

Elektrificatie-opties in de SDE++

Inventarisatie van elektrificatie-opties die mogelijk interessant zijn voor inpassing in de SDE++

In opdracht van:



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat

Submitted by:

Navigant Netherlands B.V. – A Guidehouse company
Stadsplateau 15
3521 AZ Utrecht

navigant.com

Reference No.: 209218
8 november 2019

INHOUD

1. Overzicht van elektrificatie-opties	1
2. Uitwerking geselecteerde elektrificatie-opties.....	5
2.1 Elektrische glasovens	5
2.2 Elektrische krakers	7
2.3 Elektrische aandrijvingen	9
2.4 Aangepaste scores selectiecriteria	11
3. Conclusies en aanbevelingen	13
Appendix A. Toelichting op Technologieën.....	A-1
A.1 Power to heat technologieën	A-1
A.1.1 Elektrische glasoven.....	A-1
A.1.2 Elektrische kraker	A-3
A.2 Power for mechanical drives.....	A-5
A.2.1 Elektrische aandrijvingen.....	A-5
A.3 Power to chemicals.....	A-6
A.3.1 Elektrochemische productie van mierenzuur	A-6
A.3.2 Elektrochemische productie van ammonia.....	A-7

DISCLAIMER

Dit rapport is opgesteld door Navigant Netherlands B.V. (Navigant) voor het Nederlandse ministerie van Economische Zaken. Het werk (De werkzaamheden) in dit rapport vertegenwoordig(t)/(en) het professionele oordeel van Navigant op basis van de informatie die beschikbaar was op het moment dat dit rapport werd opgesteld. Navigant is niet verantwoordelijk voor het gebruik van, of het vertrouwen in, het rapport door de lezer, noch voor beslissingen op basis van het rapport. NAVIGANT GEEFT GEEN VERKLARINGEN OF GARANTIES, UITDRUKKELIJK OF IMPLICIET. Lezers van het rapport wordt erop gewezen dat zij alle aansprakelijkheden op zich nemen als gevolg van hun vertrouwen in het rapport, of de gegevens, informatie, bevindingen en meningen in het rapport.

1. OVERZICHT VAN ELEKTRIFICATIE-OPTIES

Elektrificatie is één van de routes naar CO₂-reductie in de industrie. Hierin worden installaties die gebruik maken van gas, stoom en/of warmte vervangen door elektrisch aangedreven technologieën.

De vraag van EZK is: *welke elektrificatie-opties kunnen vanaf 2021 worden opgenomen in de SDE++?* Voor het beantwoorden van deze vraag wordt eerst een overzicht gecreëerd van de mogelijke elektrificatie-opties. Deze lijst wordt door middel van filters teruggebracht naar de meest relevante toepassingen binnen Nederland en binnen de SDE++ (zie onderstaande tekstbox voor uitgangspunten SDE++).

Voor verschillende industriële toepassingen worden elektrificatie-opties onderzocht en ontwikkeld. Vaak worden deze opties aangeduid met de term “power-to-x”. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende categorieën en technologie-opties op basis van verschillende studies:

Tabel 1: Overzicht van elektrificatie-opties

Hoofdcategorieën	Technologie-opties
Power to Heat	Warmtepompen, elektrische boilers, elektrische glasovens, elektrische krakers en elektrische droogtechnologie
Power for Mechanical Drive	Elektrische aandrijvingen zoals compressie, pompen en ventilatoren
Power to Chemicals en Power to Gas	Productie van bijvoorbeeld waterstof, methaan, mierenzuur, ammonia, etheen, methanol
Power for Separation	Ultrafiltratie, nanofiltratie, omgekeerde osmose

Deze lijst is samengesteld op basis van Navigant (2019a): Verkenning uitbreiding SDE+ met industriële opties, Navigant (2019b): Quick scan Alternatieve verwarmingstechnieken, ECN (2018), A first order roadmap for Electrification of the Dutch Industry, Beerenschot (2017): Electrification in the Dutch process industry, RVO (2014), Brochure Efficiënte Elektrische Aandrijvingen

Een aantal van de bovengenoemde opties zijn voor deze studie **buiten beschouwing** gelaten:

- *Warmtepompen, elektrische boilers en groene waterstof* worden op dit moment door PBL onderzocht op mogelijke inpassing in de SDE++ per 2020. Deze zijn daarom niet meegenomen in de selectie.
- Daarnaast zijn de *power for separation opties en droogtechnologie* buiten beschouwing gelaten. Hoewel wij voor individuele technologieën mogelijkheden zien voor stimulering met de SDE++ is in een eerdere studie (Navigant, 2019a) geconcludeerd dat deze technologieën moeilijk inpasbaar zijn in de SDE++¹. Voor een aantal van deze opties laat EZK momenteel onderzoeken hoe ze ondersteund kunnen worden.

Uitgangspunten SDE++²

Om in aanmerking te komen voor SDE++-subsidie moeten technologieën voldoen aan een aantal uitgangspunten die voor de SDE++ zijn opgesteld:

- Verminderen van uitstoot van broeikasgassen naar of het verwijderen van broeikasgas uit de atmosfeer;
- Er moet sprake zijn van potentieel dat nu benut kan worden;
- Er moet sprake zijn van een onrendabele top;
- Normering moet stuiten op grote uitvoeringsbezwaren en/of onaanvaardbare weglek van productie die gepaard gaat met CO₂-uitstoot naar het buitenland;
- Uit doelmatigheidsoogpunt moet er sprake zijn van toepassing op aanzienlijke schaal;
- De technologie moet voldoende (uit)ontwikkeld zijn om te kunnen concurreren met marktrijpe technologieën.

¹ Voor scheidingstechnieken kan geen uniforme producteenheid worden geformuleerd waardoor het vaststellen van een basisbedrag en de bijbehorende marktindices niet mogelijk is.

² Brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat aan de Staten Generaal (31239 nr. 293), dd. 23 november 2018

Na het afvallen van deze technologieën blijven de volgende opties over:

- Power to Heat: Elektrische glasoven en elektrische krakers
- Power for Mechanical Drive: Elektrische aandrijvingen (compressie, pompen en ventilatoren)
- Power to Chemicals en Power to Gas: Elektrochemische productie (methaan, mierenzuur, ammonia (directe route), etheen en methanol)

Op basis van databeschikbaarheid is een eerste representatieve selectie gemaakt van technologieën. Deze opties zijn hierboven onderstreept. De technologieën die we nu niet meenemen kunnen op een later moment worden onderzocht voor mogelijke inpassing binnen de SDE++.

Drie technologieën zijn vervolgens geselecteerd en verder uitgewerkt. Hierbij lag de focus op het ontwikkeltraject en identificatie van uitdagingen, kansen en mogelijke knelpunten voor inpassing in de SDE++. Voor het maken van deze selectie zijn de volgende selectiecriteria gebruikt:

Tabel 2: Selectiecriteria

criterium	Beschrijving
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	Eerste schatting van het totale jaarlijkse CO ₂ -reductiepotentieel in Nederland (>1 Mt CO ₂ , >0,1Mt CO ₂ , <0,1 Mt CO ₂). Het reductiepotentieel is gebaseerd op de CO ₂ -uitstoot van de huidige technologie minus de uitstoot van CO ₂ op basis van elektriciteitsgebruik. Hiervoor worden zowel de elektriciteitsmix van 2030 gebruikt (zie tekstbox “Emissiefactor SDE++” hieronder) als 100% duurzame elektriciteit gebruikt.
Marktrijpheid van de technologie	Inschatting van de huidige marktrijpheid van de technologie. Bij inpassing in de SDE++ moet de technologie commercieel verkrijgbaar zijn (TRL 8-9)
Kosteneffectiviteit van de technologie	Inschatting op basis van de verwachte onrendabele top (ORT) van de technologie, waarbij een hoge onrendabele top in een lage kosteneffectiviteit resulteert: lage kosteneffectiviteit (ORT >350 €/ton CO ₂ , vergelijkbaar met waterkracht), gemiddeld (ORT 150-350 €/ton CO ₂) en hoog (ORT <150 €/ton CO ₂)
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	Voor de technologie-opties wordt nagegaan in hoeverre inpassing in de SDE++ mogelijk is. Dat gebeurt voor de selectie op basis van de bevindingen van onze verkennende studie (Navigant, 2019a). De gegeven score is daarom niet doorslaggevend, tenzij nu al duidelijk kan worden aangegeven dat inpassing in de SDE++ niet mogelijk is. Voor de geselecteerde technologieën worden de knelpunten verder in kaart gebracht.

