

Slimme elektrificatie van industriële warmte

Februari 2025

Sikke Klein
sklein@energyconsulting.nl

de kleijn
energy consultants & engineers





De Kleijn energy consultants & engineers

- 30 jaar ervaring in industriële energie, 25 FTE
- Van idee tot realisatie:
 - Energie studies
 - (Zero carbon) blue print/road maps
 - Engineering (incl. detailed engineering)
 - Ondersteuning procurement & installatie
 - Commissioning & Start up
 - Optimalisaties, opleidingen etc
- 15+ jaar ervaring met industriële warmtepompen:
 - Realisatie 2-3 warmtepomp/MVR installaties per jaar
 - Industrialheatpumps.nl
- Breed klanten portfolio: multi nationals & middelgrote bedrijven

Voorbeeld referenties de Kleijn

de kleijn
energy consultants & engineers



Cloetta



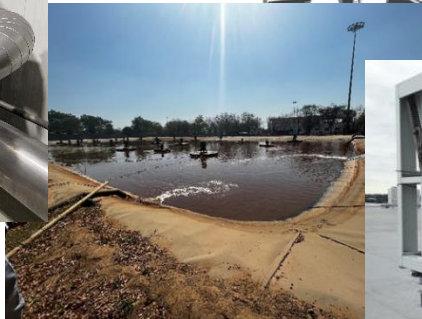
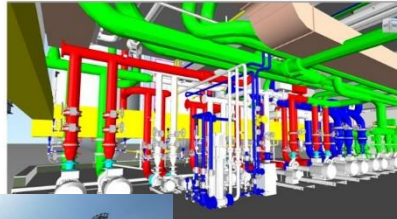
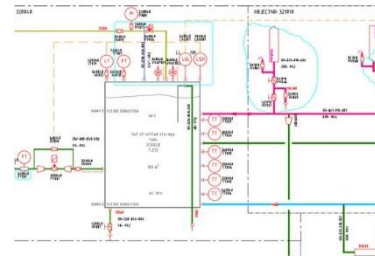
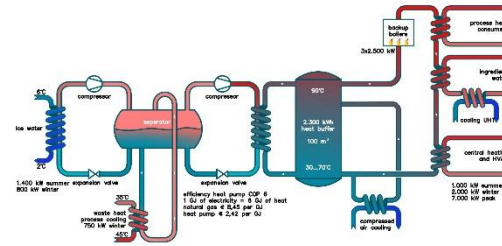
ABInBev



SULZER



Voorbeelden van projecten



**Wij houden
van techniek**



**Wij balen
van verspilling**

Whitepaper: Slimme en toekomstgerichte elektrificatie van warmte in de industrie

- **Doel:** Vergelijking opties voor elektrificatie van warmte met feiten en berekeningen onderbouwd
- **Doelgroep:** Beslissers binnen industrie
- **Achtergrond:** Kennis, ervaring en studies vanuit Nobian, TU Delft en De Kleijn
- **Document:**
https://industrialheatpumps.nl/nederlands/nieuws/whitepaper_industriële_elektrificatie/
- Commentaar/opmerkingen/vragen: neem contact op!

Slimme en toekomstgerichte elektrificatie van warmte in de industrie


Sikke Klein, De Kleijn Engineers & Consultants/TU Delft (Werktuigbouwkunde), Februari 2025
sikke@energyconsulting.nl www.dekleijn.nl

Samenvatting

De warmtevoorziening in de industrie is verantwoordelijk voor meer dan 25% van de Nederlandse CO₂-uitstoot. De verduurzaming hiervan is één van de grote uitdagingen in de energietransitie.

Veel bedrijven onderzoeken de mogelijkheden voor de volledige elektrificatie van hun warmtevoorziening maar er bestaat veel onduidelijkheid over de voor- en nadelen van de diverse opties. In dit rapport zijn de belangrijkste opties vergeleken.

In onderstaande tabel zijn de kwalitatieve bevindingen weergegeven met de volgende kleurcodering:



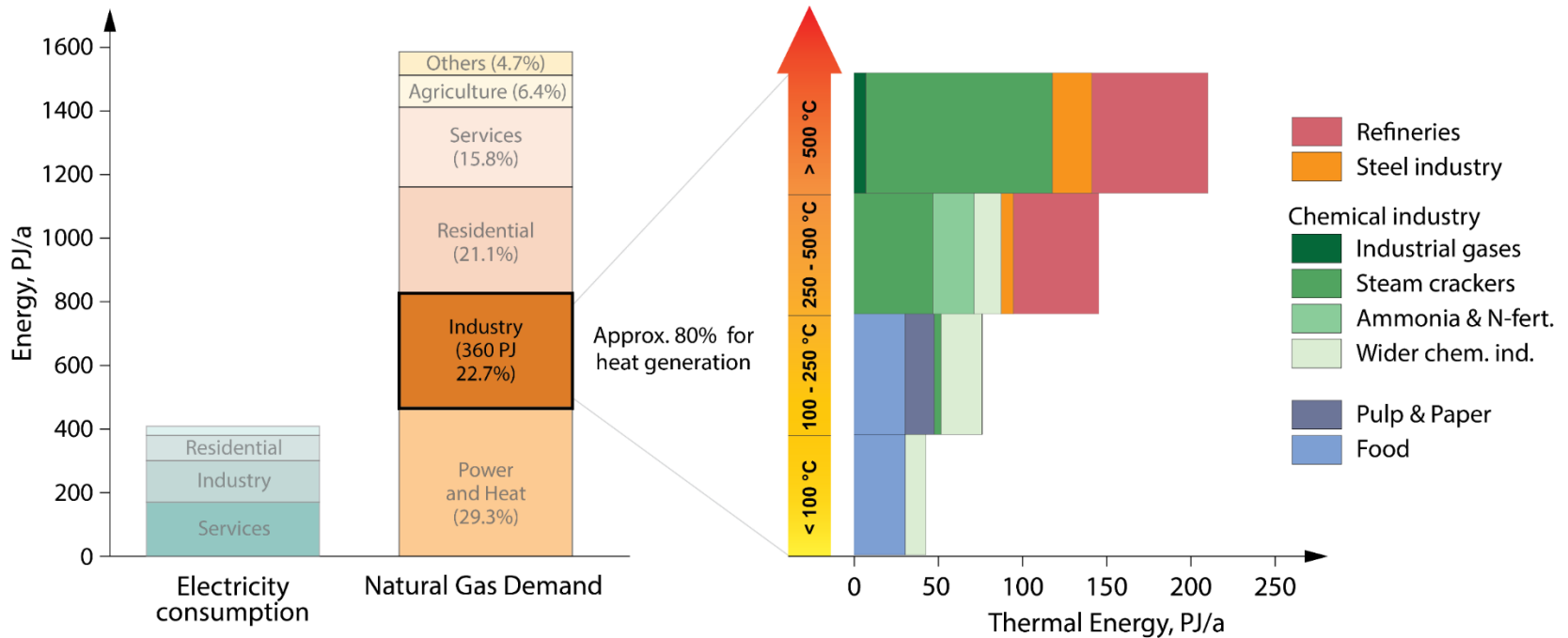
	Warmtepomp	Directe conversie (e-boiler)	Waterstof (groen) ketel	Aardgas ketel
CO₂ emissies	Green	Green	Green	Red
Operationele kosten	Green	Green	Green	Red
Lage temp warmte (<250°C)	Green	Green	Green	Red
Hoge temp warmte (>250°C)	Green	Green	Red	Green
CAPEX	Green	Green	Green	Red
Business case	Green	Green	Green	Red
Complexiteit procesintegratie	Green	Green	Green	Red
Aansluiting op het elektriciteitsnet	Green	Green	Green	Red
Noodzaak voor flex operatie/ opslag	Green	Green	Green	Red

