



Hybridvarmepumpe til fjernvarme

EUDP projektnr.: 64013-0164



Titel:

Hybridvarmepumpe til fjernvarme
EUDP 13-1 / 64013-0164

Udarbejdet af Teknologisk Institut for:

Innoterm
Essen 32
6000 Kolding

November 2018

Forfattere:

Palle Lemminger, Innoterm
Bjarke Paaske, PlanEnergi
Niels From, PlanEnergi
Nis Peter Reinholdt, Teknologisk Institut
Lars Reinholdt, Teknologisk Institut

Indholdsfortegnelse

1. Projektdetaljer	4
2. Kort beskrivelse af projektets mål og resultater.....	5
English	5
Dansk	5
3. Projektresumé	6
4. Projektets mål	9
4.1. Energisystemet	9
4.2. <i>Overordnet analyse og projektering af varmepumpen</i>	11
4.2.1. Varmeproduktionsfordeling	12
4.2.2. Selskabs- og forbrugerøkonomi	12
4.2.3. Energi og miljø	13
4.2.4. Selskabsøkonomiske følsomhedsberegninger.....	14
4.3. Detailprojektering af hybridvarmepumpen	15
4.3.1. Hybridvarmepumpens arbejdsprincip.....	15
4.3.2. Hybridvarmepumpen til Løgumkloster Fjernvarme.....	18
4.3.3. Andre varmepumpeløsninger: Et-trins hybridvarmepumpe	20
4.3.4. Andre varmepumpeløsninger: To-trins NH ₃ -varmepumpe.....	21
4.3.5. Endelig udformning af hybridvarmepumpen.....	21
4.4. Implementering af hybridvarmepumpen	23
4.5. Måleprogram.....	23
4.5.1. Ydelsestest.....	23
4.5.2. Yderligere test	24
4.5.3. Sammenligning med andre anlæg	25
1) Brædstrup Fjernvarme /3/.....	25
4.6. <i>Formidling af resultater</i>	27
5. Konklusion og perspektivering	28
5.1. Perspektivering	29
6. Kilder.....	30

1. Projektdetaljer

Projekttitle	Hybridvarmepumpe til fjernvarme
Projekt-ID	64013-0164
Støtteprogram	EUDP 13-1
Projektleder (firma/institution)	Innoterm A/S Essen 32 6000 Kolding CVR 27306403 Kontakt: Palle Lemminger, pl@innoterm.dk
Projektpartnere	Løgumkloster Fjernvarme Søndermarkvej 3 6240 Løgumkloster CVR 66211118 Kontakt: Peter Andersen, pa@lgkfjernvarme.dk Rambøll A/S Englandsgade 25 5000 Odense C CVR 35128417 Kontakt: Benjamin Kjelkvist Larsen, bkl@ramboll.dk PlanEnergi Jyllandsgade 1 9520 Skørping CVR 74038212 Kontakt: Niels From, nf@planenergi.dk Teknologisk Institut Kongsvang Allé 29 8000 Aarhus C CVR 56976116 Kontakt: Lars Reinholdt, lre@teknologisk.dk

Dato for indlevering af ansøgning	6. marts 2013
--	---------------

2. Kort beskrivelse af projektets mål og resultater

English

In the project, a full-scale electrical driven hybrid heat pump using the natural refrigerants water and ammonia has been demonstrated in the system of Løgumkloster District Heating.

Based on analysis of the integration, a two-stage heat pump of 1.2 MW heat capacity was installed. COP of 4.4 was verified being 5% higher than guaranteed and having a heat capacity 11% higher. The Heat pump has been operating trouble-free since commissioned.

The design was compared to both one-stage hybrid heat pump and two-stage high pressure ammonia heat pumps both having lower COP and not able to reach the required temperature of 85°C. The stability and flexibility of the heat pump and possibility to reach even 110°C delivery temperatures were also demonstrated by operation at a maximum temperature of 97°C.

Dansk

I projektet blev en fuldskala eldrevet hybridvarmepumpe, der anvender de naturlige kølemidler vand og ammoniak, demonstreret hos Løgumkloster Fjernvarme.

Baseret på analyse af integrationen i fjernvarmesystemet blev en to-trins hybridvarmepumpe på 1,2 MW varmekapacitet installeret. COP på 4,4 blev verificeret, hvilket var 5% højere end garanteret og med en 11% højere varmeydelse. Varmepumpen har været i drift uden problemer siden idriftsættelsen.

Designet blev sammenlignet med både et-trins hybridvarmepumpe og to-trins højtryksammoniakvarmepumper, der begge havde lavere COP og ikke kunne nå den maksimale forsyningstemperatur på 85°C. Hybridvarmepumpens stabilitet og fleksibilitet samt muligheden for endda at nå op til 110°C blev også demonstreret ved drift med en maksimal temperatur på 97°C.

3. Projektresumé

Nærværende projekt "Hybrid varmepumpe i fjernvarme" er støttet af EUDP under projektnr. 64013-0164. Projektet, som omfatter design, installation og demonstration af en fuldskala hybridvarmepumpe, supplerer energisystemet og er inkluderet i projektforslaget "Etablering af solvarmeanlæg hos Løgumkloster Fjernvarme" /1/, som blev godkendt af Tønder Kommune den 31. oktober 2013.

Bruttovarmebehovet er opgjort til 40.000 MWh/år inkl. udvidelsen med Løgumgårde. Det maksimale effektbehov er beregnet til 11,8 MW. Værkets to eksisterende motorer har en samlet varmeeffekt på 7,5 MW, og de nye kedler har en ydelse på henholdsvis 10 MW på naturgas og 2 MW på biomasse. Den eksisterende akkumuleringstank er på 2.000 m³, der er suppleret med den nye tank på 5.000 m³. Herudover er der etableret 15.200 m² af det planlagte solvarmeanlæg på 50.000 m², mens damvarmelageret på 150.000 m³ ikke er etableret.

Løgumkloster Fjernvarme producerede al varme med naturgas, men har gennem ovennævnte projekt erstattet en stor del af denne med solvarme og biomasse. Fordelingen mellem kraftvarmeproduktion på motorer og varmeproduktion på kedler afhænger primært af el- og gaspriserne. Den fortsatte udbygning med vindkraft medfører, at kraftvarmeproduktionen i fremtiden vil blive reduceret, og muliggør effektiv produktion af grøn varme med elektriske varmepumper.

Formålet med den eldrevne hybridvarmepumpe er – sammen med absorptionsvarmepumpen – at:

1. producere koldt vand, som øger kapaciteten på damvarmelageret gennem en forøgelse af det temperaturområde, lageret arbejder under (og en formindskelse af varmetabet).
2. øge produktionen og mindske tabet fra solfangerne ved at kunne udnytte solvarmen allerede ved 30 °C – altså lavere end returtemperaturen i fjernvarmenettet.
3. øge varmevirkningsgraden på gasmotorerne vha. den nye LT-veksler til yderligere køling af røggassen.

Hybridvarmepumpen vil desuden kunne udnytte lave elpriser, mens absorptionsvarmepumpen forudsætter, at biomassekedlen er i drift. Hybridvarmepumpen gør det dermed også muligt at reducere behovet for biomasse gennem udnyttelse af eventuel billig strøm (overskudsstrøm).

Hybridvarmepumper er kendetegnet ved stabil, robust og "komfortabel" drift, idet teknologien gør det muligt:

- at anvende de naturlige arbejdsmedier vand og ammoniak.
- at producere høje fremløbstemperaturer (> 100 °C) ved lave tryk (< 25 bar), hvorfor industrielle standardkølekomponenter kan anvendes og ikke belastes så meget som ved højtryksdrift.
- at udnytte kilder med ganske høj tilgangstemperatur uden begrænsninger i maksimalt sugetryk, hvor kompressorerne ellers tvinger fordampningstemperaturen (og dermed COP) ned.

- at lade driften ske langt fra alarmgrænserne ved de ret høje fjernvarmetemperaturer, hvilket åbner for en meget større driftsvariation og en større driftsstabilitet ved pludselige driftsændringer.
- at opnå høj COP, hvis det såkaldte temperaturglid på den kolde og/eller varme side kan udnyttes – dvs. når varmekilden skal køles mange °C, og varmeaf tager skal opvarmes mange °C.

På baggrund af analyser af det samlede system er der designet og installeret en to-trins hybridvarmepumpe på ca. 1,2 MW varme og COP mellem 4,0 og 5,3 – afhængigt af driftstemperaturerne. Den kontraktuelt garanterede varmeydelse og COP blev eftervist med 11 % højere ydelse ved 5 % højere COP.

Løsningen blev sammenlignet med en et-trins hybridvarmepumpe (med henblik på kostoptimering) og en højtryksammoniakvarmepumpe. Ingen af disse løsninger kunne opfylde samtlige opstillede krav til levering af fjernvarme ved op til 85 °C, foruden at den opnåelige COP lå ca. 0,2 lavere end den valgte to-trins løsning.

En sammenligning med tre andre varmepumper installeret i lignende fjernvarmesystemer viste, at hybridvarmepumpen havde den højeste COP. Systemerne arbejder dog ikke ved samme temperatursæt, hvorfor der også er gennemført en sammenligning på baggrund af Lorenz- og Carnot-virkningsgrader, der begge er baseret på de teoretisk maksimalt opnåelige COP-værdier. Her var hybridvarmepumpen bedre end konventionelle varmepumpeløsninger og sammenlignelig med en varmepumpeløsning, der som hybridvarmepumpen var tilpasset til bedre at udnytte temperaturglidet på kold og varm side.

Efter en mindre ændring af den overordnede styring af solvarmesystemet ift. varmepumpen har varmepumpen kørt uden problemer – inklusive automatisk start og stop.

Da damvarmelageret ikke blev etableret, har hybridvarmepumpen dog udelukkende kunnet anvendes til ovennævnte pkt. 2 og 3. Dette ses også af, at varmepumpen kun har haft 1.451 driftstimer siden idriftsættelsen.

Selvom varmepumpen er designet og dimensioneret til at levere fjernvarme ved 60 til 85 °C, viste det sig muligt at levere fjernvarme op til 97 °C. Begrænsningen for at nå endnu højere temperaturer lå i designet af en af de interne varmevekslere.