Emissiefactor SDE++

Binnen de SDE++-methodiek wordt voor het vaststellen van CO₂-emissies van elektriciteitsgebruik de gemiddelde emissie van de gemiddelde marginale optie in 2030 gebruikt. Deze emissiefactor wordt door EZK vastgesteld op basis van de verwachte gemiddelde elektriciteitsmix tijdens de looptijd van de subsidie. Voor de SDE++-basisbedragen in 2020 is deze gegeven emissiefactor vastgesteld op 0,183 kg CO₂/kWh. De gegeven emissiefactor zal jaarlijks door EZK worden vastgesteld op basis van nieuwe inzichten. Het is daarbij aannemelijk dat de emissiefactor in de komende 10 jaar zal dalen als gevolg van groeiende duurzame opwekcapaciteit. Elektrificatie-opties zullen daardoor steeds aantrekkelijker worden, vooral de opties die veel elektriciteit verbruiken.

Binnen deze studie wordt het CO₂-reductiepotentieel berekend op basis van de gegeven emissiefactor en de emissiefactor op basis van 100% duurzame energie. De range die ontstaat geeft dan het volledige reductiepotentieel weer. Voor het inschatten van de SDE++-basisbedragen wordt de gegeven emissiefactor van 0,183 kg CO₂/kWh gebruikt.

Voor deze eerste selectiestap worden de bovenstaande criteria gescoord op basis van eerste inschattingen. Deze worden in het vervolg van de studie waar mogelijk verder aangescherpt. Dit leidt tot het volgende resultaat:

Tabel 3: Resultaat toepassen selectiecriteria

Technologie-opties	CO ₂ -reductie potentieel bij gegeven emissiefactor	CO ₂ -reductie potentieel bij 100% duurzame elektriciteit	Marktrijpheid	Kosten-effectiviteit	Inpassing SDE++
Elektrische glasoven	<0,1 Mt CO ₂	>0,1 Mt CO ₂	TRL >7	Gemiddeld	Geen issues verwacht
Elektrische krakers	<0 Mt CO ₂	>1 Mt CO ₂	TRL 3-7	Laag	Pas na 2025 verwacht
Elektrische aandrijving in geïntegreerde processen ³	Onbekend	>0,1 Mt CO ₂	TRL >7	Gemiddeld	Geen issues verwacht
Elektrochemische productie van mierenzuur	<0,1 Mt CO ₂	<0,1 Mt CO ₂	TRL 5-6	Gemiddeld	Geen vervanging
Elektrochemische productie van NH ₃	<0 Mt CO ₂	>1 Mt CO ₂	TRL <3	Onbekend	Pas na 2025 verwacht

Legenda bij scores:

Laag
 Gemiddeld
 Hoog

Toelichting scores:

- Het CO₂-reductiepotentieel van zowel elektrische krakers als elektrochemische productie van NH₃ loopt uiteen van potentieel negatief tot (ruim) boven 1 Mt CO₂. Beide technologieën zijn zeer elektriciteitsintensief waardoor de gegeven emissiefactor een groot effect heeft op de CO₂-emissie. Voor beide technologieën geldt bovendien dat er pas richting 2030 de eerste pilots en demonstratieprojecten worden verwacht. Aangenomen wordt dat de emissiefactor dan verder gedaald zal zijn, waardoor het CO₂-reductiepotentieel boven de 1 Mt CO₂ kan uitkomen.
- Het CO₂-reductiepotentieel elektrische aandrijvingen is lastig te bepalen, omdat er geen totaaloverzicht is van de hoeveelheid primaire energie die vervangen kan worden met elektrische aandrijvingen. Dit hangt ook af van de mogelijkheden om de stoom die beschikbaar komt elders nuttig te gebruiken. Dit zal met aanvullend onderzoek inzichtelijk moeten worden gemaakt.
- De kosteneffectiviteit van elektrochemische productie NH₃ is op dit moment nog niet in te schatten. Dit heeft te maken met de relatief lage marktrijpheid van de technologie, waardoor er nog geen inzichten zijn in kosten.

Op basis van de scores in Tabel 3 is de volgende ranking gemaakt:

- 1. Elektrische glasoven**
- 2. Elektrische krakers**
- 3. Elektrische aandrijving in geïntegreerde processen**
4. Elektrochemische productie van mierenzuur
5. Elektrochemische productie van NH₃ (direct route)

³ Met elektrificatie van aandrijvingen kan potentieel veel CO₂ worden gereduceerd. Het grootste deel van deze reductie is echter al kosteneffectief (TVT <5 jaar). In geïntegreerde processen ligt dit anders en daarom is deze specificering gemaakt. Zie voor meer toelichting sectie 3.A.2.1.

De twee technologieën die in deze studie niet verder worden onderzocht zijn elektrochemische productie van mierenzuur en NH_3 :

- Voor elektrochemische productie van mierenzuur geldt dat er momenteel een beperkt CO_2 -reductiepotentieel wordt verwacht. Dit wordt beïnvloed door de huidige relatief lage productie van mierenzuur en het ontbreken van een goede inschatting van het toekomstige potentieel. Bovendien speelt hier mee dat elektrochemische productie van mierenzuur vooral additioneel zal zijn, waardoor de CO_2 -reductie moeilijk kan worden ingeschat. Dit kan ook een complexiteit zijn bij het inpassen in de SDE++.
- De elektrochemische productie van NH_3 is een interessante technologie voor de lange termijn, omdat hier een groot CO_2 -reductiepotentieel wordt verwacht. Echter, gezien de lage TRL op dit moment is het onzeker of de technologie al voor 2030 in aanmerking komt voor SDE++. Bovendien concurreert deze route met de productie van groene waterstof als grondstof voor ammoniak.

Voor beiden technologieën geldt dat er op basis van dit resultaat geen reden is om aan te nemen dat deze technologieën niet in aanmerking kunnen komen voor SDE++. De verwachting is dat deze technologieën in de komende jaren verder worden ontwikkeld en daardoor mogelijk in de toekomst interessant worden voor inpassing in de SDE++.

De drie geselecteerde elektrificatie-opties worden verder uitgewerkt aan de hand van aanvullende literatuur en interviews (zie hoofdstuk 2). De nadruk ligt hierbij op de uitdagingen en kansen die worden verwacht in de verdere ontwikkeling van de technologie en de mogelijke knelpunten die kunnen ontstaan bij de implementatie van de technologieën in de SDE++. Daarnaast is aanvullende informatie verzameld voor het vaststellen van het CO_2 -reductiepotentieel, de technologische ontwikkeling en de kosteneffectiviteit. In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste conclusies beschreven en aanbevelingen gedaan voor het al dan niet opnemen van de technologieën in de SDE++.

In de bijlage (3.Appendix A) is een korte beschrijving opgenomen van de bovenstaande technologie-opties waarin meer achtergrond wordt gegeven over de scores.

2. UITWERKING GESELECTEERDE ELEKTRIFICATIE-OPTIES

In dit hoofdstuk zijn de drie geselecteerde elektrificatie-opties (elektrische glasovens, elektrische aandrijvingen en elektrische krakers) verder uitgewerkt aan de hand van interviews en literatuur. De focus ligt hierbij op het in kaart brengen van het verwachte ontwikkeltraject, de verwachte CO₂-reductie, kosteninschattingen, mogelijke knelpunten voor implementatie onder SDE++ en uitdagingen en kansen op het gebied van technologie, kosteneffectiviteit en implementatie.

2.1 Elektrische glasovens

Beschrijving technologie

In Nederland worden gasgestookte glasovens gebruikt voor het maken van ongeveer 1.500.000 ton glas per jaar. Een groot deel hiervan is verpakkingsglas. De jaarlijkse uitstoot van alle Nederlandse glasovens wordt geschat op 0,3 Mt CO₂ per jaar.

Een alternatief voor gasgestookte glasovens zijn elektrische ovens. Deze ovens kunnen middels een hogere efficiëntie een CO₂-reductie van 0,05 ton CO₂/ton glas opleveren bij de gegeven emissiefactor voor elektriciteit. Dat komt neer op een CO₂-reductie van ongeveer 5 kt CO₂ per glasoven. In combinatie met 100% duurzame elektriciteit loopt het reductiepotentieel op tot 0,2 ton CO₂/ton glas.

In deze studie is alleen de elektrificatie van verpakkingsglas uitgewerkt. Aangenomen wordt dat de effecten voor andere typen glas vergelijkbaar zullen zijn.