Uit de tabel blijkt dat er geen perfecte oplossing is (alle vakjes groen). De één-op-één vervanging van aardgas door elektriciteit, en zeker door waterstof, is economisch de minst aantrekkelijke optie. Industriële warmtepompen scoren het beste¹. Het oorspronkelijke proces, ontworpen voor goedkope aardgas-warmte, kan vaak veel efficiënter door toepassing van slimme warmte-integratie en warmte-spaardeving met elektriciteit. Hiermee wordt naast CO₂, ook energie bespaard (typisch 60%-80%) wat tot de laagste operationele kosten leidt. Met de toepassing van deze technologie wordt er een toekomstbestendige en competitieve stap gemaakt.

De elektriciteitskosten zijn een belangrijk aspect in de business case voor alle opties. Ook in de toekomst zal elektriciteit alleen goedkoop zijn gedurende een beperkt aantal uren en zij zal tijdens periodes met een lager aanbod van duurzame elektriciteitsproductie (zeer) kostbaar zijn. Een goede business case vereist daarom om efficiënte en flexibele elektrificatie van warmte.

¹ Technisch gezien zijn warmtepompen met eindtemperaturen boven de 250°C moeilijk te realiseren en worden dus (voortlopig) niet meegenomen in dit overzicht.

Industriële warmte in Nederland (2018)



Data from CBS and IEA The Netherlands
Energy Policy Review, 2020

Project 6-25 Technology Validation, 2018, Royal HaskoningDHV

Decarbonisatie van de proces-industrie is een grote uitdaging!

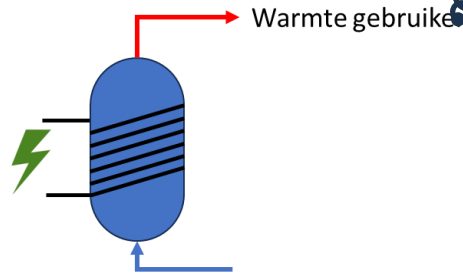
ELEKTRICITEIT ≠ AARDGAS

- Elektriciteit moet geproduceerd worden tegelijkertijd met verbruik
 - *Elektriciteit kan niet direct worden opgeslagen*
 - *Prijzen voor elektriciteit fluctueren veel meer*
- Significante investeringen nodig voor elektriciteitsproductie en transport
- Elektriciteit kan direct gebruikt worden om 'arbeid' te leveren
=> processen met hoger rendement mogelijk door hergebruik warmte

$$\text{COP}_{\text{effectief}} = \frac{\text{Vervangen fossiele warmte}}{\text{Duurzame elektriciteit}}$$

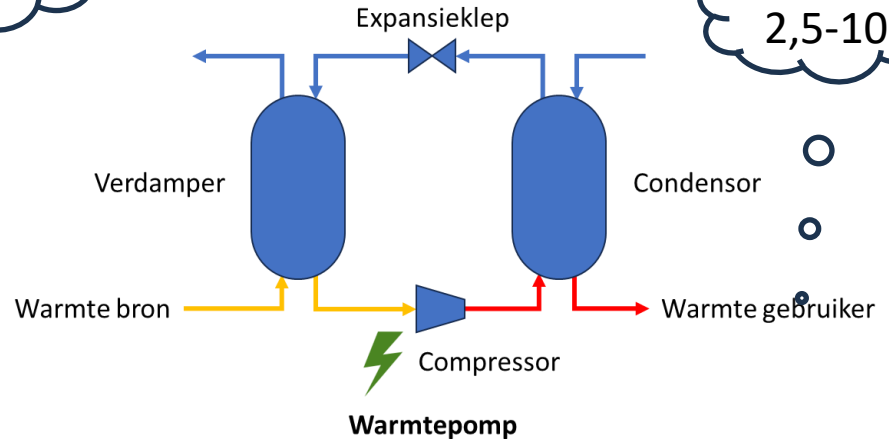
Elektrificatie van warmte

DIREKTE ELEKTRIFICATIE



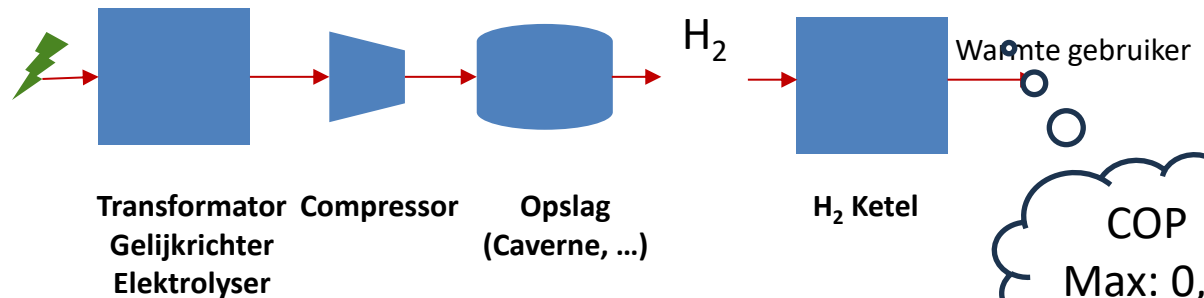
Directe conversie van elektriciteit naar warmte