Hybridvarmepumpen er særligt velegnet til opvarmning med større temperaturændring, som det er tilfældet ved fjernvarme, da blandingen af ammoniak og vand medfører varmeafgivelse med temperaturglid. Dette temperaturglid sker også ved optagelsen af varme fra varmepumpens kilde. Hybridvarmepumpen har derfor også en fordel ved kilder, der kan afkøles over et større temperaturinterval. Ved f.eks. køling af vand vil dette føre til mindre flow.

Projektet har vist, at hybridvarmepumpen kan levere høj fjernvarmetemperatur med høj COP og er meget stabil i drift – inklusive automatisk start og stop.

Førstnævnte underbygges af, at der i Norge er leveret et kommercielt anlæg designet til 95 °C og testet til kontinuerlig drift ved 110 °C /5/. Teknologien kan med andre ord anvendes til varmeleverance til de større byers transmissionsnet ved typisk 100 – 110 °C.

Selvom der ikke er opnået et højt driftstimeantal i indeværende projekt, viser erfaringer fra andre anlæg – herunder hybridvarmepumpen, der er installeret i Arlas tømælksfabrik Arinco /6/, at det lavere arbejdstryk samt ammoniak-/vandblandings rensende virkning ("salmiakvand") har en positiv betydning for vedligeholdelsesomkostningerne sammenlignet med andre industrielle højtemperaturvarmepumper.

Samlet set har Hybrid Energy erfaring fra mere end 400.000 driftstimer på deres anlæg.

4. Projektets mål

Nærværende projekt "Hybrid varmepumpe til fjernvarme" er støttet af EUDP under projektnr. 64013-0164. Projektets mål omfatter integration, installation og demonstration af en fuldskala hybridvarmepumpe, der supplerer det øvrige energisystem hos Løgumkloster Fjernvarme.

Projektet består af fire arbejdsopgaver med hvert sit fokusområde:

1. Detailprojektering af hybridvarmepumpen
2. Implementering af hybridvarmepumpen
3. Måleprogram
4. Projektleddelse og formidling af resultater.

4.1. Energisystemet

Tønder Kommune har den 31. oktober 2013 godkendt projektforslaget "Etablering af solvarmeanlæg hos Løgumkloster Fjernvarme", som omfatter etablering af:

- Et solvarmeanlæg på i alt 50.000 m²
- Et damvarmelager på 150.000 m³
- En ny akkumuleringstank på 5.000 m³ med mulighed for lagring ved mellemtemperatur.
- En biobrændselskedel (træpiller) på 2 MW hedtvand
- En absorptionsvarmepumpe på 2,1 MW_{køledelse} / 3 MW_{hedtvand} / 5,1 MW_{varmeydelse}
- Ekstra lavtemperaturvekslere (LT) på én af naturgasmotorerne for yderligere afkøling af røggassen
- En naturgaskedel på 10 MW
- Tilhørende rørinstallationer
- Teknikbygninger på ca. 1.000 m².

Forud for installationen af ovenstående består Løgumkloster Fjernvarmes varmeproduktionssystem af følgende:

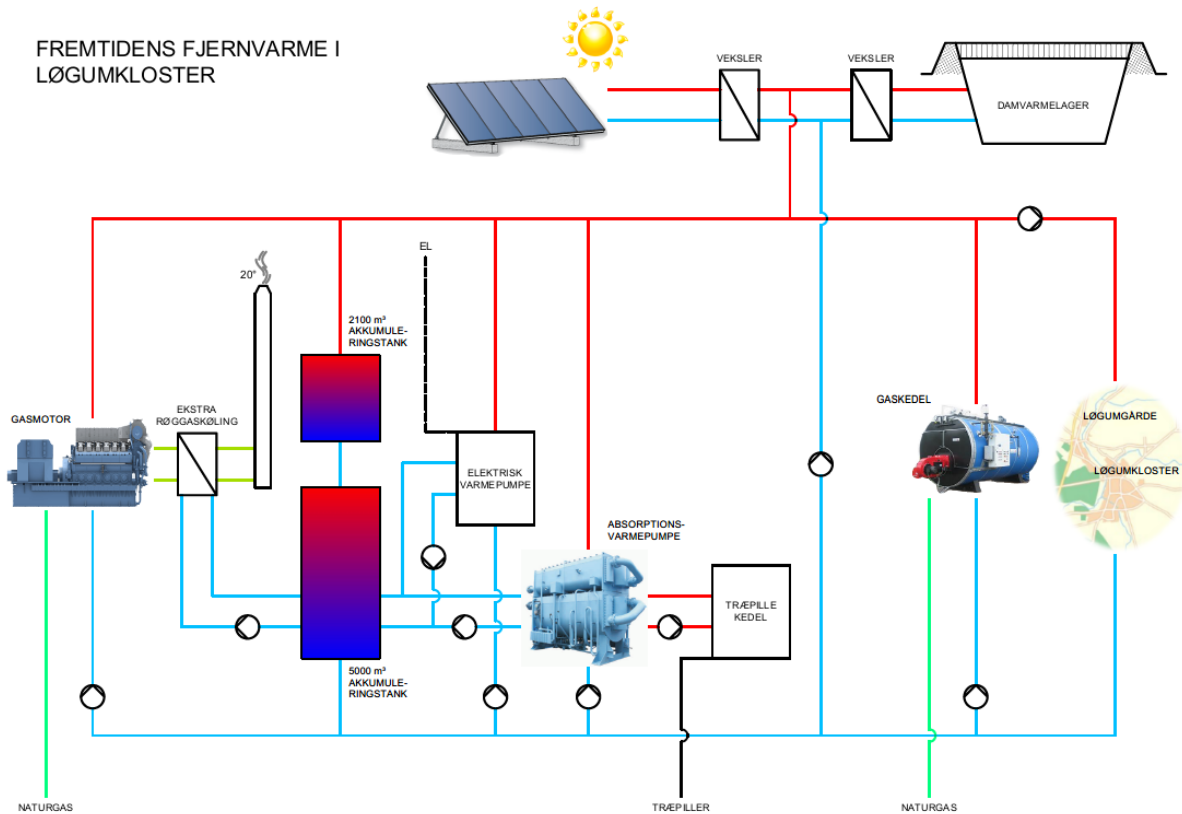
- To naturgasmotorer med en samlet varmeeffekt på 7,5 MW
- En akkumuleringstank på 2.000 m³ (samlet lagervolumen dermed 7.000 m³)
- Gamle naturgaskedler.

Af forskellige grunde, der ikke er relateret til dette projekt, er damvarmelageret endnu ikke etableret, hvorfor også kun 15.200 m² solfangerareal er installeret. Det samlede akkumuleringstankvolumen udgør 7.000 m³. De to lagertanke er koblet, så både serie- og paralleldrift er mulig. Bruttovarmebehovet er opgjort til 40.000 MWh/år inkl. en udvidelse af forsyningsområdet (Løgumgårde). Det maksimale effektbehov er beregnet til 11,8 MW.

Ud over rørsystem for frem- og returtemperatur er der installeret et rørsystem for "mellemtemperatur", der er koblet til både førnævnte tilslutning på den nye lagertank og til forbindelsen mellem de to lagertanke. En skematisk oversigt over systemet kan ses i Figur 1. Heraf fremgår, at der arbejdes med tre temperaturniveauer i det samlede lagertanksystem, idet en ekstra diffuser, der er placeret midt i den nye lagertank (den nederste i Figur 1), tillader, at der samlet set lagres vand ved høj, mellem og lav temperatur, hvor sidstnævnte er betydeligt under returvandstemperaturen fra fjernvarmenettet. Med denne kobling opnås en meget større fleksibilitet i driften. Bl.a. er det muligt at levere solvarme og varme fra den elektriske

varmepumpe ved lavere temperatur end fremløb. Dette vil henholdsvis kunne hæve andelen af solvarme og hæve COP for varmepumpen.

Hybridvarmepumpen, der er omfattet af dette projekt, er et supplement til ovenstående energisystem. Formålet med hybridvarmepumpen er – sammen med absorptionsvarmepumpen – at øge virkningsgraderne på solfangerne og naturgasmotorerne samt at øge kapaciteten og reducere varmetabet for damvarmelageret.



Figur 1 Schematisk oversigt over Løgumkloster Fjernvarmesystem inkl. hybridvarmepumpe. Det viste damvarmelager er endnu ikke etableret.

Varmepumperne, der er koblet parallelt på den kolde side, producerer koldt vand, som anvendes til at øge kapaciteten på damvarmelageret gennem en forøgelse af det temperaturområde, lageret arbejder under (og en formindskelse af varmetabet), til at øge produktionen og mindske tabet fra solfangerne samt til at øge varmevirkningsgraden på gasmotorerne vha. den ekstra røggaskøling (LT-veksler) til yderligere køling af røggassen. Forøgelsen af produktionen fra solfangerne opnås ved at udnytte solvarmen allerede ved 30 °C – altså lavere end returtemperaturen i fjernvarmenettet. Absorptionsvarmepumpen forudsætter, at biomassekedlen er i drift, hvilket ofte vil kræve mindst 12 timers sammenhængende drift. Den eldrevne hybridvarmepumpe vil kunne udnytte lave elpriser gennem meget større fleksibilitet med driftsperioder ned til én eller få timer og gennem varmelagrene – uafhængigt af drift af de øvrige systemkomponenter. Hybridvarmepumpen gør det dermed også muligt at reducere behovet for biomasse gennem udnyttelse af eventuel billig strøm (overskudsstrøm).

