetransformator technologie efficiënt op een hogere en weer bruikbare temperatuur kan worden gebracht. Deze warmte kan naast intern gebruik ook worden geleverd aan andere sectoren, waar het ook leidt tot vermindering van opwek. Wanneer systemen worden ontworpen is het belangrijk om via pinchtechnologie het “pinchpoint” te vinden als richtlijn voor de inzetbaarheid van circulaire warmte. Het is namelijk ongewenst als warmte ergens wordt ingezet dat er dan elders in het proces extra gekoeld gaat worden. Dit is in complexe systemen niet altijd evident.

Eerder werd bijvoorbeeld vermeld dat warmtepompen <150 °C reeds beschikbaar zijn en dat hogere temperaturen binnen bereik komen, maar dat de implementatie achterblijft. De innovatie zit dus minder in de losse componenten, maar vooral in ontwerp en demonstratie van systemen waarin warmtehergebruik en flexibiliteit de kern is. Dit werd in 2.1 reeds aangestipt en wordt hier in 2.2 verder uitgelicht als belangrijke pijler.

Voor dit deelprogramma zijn vier subthema's van belang:

- a. Systeemconcepten voor warmte en koude
- b. Digitale productie- en keten- ondersteuning: beschreven bij doorsnijdende onderwerpen (sectie 3.5).
- c. Elektrificatie in het industriële energiesysteem: beschreven bij deelprogramma 3 (sectie 3.3.1).
- d. Randvoorwaarden

3.3.1 Systeemconcepten voor warmte en koude

Innovatieopgave: Praktische commerciële en operationele de-risking van systemen met warmtepompen, geothermie, e-boilers en energie opslagvormen.

Ambitie: Opwek van laagtemperatuurwarmte (stoomsystemen) in 2030 grotendeels vanuit warmte integratie, opslag, hergebruik en e-boilers.

Implementatie van beschikbare op zich goedwerkende nieuwe technologie stuit vaak op operationele en economische risico's na implementatie, met name wanneer het bestaande assets betreft. Verbetering van efficiency, verhoogde flexibiliteit en verlaging van CO₂-emissies bij warmte (of koude) gedreven processen is vanwege de rol van warmte-

hergebruik, -opwaardering en -opslag vooral effectief vanuit een systeemperspectief op het warmtegebruik. Behalve de ontwikkeling van specifieke technologieën is dus een systeembenadering vereist om tot een optimaal flexibel en energie-efficiënt warmte- en koudesysteem te komen met een acceptabel risico. Dit geldt voor sites van relatief beperkte omvang, maar zeer zeker ook voor grote industriële complexen. Ingrepen in de warmtevoorziening van een bestaand proces hebben namelijk meestal ook invloed op het warmtesysteem van de site of zelfs op de uitkoppeling naar een regionaal warmtesysteem. Denk hierbij maar als voorbeeld aan *fatale* stoom die ontstaat bij een verminderde eigen behoefte en gelijkblijvende eigen stoomproductie.

Daarom is de ontwikkeling en toepassing van ontwerp- en analysetools, die onderbouwd worden vanuit nieuwe (technologische) inzichten vanuit de andere deelprogramma's, essentieel.

Herontwerp van het energiesysteem van sites

Grote industriële sites kunnen sterk geïntegreerd zijn. Een stabiel warmteleverend systeem is via de stoombalans een vitaal onderdeel van een dergelijk industrieel proces. Hiervoor is de betrouwbaarheid van zowel de levering als afname en inpasbaarheid van fluctuaties in de procesvoering van het grootste belang. Benodigde utilities zijn niet alleen gas, elektriciteit en water, maar vaak worden ook warmte en waterstof aangeleverd via een centraal systeem, vaak aparte installaties. Daarnaast worden ook hoge temperatuurprocessen gebuikt om een stoomsysteem te voeden (cascadering).

De huidige stoom en utility systemen voldoen qua functionaliteit prima, zijn relatief laag in CAPEX en in de meeste situaties ontworpen met als belangrijkste voorwaarde de betrouwbaarheid. Voor de toekomstige fabrieken zullen andere warmtesystemen nodig zijn met een grote rol voor warmtehergebruik en omgang met fluctuerend energieaanbod (en beprijzing). In veel gevallen zullen de systemen ook veel meer geïntegreerd worden met de procesinstallatie, bijvoorbeeld een destillatiekolom met ingebouwde warmtepomp. Het energiesysteem van de toekomstige fabrieken zal er daarmee heel anders uitzien maar zal uiteindelijk ook de noodzakelijke betrouwbaarheid en optimale efficiency moeten worden bereikt.

Technologisch onderzoek naar dergelijke systemen moet inzicht geven in de beste combinatie van temperatuur, vermogen, capaciteit, ruimtebeslag, efficiëntie (verliezen), kosten (operationeel en capex), veiligheid, dynamisch gedrag en tijdsduur van verschillende technieken en hun inpassing. Op deze manier kan inzicht worden verkregen in het toepassingsgebied van bijvoorbeeld diverse warmte en koudeopslagopties. Een voorbeeld van een nieuwe ontwikkeling

is het creëren van lokale decentrale waterstof hubs (die mogelijk op termijn ook verbonden worden met een centrale backbone). Dit zou voor de specifieke energiesystemen van industriële processen een uitkomst kunnen bieden. Elektrolyse zorgt naast voor waterstof tevens voor zuurstof en warmte. Die kunnen in de lokale energieketen worden bekeken en toegepast. Essentieel is dat dan de hele waardeketen wordt betrokken, om een business case zo rendabel mogelijk te maken.

De ombouw van een bestaand industrieel warmtesysteem voor optimale efficiency, betrouwbaarheid en een steeds grotere rol voor hernieuwbare bronnen (en dus flexibiliteit) vraagt om een gestructureerde aanpak, met modellen die nog verder ontwikkeld moeten worden. Dit vereist bekendheid met het portfolio aan reeds toepasbare innovatieve technologieën met daarnaast kennis en kunde op het gebied van systematische modellering en engineering en analyse van het energiesysteem van fabrieken, sites en clusters.

De praktijk is dat veel bedrijven niet goed in staat zijn de designparameters van hun processen beschikbaar te stellen. Deze informatie is nodig om op een snelle manier een inschatting te maken van het warmteintegratie potentieel (hergebruik van restwarmte zowel door warmtewisselaars als warmtepompen) en vast te stellen welke reststromen het meest geschikt zijn als warmtebron en warmte-toepassing van de warmte die een warmtepomp op gaat wekken (dwz vast te stellen hoe een warmtepomp het best in de fabriek ingepast kan worden). Om een dergelijk complex dynamisch systeem te begrijpen en vervolgens te helpen rationaliseren is digitale ondersteuning in bijvoorbeeld de ontwikkeling van digital twins als optimalisatietool een essentieel hulpmiddel. Hiermee kunnen de consequenties van diverse opties worden doorgerekend, van retrofit tot herontwerp. Een lokaal goed lijkende warmte besparende optie kan namelijk op systeem-niveau tot een hogere warmtevraag leiden. Ook kan een inschatting gemaakt worden van de voor- en nadelen van centrale versus lokale onderdelen voor het warmtesysteem alsmede de risico's van onderlinge afhankelijkheid en systeem dynamiek.

Opslag van warmte en elektriciteit

Naast een belangrijke rol voor warmtepompen die restwarmte nieuw leven inblazen zal in een toekomstig energiesysteem de opslag van energie van groot belang zijn voor flexibiliteit. Dit gaat over elektrische energie, maar ook over warmte. Opslag van warmte en/of elektrische energie kan op diverse manieren, die allen reeds relatief goed beschikbaar zijn o.a. in waterbuffervaten, materialen die een faseovergang meemaken, vaste stoffen met een hoge warmtecapaciteit, ondergronds, en met reversibele chemische reacties. Zo zijn er al apparaten beschikbaar die elektriciteit als warmte opslaan om later als stoom weer beschikbaar te maken. De toepasselijke warmte en/of elektrische energieopslagsystemen zullen elk variëren

over de diverse temperatuur ranges en situatie zoals constante of variabele in- en output temperaturen, base- of peakload (uptime als piekvermogen van systeem) en gewenste output in termen van systeemintegratie (stoom, directe vlam, hete lucht/water). Aandachtspunten zijn dynamisch gedrag in systemen en ruimtebeslag.

Uitkoppeling en deling van restwarmte

Systeemgrenzen hoeven niet perse beperkt zijn tot het eigen fabrieksterrein. Er kan bijvoorbeeld significante CO₂-emissiereductie worden bereikt wanneer bedrijven onderling samenwerken in verwarmen en koelen. De warmte die de ene fabriek bij koelen onttrokken wordt kan bijvoorbeeld bij een ander bedrijf gebruikt worden om te verwarmen. Vooral binnen industrieclusters is er potentieel om warmtegebruik in samenwerking te verminderen. Ook in de gebouwde omgeving zou restwarmte, wanneer industriële restwarmte die niet of moeizaam intern is te hergebruiken of op te waarden, kunnen worden uitgekoppeld en getransporteerd via warmtenetten. Op dit moment wordt warmte tot een temperatuurniveau van ca. 60-80 °C vaak nog geschikt geacht voor direct gebruik of potentieel hergebruik in de industrie via opwaardering tot hogere temperaturen (circulaire warmte). Warmtepomptechnologieën ontwikkelen zich echter zodanig snel, dat ook industriële bronnen van lagere temperaturen intern binnen een bedrijf of binnen een bedrijventerrein kunnen worden opgewaarderd voor hergebruik. Het streven is naar een situatie waarbij vanuit de industrie geen wegkoeling via koeltorens en ventilatoren meer optreedt. Indien fataal kan hoogwaardige warmte (> 60 °C) direct via een warmtenet, een zogeheten bronnet, efficiënt worden getransporteerd naar woningen en kantoren of glastuinbouw. Zelfs waterstromen van rond 15 °C zijn zeer geschikt als bron voor warmtepompen in de bebouwde omgeving. Hoe dit efficiënt en betrouwbaar te doen heeft vele systeemontwerpcomponenten. Deze ontwikkeling heeft sterke raakvlakken met MMIP 4 en moet in samenhang bekeken worden. Een belangrijke voorwaarde voor interesse bij de industrie is een faire beloning en erkenning voor de rol in CO₂ reductie.

Inzet van geothermie als systeemcomponent

Binnen het ontwerp van grotere industriële energiesystemen verdient na optimale inzet van restwarmte (intern of extern geleverd) en het gebruik van duurzame elektriciteit, de inzet van geothermie als systeemcomponent eveneens aandacht. Geothermie heeft de laatste jaren veel aandacht gehad in Nederland, vooral binnen de glastuinbouw. Het betreft vooral geothermie tussen 0,5 – 4 km diepte. Voor diepe geothermie (tot 4 km) zijn de laatste jaren succesvol de interessante aardlagen in kaart gebracht en is de kans op voldoende productie redelijk in te schatten zodat (dure) proefboringen een acceptabel risico herbergen. De brontemperaturen van conventionele projecten liggen op 60 – 100 °C en deze kunnen vervolgens worden

opgevaardeerd naar industrieel aantrekkelijke temperaturen van 130 – 150 °C via warmtepompen (deze ontwikkeling maakt ultradiepe geothermie dan min of meer overbodig). Er is voor geothermie vanuit industrieel gezichtspunt, net als warmtepompen < 150 °C, dus vooral behoefte aan begrip van het gedrag binnen systeemoptimalisatie en demonstratie van inzet van geothermie als adequaat onderdeel van industriële warmtenetten.

3.3.2 Randvoorwaarden

Innovatieopgave: Voldoende elektriciteit.