COP
Max 1



COP
2,5-10

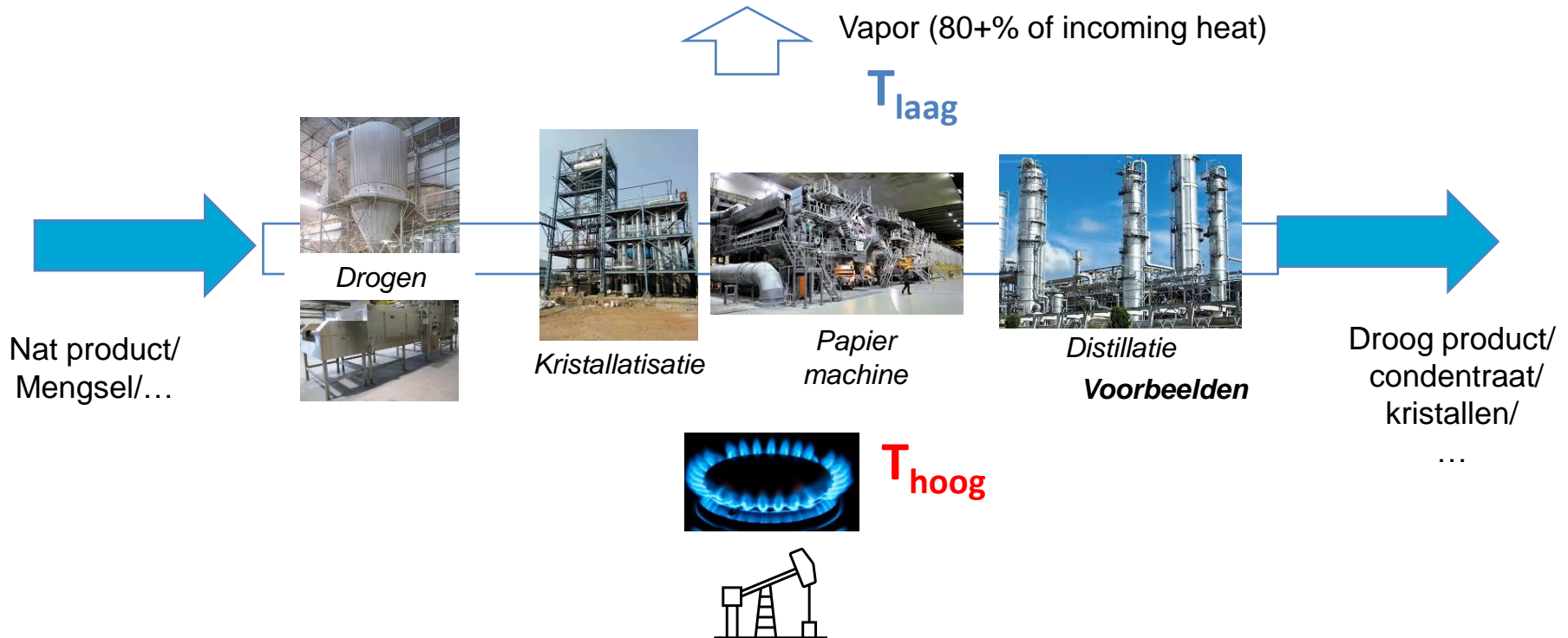
GROENE WATERSTOF



COP
Max: 0,6

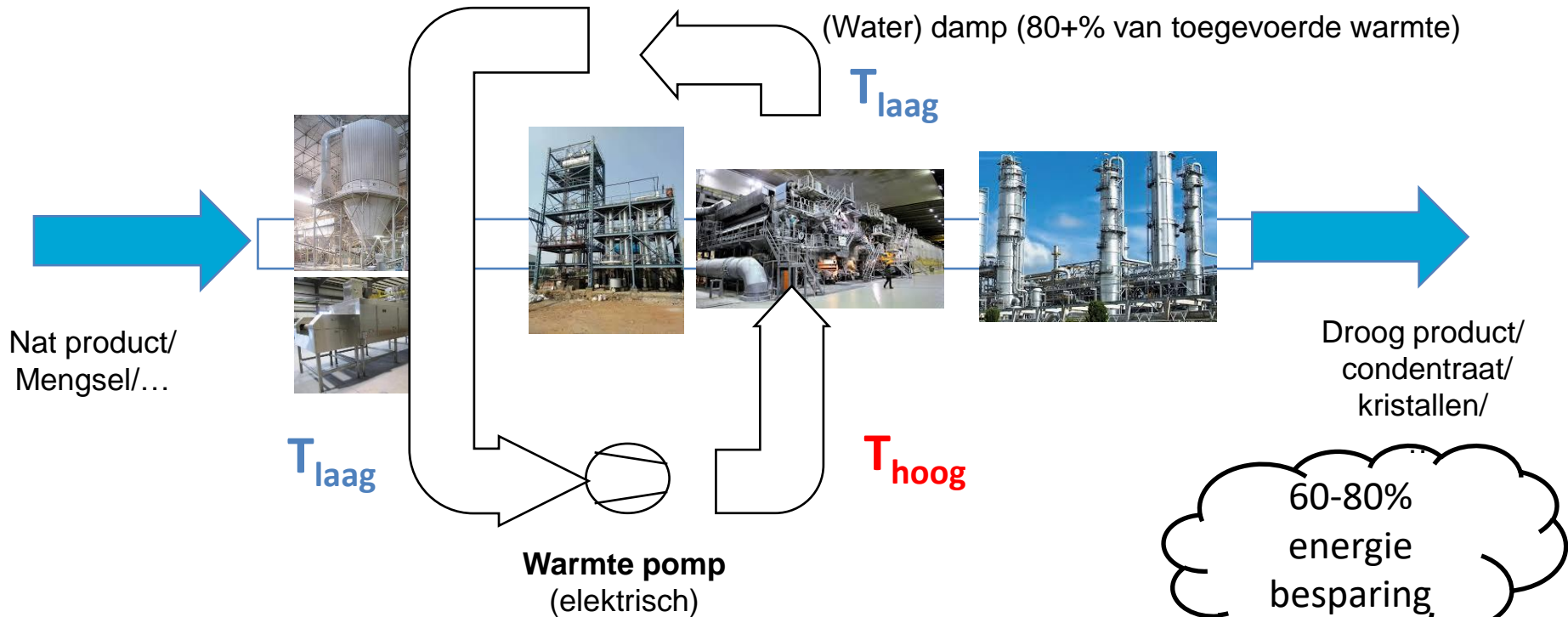
$$\text{COP}_{\text{effectief}} = \frac{\text{Vervangen fossiele warmte}}{\text{Duurzame elektriciteit}}$$

Slimme elektrificatie past perfect bij industriële scheidingsprocessen



Slimme elektrificatie past perfect bij industriële scheidingsprocessen

$$COP_{haalbaar} = 60\% \cdot \frac{T_{levering, warmtepomp}}{\Delta T_{warmtepomp}} = \frac{T_{hoog} [K]}{T_{hoog} - T_{laag}}$$