Dette stemmer overens med, at det forventes, at store eldrevne varmepumper skal spille en vigtig rolle i forbindelse med den grønne omstilling af det danske energisystem, hvor de – i

kombination med kraftvarmeanlæg – skal øge fleksibiliteten i elsystemet, således at der kan indpasses øgede mængder vindkraft og el fra solceller, samtidig med at brændselsforbruget reduceres. Dette fremgår bl.a. af Klimakommissionens rapport, hvor 26. anbefaling lyder således:

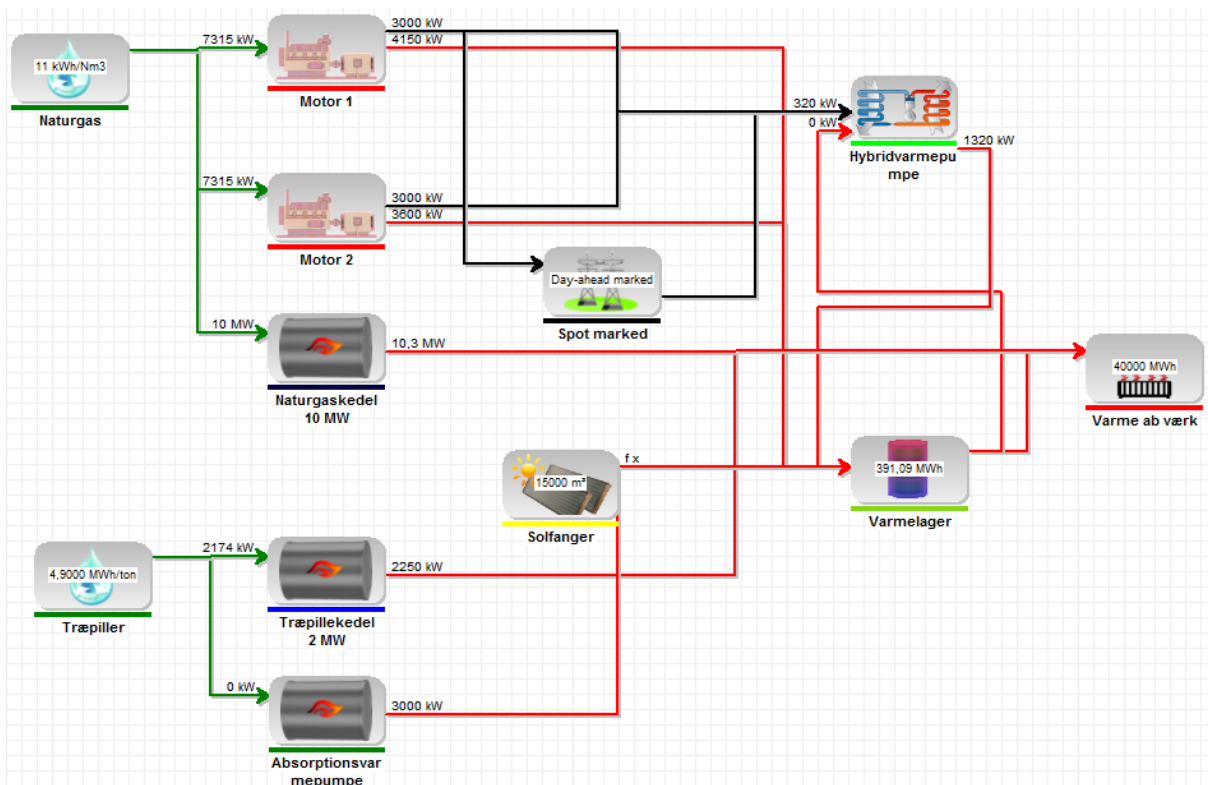
At varmepumper i fjernvarmeforsyningen fremmes, og at der sikres et hensigtsmæssigt samspil med vindkraft og kraftvarmeproduktion. Dette skal sikres gennem en hensigtsmæssig incitamentsstruktur – herunder at afgiften lægges på elforbruget til varmepumperne.

4.2. Overordnet analyse og projektering af varmepumpen

I forarbejdet til projektet gennemførte PlanEnergi en optimering af det samlede varmeproduktionssystem i Løgumkloster ved hjælp af det dynamiske simuleringværktøj TRNSYS.

Ud over type, selve designet og effektiviteten af de valgte komponenter afhænger en varmepumpes COP af driftsmåden (fuld- og dellast) og af temperaturerne, den arbejder under. Designfasen vil derfor være baseret på delvist anslåede COP-værdier og dermed driftsøkonomi (elforbrug). Med de valgte antagelser viste de detaljerede dynamiske TRNSYS-analyser en optimal størrelse for hybridvarmepumpen på ca. 1,3 MW varme.

Denne størrelse og den anslåede COP blev i dette projekt anvendt i energyPRO-modellen, der ses i Figur 2. Resultaterne af energyPRO-analyserne, der ses og citeres i uddrag i det følgende, dannede grundlag for udarbejdelsen af "Projektforslag for etablering af en hybridvarmepumpe hos Løgumkloster Fjernvarme" /1/, som efterfølgende blev godkendt af Tønder Kommune.

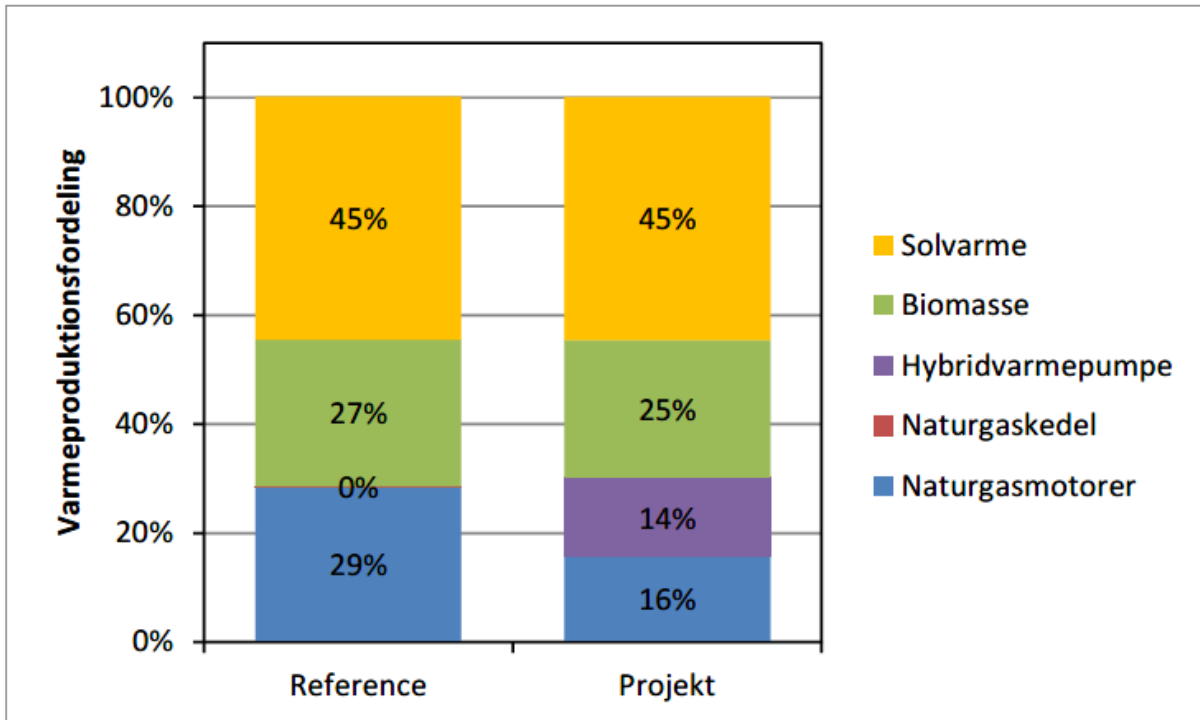


Figur 2 energyPRO-model for systemet.

Analyserne blev udarbejdet som en sammenligning mellem:

- **Referencen:** Energisystemet som beskrevet i projektforslaget "Etablering af solvarmeanlæg hos Løgumkloster Fjernvarme".
- **Projektet:** Som referencen suppleret med de i afsnit 1.3 i /1/ nævnte dele.

4.2.1. Varmeproduktionsfordeling



Figur 3 Varmeproduktionsfordeling i referencen og i projektet /1/.

Figur 3 viser, hvordan varmeproduktionen fordeles mellem de enkelte varmeproduktionsenheder henholdsvis i referencen (uden varmepumpe) og i projektet (med varmepumpe). Det fremgår:

- at naturgasmotorerne producerer 29 % af varmemængden i referencen og 16 % i projektet.
- at naturgaskedlerne producerer mindre end 1 % både i referencen og i projektet.
- at biomassen producerer 27 % af varmen i referencen og 25 % i projektet.
- at solvarmen producerer 45 % af varmen både i referencen og i projektet.
- at hybridvarmepumpen producerer 14 % af varmen i projektet.

Projektet medfører dermed, at hybridvarmepumpen primært fortrænger drift på naturgasmotorerne, men også en smule på biomassen.

4.2.2. Selskabs- og forbrugerøkonomi

Ved beregning af de selskabsøkonomiske konsekvenser ved etablering af hybridvarmepumpen sammenholdes de årlige varmeproduktionsomkostninger for referencen og projektet. Resultaterne ses i Tabel 1.

Beregningen er udført som en marginalbetragtning, hvor de samlede marginale varmeproduktionsomkostninger er opgjort for referencen og projektet.

Selskabsøkonomi	Værdi	Enhed
Investering, brutto	7.094.075	kr
Tilskud, EUDP	-2.435.305	kr
Investering, netto	4.658.770	kr
Driftsudgifter, reference	7.985.193	kr/år
Driftsudgifter, projekt	7.121.233	kr/år
Driftsbesparelse	863.960	kr/år
Simpel tilbagebetalingstid	5,4	år
Kapitalomkostninger ²	390.249	kr/år
Nettobesparelse	473.711	kr/år

Tabel 1 Selskabsøkonomiske nøgletal (alle beløb er ekskl. moms) /1/.

Nettoinvesteringen er ca. 4,66 mio. kr. (inkl. anlægstilskud fra EUDP).

Driftsbesparelsen er beregnet til ca. 0,86 mio. kr./år, hvilket giver en simpel tilbagebetalingstid på ca. 5,4 år. Dette skal ses i forhold til hybridvarmepumpens forventede tekniske levetid på ca. 15-20 år.

