

Best Practice Industrielle Wärmepumpen

Inleiding

Warmtepompen geven de mogelijkheid om ruimten, water of processen te verwarmen met een efficiëntie groter dan 100%; dit door te putten uit een (rest)warmtebron. Vanuit het verbranden van aardgas is dat een vreemde gedachte. De kern is dat een warmtepomp bestaande energie opwaardeert naar een hoger temperatuurniveau. In een aantal gevallen is het mogelijk de koude kant als koeling ook nuttig te gebruiken.

Deze 'Best Practice Warmtepompen' is voor bedrijven, die staan voor de keuze voor invulling van de warmtevraag voor ruimteverwarming, tapwater en processen of de huidige wijze van verwarming willen herzien bijv. bij het afstappen van gas of stoom. Voor bedrijven, die beschikken over een hoeveelheid restwarmte, kan de inzet van een warmtepomp om de warmte op te waarden om uit te koppelen aan derden interessant zijn; met de regionale Warmtetransities plannen, is hier een goede businesscase voor.

In deze Best Practice wordt een beeld gegeven van de potentie van de warmtepomp, recente ontwikkelingen, een beschrijving van de technologie, praktisch toepassingsgebied, businesscase en subsidies verstrekt door de overheid.

Scope van deze Best Practice:

- Mechanische dampcompressie
- Thermische dampcompressie
- Mechanische compressie
- Thermisch; sorptie
- Nieuwe ontwikkelingen

Bijzondere aandacht is er voor de gesloten mechanische dampcompressie warmtepomp, welke meer en meer wordt toegepast in de transitie om van het gas af te stappen.

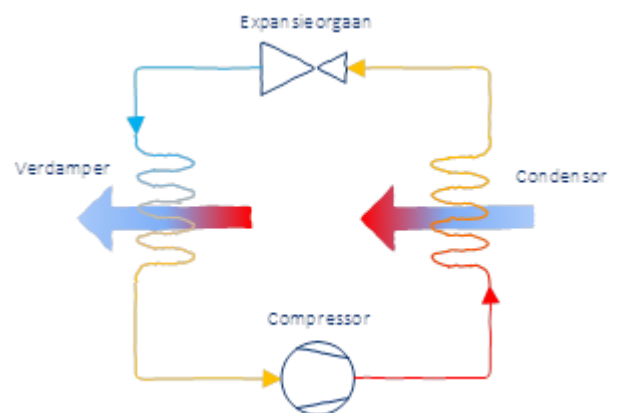
Ingegaan wordt op:

- Soorten warmtepompsystemen
- Soorten warmtebronnen
- Applicatiegebieden (tapwater, ruimteverwarming, processen)
- Componentenkeuze
- Onderhoud
- Inpassing in de omgeving
- Subsidies & Fiscale regelingen

I. Algemene technologiebeschrijving

Alle soorten warmtepompen nemen bij lage temperatuur warmte op, die bij hoge temperatuur weer wordt afgegeven.

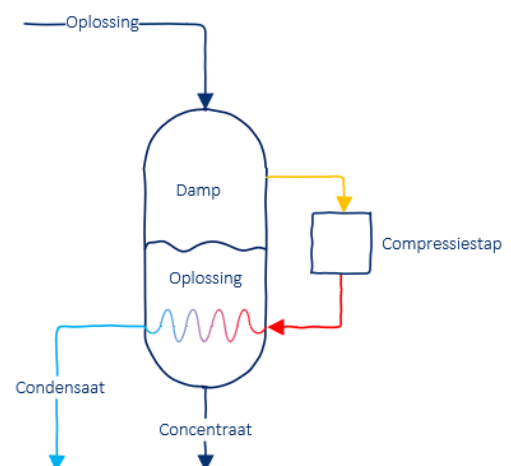
Gesloten warmtepompen (meest voorkomend) werken door een vloeistof bij lage temperatuur te laten verdampen, te comprimeren, de damp bij hoge temperatuur te laten condenseren en vervolgens weer te expanderen tot lage druk. Dit betreft een kringloopsysteem. Aan het systeem wordt arbeid toegevoerd (in de compressor) en er wordt warmte verplaatst van de verdamper (lage temperatuur) naar de condensor (hoge temperatuur). In woningen en kantoren draaien volgens het CBS in 2019 166.000 warmtepompen. Er werden 43.079 nieuwe units verkocht. In de industrie gaat het waarschijnlijk om enkele tientallen operationele systemen.



Figuur 1 - Gesloten warmtepomp

Open warmtepompen

Een open warmtepomp is een warmtepomp waar het condensaat niet wordt geëxpandeerd en wordt teruggevoerd; er is geen sprake van een kringloop.



Figuur 2 - Open warmtepomp

COP

De efficiëntie van het warmtepompsysteem wordt doorgaans aangeduid met de *COP* (Coëfficiënt of Performance), dit wordt gedefinieerd als de verhouding van geleverde warmte t.o.v. het energiegebruik. Hoe hoger de COP, hoe beter de prestatie.

Ook de maat SCOP (Seasonal Coëfficiënt of Performance) komt voor, hierbij wordt een gemiddelde efficiëntie gedurende een seizoen bepaald met aandacht voor variërende belasting en opwek-rendement, afhankelijk van het buitenklimaat.

In normen en regelgeving (o.a. Ecodesign) komen ook andere prestatiebeschrijvingen van warmtepompen voor. Dit is veelal gekoppeld aan ruimte- of tapwaterverwarming van woningen of kantoren. Voor industriële processen zijn deze waarden niet representatief.

II. Inzet warmtepomp

Een warmtepomp kan bijdragen aan het efficiënt verwarmen van een ruimte/proces. Dit is wanneer:

- Een warmtepomp de gewenste temperaturen (efficiënt) kan bereiken.
- Er een warmtebron is, waaruit kan worden geput.

Efficiënte inzet

Bij ontwerp van het warmtepompsysteem is het gewenst de temperatuurlift (intrede/uitrede warmtepomp) te minimaliseren. Hoe lager de lift, hoe hoger de efficiëntie. In de praktijk betekent dit dat binnen een bedrijf warmtestromen optimaal op elkaar dienen te worden afgestemd, wat betreft het temperatuurniveau. Een vuistregel is, dat elke graad temperatuurverschil goed is voor 2 tot 3% extra energiegebruik. Verder geldt voor warmtepompen dat een temperatuurlift van meer dan 50K in de regel leidt tot het realiseren van een tweede compressietrap. Systemen worden dan snel duurder.

Voorbeeld: Een zuivelbedrijf heeft twee stoomketels, samen goed voor 4 MW op 8 bar en verwarmd daarmee processen, schoonmaakwater en de gebouwverwarming. Bij herontwerp naar een warmtepomp wordt dit een systeem voor ruimteverwarming op 45°C, schoonmaakwater op 70°C en proceswater op 95°C. Er is een paar honderd kW stoom nodig. Lage drukstoom van 120°C blijkt hiervoor te volstaan. Waar één op één vervangen van stoomketel voor een warmtepomp, die ook 8 bar stoom maakt onmogelijk is, kan met herontwerp wel een proces aardgas vrij gemaakt worden.