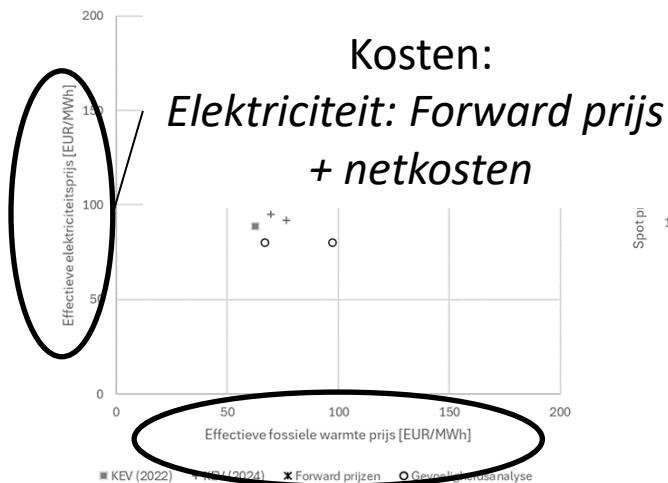
60-80% energie besparing

$$COP_{effectief} = \frac{\text{Vervangen fossiele warmte}}{\text{Duurzame elektriciteit}} = 2,5 \text{ tot } 4,5^+$$

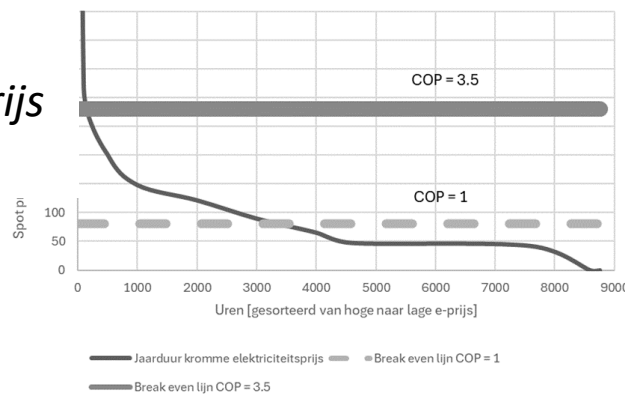
De business case van elektrificatie

$$\begin{aligned}
 & \text{Waarde van elektrificatie van warmte} = \\
 & + \text{Bespaarde fossiele brandstof en CO}_2 \text{ kosten} \\
 & - \text{Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie} \\
 & - \text{Verschil CAPEX/OPEX kosten}
 \end{aligned}$$

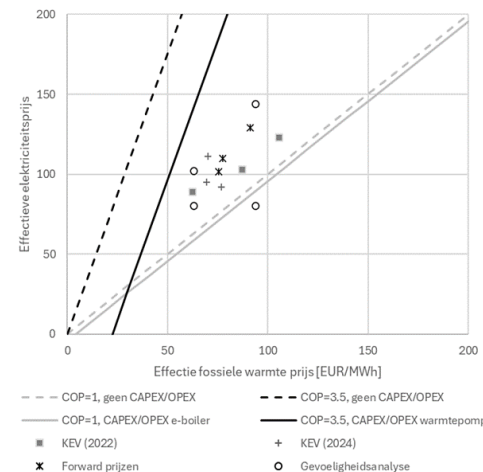
Energieprijs scenario's
Jaargemiddeld
Gas+CO₂ versus Elektriciteit



Variabele energiekosten
Jaarduurkromme
elektriciteitsprijzen



Overall business case
Waarde elektrificatie

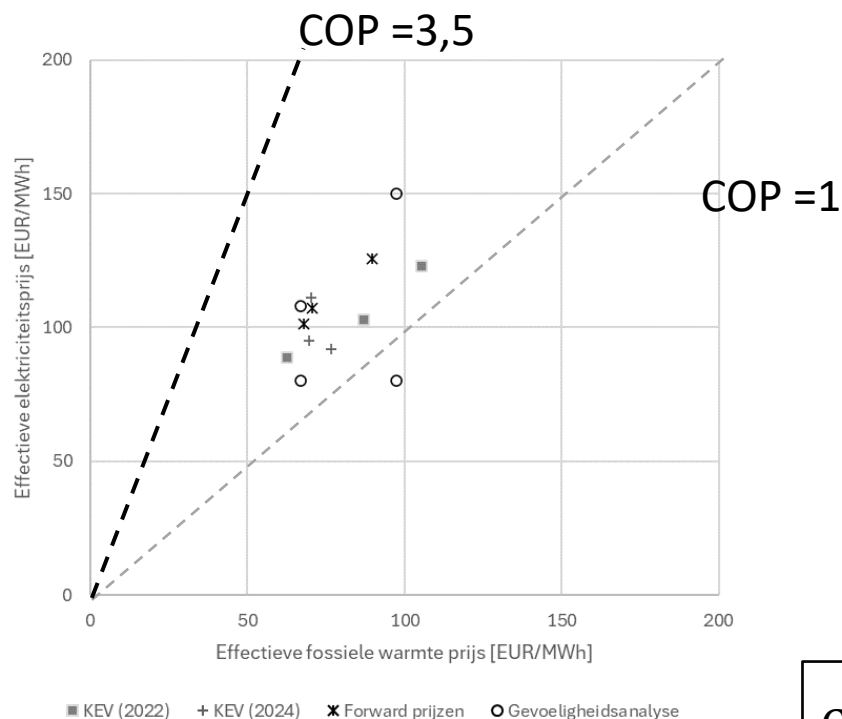


Besparing:
Warmte: Gas (TTF+belasting) + CO₂

De business case van elektrificatie

Energieprijs scenario's

Waarde van elektrificatie van warmte =
+Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
– Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
– Verschil CAPEX/OPEX kosten



Energieprijs scenario's:

- Forward 2026-2029
- Klimaat en Energieverkenningen (KEV) 2022 & 2024
- Gevoeligheidsanalyse (laag/h oog elektriciteit/CO₂)
- Koppeling fossiel => elektriciteit
- Elektriciteit blijft waardevol
- Elektriciteit duurer dan fossiele alternatief

$$\text{COP}_{\text{effectief}} = \frac{\text{Vervangen fossiele warmte}}{\text{Duurzame elektriciteit}}$$

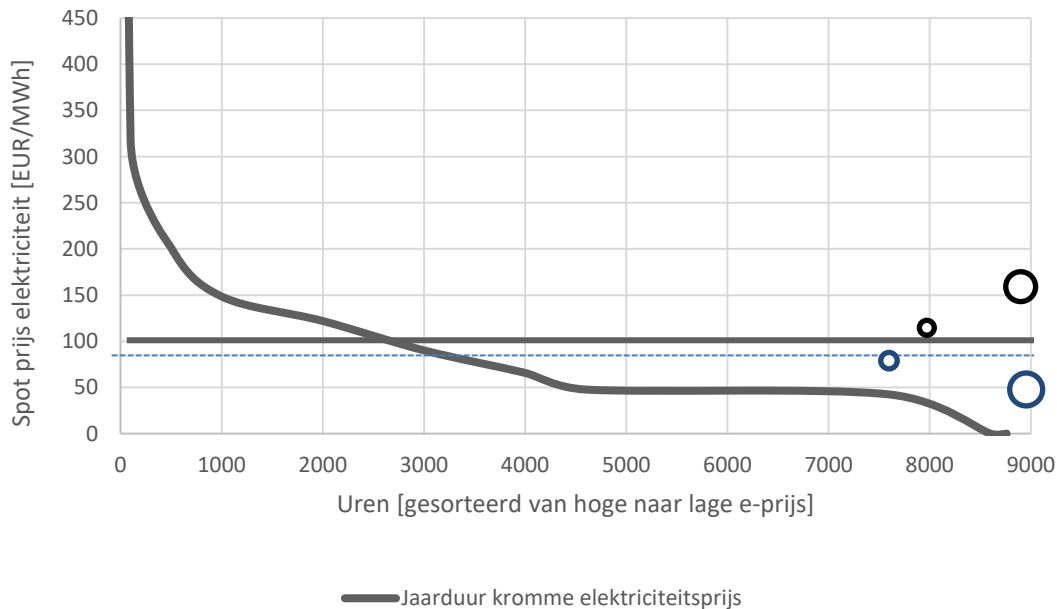
Correctie marktprijs: electriciteit : +30 EUR/MWh_e (transport/network kosten)