Ambitie: Ontwikkeling van realistische infra plannen samen met producenten en Netbeheerders.

Innovatieopgave: Flexibel elektriciteitsgebruik in de industrie.

Innovatieopgave: Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels.

Ambitie: Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

Innovatieopgave: Voldoende beloning voor levering van warmte aan anderen.

Van groot belang bij het welslagen van de introductie van dit soort systemen is te beseffen dat het alternatief relatief simpel is: een boiler met een stoomsysteem. Een warmtepomp systeem oogt veel complexer, is duurder en heeft wat meer onderhoud nodig. Mede omdat veel warmtepomp systemen specifiek voor een situatie worden ontworpen zijn steeds (dure) op maat gemaakte compressoren nodig. Een oplossing om kosten te drukken en onderhoud te vergemakkelijken is standaardisatie van vermogens en temperatuursgebieden. Dit betekent dan inbouw van systemen die meestal iets te groot zijn ontworpen – een andere manier van denken. Daarnaast is stabiele operatie gebaat bij een warmtebuffer mogelijkheid, die dan tevens flexibiliteit in afname van een elektriciteitsysteem kan leveren. Praktische demonstratie van dergelijke systemen is essentieel voor acceptatie alsmede het benadrukken van LCC versus CAPEX.

Een belangrijke andere randvoorwaarde is het verlagen van de drempel om te veranderen door goede toegang tot (goedkope) studies. Daarnaast is een vorm van beloning voor vermeden CO₂ als deze niet op de eigen site gebeurt belangrijk. Dit kan financieel geregeld worden in de afgesproken prijs voor de warmte, maar formele erkenning van actuele vermeden tonnen CO₂ is welkom.

Tabel 8:

Item	Aandachtsgebied	Kenniscentrum	Budget voor:
Herontwerp energiesysteem	Betrouwbaarheid Flexibiliteit LCC concept	Diverse adviseurs	Systeemconcepten
Opslag van warmte en elektriciteit	Ruimtebeslag Dynamisch gedrag	EnergyStorageNL FLIE TNO TU-T	Systeemontwerp Demo's
Uitkoppeling en deling van restwarmte	Schaalgrootte Operationele disruptie Gebruik Lage bron temperaturen	Energiebedrijven Netbeheerders Diverse adviseurs	(Publieke) systeem studies
Geothermie	Inpassing Exploitatierisico's	Shell; HVC; TNO	Systeem studies Demo's

3.4 Deelprogramma 3: Replace energiedragers

Voor dit deelprogramma zijn zes subthema's van belang:

- Elektrificatie van het bestaande industriële energiesysteem
- Nieuwe elektrisch gedreven procesroutes en technieken
- Inzet van klimaatneutrale brandstoffen
- Digitale productie- en ketenondersteuning: beschreven onder doorsnijdende onderwerpen (sectie 3.5).*
- Elektrolytische productie van H₂: beschreven onder deelprogramma 4 (sectie 3.4).*
- Randvoorwaarden

3.4.1 Elektrificatie in het industriële energiesysteem

Innovatieopgave: Elektrificatie van lage- en hoge temperatuuroepassingen.

Ambitie: In 2030 demo-units voor elektrisch kraken en andere hogetemperatuurfornuizen.

Ambitie: Warmtepompen > 150 °C beschikbaar.

Innovatieopgave: Flexibele betrouwbare systemen.

Ambitie: robuuste concepten voor levering, transport en (flexibel) gebruik van elektriciteit in het industriële warmtesysteem

Innovatieopgave: Inpasbaarheid in infrastructuur site en omgeving.

Als efficiency in operaties en industriële energiesystemen geoptimaliseerd zijn en warmtehergebruik zoveel mogelijk is gerealiseerd, dan zal de nog resterende energie vraag duurzaam worden ingevuld vanuit voornamelijk elektriciteit. Bij grootschalig introductie van het gebruik van elektriciteit is er sprake van een merit-order op basis van het rendement. Processen die bijvoorbeeld gebruik kunnen maken van warmtepompen zou men als eerste willen elektrificeren. Daarna komen de processen die op hoge temperatuur plaatsvinden en geen efficiënter alternatief hebben. Niet alleen de productie van de benodigde duurzame warmtebronnen/energiedragers is van belang, maar ook de inzet behoeft voortdurend innovatie.

In de toekomst zal de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit waarschijnlijk beperkt blijven, zelfs als alle wind en zonne-energie plannen zijn geïmplementeerd. Uiteraard is er een mogelijkheid tot import, maar in het algemeen is transport van energie lastig en dus prijzig. Bovendien is een te grote afhankelijkheid ongewenst. Directe elektrificatie van de industrie biedt het efficiëntst mogelijke gebruik van hernieuwbare energiebronnen, zowel in het energiesysteem als de processen.

Door toename van duurzame elektriciteit zal gezien de te verwachten grilligheid van levering flexibiliteit essentieel zijn, zowel in de energiemarkt als in operatie van de industrie. Dit laatste kan bijvoorbeeld door variatie van productievolumes

op basis van beschikbare elektriciteit, het gebruik van hybride warmte systemen en opslag/buffering van elektriciteit/warmte. De benodigde installaties dienen zodanig ontworpen te zijn dat het flexibel bedrijven ervan niet de veiligheid en betrouwbaarheid van de bedrijfsvoering gevaar te brengt.

Er is nog veel onderzoek en opdoen van ervaring nodig om hierin de optimale situatie te bereiken. Hiervoor is deels nieuwe technologie en kennis nodig (bijv. omtrent DC technologie en elektrochemie) en deels zullen reeds bestaande apparaten zoals elektrolyzers, e-boilers, warmtepompen en diverse opslagvormen veilig en betrouwbaar ingepast moeten worden in het systeem. Het is daarnaast van belang dat er een alternatief komt voor gasgestookte fornuizen en ovens (denk hierbij aan sommige chemische omzettingen, productie van glas, steen en keramiek).

Het interessante aan industriële elektrificatie is dat dit niet alleen *replace* aspecten heeft, maar tevens reeds een flinke efficiëncyslag in zich herbergt zonder de bediende conversieprocessen zélf te beschouwen. Dit onderbouwt een eerder opmerking in Hoofdstuk 3 dat de beschreven subthema's die de deelprogramma's vormgeven niet 1 op 1 te matchen zijn, maar vaak meerdere raakvlakken hebben.

Ontwikkeling en inpassing van elektrische verwarmingsmethoden

Een belangrijke ontwikkeling betreft de innovatieopgave rondom de hoge temperatuurprocessen. Deze vallen in de (bulk-) chemie ruwweg in twee delen uiteen. Het betreft allereerst de ontwikkeling, opschaling en demonstratie van diverse nieuwe geïntegreerde elektrische verwarmingsmethoden en de inpassing daarvan in bestaande processen zoals stoomkraken, methaanreforming en (vacuüm)destillatie. Er zijn hiervoor verschillende technische opties: ohmse verhitting, inductie, plasma, microgolf en kinetisch. Het Rotating Olefins Cracking concept is een voorbeeld van deze laatste methode.

Ook de relatief simpele inzet van thermische olie-systemen met elektrische verwarming voor bijvoorbeeld destillatie vallen hier onder. De technische principes zijn veelal bekend, maar het praktisch ontwerp van apparatuur en de robuuste inpassing in commerciële, geïntegreerde omgevingen vertegenwoordigen een flinke opgave. Aangezien het vaak om grote hoeveelheden energie gaat zal inpassing pas gebeuren als de duurzame elektriciteitsbeschikbaarheid toeneemt en er voldoende buffering of hybride oplossingen voorhanden zijn. Bestaande commerciële installaties kunnen vermoedelijk geleidelijk worden omgebouwd. Eventuele (fossiele) energiehoudende restgassen die overblijven tijdens deze processen – en die nu nog een energiebron zijn – zullen verder moeten worden verwerkt, het liefst als grondstof. Deze ontwikkelingen passen binnen de scope van MMIP 6 (CCU).

Daarnaast is elektrisch drogen en verwarmen op basis van

hernieuwbare elektriciteit een duurzaam alternatief voor huidige gasgestookte processen. Elektrische droogprocessen en verwarmingsprocessen tot 500°C zijn voor een aantal gevallen beschikbaar, maar onder de huidige Nederlandse marktcondities vaak niet concurrerend. Boven de 500 °C is het aantal kant en klare oplossingen echter nog klein en zijn ze specifiek voor bepaalde processen. Het is van belang dat er een alternatief is voor vervanging van gasgestookte fornuizen en ovens (denk hierbij aan sommige chemische omzettingen, productie van glas, steen en keramiek).

Flexibiliteit en systemen

De industrie heeft zich in Nederland over de afgelopen decennia geoptimaliseerd naar volcontinue operatie en economy-of-scale mede door goedkope beschikbaarheid van energie. De energie mix bestaat uit externe bronnen (gas, olie, kolen, elektriciteit) en interne stromen (o.a. (rest-) gassen, warmte cascadering met stoom netwerken) die in samenwerking de behoefte dekken en gericht is op volcontinue operatie. Processturing is vooral gericht op het borgen van de veiligheid, betrouwbaarheid, product specificaties en kwaliteit. Operationele aanpassing van productieniveaus vindt met name plaats obv de marktvraag (planning en voorraadbeheer).

Met opkomst van grootschalig opgewekte duurzame elektriciteit zal de hoeveelheid fluctuerende elektriciteit op het net de komende decennia aanzienlijk gaan toenemen. De behoefte om met dit fluctuerende aanbod om te kunnen gaan zal daardoor ook groeien. De vraag is hoe dit fluctuerende aanbod in de industrie, waar elektrificatie een prominente rol zal gaan spelen, op een effectieve en efficiënte manier ingezet kan worden. Om zoveel mogelijk duurzame energie te kunnen inpassen in combinatie met vergaande elektrificatie zal de industrie flexibel energie af moeten kunnen nemen, om te voorkomen dat gedurende momenten met weinig of geen duurzame opwekking de vraag van de industrie zal leiden tot instabiliteit van het elektriciteitssysteem of hele kostbare back-up voorzieningen. Afname-flexibiliteit betekent dat de industrie in het geval van voldoende piek aanbod of dal tekorten inspeelt op beschikbaarheid van opgewekte stroom. Een voorbeeld hiervan is het opereren van meerdere kleinere reactoren in plaats van één hele grote. Een overweging hierbij is in hoeverre een investering in een dergelijk aangepast proces kosteneffectief genoeg is om fluctuerend aanbod via de industrie kosteneffectief op te vangen. Deze rol van de industrie zal bijdragen aan de laagste maatschappelijke kosten en zal helpen bij het creëren van maatschappelijke draagvlak om de industrie te gaan elektrificeren. Dit vereist een goede afstemming tussen industriegebruik, opwek en netbeheerders.

Het aanbod van lokaal in Nederland opgewekte duurzame elektriciteit zal voor langere tijd slechts een deel van de totale nationale energie behoefte kunnen invullen. Hybride

oplossingen zijn dus belangrijk. Import van de benodigde aanvullende duurzame energiedragers is noodzakelijk en dit kan vanuit diverse delen in de wereld gebeuren – grootschalige elektrificatie speelt wereldwijd. Import van nieuwe energiedragers kan geschieden via bijvoorbeeld een HVDC elektriciteitsnet, een pijpleidingnet of aanvoer per tanker. Met de introductie van elektrificatie opties en groeiend aanbod van duurzame energiedragers (waterstof en afgeleiden daarvan, zowel nationaal opgewekt als geïmporteerd) komen er de komende decennia dus extra vrijheidsgraden in het optimaliseren en sturen van de energie mix.

