

solv & varmepumper

Evaluering af muligheder for samdrift



Solvarme & varmepumper

Evaluering af muligheder for samdrift

Forsidebillede:	Solfangere og energioptagere på dansk fjernvarmeværk, DT/PlanEnergi
Rapporttitel:	Solvarme & varmepumper
Emne:	Evaluering af muligheder for samdrift
Udgivelsesdato:	Marts 2026
Projekt nr.:	21015
Udarbejdet af:	DT
Kvalitetssikret af:	NF
Version:	1.3
Udarbejdet for:	Dansk Fjernvarme <i>Rapporten er udarbejdet med støtte fra Dansk Fjernvarmes F&U-konto under projektnummer 202101 med input fra Løgumkloster Fjernvarme.</i>

Indholdsfortegnelse

Resumé	5
1 Indledning	9
1.1 Formål og baggrund	9
1.2 Rapportens anvendelse	9
2 Konfigurationer – fordele og ulemper.....	10
2.1 Principskitser for forskellige konfigurationer	10
2.1.1 Figurforklaring.....	10
2.1.2 Konfigurationer	10
2.2 Generelle fordele og ulemper ved solkøling	21
2.3 Komplexiteten	22
2.3.1 Det øvrige anlæg	22
2.3.2 Overkapacitet eller begrænset kapacitet	23
2.3.3 Temperaturpåvirkning af varmepumpens COP	23
2.3.4 Køling af solvarmetransmissionsledning	24
3 System-COP-princippet	25
4 Forudsætninger	27
4.1 Eksempel på fordeling af solindstråling	27
4.2 Grundlæggende parametre.....	29
4.3 Ekstra kapacitet på varmepumpen.....	29
5 Resultater – eksempler på driftssituationer.....	31
5.1 Merydelse fra solfangere	31
5.2 Sammenligning på tværs af driftsformer.....	35
5.3 Tendenser for system-COP.....	37
5.3.1 Beregningsresultater for system-COP	37
5.3.2 System-COP og fordeling af solindstråling.....	41
5.4 Valg af driftsform for solvarmeanlægget	42
5.4.1 Høj temperatur fra solvarme blandet med lavere temperatur fra VP	42
5.4.2 Solvarme ved lavere temperatur og varmepumpe ved høj temperatur	44
5.4.3 Reduceret tilgangstemperatur til solfeltet	46
5.4.4 Beslutningstræ	49
6 Metodebeskrivelse – årssimuleringer	53
7 Resultater – årssimuleringer	54

7.1	Energiberegninger	54
7.1.1	System-COP time for time og døgn for døgn.....	54
7.1.2	Energimæssige forbedringspotentialer	55
7.2	Økonomi	56
7.2.1	Driftsbesparelsemuligheder	56
7.2.2	Merinvesteringer	58
7.2.3	Alternativ investering.....	58
7.3	Følsomhedsberegninger	59
7.3.1	Varmepumpekapacitet flyttes fra normal varmepumpe drift	59
7.3.2	Prisen for øvrig varme	59
7.3.3	Elpris	60
7.3.4	COP for varmepumpen	60
7.3.5	Varmepumpens kapacitet.....	60
7.3.6	Solfangerareal	61
7.3.7	Kapacitet af solkøling og kombination med øvrig solvarmedrift	61
7.3.8	Temperaturniveau for køling.....	61
7.4	Opsummering af årssimuleringer.....	62
8	Konklusion og anbefalinger	63
9	Nomenklatur.....	65
9.1	Symbolforklaring og forkortelser	65
9.2	Præfikser.....	65
	Bilag A – Køling af returvand	66
	Bilag B – Øvrige opmærksomhedspunkter	67
	Kondensering i solfangerne.....	67
	Allokering af lagerkapacitet	67
	Sæsonvarmelagre	67
	Absorptionsvarmepumper	67
	Bilag C – Beslutningstræ	68

Resumé

Baggrund

Varmepumper udgør i stigende grad en vigtig del af fjernvarmeforsyningen. Samtidigt har mange fjernvarmeværker allerede et storskala solvarmeanlæg. Nærværende rapport beskriver muligheder for samspil mellem sådanne solvarmeanlæg og varmepumper inkl. anbefalinger til driften.

Solvarmeanlæg bliver mere effektive, hvis man kan reducere temperaturniveauet i solfangerne. Tilsvarende kan varmepumpers ydelse potentielt forbedres ved at temperaturen på den varme side sænkes (dvs. indløbet som typisk er fjernvarmenettets returvand og/eller den temperatur, der skal leveres). Den ideelle driftsform afhænger af en række anlægsspecifikke parametre såvel som udefrakommende faktorer som el- og brændselspriser, og er ikke konstant over året. Formålet med rapporten er således ikke at give et entydigt svar gældende for alle værker med solvarme og varmepumpe, men at forklare fordele/ulemper ved forskellige kombinationer af driftsstrategi for hhv. solvarmeanlæg og varmepumpe for på den måde at vejlede til en mere effektiv samlet drift.

Sammenligning af driftsformer – øjeblikbilleder

Al varme med en temperatur, der er højere end fjernvarmenettets returtemperatur kan bruges i fjernvarmenettet ved hjælp af direkte varmeveksling¹. Hvis solvarmen ikke leveres ved (eller over) fjernvarmenettets fremløbstemperatur, skal en anden varmekilde levere en højere temperatur fra fx en kedel eller en varmepumpe (enten i en seriekobling eller ved blanding af vandstrømme). Tilsvarende kan solfangerne alternativt levere en *højere* temperatur end fjernvarmenettets fremløbstemperatur, hvilket medfører en lavere solvarmeydelse, men muliggør, at der kan iblandes en lavere temperatur fra fx en varmepumpe, som drager fordel af at levere en lavere fremløbstemperatur. En tredje mulighed er, at en varmepumpe bruger solvarmen som varmekilde, hvilket kan øge solvarmeydelsen og varmepumpens COP ift. andre varmekilder. I nærværende rapport beskrives disse muligheder, fordele og ulemper, en evaluering af, hvornår de forskellige driftsformer er mest relevante, samt en vurdering af økonomien i forskellige valg af driftsformer.

Nedenfor ses et eksempel på et øjeblikbillede, hvor varmebehovet er 4 MW og solindstrålingen (G) er grupperet i hhv. 200, 300, 400 og 500 W/m². Figuren kunne også svare til en times drift (så det svarer til en produktion på 4 MWh) – eller et gennemsnit over flere timer. I eksemplet kan varmebehovet dækkes af hhv. solvarme og en varmepumpe, som kan køle udeluft. Der sammenlignes tre mulige valg af driftsformer: Søjlen til venstre ved hver af de fire forskellige solindstrålinger repræsenterer en normal styring af temperaturen i sol-feltet ("Standard"). Søjler til højre i hver gruppe repræsenterer en alternativ driftsform, hvor varmepumpen køler vandet, der sendes til solfeltet², for at holde en lav temperatur i solfangerne. Denne driftsform er på figuren kaldet "Solkøl" og kan supplere normal varmepumpedrift baseret på udeluft. Til sammenligning er der desuden lavet en beregning, hvor solvarmeanlægget modtager en temperatur på niveau med fjernvarmenettets returløb, mens det leverer en temperatur, der er lavere

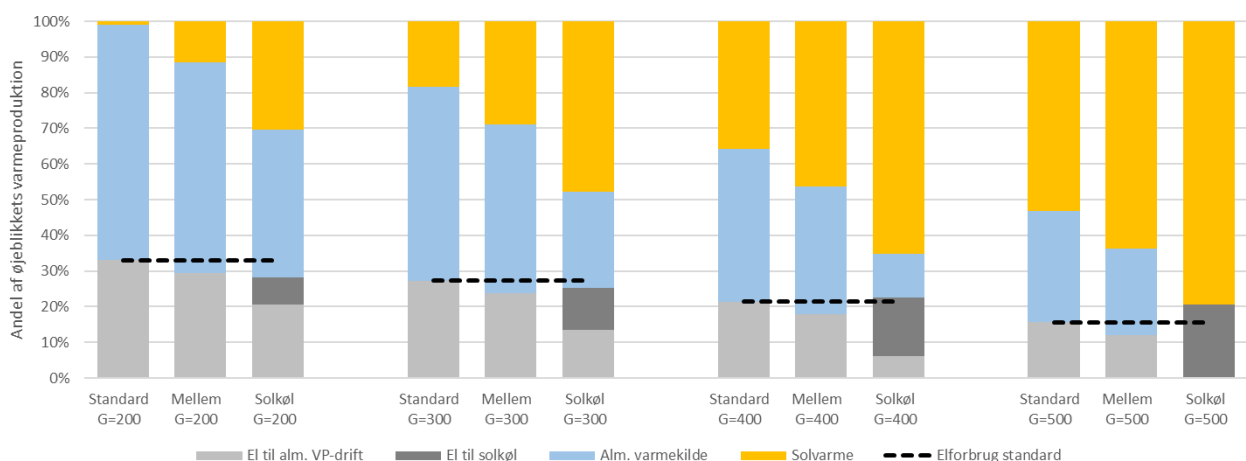
¹ Retteligt skal der til solvarmens minimumtemperatur tillægges temperaturforskellen mellem varmevekslerens primære og sekundære side – typisk omkring 3-4 K.