Fossiel warmte: +15 EUR/MWh_{heat} (belasting) geen vrije CO₂ allocatie, 93% efficiënte ketel

De business case van elektrificatie

Variabele energiekosten

Waarde van elektrificatie van warmte =
+ Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
– Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
– Verschil CAPEX/OPEX kosten



Jaargemiddelde
electriciteitsprijs
100 EUR/MWh

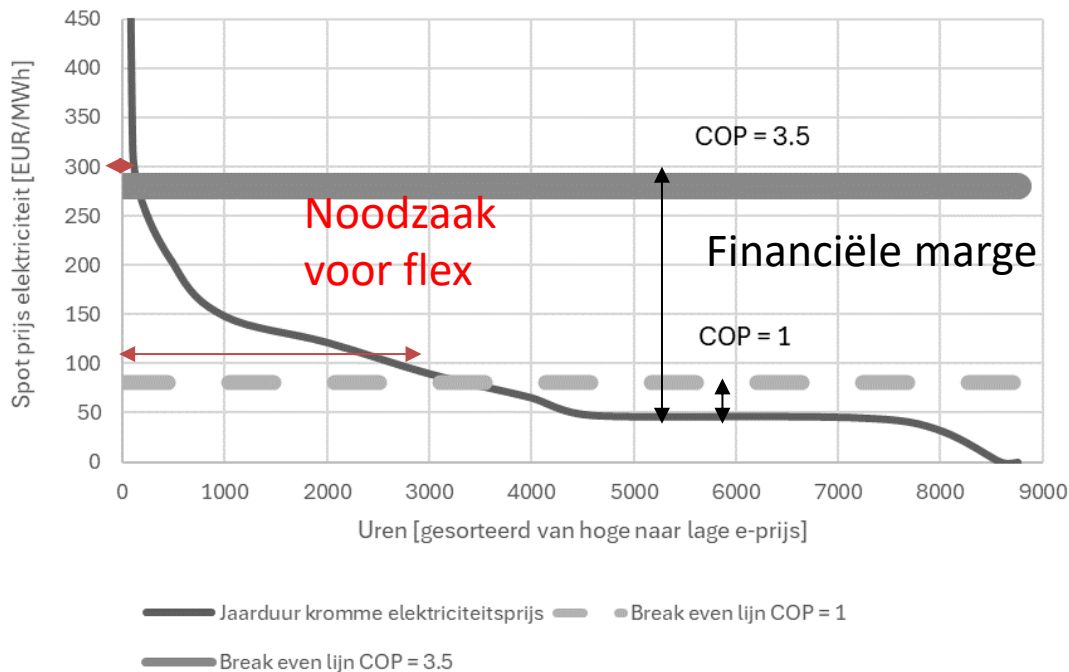
Prijs fossiele
alternatief
(prijsscenario's) :
ongeveer 80
EUR/MWh

Jaarduurkromme toekomstig duurzaam elektriciteitssysteem (spot prijs),

De business case van elektrificatie

Variabele energiekosten

Waarde van elektrificatie van warmte =
+ Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
– Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
– Verschil CAPEX/OPEX kosten



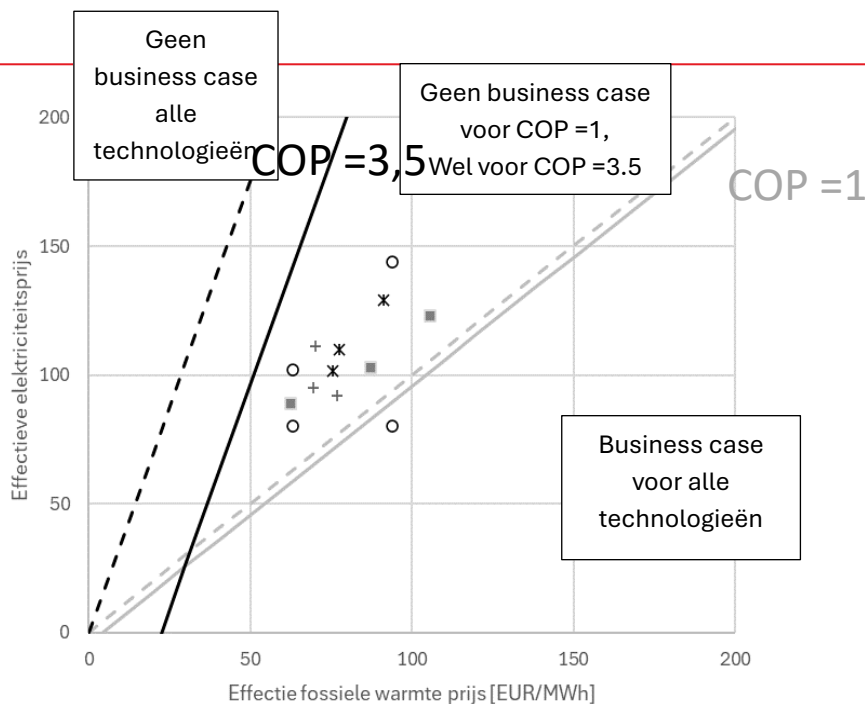
- Bij COP 1: prijs elektriciteit te hoog bij groot aantal uren
- Bij COP 3.5:
 - Veel hogere financiële marge
 - Prijs elektriciteit te hoog in beperkt aantal uren
- Noodzaak voor flex veel kleiner bij hogere COP (betere efficiency)

Jaarduurkromme toekomstig duurzaam elektriciteitssysteem,
jaargemiddelde elektriciteitsprijs: 100 EUR/MWh, prijs fossiele alternatief: 80 EUR/MWh

De business case van elektrificatie

Overall business case

Waarde van elektrificatie van warmte =
 + Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
 – Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
 – Verschil CAPEX/OPEX kosten