De accommodatie van fluctuerend aanbod van elektriciteit kan bijvoorbeeld gebeuren door via een hybride systeem met buffering van warmte of elektriciteit intern de energievoorziening te stabiliseren zodat de kernoperaties gevrijwaard zijn van disrupties.

Naast de opties voor stabilisering van de energietoevoer aan processen zoals hybride systemen en buffering is er nog veel nieuwe kennis en technologie benodigd voor het ontwerpen en bedrijven van flexibel aangestuurde conversieprocessen. Dit is deels onderdeel van nieuwe procesroutes zoals elektrochemie maar zal deels ook van toepassing zijn op conventionele processen. Niet alleen zal een tijdelijke terugschakeling in de productie bij volledige utilisatie tot een lagere jaarproductie leiden en invloed hebben op voorraadbeheer (buffering), maar tevens kan het fysisch-dynamische gedrag van fabrieken relatief onbekend zijn met daarbij veiligheids-, betrouwbaarheids- of kwaliteits-issues. Veranderen bijvoorbeeld stromingscondities bij tijdelijk lagere doorzet de menging en/of productkwaliteit? Zijn er onverwachte warmte-effecten (ontstaan er hot-spots bijvoorbeeld)? Vindt er depositieplaats van vervuilende componenten?

Het vergt grondige modellering, simulering en test/ meetcampagnes in de praktijk om de procesoperatie (deels) conform het aangeboden elektriciteitsprofiel te laten lopen. Sommige productieprocessen kunnen mogelijk makkelijk op- en afschakelen en kunnen een oplossing bieden bij elektriciteitstekorten. Hiervoor is wel vergroting van de productiecapaciteit nodig om zo te compenseren voor de tijden waarin niet geproduceerd wordt.

De bovengenoemde opties kunnen worden gecombineerd zodat het procesgedeelte inclusief de hybride/buffercapaciteit het aangeboden elektriciteitsprofiel kan volgen. Alle opties hebben een significante invloed op procesoperatie, -ontwerp en -regeling en de samenhang binnen de totale betrokken supply-chain.

De concrete innovatie uitdagingen die met het bovenstaande samenhangen zijn de volgende:

Ontwerp(aanpassingen) voor keten elasticiteit. Het hele veld van Process Systems Engineering, Process Control en Digitalisering speelt een belangrijke rol in ontwerp van grootschalige flexibele processen, van unit operatie tot plant tot complete site tot supply chain. Dit zou bijvoorbeeld in de productie via modulaire reactoren kunnen lopen. Daarbovenop komt de integratie in de regionale setting (o.a. via industriële samenwerking) en de koppeling met planning en scheduling van operaties en voorraden die rekening houden met vraag en aanbod aan de product kant (supply-chain management) alsook aan de energie kant. De innovatie opgave richt zich op hoe grootschalige systemen ontworpen kunnen worden die stuurbaar zijn en een optimale energie mix gebruiken zodat minimale CO₂ emissie gepaard gaat met betrouwbare productiviteit. Hier speelt de digital twin een rol – het digitaal kopiëren van de productieketen voor ontwerp en analyse van de proces flow.

Piloting en demonstratie van flexibiliteitsverhogende systemen zoals hybride systemen met een energiebufferingsvorm om te leren over dynamiek, betrouwbaarheid, rendement en businesscase. Hierbij hoort het ontwerp van een financieel compensatiesysteem voor bedrijven die door gebruik van extra energieopslag of door tijdelijk verminderen van energiegebruik beschikbaar maken.

Inzet van digitale technologie. Door snelle ontwikkelingen in proces analyse systemen komt in moderne fabrieken en hun waardeketens steeds meer procesdata beschikbaar. De grote hoeveelheid data is op zich van beperkte waarde, het gaat erom een vertaling van data naar informatie te maken op basis waarvan beslissingen genomen kunnen worden voor betrouwbare flexibele operatie. Dit speelt met name een grote rol in besturing van de conversieprocessen en gerelateerde energiesystemen, maar is ook bruikbaar in onderhoud (condition based maintenance) en in optimalisatie van bedrijfsvoering en waardeketens. Innovatie aan de hardware kant en aan de digitale kant is beiden van belang.

Distributie van energiedragers voor processen

Als de juiste technologie-systemen beschikbaar zijn, dan is een verdere uitdaging om de duurzaam opgewekte energie en grondstoffen zo efficiënt mogelijk in de unit operatie te krijgen en daarmee te borgen dat de industrie flexibel kan opereren en productiviteit kan handhaven. Te denken valt hierbij aan efficiënte transmissie, conversie en distributie infra van DC voor hoogvermogen applicaties in binnen het fabriekshek – hoe wordt het elektrisch systeem uitgelegd om van aanbod naar toepassing te komen, waar worden DC/AC overgangen gemaakt, waar wordt op welke vermogensniveaus geschakeld en gestuurd om een maximaal flexibel en efficiënt systeem te borgen?

Bestaande stoom en warmte netwerken gaan veel intensiever gecombineerd worden met elektrische utility netwerken samen met energie opslag en systeem-integratie (inclusief met de bebouwde omgeving) voor het borgen van continue operatie. Verdere kennis en inzicht in gedrag, betrouwbaarheid en veiligheid van diverse hybride systemen met opslagmogelijkheden voor het aandrijven van hoge temperatuur processen moet opgedaan worden. Dit zal deels op niveau van individuele processen en/of bedrijven aangepakt worden en deels via ontwikkelen van opslagfaciliteiten of energie hubs op regionaal of nationaal niveau. De hubs hebben als taak om wisselvallige opwek te stabiliseren en synergie te zoeken in warmte, opslag en moleculen. Dit gebeurt in afstemming met MMIP 8 & 13 waarin diverse grootschalige opslagtechnologieën onderzocht worden die in industrieomgeving ingezet kunnen worden. Voor alle vormen van energie opslag systemen geldt dat de laad-ontlaad cyclus een voldoende hoge frequentie dient te hebben. Hoe hoger deze frequentie des te kleiner (en dus goedkoper) de vereiste opslag capaciteit en hoe hoger de waarde toevoeging aan de totaal doorgeleverde energie.

3.4.2 Nieuwe elektrische processen en technieken

Innovatie-opgave: Ontwikkeling van nieuwe efficiënte directe en indirecte elektrochemische conversie routes en scheidingen.

Ambitie: In 2030 een aantal pilot- en demoschaal concepten toonbaar.

Bijna alle processen in de industrie zijn ooit ontwikkeld zonder restricties t.a.v. broeikasgasemissies en energie uit fossiele brandstoffen was vrijwel altijd het goedkoopste. Vanwege de veranderingen in dit beeld komen veel industriële processen van vandaag in aanmerking voor radicale vernieuwing, met een belangrijke rol voor elektrificatie. De ontwikkelingen zijn vooral relevant voor MMIP 7 indien er naast een CO₂-emissiereductie grote (energie-) efficiency dan wel flexibiliteitsvoordelen worden gehaald. Elektriciteit maakt een game-change mogelijk om geheel andere processen te ontwikkelen waarbij elektriciteit direct wordt gebruikt voor het beoogde fysische of chemische proces, in plaats van elektriciteit eerst te converteren tot warmte. Er zijn reeds een aantal goede voorbeelden van dergelijke ontwikkelingen te noemen.

Elektrochemisch gedreven nieuwe procesroutes

Een belangrijk pad betreft de ontwikkeling van nieuwe routes naar duurzame brandstoffen en basischemicaliën. Deze laatste komen nu nog meestal uit stoomkraken en katalytische reforming. Men kan denken aan conversie van CO₂/CO naar methanol, ethanol, mierzuur of DME als platformchemicalien.

Binnen dit subthema past de directe elektrochemische productie van moleculen. Hierin vindt onderzoek en ontwikkeling plaats naar elektrochemische productieprocessen voor synthetische grondstoffen en brandstoffen (e-fuels). Deze laatste komen ten behoeve van vervoer of warmtevoorziening waar elektriciteit of waterstof geen goed alternatief biedt. Belangrijke voorwaarde daarbij is de keuze van de juiste geschikte producten (energiedragers/brandstoffen/grondstoffen) voor verschillende toepassingen. Er zal een dual-use mogelijk zijn van de producten: zo zijn bijvoorbeeld methanol en NH_3 zowel inzetbaar als brandstof als grondstof.

Bij de directe elektrochemische productie van chemische platformmoleculen voor verdere verwerking in de chemische industrie is het al aangetoond dat CO_2 en water met behulp van katalysatoren en membranen in één keer kunnen worden omgezet in etheen en ethanol. Van vergelijkbare orde is elektrificatie van de productie van ammoniak (NH_3). Wereldwijd is dit proces verantwoordelijk voor de grootste vraag naar industriële waterstof. In principe is het mogelijk om stikstof en water direct via een elektrochemisch proces naar ammoniak om te zetten. Het effect van deze ontwikkelingen is potentieel zeer groot omdat etheen en ammoniak in Nederland en wereldwijd de grootste hoeveelheid bulkchemicaliën vertegenwoordigen, en dus aan de basis staan van heel veel chemische producten en materialen. Deze ontwikkelingen bevinden zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Elektrolyse technologie biedt ook de mogelijkheid voor simultane elektrochemische reductie van CO_2 en water tot syngas (mengsel van koolmonoxide en waterstof) en zuurstof. In een vervolgstap kan dit synthesegas worden gebruikt voor het maken van vervolgproducten in een conventioneel thermochemisch proces (Fisher-Tropsch of methanol synthese).

De belangrijkste opgaven in het veld van de elektrochemie zijn de doorontwikkeling van celtechnologie (inclusief katalysatoren en elektrode -materiaal en -ontwerp), robuustheid van operatie, selectiviteit, opschaling van productie met kosteneffectieve fabricage-technologie en supply chain ontwikkeling. Daarnaast speelt integratie met (hoge temperatuur) processen die H_2 , synthesegas of CO als grondstof gebruiken een rol. Fundamenteel onderzoek en fieldlabs zullen de weg moeten banen naar de vereiste schaalgrootte met daarnaast aandacht voor integratie en flexibilisering van deze elektrochemische processen in het energiesysteem.

Niet elektrochemische nieuwe procesroutes

Naast de directe routes bestaan er nog andere vormen van nieuwe chemische routes naar platformchemicaliën die zijn gebaseerd op de inzet van groene waterstof. Dit soort processen komt uitgebreid aan bod in MMIP 6. Hierbij moet worden opgemerkt dat indirecte routes een overall aanzienlijk lagere energie efficiency kennen dan directe elektrificatie – een

factor 2 is daarbij geen uitzondering. Dit alles kan op gespannen voet staan met energie efficiency doelen.

Een alternatief voor elektrochemie zijn de elektrisch opgewekte plasmareacties. Deze kunnen voor vele reacties worden ingezet zoals de productie van een mengsel van waterstof, koolmonoxide en zuurstof uit water en CO_2 ; de productie van ammoniak uit water en stikstof en dry-reforming van methaan met CO_2 naar synthesegas. Dit vormt een potentiële route naar duurzame grondstoffen waarbij CO_2 emissies worden vermeden. Er zijn meerdere opties voor stabilisatie van het plasma (bijv. RF, microgolf).

Een tweede toepassing geeft een oplossing voor de groeiende vraag naar duurzame waterstof voor allerlei doeleinden. Elektrolyse van water (die apart wordt behandeld in deze MMIP 7) zal hiervan op den duur het leeuwendeel (moeten) gaan verzorgen. Het is echter goed om in de transitieperiode een aantal andere methoden voor CO_2 vrije productie van waterstof achter de hand te hebben. Zo kan in de komende decennia de productie van waterstof met CO_2 afvang (blauwe waterstof) mogelijk nog een belangrijke rol spelen om CO_2 doelstellingen te halen. De blauwe route via ATR of SMR kan worden aangevuld met alternatieve CO_2 -vrije productieroutes naar waterstof die via een radicaal ander proces verlopen waarbij elektriciteit een belangrijke rol speelt.

