

CoE HRTech – Cluster Verduurzaming Industrie

# Maatwerk als sleutel naar een CO<sub>2</sub>-arme industrie

Brendon de Raad & Gijsbert Korevaar

Contact: [B.W.de.Raad@hr.nl](mailto:B.W.de.Raad@hr.nl)

mei 2026



**HOGESCHOOL  
ROTTERDAM**

**Toekomstmakers**

# Executive Summary

Elektrificatie van proceswarmte is één van de snelste routes naar CO<sub>2</sub>-reductie in de industrie. Tegelijkertijd blijkt in de praktijk dat generieke elektrificatieoplossingen zelden leiden tot een robuuste businesscase of structurele efficiëntiewinst. Zonder diepgaand inzicht in procestemperaturen, restwarmtestromen en procesinteracties leidt elektrificatie regelmatig tot hogere operationele kosten, inefficiënt gebruik van elektriciteit en investeringskeuzes die toekomstige optimalisatie beperken.

Dit position paper benadrukt dat procesgedreven analyse de basis moet vormen voor elke elektrificatiestrategie. Methoden zoals Pinch Analyse maken expliciet waar en op welk temperatuurniveau warmtevraag en -aanbod elkaar kunnen vinden, welke rol warmtepompen kunnen spelen en wanneer e-boilers of thermische opslag een logischere keuze zijn.

Elektrificatie is daarmee geen technologische keuze, maar een procesontwerpvoorbeeld: alleen met maatwerk, gebaseerd op procesanalyse en slimme systeemintegratie, leidt elektrificatie tot structurele CO<sub>2</sub>-reductie én economische haalbaarheid.

# Elektrificatie is maatwerk

## 1. Het proces als basis

Industriële CO<sub>2</sub>-emissies worden grotendeels veroorzaakt door de inzet van fossiele brandstoffen voor de productie van proceswarmte. Elektrificatie van deze warmtevraag wordt daarom breed gezien als een sleutelstrategie voor snelle emissiereductie. In de praktijk is elektrificatie echter zelden een eenvoudige vervangingsopgave.

Veel industriële processen zijn historisch ontworpen rond hoge temperatuurniveaus en continue warmtevraag. Het één-op-één vervangen van gasgestookte installaties door elektrische alternatieven leidt daardoor tot hogere operationele kosten, inefficiënt gebruik van elektriciteit en suboptimale benutting van beschikbare restwarmte.

Dit position paper stelt dat succesvolle elektrificatie begint bij het proces zelf. Inzicht in werkelijke procestemperaturen, warmtevraag en -aanbod door de tijd en onderlinge procesinteracties zijn bepalend voor de technische en economische haalbaarheid van elektrificatieoplossingen.

Het doel van dit paper is om te laten zien waarom procesgedreven analyse aan de hand van Pinch Analyse (in Bijlage A wordt hier een verdere toelichting opgegeven) essentieel is voor het ontwikkelen van maatwerk elektrificatiestrategieën. Niet technologie, maar het procesontwerp bepaalt welke rol warmtepompen, e-boilers en thermische opslag zinvol kunnen spelen.

Succesvolle elektrificatie begint bij een uitgebreide analyse van het productieproces waarin de warmtevraag moet worden ingezet. Dit position paper laat zien waarom proceskennis essentieel is voor het opstellen van een robuuste elektrificatiestrategie.

## 2. Waarom 1-op-1 elektrificatie faalt

Veel industriële processen hebben een continue warmtevraag die momenteel wordt ingevuld met fossiele brandstoffen. Een directe vervanging door elektrische alternatieven, zoals een e-boiler die elektriciteit 1-op-1 omzetten, lijkt op het eerste gezicht logisch, maar blijkt in de praktijk zelden economisch haalbaar door de gemiddeld hogere gas- dan elektriciteitsprijs. De toegevoegde waarde van e-boilers, eventueel aangevuld met energieopslag, zit daarom vooral in specifieke situaties, zoals momenten met lage elektriciteitsprijzen.

Warmtepompen doorbreken dit patroon doordat zij elektrische energie gebruiken om aanwezige restwarmte op te waarden. Hierdoor kan met minder elektriciteit dezelfde hoeveelheid bruikbare warmte worden geleverd. Deze efficiëntiewinst kan het verschil in energieprijzen tussen gas en elektriciteit overbruggen, maar gaat gepaard met hogere investeringskosten en is sterk afhankelijk van het vereiste temperatuurniveau.