² Varmepumpen kan også køle tankens bund, som så kan veksles med glykol-kredsen i solfangerfeltet, dvs. varmepumpen køler solfangervæsken *indirekte* via tanken.

end fjernvarmenettets fremløb. Solvarme ved en sådan "mellemtemperatur" skal således blandes med høj temperatur fra varmepumpen for at den ønskede fremløbstemperatur i fjernvarmenettet opnås. Hvis der ikke skal benyttes andre enheder end solvarmeanlæg og varmepumpe forudsætter dette, at varmepumpen er bygget til at kunne levere en højere temperatur end fjernvarmenettets fremløb³.

I eksemplet med en indstråling på 400 W/m² ("G=400") leverer solvarmen med en standard-driftsform ca. 1,4 MW ved fjernvarmenettets fremløbstemperatur (gul søjle), mens varmepumpen køler udeluft og leverer den resterende del af varmen bestående af hhv. 1,7 MW energi fra udeluften (blå søjle) og 0,9 MW el (lysegrå søjle). I samme gruppe (G=400), resulterer driftsform med "solkøling" i en højere solvarmeydelse på 2,6 MW. Selv med en høj COP bruger varmepumpen 0,7 MW el til denne køling (mørkegrå). Til gengæld behøves ikke samme mængde energi fra luften, så varmepumpen trækker kun 0,5 MW fra udeluften, hvilket kræver 0,2 MW el. Tilsammen bruges dermed 0,7 + 0,2 = 0,9 MW el til denne driftsform (lysegrå + mørkegrå søjle på figuren). På trods af at der er produceret væsentligt mere solvarme i eksemplet med solkøling, er der således ikke nogen reduktion i det primære energibehov (el-forbruget) i dette eksempel. Solvarmen har blot fortrængt energi fra udeluften.

Sammenlignes elforbrugene i hver gruppe ses det, at driftsformen med solkøling i nogle tilfælde bruger mere el for den samme mængde varmeoutput. Det er således ikke altid en fordel at køle solfangerne, selvom solvarmeydelsen øges og COP er forbedret. Det skal dog understreges, at forudsætningerne (solindstråling, temperaturniveauer mv.) er afgørende for, hvilken driftsform der er mest fordelagtig og at resultatet i nogle situationer med andre forudsætninger viser en fordel ved den modsatte driftsform. I nogle tilfælde vil der være behov for at udjævne produktionen over døgnet vha. en akkumuleringstank (eksempelvis med solvarmeproduktion om dagen og varmepumpedrift døgnet rundt). På den måde kan passende mængder vand ved høj temperatur blandes med solvarme ved en "mellemtemperatur" for at sikre forsyning ved den ønskede fremløbstemperatur i fjernvarmenettet.

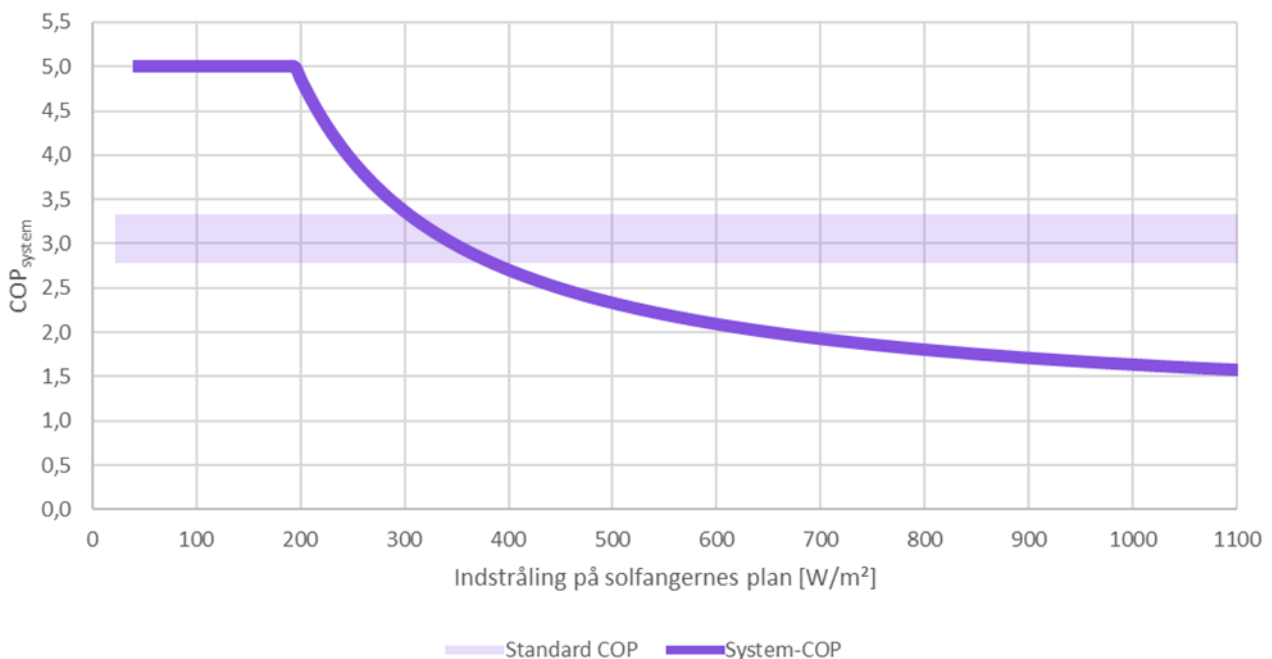


Fjernvarmeproduktionens fordeling i en situation med solindstråling (G) på hhv. 200, 300, 400 og 500 W/m², hvor solfangerne skal levere hhv. fremløbstemperaturen i fjernvarmenettet ("Standard"), en mellemtemperatur ("Mellem", dvs. en temperatur mellem fjernvarmenettets retur- og fremløb) eller hvor solfangerne køles af varmepumpen og leverer en lav temperatur ("Solkøl"). Udelufttemperatur i dette eksempel: 20 °C.

³ I nogle tilfælde er varmepumpen ikke designet til at kunne levere temperaturer nævneværdigt højere end fjernvarmenettets fremløbstemperatur. I andre tilfælde er det ikke så afgørende for varmepumpens drift.

System-COP

Beregningerne viser, at når en varmepumpe køler solfangervæsken, øges solvarmeproduktionen med en absolut mængde, der ikke afhænger af solindstrålingen. Ekstra solvarmeproduktion ved køling af solfangerne er således uafhængig af solindstrålingen. Til gengæld gælder det, at ved høj solindstråling skal mere solvarme køles, og dermed skal der mere elektricitet til for at opnå den ekstra varme. Der kan således opstilles en sammenhæng mellem ekstra varmeoutput ved at køle solfangerne og elforbruget for at muliggøre dette. Man kan betragte dette som en COP for hele systemet – "en system-COP". Figuren herunder viser et eksempel på en sådan system-COP beregnet som *ekstra varmeydelse* divideret med *ekstra elforbrug*. Til sammenligning vises tilsvarende et typisk niveau for en varmepumpes COP ved normal drift ("Standard-COP").



Hvis der er behov for ekstra varme ud over, hvad varmepumperne og solfangerne kan levere, kan en lav system-COP (fx 2,0) stadig være relevant, hvis alternativet eksempelvis er en elkedel. På den anden side, hvis der er en overkapacitet af solvarme (fra solfangerne/lageret) kombineret med den almindelige varmepumpedrift, er der ingen el-besparelse ved drift med en lav system-COP, der fortrænger drift med den almindelige varmepumpe-COP. Med andre ord giver det ikke mening at erstatte *varmepumpe-drift ved en COP på fx 3,0 med solkøling ved en system-COP på 2,0* – selv om det kan se tillukkende ud, at solfangerne vil producere mere varme. Denne ekstra solvarme fortrænger varmepumpens almindelige varmekilde.

Årssimuleringer

Timeværdier for system-COP beregnet hen over et år viser, hvordan værdierne følger tendensen på ovenstående figur. Det ses af årssimuleringerne, at hvis solkøling aktiveres på tidspunkter, hvor det giver økonomisk gevinst (med de angivne forudsætninger), fås omkring 7-11% højere solvarmeydelse end en referencesituation uden solkøling. Dette kræver dog ekstra elforbrug til varmepumpen. Hvis man

sidestiller elforbrug og den øvrige varme, der skal dække behovet ud over solvarme og varmepumpe, ses en energibesparelse på ca. 2% på årsbasis.