De gennemsnitlige kapitalomkostninger er beregnet til ca. 0,39 mio. kr./år. Dette giver en nettobesparelse på ca. 0,47 mio. kr./år.

Det fremgår således, at selskabsøkonomien er positiv. I henhold til "hvile i sig selv"-princippet får Løgumkloster Fjernvarmes ca. 1.600 forbrugere en selskabsøkonomisk fordel på gennemsnitligt ca. 300 kr. ekskl. moms pr. forbruger pr. år.

4.2.3. Energi og miljø

De energi- og miljømæssige konsekvenser – ved henholdsvis drift uden og med hybridvarmepumpen – er opstillet i Tabel 2.

Energimæssige konsekvenser	Enhed	Reference	Projekt	Projekt minus reference
Varme ab værk	MWh/år	40.000	40.000	0
Naturgas, Motor	MWh/år	19.158	10.585	-8.573
Naturgas, Kedel	MWh/år	26	16	-10
Træpiller (industri), Ke	MWh/år	11.742	10.982	-760
Brændsler i alt	MWh/år	30.926	21.583	-9.343
El-produktion	MWh/år	7.857	4.341	-3.516
El-forbrug	MWh/år	0	1.396	1.396
El-prod. minus forbrug	MWh/år	7.857	2.945	-4.912

Tabel 2 Brændselsforbrug pr. år før og efter etablering af hybridvarmepumpen /1/.

Det fremgår af Tabel 2, at det samlede brændselsforbrug reduceres med 30 %.

Det fremgår endvidere af Tabel 3, at alle emissioner reduceres – herunder CO₂-udledningen, som reduceres med 23 %. Dog øges emissionen af SO₂.

Emissioner ¹	Enhed	Reference	Projekt	Projekt minus reference
CO ₂	ton/år	2.438	1.910	-528
CH ₄ (metan)	kg/år	33.509	24.504	-9.005
N ₂ O (lattergas)	kg/år	176	170	-6
CO₂-ækvivalenter	ton/år	3.329	2.573	-755
SO ₂	kg/år	88	432	345
NO _x	kg/år	10.505	8.738	-1.767
PM _{2,5}	kg/år	391	388	-3

Tabel 3 Luftemissioner (gennemsnit over perioden fra 2012 til 2035). Note 1: Inkl. CO₂-udledning fra gennemsnitlig dansk elproduktion /1/.

4.2.4. Selskabsøkonomiske følsomhedsberegninger

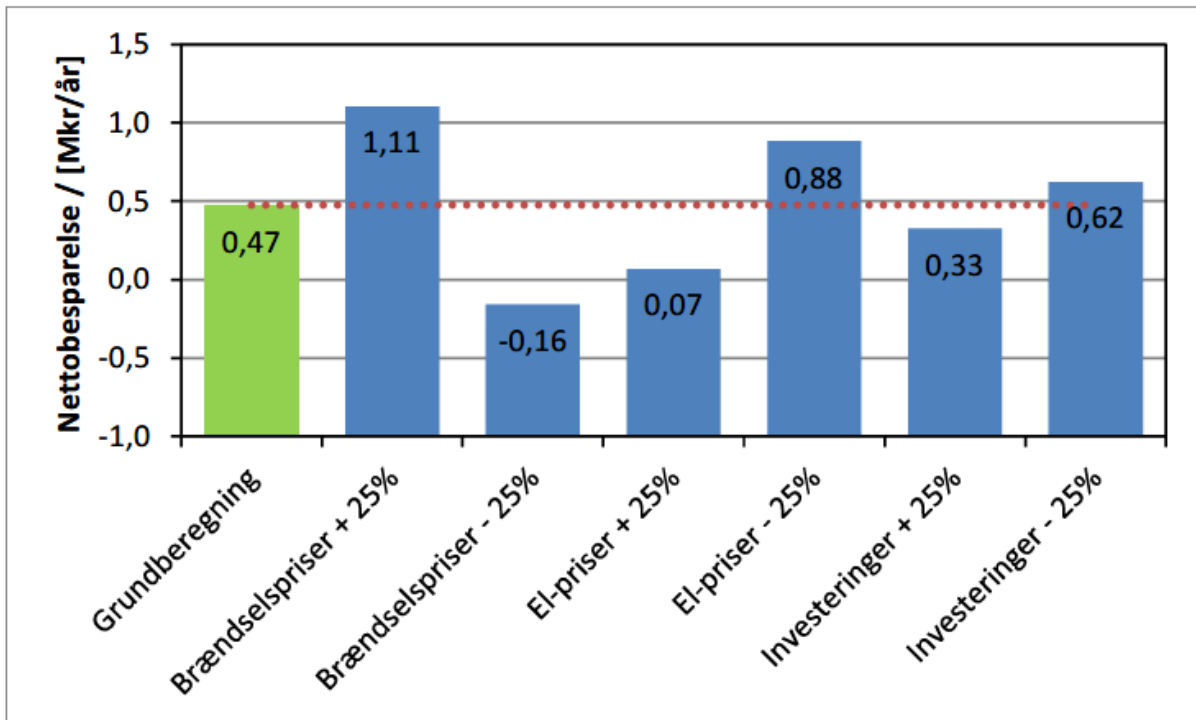
Der blev desuden gennemført en analyse af projektets følsomhed over for følgende centrale beregningsforudsætninger:

- Brændselspriser
- Elpriser
- Investeringer.

Resultatet fremgår af Tabel 4, og følgende forklaring og konklusion er citeret direkte fra Projektforslaget /1/:

I den selskabsøkonomiske grundberegning er naturgasprisen sat til 3,00 kr./Nm³ og træpilleprisen til 1.200 kr./ton. Hvis brændselspriserne øges med 25 %, øges nettobesparelsen med 0,63 Mkr./år, og hvis brændselspriserne reduceres med 25 %, reduceres nettobesparelsen med 0,63 Mkr./år. Projektet er således relativt følsomt over for ændringer i brændselspriserne, således at projektfordelen øges med øgede brændselspriser.

Den selskabsøkonomiske grundberegning er baseret på elspotpriser fra Vestdanmark fra 2. kvartal 2011 til 1. kvartal 2012 (begge inkl.). Hvis elspotpriserne øges med 25 %, reduceres nettobesparelsen med 0,41 Mkr./år, og hvis elspotpriserne reduceres med 25 %, øges nettobesparelsen med 0,41 Mkr./år. Projektet er således mindre følsomt over for ændringer i elspotpriserne sammenlignet med ændringer i brændselspriserne.



Tabel 4 Selskabsøkonomisk følsomhed /1/.

Hvis investeringerne øges med 25 %, reduceres nettobesparelsen med 0,15 Mkr./år, og hvis investeringerne reduceres med 25 %, øges nettobesparelsen med 0,15 Mkr./år. Projektet er således relativt følsomt over for store ændringer i investeringerne.

Af de beregnede følsomheder er det kun reducerede brændselspriser, der medfører et negativt, selskabsøkonomisk resultat, hvilket dels vurderes at være relativt usandsynligt, og dels vil denne følsomhed i sig selv reducere varmeproduktionsomkostningerne. Det konkluderes derfor, at projektets selskabsøkonomi er relativt robust.

Ud over de anførte analyser indeholder Projektforslaget /1/ også den samfundsøkonomiske analyse, der kræves for sådanne projekter.

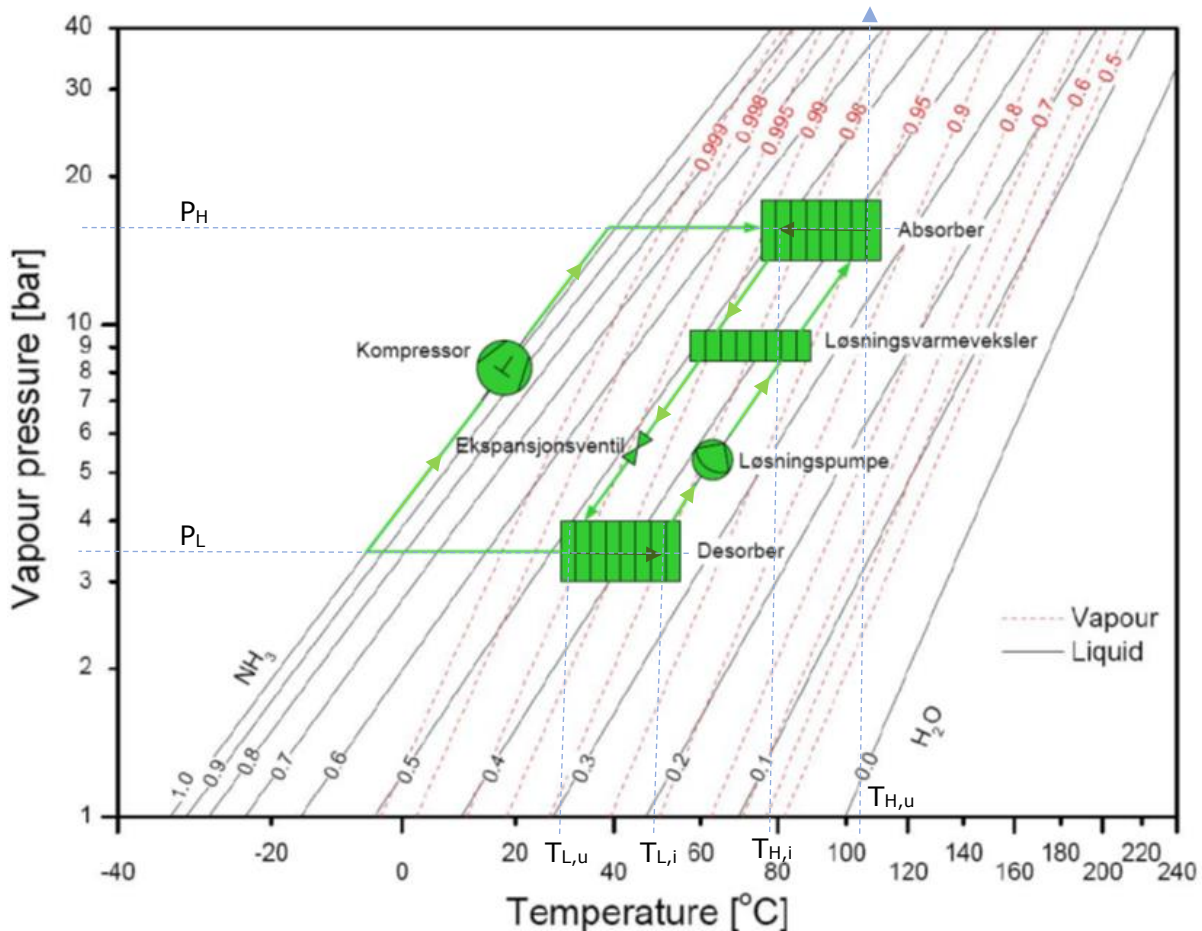
4.3. Detailprojektering af hybridvarmepumpen

4.3.1. Hybridvarmepumpens arbejdsprincip

En hybridvarmepumpe er en kombination af en mekanisk drevet varmepumpe og en absorptionsvarmepumpe. Kølemidlet i en hybridvarmepumpe er en blanding af ammoniak og vand, hvis koncentration ændres i kredsløbet.