Ontwikkelstatus

Elektrische glasovens zijn al geruime tijd beschikbaar, maar worden door hogere investeringskosten niet vaak gebruikt voor industrieel gebruik. Er zijn wereldwijd slechts een klein aantal industriële toepassingen bekend, waaronder bij Consol in Zuid-Afrika. In 2003 besloten zij een elektrische glasoven te gebruiken voor de productie van speciaal verpakkingsglas. Deze keuze werd destijds gemaakt omdat in Zuid-Afrika elektriciteit significant goedkoper was dan aardgas. De laatste jaren wordt ook de potentiële CO₂-reductie een belangrijkere factor.

De ontwikkeling van elektrische glasovens wordt doorgezet, onder andere door het Britse bedrijf ElectroGlass. Zij werken momenteel aan elektrische glasovens met een capaciteit vergelijkbaar aan die van gasgestookte glasovens en met een verbeterde energie efficiëntie.

Gasgestookte glasovens hebben een levensduur van ongeveer 12-15 jaar. In Nederland zijn er ongeveer 10 gasgestookte glasovens voor verpakkingsglas. In de komende jaren wordt verwacht dat meerdere gasgestookte glasovens vervangen moeten worden. Vervanging met elektrische glasovens is daarbij een optie.

Uitdagingen en kansen

- Elektrische glasovens hebben een relatief kleine productiecapaciteit van maximaal 120 ton glas per dag. Gasgestookte ovens kunnen >300 ton glas per dag produceren. Dat betekent dat één gasgestookte glasoven moet worden vervangen door ongeveer 3 elektrische glasovens. Het totale productievolume moet daarbij over verschillende ovens moet worden verdeeld, waardoor mogelijke een aanpassing moet worden gedaan in het proces en/of de aansturing hiervan.
- Tegelijkertijd bieden meerdere kleinere ovens ook flexibiliteit, bijvoorbeeld door glasovens in te zetten voor specifieke kleuren of type glas. Nu moeten bij kleurverandering de ovens worden aangepast.
- Elektrische glasovens hebben een relatief lage levensduur van ongeveer 5-7 jaar. Dit komt onder meer doordat de temperaturen in de elektrische ovens hoger zijn dan in gasgestookte ovens, waardoor de prestaties van de ovens sneller achteruitgaan. Er is wel onderzoek

gedaan naar het gebruik van alternatieve materialen die de levensduur kunnen verlengen, maar dit is economisch nog niet interessant.

- Gasgestookte ovens hebben in vergelijking met elektrische glasovens lagere investeringskosten per ton glas, onder meer vanwege schaalvoordelen door hun grotere capaciteit.
- Elektrificatie van glasovens leiden tot een (fors) hogere elektriciteitsvraag en daarmee een vergroting van de benodigde elektrische capaciteit op de site en mogelijk aanpassingen in de elektrische infrastructuur. Dit leidt tot additionele investeringen.
- Elektrische ovens kunnen beperkt worden ingezet als flexibiliteitsoptie in het elektriciteitsnetwerk. Uitzetten van de oven resulteert in een temperatuurdaling van ongeveer 50 °C per uur. Uitzetten gedurende een half uur zal geen effect hebben op de kwaliteit van het glas, maar langer dan een uur is niet verantwoord. Kleinere aanpassingen in elektriciteitsgebruik (+/- 10%) zijn wel mogelijk voor langere tijd, maar langer dan een dagdeel wordt afgeraden. Deze optie zal nader moeten worden onderzocht om een beter begrip te krijgen voor zowel de impact als flexibiliteitsoptie als de impact op de glasproductie.

Business case

Tabel 4 geeft een overzicht van de kosten voor een elektrische glasoven. Op basis hiervan worden het basisbedrag (in €/ton glas) en de subsidie-intensiteit (in €/ton CO₂ vermeden) geschat.

De productiecapaciteit is gelijkgesteld aan een gasgestookte glasoven (productie 360 ton glas per dag). Voor deze productiecapaciteit zijn 3 elektrische glasovens nodig, waarvan de totale investeringskosten worden geschat op 20M€. Aangezien een glasoven een relatief korte levensduur heeft (5-7 jaar) zullen er gedurende de subsidieperiode (15 jaar) 1-2 herinvesteringen nodig zijn. Deze herinvesteringen bedragen 10M€, ofwel 10-20 M€ afhankelijk van het aantal herinvesteringen in de looptijd van de subsidie. Voor de berekeningen is uitgegaan van het gemiddelde (15M€).

Voor de productie van 1 ton glas is ongeveer 900 kWh elektriciteit nodig. Op basis van de groothandelsprijs voor elektriciteit worden de jaarlijkse energiekosten geschat op 6,1 M€. De verkoopprijs van glas is geschat op 41 €/ton glas (Navigant, 2019a).

Tabel 4: Kostenschattingen elektrische glasoven (Consol, 2019)

Onderdeel	Eenheid	Waarde
Productiecapaciteit	ton glas/dag	360
Investeringskosten (exclusief herinvestering)	M€	20
Herinvesteringen	M€	15
O&M kosten (2% CAPEX)	M€/jaar	0,7
Energiekosten	M€/jaar	6,1
<i>Inschatting SDE++ basisbedrag</i>	<i>€/ton glas</i>	<i>89 (85-92)</i>
Verkoopprijs glas	€/ton glas	41
CO ₂ reductie potentieel	ton CO ₂ /ton glas	0,05 – 0,2*
Inschatting SDE++ subsidie-intensiteit	€/ton CO₂	958 (239-958)

* De range voor het CO₂-reductiepotentieel geeft de minimale CO₂-reductie aan (met gebruik van de gegeven emissiefactor voor elektriciteit) en de maximale CO₂-reductie (bij 100% duurzame elektriciteit). Voor het bepalen van de subsidie-intensiteit is gebruik gemaakt van de gegeven emissiefactor.

Op basis van bovenstaande data worden de kosten voor het produceren van één ton glas met een elektrische glasoven geschat op 89 €/ton glas. Om van dit basisbedrag te komen naar subsidie-intensiteit (in €/ton CO₂ vermeden) wordt gecorrigeerd voor de verkoopprijs van glas en de vermeden CO₂-uitstoot ten opzichte van een gasgestookte oven. Dit laatste wordt geschat op ongeveer 0,05 t CO₂/ton glas. Daarmee wordt de subsidie-intensiteit geschat op 958 €/ton CO₂ vermeden. Dit is significant hoger dan de inschatting uit de eerdere Navigant-studie (85-168 €/ton CO₂) die gebaseerd is op literatuur. De huidige schatting is gebaseerd op een bestaande business case met hogere

investeringskosten (onder andere door de benodigde herinvesteringen) en het gebruik van een lagere CO₂-reductie op basis van de gegeven CO₂-emissiefactor voor elektriciteit. Bij gebruik van 100% duurzame elektriciteit daalt de subsidie-intensiteit naar 239 €/ton CO₂.

Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++

De levensduur van de technologie is aanmerkelijk korter dan de (standaard) 15 jaar subsidietermijn. Dit betekent dat als er een termijn van 15 jaar wordt gekozen er 1-2 momenten zijn voor herinvesteringen. De variatie in benodigde herinvesteringen wordt weergegeven in de ranges van basisbedrag en subsidie-intensiteit.

Andere toepassingen van elektrische ovens

Naast de elektrische glasovens, zijn er ook andere toepassingen van elektrische ovens in de industrie denkbaar, waaronder in de voedingsmiddelenindustrie (bijvoorbeeld bakkersovens) en bouwmaterialen (zoals bakstenen, tegels en keramiek). Deze toepassingen zijn gezien de kleinere capaciteit en het beperkte reductiepotentieel niet onderzocht als onderdeel van deze opdracht.

Toevoegen van andere toepassingen voor elektrische ovens in de SDE++ betekent dat er een afweging moet worden gemaakt of er per toepassing een basisbedrag wordt vastgesteld, of dat er een algemene categorie voor "elektrische ovens" komt. In het eerste geval kan dit leiden tot meerdere kleine subcategorieën met een beperkt CO₂-reductiepotentieel, in het tweede geval is goed inzicht nodig in de kosteneffectiviteit van de verschillende toepassingen zodat vaststellen van een SDE++-basisbedrag mogelijk is.

2.2 Elektrische krakers

Beschrijving technologie

Stoomkraken is het meest energie-consumerende proces in de chemische industrie. In deze processen wordt nafta gekraakt om High Value Chemicals (HVC) te maken: ethyleen, propyleen, waterstof, benzeen-tolueen-xylenen. Hiervoor is veel energie nodig, die nagenoeg geheel komt uit verbranding van vrijgekomen laagwaardige stoomkraakproducten.