Beregningerne viser et potentiale for økonomiske besparelser ved at optimere samdriften for solvarme og varmepumpe bl.a. i form af køling af solfangerne med varmepumpen. Dette gælder også selvom en sådan mulighed kræver en merinvestering. Gevinsten afhænger dog meget af forudsætninger som elpriser og prisen for den alternative varmeproduktion, som kan fortrænges ved en øget solvarmeproduktion. Desuden er et afgørende element, om varmepumpens kapacitet i et eller andet omfang øges som konsekvens af solkølingsfunktionen.

Konklusioner og anbefalinger

Beregningerne viser, at der ved nye anlægsinvesteringer er basis for at undersøge muligheden for en solkølingsfunktion nærmere, eftersom tilbagebetalingstiden potentielt kan blive relativt kort sammenholdt med anlæggets levetid. I en sådan evaluering bør der dog også indgå øvrige investerings-/dimensioneringsmuligheder. Optimeringen er dog kompleks, og mange faktorer spiller ind på valget af den mest relevante driftsform. Komplexiteten medfører samtidigt en risiko for at træffe u hensigtsmæssige beslutninger for driften. Det er således ikke i alle tilfælde at solkøling vil være rentabelt.

Det bemærkes at fleksibilitet mht. driftsformer også har den fordel, at det giver flere muligheder for optimering på den lange bane, hvilket kan gøre værket mere robust ift. udsving i priser på el, brændsler mv.

Beregningerne viser en tendens til at det typisk er u hensigtsmæssigt at køle solfangerne ved høj solindstråling. Det er samtidigt mindst relevant, hvis der i forvejen er tilstrækkelig kapacitet på solvarme sammen med varmepumpen.

Solvarmeanlægget kan med fordel levere en lavere temperatur end fremløbstemperaturen så længe solvarmen dækker en mindre andel af forbruget (typisk i vinterhalvåret). Dette ses allerede i dag som en bredt anvendt driftsstrategi hos en række fjernvarmeværker med solvarme. Det er muligt at beregne, hvilken temperatur der kan lagres ved og hvor hurtigt en sådan "mellemtemperatur" kan afsættes ved at blande med en højere temperatur fra fx varmepumpe eller kedel for at opnå fjernvarmenettets fremløbstemperatur.

I anlæg hvor muligheden for at styre solvarmeanlægget i samspil med en varmepumpe, allerede er til stede i dag, kan der potentielt implementeres løbende beregninger for at sammenligne forskellige potentielle driftsstrategier og udvælge den mest hensigtsmæssige for det givne anlæg.

1 Indledning

1.1 Formål og baggrund

Mange danske fjernvarmeværker har minimum én varmepumpe. I mange tilfælde er der tale om luft/vand-varmepumper, hvor der samtidigt allerede er etableret storskala solvarmeanlæg. Formålet med projektet er at undersøge hvilke driftsformer for kombinationen af solvarme- og varmepumpeanlæg, der er mest hensigtsmæssig. Den optimale kobling og drift er kompleks og indebærer mulige "faldgruber" i form af metoder, der umiddelbart kan se favorable ud, men som faktisk øger omkostningerne.

Generelt har både solvarmeanlæg og varmepumper fordel af at skulle levere en så lav temperatur som muligt. Dilemmaet består dermed i, hvordan man bør kombinere driften af hhv. solvarmeanlæg og varmepumpe mht. hvilke temperaturer de skal levere hver især. Komplexiteten øges af, at der ikke er et svar, som repræsenterer alle tænkelige vejrforhold, driftsforhold, forudsætninger mv.

I rapporten introduceres begrebet "system-COP" som kan bruges til sammenligning af forskellige løsninger. Analysen viser, hvordan den optimale driftsform i høj grad afhænger af de ydre omstændigheder – særligt solindstrålingen. Derfor vises flere regneeksempler med variationer af solindstrålingen for at præsentere betydningen og konkludere på anbefalede valg ift. styring af det samlede anlæg.

1.2 Rapportens anvendelse

Nærværende rapport er tiltænkt som inspiration og oplysning om fordele og ulemper ved forskellige konfigurationer og driftsformer af kombinationen af solvarme- og varmepumpeanlæg. Beregningerne er udført med en række antagelser, der i praksis vil variere fra sted til sted og i forskellige situationer mv. Hverken PlanEnergi, forfattere eller Dansk Fjernvarme kan derfor på nogen måde drages til ansvar for direkte eller indirekte negative konsekvenser af eventuelle investeringer, valg af driftsformer eller anden anvendelse af indholdet i rapporten. Til gengæld bør der udføres beregninger, der tager udgangspunkt i det enkelte værk, hvis man ønsker at belyse situationen for den given specifik case.

2 Konfigurationer – fordele og ulemper

I det følgende beskrives forskellige konfigurationsmuligheder samt grundlæggende overvejelser vedr. de forskellige muligheder.

2.1 Principskitser for forskellige konfigurationer

Et solvarmeanlæg (med en akkumuleringstank) kan bruges sammen med en varmepumpe på flere forskellige måder, herunder følgende konfigurationer, hvortil temperaturløftet i hhv. solvarmeanlæg og varmepumpen (varm side) er illustreret grafisk.







2.1.1 Figurforklaring

I de følgende skitser er temperaturniveauer beskrevet med forskellige farver (se forklaring nedenfor). En pil indikerer en bestemt retning på væskeflowet. En forbindelse uden en pil indikerer at væske-flowet kan gå begge veje.

Det gælder generelt for alle diagrammerne, at de ikke skitserer det fuldt fungerende system, men nogle delelementer af systemet relateret til koblingen af solvarmen, varmepumpen, akkumuleringstanken ("akkutank") og "Forbruget" (dvs. grænsen mellem fjernvarmeværket og fjernvarmenettet). "Forbrug" henviser til temperatursættet med hhv. "Fremløbstemperatur" og "Returtemperatur".

Varmepumpens energioptagere, som eksempelvis henter varme fra udeluften, illustreres kun på første skitse (standardløsningen) og er udeladt efterfølgende for overskuelighedens skyld, men indgår principielt i alle konfigurationerne.

Følgende farvekoder bruges i de efterfølgende skitser:

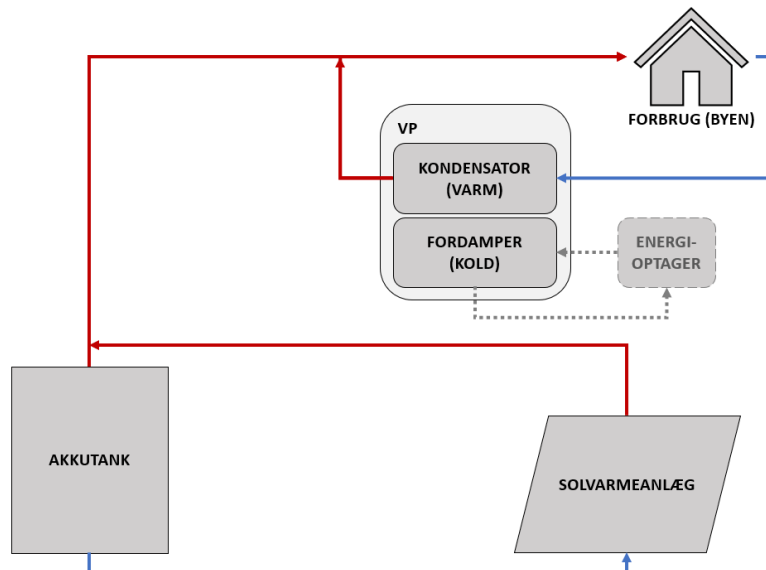
	Høj (over "Frem")
	Frem (fremløbstemperatur i fjernvarmenettet)
	Mellem (mellemting mellem Retur og Frem)
	Miks (blanding af Mellem og Retur)
	Retur (returtemperatur i fjernvarmenettet)
	Kølet (kølet og lavere end Retur)

2.1.2 Konfigurationer

Konfiguration 0

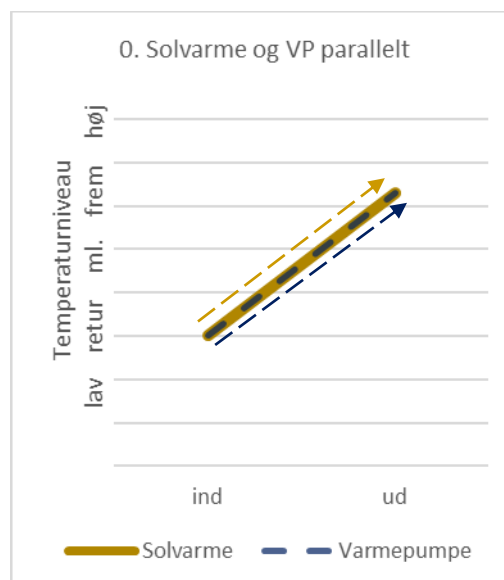
Solvarmeanlæg og varmepumpe driftes parallelt (standardløsning)

Varmepumpe (VP) og solvarme driftes parallelt, hvor returvand fra fjernvarmenettet opvarmes af enten, solvarmeanlægget, varmepumpen (på den varme side) eller akkumuleringstanken. Både solvarmeanlæg og varmepumpe har mulighed for at lagre varme i eller aftage vand fra akkumuleringstanken. Varmepumpens kolde side optager energi fra varmekilden – eksempelvis udeluften. I denne konfiguration er der ingen direkte kobling mellem de to produktionsenheder.