III. Recente ontwikkelingen

Warmtepomp ter vervanging van stoomketel

Een stoomketel is bij veel bedrijven benodigd voor het productieproces. In Nederland staan er naar verwachting ruim 4.000. Conventioneel wordt stoom geproduceerd met een gasbrander. Recent is voor de stoomketel een alternatief ontstaan in de vorm van de hoge temperatuur warmtepomp. De warmtepomp produceert water met een temperatuur oplopend tot 130°C. Het water wordt geflashed tot lage druk stoom van 127°C. Er zijn diverse concepten in ontwikkeling, die atmosferische reststoom van 100°C opwaarderden naar hoge temperaturen oplopend tot 180°. De marktintroducties worden komende jaren verwacht.

Warmtepomp voor hoge temperatuur verwarming

De hogere temperaturen (oplopend tot 95°C) zijn mogelijk gemaakt door ontwikkelingen op het gebied van compressoren, oliën en het

gebruik van koudemiddelen als o.a. propaan, ammoniak, CO₂ en (iso)butaan. Ook diverse synthetische middelen zijn geschikt voor hogere temperaturen.

Met de warmtepomp wordt het mogelijk om bedrijven met een hoog temperatuur afgiftesysteem (vaak gezien wanneer voorheen een gasgestookte cv-ketel aanwezig was) met warmtepomp te verwarmen en af te stappen van het gas. Met de warmtepomp kan tevens de tapwater vraag van > 65°C worden ingevuld. Waar warmte niet binnen het bedrijf gebruikt kan worden, is deze temperatuur interessant om bijvoorbeeld warmte af te geven aan een stadsverwarmingsnet.

Warmtepompen met synthetische koudemiddelen

Andere ontwikkelrichting is het gebruik van nieuwe synthetische koudemiddelen. Voorbeelden hiervan zijn de nieuwe synthetische R32 met GWP van 677 of HFO's. Deze warmtepompen kunnen in de regel met buitenlucht als bron tot 60°C water maken. Gekoppeld aan restwarmtestromen zijn temperaturen tot 80°C mogelijk. Het betreft hier een technologie, die toegepast wordt in utiliteitsector. De vaak algemene brochures sluiten dan niet aan op industriële processen.

Gecombineerde opwekking van warmte & koude en gebruik restwarmte

Door stijgende energieprijzen en de uitdaging van de elektrificatie van Nederland is de waarde van warmte steeds hoger geworden. Dit betekent dat restwarmte, bijv. van een koelinstallatie, niet langer als afvalproduct wordt gezien, maar meer en meer nuttig wordt aangewend. Soms kan dit direct (bijv. uit de oliekoeling) na het opwaarderden van de warmte, met een externe warmtepomp. Een andere optie die steeds vaker wordt gezien, is het in verhogen van de condensatiedruk van een koelinstallatie; hierdoor is de warmte op een hogere temperatuur beschikbaar tegen een geringe hoeveelheid extra energie. De koelinstallatie zelf fungeert hierbij als het ware als een warmtepomp. Mismatch tussen tijdstippen van vraag en aanbod van warmte/koude kan worden opgevangen met warmtebuffers.

Overige ontwikkelingen - EC ventilatoren

Op de buitenverdampers van een lucht/lucht of lucht/water warmtepomp is een ventilator aanwezig. In recente jaren hebben er zich ontwikkelingen voor gedaan op het gebied van ventilatoren; de EC motor wordt vaker toegepast. EC motoren zijn elektromotoren met permanente magneten op de rotor. EC ventilatoren kennen een hoger rendement, groter werkbereik en eenvoudig in toeren te regelen, dan de traditionele AC ventilatoren.

Toekomstige speerpunten innovatie

In het rapport van TNO¹ over de roadmap voor warmtepompen staan een aantal innovatielijnen uitgewerkt. De zes belangrijkste innovatielijnen voor de ontwikkeling van warmtepompen in Nederland zijn:

- De compatibiliteit met Smart Grids,
- Integratie met andere installaties en bouwdelen,
- Geluidsreductie,
- Alternatieve warmtepomptechniek,

¹ Roadmap Warmtepompen, TNO, 2017.

- Andere koudemiddelen,
- Innovaties in productielijn/opschaling.

Dit betreft warmtepompen voor ruimteverwarming en tapwater.

Voor de industrie bestaat volgens TNO² de warmtevraag in Europa uit circa 85% procesverwarming en 15% ruimteverwarming. Van de procesverwarming is de warmtevraag per temperatuurniveau:

- | | |
|------------------------------|---------|
| - Toepassingen tot 100°C | ca. 11% |
| - Toepassingen van 100-200°C | ca. 26% |
| - Toepassingen van > 200°C | ca. 63% |

Huidige stand van de techniek is dat warmtepomp tot een temperatuur van 100°C met huidige techniek goed mogelijk is. Warmtepompen van 100-200°C zijn onderwerp van onderzoek; hiervoor zijn nog weinig leveranciers en de techniek is nog in ontwikkeling. Voor temperatuurniveau 's > 200°C zijn vooralsnog geen warmtepomp oplossingen. Hier kan herontwerp van een proces, om met lagere temperaturen te werken, een oplossing zijn.

IV. Typen warmtepompen

Warmtepompen vallen onder te verdelen in open en gesloten warmtepompsystemen. De open warmtepompsystemen kunnen mechanisch of thermisch aangedreven zijn; bij de gesloten warmtepompen kan het gaan om mechanische compressie, ab- en ad-sorptiewarmtepompen. Onderstaand een beschrijving van elk van de systemen met bijbehorende eigenschappen en aandachtspunten.

² Strengthening Industrial Heat Pump Innovation. Decarbonizing Industrial Heat. TNO, Robert de boer

Open systemen

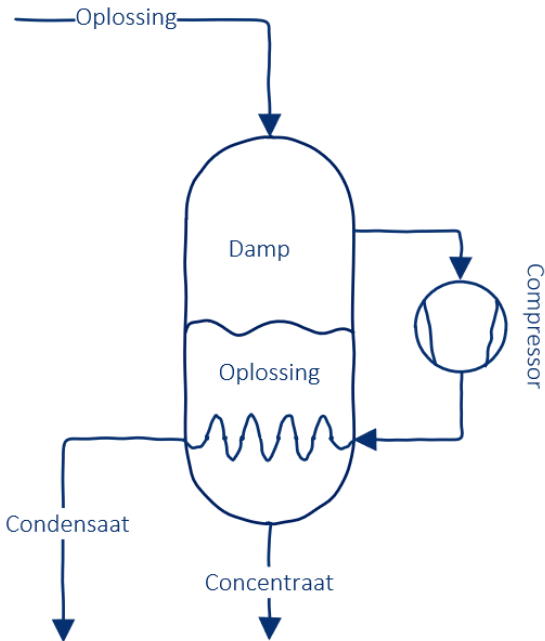
I. Typen open systemen

Mechanische dampcompressie

Bij mechanische dampcompressie wordt een vloeistof tot koken gebracht (ingedampt) door de druk te verlagen. De compressor zorgt hier voor de drukverlaging, vervolgens wordt de damp verdicht door de compressor, afgekoeld door de in te dampen vloeistof tot deze condenseert en wordt afgevoerd. Resultaat is een vloeistof, welke is ingedampt en verwarmd door de condenserende damp.