--- COP=1, geen CAPEX/OPEX	--- COP=3.5, geen CAPEX/OPEX
— COP=1, CAPEX/OPEX e-boiler	— COP=3.5, CAPEX/OPEX warmtepomp
■ KEV (2022)	+ KEV (2024)
* Forward prijzen	○ Gevoeligheidsanalyse

- Break even lijnen voor de business case (waarde > 0)
- Grote CAPEX impact voor hogere COP technologieën
- Geen business case bij gemiddeld prijsscenario's voor lagere COP technologieën, zelfs inclusief CO₂ beprijzing

CAPEX: SDE++
 elektriciteit: +30 EUR/MWh_{el}
 fossiele warmte: +15 EUR/MWh_{heat} geen vrije CO₂ allocatie, 93% ketel

Samenvatting business case

Slimme elektrificatie van warmte



	Warmtepomp	Directe conversie (e-boiler)	Waterstof (groen) ketel	Aardgas ketel
CO₂ emissies	Beste	Beste	Beste	Slechts
Operationele kosten				
Lage temp warmte (<250°C)	Beste	Slecht	Slechts	Beste
Hoge temp warmte (>250°C)	NVT ¹	Slecht	Slechts	Beste
CAPEX	Slecht	Slecht	Beste	Beste
Business case				
Complexiteit procesintegratie	Slecht	Slecht	Slechts	Beste
Aansluiting op het elektriciteitsnet	Slecht	Slechts	H2 net	Beste
Noodzaak voor flex operatie/ opslag	beperkt	groot	niet nodig	niet nodig

- **Eén op één vervanging van aardgas is de minst aantrekkelijke optie**
- Industriële warmtepomp heeft laagste (variabele) energiekosten
- Warmtepomp:
 - Factoren kleinere netaansluiting en minder noodzaak tot flexibiliteit dan e-boiler
 - Toekomstbestendige en competitieve investering
 - Meestal (significante) aanpassingen nodig voor bereiken van hoge COP (proces integratie)
 - CAPEX kan bottleneck zijn, er zijn subsidies beschikbaar
- Groene waterstof altijd aanzienlijk duurder door verliezen in keten (COP = 0,6) en extra investeringen
- E-boiler (COP = 1): (jaargemiddelde) elektriciteitskosten hoger dan fossiele alternatief (inclusief CO₂)
 - Hybride (e-boiler/gas ketel): alleen korte termijn oplossing met beperkte besparing op aardgas en CO₂
- Goede structurele analyse van productieproces en warmte-integratie/opwaardering noodzakelijk



VOORBEELDEN

SLIMME ELEKTRIFICATIE VAN WARMTE

Recente voorbeelden (NL)



<https://www.coca-cola.com/nl/nl/media-center/coca-cola-fabriek-in-nederland-co2-neutraal-gecertificeerd>



Zonder mout geen bier. Maar voor de productie is veel energie nodig, vaak gas. In Eemshaven lukt het een van Europa's grootste mouterijen zonder iets uit te stoten.

Job Urbaah 21 maart 2024, 18:10

<https://royalswinkels.com/nl/media/nieuws-en-verhalen/holland-malt-opent-s-werlds-eerste-emissievrije-mouterij>

Maatwerk afspraken Nobian: elektrificatie van zoutproductie door toepassing MVR technologie



- Nobian bedrijft al twee kleinere Mechanical Vapor Recompression (MVR) installaties (Delfzijl and Hengelo)
- Nobian gaat 2/3^e van de huidige stoomgedreven zout productie in Delfzijl and Hengelo vervangen door grootschalige MVR technologie inclusief flex
- Nobian is voorloper in Maatwerk afspraken, getekend December 2024
- CO₂ reductie: ca 540 kton/jaar (Scope 1)

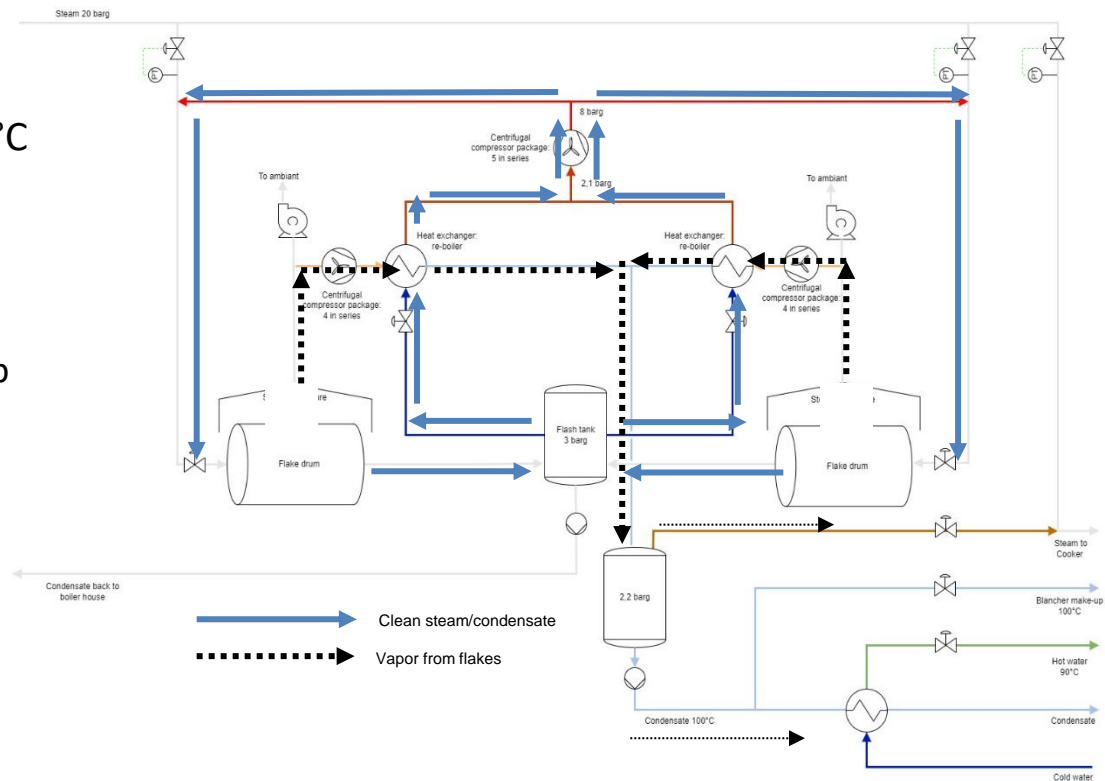


Bestaande MVR-Zout recrystallizer in Delfzijl



Warmteterugwinning vlokken drum

- Drogen van aardappel vlokken middels vlokkendrum, intern verwarmd met stoom
- Huidige situatie:
Veel lucht in dampkap, dauwpunt 40°C
- Nieuwe situatie:
 - Dauwpunt dampkap: ca 100 °C
 - Compressie van damp
 - 'reboiler' produceert stoom uit damp
 - Compressie stoom naar 8 bar(g)
- COP: 4
- Geplande in bedrijfstelling: Q1 2026





https://industrialheatpumps.nl/nederlands/nieuws/white-paper_industriële_elektrificatie/

Slimme en toekomstgerichte elektrificatie van warmte in de industrie

Sikke Klein, De Kleijn Engineers & Consultants/TU Delft (Werktagbouwkunde), Februari 2025
sklein@energyconsulting.nl s.klein@tudelft.nl

Samenvatting

De warmtevoorziening in de industrie is verantwoordelijk voor meer dan 25% van de Nederlandse CO₂-uitstoot. De verbruizaming hiervan is één van de grote uitdagingen in de energietransitie.