Figur 1: Konfiguration 0 – Standardløsning, hvor solvarmeanlæg og varmepumpe driftes parallelt. Kun fjernvarmevandsstrømme vises.

Både solvarmeanlæg og varmepumpe modtager fjernvarmevand ved returtemperatur⁴ og leverer varme ved fjernvarmenettets fremløbstemperatur. På figurer som den viste nedenfor, henviser "Varmepumpe" til varmepumpens varme side.



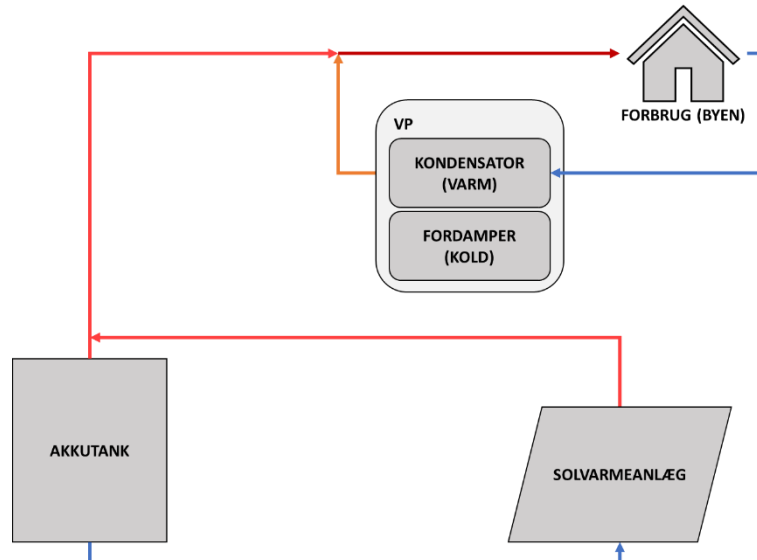
Figur 2: Konfiguration 0 – Temperaturniveauer for standardløsningen, hvor solvarmeanlæg og varmepumpe driftes parallelt.

⁴ Da der er en varmeveksler mellem fjernvarmevandet og solfangervæsken, vil der i praksis opleves en temperaturforskel mellem fjernvarmereturvand og væsken, der cirkuleres ud til solfangerne.

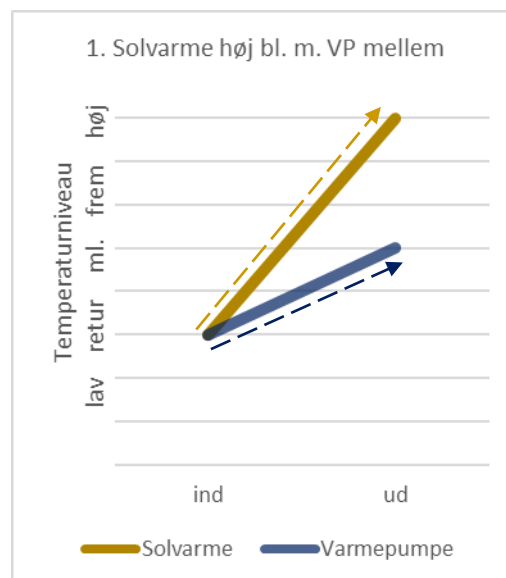
Konfiguration 1

Solvarme ved høj temperatur blandes med flow fra varmepumpe ved lavere temperatur

Højtemperatursolvarme blandes med en lavere "mellemtemperatur" fra varmepumpen. ("Mellemtemperatur" henviser til en temperatur mellem fjernvarmenettets retur- og fremløb.)



Figur 3: Konfiguration 1 – Flow fra varmepumpe ved lavere temperatur blandes med solvarme ved høj temperatur.



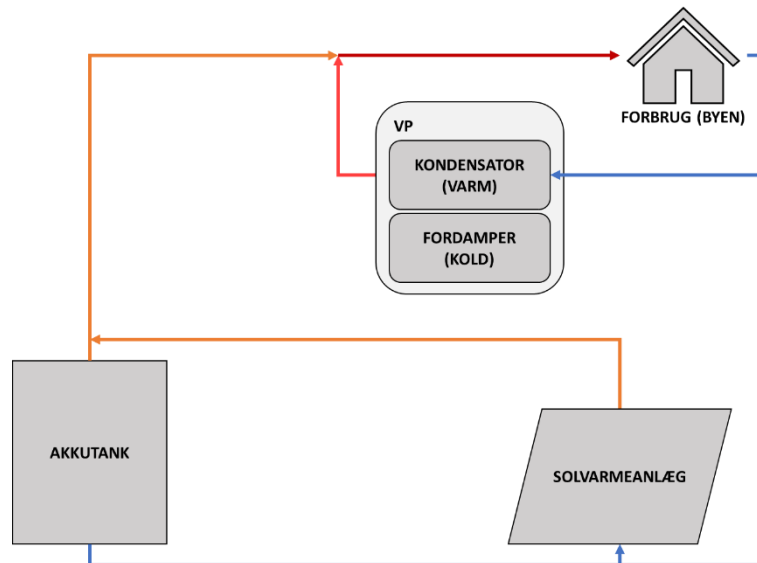
Figur 4: Konfiguration 1 – Temperaturniveauer hvor flow fra varmepumpe ved lavere temperatur blandes med solvarme ved høj temperatur.

Konfiguration 2

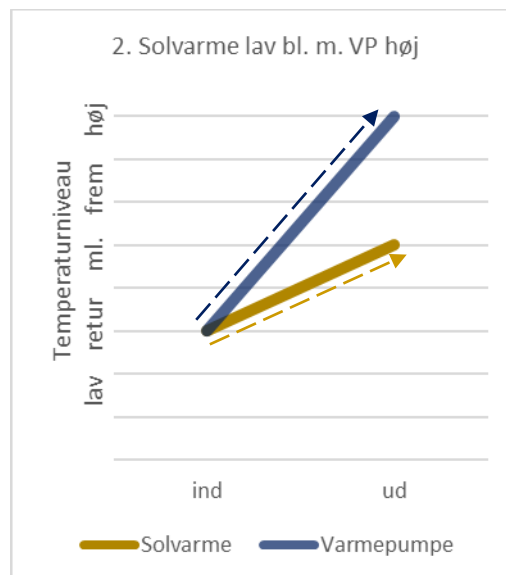
Solvarme ved lavere temperatur blandes med flow fra varmepumpe ved høj temperatur

Solvarme ved en "mellemtemperatur" blandes med høj temperatur fra varmepumpen.

(Forudsætter at varmepumpen er dimensioneret til at kunne levere en højere temperatur end fjernvarmenettets fremløbstemperatur⁵.)



Figur 5: Konfiguration 2 – Solvarme ved lavere temperatur blandes med flow fra varmepumpe ved høj temperatur.



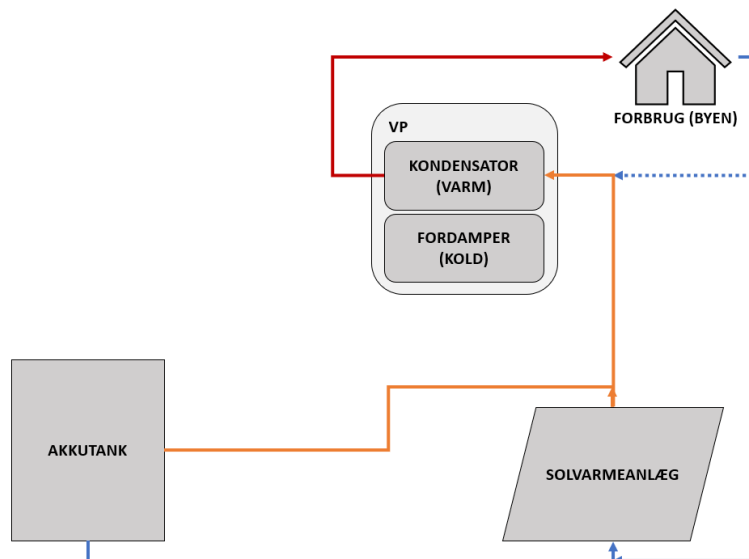
Figur 6: Konfiguration 2 – Temperaturniveauer hvor solvarme ved lavere temperatur blandes med varme fra VP ved høj temperatur.