Fordelen ved denne proces, der beskrives mere detaljeret i det følgende, er, at der kan opnås høje leverede vandtemperaturer med et betydeligt lavere tryk end tilsvarende løsninger, der er baseret på ren ammoniak (R717), samt at temperaturforløbene ved både varmeoptagelsen (der sker i en desorber, der procesmæssigt svarer til fordampere i en konventionel varmepumpe) og varmeafgivelsen (der sker i en absorber, der procesmæssigt svarer til fordampere i en konventionel varmepumpe) ændrer sig, hvilket passer bedre til varmekilder og -aftagere med temperaturændring (som f.eks. fjernvarme). En tilsvarende tilpasning vil ved konventionelle varmepumper ofte kræve en opdeling i flere trin monteret i serie.

Et eksempel på procesparametre kan ses i Figur 4, hvor processen er indtegnet i et såkaldt Dühring-diagram, hvor temperaturen er vist på den vandrette akse og arbejdstrykket på den lodrette.

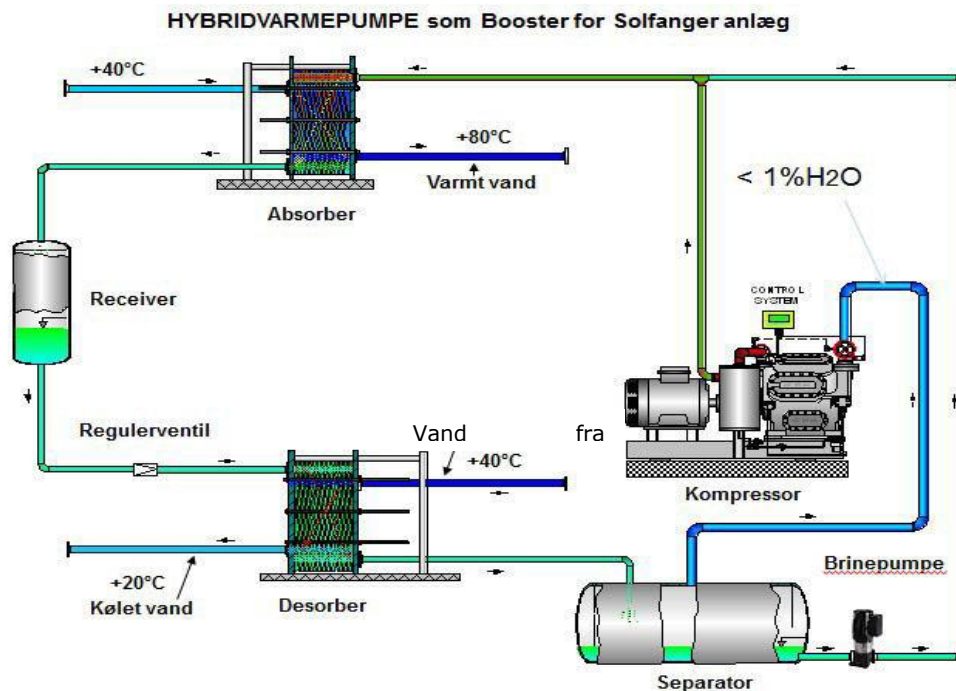


Figur 4 Eksempel på hybridproces vist i Dühring-diagram.

Med henvisning til principdiagrammet i Figur 5 og betegnelserne i Figur 4 forløber processen på følgende måde:

I separatoren skilles ammoniakdampene fra væskeblandingen (ammoniakholdigt vand) ved $P_L, T_{L,i}$, og ammoniakdampene komprimeres til det højere tryk P_H i den eldrevne kompressor, mens væskeblandingen pumpes til det højere tryk med en væsepumpe (løsningspumpe). I absorberen blandes gas og væskestrømmene ved punkt $(P_H, T_{H,u})$. Vandet, hvortil varmen afgives, strømmer i modstrøm, og ammoniakdampene absorberes i vandet under afgivelse af varme. Da koncentrationen af ammoniak i væsken stiger, som absorptionen skrider frem, vil absorptionstemperaturen falde fra $T_{H,u}$ til $T_{H,i}$.

Herved opstår det førnævnte temperaturglid gennem absorberne, hvilket passer godt til stor opvarmning af væskestrømmen (varmt vand), der som nævnt strømmer i modstrøm med absorptionsprocessens strøm. Væskestrømmen, der nu er rig på ammoniak (høj koncentration ved punkt $P_H, T_{H,i}$), løber nu til en receiver, hvorfra den efter en tryksækning til P_L i ekspansionsventilen ledes til desorberen. I desorberen koges en del af ammoniakken ud af væsken, og på samme måde som i absorberen vil der være tale om et temperaturglid på grund af den faldende koncentration i væske gennem veksleren, der strømmer i modstrøm med varmekilden fra $T_{L,u}$ til $T_{L,i}$. Processen passer dermed godt til en stor afkøling af en væskestrøm.



Figur 5 Principdiagram for en hybridvarmepumpe.

Endvidere betyder egenskaberne for vand-ammoniak-blandingen som nævnt, at der kan opnås meget højere temperaturer ved samme tryk – sammenlignet med ren ammoniak. Dette er markeret i Figur 4 med forlængelsen af temperaturlinjen ved $T_{H,u}$, der bestemmer temperaturen, varmeaftageren når op på. I Figur 4 er $T_{H,u} = \text{ca. } 105 \text{ } ^\circ\text{C}$ ved $P_H = \text{ca. } 15 \text{ bar}$. For ren ammoniak vil dette kræve et tryk på 70 bar, hvilket er højere end designtrykket for varmepumpekompressorer, der er kommercielt tilgængelige i dag (maksimalt driftstryk op til 65 bar). Til sammenligning svarer 15 bar til en kondenseringstemperatur på ca. $41 \text{ } ^\circ\text{C}$, hvilket er en ret almindelig driftssituation for et industrielt køleanlægs kondensator i et lidt varmere klima.

Da kompressoren komprimerer næsten helt ren ammoniak, og der sker en yderligere opvarmning af gassen gennem kompressionsprocessen, er der ikke risiko for "frit" vand i kompressoren eller i dennes olie. Mere end 400.000 driftstimer samlet set med Hybrid Energys kommercielt leverede anlæg har endvidere vist robustheden af både teknologien, design, komponenter og olie. Rør og ventiler i hybridvarmepumpeanlæg har også vist sig at være meget rene, hvilket delvist skyldes, at ammoniak-vand-blandingen faktisk er et rengøringsmiddel, der anvendes til affedtning (salmiakspiritus).

Ammoniak-vand-blandingen kan være skadelig for vandmiljøet ved høje koncentrationer, mens den ved en lavere koncentration ikke er skadelig og anvendes direkte som nitratgødning ("ammoniaknedfældning").

Hybridvarmepumpens vigtigste egenskaber kan opsummeres, som følger:

- Den anvender de naturlige arbejdsmedier vand og ammoniak.
- Den kan producere høje fremløbstemperaturer ($> 100 \text{ } ^\circ\text{C}$) ved lave tryk ($< 25 \text{ bar}$), hvorfor industrielle standardkølekomponenter kan anvendes og ikke belastes så meget som ved højtryksdrift.

- Den kan udnytte kilder med ganske høj tilgangstemperatur uden at ramme begrænsninger i maksimalt sugetryk, eftersom ammoniak/vand-blandingen har lavere tryk end ved drift med ren ammoniak.
- Ved de ret høje temperaturer, der anvendes i fjernvarmesystemer, vil driften ske langt fra alarmgrænser, hvilket åbner for en meget større driftsvariation og en større driftsstabilitet ved pludselige driftsændringer.
- Den har en høj COP, hvis det såkaldte temperaturglid på den kolde og/eller varme side kan udnyttes – dvs. når varmekilden skal køles mange °C, og varmedrænet skal opvarmes mange °C.

Hybridvarmepumpen var således et oplagt valg til Løgumkloster Fjernvarme, idet den i dette energisystem skal køle meget af på den kolde side (damvarmelageret) og varmes meget op på den varme side (fjernvarmevandet).

4.3.2. Hybridvarmepumpen til Løgumkloster Fjernvarme

Mere detaljeret er hybridvarmepumpen installeret i og forbundet med Løgumkloster Fjernvarmes nye fjernvarmecentral, der også indeholder den nye gaskedel, træpillekedel, absorptionsvarmepumpe, varmevekslerstationer og pumper til solvarmeanlægget, tilslutninger til varmelagertankene samt pumperne til fjernvarmenettet. Centralen er designet med et kredsløb til fjernvarme, med et kredsløb til køling samt med et rørsystem med mellemtemperatur, der er forbundet til hovedshuntsystemet mellem bynettets frem- og returløb og til den midterste del af lagringstankene (mellemtemperaturniveauet).