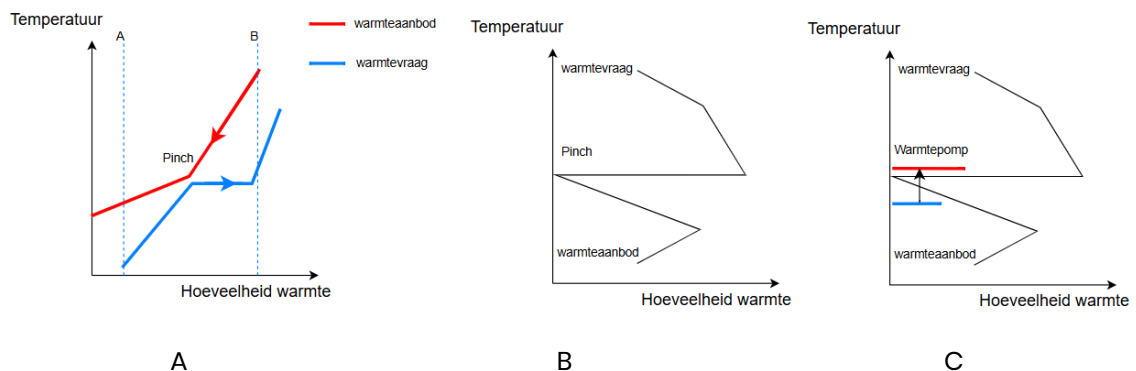
Of een warmtepomp of e-boiler economisch en technisch haalbaar is, kan daarom niet generiek worden bepaald. Dit vereist inzicht in werkelijke procestemperaturen, beschikbare restwarmte en de interactie tussen warmtebronnen en -afnemers binnen het proces.

### 3. Proceskennis als fundament

Succesvolle elektrificatie vraagt om inzicht in het industriële proces zelf. Niet de gekozen technologie, maar het temperatuurniveau waarop warmte wordt gevraagd en aangeboden (niet die het warmtenetwerk momenteel levert), warmtevraag- en aanbod door de tijd fluctueren en de mogelijkheden van de netaansluiting bepalen of elektrificatie economisch haalbaar is. Hierbij zijn twee inzichten essentieel:

#### 1. Restwarmte is warmte die in het proces vrijkomt zonder bij te dragen aan het reduceren van de netto warmtevraag.

Pinch Analyse (Bijlage A) helpt te bepalen welk deel van de warmte bruikbaar is en waar verdere warmte-integratie mogelijk is. Figuur 1.a toont typische warmtestromen van een industrieel proces. Slechts het gedeelte tussen A en B van de warme stroom kan de warmtevraag invullen; het resterende deel onder het Pinch punt verlaat het proces als onbenutte lage-temperatuur warmte. Figuur 1.b (Grand Composite Curve) laat zien dat deze restwarmte (warmteoverschot) op hogere temperaturen ontstaat, net onder het Pinch punt, en kansen bieden om tot een haalbare warmtepompoplossing te komen, Figuur 1.c.



Figuur 1.a Composite curve voorbeeld process, Figuur 1.b Grand Composite Curve, Figuur 1.c integratie warmtepomp in grand composite curve

#### 2. Energie gaat nooit verloren, maar vermindert wel in kwaliteit.

Energie gaat nooit verloren, maar kan wel in kwaliteit afnemen. Deze afname in kwaliteit bepaalt in belangrijke mate in hoeverre energie nog bruikbaar is voor nuttige toepassingen. Warmte verschilt hierin fundamenteel van andere energievormen zoals elektriciteit of mechanische arbeid. Warmte kan niet één-op-één worden omgezet in arbeid. De kwaliteit van warmte hangt samen met het temperatuurniveau. Hoe hoger de temperatuur, hoe groter het potentiële nuttige aandeel.

Een warmtepomp maakt gebruik van het kwaliteitsprincipe door hoogwaardige energie (elektrische arbeid) toe te voegen aan een lage-temperatuur warmtebron, waardoor de warmte wordt opgewaardeerd naar een bruikbaar temperatuurniveau. Hierdoor kan een warmtepomp per eenheid toegevoerde elektriciteit meerdere eenheden warmte leveren. Deze verhouding wordt uitgedrukt in de Coefficient of Performance (COP) (nadere toelichting in Bijlage B).