Zo is er een ontwikkeling waarbij lichte koolwaterstoffen (fossiel of biogeen) met nieuwe geïntegreerde elektrische verhittings-technieken bij zeer hoge temperatuur worden ontleed in waterstof en vaste koolstof waardoor de emissie van CO_2 kan worden vermeden. Deze route is energie-efficiënter dan de ATR/SMR route en heeft als nevenvoordeel dat vaste koolstof wordt gevormd en CO_2 emissies worden vermeden. De selectieve ontleding van aardgas bevindt zich op laag (in het geval van molten metal route) en middel (plasma route) TRL niveau. Een bijkomend voordeel is dat de vaste koolstof, mits van voldoende zuiverheid, makkelijk transporteerbaar is en (internationaal) kan worden ingezet als koolstofbron in producten waarin het (voor lange tijd) wordt vastgelegd.

Een ander mooi voorbeeld van een indirecte route is te vinden in de staalindustrie. Een CO_2 -vrije staalproductie is een belangrijk onderwerp binnen de ontwikkelingsinspanning bij de staalsector. Deze richt zich (naast het afvangen van geproduceerde CO_2) op de vervanging van kolen door reductiemiddelen met een gunstiger broeikasgasprofiel (waterstof, aardgas, biomassa) en het gebruik van electric arc furnaces. Het vermijden van het gebruik van steenkool geschiedt hier via directe reductie (DRI) met waterstof en/of synthesegas. Ook elektrolyse wordt genoemd als methode om staal te maken uit ijzererts, maar deze ontwikkeling is nog pril.

Tenslotte een voorbeeld van een niet-elektrochemische rol voor elektriciteit is het niet-thermisch of mechanisch ontwateren en drogen met behulp van electro-osmotische extractie of corona-ionisatie.

Hoewel deze routes dus onderdeel van MMIP 6 vormen, is er vanwege de rol van elektriciteit, mogelijke efficiencywinst en flexibiliteit een duidelijke overlap met MMIP 7.

De belangrijkste thema's zijn het doorlopen van de vroege TRL fases richting pilot en uiteindelijk demo. Vroege thema's betreffen verhoging van energetische rendementen, levensduur, betrouwbaarheid, flexibiliteit, selectiviteit en daarnaast vroege aandacht voor inpassing/rol in het systeem en het verlagen van de LCC van producten.

3.4.3 Inzet van klimaatneutrale brandstoffen

Innovatieopgave: Ontwikkeling van flexibele branders. Innovatieopgave: NO_x-emissies laag.

Ambitie: Branders voor duurzame brandstoffen klaar (evt voor hybride gebruik) in 2030.

Hoewel directe elektrificatie energetisch veruit het aantrekkelijkst is en dus op de lange duur dominant zal zijn, zijn er voor stabilisatie van het energiesysteem, flexibiliteit en moeilijk te elektrificeren processen en sectoren (denk ook aan luchtvaart en zwaar vervoer) ook duurzame brandstoffen nodig. Voorbeelden van duurzame brandstoffen zijn bio-gas, waterstof, ammoniak, e-fuels, methanol, DME, biobased fuels en mogelijk ook metallisch ijzer. Hiervoor is veel (groene) waterstof als grondstof nodig.

Inzetbaarheid van directe elektrische verwarming kan ook om technische redenen lastig zijn zoals bijvoorbeeld gewenste temperatuurverdeling, warmteoverdracht en producteigenschappen. Een goed voorbeeld is de glas en keramiek sector. In vele hoge temperatuur processen spelen daarnaast de CAPEX kosten van directe elektrificatie (apparatuur, ombouw en, indien beschikbaar, de aansluiting voor elektriciteit) een belangrijke rol.

Voor de duurzame brandstoffen bestaan er een aantal alternatieve maakprocessen die binnen MMIP 6 verder ontwikkeld worden. Niet alleen de productie van deze nieuwe duurzame energiedragers is van belang, maar ook de inzet, opslag en handling hiervan behoeft verder onderzoek. Dit MMIP 7 deelprogramma richt zich daarom op het verbeteren van de toepasbaarheid en daarmee de energie- en/of koolstofefficiency van deze alternatieve brandstoffen.

In dit subthema gaat het dus om de impact op de verbrandingsprocessen zélf, zoals warmteverdeling, warmteoverdracht en uitstoot van NO_x. Toepassing van klimaatneutrale brandstoffen vraagt met name onderzoek naar

aangepaste branders, NO_x minimalisering en fornuizen en systemen. Met name onderzoek naar gebruik van bestaande brander/fornuizen voor waterstof (0-100%) en het effect daarvan op productkwaliteit zijn nog steeds belangrijke thema's. Ook de niet-constante samenstelling van vele brandstoffen en/of flexibele inzet in hybride constellatie met e-boilers stelt extra eisen aan branders en regeling.

Omdat ontwikkeling een lange aanlooptijd kent en er competitie voor resources zal ontstaan dient vroeg te worden begonnen met de ontwikkeling van deze optie zodat die op termijn geen belemmering in de voortgang van de energie transitie vormt. Voor deze ontwikkeling worden opeenvolgende verkenningen, haalbaarheidsstudies en (systeem) ontwerpstudies voorzien die uiteindelijk moeten leiden tot eerste praktijkprojecten. Dit dient in nauwe samenwerking met internationale partners plaats te vinden.

3.4.4 Randvoorwaarden

Innovatieopgave: Voldoende elektriciteit.

Ambitie: Ontwikkeling van realistische infrastructuurplannen samen met gebruikers, producenten en Netbeheerders.

Innovatieopgave: Demonstratie van directe electrochemische route naar basis chemicalien

Ambitie: een grote pilot of demonstratiefabriek van een direct electrochemisch proces

Innovatieopgave: Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels.

Ambitie: Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

Van groot belang bij het welslagen van de elektrificatie is het besef dat dit een grote verandering betreft. Nog groter dan de verandering in het energiesysteem zelf. Ook is een vroege anticipatie op de behoefte aan flexibiliteit noodzakelijk. Deze transitie vergt grote inspanning bij de industrie en grote kosten, waarvoor voldoende incentive moet zijn via prijsprikkels. Vanwege het risico (en niet alleen financieel) die een bedrijf neemt is maatschappelijke erkenning en ondersteuning nodig. In de vrije markt zal niet snel een partij als eerste deze stappen zetten. Hiervoor heeft de overheid de mogelijkheid om wetten en/of financiële prikkels te introduceren en eventueel individuele gesprekken aan te gaan. Het ontbreekt vele kleinere bedrijven aan kennis en overzicht van beschikbare technologieën om hun energiegebruik echt te verminderen en om klimaatneutraal hetzelfde of vergelijkbare producten te maken.

Tabel 9:

Item	Aandachtsgebied	Kenniscentrum	Budget voor:
Elektrische verwarmingsmethoden	LCC besef Levering van stabiliteit/ flexmanagement	Shell, Dow FME	Systeemconcepten Pilots
Flexibiliteit	Flexibele operatie Hybride systemen Digitale ondersteuning	EnergyStorageNL FLIE TNO	Systeemontwerp Demo's
Distributie van energiedragers voor processen	Interfaces	Siemens Netbeheerders Diverse adviseurs	(Publieke) systeem studies
Elektrochemische procesroutes	Materialen e-Efficiency Selectiviteit Robuustheid	TU-e; TU-D	Bench/pilots
Niet- elektrochemische procesroutes	e-Efficiency Selectiviteit Robuustheid	Brightlands TNO	Low TRL
Inzet van klimaatneutrale brandstoffen	Flexibiliteit branders Brandstoftypes Hybride inzet NOx	Duiker combustion Brightlands	Demo

3.5 Deelprogramma 4: Produce - elektrolytische productie van waterstof.

Hierboven werd reeds vermeld dat een efficiënt en flexibel gebruik van hernieuwbare energie een belangrijke drijfveer is bij de ontwikkeling van (radicaal) nieuwe processen om gewenste producten te maken. Veel van dergelijke mogelijke routes leunen zwaar op waterstof die op diverse manieren CO₂-vrij kan worden gemaakt. De elektrolyse van water is daarvan een belangrijk voorbeeld.

Voor dit deelprogramma zijn vijf subthema's van belang:

- Elektrolytische productie van H₂
- Systeemconcepten voor warme en koude: beschreven onder deelprogramma 2 (sectie 2.2.1).
- Radicaal nieuwe efficiënte processen en technieken: beschreven onder deelprogramma 1 (sectie 2.1.2).
- Digitale productie- en ketenondersteuning: beschreven onder doorsnijdende onderwerpen (sectie 2.5).
- Randvoorwaarden

3.5.1 Elektrolytische productie van H₂

Innovatieopgave: Flexibele inzet van elektrolyzers.

Innovatieopgave: Kostenreductie.

Innovatieopgave: Efficiency.

Innovatieopgave: Materialenintensiteit.

Ambitie: In 2030 AEL bewezen als commercieel haalbaar.

Ambitie: Demo's voor PEM/SOE.

Waterstof en elektrificatie zijn zeer nauw verbonden.

Waterstof biedt een flexibel mechanisme om wind- en zonne-energie in hoge mate gecontroleerd in te passen in het elektriciteitssysteem, en om energie van deze bronnen vast te leggen in de vorm van moleculen die in grote hoeveelheden kunnen worden opgeslagen, eenvoudig zijn te transporteren, en breed inzetbaar zijn, niet alleen energetisch als energiedrager, maar ook non-energetisch als baselement voor de (petro) chemische industrie.

Gezien het belang en het verbeterpotentieel in efficiency, robuustheid en kosten zal de productie van waterstof door water- elektrolyse voorlopig nog veel innovatie aandacht opeisen.

In het deelprogramma ligt de nadruk op kostenverlaging door schaalvergroting, de ontwikkeling van essentiële componenten om waterstofproductiviteit per kWh elektriciteit te verhogen, de vermindering van de behoefte aan schaarse grondstoffen in de productie van elektrolyzers en operationele robuustheid onder flexibele belasting. Binnen dit kader past ook onderzoek en ontwikkeling in opslag en naar dragers van waterstof om internationaal transport van waterstof te faciliteren.

Vanwege de systeemfunctie die waterstof kan vervullen in een duurzame energievoorziening is een belangrijke vraag op welke schaal productie van waterstof het beste kan plaatsvinden. Voor ontwikkeling van de technologie maakt het de uiteindelijke schaal niet veel uit, deze moet worden geoptimaliseerd tot installaties variërend in capaciteit van (tientallen) MW tot GW schaal. Dit onderwerp komt typisch aan de orde in MMIP 8 en 13. Dit deelprogramma wordt in nauwe samenhang ontwikkeld met het innovatieprogramma waterstof eveneens onder de Topsector Energie.