Hybridvarmepumpens absorber og overhedningsfjerner forsynes fra bynettes returledning og leverer det opvarmede vand til enten bynettes fremløbsledning eller til mellemtemperatursystemet – alt efter operatørens valg. Tilslutningen til mellemtemperatursystemet gør, at hybridvarmepumpen kan producere varme ved en temperatur, der er lavere end den ønskede fremløbstemperatur i fjernvarmenettet – og dermed opnå en højere COP. Den lavere temperatur kan derefter blandes med en højere temperatur fra kedlen eller lagertank.

Hybridvarmepumpens desorber forsynes fra returflowet fra kølekredsløbet og leverer det kølede vand til fremløbet i kølekredsløbet. Kølekredsløbets fremløb er forbundet til bunden af den nye varmelagertank (laveste temperaturniveau), mens returløbet er koblet til mellemtemperaturniveauet i lagertanken samt til fremløbet til solvarmeanlægget og det fremtidige damvarmelager. Denne forbindelsesmåde gør det muligt for hybridvarmepumpen at afkøle varmelagrene – herunder det fremtidige damvarmelager. Returflowet er forbundet med den midterste del af det største ståltankvarmelager, hvor varme tilføres fra den nye lavtemperaturkøler af røggassen fra den ene gasmotor og fra solfangerne ved produktion af lavtemperatursolvarme.

Som nævnt er absorptionsvarmepumpen koblet parallelt med hybridvarmepumpen på den kolde side, men i modsætning til hybridvarmepumpen leverer absorptionsvarmepumpen udelukkende varmen ved fremløbstemperaturen.

Ved ansøgningen var hybridvarmepumpen forprojekteret til at skulle have en varmeeffekt på 1,32 MW med $COP_H = 4,5$. Den detaljerede analyse af det samlede nye energisystem –

sammenholdt med kapaciteten ved de forskellige kommercielt mulige kompressorvalg – førte til en løsning med en to-trins varmepumpe baseret på standardkølekompressorer. En justering af den dimensionsgivende varmeydelse til 1,1 MW ved $COP_H = 4,2$. COP_H er baseret på det samlede elforbrug til varmepumpen inkl. tab i kompressormotorer og opløsningspumpe og inkl. deres frekvensomformere. Cirkulationspumper for fjernvarmesiden af de- og absorber er dog ikke medregnet, da de er en del af vandsystemet (med en motorstørrelse på hhv. 10 og 7,5 kW_e).

Følgende ydelsesdata blev opstillet i forbindelse med kontraktindgåelsen:

Driftpunkt nr.	Køleydelse, kW	Varme-effekt, kW	T _{desorber} (ind/ud), °C	T _{absorber} (ind/ud), °C	Optaget neteffekt, kW	COP _H
1	866	1100	23/17	35/75	265	4,2
2	1005	1207	23/17	35/60	230	5,3
3	844	1089	35/17	35/85	275	4,0

Tabel 5 Kontraktuelt opstillede ydelsesdata for den installerede hybridvarmepumpe. Nr. 1 er basis for den garanterede ydelse og effektivitet.

Det er muligt at beregne den teoretiske maksimale COP for en varmepumpe, som dermed kan bruges som et mål for, hvor god en reel varmepumpe er. For en proces med meget lille temperaturændring på kilde- og aftagersiden (i teorien slet ingen temperaturændring) vil Carnot-COP være den højest mulige for en helt tabsfri varmepumpe.

Carnot-COP, COP_C , er givet ved:

$$COP_C = \frac{T_H}{(T_H - T_L)}$$

, hvor T_H og T_L er temperaturen på henholdsvis varmeaftager- og -kildeside, der skal indsættes i grader kelvin.

Hvis der er tale om varmekilde og/eller -aftager med stor temperaturændring, kan man opnå højere COP ved at bruge varmepumper, der kobles i serie. Dette betyder, at man i teorien faktisk kan opnå højere COP end COP_C . Seriekobler man uendeligt mange varmepumper, kan man udtrykke dette nye maksimum ved Lorenz-COP, COP_L , der er givet ved:

$$COP_L = \frac{T_{lm,H}}{(T_{lm,H} - T_{lm,L})}$$

, hvor temperaturerne nu er udtrykt ved den logaritmiske middeltemperatur på de to strømme. Det skal her pointeres, at Lorenz-COP er det teoretiske maksimum, uanset om det er muligt at etablere en varmepumpe, der reelt kan arbejde med de optimalt tilpassede temperaturforløb. Et eksempel kunne være en fjernvarmepumpe, der bruger generering af is som varmekilde (f.eks. havvandsvarmepumpe). Her vil der være et meget lille glid på varmekilden (frysepunktet), mens der vil være et stort glid på varmeaftagersiden (opvarmning fra retur- til fremløbstemperatur).

Da COP_C og COP_L er de to teoretisk maksimale COP-værdier for et givet temperatursæt, kan "godheden" af en reel varmepumpes COP_{reel} vurderes ved at beregne henholdsvis Carnot- eller Lorenz-virkningsgrad, der er givet ved henholdsvis:

$$\eta_C = \eta_c = \frac{COP_{reel}}{COP_C}$$

$$\eta_L = \eta_l = \frac{COP_{reel}}{COP_L}$$

Med henvisning til Tabel 5 kan de teoretiske COP-værdier og tilhørende virkningsgrad beregnes som vist i Tabel 6.

Driftspunkt nr.	COP_L	η_L	COP_C	η_C
1	9,47	44,4%	6,00	70,0%
2	11,72	45,2%	7,75	68,4%
3	9,94	40,2%	5,27	75,9%

Tabel 6 Maksimale teoretiske COP-værdier og effektiviteter for driftskonditioner og reel COP i Tabel 5.

Lorenz-virkningsgraden på 40 til 44 % viser her, at der stadig er et potentiale for forbedring, mens Carnot-effektiviteten på 68 til 76 % vil være meget vanskelig at opnå med en konventionel varmepumpe uden opsplitning i flere trin.

På basis heraf ser hybridvarmepumpen med andre ord ud til at være det bedste valg rent procesmæssigt. Men et varmepumpeprojekts rentabilitet er en kombination af:

- finansieringsomkostninger til etablering
- driftsudgifter (COP, elpris og vedligehold)
- driftstid, der igen afhænger af nettovarmeproduktionsprisen på de alternative produktionsenheder.

Derfor er følgende alternativer undersøgt.

4.3.3. Andre varmepumpeløsninger: Et-trins hybridvarmepumpe

Dette alternativ blev undersøgt, da et et-trins anlæg rent opbygnings- og installationsmæssigt er enklere end et to-trins anlæg, hvor der ud over en ekstra kompressor med styring samt kraftforsyning også er behov for en mellemkøler. Installationsomkostningerne ville dermed blive lavere på bekostning af en reduktion i COP (og dermed højere driftsomkostninger).

Beregningerne af et-trins konfigurationen med stempelkompressor viste, at COP ville være ca. 0,2 lavere, men de viste også, at det ikke ville være muligt at overholde den maksimalt tilladelige trykrørstemperatur ved en fjernvarmetemperatur på over 80 °C. Løsningen kunne dermed ikke opfylde de opstillede krav og blev derfor forkastet.

Sammenligning af én drivlinje (motor, frekvensomformer samt eltavle og forsyningskabler) med to viste endvidere, at besparelsen var minimal ved at vælge én kompressor frem for to.

4.3.4. Andre varmepumpeløsninger: To-trins NH₃-varmepumpe

Da en konventionel designet varmepumpe er enklere i opbygningen, ville man kunne forvente en lavere etableringsomkostning. Der blev derfor også indhentet tilbud på to forskellige to-trins NH₃-varmepumper med følgende bestykning:

1. Én lavtryks- og én højtrykskompressor
2. Én lavtrykskompressor og to højtrykskompressorer.

Af disse kunne kun løsning 2 nå fjernvarmetemperaturen på 75 °C og kunne da maksimalt nå COP = 4,0, hvilket altså også var 0,2 lavere end den valgte to-trins hybridløsning. Kravet om en fjernvarmetemperatur på 85 °C var ikke muligt at nå inden for kompressorernes grænser for arbejdstryk.

Løsningen med en konventionel ammoniakbaseret varmepumpe blev derfor også forkastet.

4.3.5. Endelig udformning af hybridvarmepumpen

Anlægget er principielt udført som vist i Figur 5 – dog med to kompressorer koblet i serie med mellemkøler og væskeudskillere til køling af indsugningsgassen til højtrykskompressoren og sikring imod kondensatdannelse.

Mellemkøleren forvarmer væskeflowet, før det ledes til absorbereren, der er udført som to serieforbundne pladevarmevekslere. Trykgassen fra højtrykskompressoren køles i en overhedningsfjerner, før den ledes til absorbereren. Fjernvarmevandet opvarmes først gennem de to absorbervekslere og derefter i overhedningsfjernereren. Desorbereren er også udført som to seriekoblede pladevekslere, hvor vandet, der køles, strømmer i modstrøm.

Varmepumpen er placeret i sit eget rum og består overordnet af tre dele, der var præfabrikeret:

- Lavtrykskompressor, inklusive olieudskillere
- Højtrykskompressor, inklusive olieudskillere
- Bundramme med:
 - Mellemkøler
 - Ab- og desorber
 - Beholdere
 - Vand- og opløsningspumper.

Installationen fremgår af billederne i Figur 7 og Figur 7. 3D-videoen, der kan findes på YouTube [her](#), giver endvidere en god fornemmelse af hele installationen.



Figur 7 De to kompressorer med lavtryksskuffen forrest.



Figur 7 Rammevarmevekslere og væskeseparator. Pumpe for "kølet vand" (desorber) ses forrest.

4.4. Implementering af hybridvarmepumpen

Som det er beskrevet i 4.1 Energisystemet gør varmepumperne det muligt at udnytte varmen fra solfangerne allerede fra 30 °C. Ved denne drift leveres solvarmen ind i det nævnte mellemtemperatursystem, hvorfra varmepumpernes varmekildeside også forsynes. Med den valgte kobling, hvor solvarmeanlægget arbejder med forsyning til samme sted på tanken, opstod der ved indkøringen lejlighedsvis (f.eks. ved halvskyet vejr) så hurtige temperaturskift, at styringen af varmepumpen blev meget udfordret og nogle gange stoppede på grund af for høje temperaturer ved desorberens indløb. Dette blev løst ved ændring af den overordnede styring.