De maximaal haalbare COP wordt theoretisch begrensd door de verhouding tussen de afgiftetemperatuur en het temperatuurverschil tussen warmtebron en warmtevraag (de temperatuurlift). In de praktijk ligt de gerealiseerde COP lager, maar het onderliggende verband blijft geldig: een grotere temperatuurlift leidt tot lagere prestaties. De economische haalbaarheid van warmtepompen is daarom sterk afhankelijk van het vereiste temperatuurniveau. Toepassingen met zeer hoge temperatuurverschillen, zoals hogedruk stoomproductie vanuit omgevingswarmte, zijn in de meeste gevallen daarom niet kosteneffectief met een warmtepomp. Voor dergelijke toepassingen ligt directe elektrische verwarming, bijvoorbeeld met een e-boiler inclusief thermische opslag, meer voor de hand.

Het effectief inzetten van warmtepompen vraagt daarom om een systeemontwerp met zo laag mogelijk temperatuurverschil tussen bron- en afgifte (minimale temperatuurlift). De hoogste operationele besparingen met een warmtepompoplossing worden behaald met een zo hoog mogelijk COP. Ofwel, door het temperatuurverschil tussen warmtebron en -afnemer zo klein mogelijk te maken. Pinch analyse helpt om deze temperaturen inzichtelijk te krijgen en is daarmee essentieel voor een solide warmtepomp businesscase.

## 4. Elektrificatie als onderdeel van de transitie

Elektrificatie van industriële processen is geen opzichzelfstaande maatregel, maar onderdeel van een bredere transitie. In deze transitie bestaan huidige en nieuwe systemen naast elkaar. Zo gaat elektrificatie zelden alleen over het vervangen van energiesystemen. Procesaanpassingen zijn vaak nodig om de energievraag te verminderen, procestemperaturen te verlagen en restwarmte optimaal te benutten. Door deze aanpassingen kan het totaal efficiënter werken met kosteneffectieve(re) CO<sub>2</sub>-reductie tot gevolg. Dit maakt elektrificatie niet alleen een technische, maar vooral strategische opgave.

Volledige vervanging van fossiele warmtebronnen in één stap is voor de meeste industriële processen niet realistisch. Hybride configuraties, waarin elektrische oplossingen worden gecombineerd met bestaande installaties, bieden daarom vaak een pragmatische route richting CO<sub>2</sub>-reductie. Voorbeelden hiervan zijn het parallel inzetten van een e-boiler naast een gasketel of het gefaseerd integreren van warmtepompen in bestaande warmtevoorzieningen.

Hybride bedrijf is echter geen doel op zich. Het is uitsluitend zinvol wanneer het onderdeel vormt van een doordachte transitiestrategie. Zonder procesinzicht en langetermijnvisie bestaat het risico dat hybride oplossingen leiden tot suboptimale investeringen die latere optimalisatie belemmeren.

De samenhang tussen technieken is dan ook van groot belang. Niet alleen de keuze voor technologie, maar vooral de volgorde van implementatie bepaalt of elektrificatie toekomstbestendig is. Beslissingen die op korte termijn logisch lijken, kunnen onbedoeld leiden tot technologische lock-ins. Voorbeelden hiervan zijn:

- warmtewisselaars die potentiële warmtepompbronnen reeds benutten;
- procesaanpassingen die hogere procestemperaturen vereisen en daarmee de inzet van warmtepompen bemoeilijken;
- elektrificatiemaatregelen die de beschikbare netcapaciteit volledig opsouperen zonder structurele efficiëntiewinst.

Dergelijke keuzes beperken de ruimte voor verdere verduurzaming en verhogen de kosten van latere aanpassingen. Een gefaseerde aanpak zonder expliciete procesanalyse vergroot dit risico aanzienlijk. Om elektrificatie effectief onderdeel te laten zijn van de industriële transitie is een strategische, procesgedreven routekaart noodzakelijk. Deze routekaart beschrijft niet alleen welke technologieën worden ingezet, maar vooral:

- in welke volgorde maatregelen worden genomen;
- hoe procesaanpassingen en elektrificatie elkaar versterken;
- hoe flexibiliteit voor toekomstige optimalisatie behouden blijft.