⁵ Nogle varmepumper er ikke designet til at kunne levere temperaturer nævneværdigt højere end fjernvarmenettets fremløbstemperatur (eksempelvis 75 °C), mens det for andre typer gælder, at opvarmning til ca. 85 °C ikke er afgørende for varmepumpens drift.

Konfiguration 3a

Solvarmeanlægget forvarmer vandet til varmepumpen

”Mellemtemperatur-solvarme” sendes ind på den varme side af varmepumpen, hvor temperaturen øges til fremløbstemperaturen. (Varmepumpen kan potentielt være konfigureret, så denne løsning er begrænset eller umulig.) Det understreges, at det kan være et krav fra varmepumpeleverandøren, at varmepumpen modtager en jævn temperatur, da den ellers risikerer udfald/skader. Direkte forbrug af mellemtemperatur-vand fra solfeltet til varmepumpens varme side bør derfor kunne blandes (shuntes) med returvand for at holde temperaturen stabil, jf. punkt 3b. Metoden vil dog begrænse muligheden for underkøling i varmepumpen, medmindre der suppleres med en direkte forbindelse fra returvandet til varmepumpen, som forbindes til underkølingen. Ikke alle varmepumper vil dog understøtte en sådan konfiguration.

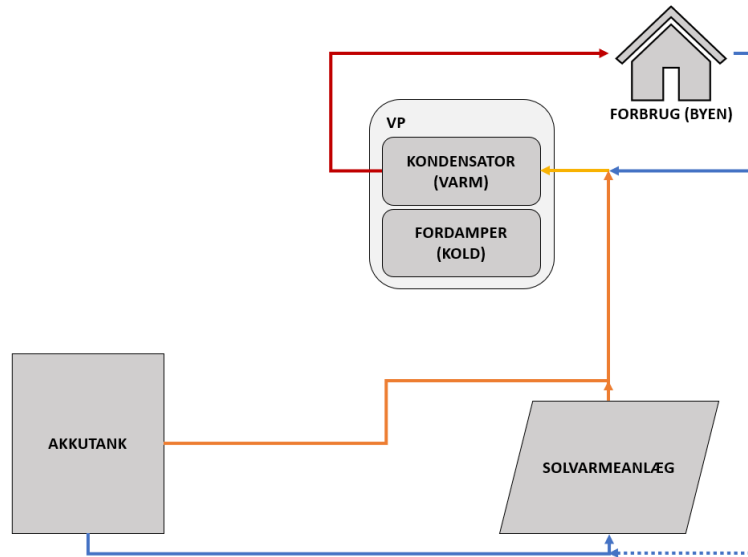


Figur 7: Konfiguration 3a – Solvarmeanlægget forvarmer vandet til varmepumpen.

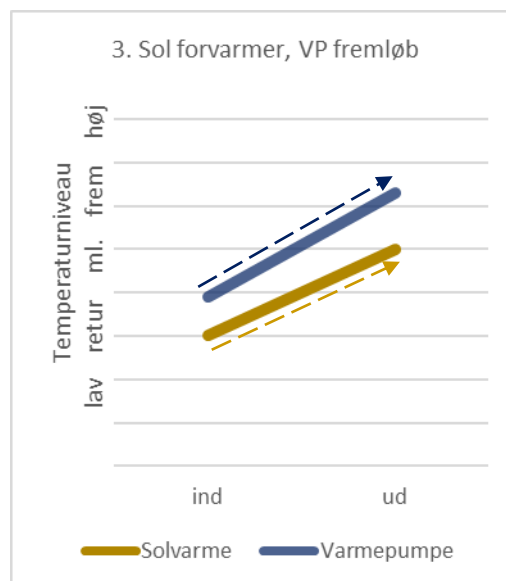
Konfiguration 3b

Solvarmeanlægget forvarmer vand som blandes med returvand inden varmepumpen

I denne variation (som minder om 3a) blandes ”mellemtemperatur-solvarme” med et væskeflow ved returtemperatur inden det sendes ind på den varme side af varmepumpen. Dermed modtager varmepumpen et lavere temperaturmiks end ”mellemtemperatur”.



Figur 8: Konfiguration 3b – Solvarme forvarmer vand som blandes med returvand inden varmepumpen.

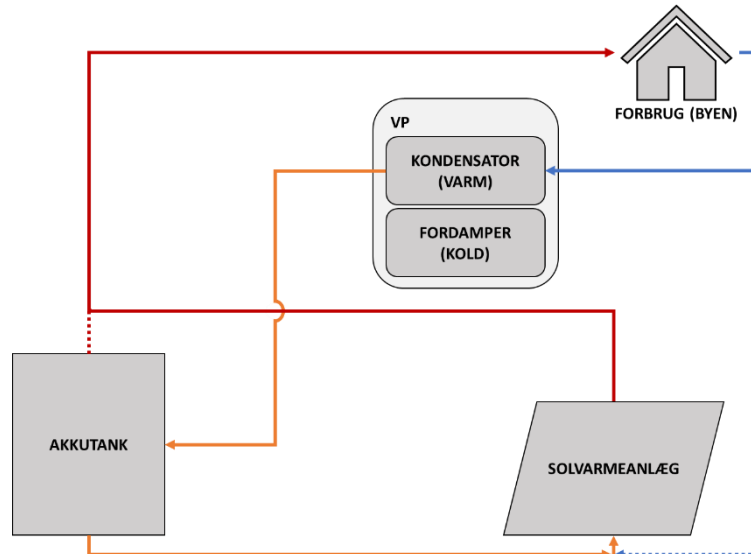


Figur 9: Konfiguration 3 (a / b) – Temperaturniveauer hvor solvarmeanlægget forvarmer vand til varmepumpen.

Konfiguration 4a

Varmepumpen forvarmer vand til solvarmeanlægget

Vand med "mellemtemperatur" fra varmepumpen sendes til solvarmeanlægget, hvor temperaturen øges til fremløbstemperaturen.

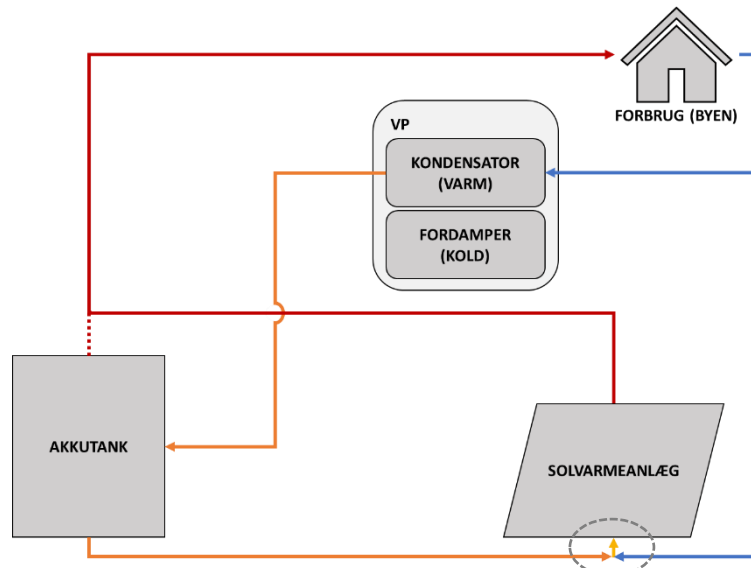


Figur 10: Konfiguration 4a – Varmepumpen forvarmer vand til solvarmeanlægget.

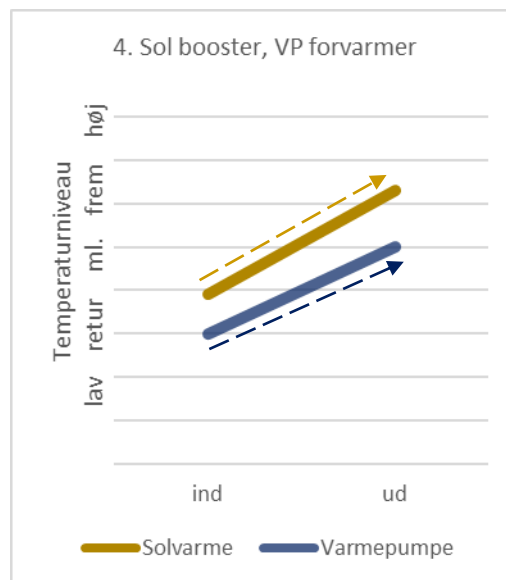
Konfiguration 4b

Varmepumpen forvarmer vand, som blandes med returvand inden solvarmeanlægget

I denne variation (som minder om 4a) blandes vand med "mellemtemperatur" fra varmepumpen med et væskeflow ved returtemperatur, inden det sendes til solvarmeanlægget. Dermed modtager solvarmeanlægget et lavere temperaturmiks end "mellemtemperaturen". (Blandingspunktet er fremhævet med en cirkel på Figur 11.)