AEL en PEM doorontwikkeling

Er zijn verschillende min of meer gangbare varianten water-elektrolyse processen zoals alkalische elektrolyse (AEL), anion exchange membrane (AEM) elektrolyse, en proton exchange membrane (PEM) elektrolyse. Water-elektrolyse is voor grootschalige industriële en energetische toepassingen op de korte termijn nog te duur om direct te kunnen concurreren met waterstof geproduceerd op basis van aardgas. De kosten moeten dus omlaag. Optimalisatie en opschaling van zowel aantallen- (elektrolyzers zijn modulair opgebouwd) als van capaciteit van installaties leidt tot daling van investeringskosten en variabele kosten. Daarnaast wordt er gekeken naar ontwikkeling van essentiële componenten om waterstofproductiviteit per kWh elektriciteit te verhogen. Voorbeelden hiervan zijn onderzoek naar en ontwikkeling van componenten zoals membranen, katalysatoren en elektroden die bij voorkeur niet alleen veel beter zijn (efficiency, levensduur) maar ook goedkoper. Ook de assemblage van cellen en stacks kan – analoog aan computerchips en autofabricage – geautomatiseerd worden waardoor kosten gaan dalen.

Er zal vooraleerst, gezien de technische maturity, worden gefocused op realisatie van installaties op basis van bestaande AEL en PEM technologie bij diverse industriële processen (o.a. ammoniak, olie- /bioraffinage, methanolproductie) waarbij de schaal al geleidelijk toeneemt van megawatt, via enkele tientallen megawatt, naar >100 MW. Doel hiervan is in eerste instantie om ervaring op te doen en dynamisch- en duurbedrag van de technologie aan te tonen. Dit leidt tot een steeds beter inzicht in de techno-economische mogelijkheden voor optimalisatie van de technologie en de bedrijfsvoering van elektrolyzers in samenhang met de energievoorziening die in toenemende mate zal zijn gebaseerd op aanbod vanuit variabele bronnen. Daarnaast is het flexibel bedrijven van deze installaties een belangrijk onderzoeksgebied, niet alleen voor de elektrolyzers maar ook de randapparatuur zoals de waterstofcompressoren. Tenslotte is het borgen van veiligheid een belangrijk item in waterstofproductie op de schaal die voorzien wordt.

Voor grootschalige uitrol van elektrolyse zal ook de productie capaciteit van de toeleverende keten zich moeten ontwikkelen.

Ook nieuwe manufacturing capabilities op grote schaal zijn vereist bijvoorbeeld voor het zo efficiënt mogelijk omgaan met kritieke elektrode materialen, zoals nanotechnologische processen (atoomlaagdepositie). Hierbij kan geleerd worden van de halfgeleiderindustrie. In samenhang met de opschaling en ontwikkeling van verbeterde technologie wordt in een vroeg stadium dan ook beoogd aandacht te besteden aan de produceerbaarheid van componenten en systemen op industriële schaal met als doel om ook high-tech industrie op het gebied van elektrolyse en elektrochemie in Nederland te kunnen ontwikkelen. Nederland heeft een sterke Nederlandse hightech maaksector die gespecialiseerd is in ontwikkeling van efficiënte technologische productieketens.

Daarnaast is er in Nederland veel expertise op gebied van katalyse en elektrochemie en ruime industriële ervaring met grootschalige handling en operatie van waterstof. Er ligt een goede kans voor Nederland om een rol in de toekomstige technologieketen van water- elektrolyse te spelen zoals in de productie van membranen en samengestelde producten (membrane electrode assembly - MEA), de ontwikkeling van productielijnen voor deze componenten en producten en voor assemblage van stacks en systemen.

De van oudsher sterke engineering en EPC sector in Nederland biedt een goede basis voor professionalisering van het domein van ontwerp, opschaling en inpassing van elektrolyse systemen. Hierbij is er bij pilots en demo's aandacht voor optimale inpassing met maximale "verwaarding" van bijproducten van water-elektrolyse zoals warmte en zuurstof.

Solid Oxide Electrolysis

Naast PEM en AEL bestaat er een specifieke interessante elektrolyse techniek, met name vanwege het efficiëntere gebruik van elektriciteit: solid oxide electrolysis (SOE). Deze elektrolyzers werken op zeer hoge temperaturen, typisch tussen 700 °C en 900 °C en hebben een hogere elektrische efficiency naar waterstof. De innovatieopgave voor SOE is naast het bewijzen van de robuustheid op voldoende schaal, net als voor AEL en PEM het bereiken van kostendaling en ontwikkeling van technologie geschikt voor integratie met (hoge temperatuur) processen die H₂, syngas of CO als grondstof gebruiken. De belangrijkste innovatieonderwerpen zijn doorontwikkeling van celtechnologie, opschaling van productie met kosteneffectieve fabricage-technologie en supply chain ontwikkeling. Fundamenteel onderzoek en fieldlabs zullen de weg moeten banen naar de vereiste schaalgrootte met daarnaast aandacht voor demonstratie van integratie en robuuste flexibilisering van deze elektrochemische processen in het energiesysteem.

Nieuwe concepten/spin-offs

In het kielzog van water-elektrolyse ontwikkelen zich reeds alternatieven zoals fotokatalytische splitsing van water. Dit is een prille technologie die enigszins met zon-PV is te vergelijken,

maar waarbij het actief oppervlak zich in water bevindt. In plaats van elektriciteit wordt er bij inval van zonlicht op het oppervlak in dit geval echter direct waterstof geproduceerd.

Waterstofdragers en -opslag

Naast de productie van de waterstof past ook onderzoek en ontwikkeling naar opslag en dragers van waterstof zoals bijvoorbeeld ammoniak (die via conventionele of elektrochemische route kan worden geproduceerd). Wanneer direct lokaal gebruik of export van (overtollige) elektriciteit niet mogelijk is zal ter plekke e-opslag of conversie moeten plaatsvinden naar in eerste instantie waterstof. Deze waterstof zal lokaal worden ingezet als grondstof of voor stabilisering van de energielevering.

Wanneer er lokaal systematische overschotten mogelijk zijn biedt dit goede mogelijkheden voor verdere conversie naar duurzame grondstoffen en eindproducten. Deze situatie zal naar verwachting vooral optreden in specifieke regio's in de wereld en kan leiden tot nieuwe industrieclusters en globale productenstromen zoals vloeibare waterstof; ammoniak; methanol; DME; liquid organic hydrogen carrier (LOHC) en natriumboorhydride (NaBH₄). In de transitiefase kan de aan de basis liggende waterstof mogelijk ook een alternatieve koolstof-arme variant zijn, verkregen door CO₂-vrije decarbonisatie van aardgas (SMR/ATR met CCS, methaan pyrolyse) afkomstig uit landen die nog grote voorraden gas hebben. Dit kan helpen de CO₂ doelstellingen tijdig te halen. Bij het beschikbaar hebben van

voorraden van deze waterstofdragers in tankparken of andere opslag systemen zullen ze een duurzame bron van energie en grondstoffen vormen waar de industrie uit kan kiezen.

3.5.2 Randvoorwaarden

Innovatieopgave: Voldoende elektriciteit.

Ambitie: Ontwikkeling van realistische infrastructuurplannen samen met gebruikers, producenten en netbeheerders.

Innovatieopgave: Flexibele operaties industrie.

Innovatieopgave: opslagvormen voor waterstof

Innovatieopgave: Beloning waterstofgebruik.

Innovatieopgave: Ontwikkelen van wetten en

financiële prikkels.

Ambitie: Nieuwe stimulerende wetten en financiële prikkels klaar voor implementatie.

Innovatieopgave: Voldoende beloning voor levering van warmte aan anderen.

Innovatieopgave: Beloning voor CO₂-emissiereductie.

Van groot belang bij het welslagen van de introductie van een dominante rol voor waterstof en elektriciteit is de verwachting betreffende de beschikbaarheid van voldoende betaalbaar volume en infrastructuur. Daarnaast vereist het elektrificeren nieuwe (krachtstroom) skills voor ontwerp, bouw en operatie. Ook de supply chains van de benodigde grondstoffen, elektrolyzers, membranen etc zijn van groot belang om prijs en tijdigheid te beïnvloeden.

Tabel 10:

Item	Aandachtsgebied	Kenniscentrum	Budget voor:
AEL en PEM doorontwikkeling	LCC besef Levering van stabiliteit/ flexmanagement	Shell, Dow FME	Systeemconcepten Pilots
Solid Oxide Electrolysis	Flexibele operatie Hybride systemen Digitale ondersteuning	EnergyStorageNL FLIE TNO	Systeemontwerp Demo's
Nieuwe concepten/spin-offs	Interfaces	Siemens Netbeheerders Diverse adviseurs	(Publieke) systeem studies
Waterstofdragers en -opslag	Materialen e-Efficiency Selectiviteit Robuustheid	TU-e; TU-D	Bench/pilots
Niet- elektrochemische procesroutes	e-Efficiency Selectiviteit Robuustheid	Brightlands TNO	Low TRL
Inzet van klimaatneutrale brandstoffen	Flexibiliteit branders Brandstoftypes Hybride inzet NOx	Duiker combustion Brightlands	Demo

3.6 Doorsnijdende innovatieonderwerpen

3.6.1 Digitale productie- en ketenondersteuning

Innovatieopgave: Acceptatie en bekendheid vergroten.

Ambitie: In 2030 vele toepassingen van Digitale productie- (en flex) ondersteuning.

Innovatieopgave: Ontwikkeling van meet, regel en optimalisatiesoftware voor betrouwbare en rendabele warmtesystemen.

Ambitie: Onderdeel van laagtemperatuur warmteopwek (stoomsystemen) in 2030 grotendeels vanuit integratie, hergebruik en e-boilers.

Innovatieopgave: Modellen en regelsoftware ontwikkelen om geëlektrificeerde systemen betrouwbaar te opereren binnen de nieuwe dynamische energiesystemen.

Ambitie: In 2030 een aantal pilot smart-grids met industriële participatie.

Ambitie: Toepassingen van digitale productie- ondersteuning in flexibele geëlektrificeerde warmtesystemen.

Innovatieopgave: Inpassing van waterstofproductie in (dynamisch) elektriciteitsnet en andere infrastructuur.

Ambitie: In 2030 toepassing van digitale productie- (en flex-) ondersteuning in een commerciële elektrolyzer.

Digitalisering is al decennia een belangrijke driver voor innovatie in de industrie en is van groot belang voor vele innovatieopgaven. Vanuit research en engineering is er al vele jaren aandacht voor toepassing van digitale technologie in ontwikkeling, ontwerp, optimalisatie en operatie van industriële processen. Ging het hierbij in het verleden vooral om veiligheid, betrouwbaarheid en productkwaliteit, nu komt daar operationele (energie-)optimalisatie, flexibiliteit en integratie bij. Ook het gebrek aan staf dat veel bedrijven bemerken kan deels worden opgelost met inzet van digitale technieken. De opkomst van steeds grotere computationele capaciteit in de afgelopen jaren (met opkomst van cloud diensten, analytics, nieuwe sensor technologie en vele andere mogelijkheden) levert in toenemende mate de mogelijkheden voor impact van digitale technologie in het faciliteren van een flexibele en energie-efficiënte industrie.

Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om een groot aantal meetgegevens simultaan en real time te verkrijgen en te analyseren. Op grond hiervan kan men veel meer inzicht krijgen in hoe een proces verloopt en waar nodig het proces tijdig bij te sturen en te optimaliseren, bijvoorbeeld via geavanceerde process control. Dit leidt potentieel tot hogere conversies, afname van verstoringen, toename van beschikbaarheid, en mede daardoor een verbeterde (energie-)

efficiency. Daarnaast kunnen ook grotere systemen worden geoptimaliseerd door hier bijvoorbeeld Digital Twins voor op te zetten.

Met het beschikbaar komen van grootschalige duurzame energie worden er meer eisen gesteld aan flexibele operatie. Ook hiervoor is digitale proces ondersteuning onontbeerlijk. Er gaan vanwege het fluctuerende aanbod nieuwe energie markten ontstaan en de aansluiting van industriecomplexen op deze markten zullen voor een groot deel data-gestuurd gaan worden. De vraag is hoe de koppeling met en tussen verschillende energie markten een sturende rol kunnen gaan spelen in de operatie.