Procesanalyse vormt hierbij het fundament. Dit maakt zichtbaar welke stappen logisch zijn in de tijd en welke investeringen beter worden uitgesteld of anders worden ingericht. Daarmee voorkomt het dat elektrificatie leidt tot tijdelijke oplossingen met langdurige consequenties. Elektrificatie is daarmee geen geïsoleerde maatregel, maar een strategisch instrument binnen de bredere energietransitie van de industrie.

## 5. Conclusie en aanbevelingen

Elektrificatie maakt het mogelijk om de industrie snel te decarboniseren, maar biedt geen universele oplossing. Proceskennis is de sleutel: alleen door inzicht in warmtevraag, ontwikkeling restwarmte en procestemperaturen wordt elektrificatie economisch effectief. Maatwerkroudekaarten, procesaanpassingen en slimme integratie van technologieën zorgen voor maximale CO<sub>2</sub>-reductie en operationele efficiëntie. Om tot een succesvolle elektrificatie strategie te komen is het volgende nodig:

- Analyseer het proces vóór elektrificatie: gebruik tools zoals Pinch Analyse om zicht te krijgen op hoe “rest”warmte zich ontwikkeld en hoe dit nuttig ingezet kan worden;
- Overweeg procesaanpassingen: verminder de energievraag en creëer kansen voor warmtehergebruik en warmtepompen;
- Ontwikkel maatwerk roudekaarten: combineer technologieën strategisch en voorkom lock-ins door de plaatsingsvolgorde te bestuderen.

## 6. Stand van zaken en vooruitblik

Naast de succesvolle uitrol van e-boilers voor flexibiliteitsdoeleinden binnen verschillende sectoren wint ook efficiënte elektrificatie van industriële processen snel aan terrein. Zo experimenteert FrieslandCampina in Maasdam met een warmtepomp in het pasteurisatieproces [1], opende Holland Malt recent 's werelds eerste volledig elektrische mouterij met een 22 MW warmtepomp [2] en draait bij DOW Chemical in Terneuzen sinds 2021 een stoomcompressiewarmtepomp (MVR) die jaarlijks 13.500 ton CO<sub>2</sub> bespaart [3]. De toenemende vraag naar elektrificatieoplossingen sluit aan bij de ambities uit de 'Actieagenda Elektrische Industrie' van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei [4] en wordt verder onderbouwd door de snel opvolgende internationale ontwikkelingen die het Internationaal Energieagentschap signaleert [5]. Deze pioniersprojecten markeren slechts een fractie van de technologische versnelling die momenteel gaande is.

Komt u ook op e-stoom?

## Referenties

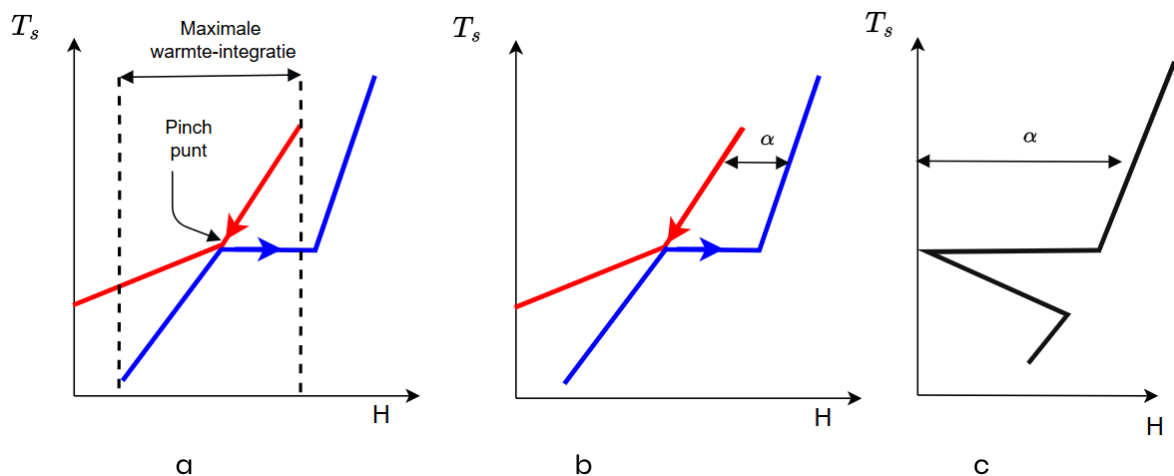
1. NPVI. *Warmtepomp met stoom volgende stap in elektrificatie FrieslandCampina*. 2025 [cited 2026 05/03]; Available from: <https://www.verduurzamingindustrie.nl/inspiratie/2991161.aspx?t=Warmtepomp-met-stoom-volgende-stap-in-elektrificatie-FrieslandCampina>.
2. NPVI. *Holland Malt opent volledig elektrische mouterij*. 2024 [cited 2026 05/03].
3. Experts, B.E. *Stoomcompressor bij DOW presteert energetisch beter dan verwacht*. 2021 [cited 2026 05/03]; Available from: <https://www.verduurzamingindustrie.nl/actueel/nieuws/2681522.aspx?t=Holland-Malt-opent-volledig-elektrische-mouterij>.
4. Groei, M.v.K.e.G., *Actieagenda Elektrificatie Industrie*. 2025.
5. Zühlsdorf, B., Andersen, M. P., Tammone, C. et al. *State of the art and ongoing developments for systems and components*. 2025 [cited 2026 05/03]; Available from: <https://heatpumpingtechnologies.org/project68/task1>.