Figur 11: Konfiguration 4b – Varmepumpen forvarmer vand, som blandes med returvand inden solvarmeanlægget.



Figur 12: Konfiguration 4 (a / b) – Temperaturniveauer hvor varmepumpen forvarmer vand til solvarmeanlægget.

Konfiguration 5a

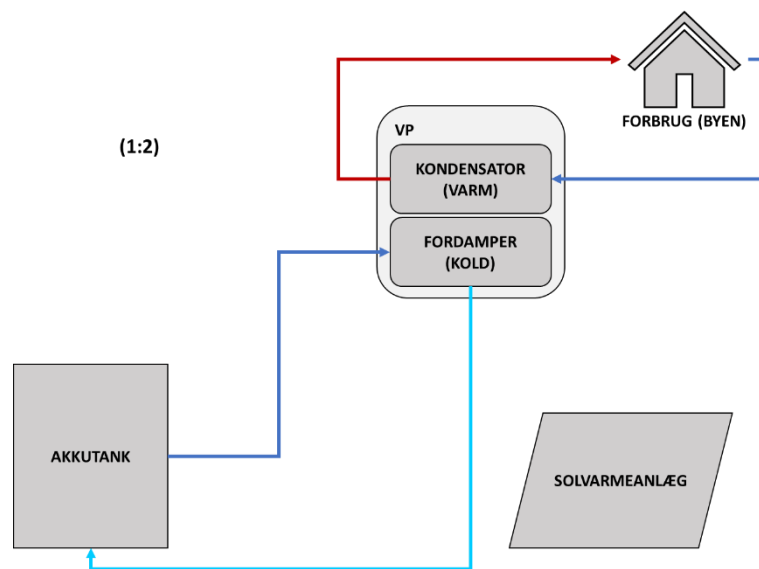
Varmepumpen afkøler akkumuleringstanken, som leverer koldere vand til solfangerne

Denne konfiguration adskiller sig fra de foregående, idet fordele og ulemper ikke kan opgøres direkte, men må evalueres ved en sammenligning med alternative muligheder.

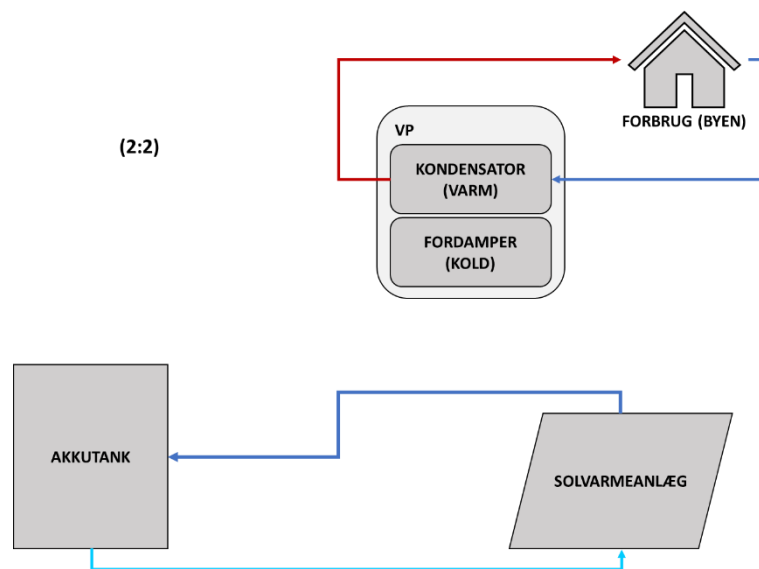
I første skridt (1:2) afkøles vandet i akkumuleringstanken med varmepumpen. På skitsen producerer solvarmeanlægget ikke varme (eksempelvis en natsituation). Her "isoleres" akkumuleringstankens bund fra fjernvarmeforbruget, så tanken ikke blot opvarmes igen af returvand fra fjernvarmenettet⁶.

I næste skridt (2:2) drives solvarmeanlægget ved lav temperatur, så der leveres varme eksempelvis ved returtemperatur tilbage til tanken. Når akkumuleringstankens temperatur ikke længere er under returtemperaturen, kan systemet igen kobles sammen med det øvrige system dvs. "isoleringen" brydes. I det følgende omtales dette bl.a. som "køling af solfangerne/solfangervæsken" (eller forsimplet som "solkøling") for forståelsens skyld, selvom der i praksis køles på fjernvarmevand i akkumuleringstanken, som så via solvarmeveksleren køler glykolvæsken i solfangerkredsen.

⁶ Hvis der med en "solkølingsfunktion" kan opnås en samlet øget kapacitet på varmepumpen, kan man forestille sig situationer, hvor køling af akkumuleringstanken kan give mening, selv i en periode uden udsigt til at solvarmeproduktion kan genopvarme tanken (eksempelvis en skyet periode i december). I så fald opnås kun en system-COP på 1, men til gengæld en tidsmæssig forskydning, som potentielt kan bruges til at dække en spidslastsituation med begrænset behov for dyrere spidslastenheder. Om en sådan driftsform giver mening, afhænger af en konkret vurdering af den alternative varmeproduktionspris.

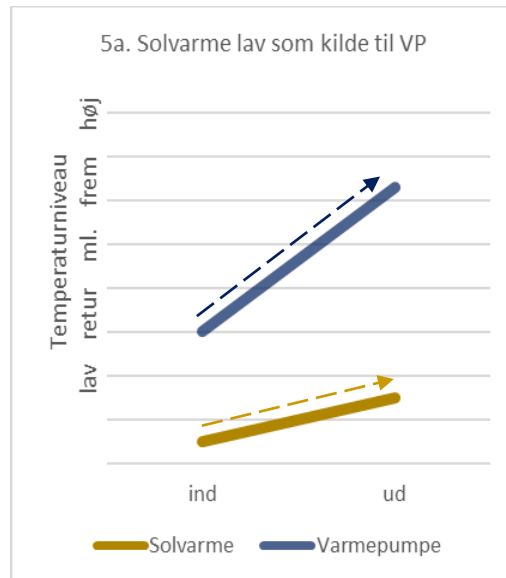


Figur 13: Konfiguration 5a del 1 – Varmepumpen afkøler vandet i akkumuleringstanken, som "isoleres" til solvarme.



Figur 14: Konfiguration 5a del 2 – Solvarmeanlægget genopvarmer afkølet vand i akkumuleringstanken.

Solvarmen benyttes her som varmekilde, dvs. der leveres varme på fordampersiden af varmepumpen (kold side), evt. i samspil med øvrige varmekilder (eksempelvis udeluft).

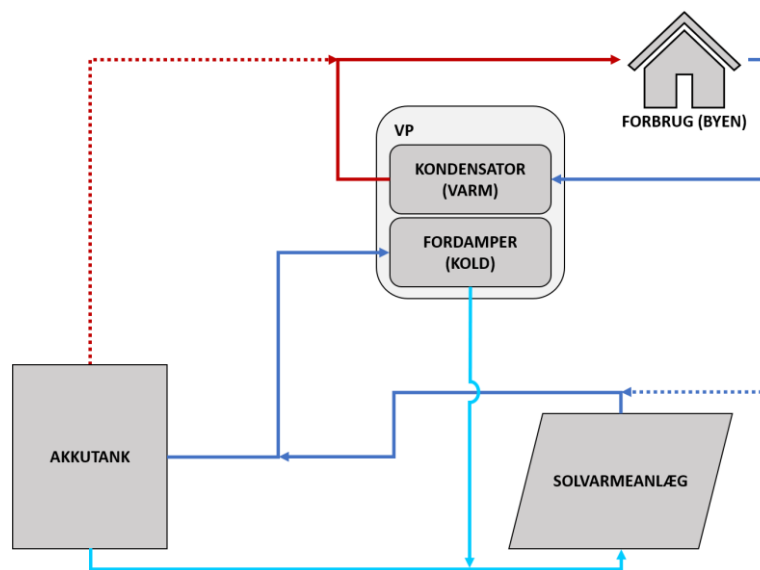


Figur 15: Temperaturniveauer hvor varmepumpen afkøler akkumuleringstanken, som leverer koldere vand til solfangerne.

Det er muligt at "opdele en tank virtuelt" (forudsat at tanken har mindst 3 diffusorer) ved at man betragter den nederste del som en separat kold tank (til solkøling), mens den øverste del kan bruges til varmere vand. I så fald vil midterste dyse fungere som hhv.

- varmeste udtag for den nederste del (udtag til varmepumpen, som afkøler vandet og sender det til bunden af tanken) og
- koldeste udtag for den øverste del (returvand som opvarmes af fx varmepumpen, som derefter sender vandet til toppen af tanken).

I den sammenhæng er det blot vigtigt at returvandet fra fjernvarmenettet ikke føres til bunden af tanken (som ellers er tilfældet normalt), men til midten. Princippet er illustreret på Figur 16.