Op dit moment worden verschillende technologieën onderzocht om het kraakproces elektrisch te maken. Hierbij spelen verschillende aspecten een rol: de generatie van hoge temperaturen voor de kraakprocessen, de effecten op de waardeketen en producten downstream.

Voor deze studie is stoomkraken van nafta als case verder uitgewerkt.

Ontwikkelstatus

Elektrisch kraken lijkt in principe mogelijk met verschillende technologieën, waaronder inductie, plasma, microgolf. Verschillende bedrijven (individueel of gezamenlijk) onderzoeken momenteel de mogelijkheden van deze en mogelijk andere technologieën. Dit onderzoek heeft vanwege de grote belangen een zeer betrouwbaar karakter. De ontwikkelstatus van benodigde individuele deelttechnologieën wordt momenteel ingeschat op een laag niveau (TRL 1-6) en verschilt sterk per technologie (inductie TRL 6, plasma en microgolf TRL <3). Er is echter nog geen integraal concept voor elektrisch kraken van koolwaterstoffen en daarom wordt de ontwikkelstatus voor de geïntegreerde technologie toegepast op elektrisch kraken lager ingeschat: TRL <3. Hierbij moet worden opgemerkt dat de technologie met de hoogste TRL niet noodzakelijkerwijs de geprefereerde technologie hoeft te zijn. Verwacht wordt dat na 2025 de eerste pilots en demo's kunnen worden uitgevoerd. Niet eerder dan rond 2040 wordt commerciële toepassing verwacht.

Uitdagingen en kansen

- De technologieën zijn nog volop in ontwikkeling. Voor alle varianten worden uitdagingen verwacht rondom opschaling, veiligheid en integratie op de site.
- De bovengenoemde aspecten kunnen leiden tot verschillen in kosten, zowel voor de investering als de inpassing op de site.
- Huidige stoomkrakers zijn in “energie-geïntegreerd” waardoor restwarmte zeer goed kan worden benut in de rest van het proces. Hierdoor hebben ze een zeer hoge energie-efficiëntie. Indien de beschikbaarheid van restwarmte afneemt door elektrificatie en energiebesparing, zal er op verschillende plekken additionele duurzame stoomopwekking moeten worden ingezet.
- Een elektrische stoomkraker heeft een zeer hoge elektriciteitsvraag. Dit kan leiden tot hoge investeringen in elektrische infrastructuur op de sites.
- Elektrisch kraken zal alleen leiden tot een CO₂-reductie als er 100% duurzame elektriciteit kan worden gebruikt.
- De verwachting is dat de technologie gepaard zal gaan met (zeer) hoge investeringen.
- Vergaande elektrificatie betekent dat de industrie steeds afhankelijker wordt van een beschikbare en betrouwbare elektrische infrastructuur. Zeker wanneer power-to-heat oplossingen grootschalig worden geïmplementeerd is de huidige verwachting dat de beschikbaarheid en betrouwbaarheid onder druk zal komen te staan. Er is daarom een stijgende behoefte aan back-up opties die de elektriciteitsvraag (batterijen, pumped storage) en/of de warmtevraag voor de industrie kunnen garanderen (gesmolten zout).

Vervangen van de huidige (fossiele) brandstofdoor elektriciteit maakt het mogelijk een CO₂-emissiereductie te realiseren. Onder de aanname dat productie van 1kg HVC leidt tot 1-2 kg CO₂ en dat er enkele miljoenen tonnen HVC worden geproduceerd in Nederland, is er bij 100% duurzame elektriciteit een CO₂-reductie mogelijk van enkele megatonnen CO₂ per jaar. Het exacte reductiepotentieel is mede afhankelijk van de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit en de inpassing van duurzame oplossingen voor het opwekken van stoom.

Business case

- De technologie bevindt zich nog in een beginstadium. Hierdoor is er nog weinig zicht op goede en concrete inschattingen van zowel investeringskosten als operationele kosten.
- Verwacht wordt dat de CAPEX voor de elektrificatie van een grote kraker ordegrrootte enkele miljarden euro's zal bedragen. De kosten zullen mede afhangen van de gekozen technologievariant en de complexiteit van inpassing in het proces en de site.
- De OPEX hangt sterk af van de elektriciteitsprijs ten opzichte van alternatieven. De levensduur is één van de bepalende factoren in businesscases.

Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++

Er worden op dit moment nog geen knelpunten verwacht voor het inpassen van elektrische krakers in de SDE++.

Andere toepassingen van elektrisch kraken

Een variant op elektrisch kraken is procesverwarming waarbij gebruik wordt gemaakt van directe elektrische verwarming. Dit zou in combinatie met bestaande (fossiele) procesverwarming een hybride systeem kunnen vormen, waarbij de elektrische verwarming wordt ingezet in geval van overschot aan duurzame elektriciteit. Op deze manier kan aardgas worden bespaard en CO₂ gereduceerd.

2.3 Elektrische aandrijvingen

Beschrijving technologie

De industrie heeft in het verleden veel gebruikgemaakt van gas- en stoomaandrijvingen voor bijvoorbeeld compressoren, pompen en koeling. Een deel van deze aandrijvingen inmiddels zijn vervangen door efficiëntere elektrische aandrijvingen (RVO, 2018 en interviews). Belangrijkste drijfveer is dat elektrische aandrijvingen efficiënter zijn en dat de investeringen daarom relatief snel kunnen worden terugverdiend. In een aantal gevallen blijkt vervanging echter complexer. In deze sectie worden ter illustratie twee casussen geschetst: verduurzamen van elektrificatie van aandrijvingen in geïntegreerde processen en elektrificatie van aandrijvingen op offshore productieplatformen.

Elektrificatie van aandrijvingen in geïntegreerde processen

Vervanging van stoomturbines met elektrische aandrijvingen is technisch goed mogelijk, maar leidt niet per definitie tot CO₂-reductie. Dit hangt namelijk af van de mate waarin de turbines zijn geïntegreerd en in hoeverre een dalende stoomvraag leidt tot een afname in energie-input. CO₂-reductie is mogelijk bij vervanging van een zogenaamde condenserende stoomturbine, waarbij na gebruik de stoom geen andere functie meer heeft en wordt weggekoeld. Indien de dalende stoomvraag leidt tot een verlaagde energie-input zal er CO₂-reductie mogelijk zijn. In de overige gevallen is CO₂-reductie alleen technisch mogelijk indien er alternatieve toepassingen worden gevonden voor de beschikbare stoom. Dit kan echter zeer complex zijn, leiden tot additionele kosten en heeft waarschijnlijk slechts een beperkte CO₂-reductie tot gevolg.

Stoomaandrijvingen worden momenteel nog gebruikt in kraakprocessen, omdat deze processen zelfvoorzienend zijn in stoom. Het vervangen van deze stoomaandrijvingen wordt voor deze studie als uitgangspunt genomen. Aangenomen wordt dat er ook in andere processen mogelijkheden zijn voor vervanging van gas- en/of stoomaandrijvingen, maar deze zijn nog niet in kaart gebracht.

Elektrificatie van aandrijvingen op offshore productieplatformen

In de Noordzee zijn productieplatformen niet aangesloten op het elektriciteitsnetwerk. Daarom worden gasturbines gebruikt om elektriciteit op te wekken. Deze elektriciteit wordt grotendeels gebruikt voor het comprimeren van gewonnen gas en voor de energievoorziening van accommodaties. Door de ontwikkeling van wind op zee ligt er nu een offshore elektriciteitsnetwerk waarop platformen kunnen worden aangesloten en waardoor gasturbines overbodig worden. De NAM onderzoekt samen met TenneT of aansluiting op het offshore netwerk mogelijk is. Aansluiting biedt de NAM de mogelijkheid om het gasgebruik op het platform te reduceren en mogelijk de baten uit de gasverkoop te verhogen.

Deze case verschilt van de andere opties, omdat het hier niet de vervanging van een gas- of stoomaandrijving met een elektrische aandrijving betreft, maar het overbodig maken van een gasturbine door een directe aansluiting op het offshore grid. De verduurzaming van de elektriciteitsvoorziening leidt op het platform tot een vermindering van het gasgebruik. Het effect op de CO₂-uitstoot hangt af van het effect op de aardgasproductie en de gekozen systeemafbakening:

Tabel 5: CO₂-reductiepotentieel van aansluiting offshore platform op offshore grid

Systeemafbakening / Effect aardgasproductie	Productieplatform	Nederland
Lagere aardgasproductie	CO ₂ -reductie	CO ₂ -reductie
Gelijke aardgasproductie (additionele gasverkoop)	CO ₂ -reductie	CO ₂ -reductie afhankelijk van <u>waar</u> het aardgas wordt gebruikt

Tabel 5 laat zien dat de combinatie van het effect op aardgasproductie en systeemafbakening bepaalt of er sprake is van CO₂-reductie. De discussie rondom het effect van CO₂-emissies in de keten wordt momenteel ook gevoerd in relatie tot circulaire opties.