Dampcompressie wordt gezien bij het drogen van vloeibare producten; indikken, concentreren en indampen van vloeistoffen; destilleren, scheiden van vloeistoffen.

Applicatiegebied (bij waterdamp)	80-200°C
Temperatuurlift	5-50°C (praktijk 30°C)
Minimale rendabel	2-3MWth of 3-5t / hr stoom
COP	> 5



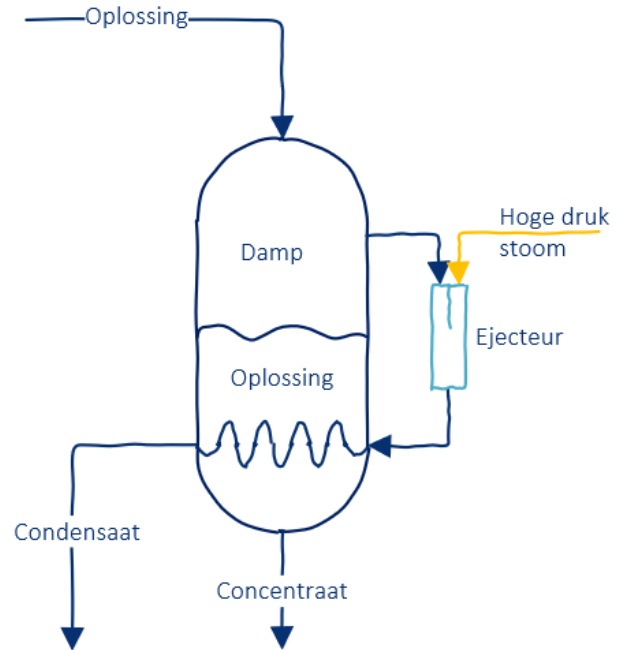
- ✗ Hogere investeringskosten dan thermische dampcompressie
- ✓ Energiebesparing t.o.v. thermische dampcompressie
- ✓ Lage T.V.T. t.o.v. thermische dampcompressie

Compressie kan plaatsvinden door (elektro)motor of stoomturbine.

Thermische dampcompressie

Bij thermische dampcompressie wordt met een ejecteur lage druk damp vanuit een proces met hoge druk stoom gecomprimeerd. Hierbij wordt het in temperatuur verhoogd en vervolgens wordt de damp gecondenseerd. Resultaat is ook hier een vloeistof, welke is ingedampt en verwarmd door de condenserende damp.

Applicatiegebied (bij waterdamp)	60-180°C
Temperatuurlift	25°C (eentraps)



- ✓ Lagere investeringskosten dan mechanische dampcompressie
- ✗ Hoger energiegebruik dan mechanische dampcompressie
- ✗ Hogere T.V.T. t.o.v. thermische dampcompressie

De warmtepompcyclus wordt hier aangedreven door de hoge druk stoom.

II. Applicatiegebieden

Dampcompressie warmtepompen worden gezien in de industrie o.a. drogen van vloeibare producten; indikken, concentreren en indampen van vloeistoffen; destilleren, scheiden van vloeistoffen.

Concrete voorbeelden hiervan zijn bijv. het scheiden van propaan en propaan in de chemie; concentreren van melk tot melkpoeder in de zuivelindustrie of hergebruik van stoom in de papierindustrie.

III. Compressoren

Omdat er bij open systemen sprake is van lage drukverhoudingen en grote volumestromen worden hier vooral axiaalcompressoren toegepast. Bij zeer geringe drukverhoudingen, zoals bij indampinstallaties zonder kookpuntsverhoging kunnen ook hogedrukventilatoren toegepast worden. Bij hogere drukverhoudingen én grote volumestromen komen eigenlijk alleen centrifugaalcompressoren in aanmerking. Centrifugaalcompressoren worden veel toegepast in systemen met relatief grote debieten én relatief hoge drukverhoudingen. Zo mogelijk dient men, zowel uit oogpunt van compressorkosten, als uit oogpunt van COP met ééntrapssystemen te volstaan.

Eigenschappen en rendementen van de compressoren zijn circa als volgt:

Categorie	Volumestroom [m ³ /h]	Drukverhouding	Isentropisch rendement
<i>Dynamische</i>			
axiaal	50.000 – 500.000	1,2 – 1,8	80%
centrifugaal	500 – 300.000	1,8 – 3,0	70 – 80%

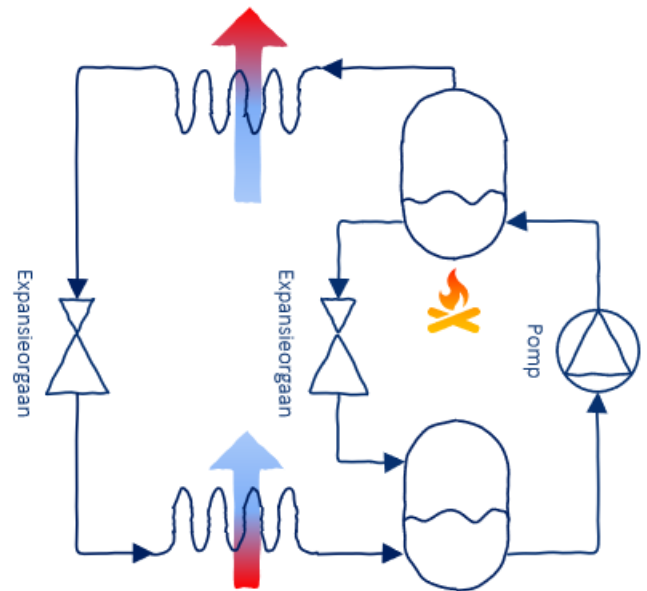
Gesloten systemen – Thermische; sorptie

Het aantal thermische sorptiesystemen in Nederland is beperkt. Dit komt door de vereiste beschikbaarheid van restwarmte en de minimale temperatuur, die de restwarmte moet hebben. De opkomst van hoog temperatuur mechanische warmtepompen heeft het perspectief voor sorptie systemen verkleind. Binnen procesindustrie zijn er toepassingen denkbaar. Tweede nadeel is dat er nauwelijks leveranciers van deze technologie zijn.

I. Absorptie

In een absorptiewarmtepomp wordt gebruik gemaakt van warmte als drijvende kracht. De werking van de absorptiewarmtepomp berust op het principe dat bij dezelfde druk het kookpunt van een mengsel hoger is dan dat van een zuivere stof. Voor aandrijving wordt gebruik gemaakt van lage druk stroom. Er kan een COP tot 1,6 worden bereikt.