Flexibiliteit vereist niet alleen de juiste response op marktprikkels, maar tevens samenwerking over de gehele industriële keten met sterke onderlinge afhankelijkheden. Inzet van digitale (supplychain) technologie is hierbij essentieel. Ook moet gedacht worden aan het hoofd bieden aan moedwillige interventie (cyber attacks of hacking) via een goede architectuur.

Standaardisatie, markt inrichting en data-sharing zijn dus belangrijke ingrediënten bij het tot stand komen van deze nieuwe dynamiek en zullen helpen bij de nieuwe rol van de industrie in het borgen van een robuust flexibel energiesysteem. Dit onderdeel sluit nauw aan op MMIP 8. Digitalisering vereist zowel specialisten met kennis van industriële processen en operaties, als specialisten met state-of-the-art kennis op gebied van architectuur, cyber security, digitale technologie en applicatie kennis, data management en analytics. Beschikbaarheid van expertise op dit kruispunt van disciplines in process control en process systems engineering is een grote bottleneck die voor de slagkracht van vernieuwing van de industrie op dit gebied.

4. Nederlandse innovatie-activiteiten

Om tot een klimaatneutrale industrie met hergebruik van grondstoffen en producten te komen, is er veel te doen. Het vorige hoofdstuk beschreef de innovatie-opgaven rond de industriële energiehuishouding in detail. Dit hoofdstuk benoemt de belangrijkste activiteiten die nodig zijn om deze innovatie-opgaven verder te brengen. Het gaat daarbij om de activiteiten die op korte termijn, in de komende vier jaar, nodig zijn.

De samenhang tussen de deelprogramma's en subthema's is groot. Veel activiteiten bevorderen meerdere ervan. Deze zijn dan opgenomen onder elk subthema waarvoor ze relevant zijn.

4.1 Deelprogramma 1: Reduce energieverbruik

Subthema 1: Efficiency van processen.

- Ontwerp en demonstratie van systemen met inzet van reeds beschikbare "tools" zoals warmte-uitkoppeling met naar believen inzet van warmtepompen, geothermie, e-boilers en energie opslagvormen, procesintensificatie, membranen.

Subthema 2: Radicaal efficiëntere concepten en apparaten.

- *Revival* membraantechnologie: ontwikkeling van concepten voor geïntegreerde membraanscheiding met conventionele distillatie.
- Ontwikkeling van warmtepompen > 150 °C.
- Ontwikkeling van procestechnologie voor geïntegreerde reactie en scheiding.
- Onderzoek aan droog/ontwateringsconcepten.
- Onderzoek naar nieuwe routes voor papier.
- Ontwikkeling en implementatie van Innovatieve reactoren.

Subthema 3: Digitale productie- en ketenondersteuning.

- Demonstreren rol van digitale ondersteuning (o.a. Digital Twins) om energie verbruik blijvend minimaal te houden.

Subthema 4: Elektrificatie in het industriële energiesysteem (incl. nieuwe processen en technieken).

- Modelstudies om inpassing in elektrische infrastructuur transparant te krijgen.
- Pilots van elektrochemische conversie routes met voldoende marktpotentieel.
- Pilot- of demo schaal van apparaten.

Subthema 5: randvoorwaarden.

- Ontwikkeling van wetten en financiële prikkels ter bevordering van flexibiliteit.
- Piloting en demonstratie van industriële flex-readiness.

4.2 Deelprogramma 2: Re-use energie

Subthema 1: Systeemconcepten voor warmte en koude.

- Modelleren en ontwerp van robuuste systemen met naar believen warmtepompen, geothermie, e-boilers en energieopslagvormen.
- Demonstratie op industriële schaal.

Subthema 2: Digitale productie- en keten- ondersteuning.

- Ontwikkeling en demonstratie van robuuste modellen en besturingssoftware om (soms ingewikkelde) systemen te opereren.

Subthema 3: Elektrificatie in het industriële energiesysteem.

- Demonstreren rol van digitale ondersteuning (o.a. Digital Twins) om energieverbruik blijvend minimaal te houden.
- Starten en uitrollen programma met essentiële bewezen technologie.

Subthema 4: Randvoorwaarden.

- Inzet en verdere ontwikkeling van modellen om kwantificering, discussies en beslissingen te faciliteren.
- Ontwikkeling van wetten en financiële prikkels ter bevordering van flexibiliteit.

4.3 Deelprogramma 3: Replace energiedragers

Subthema 1: Elektrificatie in het industriële energiesysteem.

- Verbetering van electrolyse van water.
- Ontwikkeling van elektrische hogetemperatuurfornuizen.
- Ontwikkeling van warmtepompen > 150° C.

Subthema 2: Nieuwe elektrische processen en technieken.

- Ontwikkeling flexibele elektrochemische conversie routes met voldoende marktpotentieel.
- Onderzoek aan bieuwe droog/ontwateringsconcepten.
- Onderzoek naar nieuwe scheidingsconcepten.

Subthema 3: Inzet van klimaatneutrale brandstoffen.

- Branderontwikkeling.
- Verbetering van ovens, fornuizen, reactoren.

Subthema 4: Digitale productie- en ketenondersteuning.

- Opzetten pilots voor smart grids.
- Demonstratie flexibele lage temperatuur systemen.
- Demonstreren rol van digitale ondersteuning netwerk stabilisatie.

Subthema 5: Elektrolytische productie van H₂.

- Opzetten demonstratie en pilot om flexibele inzet te testen.

Subthema 6: Randvoorwaarden.

- Inzet en verdere ontwikkeling van modellen om de kwantificering, discussies en beslissingen te faciliteren.
- Ontwikkeling van wetten en financiële prikkels ter bevordering van flexibiliteit.

4.4 Deelprogramma 4: Produce: Elektrolytische productie van waterstof

Subthema 1: Elektrolytische productie van H₂.

- Schaalvergroting/demonstratie van elektrolyse
- Ontwikkelen van systeemintegratie (verwaarding restwarmte en zuurstof).
- Piloting en demonstratie van flexibele inzet/dynamiek.
- Verbeteren van de efficiency (PEM, SOE).
- Kostenverlaging door verbetering van de technologie.
- Verlengen van de levensduur.

Subthema 2: Systeemconcepten voor warmte en koude.

- Ontwerp en demonstratie van systemen met warmte-uitkoppeling en zuurstoflevering.

Subthema 3: Nieuwe elektrische processen en technieken.

- Onderzoek en ontwikkeling van waterstofdragers.
- Stimuleren van groene waterstof gebruik als grondstof voor CCU.

Subthema 4: Digitale productie- en ketenondersteuning.

- Demonstreren rol van digitale ondersteuning (o.a. Digital Twins) om elektrolyzers optimaal in te passen.

Subthema 5: Randvoorwaarden.

- Inzet en verdere ontwikkeling van modellen om de kwantificering, discussies en beslissingen te faciliteren.
- Ontwikkeling van wetten en financiële prikkels ter bevordering van flexibiliteit en waterstofgebruik.

5. Stakeholders/actoren

Onderstaande tabel geeft een eerste (onvolledige) beeld van het bekende systeem van actoren binnen het domein van MMIP 7. Er zijn veelal ook industriële partners (de toekomstige gebruikers) betrokken bij de ontwikkeling van technologie

en toepassing hiervan. Gezien het brede speelveld en de groeiende (internationale) ontwikkelingen en betrokkenheid is de ontwikkeling van de tabel een continu work-in-progress. De TKI Energie en Industrie zal deze regelmatig updaten.

Tabel 11:

Organisatie	Thema	Samenwerking met
Voltachem	Systeemintegratie power-2-X; Elektrolyse; Elektrochemie; Geïntegreerde thermokatalyse; plasmatechnologie	Groot consortium aan industriële partners uit procesindustrie, duurzame energiesector, EPC sector en apparatenbouw (incl. MKB); TNO, TU Delft/e-Refinery, Universiteit Maastricht.
Field Lab Industrial Electrification (FLIE)	Elektrificatie technologie en systemen (warmtepompen, warmteopslag, CO en CO2 chemie, elektrificatie, power to heat- H2P, P2C) groene moleculen en groene stroom en alle processen die qua elektrificatie onderdeel kunnen zijn.	TNO, FME, Deltalinqs; Havenbedrijf Rotterdam; Innovation Quarter; Gemeente Rotterdam; Provincie ZH; regionale procesindustrie en apparatenbouw
TU/e	Elektrochemie; Spinning disc reactoren; Metal fuels; Warmte-integratie	
TU/D	Hoge temperatuur warmte-opslag; Industriële warmtepompen; H2 verbranding; Systeem analyses (digital twins); Waterstof; Elektrochemische & thermochemische conversies (e-Refinery Institute); Innovatieve distillatie;	Voltachem, Thomassen, OPRA, Vattenfal, JM, HyET, Shell, Tata, and many others
UT	Warmte opslag; Warmtepompen; Restwarmte terugwinning; Proces intensificatie; Elektrochemie	
TNO Energy and Materials Transition	Industriële transformatie, CCUS, industrial heat, industrial infrastructure, clean hydrogen production, synthetic fuels & chemicals, biobased fuels & chemicals, solar fuels & chemicals; Digital twins; Molten metal pyrolysis; Warmtepompen; Drogen; Ontwateren;	Oil & gas industry, process industry, infrastructure providers, EPC, equipment supply, national and regional governments, RTO's (Fraunhofer, SINTEF, VTT, Tecnalia, VITO, DECHEMA), universities (TUD, TU/e, UT, WUR, UvA, University Groningen, University Maastricht), FLIE, Hydrohub, VoltaChem, North Sea Energy, ISPT, FME, VNCI, Brightsite
ISPT	Warmte-integratie; Waterstof: Ammoniak; Slim drogen (incl. steam drying); Hoge temperatuur warmtepompen (incl. stoomrecompressie); Warmteopslag; Ontwateren; Elektrificatie; Flexibilisering	Ammonia Platform (a.o. Ammoniak combustion (Duiker); NH3 cracking (Linde); NH3 fuel cell; NH3 opslag Warmte Integratie platform The Heat Is On (THIO) - consortium Platform Efficiënte Flexibele Elektrificatie; HydroHub; Megawatt testcentre
Brightsite	Plasmachemie; Shockwave chemie; Microwaves/radiofrequentie; Ammoniak(zouten); waterstof uit vergassing; lignofuels; lithium recycling	TNO; Universiteit Maastricht; DIFFER; Chemelot; Plasma: Nitrocapt & Transform; Shockwave: Coolbrook; Sypox: directe elektrische verwarming
Groenvermogen	Waterstof productie; opslag; transport	o.a. TNO; FUJIFILM, Hydron, VDL, Nedstack, Hygear, MAGNETO, Ampleon, Siemens; Sunfire; SkyNRG; HYGRO;...
Yokogawa	Dynamic Systems modelling;	Havenbedrijf Rotterdam
Stork / Heatcube / OEMs	Warmteopslag, batterijen	Field Lab Industriële Elektrificatie
Siemens/MAN/ AtlasCopco/Ochsner/ OEMs	Industriële warmtepompen	Field Lab Industriële Elektrificatie; ook onderzoek buiten NL