4.5. Måleprogram

Der er installeret et energimålesystem for registrering af leveret varmeproduktion, optaget varme og elforbrug til dokumentation af varmepumpens drift og effektivitet.

Det forhold, at damvarmelageret endnu ikke er bygget, har dog betydet, at de to varmepumper udelukkende har kunnet køle på den nye lagertanks volumen på 5.000 m³, hvilket igen har betydet, at driftsforholdene har været meget ens indtil nu. Det producerede kolde vand blev brugt til den ekstra røggaskøling på den ene gasmotor samt muliggjorde førnævnte start af solfangernes leverance allerede ved 30 °C.

Dette – samt den i perioden lave naturgaspris og ikke så gunstige elpris – har samlet set betydet, at hybridvarmepumpen kun har opnået 1.451 driftstimer siden starten.

4.5.1. Ydelsestest

Den kontraktuelle ydelsestest for hybridvarmepumpen blev udført natten mellem den 6. og den 7. oktober 2015, hvor der blev udvalgt en stabil periode på en times varighed til at eftervise anlæggets ydelse. Den fra kontrakten garanterede ydelse omfatter:

- Leveret effekt på min. 1150 kW
- Optaget effekt på 915 kW
- COP_H = 4,2.

Dette er under forudsætning af, at temperaturerne på kold side er 23/17 °C og på varm side er 35/75 °C.

De givne temperaturforhold under ydelsestesten var for tre af de fire temperaturer ganske tæt på designpunktet: Dette gælder temperaturerne på den kolde side, der var 22,95/16,93 °C, samt den høje temperatur på den varme side, der var 75,00 °C. Derimod var den lave temperatur på den varme side ikke 35 °C, men 38,15 °C. Ifølge producenten, Hybrid Energy AS, vil denne afvigelse i forhold til designpunktet påvirke COP_H og ydelse negativt. Betydningen er af Hybrid Energy beregnet til, at COP_H ville være 0,1 bedre, hvis testen var foretaget ved 35 °C gennem den større temperaturændring ("glid") på den varme side.

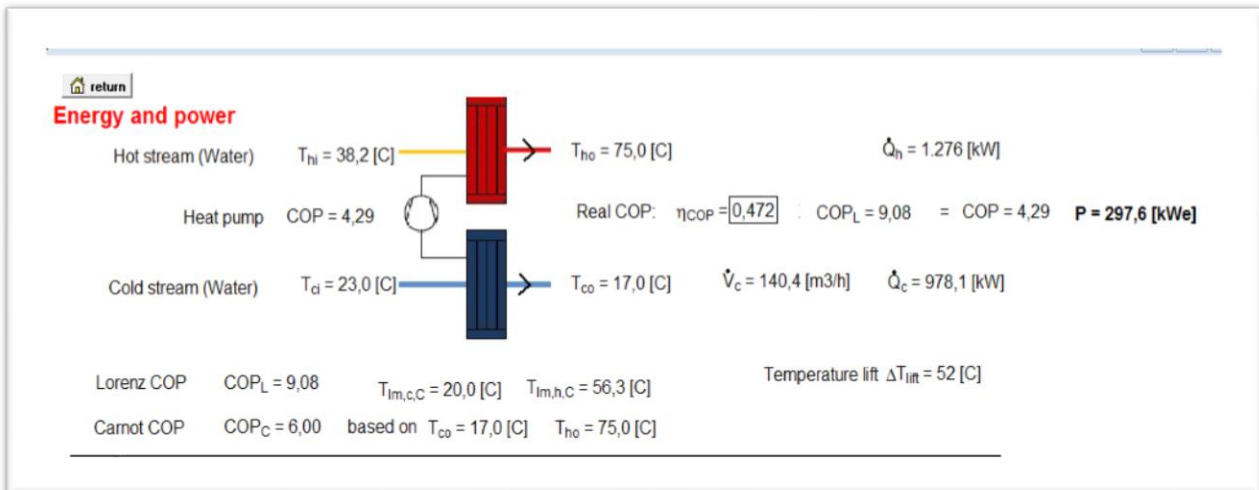
Ydelsen blev eftervist til at være:

- | | |
|-------------------------------------|-----------|
| • Leveret varmeeffekt i gennemsnit: | 1276,6 kW |
| • Optaget køleeffekt i gennemsnit: | 925,0 kW |
| • Samlet elforbrug i gennemsnit: | 297,4 kW. |

Baseret på dette var COP_H i gennemsnit = 4,29, og korrigeret for temperaturafvigelse bliver COP $4,29 + 0,1 = 4,39$.

Det kan dermed konkluderes, at hybridvarmepumpen opfylder den garanterede ydelse, idet den leverede varmeeffekt ligger 11 % højere end lovet, og COP ligger 5 % højere end lovet.

Figur 8 viser beregning af COP_C og COP_L ved garantitestens driftskonditioner. Lorenz-virkningsgraden er her 47,2 % og Carnot-virkningsgraden 71,5%.



Figur 8 Lorenz-virkningsgrad beregnet ved garantitestens driftskonditioner: 47,2 %. Beregnet med det gratis program HP FAT /2/.

Driftsmæssigt er erfaringen, at anlægget (efter førnævnte ændring af den overordnede styring) er ganske stabilt og "robust" ift. udsving til driftskonditioner og start/stop. En meget betydelig grund til dette er, at det er muligt at køre en hybridvarmepumpe med stor margin til alarmgrænserne. Ved skift af driftsparametre er styringen endvidere indrettet således, at den selv optimerer driften til optimal COP.

4.5.2. Yderligere test

Ud over ydelsestesten blev driftspunkt 2 og 3 i Tabel 5 testet. Resultaterne i Tabel 7 viser, at de opstillede ydelser og COP-værdier blev nået for driftspunkt 2, mens varmeydelsen og COP lå henholdsvis 11 % og 6 % højere ved testen af driftspunkt 3.

Driftspunkt nr.	Varmeeffekt, kW	T _{desorber} ind/ud °C	T _{absorber} ind/ud °C	COP _H
2	(1207)	(23/17)	(35/60)	(5,3)
3	(1089)	(35/17)	(35/85)	(4,0)

Tabel 7 Test ved driftspunkter fra kontraktindgåelsen: Værdier i () er fra Tabel 5, øvrige værdier er fra testen.

Som beskrevet er hybridprocessen kendetegnet ved meget stor fleksibilitet i driftsparametrene.

Dette er godt illustreret ved, at hybridvarmepumpen blev kørt højere op i temperatur for at se, hvor den øvre grænse for dette konkrete anlæg ligger. Målet var at nå 105 °C, men den højeste temperatur, der blev opnået, var 97 °C, hvor højtrykskompressoren stoppede på grund af for høj trykgastemperatur. Dette skyldtes, at mellemkøleren mellem de to kompressorer ikke havde stor nok kapacitet ved denne ret ekstreme off-designkondition til at holde sugegastemperaturen på højtrykskompressoren nede.

4.5.3. Sammenligning med andre anlæg

Da en varmepumpes COP er meget afhængig af driftskonditionerne, er en sammenligning af "godheden" mellem forskellige varmepumpeinstallationer ofte vanskelig. I det følgende er det derfor valgt at foretage sammenligningen gennem Lorenz- og Carnot-virkningsgraderne, som er beskrevet i 4.3.2.

Følgende anlæg, der også er etableret gennem et projekt, der har været støttet af EUDP, er brugt til sammenligningen:

1) Brædstrup Fjernvarme /3/

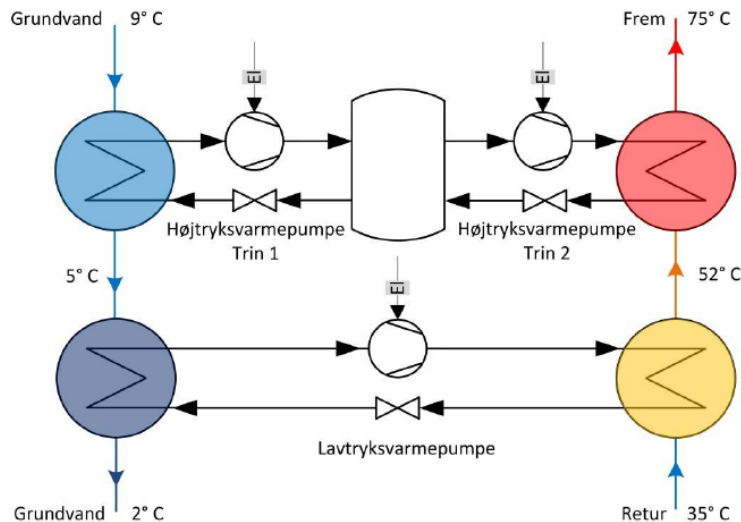
I forbindelse med et borehulslager opvarmet med solvarme har Brædstrup Fjernvarme installeret en ammoniakvarmepumpe på 1,2 MW varme. Systemet er nærmere beskrevet i Kilde 3.

2) Marstal Fjernvarme /3/

I forbindelse med et damvarmelager opvarmet med solvarme har Marstal Fjernvarme installeret en transkritisk CO₂-varmepumpe på 1,5 MW varme. Systemet er nærmere beskrevet i Kilde 3.

3) Rye Kraftvarmeværk /4/

Rye Kraftvarmeværk har etableret en ammoniakvarmepumpe på 2 MW varme. Anlægget er opbygget med opvarmning i to trin: Første opvarmning sker med en lavtryksammoniakvarmepumpe, hvorefter en højtryksammoniakvarmepumpe i to trin med i alt tre kompressorer forestår den resterende forøgelse af temperaturen. Varmekilden er grundvand, og afkølingen sker på samme måde også i to trin. Systemet er nærmere beskrevet i Kilde 4 og fremgår af Figur 9.



Figur 9 Forsimplet principdiagram for varmepumpen ved Rye Kraftvarmeværk /4/.