Ontwikkelstatus

Elektrische aandrijvingen worden al geruime tijd gebruikt binnen de industrie. In verschillende (standalone) toepassingen hebben ze al stoom en/of gas aandrijvingen vervangen of zijn ze vanaf het begin geïntegreerd in processen. Elektrische aandrijvingen zijn commercieel beschikbaar en worden als zeer betrouwbaar ervaren. Verbeteringen in de technologie zijn incrementeel.

Uitdagingen en kansen

Uitdagingen en kansen zijn in zekere mate specifiek voor de twee onderzochte casussen. Daarom worden ze hieronder per casus weergegeven.

Elektrificatie van aandrijvingen in geïntegreerde processen

- De meeste condenserende stoomturbines zijn in de afgelopen jaren al vervangen door elektrische aandrijvingen. Nu zijn vooral nog casussen die economisch niet rendabel zijn (bijvoorbeeld door een restwaarde) of complex zijn (bijvoorbeeld tegendruk turbines).
- De meest stoomaandrijvingen zitten in kraakprocessen en kunnen alleen worden ingepast tijdens turnovers (eens per 6-8 jaar).

Elektrificatie van aandrijvingen op offshore productieplatformen

- Belangrijkste uitdagingen bij het aansluiten van productieplatformen op het offshore grid zijn dat (1) de Wet Windenergie op Zee geen tie-ins toestaat op het offshore grid, (2) de Energie Wet niet toestaat dat elektriciteit opgewekt op zee ook op zee gebruikt mag worden, (3) het onduidelijkheid is welke tarieven gehanteerd moeten worden voor directe gebruik van offshore wind.
- De investeringskosten voor deze casus zijn hoog omdat er nog geen aansluiting is op het elektriciteitsnet, er beperkt plaats is op het platform en de realisatie offshore plaatsvindt. Vergelijkbare investeringen bij gaswinning op land hebben een veel gunstigere business case en zijn ook al uitgevoerd.
- Elektrificatie van een groot productieplatform in de Noordzee (K14) levert een CO₂-reductie van maximaal 140 kt CO₂ per jaar (bij gebruik van volledig duurzame elektriciteit).
- Daarnaast zijn er additionele baten uit de verkoop van meer gas.

Voor alle elektrificatie-opties:

- Verdergaande elektrificatie zal leiden tot significante uitbreiding van de elektrische capaciteit en infrastructuur op de site.
- Vergaande elektrificatie betekent dat de industrie steeds afhankelijker wordt van een beschikbare en betrouwbare elektrische infrastructuur.
- Het is belangrijk dat er voldoende duurzame elektriciteit beschikbaar is, voor zowel de aandrijving zelf als de eventuele additionele elektrische stoomproductie.

Business case

Op basis van interviews is vastgesteld dat de business case voor alleen vervanging van de stoomaandrijving door een elektrische aandrijving vaak uit kan zonder subsidie. Voor de totale business case spelen echter de volgende zaken ook een rol:

- Het vervangen van stoomturbines in geïntegreerde processen kan complex zijn en leiden tot hogere kosten. Ook kan er sprake zijn van een economische restwaarde.
- Bij offshore productieplatformen zijn kosten voor elektrificatie hoger door aansluiting op het offshore elektriciteitsnetwerk en de meerkosten voor offshore realisatie. Daarnaast profiteert de business case van aanvullende baten uit de verkoop van gas.
- Op basis van eerste schattingen voor het K14-platform wordt een hoge kosteneffectiviteit verwacht voor elektrificatie op boorplatformen (ORT <150 €/ton CO₂ vermeden)⁴. Het is niet duidelijk of kosten voor de elektrificatie van andere productieplatformen vergelijkbaar zijn.

⁴ Deze schattingen zijn direct afkomstig van de industrie en mogelijk gebaseerd op elektriciteitskosten, financiële parameters en belastingen die mogelijk afwijken van het OT-model.

- Noodzakelijke vergroting van de elektrische capaciteit. De kosten hiervoor kunnen een onrendabele top tot gevolg hebben.

Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++

- Het vervangen van stoomaandrijvingen met elektrische aandrijvingen leidt tot energie efficiëntie, zonder dat er een typisch product kan worden vastgesteld⁵. Hierdoor ontstaat een vergelijkbaar knelpunt voor inpassing in de SDE++ als voor droog- en scheidingstechnieken: de optie moet worden gemeten in "GJ vermeden" en daarin kan de SDE++ niet in voorzien.
- Door verdergaande elektrificatie zijn investeringen nodig in de elektrische infrastructuur. Hierdoor kunnen de kosten oplopen en leiden tot een onrendabele business case.
- Inpassingskosten kunnen uiteenlopen als gevolg van verschillen op industriële sites en tussen op het oog vergelijkbare processen.
- Voor de offshore netwerken is duidelijkheid nodig of huidige regelgeving aansluiting op offshore netwerken toestaat en welke tarieven er voor elektriciteitsgebruik gehanteerd moeten worden. Zonder deze duidelijkheid kunnen er geen investeringsbeslissing nemen.
- Indien de investering plaatsvindt op zee zullen de inpassingskosten naar verwachting significant hoger zijn.
- Elektrificatie van offshore platformen zullen net als andere elektrificatie opties leiden tot CO₂-reductie op de locatie zelf (scope 1), maar niet noodzakelijkerwijs tot een CO₂-reductie in Nederland. Indien de aardgasbesparing op het platform leidt tot verminderde gaswinning, dan is er sprake van CO₂-reductie, indien het leidt tot additionele gas verkopen dan hoeft er geen sprake zijn van CO₂-reductie.

Andere toepassingen van elektrische aandrijvingen

Buiten vervanging van aandrijvingen in geïntegreerde industriële processen of op boorplatformen, zijn er mogelijk nog andere toepassingen van gas en stoom aangedreven turbines die vervangen kunnen worden met elektrische aandrijvingen. Deze mogelijkheden kunnen in een vervolgstudie verder worden onderzocht.

2.4 Aangepaste scores selectiecriteria

Naar aanleiding van de verzamelde informatie en data hebben we de originele scores voor de selectiecriteria (zie Tabel 3) aangepast:

⁵ Hiermee wordt bedoeld dat de toepassing van elektrische aandrijving niet gelinkt is aan één typisch product. Het product hangt namelijk sterk samen met het proces waarin de aandrijving wordt toegepast. Dit maakt het complex om een goede functionele eenheid vast te stellen, wat een belangrijke voorwaarde is voor het vaststellen van een SDE++-basisbedrag.

Tabel 6: Aangepaste scores selectiecriteria

Technologie-opties	CO ₂ -reductie potentieel bij gegeven emissiefactor	CO ₂ -reductie potentieel bij 100% duurzame elektriciteit	Marktrijpheid	Kosten-effectiviteit	Inpassing SDE++
Elektrische glasoven	<0,1 Mt CO ₂	>0,1 Mt CO ₂	TRL 9	Laag	Geen issues verwacht
Elektrische krakers	<0 Mt CO ₂	>1 Mt CO ₂	TRL <3	Laag	Pas na 2025 verwacht
Elektrische aandrijving in geïntegreerde processen ⁶	<0,1 Mt CO ₂	>0,1 Mt CO ₂	TRL 9	Gemiddeld	Functionele eenheid
Elektrochemische productie van mierenzuur	<0,1 Mt CO ₂	<0,1 Mt CO ₂	TRL 5-6	Gemiddeld	Geen vervanging
Elektrochemische productie van NH ₃	<0 Mt CO ₂	>1 Mt CO ₂	TRL<3	Onbekend	Pas na 2025 verwacht

Legenda bij scores:

Laag
 Gemiddeld
 Hoog

Opmerking: wij hebben een aantal aanpassingen gemaakt op basis van enkele bronnen die (nog) niet gevalideerd zijn. De bovenstaande tabel bevat wel onze beste inschatting naar aanleiding van de laatste inzichten.