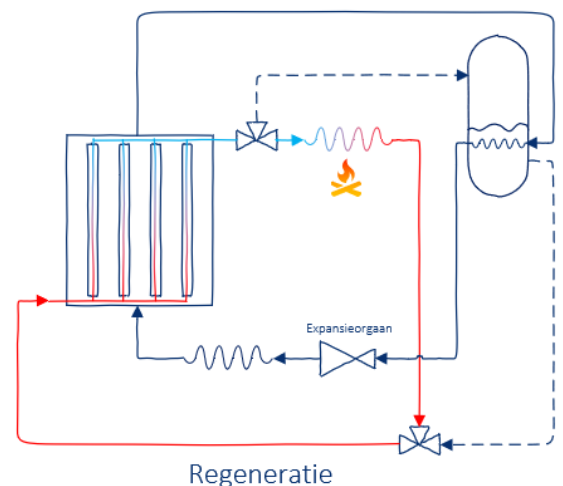
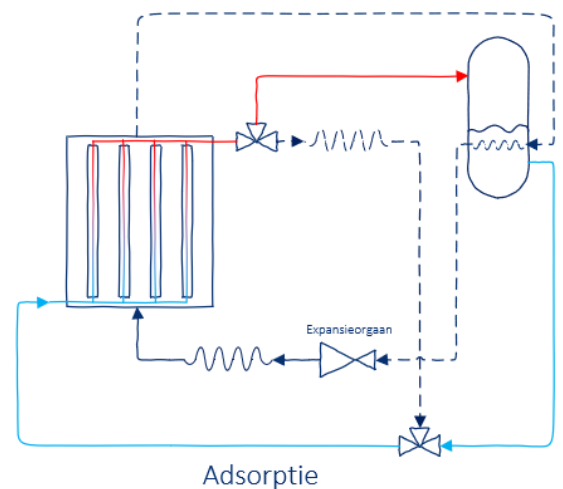
COP 1,6
PER 1,3-1,5



II. Adsorptie

De adsorptiewarmtepomp werkt op eenzelfde wijze als de absorptiewarmtepomp, echter dan met een vaste stof i.p.v. een vloeistof. Voorbeelden van de gebruikte stoffen zijn:

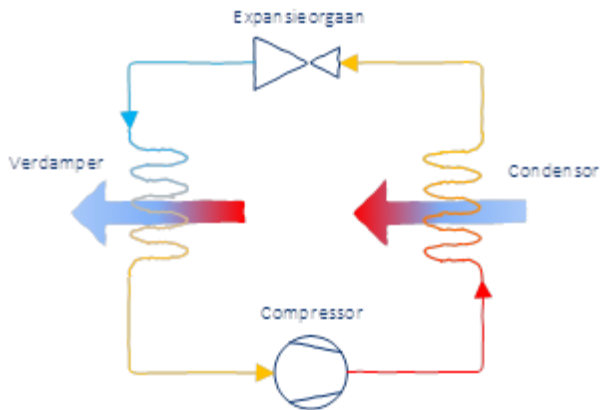
- Silicagel – H₂O
- Zeoliet – H₂O
- Actief kool – MeOH
- Actief kool/Zout - NH₃



Gesloten systemen – Mechanische compressie

In de gesloten damp-compressie-cyclus wordt achtereenvolgens het gasvormig koudemiddel gecomprimeerd, afgekoeld tot deze condenseert tot een vloeistof, geëxpandeerd en verdampt wanneer de cyclus zich herhaalt. Het is een identieke cyclus als voor de koeltechniek, focus ligt echter op de warmteproductie.

Veel overwegingen als beschreven in de *Best Practice Koudetechniek* zijn ook hier relevant.



Figuur 3 – Gesloten warmtepomp met mechanische dampcompressie

De warmtepompcyclus wordt aangedreven door een elektromotor.

Applicatiegebied	30-130°C
Temperatuurlift	20-50°C (per trap)
COP	2,5-6

I. Applicatiegebieden

Meest voorkomende applicatiegebieden van een mechanische dampcompressie warmtepomp zijn:

Tapwater

Bereiding van tapwater vraagt i.v.m. risico op legionella een temperatuur van minimaal 60°C. Deze temperatuur hoeft niet altijd 24/7 te worden gehandhaafd, kortstondig verwarmen tot deze temperatuur kan voldoende zijn.

Aandachtspunten:

- Legionella preventie in acht te nemen, echter soms kan alleen tijdelijk booster naar hoge temperatuur afdoende zijn.

Verder wordt in processen tapwatertemperatuur bepaald door het reinigingsproces. Voor sommige eiwitten is 60°C te warm, voor bepaalde vetten 60°C weer te koud.

Ruimteverwarming

Warmtepompen van industriële schaal worden meer en meer ingezet voor ruimteverwarming. Ruimtetemperatuur varieert hier van het vorstvrij houden tot voldoen aan comfortvereisten in kantoren en laboratoria.

De ontwerp temperatuur van het afgiftesysteem speelt een belangrijke rol in de uiteindelijke efficiëntie van het verwarmingssysteem met warmtepomp: hoe lager, hoe beter. Doorgaans kan bij een vloerverwarmingssysteem met een lagere aanvoertemperatuur worden gewerkt, dan bij radiator of luchtverwarmers. Industriële

processen lopen vaak langer dan openingstijden van kantoren. Door de nachtverlaging van kantoorverwarming uit te schakelen en 's nachts kantoor op temperatuur te houden, kan het verwarmingssysteem met lagere temperaturen werken. De aanwarmingspiek 's ochtends wordt dan verkleind.

Recente ontwikkelingen op het gebied van hoge temperatuur warmtepompen bieden oplossingen kantoren en laboratoria met een acceptabele COP gasloos te maken.

Aandachtspunten:

- Verbeter isolatie en beperk verliezen door ramen, deuren en ventilatiesystemen
- Ontwerp afgiftesysteem: bij voorkeur vloerverwarmingssysteem of lage temperatuur luchtverwarmers.

Processen (drogen, chemie)

Benodigd temperatuurniveau wordt ingegeven door het proces. Bij het ontwerp van het proces dient bij voorkeur rekening gehouden te worden met ontwerp op zo laag mogelijke temperatuur. De gevraagde temperatuurlift voor de warmtepomp blijft dan beperkt, waardoor de efficiëntie hoog is.

Door de beschikbaarheid van stoom en warmwatersystemen zijn veel processen ontworpen met relatief kleine warmtewisselaars. Door het warmtewisselend oppervlak te vergroten, kan de temperatuur verlaagd worden.

Aandachtspunten:

- Onderzoek de mogelijkheden tot temperatuurverlaging op warmtewisselaars in het productieproces. Elke graad lager bespaart bij een warmtepomp 2 tot 3% energie.

II. Warmtebronnen

Een warmtepomp put uit een bron op lagere temperatuur en waardeert deze warmte op tot een hogere temperatuur.