Alle fire anlæg er oplyst i Tabel 8 og er karakteriseret ved relativt stor temperaturændring (glid) på fjernvarmesiden, mens temperaturændringen på kildesiden er ret lille: ca. 3 °C for anlæg 1 og 2 og ca. 6 °C for anlæg 3 og hybridvarmepumpen. COP er højest for hybridvarmepumpen, men da varmepumperne ikke arbejder ved samme temperatursæt, er Lorenz- og Carnot-virkningsgraderne også anført – baseret på de respektive ydelsestest.

Anlægsnummer	Varme-effekt, kW	T _{kilde} (ind/ud), °C	T _{aftager} (ind/ud), °C	COP _H	COP _L	η _L	COP _c	η _c
1	1.200	25/22,1	40/80	3,1	9,23	33,6%	6,10	50,8%
2	1.500	18/15	35/78	3,4	8,33	40,8%	5,57	61,0%
3	2.000	8,9/2,7	41,3/71,1	3,9	6,56	59,2%	5,03	77,2%
Hybrid	1.276	23,0/16,9	38,2/75,0	4,3	9,08	47,2%	6,00	71,5%

Tabel 8 Lorenz- og Carnot-virkningsgrader for sammenlignelige varmepumpeanlæg og hybridvarmepumpen.

Som beskrevet i 4.3.2 er Lorenz-virkningsgraden den øvre teoretiske grænse for varmepumpernes COP, mens Carnot-virkningsgraden er den teoretiske COP-grænse for en varmepumpe, der opererer mellem den laveste kilde- og højeste aftagertemperatur. Forskellen mellem de to virkningsgrader er et udtryk for potentialet ved at vælge en varmepumpeteknologi, der udnytter temperaturglidet på kilde- og/eller aftagersiden. Af Tabel 8 ses, at

hybridvarmepumpen er betydeligt bedre end anlæg 1 og 2, mens anlæg 3 er bedre end hybridanlægget. Vedrørende anlæg 3 skal der dog gøres opmærksom på, at forskellen mellem Lorenz- og Carnot-virkningsgraden er betydeligt mindre end ved de øvrige to anlæg, samt at der også er gjort tiltag i designet (Figur 9), der udnytter temperaturlidet bedre.

4.6. Formidling af resultater

Anlægget har været fremvist gentagende overfor interesserede af både Løgumkloster Fjernvarme og Innoterm, foruden at det fremgår af Innoterms referenceliste, der kan ses her: www.innoterm.dk/files/9415/0788/3228/121017_Ref_liste_Innoterm.pdf

Anlægget præsenteres også i Hybrid Energys referenceliste og kan ses her: www.hybridenergy.no/referenceplants/logumkloster-denmark/

Innoterm har udarbejdet en animeret 3D-videovisualisering af anlægget, der kan ses her: www.youtube.com/watch?v=akohGCP08fA

Projektet er også præsenteret som "sekundært projekt" på HPCOM's hjemmeside: hpcom.dk/hybrid-varmepumper-til-fjernvarme

Endvidere er teknologien og anlægget præsenteret af Teknologisk Institut på internationale konferencer, hvor også testen ved 97 °C fjernvarmetemperatur fremhæves:

- 12th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - GL2016
- High Temperature Heat Pump Workshop: www.teknologisk.dk/ydelser/high-temperature-heat-pump-workshop/38650
- European Heat Pump Summit, 2017: www.hp-summit.de/en.

5. Konklusion og perspektivering

I forbindelse med Løgumkloster Fjernvarmes overgang fra naturgasbaseret fjernvarme til vedvarende energiresourcer i form af biobrændsel, solvarme, større buffertankkapacitet og damvarmelager til sæsonlagring af solvarme, var det et ønske at supplere den allerede installerede absorptionsvarmepumpe med en elektrisk drevet hybridvarmepumpe.

Formålet med hybridvarmepumpen var – sammen med absorptionsvarmepumpen – at:

1. producere koldt vand, som øger kapaciteten på damvarmelageret gennem en forøgelse af det temperaturområde, lageret arbejder under (og en formindskelse af varmetabet).
2. øge produktionen og mindske tabet fra solfangerne ved at kunne udnytte solvarmen allerede ved 30 °C – altså lavere end returtemperaturen i fjernvarmenettet.
3. øge varmevirkningsgraden på gasmotorerne vha. den nye LT-veksler til yderligere køling af røggassen.

Den eldrevne hybridvarmepumpe vil endvidere kunne udnytte lave elpriser, mens drift af absorptionsvarmepumpen forudsætter, at biomassekedlen er i drift. Hybridvarmepumpen gør det dermed også muligt at reducere behovet for biomasse gennem udnyttelse af eventuel billig strøm (overskudsstrøm).

Hybridvarmepumper er kendetegnet ved stabil, robust og "komfortabel" drift, idet teknologien gør det muligt:

- at anvende de naturlige arbejdsmedier vand og ammoniak.
- at producere høje fremløbstemperaturer (> 100 °C) ved lave tryk (< 25 bar), hvorfor industrielle standardkølekomponenter kan anvendes og ikke belastes så meget som ved højtryksdrift.
- at udnytte kilder med ganske høj tilgangstemperatur uden begrænsninger i maksimalt sugetryk, eftersom kompressorerne tvinger fordampningstemperaturen (og dermed COP) ned.
- at lade driften ske langt fra alarmgrænserne ved de ret høje fjernvarmetemperaturer, hvilket åbner for en meget større driftsvariation og en større driftsstabilitet ved pludselige driftsændringer.
- at opnå høj COP, hvis det såkaldte temperaturglid på den kolde og/eller varme side kan udnyttes – dvs. når varmekilden skal køles mange °C, og varmedrænet skal opvarmes mange °C.

På baggrund af analyser af det samlede system er der designet og installeret en to-trins hybridvarmepumpe på ca. 1,2 MW varme og med en COP på mellem 4,0 og 5,3 – afhængigt af driftstemperaturerne. Den kontraktuelt garanterede varmeydelse og COP blev eftervist med 11 % højere ydelse ved 5 % højere COP.

Løsningen blev sammenlignet med en et-trins hybridvarmepumpe (med henblik på kostoptimering) og en højtryksammoniakvarmepumpe. Ingen af disse løsninger kunne opfylde

samtligte opstillede krav til levering af fjernvarme ved op til 85 °C, foruden at den opnåelige COP lå ca. 0,2 lavere end den valgte to-trins løsning.

Sammenligning med tre andre varmepumper installeret i lignende fjernvarmesystemer viste, at hybridvarmepumpen havde højeste COP. Systemerne arbejder dog ikke ved samme temperatursæt, hvorfor der også er gennemført en sammenligning på baggrund af Lorenz- og Carnot-virkningsgrader, der begge er baseret på de teoretisk maksimalt opnåelige COP-værdier. Her var hybridvarmepumpen bedre end konventionelle varmepumpeløsninger og sammenlignelig med en varmepumpeløsning, der som hybridvarmepumpen var tilpasset til bedre at udnytte temperaturglidet på kold og varm side.

Efter en mindre ændring af den overordnede styring af solvarmesystemet ift. varmepumpen har varmepumpen kørt uden problemer – inklusive automatisk start og stop.

Da damvarmelageret ikke blev etableret, har hybridvarmepumpen dog udelukkende kunnet anvendes til ovennævnte pkt. 2 og 3. Dette ses også af, at varmepumpen kun har haft 1.451 driftstimer siden idriftsættelsen.

Selvom varmepumpen er designet og dimensioneret til at levere fjernvarme ved 60 til 85 °C, viste det sig muligt at levere fjernvarme op til 97 °C. Begrænsningen for at nå endnu højere temperaturer lå i designet af en af de interne varmevekslere.

5.1. Perspektivering

Hybridvarmepumpen er særligt velegnet til opvarmning med større temperaturændring, som det er tilfældet ved fjernvarme, da blandingen af ammoniak og vand medfører varmeafgivelse med temperaturglid. Dette temperaturglid sker også ved optagelsen af varme fra varmepumpens kilde. Hybridvarmepumpen har derfor også en fordel ved kilder, der kan afkøles over et større temperaturinterval. Ved f.eks. køling af vand vil dette føre til mindre flow.

Projektet har vist, at hybridvarmepumpen kan levere høj fjernvarmetemperatur med høj COP og er meget stabil i drift – inklusive automatisk start og stop.

Førstnævnte underbygges af, at der i Norge er leveret et kommercielt anlæg designet til 95 °C og testet til kontinuerlig drift ved 110 °C /5/. Teknologien kan med andre ord anvendes til varmeleverance til de større byers transmissionsnet ved typisk 100 – 110 °C.

Selvom der ikke er opnået et højt driftstimeantal i indeværende projekt, viser erfaringer fra andre anlæg – herunder hybridvarmepumpen, der er installeret i Arlas tørmælksfabrik Arinco /6/ – at det lavere arbejdsstryk samt ammoniak-/vandblandingens rensende virkning ("salmiakvand") har en positiv betydning for vedligeholdelsesomkostningerne sammenlignet med andre industrielle højtemperaturvarmepumper.

Samlet set har Hybrid Energy erfaring fra mere end 400.000 driftstimer på deres anlæg.

6. Kilder

- 1 "Projektforslag for etablering af en hybridvarmepumpe hos Løgumkloster Fjernvarme", PlanEnergi, maj 2014.
- 2 Heat Pump First Assessment Tool, HP FAT, Teknologisk Institut 2016, www.teknologisk.dk/ydelser/varmepumper/beregningsprogram-hp-fat/22685,2
- 3 Long term storage and solar district heating, PlanEnergi, ens.dk/sites/ens.dk/files/Forskning_og_udvikling/sol_til_fjernvarme_brochure_endelig.pdf
- 4 Inspirationskatalog for store varmepumper, Energistyrelsen 2017, ens.dk/sites/ens.dk/files/Varme/inspirationskatalog_for_store_varmepumper.pdf
- 5 Referenceanlæg Frevar, Hybrid Energy, www.hybridenergy.no/referenceplants/frevar-norway/
- 6 Referenceanlæg Arinco, Innoterm, www.innoterm.dk/files/9415/0788/3228/121017_Ref_liste_Innoterm.pdf
Hybrid Energy, www.hybridenergy.no/referenceplants/arla-arinco/