⁶ Met elektrificatie van aandrijvingen kan potentieel veel CO₂ worden gereduceerd. Het grootste deel van deze reductie is echter al kosteneffectief (TVT <5 jaar). In geïntegreerde processen ligt dit anders en daarom is deze specificering gemaakt. Zie voor meer toelichting sectie 3.A.2.1

3. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Voor de drie geselecteerde technologieën kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Elektrische glasovens

- Elektrische glasovens kunnen op korte termijn worden geïmplementeerd in de SDE++.
- Op basis van één case wordt de subsidie-intensiteit geschat op 958 €/ton CO₂ vermeden. Deze hoge subsidie-intensiteit wordt veroorzaakt door:
 - Relatief hoge kosten: korte levensduur en forse herinvesteringen;
 - Beperkte CO₂-reductie: de gegeven emissiefactor voor elektriciteit geeft een CO₂-reductie van ongeveer 5 kt CO₂ per glasoven.
- Daarnaast vragen de korte levensduur om herinvesteringen tijdens de looptijd van de SDE++. Dit is niet uitzonderlijk, ook bij zon-PV is sprake van herinvesteringen, echter voor glasovens zijn deze substantiëler. Dit heeft een nadelige invloed op het SDE++-basisbedrag.

Elektrische aandrijvingen

- Een deel van de stoom en gas aangedreven turbines zijn de afgelopen jaren vervangen door elektrische aandrijvingen. Vervanging van de overgebleven turbines is vaak complex, omdat de aandrijvingen meestal geïntegreerd zijn in het proces of omdat elektrificatie niet direct leidt tot een lager energiegebruik.
- Er zijn toepassingen bekend waarbij elektrificatie wel tot CO₂-reductie kan leiden, maar (nog) niet economisch rendabel zijn. Subsidie kan deze projecten stimuleren.
- Vervanging van gasturbines op offshore productieplatformen door een directe verbinding op het offshore netwerk. De inpassingskosten van deze toepassingen zijn hoog als gevolg van aansluiting op een offshore netwerk en de meerkosten voor realisatie offshore.
- De kosten voor inpassing kunnen per casus mogelijk (sterk) verschillen. Dat maakt vaststelling van basisbedragen mogelijk complex.
- Daarnaast kan het moeilijk vaststellen van een functionele eenheid een knelpunt opleveren. In dat geval zal er gekeken moeten worden naar eenzelfde oplossing als er momenteel voor scheidings- en droogtechnieken wordt gezocht.
- Elektrificatie leidt tot een directe CO₂-reductie op de locatie, maar leidt pas tot een CO₂-reductie van het systeem als er ook daadwerkelijk minder primaire energie wordt gebruikt.

Elektrisch kraken

- Elektrisch kraken als technologie bevindt zich nog in een vroeg stadium en zal pas interessant worden voor de SDE++ wanneer de eerste demonstratieprojecten kunnen worden uitgevoerd (verwacht rond 2040).
- Elektrisch kraken is een dure technologie, investeringskosten voor een grote kraker lopen naar verwachting in de miljarden euro's. Hiervoor is innovatiesteun nodig en de SDE++ kan daarbij een rol spelen in de mogelijk implementatie en uitrol van de technologie. Inschattingen van subsidie-intensiteit uit Navigant (2019a) lopen sterk uiteen, zie sectie A.1.2 voor een overzicht.
- Voor inpassing van elektrisch kraken in de SDE++ worden geen knelpunten verwacht.

Daarnaast zijn er ook een aantal randvoorwaarden geïdentificeerd die belangrijk zijn bij de realisatie van de technologieën:

- Voor alle technologieën geldt dat er aanvullende kosten worden verwacht voor het **aanpassen van de elektrische infrastructuur** op de industriële sites. Deze kosten kunnen voor elektrificatie-intensieve technologieën zoals elektrisch kraken zeer hoog zijn.
- De **ontwikkeling van een zeer betrouwbaar elektriciteitsnet** is voor vergaande elektrificatie van de industrie een belangrijke voorwaarde.
- De **beschikbaarheid van voldoende duurzame elektriciteit** is een belangrijke voorwaarde.
- Zolang de **emissiefactor voor elektriciteit** nog relatief hoog is, zullen elektrificatie-opties relatief duur zijn en niet competitief met andere opties.
- Elektrificatie kan ook worden gedreven door **prijratio in elektriciteit en gas**. Een hoge gasprijs kan elektrificatie aantrekkelijker maken, mits de meer-investering in verhouding is met de lagere elektriciteitsprijzen.

Aanbevelingen:

- De elektrische glasoven kan worden toegevoegd aan de SDE++. Echter, de hoge subsidie-intensiteit en de relatief lage CO₂-reductie per glasoven bij de gegeven emissiefactor voor elektriciteit moeten worden meegewogen in deze beslissing.
- Het berekende basisbedrag is gebaseerd op één case. De elektrische glasoven is als technologie nog in ontwikkeling en daarom wordt aanbevolen om een uitgebreidere studie uit te voeren waarbij meerdere aanbieders kunnen worden geconsulteerd waardoor meer inzicht ontstaat in het basisbedrag en de subsidie-intensiteit voor elektrische glasovens.
- Elektrisch kraken lijkt geschikt voor de SDE++, maar gezien de huidige status moet dit over 2 jaar worden heroverwogen.
- Technologieën die in de SDE++ worden opgenomen moeten leiden tot een CO₂-reductie. Bij elektrificatie van offshore productieplatformen is het vaststellen van de CO₂-reductie afhankelijk van het effect op de aardgasproductie en de systeemaftakking. Deze discussie rondom het effect van CO₂-emissies in de keten wordt momenteel gevoerd in relatie tot circulaire opties. De uitkomst hiervan zal ook moeten gelden voor de optie “elektrificatie van offshore productieplatformen” en daarmee bepalend moeten zijn in het vaststellen of de optie leidt tot CO₂-reductie en dus in aanmerking komt om opgenomen te worden in de SDE++.
- De overweging wordt meegegeven om de ingrijpende aanpassingen van elektrische infrastructuur op regionaal niveau te ondersteunen. Nu geldt dat aanpassingen aan de infrastructuur op de individuele SDE++-projecten moeten worden meegenomen. Dan kan het gebeuren dat de kosten voor een ingrijpende aanpassing moet worden meegenomen op een klein project, waardoor de kosten van dit project het maximale basisbedrag zullen overschrijden en het project niet gerealiseerd kan worden.
- Daarnaast is uit de interviews opgemaakt dat de industrie zich zorgen maakt over een groeiende afhankelijkheid van het elektriciteitsnetwerk voor hun processen. De industrie is daarom ook geïnteresseerd in back-up en balansopties die hen de leveringszekerheid kan bieden in het geval er onbalans ontstaat. Overwogen kan worden om deze opties (bijvoorbeeld opslag in batterijen, pumped hydro en gesmolten zout) te ondersteunen.

APPENDIX A. TOELICHTING OP TECHNOLOGIEËN

A.1 Power to heat technologieën

A.1.1 Elektrische glasoven

Bij glasovens moeten zeer hoge temperaturen worden bereikt van boven de 1600 °C. Nu worden daar nog vooral gasgestookte glasovens voor gebruikt. Inmiddels zijn er ook elektrische glasovens beschikbaar die als alternatief kunnen dienen.

Onderdeel	Beschrijving
Elektrificatie-optie	Elektrische glasoven (cold-top electric melting)
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	<p>De totale Nederlandse productie voor glas is ongeveer 1-1,5 miljoen ton glas per jaar. De CO₂-emissies van deze productie zijn geschat op basis van het energieverbruik:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energieverbruik van een gasgestookte oven wordt geschat op 3,8 GJ/ton glas, oftewel 3,8-5,7 PJ per jaar; • Aangenomen wordt dat in het huidige proces vooral gas wordt gebruikt. De emissies worden geschat op ongeveer 0,2 tCO₂/ton glas; • Het energieverbruik van een elektrische glasoven is 900 kWh/ton glas (3,2 GJ/ton glas); • Met de gegeven emissiefactor voor 2030 van 0,183 kgCO₂/kWh komt dit neer op 0,16 tCO₂/ton glas, een netto-reductie van 0,05 tCO₂/ ton glas. Op jaarbasis kan er met een elektro-glasoven 0,05-0,075 Mt CO₂ gereduceerd worden; • Met 100% duurzame energie kan het CO₂-reductiepotentieel oplopen tot 0,2 tCO₂/ton glas, ofwel 0,3 Mt CO₂ per jaar.
Marktrijpheid van de technologie	<p>De technologie is al toegepast in Zuid-Afrika door Consol. Hier wordt op een kleinere schaal glas geproduceerd dan op de Nederlandse markt. De marktrijpheid is daarom TRL 9. Technologie nog in ontwikkeling, onder meer op vergroten capaciteit en efficiëntie.</p>
Kosteneffectiviteit van de technologie	<p>In de verkennende studie wordt de SDE++ subsidie-intensiteit geschat op 85-168 €/tCO₂ (Navigant, 2019). Dit is op basis van 100% duurzame elektriciteit en exclusief de benodigde investeringen in de elektriciteitsaansluiting. Op basis van de kostendata van Consol wordt de subsidie-intensiteit geschat op 958 €/ton CO₂ (239-958 €/tonCO₂).</p> <p>Inschatting kosteneffectiviteit: laag</p>
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	<p>Elektrische glasovens hebben een korte levensduur (5-7 jaar) en vergen significante herinvestering(en) tijdens de looptijd van de SDE++.</p>
Alternatieve technologieën	<p>Andere elektrische smelttechnologieën worden momenteel onderzocht (Springer & Hasanbeigi, 2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segmented Melter (TRL 3); • Plasma Melter (TRL 6); • Microwave Heating (TRL 2).