FME	Opslag; Aandrijvingen; Restwarmte; energieopslag;	6-25 project
Energy Storage NL (ESNL)	Warmte opslag ; Energie opslag; Moleculen opslag	FME platform (branche organisatie) voor alle stakeholders in storage (bedrijven, netbeheerders, kennisinstellingen en financiers)
Elektrolyzer Makers Platform (EMP)	Waterstofelektrolyse	FME/TNO platform voor leveranciers en keten partners van Elektrolyzers en sub systemen voor elektrolyzers.
HS Rotterdam	Warmtepompen-systemen; Warmteopslag; Waterstofverbranding; Power&Energy management systems; Batterijtechnologie; Slim drogen (super heated steam drying)	Hogeschool Utrecht, Hogeschool Rotterdam, TUD, TU/e, ISPT; Uniper; BP; BatteryNL; TCR; Deltalinqs; Katapult; STC voor Regionale Liaison en roadmap (GroenvermogenNL); Hanzehogeschool; Hogeschool Zeeland; Hogeschool van Amsterdam; Zuyd Hogeschool; Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (voor Learning Communities en Nationaal Kennisplatform (GroenvermogenNL))
Hogeschool Zuyd	Procesintensificatie; Flow chemie	Hogeschool Utrecht; Hogeschool Rotterdam; TU/e; Brightlands; universiteit Maastricht; diverse MKBs
Hanze Hogeschool	Digitalisering warmtesystemen	
DIFFER	- plasma chemie (pyrolyse van methaan en productie van grondstoffen); - electrochemie; en - membraanreactoren; - innovatieve chemische conversie processen	Brightsite/Sitech; UM en TU/e; diverse industrie partners o.a. BASF, Stamicarbon, Shell, Tata, Toyota,
DNV	Waterstof ;Ammoniak; Methanol;Aardgas; biogas; LNG; Brandstofcellen; Electrolyzers; Industriële branders; Gasmotoren; Flowmeters; Multiphase flowmeters; Gasanalyse; Waterstofanalyse (zuiverheidsmetingen); Gassamenstellingsmetingen; Kalibratie gassen; Rookgas/emissie metingen	Rijksuniversiteit Groningen; Consortia met industriële partners; Branderfabrikanten zoals Stork Thermeq; Branderstofleveranciers (bijv. Shell) Gasmotor fabrikanten (bijv. Wärtsilä, Fiat Power train); Flowmeter fabrikanten; TSO/DSO; Analyse apparatuur fabrikanten

6. Omgevingsanalyse en -factoren

De oriëntatie van de deelprogramma's is grotendeels technisch, waarbij de economische kant eveneens van groot belang is, aangezien verdere kostenreductie een belangrijk doel blijft.

Daarnaast is er een groeiend besef en behoefte om innovaties te bezien en te implementeren als onderdeel van een keten en is er groeiende behoefte en noodzaak om op keten-niveau innovaties op te zetten die ondersteuning geven aan logistieke uitdagingen of het ecosysteem ondersteunen. Deze kunnen o.a. te maken hebben met regelgeving of beschikbaarheid van data.

Ook zijn socio-economische invloeden van groot belang voor het welslagen van innovaties. Deze zijn uitgebreid beschreven in deelprogramma randvoorwaarden. Zo kan sociale innovatie een belangrijke rol spelen bij het toepassen van efficiency maatregelen, en zijn voor industriële flexibiliteit nieuw gedrag en vaardigheden binnen de industrie nodig.

Vanwege het toenemende belang wordt in onderstaande paragraaf Digitalisering als doorsnijdend thema specifiek beschreven. Daarnaast wordt per deelprogramma beschreven wat het belang is van de industriële omvang, belang en innovatiepotentie.

6.1 Digitalisering

Algemeen

Digitalisering en het gebruik van *big data* zijn doorsnijdende thema's voor veel innovatieprogramma's, ook voor MMIP 7. Hieronder eerste een algemene beschrijving wat wordt verstaan onder digitalisatie en wat de trends en wordt verder ingegaan op specifiek voor MMIP 7 relevante digitalisatie stappen.

Digitale transformatie is geen one-size-fits-all aanpak. Spelers in de industrie hebben unieke infrastructuren, bedrijfsmodellen, organisatiestructuur en vaardigheden van hun personeel. Hun gereedheid voor digitale transformatie varieert sterk, wat ook impliceert dat ze een op maat gemaakte digitale transformatiestrategieën en roadmaps nodig hebben. Bereidheid voor digitale transformatie vereist niet alleen de bereidheid van de belangrijkste belanghebbenden om de nodige toezeggingen te doen of de juiste technologieën te hebben, het vereist ook inzicht in de bestaande organisatie, mensen en behoeften van de supply chain en klanten. Zonder deze fundamentele aspecten te begrijpen, is digitale transformatie fragiel. Om digitale transformatie te laten slagen moeten bedrijven hun huidige technologie, processen en infrastructuur, menselijk kapitaal, organisatiestructuur onderling afwegen. Daarmee kunnen prioriteiten worden gesteld aan investeringen en initiatieven en kan worden bregrepen waar de huidige sterke en zwakke punten binnen de organisatie liggen. In een workshop met industriële eindgebruikers is verkend welke innovatiebehoeften en vereisten er bestaan voor digitale

technologie moet hebben, om met succes ingezet te worden voor een net zero industrie te.

Algemene trends op het gebied van digitalisering:

- Toegenomen connectiviteit van assets
- Nieuwe mogelijkheden van tracing van producten
- Initiatieven met datasafehouses
- Initiatieven met product paspoorten en product vingerafdrukken
- Groeiend volume en variëteit van data maar achterblijvende standaarden
- Meer smart assets
- Decentralisering van computing (edge computing)
- Toegenomen focus op cybersecurity
- Snelle digitale technologie ontwikkeling van met name van AI
- Nieuwe (Europese) wetgeving over dataopslag en ethische AI.

De volgende informatie komt uit de Handreiking slimme energiesystemen van de Topsector Energie, met daarin opgenomen e-hub filosofie. De focus van de bedrijven ligt vooral op de eigen bedrijfsvoering. Door netcongestie ontstaat in veel gebieden de urgentie om met slimme energiesystemen aan de slag te gaan. Simpelweg omdat dit de voortgang en betrouwbaarheid van de eigen bedrijfsvoering in de weg kan zitten. Door congestie kunnen sommige partijen (zowel afnemers als producenten) namelijk niet de gewenste aansluiting krijgen. Daarnaast heeft de industrie de behoefte om te kunnen reageren in de verscheidenheid in de energiemix, zowel in volume als in tijd (adaptiviteit). Dat kan gaan om een nieuwe aansluiting, of een verzwaarde aansluiting wanneer een bedrijf bijvoorbeeld wil elektrificeren (denk aan laadinfrastructuur).

Tabel 12: De volgende behoefte aan data en toepassing van IT technologie is geïdentificeerd

Databehoefte	IT Technologie	Ondersteunende technologische ontwikkelingen
<ul style="list-style-type: none"> Energie verbruik op asset, site en keten level Emissie data Carbon pricing en ETS data Process data Asset health data Duurzaamheidsdata over product, productieproces en lifechain (LCA) Data tbv van ESG. Financiële data Juridische data Logistieke en OT-planningsdata Product flow informatie 	<ul style="list-style-type: none"> Cyber physical systems Data-driven decision systems Robotisering AI en machine learning Blockchain Advanced process control, o.a. om variabele energielevering te beheersen. Process control van elektrische processen Smart maintenance AR voor onderhoud Digital twins Connectivity Communication protocols Big Data Balans tussen data- en model-gedreven engineering 	<ul style="list-style-type: none"> Overall Equipment Efficiency proces methodieken Acceptatie van algoritmes en Human-Centered Design. Responsibility en transparantie van algoritmes. Focus op digital literacy en digital skills.

Daarbij pleiten we net als de Europese unie voor een community rond cyber security met de volgende prioriteiten en activiteiten:

- **Cyberweerbaarheid opbouwen:** cyberweerbaarheid verbeteren door toekomstgerichte oplossingen te ontwikkelen en op te schalen en effectieve praktijken in digitale ecosystemen te bevorderen.
- **Versterking van de mondiale samenwerking:** meer mondiale samenwerking tussen publieke en private belanghebbenden door een collectieve reactie op cybercriminaliteit te bevorderen en gezamenlijk de belangrijkste veiligheidsuitdagingen aan te pakken.
- **Inzicht in toekomstige netwerken en technologie:** het identificeren van toekomstige cyberbeveiligingsuitdagingen en -kansen met betrekking tot Industrie 4.0-technologieën en het bevorderen van betrouwbare en ethische technologische oplossingen.

6.2 Human Capital Agenda (HCA)

Het is de totale constellatie van organisaties/actoren en de instituties die het verloop van innovatieprocessen bepalen. Daarbij zijn interacties allesbepalend en leren gebeurt bij uitstek door interactie. Deze structuur bevat 7 sleutelprocessen:

- Experimenteren door ondernemers
- Kennisontwikkeling
- Kennisuitwisseling
- Richting geven aan het zoekproces
- Markt formatie
- Mobiliseren van middelen
- Tegengaan van weerstand

Ten behoeve van kennisdiffusie is het van belang dat er een goede connectie is tussen de plekken waar kennis wordt ontwikkeld (kennisinstituten, innovatieprojecten) en waar kennis gebruikt moet gaan worden. Innovatie moet dus gekoppeld worden aan PPS-netwerken waar werken leren en innoveren samenkomen. Dergelijke netwerken/ sociale systemen bestaan in velerlei vormen, met een eigen focus, aanleiding, samenstelling en eigenschappen en verschillende benamingen. Afhankelijk van of de nadruk ligt op leren, innoveren of werken, is de vorm, samenstelling en (gekozen) naam van het sociale systeem anders (zoals bijvoorbeeld Leernetwerk, Living Lab, of Innovatie Community. Omdat dergelijke initiatieven in de context van de beroepspraktijk zijn georganiseerd, kunnen ze bijdragen aan anders werken, innoveren en/of (gezamenlijk) leren, wat ook wel de “WIL-driehoek” wordt genoemd. Het draait in een dergelijk sociaal (leer)systeem niet alleen om kennisdeling, maar ook om kennisproductie en -toepassing (zie ook: Landelijk Position paper Learning Communities 2022)

Voor MMIP 7 zijn dit bij uitstek de learning communities die zich richten op energie huishouding en de implementatie van nieuwe oplossingen binnen de industrie, een vrij compleet overzicht kan gevonden worden op de site van Katapult. Voorbeelden zijn COVE Seed (HU: Sustainable Energy Education), GAS 2.0 (Community of practice drie noordelijke provincies), Cleantech Center (Oost Nederland), FLIE: fieldlab industriële elektrificatie, SEECE (Sustainable Electrical Energy Centre of Expertise (SEECE) van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN). Daarnaast zijn netwerken als lectoren platforms, de fieldlabs van smart industry, en de labs verbonden aan energie gerichte opleidingen van belang:

Skills behoefte

Bepaling van een skills framework voor professionals kan kennisinstituten en aanbieders van trainingen en leeractiviteiten faciliteren bij het opzetten en reviewen van hun aanbod en curricula. De benodigde skills volgen een T-shape. Waarbij een professioneel diepgaande expertise op een specialistisch gebied combineert met algemene kennis en vaardigheden over diverse disciplines.: de horizontale lijn. Digitale skills, en energie skills moeten naast sociale en human skills worden opgenomen in de horizontale lijn als basis skills. Er zijn vanuit Europa al frameworks beschikbaar¹ zodat een framework passend bij deze MMIP versneld gemaakt kan worden.

Zowel bij het onderzoek naar nieuw technologie als bij de uitrol van de technologieën in de industrie hebben we te maken met de tekorten op de arbeidsmarkt zoals die bestaan voor de hele technische sector. Tekorten aan arbeidskrachten worden door steeds meer ondernemers gezien als voornaamste belemmering bij de bedrijfsvoering.