# Bijlage A – Pinch Analyse

Energie gaat nooit verloren, maar degraderen kan het wel. Warmte toegevoerd aan een proces komt er veelal dan ook kouder uit. Maar vaak warm genoeg om nog gebruikt te kunnen worden in andere processen. Dit cascaderen van warmte is een van de voornaamste efficiëntie maatregelen geweest in de afgelopen 50 jaar en heeft geleid tot complexe netwerken van warmtewisselaars. Het ontwerp van deze netwerken is veelal gedaan met behulp van Pinch analyse.

Pinch analyse bepaalt de maximale hoeveelheid warmte die intern teruggewonnen kan worden. De analyse ontleent haar naam aan het (Pinch/knijp) punt waar de samengestelde lijn van alle warme (warmte-leverende) stromen de samengestelde lijn van alle koude (warmte-vragende) stromen nadert, zoals in Fig. A.1.a. De overlap tussen deze lijnen, vaak "Composite Curves" genoemd, geeft aan hoeveel warmte er intern met warmtewisselaars kan worden terug gewonnen. Op het Pinch punt is het temperatuurverschil tussen de lijnen het kleinst en daarmee de warmteoverdracht het meest gelimiteerd. De optimale hoeveelheid intern uitgewisselde warmte is dan ook een balans tussen energiekosten en de kosten van de warmtewisselaar.

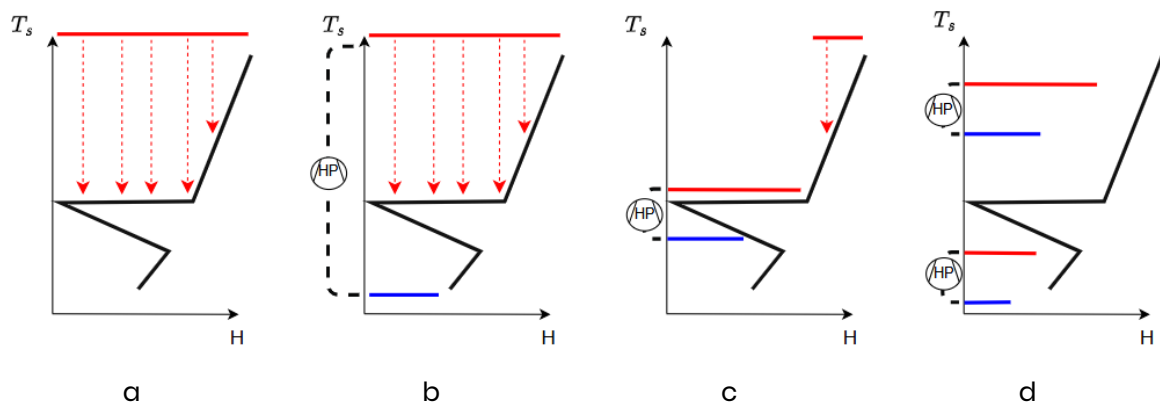
Doordat het Pinch punt een limiet stelt aan de interne warmte-uitwisseling verdeelt het een systeem in een regio met een netto warmte tekort (boven het Pinch punt) en een netto warmte overschot (onder het Pinch punt). In Fig. A.1.b-c is deze netto warmtevraag of -overschot per temperatuurstap inzichtelijk gemaakt in een zogenaamde "Grand Composite Curve". Om het proces continue te laten verlopen moet dan ook warmte worden toegevoerd boven het Pinch punt en warmte worden afgevoerd onder het Pinch punt.