Bronnen waaruit kunnen worden geput zijn:

Lucht

Bij een lucht-/lucht of lucht-/water-warmtepomp is de buitenlucht of proceslucht de warmtebron waar uit wordt geput. In het concept verdampt het koudemiddel in een verdampers, waar het overgaat van de vloeistoffase naar de gasfase. Hierbij wordt warmte uit de lucht onttrokken. Bij processen kunnen dit vrij hoge temperaturen zijn. Van belang is vast te stellen of afkoelen van proceslucht tot problemen kan leiden, zoals condensatie van stoffen of verminderde pluimvorming. Het koudemiddel wordt in de compressor gecomprimeerd, waar de temperatuur stijgt en vervolgens door een condensor geleid, waar de warmte nuttig wordt afgestaan aan (binnen)lucht of water.

Wanneer de buitenlucht de bron is varieert de brontemperatuur gedurende het jaar. Ook proceslucht

kan wisselende temperaturen hebben. Hiermee fluctueert ook de capaciteit en de COP van de warmtepomp. Er dient rekening gehouden te worden met ontdooitijden en ontdooivoorzieningen op en van de verdamer. Bij verdampen onder 0°C kan zich ijs vormen waardoor de verdamer dichtgroeit.

De verdamperventilator kan terug geregeld worden om energie te besparen.

Best Practice is om te streven naar efficiëntie van warmtepompen voor ruimteverwarming van tenminste:

Lucht/water warmtepomp SCOP $\geq 4,3$ ($\eta_{s,h} \geq 297\%$)

Lucht/lucht warmtepomp SCOP $\geq 4,0$ ($\eta_{s,h} \geq 276\%$)

Of afhankelijk van de temperatuurlift, voor zowel toepassing als ruimteverwarming, als verwarming van processen:

COP $\geq 4,0$ bij dT tot +40 °C

COP $\geq 3,5$ bij dT van +40 °C tot +50 °C

COP $\geq 3,0$ bij dT van +50 °C tot +60 °C

COP $\geq 2,5$ bij dT van +60 °C tot +70 °C

COP $\geq 2,3$ bij dT $\geq +70$ °C

Bodem/Oppervlakte water

Bij een bodem of oppervlaktewater warmtepomp is er een bron met nagenoeg constante temperatuur, waar uit wordt geput.

De warmtepompen zijn doorgaans uitgevoerd als water-/water warmtepompen.

Bij een oppervlaktewater warmtepomp circuleert het water direct door een wisselaar waar dit afkoelt en aan de andere zijde van de wisselaar verdampt het koudemiddel.

Bij een bodem warmtepomp wordt een water-/glycol mengsel of door een bodemcollector geleid of wordt gewerkt met opgepompt water, welke elders in de bodem wordt teruggebracht. Voor de bodemcollector kan sprake zijn van horizontale in de grond ingegraven collector of een verticale collector .

Best Practice is om te streven naar een efficiëntie van tenminste SCOP $\geq 5,0$ ($\eta_{s,h} \geq 344\%$) of een COP afhankelijk van de temperatuurlift, als genoemde in voorgaande paragraaf.

WKO

Een warmtepomp WKO (Warmte-Koude Opslag) systeem is een bijzondere uitvoering van het bodem warmtepompsysteem, waarbij 's winters de door de warmtepomp gegeneerde koude wordt opgeslagen in de bodem en 's zomers als bron voor koeling wordt gebruikt (direct of na tussenkomst van compressiekoeling). In de zomer wordt hiermee warmte geladen in de grond, welke in de winter als bron kan dienen voor de warmtepompen. Het systeem kan zowel open als gesloten zijn uitgevoerd. Bij een open systeem wordt water opgepompt en elders weer geïnjecteerd; bij een gesloten systeem wordt warmteoverdracht gedaan met een wisselaar, waardoor een water-/glycoloplossing circuleert.

Restwarmte

Een aantrekkelijke bron van warmte voor een warmtepomp is restwarmte. Dit is doorgaans warmte, welke vrijkomt uit een proces. Voorbeelden zijn: restwarmte uit een koelinstallatie, persluchtinstallatie, afvalwaterstromen of van een productieproces.

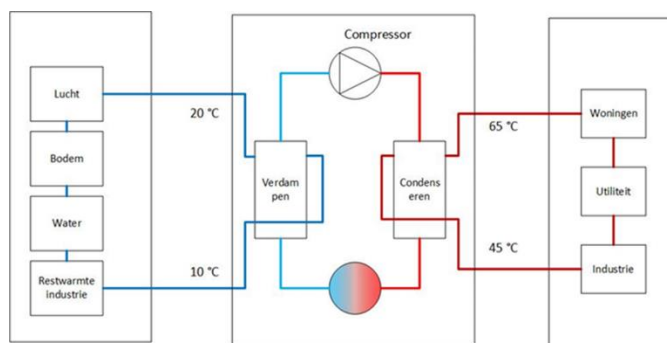
Niet nuttige warmte, die vernietigd wordt in condensoren, koelers en koeltoren, wordt met een warmtepomp opgewaarderd tot een niveau, waar deze nuttig kan worden aangewend. Het kan hier gaan om benutting voor eigen proces-/ruimteverwarming of uitkoppeling

aan derden. Denk bij laatstgenoemde bijvoorbeeld aan export naar een lokaal warmtenet.

Recente ontwikkelingen liggen op dit gebied. Restwarmte wordt meer en meer gezien als een waardevolle energiestroom in plaats van een afvalstroom.

Gecombineerde systemen

Het is technisch goed mogelijk verschillende bronnen op één warmtepomp te combineren. De keuze voor verschillende bronnen hangt samen met de beschikbaarheid van de bron en de temperatuur van de restwarmte. Een pand met een productieproces wat 5 dagen per week operationeel is, wil op maandagochtend wel dat het gebouw op temperatuur is. Er kan dan gekozen worden om in de nacht van zondag op maandag buitenlucht als bron te gebruiken en als de productie weer is opgestart, deze warmtestroom te gebruiken.



III. Componenten

Industriële compressie koelinstallaties en warmtepompen lijken qua componenten sterk op elkaar. In de 'Best Practice Koudetechniek' is meer achtergrond over componentkeuze opgenomen.

De hoofdcomponenten van een mechanische compressie warmtepomp zijn:

Compressoren

Zuigercompressoren worden gebruikt voor kleinere systemen tot circa 500 kW warmtelevering, schroefcompressoren voor middenklasse systemen tot circa 4 MW, terwijl centrifugaalcompressoren nagenoeg uitsluitend gebruikt worden in grotere systemen met een warmtelevering boven 2 MW.

Categorie	Volumestroom [m³/h]	Drukverhouding	Isentropisch rendement
<i>Dynamische</i>			
centrifugaal	500 – 300.000	1,8 – 3,0	70 – 80%
<i>Verdringing</i>			
schroef	500 – 35.000	2 – 6	60 – 80%
roots(rolzuiger)	100 – 60.000	1 – 2	40 – 65%
scroll	10 – 60	1 – 10	40 – 65%
zuiger	100 – 3.000	4– 6	50 – 80%

Zuigercompressoren kennen een hoger energetisch rendement dan schroefcompressoren. Deze zijn goedkoper bij een klein/middelgrote slagvolumes,

eenvoudiger in onderhoud, efficiëntie in deellast en kennen meer mogelijkheden om capaciteit te regelen.