6.3 Omgevingsanalyse en -factoren reduce (energie efficiëntie)

De Nederlandse procesindustrie is lang over de hele linie koploper geweest in energie efficiëntie. Met een laag aantal investeringen de afgelopen 10 jaar, brokkelt die positie af. De kennis over efficiëntie van bestaande processen is van oudsher groot, en de kennisuitwisseling tussen bedrijven, kennisinstellingen en netwerkorganisaties is nog steeds sterk.

Investeringen in nieuwe procestechnologie zullen vaak op het vlak van elektrificatie liggen. Voorbeelden hiervan zijn aandrijvingen, nieuwe elektrisch gedreven reactoren en elektrochemie. In Nederland is een actieve subsector van apparaat- en componentleveranciers. Een aantal bedrijven heeft zich op het gebied van efficiëntie verzameld in het 6-25 initiatief, onder leiding van FME. Er liggen dus kansen om op dit vlak een goede positie te behouden.

6.4 Omgevingsanalyse en -factoren re-use van energie

Eindgebruikers in de industrie voelen een groeiende noodzaak om (met name) warmte hergebruik te verbeteren. Daarvoor zijn meestal voldoende technologie-opties voorhanden, maar ontbreken de concepten voor integratie of de ervaring daarmee. Diverse consultants en kennisinstellingen hebben ervaring met energie-analyses en het ontwerpen van warmte-integratie concepten. De uitdaging ligt in het verspreiden van de kennis, en het organiseren van het proces rond deze kennis. Partijen weten elkaar niet altijd te vinden, successen worden lang niet altijd breed gedeeld, en binnen individuele bedrijven is meestal niet de capaciteit aanwezig om kennis naar binnen te halen. Er ligt

daarom een belangrijke rol om relevante partijen te verbinden en de industrie te helpen deze verandering door te maken.

ISPT heeft al een aantal jaar een warmteplatform voor kennisuitwisseling. TKI Energie en Industrie heeft de ambitie om daar een rol van procesregisseur aan toe te voegen, zodat bedrijven tot actie over kunnen gaan.

6.5 Omgevingsanalyse en -factoren replace (elektrificatie)

De routekaart elektrificatie in de industrie (2021) heeft de grote potentie van elektrificatie in de industrie laten zien. Energiebedrijven, netbeheerders en industrie in Nederland zien het belang van elektrificatie, en willen vol inzetten op deze route. Naast technische innovaties, zien we vooral behoefte aan randvoorwaarden voor de industrie die elektrificatie mogelijk maken (zie ook 4.2). De werkgroep power-to-industry bewaakt de voortgang van de routekaart en probeert elektrificatie te versnellen door barrières weg te nemen.

Van belang is dat het beleid vanuit de rijksoverheid de voorwaarden creëert waarbinnen investeringen in elektrificatie kunnen plaatsvinden. De maatwerkafspraken en het Nationaal Programma Energiesysteem zijn hier belangrijke bouwstenen in.

6.6 Omgevingsanalyse en -factoren produce (waterstof)

Het Nederlandse ecosysteem voor waterstof is de afgelopen jaren explosief gegroeid. Aan de kant van technologie-aanbod zijn diverse spelers actief, en nieuwe spelers treden toe tot het netwerk. Ook aan de kant van toepassing, transport en opslag, en import van waterstof groeien de activiteiten. In MMIP 7 ligt onze focus op de grootschalige productie en industriële toepassing van waterstof. Voor een meer gedetailleerde beschrijving verwijzen we naar het innovatieprogramma waterstof, dat ook in 2022/'23 is herijkt.

7. Communicatie, leren en disseminatie

Aandacht voor communicatie, leren en disseminatie is essentieel voor dit MMIP, omdat tegelijk bestaande processen worden verduurzaamd, nieuwe technologie-opties worden ontwikkeld, en het onderwijs wordt aangepast met nieuwe kennis. Per deelprogramma is hier beschreven hoe dit uitpakt. Generiek zien we een aanpak waarbij één of meerdere platforms deze rol invullen.

Reduce

De ontwikkeling van efficiënte procestechnologie is al ruim 10 jaar het terrein van Institute for Sustainable Process Technology (ISPT). Samen met bedrijven en kennisinstellingen wordt hier gewerkt aan innovaties, en kennis uitgewisseld. ISPT vervult hiermee een belangrijke rol voor kennisdeling over nieuwe innovaties.

Project 6-25 onder FME heeft een groot aantal technologieën voor efficiënte procesvoering in de etalage gezet. Samen met VEMW wordt gewerkt aan kennisdeling over kansrijke technologie, en het delen van successen.

Re-use

Warmtetechnologie-opties, zoals warmtepompen, -opslag zijn beschikbaar, maar implementatie blijft achter. Om die reden heeft ISPT een warmteplatform opgericht, voor eindgebruikers, technologieleveranciers en consultants. Dit platform heeft tot doel om successen te delen, en industrie-cases uit te werken. Vanuit het platform is ook de behoefte ontstaan om de implementatie meer te faciliteren, door een actieplan warmte-integratie op te starten. Dit actieplan wordt op dit moment uitgewerkt, en er wordt met alle stakeholders gezocht naar de beste vorm.

Replace

Voor elektrificatie en vraag-aanbod koppeling is de laatste twee jaar veel meer aandacht ontstaan, mede ingegeven door de toegenomen druk op de elektriciteitssector. Als vervolg op het klimaatakkoord bestond er nog de cross-sectorale werkgroep power-to-industry (P2I). Vanuit die werkgroep is de Routekaart elektrificatie in de industrie ontstaan, die in 2021 is gepubliceerd. De werkgroep is een belangrijk platform voor kennisdeling en gezamenlijk leren tussen de elektriciteitssector en de industrie. Ook spelen brancheverenigingen zoals, NVDE, FME, Energie-Nederland, Netbeheer Nederland een rol hierbij. FME is onlangs een rondgang gestart voor een kansenkaart elektrificatie.

Als vervolg op de routekaart elektrificatie heeft TKI Energie en Industrie het vraagstuk van industriële flexibiliteit verder uitgediept, samen met industrie-eindgebruikers. Op basis van deze inzichten wordt gewerkt aan een voorstel voor het nationaal groeifonds (REFLEX), waarin kennisdeling en innovatie bij elkaar moeten komen.

Produce

Op het gebied van waterstof is het nationaal groeifonds programma GroenvermogenNL opgestart. Dit programma is een belangrijke spil in het ecosysteem voor innovatie en leren. ISPT heeft een aantal jaar grote projecten ontwikkeld op het gebied van waterstof innovaties, o.a. op het gebied van test-faciliteiten (MW-test center), full-scale ontwerp (GW-scale conceptual design), en veiligheid. Deze ervaring wordt ingebracht bij GroenvermogenNL, en er wordt op verder gebouwd.

8. Appendix A Financiering, instrumentering en randvoorwaarden in beleid

Nationaal Groeifonds programma's

Deelprogramma's reduce en reuse zijn bij uitstek geschikt voor implementatie en opschaling via herhaalde toepassing van vergelijkbare apparaten in een steeds meer gestandaardiseerde integratie. Juist op die integratiestap is nog werk te verzetten. Daarvoor voorzien we een versnellingsprogramma, dat wellicht in het nationaal groeifonds een plek kan krijgen.

Deelprogramma replace op het gebied van (directe) elektrificatie heeft in ronde 1-3 nog geen aandacht gekregen in het nationaal groeifonds. Voor ronde 4 is een voorstel in voorbereiding dat grootschalige vraag- aanbodkoppeling van offshore wind en industrieel elektriciteitsverbruik moet gaan afdekken (REFLEX). Dit voorstel zal innovaties op het gebied van flexibiliteit aanjagen.

Programma's in het Nationaal Groeifonds hebben een lange aanlooptijd, ook na toekenning. Tijdens de komende looptijd van dit MMIP is daarom behoefte aan grote projecten in de subsidieregelingen, mede als aanloop naar grotere programma's in het Nationaal Groeifonds.

Deelprogramma produce voor waterstof is in het nationaal groeifonds opgepakt door GroenvermogenNL I en II. Dit programma omvat met name elektrolyserontwikkeling en -opschaling, en is grotendeels gericht op toepassing in de industrie. Subsidies onder MMIP 7 zullen daarom alleen additioneel aan GroenvermogenNL worden uitgezet.

Subsidieregelingen

Nieuwe technologie-concepten of -opties op laboratoriumschaal kunnen een plek vinden in de NWO (KIC en NWA) calls, in de TSE-regeling (TSE-industrie, MOOI) en in de PPS-toeslag. Voor deelprogramma circulariteit van plastics zal dit met name gaan om nieuwe conversietechnologie en sorteer- en scheidingsmethodieken. Voor biograndstoffen leggen we ook de nadruk op conversietechnologie en scheidingstechnologie. Voor CCU zien we veel aandacht voor (elektro)katalyse.

De DEI+ en VEKI regeling bieden ruime mogelijkheden voor demonstratieprojecten op het gebied van procesinnovaties, warmte-integratie, elektrificatie en waterstof. Onze verwachting is dat het volume van pilot- en demonstratieprojecten voor deze deelprogramma's de komende 4 jaar verder kan toenemen.

De subsidies voor uitrol (HER+ en SDE++) zijn geschikt voor de innovaties op elektrificatie en waterstof. Met de komst van schotten of hekjes in de SDE++ kunnen ook de minder

goedkope elektrificatieopties in beeld komen. Juist deze technieken zijn noodzakelijk voor verre gaande elektrificatie na 2030.

Randvoorwaarden

Belangrijke randvoorwaarden voor het verduurzamen van de industrie zijn CO₂-beprijzing en stabiel beleid dat perspectief biedt voor investeringen in duurzame processen. De CO₂-beprijzing is Europees geregeld via ETS en nationaal via een CO₂-heffing. De voorgenomen CBAM geeft Europese bedrijven zekerheid ten opzichte van fabrieken in andere werelddelen. De CO₂-prijs is een reële drijfveer geworden voor scope 1 emissiereductie.

In het coalitieakkoord is afgesproken om maatwerkafspraken te maken met de bestaande grote uitstoters van CO₂. Dit komt stap voor stap tot stand en lijkt een zinvolle manier om grote bedrijven de zekerheid te bieden die nodig is voor diepe investeringen naar een klimaatneutrale toekomst. Daarnaast kan het zinvol zijn om vergelijkbare afspraken te maken met bedrijven die opkomende ketens en producten leveren, en daarmee onderdeel kunnen worden van de duurzame industriële toekomst. Deze bedrijven dragen niet bij aan de huidige uitstoot, en zijn daarmee geen onderdeel van het probleem. Ze kunnen echter wel een belangrijk onderdeel van de toekomstige industrie zijn. Over de hele linie van innovaties onder MMIP 7 kan dit relevant zijn. We verwachten met name invloed op het tempo van innovaties die grote impact hebben op de procesvoering, zoals in de deelprogramma's replace (elektrificatie) en produce (waterstof) beschreven zijn.

We voorzien een belangrijke rol voor roadmaps en beleidsnotities, om een richting te schetsen in een systeem met vele opties en routes. Elektrificatie en waterstof zijn intrinsiek veranderingen van complete waardeketens. Daarbij zijn de risico's voor individuele bedrijven groot, en daarom is stabiel en helder beleid essentieel. We hechten daarom belang aan het nationaal plan energiesysteem en de rol van de industrie daarin. En we zien meerwaarde in een beleidsmatige vertaling van de routekaart elektrificatie, die tussenstappen definieert onderweg naar een verregaand geëlektrificeerde industrie.