Figuur A.1 a. Composite curves van een proces met de warme stromen in rood en de koude stromen in blauw en temperatuur en warmtevermogen op de Y- en X-as. B. Netto warmteverschil tussen de warme en koude stroom ( $\alpha$ ) getekend tussen composite curves. C. Grand composite curve waarin  $\alpha$  uitgezet is voor T.

Naast het begeleiden van het ontwerpen van een warmtewisselaar netwerk biedt het hiermee ook richtlijnen voor de optimale inpassing van energiesystemen. Gezien het voor een gasgestookte installatie weinig uitmaakt of stoom nu of 2 of 20 bar wordt geproduceerd, zijn energiesystemen van oudsher uitgelegd op hoge drukken (temperaturen). Naast opstart voordelen leidt dit onder andere tot kleinere warmtewisselaars en goedkoper warmtetransport. In de Grand Composite Curve van Fig. A.2a is een dergelijke integratie inzichtelijk gemaakt. De integratie van een e-boiler kan op dezelfde manier. Voor een warmtepomp is dit minder interessant gezien de hoge temperatuurlift die nodig is om omgevings/restwarmte om te zetten in

hoge druk stoom (Fig. A.2.b). Een nauwere integratie met het gros van de warmtevraag en warmteaanbod op hoge temperatuur, zoals in Fig. A.2.c, leidt tot hogere technische warmtepomp prestaties. Een dergelijke warmtepomp kan worden gecombineerd met een hoge temperatuur warmtevoorziening om tot haalbare business cases te komen. Zo zullen in het voorbeeld de nabije CO<sub>2</sub>-doelstellingen al gehaald worden als de warmtepomp wordt ondersteund door de huidige gasgestookte ketel, maar kan een e-boiler met of zonder thermische opslag hier ook een rol spelen. Belangrijk is wel dat de warmtepomp juist geplaatst wordt en warmte van onder naar boven het Pinch punt verplaatst. Doet het dit niet, zoals in de voorbeelden van Fig. A.2.d, dan vind er geen energiebesparing plaats. In het geval dat de warmtepomp boven het Pinch punt wordt geplaatst verplaatst het namelijk warmte binnen een regio met een netto tekort, ofwel warmte die anders al nuttig gebruikt had kunnen worden. Door dit te doen werkt een warmtepomp op systeemniveau als een e-boiler, omdat alleen de toegevoerde elektriciteit de energievraag stilt. Desalniettemin is dit gunstiger dan het plaatsen van een warmtepomp onder het Pinch punt waar al een netto warmteoverschot aanwezig was slechts de koelvoorziening verder wordt belast. Door vanuit het Pinch beeld te werken kan correcte plaatsing van een warmtepomp of andere energietechnieken worden gegarandeerd.

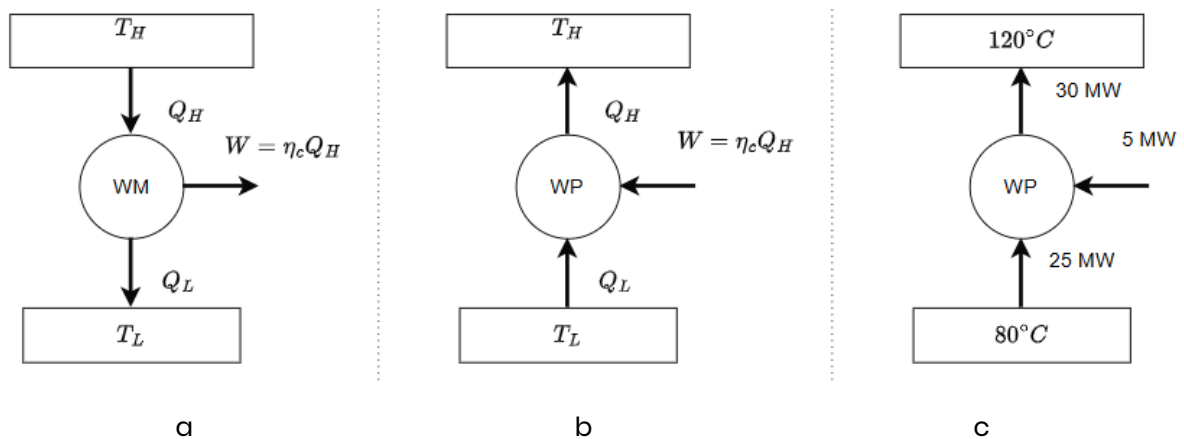


Figuur A.2. a. Warmtevoorziening in een opzet met een boiler. B. Warmtevoorziening met warmtepomp als losstaande installatie. C. warmtepomp geïntegreerd in het systeem ondersteund door ketel, d. misplaatste warmtepompen.