Veel bedrijven onderzoeken de mogelijkheden voor de volledige elektrificatie van hun warmtevoorziening maar er bestaat veel onzekerheid over de voor- en nadelen van de diverse opties. In dit rapport zijn de belangrijkste opties vergeleken.

In onderstaande tabel zijn de kwalitatieve bevindingen weergegeven met de volgende kleurcodering:



	Warmtepomp	Dichte conversie (e-benel)	Waterstof (groen gas)	Aardgas (rood)
CO₂ emissies	Green	Green	Green	Red
Operationele kosten:				
Lage temp warmte (<100°C)	Green	Green	Green	Red
Hoge temp warmte (>100°C)	Green	Green	Green	Red
CAPEX	Green	Green	Green	Red
Business case				
Compleet procesintegratie	Green	Green	Green	Red
Aansluiting op het elektriciteitsnet	Green	Green	Green	Red
Noodzaak voor flex operatief gebruik	Green	Green	Green	Red

Uit de tabel blijkt dat er geen perfecte oplossing is (alle velden groen). De één-op één vervanging van aardgas door elektriciteit, en zeker door waterstof, is economisch de minst aantrekkelijke optie. **Industriële warmtepompen scoren het beste!** Het industriële proces, ontwerpen voor goedkope aardgas warmte, kan ook veel efficiënter door toepassing van slimme warmte-integratie en warmte-opslag met elektriciteit. Hiermee wordt naast CO₂ ook energie bespaard (typisch 50%-80%) wat tot de laagste operationele kosten leidt. Met de toepassing van deze technologie wordt er een toekomstbestendige en complete oplossing gerealiseerd.

De elektrificatiekosten zijn een belangrijk aspect in de business case voor alle opties. Ook in de toekomst zal elektriciteit alleen goedkoop zijn gedurende een beperkt aantal uren en zij zal tijdens periodes met een lager aanbod van duurzame elektriciteitsproductie (meer) kostbaar zijn. Een goede business case vereist daarom een efficiënte en flexibele elektrificatie van warmte.

¹ Technisch gezien zijn warmtepompen met eindtemperaturen boven de 250°C moeilijk te realiseren en worden daar (voorlopig) niet meegenomen in dit overzicht.

VFRAGEN ?

Sikke Klein

sklein@energyconsulting.nl

Tel: 0615965844

de kleijn

energy consultants & engineers



**Bedankt voor
uw aandacht!**

ZERO AMBITION

**Wat is
úw ambitie?**

Referentielijst & eerdere studies

- https://topsectorenergie.nl/documents/1278/Whitepaper_Verduurzaming_van_lage_temperatuur_industriele_warmtebehoefte.pdf
- <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>
- Mulder, S.; Klein, S. Techno-Economic Comparison of Electricity Storage Options in a Fully Renewable Energy System. *Energies* 2024, 17, 1084. <https://doi.org/10.3390/en17051084>
- <https://www.tudelft.nl/me/over/afdelingen/process-energy/research/gas-turbines/electrification-of-industrial-heat>
- <https://www.verduurzamingindustrie.nl/api/documents/downloadfile?sectionid=219230&fileid=1508667&forcedownload=true>
- <https://verduurzamingindustrie.mett.nl/actueel/nieuws/2397960.aspx?t=Aanbodgestuurde-productie-maakt-elektrificatie-mogelijk>
- Recente afstudeerverslagen TU Delft:
 - P. Widdows, [Design of an advanced heat pump for industrial drying installations](#)
 - D. Gautam, [Pumped Thermal Energy Storage: Thermodynamic Modelling And Optimization Of Waste Heat Integrated Rankine PTES System](#)

A tall, cylindrical smokestack with alternating red and white horizontal bands. The top of the stack is emitting a thick plume of white smoke that drifts to the right. The background is split: the left side is a clear teal sky, and the right side is a large, textured cloud with a strong red tint. The text 'BACK UP' is centered in white, bold, sans-serif font across the middle of the image.

BACK UP

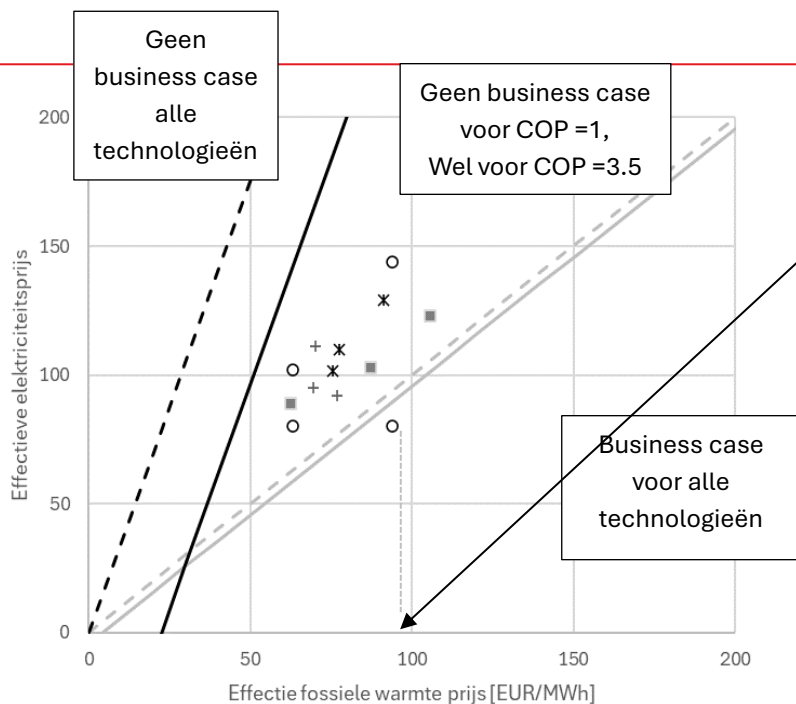
Samenvatting stappenplan

1. Alternatief product/productieproces met geen of lagere energie vraag
2. Technisch:
 1. Energie & massabalans
 - Analyse warmte (vraag/aanbod, temperatuur, hoeveelheid, locatie, latent/sensibel, ..)
 2. Optimalisatie
 - Doelstelling: minimaal 80% CO2 reductie
 - 'Pinch analyse' voor matching warmte aanbod/vraag : afstand tussen bron en gebruiker!
 - Sluiten van kring binnen unit operations
 - Opties flexibiliteit (Opslag, ...)
 3. Operationele aspecten/Risico's
 - Start stop/back up/betrouwbaarheid/....
 4. Vergelijking scenario's/business cases
3. Business case/project ontwikkeling
 1. Stel een roadmap op, bijvoorbeeld upgrade in combinatie met vervanging
 2. Ga in gesprek met de netbeheerder: wat is wel mogelijk?
 3. Doe een subsidie analyse, neem contact op met RVO
 4. Onderzoek eventuele alternatieve investeringsvormen (ESCO), goede afbakening noodzakelijk