Bronnen:

- Carbon Transparency (2017), Brown to Green: South Africa, <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2017/07/B2G2017-SouthAfrica.pdf>
- Consol (201X), Demystifying carbon footprinting, <https://www.consol.co.za/assets/files/demystifying-carbon-footprinting.pdf>
- Consol (2019), Interview met Jan de Wind en Paul Curnow (september 2019)
- Grayson (2019), Are Electric Furnaces the Future of Glass Manufacturing?, <https://mo-sci.com/electric-furnaces-future-glass-manufacturing>
- Heineken (2019), Jaarlijkse CO₂-monitoring
- Navigant (2019a): Verkenning uitbreiding SDE+ met industriële opties
- RVO (2012), Routekaart 2030 Nederlandse glasindustrie, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/Routekaart%20glasindustrie%20-%20rapport%20-%20juni%202012.pdf>
- Springer & Hasanbeigi (2017), Emerging energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction technologies for the glass industry, https://china.lbl.gov/sites/default/files/lbl_glass_final.pdf
- Stichting duurzaam verpakkingsglas (201X), Materiaalverduurzamingsplan verpakkingsglas, <https://www.duurzaamglas.nl/file/view/MVP-Glas-SDV-def.pdf>

A.1.2 Elektrische kraker

Elektrische krakers verhitten nafta (of gasolie) in aanwezigheid van stoom gedurende zeer korte tijd, waardoor de in de voeding aanwezige hoogmoleculaire stoffen worden gekraakt. In een groot aantal stappen worden uit het kraakgas de hoofdproducten etheen en propeen verkregen en daarnaast een flink aantal bijproducten. Het merendeel van deze stappen bestaat uit destillatieprocessen. De warmte nodig voor het kraakproces wordt normaliter opgewekt door verbranding van fossiele (rest)gassen. In een elektro-fornuis wordt de warmte opgewekt met elektriciteit. Er zijn wereldwijd slechts een beperkt aantal spelers (10-12) voor wie elektrisch kraken interessant is. Een deel van die spelers heeft vestigingen in Nederland.

Onderdeel	Beschrijving
Elektrificatie-optie	Elektrische kraker
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	<p>De CO₂-emissies van hoge temperatuurprocessen in de industrie werden in 2014 geschat op 22 Mt CO₂ (RVO, 2018). Dit is inclusief toepassingen van kraken bij raffinaderijen en organische chemie. Op basis van literatuur zijn inschattingen gemaakt voor CO₂-reductiepotentieel van elektrisch kraken bij raffinaderijen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De elektrische capaciteit van fornuizen bij raffinaderijen wordt geschat op 3.275 MW (DNV-GL, 2018); • Een 10 MW elektrisch fornuis gebuikt 94.400 MWh per jaar (90% efficiënt). Bij een capaciteit van 3.275 MW betekent dat 30,9 TWh elektriciteit per jaar; • Bij 100% duurzame energie wordt het reductiepotentieel van fornuizen bij raffinaderijen wordt door DNV-GL geschat op 3 Mt CO₂ (DNV-GL, 2018); • Met de gegeven emissiefactor van 0,183 kgCO₂/kWh leveren elektrische fornuizen een CO₂-emissie van 5,7 Mt CO₂ en is er sprake van een netto toename van CO₂-emissies. Bij gebruik van de gegeven 2030 emissiefactor is het CO₂-reductiepotentieel dus negatief. <p>Toepassing van elektrificatie bij stoomkrakers levert een vergelijkbaar resultaat:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bij stoomkraken wordt van nafta zogenaamde High Value Chemicals (HVC) gemaakt. Bij dit proces komt CO₂ vrij: ordegrrootte 1 tot 2 kg CO₂ /kg HVC; • Er worden in Nederlandse jaarlijks miljoenen tonnen HVC geproduceerd. Het CO₂-reductiepotentieel wordt daardoor geschat op enkele miljoenen ton.
Marktrijpheid van de technologie	<p>Er worden verschillende technologieën onderzocht op toepassing voor elektrisch kraken. Voor inductie bestaan pilot installaties, maar bruikbaarheid is niet aangetoond voor de schaal van hoge temperatuurprocessen (TRL <7). Plasma en microgolf zijn nog in ontwikkeling (TRL <3). Naast deze technologieën worden ook nog andere technologieën onderzocht.</p> <p>Vóór 2030 worden in Nederland de eerste pilot-installaties en een grootschalige demo-installatie verwacht. Na 2040 is de verwachting dat elektrische fornuizen breder inzetbaar zullen zijn. De potentie van elektrisch kraken richting 2050 is groot.</p>

Onderdeel	Beschrijving
Kosteneffectiviteit van de technologie	<p>Er zijn verschillende schattingen bekend:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Navigant 2019: 348-1169 €/tCO₂; • DNV-GL 2018: 400-500 €/ton CO₂* (elektrisch kraken bij raffinaderijen); • De investeringskosten voor een grote elektrische stoomkraker worden geschat op enkele miljarden euro's. <p>Voor de technologieën wordt rekening gehouden met hoge investeringskosten en hoge aanpassingskosten in vergroten van de elektrische capaciteit. Deze laatste zijn niet opgenomen in de Navigant inschattingen.</p> <p>Inschatting kosteneffectiviteit: laag</p> <p><i>* De inschatting van DNV-GL is gemaakt onder afwijkende financiële parameters: 20 jaar (SDE++: 15 jaar) afschrijving en 10% WACC (SDE++: 6,2%).</i></p>
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	<ul style="list-style-type: none"> • Moeilijk in te schatten wanneer de technologie ver genoeg ontwikkeld is zodat installaties in aanmerking komen voor SDE++; • Er moet voldoende duurzame elektriciteit beschikbaar zijn, anders leidt de optie niet tot CO₂-reductie.
Technologieën	<p>Er zijn verschillende technologieën waarmee hoge temperaturen elektrisch kunnen worden bereikt. Voor fornuizen worden meerdere technologieën onderzocht, waaronder inductie, plasma en microgolf.</p>

Bronnen:

- DNV-GL (2018), VNPI CO₂ reductie roadmap Nederlandse raffinaderijen, [https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO₂-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf](https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO2-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf)
- Interview met industrie-expert (vertrouwelijk), oktober 2019
- Navigant (2019a): Verkenning uitbreiding SDE+ met industriële opties
- Navigant (2019b): Quick scan Alternatieve verwarmingstechnieken
- RVO (2018), Verkenning groeimarkten en CO₂-reductie in de industrie, https://www.rvo.nl/sites/default/files/2018/07/Verkenning_groeimarkten_EEAenICT_juni2018.pdf

A.2 Power for mechanical drives

A.2.1 Elektrische aandrijvingen

Elektrische aandrijvingen worden al veel toegepast binnen de industrie, bijvoorbeeld voor compressoren, pompen en koelmachines. Deze zijn vaak efficiënter dan gas of stoom aangedreven varianten met een vergelijkbare betrouwbaarheid. RVO schat in dat het implementeren van efficiënte elektrische aandrijvingen in de industrie 4,5 Mt CO₂ kan besparen (RVO, 2018). Dit wordt bereikt als alle aandrijvingen (inclusief bestaande elektrische) worden vervangen door efficiënte elektrische aandrijvingen. In de meeste gevallen wordt de investering snel terugverdiend (<5 jaar). Echter voor complexe en geïntegreerde toepassingen in de (petro)chemische industrie kan dit anders liggen, bijvoorbeeld wanneer het vervangen van een stoomaandrijving met een elektrische aandrijving niet leidt tot een vermindering van primaire energie. In dat geval zal moeten worden gezocht naar nuttige alternatieve toepassingen van stoom. Dit kan leiden tot aanvullende investeringen. Daarnaast kan verdergaande elektrificatie leiden tot aanvullende investeringen in de elektrische infrastructuur.