Schroefcompressoren worden voornamelijk gekenmerkt door hoge betrouwbaarheid, lange levensduur en een kostprijsvoordeel bij grotere capaciteiten. Schroefcompressoren gebruiken een olielfilm om, in het huis van de compressoren, de schroef af te dichten. Deze compressoren vragen om een aparte oliekoeling. Deze kan geïntegreerd worden met de condensor. Meestal is splitsen in een aparte wisselaar aan te bevelen. De koeling van olie vraagt voor betrouwbaar functioneren van de schroef bepaalde specificaties.

Condensors

In de condensor van de warmtepomp wordt de warmte nuttig afgegeven. Dit kan zijn aan de lucht of aan een ander medium (bijv. water). De condensatietemperatuur ligt altijd enkele graden boven de gewenste lucht/water temperatuur. Zaak is om dit temperatuurverschil klein te houden. Hoe lager de condensatietemperatuur, hoe beter de prestaties van de warmtepomp. Dit kan worden bereikt door de warmteoverdracht te vergroten. In de praktijk betekent dit:

- Vergroten warmtewisselend oppervlak
- Adequate ventilatorcapaciteit* (bij lucht)

*Energiegebruik ventilatoren zelf te beperken door te kiezen voor energiezuinige EC ventilatoren met toerenregeling.

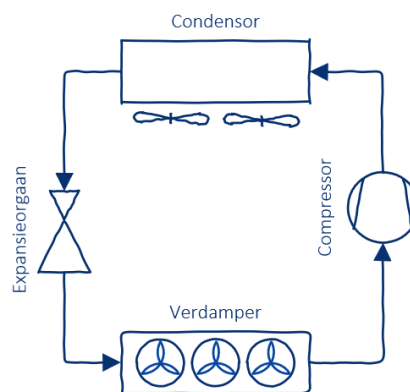
Best Practice is een temperatuurverschil tussen condensor en omgeving van max. 10K bij een luchtgekoelde condensor of 8K bij een watergekoelde condensor.

Verdampers

In de verdamper van de warmtepomp wordt warmte onttrokken aan de omgeving. Dit is bijv. aan de buitenlucht, water of een restwarmtebron. De verdampingstemperatuur ligt enkele graden onder de brontemperatuur. Zaak is ook hier om dit temperatuurverschil klein te houden. Hoger verdampen geeft een betere COP op de compressor.

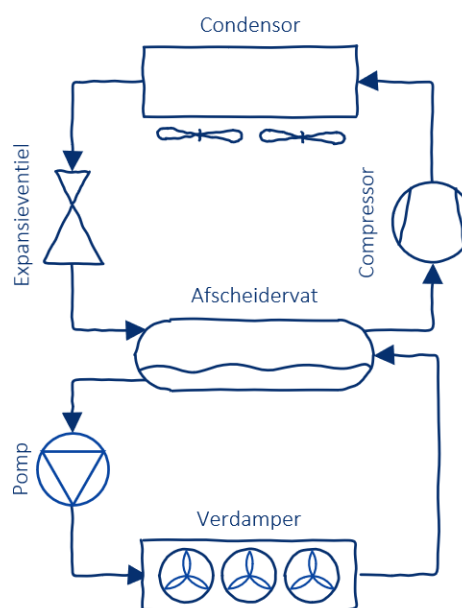
Er zijn twee manieren van verdampen: droge verdamping (DX) & natte verdamping (pomp). Bij droge verdamping moet een oververhitting worden aangehouden om te voorkomen dat de compressor vloeistof aanzuigt. Hierdoor wordt het verdamperoppervlak minder goed benut en moet er hoger verdampt worden.

Best Practice is een temperatuurverschil tussen verdamper en omgeving van max. 8K en toepassing van EC ventilatoren met toerenregeling.



Figuur 4 - Droge verdamping

Het pompsysteem kent deze noodzaak tot oververhitting niet, maar is kostbaarder.



Figuur 5 - Natte verdamping (pomp)

Voor beide systemen gelden als energiebesparingsopties:

- Vergroten warmtewisselend oppervlak
- Adequate ventilatorcapaciteit* (bij lucht)

Best Practice is temperatuurverschil tussen verdamper en omgeving van max. 10 K.

*Energiegebruik ventilatoren zelf te beperken door te kiezen voor energiezuinige EC ventilatoren met toerenregeling.

IV. Regeling

Er zijn twee soorten regelingen te onderscheiden:

- Interne regeling heeft als doel om de opgelegde warmtevraag en/of de koudevraag te realiseren. Het gaat hier om aansturing van de compressoren, ventilatoren, pompen. Hier wordt onderstaand nader op ingegaan.
- Externe regeling stelt de warmte/koudevraag vast en geeft deze door aan de interne regeling.

Compressor

De belangrijkste regeling voor de gesloten warmtepomp heeft betrekking op de capaciteitsregeling van de compressor. In een onderstaande tabel een overzicht van de regelmogelijkheden.

Regeling	Geschiktheid	Regelbereik in %	Opmerkingen
Toerenregeling	++	50 - 100	-
Toerenregeling (schroefcompressoren)	+/-	70 - 100	Beperkt i.v.m. afdichting en smering
Toerenregeling met beperkte kleplichting (zuigercompressoren)	+	25 - 100	-
Beperkte schuifregeling (schroefcompressoren)	+/-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen
Beperkte inlet/vane regeling (centrifugaal)	+/-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen
Kleplichting (zuigercompressoren)	-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen.
Bypass	-	-	Niet toepassen
Zuigdrukregeling	-	-	Niet toepassen

Ventilatoren

Bij lucht/lucht warmtepompen of lucht/water warmtepompen is ook de ventilator bepalend in het elektriciteitsverbruik.

Ventilatoren zijn aanwezig op verdampers en evt. condensors (luchtverwarmers).

Ventilatorvermogen stijgt met de derde macht met het toerental, aftoeren van de ventilatoren, wanneer dit mogelijk is, geeft hierom een aanzienlijke energiebesparing. Om aftoeren mogelijk te maken dienen ventilatoren geschikt te zijn voor toerenregeling en hiervoor een regeling te zijn aangebracht en zijn ingeregeld. Ook de gebruikte ventilatormotortechnologie is van belang: EC, gelijkstroomventilatoren zijn doorgaans zuiniger dan AC ventilatoren. Bijkomend voordeel dat EC ventilatoren eenvoudig in toeren te regelen zijn, waar bij AC ventilatoren een frequentieregelaar nodig is.

De ErP 2015 beschrijft de minimale energie-efficiënte, waaraan ventilatoren dienen te voldoen.