De business case van elektrificatie

Overall business case voor COP = 1 technologie

Waarde van elektrificatie van warmte =
 + Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
 – Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
 – Verschil CAPEX/OPEX kosten



100 EUR/MWh fossiele warmte =

- 50 EUR/MWh gas
- 275 EUR/ton CO₂

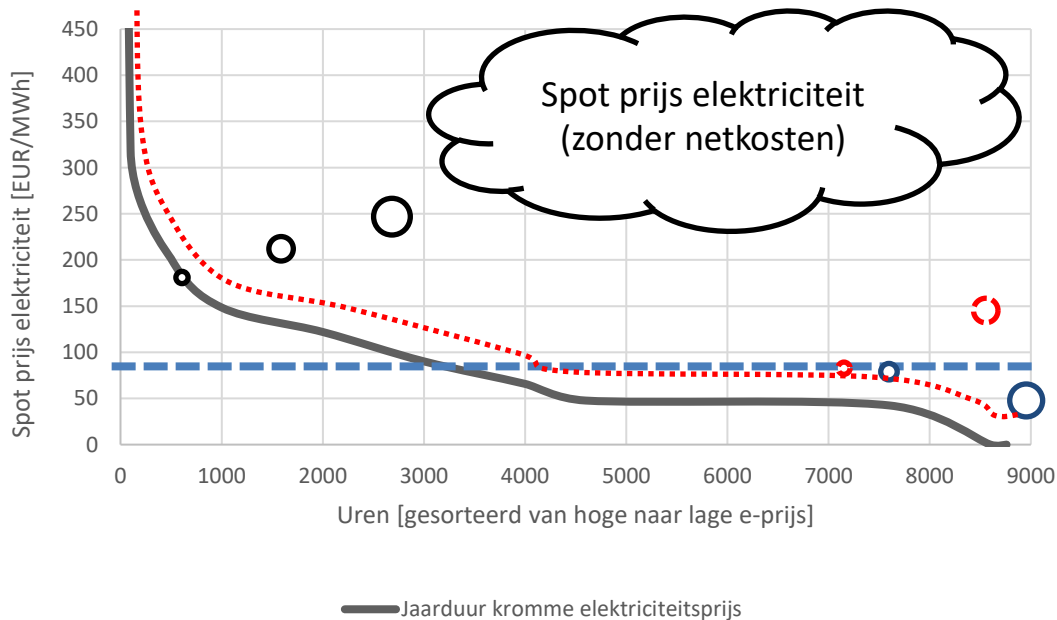
- COP=1, geen CAPEX/OPEX
- COP=1, CAPEX/OPEX e-boiler
- KEV (2022)
- * Forward prijzen
- COP=3.5, geen CAPEX/OPEX
- COP=3.5, CAPEX/OPEX warmtepomp
- + KEV (2024)
- Gevoeligheidsanalyse

CAPEX: SDE++
 elektriciteit: +30 EUR/MWh_{el}
 fossiele warmte: +15 EUR/MWh_{heat} geen vrije CO₂ allocatie, 93% ketel

De business case van elektrificatie

Variabele energiekosten/hybride

Waarde van elektrificatie van warmte =
+ Bespaarde fossiele brandstof en CO₂ kosten
– Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie
– Verschil CAPEX/OPEX kosten

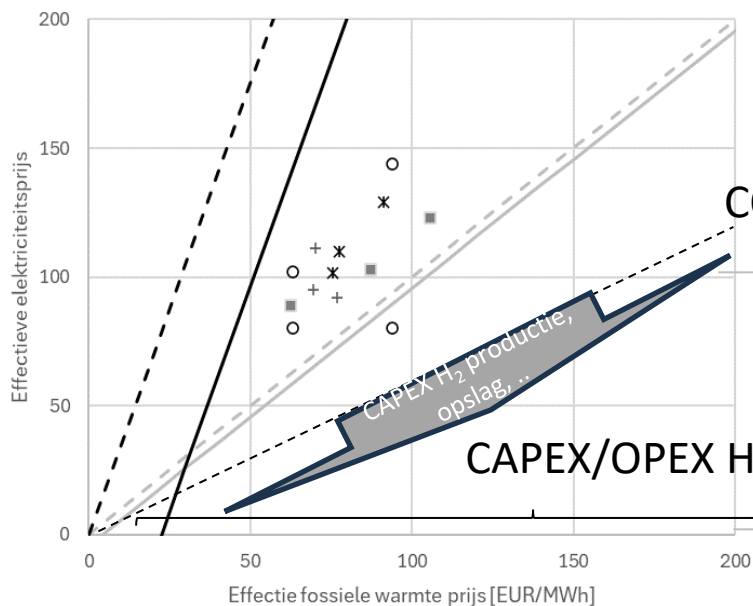


Jaarduurkromme toekomstig duurzaam elektriciteitssysteem,
jaargemiddelde elektriciteitsprijs: 100 EUR/MWh, prijs fossiele alternatief: 80 EUR/MWh

De business case van elektrificatie

Overall business case groene waterstof

$$\begin{aligned} & \text{Waarde van elektrificatie van warmte} = \\ & + \text{Bespaarde fossiele brandstof en CO}_2 \text{ kosten} \\ & - \text{Effectieve elektriciteitskosten voor elektrificatie} \\ & - \text{Verschil CAPEX/OPEX kosten} \end{aligned}$$



Warmte uit groene waterstof (TNO studie)

- 440 / 93% = 473 EUR/MWh warmte

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| --- COP=1, geen CAPEX/OPEX | --- COP=3.5, geen CAPEX/OPEX |
| — COP=1, CAPEX/OPEX e-boiler | — COP=3.5, CAPEX/OPEX warmtepomp |
| ■ KEV (2022) | + KEV (2024) |
| * Forward prijzen | ○ Gevoeligheidsanalyse |

CAPEX: SDE++
 elektriciteit: +30 EUR/MWh_{el}
 fossiele warmte: +15 EUR/MWh_{heat} geen vrije CO2 allocatie, 93% ketel