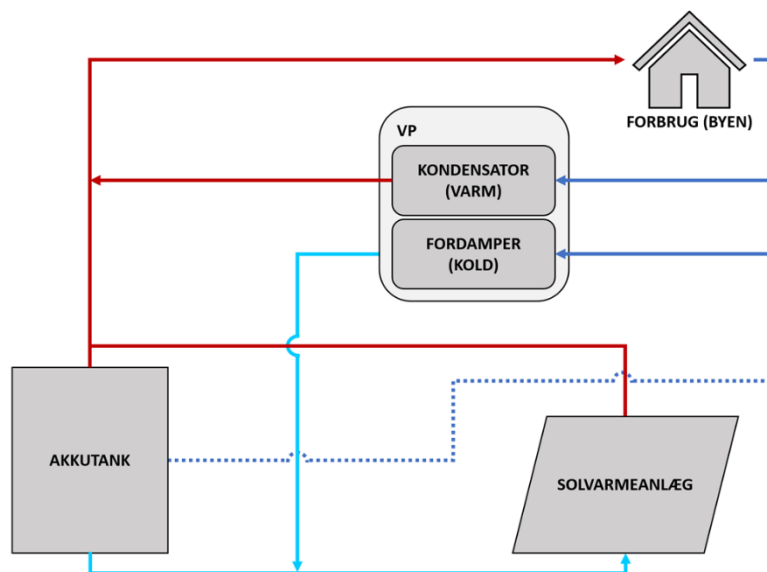
Figur 16: Konfiguration 5a opsummeret i én figur – Varmepumpen køler bunden af akkumuleringstanken (eller vandet der sendes til solfangerne), mens solvarmeanlægget genopvarmer dette afkølede vand.

En alternativ konfiguration illustreres til sammenligning i Bilag A for at vise en problemstilling ved køling af akkumuleringsstanken, hvis bunden ikke "isoleres" til solvarme.

Konfiguration 5b

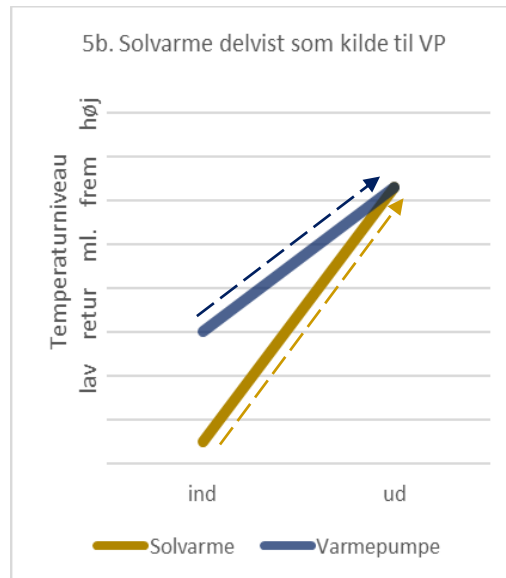
Varmepumpen leverer koldere vand til solfangerne, som opvarmer til fremløbstemperatur

I denne konfiguration køles returvand og/eller vandet i bunden af akkumuleringsstanken for at der kan sendes en koldere temperatur til solfangerne. Solfangerne styres fortsat til at levere fremløbstemperaturen. Dette giver en højere ydelse af solfangerne end ved normal drift, mens de fortsat leverer varme, som kan bruges direkte i fjernvarmenettet. Til gengæld bliver temperaturerne i solfangerne ikke lige så lave som i konfiguration 5a og den absolutte merydelse bliver således tilsvarende lavere end i konfiguration 5a.



Figur 17: Konfiguration 5b – Varmepumpen køler vandet til solvarmeanlægget, som opvarmer til fremløbstemperatur.

Varmepumpen køler her returvandet eller bunden af tanken, mens solvarmeanlægget varmer op til fjernvarmenettets fremløbstemperatur.



Figur 18: Temperaturniveauer hvor varmepumpen afkøler vandet inden det sendes til solvarmeanlægget, som varmer op til fremløbstemperaturen.

Udfordringen med de ovenfor oplyste konfigurationer/muligheder er dels at finde den optimale driftstilstand til ethvert tidspunkt, og dels at forudse den kommende tid for at vurdere, hvordan et givet valg vil påvirke den samlede ydelse.

2.2 Generelle fordele og ulemper ved solkøling

De fleste solvarmeanlæg driftes allerede i dag ved en lavere temperatur i vinterhalvåret. Dette sker uden brug af en varmepumpe til at køle solfangerne, men blot ved at lade solfangerne varme op til en temperatur mellem fjernvarmenettets retur og fremløb for på den måde at øge solvarmeydelsen – særligt i perioder, hvor solvarmen alligevel udgør en relativt lille andel af det samlede behov og derfor relativt let kan blandes med varme fra andre varmeproduktionsenheder for at opnå fremløbstemperaturen. Overvejelser vedr. drift med en sådan mellemtemperatur i solfeltet beskrives yderligere i afsnit 5.4.2. Grundet kompleksiteten og behovet for merinvesteringer er der i det følgende et særligt fokus på relevansen af solvarme ved lavere temperaturer, som kræver aktiv køling med varmepumpen.

Umiddelbare fordele og ulemper ved solkøling:

- Ved at køle vandet i tanken ned, kan der sendes koldere vand til solfangerne. Dermed opnås en højere solvarmeydelse – på nogle tidspunkter kan solvarmeanlægget producere varme ved lav temperatur, mens det ikke ville kunne være i drift under normale omstændigheder (pga. for lav effektivitet).
- Varmepumpen kan typisk opnå en højere COP, når den bruger akkumuleringstankens vand som varmekilde.
- Der er et elforbrug knyttet til køling af vandet i tanken, som skal medregnes ifm. opgørelse af omkostninger ved denne driftsform.

Uddybning af ulemper:

- For at udnytte solvarme ved lav temperatur kræves el til varmepumpen. Hvis man alternativt kunne have fået næsten samme mængde solvarme direkte leveret til fjernvarmeforsyningen, ville man undgå at bruge el til den andel. Hvis man køler tanken "for meget" betaler man el for at udnytte noget solvarme, som man kunne have udnyttet direkte, dvs. resultatet er et større elforbrug end nødvendigt. Der skal således findes en balance mellem ekstra solvarmeydelse og ekstra el til at køle tanken.
- Hvis man ikke afgrænser tanken/bunden af tanken til kun at interagere med solvarmeanlægget, risikerer man at køle på returvand fra fjernvarmen. Hvis varmepumpen køler tanken og varmepumpen samtidigt opvarmer tanken, kan man betragte anlægget som et system, hvor eneste energi, der tilføres udefra, er el (og ingen energi fra sol, luft eller andet), hvilket svarer til en elpatron ($COP_{system} = 1,0$), jf. Bilag A.
- Hvis tanken allokeres til solvarme i løbet af en længere periode, bør man være opmærksom på eventuelle afledte ulemper, idet tanken evt. kunne være brugt til at optimere øvrig drift, fx ved at en elkedel kan blive benyttet til at tilbyde systemydelse (fleksibilitet) for elnettet.

Ekstra fordele ved køling af akkumuleringstank:

- Vandet i akkumuleringstanken har en højere temperatur end luften. Som "varmekilde" til varmepumpen kan dette medføre en højere varmepumpekapacitet (effekt). I tilfælde hvor denne ekstra effekt fortrænger spidslastenheder, kan driftsøkonomien blive forbedret på trods af det ekstra elforbrug.
- Udstyret til køling af akkumuleringstanken kan i nogle tilfælde også benyttes til optimering af andre enheder på værket, hvilket kan give en ekstra fordel udover effekten for solvarmeanlægget – eksempelvis ifm. røggaskondensering.

2.3 Komplexiteten

2.3.1 Det øvrige anlæg

At evaluere fordelene ved forskellige konfigurationer og driftsformer giver anledning til en række opfølgende spørgsmål, der afslører, at der ikke er tale om et simpelt regelsæt, som kan gælde for alle anlæg hvor solvarme og varmepumper kombineres. Særligt øges kompleksiteten, når der er tale om køling af solfangervæsken, hvorfor et fokusområde i nærværende rapport er netop solkøling.

Eksempler på faktorer, der har indflydelse på den mest relevante driftsform er:

- Øvrige produktionsenheder såsom biomassekedel, gaskedel, elkedel, gasmotor, mv. inkl. hvad prisen er for at drive disse
- Hvilke muligheder, der er for samspil med øvrigt anlæg og varmelager
- Elprisen
- Systemydelse på elmarkedet, som påvirker driften af øvrige enheder ud over den umiddelbare produktionspris baseret på eksempelvis elprisen og afgifter for en elkedel.

At en sådan evaluering er kompleks, udgør i sig selv en barriere for optimering af driften i praksis, hvor der ikke kan forventes perfekt forudsigtelse af vejrforhold, varmebehov, elpriser osv. eller nødvendigvis kan allokeres ressourcer til at evaluere mulighederne løbende.