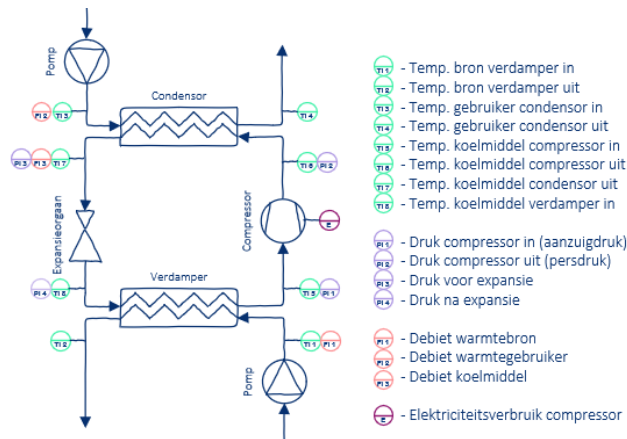
Best practice ten aanzien van ventilatoren is om te kiezen voor EC ventilatoren, voorzien van toerenregeling, >5% energiezuiniger ontwerpen dan de ErP 2015.

Regeling pompen

Pompen zijn aanwezig in een pompsysteem (koudemiddelpomp) en in het glycol/water afgiftesysteem van een water-/water of lucht-/water warmtepomp. Best practice is hier om te kiezen voor frequentiereguleerde pompen met IE4 motoren. Ook regeling van de pompen, aftoeren (en aan/uit wanneer mogelijk) zijn wijzen om energie te besparen.

V. Monitoring

Om te bepalen of de warmtepompinstallatie nog op het temperatuurniveau werkt, als waarvoor deze is ontworpen en of deze nog optimaal presteert, is het van belang de installatie te monitoren. In onderstaande schets van een compressiewarmtepompinstallatie zijn diverse meetpunten aangegeven. De registraties op deze meetpunten kunnen worden gebruikt bij het beoordelen van de werking van de installatie.



VI. Koudemiddelen

Keuze van een koudemiddel voor een koelinstallatie vraagt om te kijken naar alle eigenschappen van het koudemiddel:

- Thermodynamische eigenschappen / energieprestatie
- Veiligheid (brandbaarheid, giftigheid)
- Geschiktheid (druk, dichtheid)
- Milieu impact.

Thermodynamische eigenschappen/energieprestatie

Thermodynamische eigenschappen van een koudemiddel vertalen zich naar de prestaties van de warmtepomp. Hier is het werkgebied van de warmtepomp van belang en de heersende omgevingscondities tijdens bedrijf.

De thermodynamische eigenschappen verschillen sterk en dit kan leiden tot verschillen in energiegebruik van meer dan 10%. Er is niet eenvoudig een "beste" koudemiddel aan te wijzen. Het systeem moet zo ontworpen zijn, dat het optimaal gebruik maakt van de eigenschappen van het koudemiddel.

Veiligheid (brandbaarheid, giftigheid)

Gesloten mechanische dampcompressie warmtepompen zijn gesloten systemen. Toch kan het voorkomen dat er een lekkage ontstaat. Nederland heeft actuele wet- en regelgeving om risico's te beperken. Zolang er volgens de regels gebouwd wordt, vinden we elk koudemiddel veilig.

Veiligheid van koudemiddelen is in categorieën ingedeeld A, B, 1, 2L, 2 en 3. De letters A en B geven de mate van toxiciteit aan. De cijfers geven de mate van brandbaarheid aan.

Deze classificatie is geregeld in de normen: ASHRAE 34 en ISO 817.

Categorieën:

A: koudemiddelen met een lage toxiciteit

B: koudemiddelen met een hoge toxiciteit

1: niet brandbaar

2L: lage brandbaarheid (mild brandbaar)

2: brandbaar

3: hoge brandbaarheid

Voorbeelden zijn:

R32 (HFK) A2L

R448A (HFO) A1

R718 Water A1

R290 Propaan A3

R717 Ammoniak B2L

R744 CO₂ A1

De erkende installateur weet hoe veilig met deze middelen gewerkt moet worden.

Geschiktheid (druk, dichtheid)

Niet elk koudemiddel is geschikt voor elke toepassing; soms lopen de drukken/temperaturen te hoog op of zijn deze juist te laag.

Milieu

Het aspect milieu is door de jaren heen steeds een belangrijker item geworden met meer wet- en regelgeving. De discussie gaat daarbij veelal om synthetische koudemiddelen ten opzichte van meer natuurlijke koudemiddelen.

Synthetische koudemiddelen

Synthetische koudemiddelen zijn stoffen, die van nature niet voorkomen, maar door de mens zijn ontwikkeld voor industriële doeleinden. Synthetische koudemiddelen zijn HFK's en HFO's. Hiervoor gelden direct werkende Europese verordeningen met voorschriften, die gericht zijn op het beschermen van het milieu. Met het Montrealprotocol wordt het gebruik van HFK's met een hoge bijdrage aan het broeikas effect (GWP) uitgefaseerd. Europa heeft hier het F-gassenbesluit voor. De laatste versie uit 2014 wordt binnenkort aangescherpt. Momenteel zijn er verbodsbepalingen van HFK's voor verschillende toepassingen en wordt het middel op basis van een quotumsysteem steeds duurder gemaakt. Het beschikbare quotum neemt in 15 jaar af met 85%. De kosten voor deze middelen zijn zeer sterk gestegen en leveringszekerheid kan niet altijd gegarandeerd worden.

Natuurlijke koudemiddelen

Natuurlijke koudemiddelen komen ook van nature voor in het milieu, zoals:

- Water
- CO₂ (R744)
- NH₃ (R717)
- Koolwaterstoffen, zoals ethaan (R170), propaan (R290), propeen (R1270), butaan (R600), ISO butaan (R600a)

HFK's hebben een groot broeikas effect. Dit wordt uitgedrukt in CO₂ equivalent en in de vaktiaal GWP. Een in Nederland veel gebruikt koudemiddel R410A heeft een GWP van 2.088. Dit betekent dat 1 kg

lekkage gelijk is aan 2.088 kg CO₂ uitstoot. Een a-label personenauto heeft een uitstoot van ca. 100 gr/km. 1 kg 410A is gelijk aan 21.000 km autorijden.

Vanuit milieuoogpunt zijn de natuurlijke koudemiddelen daarom een beter alternatief. Bij gebruik van natuurlijke koudemiddelen is veiligheid wel een aandachtspunt.

HFO's zijn de nieuwe generatie synthetische koudemiddelen. Ze kenmerken zich door een laag GWP getal. Deze koudemiddelen zitten vooral in voorgevulde installaties. De diversiteit is zeer groot. Het is van belang een specifieke keuze te beoordelen op energie-efficiëntie, milieu-impact, bedrijfszekerheid, brandbaarheid en risico op gezondheid personeel.

soort koudemiddel	veel gebruikt koudemiddel
<u>synthetische koudemiddelen die vallen onder de F-gassenregelgeving</u>	
HFK's	R134a, R32
HFK's bevattende mengsels	R404a, R407c, R410a, , R507a, R449
HFO	R1234 met daarachter een specifieke lettercode
<u>natuurlijke koudemiddelen: Activiteitenbesluit H3 of vergunning</u>	
natuurlijke koudemiddelen	R744 (CO ₂) R717 (ammoniak) R290 (propaan) R170 (ethaan) R600a (isobutaan) R1270 (propeen) R718 (water)

VII. Onderhoud

Als uit de meetwaarden blijkt dat deze niet meer voldoen aan de ontwerp specificaties of afwijken van eerdere registraties, kan geconcludeerd worden dat nader onderzoek/onderhoud noodzakelijk is. Controleer ook of de bedrijfsomstandigheden niet zijn gewijzigd. Voor wat betreft de bedrijfsvoering en het onderhoud zijn warmtepompen te vergelijken met koelinstallaties. Aandachtspunten zijn:

- Vervuiling van warmtewisselaars (condensator en verdamper) resulteert in een toenemend temperatuurverschil en/of wijziging in drukverschil over de condensator en/of verdamper.
- Lekkage van koelmiddel of te weinig koelmiddel geeft een aanzienlijke verlaging van de COP. Ook juist de aanwezigheid van niet condenseerbare gassen (lucht) verlaagt de COP.
- Mechanische storingen zijn met name te herleiden tot de compressor en/of het expansieventiel. Afhankelijk van het aantal draaiuren van de compressor is ook onderhoud/revisie noodzakelijk conform de

leverancier gegevens.