Onderdeel	Beschrijving
Elektrificatie-optie	Elektrische compressie in geïntegreerde processen
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	Referentie-case: vervanging van een 9 MW stoom aangedreven compressor door een elektrische aandrijving met een 8 MW compressor: <ul style="list-style-type: none"> • CO₂-uitstoot uitgangssituatie: 0,07 Mt CO₂ per jaar; • Bij 100% duurzame energie is het reductiepotentieel 0,07 Mt CO₂; • Met de gegeven emissiefactor van 0,183 kgCO₂/kWh leveren elektrische fornuizen een CO₂-emissie van 0,05 Mt CO₂.
Marktrijpheid van de technologie	Technologie is commercieel beschikbaar (TRL 9). Een groot deel van de potentiële besparing kan al vóór 2030 behaald worden (RVO, 2018).
Kosteneffectiviteit van de technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Vervangen van stoomaandrijvingen door elektrische aandrijvingen in geïntegreerde processen is nu vaak al kosteneffectief; • Echter, aanpassingen aan de elektrische infrastructuur kunnen leiden tot hoge investeringen die de kosteneffectiviteit negatief beïnvloeden;
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	<ul style="list-style-type: none"> • Indien de elektrische aandrijving zelf ondersteuning behoeft, kan het ontbreken van een functionele eenheid een knelpunt zijn.
Alternatieve technologieën	Geen

Bronnen:

- Beerenschot (2017), Electrification in the Dutch process industry, http://www.ispt.eu/media/Electrification-in-the-Dutch-process-industry-final-report-DEF_LR.pdf
- Interview met industrie-expert (vertrouwelijk), oktober 2019
- RVO (2018), Verkenning groeimarkten en CO₂-reductie in de industrie, https://www.rvo.nl/sites/default/files/2018/07/Verkenning_groeimarkten_EEAenICT_juni2018.pdf
- RVO (2014), Brochure efficiënte elektrische aandrijvingen, https://www.rvo.nl/sites/default/files/Brochure_EEA_juli_2014.pdf

A.3 Power to chemicals

Elektrochemische productie is een productieproces waarbij elektriciteit wordt gebruikt om chemicaliën te produceren. Deze technologie biedt een alternatief voor de huidige productieprocessen die vaak energie-intensief zijn. Door gebruik te maken van duurzame elektriciteit kunnen de CO₂-emissies voor productie gereduceerd worden.

A.3.1 Elektrochemische productie van mierenzuur

Mierenzuur wordt in de industrie gebruikt voor de chemische synthese van organische stoffen. Met alcoholen vormt mierenzuur esters die als oplosmiddel of geurstof worden gebruikt. Daarnaast kan mierenzuur in zuivere vorm worden gebruikt als schoonmaakmiddelen, antisepticum en ontkalker en wordt het in de leer- en textielindustrie gebruikt als looi- of beitsmiddel.

Elektrochemische productie uit CO₂ en waterstof is een alternatief voor de conventionele productie uit aardgas. Elektrochemische productie van mierenzuur biedt daarnaast de mogelijkheid voor opslag van elektriciteit, koolstof (uit CO₂) en waterstof.

Onderdeel	Beschrijving
Elektrificatie-optie	Elektrochemische productie van mierenzuur
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	<ul style="list-style-type: none"> Voor productie van 1 kg mierenzuur is ongeveer 3,5 kWh nodig. Met de gegeven emissiefactor voor 2030 is dat 0,6 kg CO₂/kg mierenzuur; De Nederlandse productie van mierenzuur is klein, enkele kilotonnen per jaar. Er is geen CO₂-uitstoot bekend van deze productie; De verwachting is dat elektrochemische productie van mierenzuur vooral interessant is voor nieuwe decentrale toepassingen zoals energieopslag en lokaal hogedruk CO produceren.
Markrijpheid van de technologie	De technologie is nog in ontwikkeling, huidige TRL-niveau is 5-6. Verwachting is dat in de komende twee jaar de eerste industriële schaal projecten zullen komen (20-50kW). Technologie is modulair schaalbaar.
Kosteneffectiviteit van de technologie	Op basis van eerste inschattingen zijn de productiekosten voor elektrochemische productie van mierenzuur vergelijkbaar met de huidige productiekosten. Echter, de zuiverheid van de huidige productie is hoger, waardoor de kosteneffectiviteit afhankelijk is van de toepassing. Inschatting kosteneffectiviteit: gemiddeld tot hoog
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	<ul style="list-style-type: none"> De verwachting is dat elektrochemische productie van mierenzuur niet de huidige productie zal vervangen. Er zal daardoor slechts een beperkt scope 1 effect zijn. De overige CO₂-reductie zal afhangen van de toepassingen; Het zal lastig zijn een functionele eenheid vast te stellen; Deze toepassing haakt ook in op CCU.
Alternatieve toepassingen	Andere vergelijkbare elektrochemische toepassingen waarbij CO ₂ wordt gebruikt zijn: <ul style="list-style-type: none"> Koolmonoxide (TRL 4-5); Etheen (TRL 2); Formaldehyde (TRL 4).

Bronnen:

- Interview Earl Goetheer, Robert de Kler (2019)
- TKI Energie en Industrie (2019), Naar een duurzame en inclusieve industrie, <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Energie%20en%20Industrie/TKI%20Programmalijn%202.pdf>
- Voltachem (2019), CO₂ utilisation

A.3.2 Elektrochemische productie van ammonia

Ammonia (NH₃) wordt momenteel geproduceerd uit aardgas als basisproduct en grondstof voor meststoffen. Het is een hoogcalorische energiedrager die geproduceerd kan worden uit elektriciteit en gebruikt kan worden voor de opslag van elektriciteit.

Ammonia kan met elektrochemie via een directe route worden geproduceerd uit N₂ en H₂O. Deze productiemethode is fundamenteel anders dan het Haber Bosch proces, waarbij eerst waterstof wordt geproduceerd. De directe elektrochemische route is nog nieuwe en momenteel volop in ontwikkeling.

Onderdeel	Beschrijving
Elektrificatie-optie	Elektrochemische productie van NH ₃
Inschatting van het CO ₂ -reductiepotentieel	<ul style="list-style-type: none"> • Ammoniaproductanten in Nederland stoten ongeveer 5 Mt CO₂ per jaar uit. De jaarlijkse ammoniaproductie is ongeveer 2,8 Mt NH₃; • Elektrochemische productie van ammonia via de directe route heeft ongeveer 14 kWh/kgNH₃ nodig; • Met de gegeven 2030 emissiefactor komt de CO₂-uitstoot van 1 kg NH₃ neer op 2,6 kg CO₂/kg NH₃; • Uitgaande van de huidige jaarlijkse productie van NH₃ zou deze technologie een jaarlijkse CO₂-uitstoot van 7,3 Mt CO₂. Daarmee zal het leiden tot een negatieve CO₂-reductie; • Indien er wordt uitgegaan van 100% duurzame elektriciteit kan een CO₂-reductie van maximaal 5 Mt CO₂ worden gerealiseerd.
Marktrijpheid van de technologie	De TRL van deze optie is nog laag, geschat wordt TRL<3
Kosteneffectiviteit van de technologie	Er is nog weinig bekend over kosten
Mogelijke knelpunten inpassing in de SDE++	<ul style="list-style-type: none"> • Het is nog onduidelijk wanneer deze technologie marktrijp wordt. Verwachting is dat dit na 2025 zal zijn; • Zonder duurzame elektriciteit levert leidt deze optie niet tot CO₂-reductie.
Alternatieve toepassingen	Andere vergelijkbare elektrochemische toepassingen zijn: <ul style="list-style-type: none"> • Power to Ammonia met groene waterstof

Bronnen:

- ISPT (2017), Power to Ammonia, <https://emis.vito.be/sites/emis.vito.be/files/articles/3331/2017/CE%20Delft%20-%20Power%20to%20Ammonia-%20Energy%20and%20electricity%20prices%20scenarios%202020-2023-2030%20%283%29.pdf>
- McEnaney et.al. (2017), Ammonia synthesis from N₂ and H₂O using a lithium cycling electrification strategy at atmospheric pressure, <https://orbit.dtu.dk/ws/files/134381717/Untitled.pdf>

- Voltachem (2017), Industrial electrification,
<https://www.kivi.nl/uploads/media/58fc7ec47f760/4.%20KIVI%20Voltachem%20%20Electrification%2020-04-2017.pdf>