# Bijlage B – Warmtepomp en COP

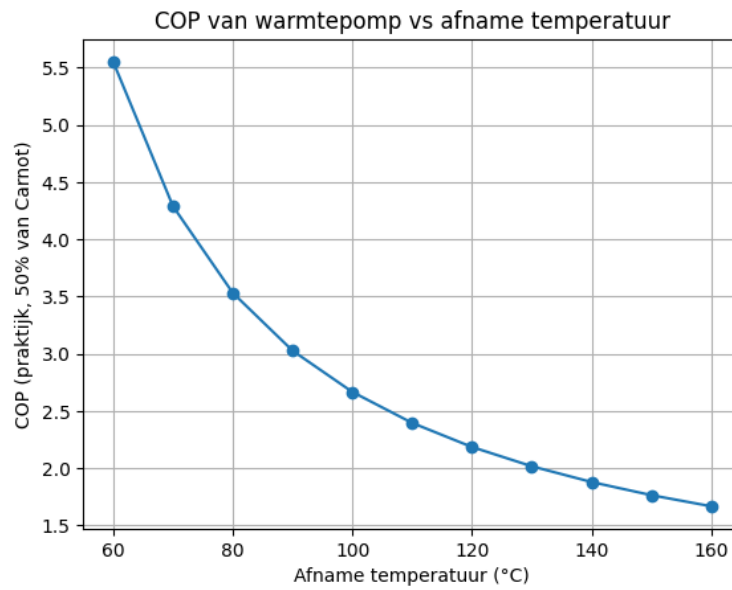
## Werking op systeemniveau

Een warmtepomp maakt het mogelijk om lage temperatuur restwarmte wederom in te zetten in processen op een hogere temperatuur, zie bijlage 1 Pinch Analyse. Dit is mogelijk door de toevoer van energie, veelal in de vorm van compressor arbeid aangedreven door een elektromotor. Thermodynamisch is een warmtepomp dan ook een omgekeerde warmtemotor. Een warmtemotor (Fig. B.1.a) zet hoge temperatuur ( $T_H$ ) warmte ( $Q_H$ ) om in arbeid ( $W$ ) en restwarmte ( $Q_L$ ). De warmtepomp van Fig. B.1.b draait dit proces om. De Coefficient of Performance (COP) van de warmtepomp is gedefinieerd als de hoeveelheid geleverde warmte gedeeld door de toegevoegde arbeid/elektriciteit. De COP van de warmtepomp in Fig. B.1.c is dan ook  $30 \text{ MW}/5 \text{ MW} = 6$ .



Figuur B.1.a Voorbeeld van een warmtemotor die hoge temperatuur warmte omzet in arbeid en restwarmte. B. Warmtepomp die warmte van een lage temperatuur met de toevoer van arbeid omzet in bruikbare warmte. C.

Het thermische rendement van een ideale warmtemotor is gelijk aan de Carnot efficiëntie. Deze efficiëntie is als volgt gedefinieerd:  $\eta_c = (T_H - T_L)/T_H$ . Voor het omgekeerde proces, de warmtepomp, is de maximale prestatie dan ook het omgekeerde:  $COP_c = T_H/(T_H - T_L)$  ofwel  $COP_c = T_H/\Delta T_{ift}$ . In de praktijk ligt de efficiëntie van een warmtepomp vaak op 40-50% van het Carnot COP. Fig. B.2 laat zien hoe de ontwikkeling van de COP eruit ziet voor een warmtepomp met een 50% Carnot efficiëntie en een brontemperatuur van  $30^\circ\text{C}$ .



Figuur B.2 De ontwikkeling van de Coefficient of Performance voor een warmtepomp die opereert vanaf een warmtebron van 30 °C met een efficiëntie van 50% t.o.v. het ideale geval