VIII. Inpassing in de omgeving

Een warmtepomp functioneert nagenoeg altijd in context van een omgeving (denk hierbij aan uitwisseling van warmtestromen en de aansluiting op een elektriciteitsnet).

Met betrekking tot de aansluiting op het elektriciteitsnet is de congestie problematiek een uitdaging. Dit wil zeggen dat er tijdens het draaien capaciteit moet zijn op het net.

Wanneer de capaciteit op het net beperkt is, kan een Smart Grid oplossing, dan wel slimme sturing, een uitkomst bieden. Voorbeeld hiervan is een mogen/moeten regelen om de warmtepomp vrij te geven om een buffer op temperatuur te draaien, buiten de congestietijden op het elektriciteitsnet of om juist de warmtepomp te draaien op eigen zon-pv, wanneer export naar het elektriciteitsnet niet mogelijk is i.v.m. congestie.

IX. Subsidies & Fiscale regelingen

EIA 2022

De EIA regeling stimuleert de investering in warmtepompen met een hoge COP. Dit voor toepassingen als tapwater bereiding; ruimteverwarming en processen. Dit zowel voor warmtepompen met synthetische koudemiddelen als halogeenvrije koudemiddelen.

Tapwater

Voor een warmtepompboiler wordt een minimum COP > 3,0 gevraagd.

Ruimteverwarming

Voor ruimteverwarming wordt een minimum SCOP gevraagd, afhankelijk van het type warmtepomp. De SCOP dient hierbij te worden bepaald bij de Europese norm NEN14825.

Voor halogeenvrije warmtepompen bestaat ook de mogelijkheid om te voldoen aan een COP, afhankelijk van de lift:

- COP \geq 4,0 bij dT tot +40 °C,
- COP \geq 3,5 bij dT van +40 °C tot +50 °C,
- COP \geq 3,0 bij dT \geq +50 °C

Of om subsidie te verkrijgen op een ab-adsorptie warmtepomp.

Processen

Voor processen wordt een COP gevraagd, welke afhankelijk is van de bereikte temperatuurlift door de warmtepomp:

- COP \geq 4,0 bij dT tot +40 °C,
- COP \geq 3,5 bij dT van +40 °C tot +50 °C,
- COP \geq 3,0 bij dT van +50 °C tot +60 °C,
- COP \geq 2,5 bij dT van +60 °C tot +70 °C,
- COP \geq 2,3 bij dT \geq +70 °C,

Stoomrecompressie

Voor het opwaarderen van stoom naar hogere temperatuur en druk. De techniek bestaat uit een mechanische of thermische dampcompressor, aansluiting op het stoomnetwerk, de noodzakelijke aanpassing van de elektriciteitsaansluiting en het regelsysteem.

DEI

Middels de DEI regeling (Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie) subsidieert de overheid projecten, welke de CO₂ uitstoot terugbrengen. Het gaat hier demonstratieprojecten, welke innovatief zijn.

Ook op het gebied van warmtepompen zijn hier de afgelopen jaren projecten geweest, welke ondersteund worden door deze regeling en zijn gedemonstreerd. Enkele voorbeelden zijn:

Propaan/isobutaan warmtepomp voor processen

Een propaan/isobutaan warmtepomp is gedemonstreerd bij Kuikenbroederij Van Hulst uit het Brabantse Veldhoven. Met de warmtepomp is Van Hulst sinds mei 2018 van het gas af.

De warmtepomp betreft een grote tweetraps warmtepomp met uitsluitend natuurlijke koudemiddelen, welke zelfs bij -20°C de eieren op de benodigde temperatuur van 40°C weet te houden. De warmtepomp is hier ingekoppeld in het bestaande systeem, welke werkt met aanvoerwater van 80°C. Het betreft hier een warmtepomp met hoge lift en een hoge eind temperatuur. Sinds enkele jaren functioneert de warmtepomp naar tevredenheid.

Propaan/isobutaan warmtepomp ter bereiding van stroom

Bierbrouwerij Gulpener heeft met DEI subsidie het brouwproces aanzienlijk energie efficiënter gemaakt. De volgende fase in het project is door middel van een propaan/isobutaan warmtepomp de gasgestookte stoomketel geheel te laten vervallen en in plaats hiervan stoom te maken met een warmtepomp. Het ontwerp van de warmtepomp is hiervoor gereed.

Propaan/isobutaan warmtepomp voor ruimteverwarming

Woningbouw vereniging Wonen Limburg demonstreert met DEI subsidie de toepassing van een hoge temperatuur propaan/isobutaan warmtepomp voor invulling van de warmtevraag voor ruimteverwarming en tapwater bij 8 wooncomplexen in Weert en Venray. Het betreft hier complexen uit de jaren '70 met standaard isolatie en hoge temperatuur radiatoren. De warmtepomp demonstreert dat verwarming van dit soort complexen, waar er veel van zijn in Nederland, haalbaar is. Aanvoer temperatuur is tot 80°C, maar wordt afgestemd op buitentemperatuur/warmtevraag middels een stooklijn.

SDE

De overheid stimuleert de productie van duurzame energie middels de SDE-regeling. Hiertoe behoort de productie van CO₂-arme warmte.

De SDE++ regeling in 2022 vraagt een minimum thermisch vermogen van 0,5 MWth en een COP van minimaal 2,3. Per eenheid geproduceerde warmte wordt een subsidie ontvangen.

X. Nieuwe ontwikkelingen

Het veld van de warmtepomp innoveert continue, onderstaand enkele terreinen, welke worden verkend maar nog niet of nog nauwelijks in de markt worden gezien³.

- **Warmtepompen of basis van metallische hydriden**
Een warmtepomp aangedreven door de chemische reactie tussen metallische hydriden en waterstof.
- **Thermo-akoestische warmtepomp**
Een technologie welke berust op het thermisch-akoestisch principe; met geluidsgolven wordt warmte en koude gescheiden .
- **Magneto calorische warmtepomp**
Een technologie welke gebruik maakt van het magneto-calorisch effect; door het toevoegen van een extern magneetveld kunnen materialen opwarmen of afkoelen.

³ TKI Urban Energy – Topsector Energy