I Bilag B findes beskrivelse af nogle generelle opmærksomhedspunkter ifm. en funktion med køling af solfangere.

2.3.2 Overkapacitet eller begrænset kapacitet

Køling af solfangerne kan foregå enten indirekte ved at køle en akkumuleringstank for derefter at køle solfangervæsken eller direkte ved at køle glykolkredsen. I begge tilfælde kan det vise sig væsentligt, om solkølingen erstatter kapacitet på varmepumpen fra den primære varmekilde, eller om der (helt eller delvist) suppleres med ekstra kapacitet. Under alle omstændigheder bliver det væsentligt for valget af driftsform

- om der er overkapacitet på solvarmeanlægget alene⁷,
- om der er overkapacitet på solvarme og varmepumpe i fællesskab eller
- om der er behov for at supplere med en tredje produktionsform.

Særligt hvis der kan opnås en ekstra kapacitet for varmepumpen ved køling af solfangerne i perioder, hvor der er behov for det, kan funktionen vise sig at være værdifuld, såfremt man dermed kan fortrænge endnu dyrere varmeproduktion.

Hvis der er overkapacitet på solvarme og varmepumpe tilsammen, vil et øget solvarmeudbytte fortrænge noget af varmepumpens normale varmekilde, og derfor skal det overvejes, hvilken løsning der indebærer laveste elforbrug.

2.3.3 Temperaturpåvirkning af varmepumpens COP

For nogle varmepumpetyper er der en større fordel ved reduktion af den leverede afgangstemperatur end andre. Dette ses i højere grad ved ammoniak (R717/NH₃) som kølemiddel ift. kuldioxid (R744/CO₂), der til gengæld er mere følsom overfor hvilken temperatur, der leveres ind på den varme side. Desuden betyder den konkrete konfiguration af varmepumpen meget for, hvad der i praksis vil være muligt og hvilke fordele, der kan opnås med reducerede temperaturer, idet varmepumperne ofte er specialdesignet til forholdene på det konkrete varmeværk.

Der vil typisk være begrænsninger ift. hvor høj temperatur, der kan sendes ind i varmepumpen (på den varme side). Varmepumper med kuldioxid som kølemiddel er særligt "følsomme" overfor tilgangstemperaturen på den varme side (dvs. typisk fjernvarmenettets returtemperatur). Til gengæld er COP for disse varmepumper i mindre grad påvirket af afgangstemperaturen (ift. fx ammoniak-baserede varmepumper).

⁷ Når der i denne sammenhæng omtales *solvarmeanlægget*, betragtes lager/lagre som en del af dette system, dvs. om solvarmen på døgnbasis i samspil med akkumuleringstank(e) kan dække hele varmebehovet.

En højere temperatur af varmekilden (eksempelvis luft) vil generelt medføre en øget COP. Men i nogle tilfælde vil der kun opleves en begrænset forbedring af COP, selv hvis varmekildens temperatur øges yderligere, da varmepumpen er designet efter at optimere kredsprocessen under normal drift. Dette – sammen med konfigurationen af, hvordan den grundlæggende varmekilde kan kombineres med en eventuel køling af solvarmeanlægget – har betydning for, hvilke fordele der i praksis kan opnås på det konkrete anlæg.

2.3.4 Køling af solvarmetransmissionsledning

En mulighed kunne også være at køle transmissionsledningen mellem værket og solfeltet ned efter solnedgang vha. varmepumpen, hvis transmissionsledningen er af en størrelse, hvor værdien er relevant at udnytte (sammenlignet med indsatsen for at dette kan lade sig gøre – eksempelvis mht. styring, evt. ventiler mv.).

3 System-COP-princippet

Hvis man i stedet for at betragte varmepumpens COP isoleret, ser på det samlede system, kan man tale om en såkaldt "system-COP". Mens en elektrisk varmepumpes COP⁸ (COP_{VP}) er defineret som forholdet mellem energioutputtet og elforbruget, udgør system-COP forholdet mellem et øget energioutput og det tilhørende elforbrug, der skal tilføres for at opnå det højere output.

I nærværende rapport undersøges system-COP ifm. merydelse fra solvarme- og varmepumpeanlægget i kombination. Det øgede varmeoutput udgøres af forskellen mellem solvarmeydelsen ved lav temperatur + ekstra elforbrug til varmepumpen, og solvarmeydelsen ved et temperaturniveau, hvor den kan benyttes direkte i varmforsyningen.

$$COP_{VP} = \frac{\text{Energioutput}}{\text{Elforbrug}}$$

$$COP_{system} = \frac{\text{Ekstra energioutput}}{\text{Ekstra elforbrug}} = \frac{\text{Ekstra solvarme} + \text{ekstra elforbrug}}{\text{Ekstra elforbrug}}$$

Det bemærkes at system-COP ikke kan måles, da den baseres på en forskel mellem to driftstilstande (hvilket i sagens natur ikke kan forekomme på samme tid). Der er således behov for beregninger af flere mulige scenarier, for at man kan angive forskellen og dermed udregne system-COP ved en given løsning.

System-COP kan ikke måles, men skal beregnes, da den defineres på baggrund af forskellen mellem to mulige driftsformer.

Værdien angiver kort sagt forholdet mellem hvad man får ud af at køle på solfangerkredsen (varmegevinsten) ift. hvad man "betaler" for det (mer-elforbruget). Ved at betragte system-COP i stedet for varmepumpens COP opnås et bedre grundlag for at vurdere, om det er fordelagtigt med den ene eller den anden driftstilstand.

System-COP udgør forholdet mellem "gevinsten" ved at køle solfangerne (ekstra varme) og "prisen" der skal betales for at gøre det (ekstra elforbrug).

⁸ I nærværende rapport henviser COP til forholdet mellem varmepumpens varmeproduktion og dens elforbrug, også betegnet som "COP_{varm}".

Når varmepumpen køler på solfangerne, er der typisk tale om at den oplever en varmere varmekilde end varmepumpens normale varmekilde (eksempelvis udeluft). Dette kan muliggøre en højere COP for den del af driften, der relaterer sig til at køle på solfangerne ("COP_{solkøl}"), men det afhænger af den konkrete varmepumpetype og konfiguration. Elforbruget kan beregnes ud fra formelen for varmepumpens COP, når den køler på solvarmen, defineret som forholdet mellem varmeoutput (summen af solvarme kølet af varmepumpen og elforbrug til solkølingen) og elforbrug til solkølingen:

$$COP_{solkøl} = \frac{\text{Solvarme kølet af VP} + \text{Elforbrug til solkøling}}{\text{Elforbrug til solkøling}}$$

$$\Rightarrow \text{Elforbrug til solkøling} = \frac{\text{Solvarme kølet af VP}}{COP_{solkøl} - 1}$$

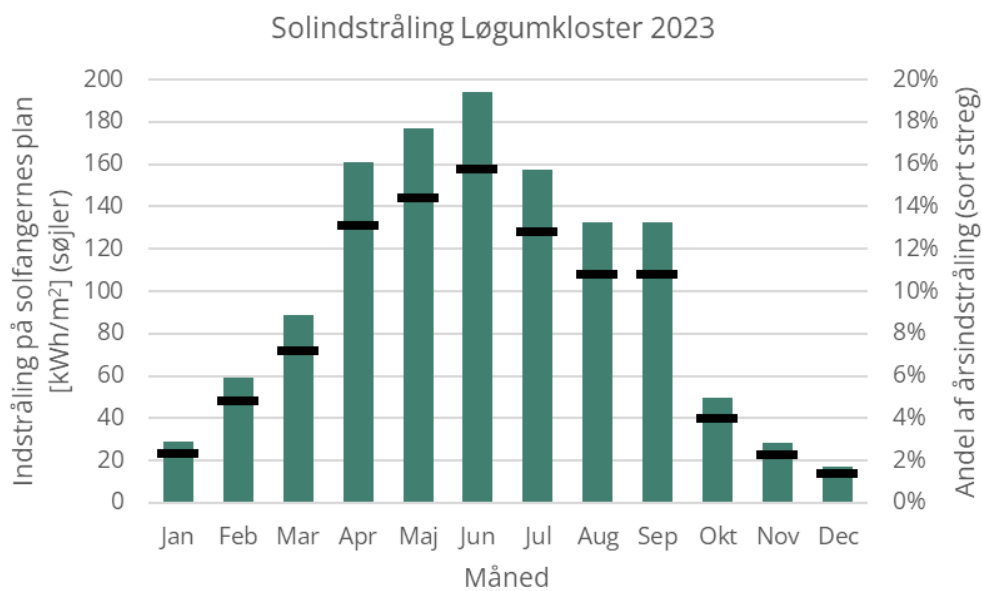
Yderligere information om system-COP findes i afsnit 5.3.

4 Forudsætninger

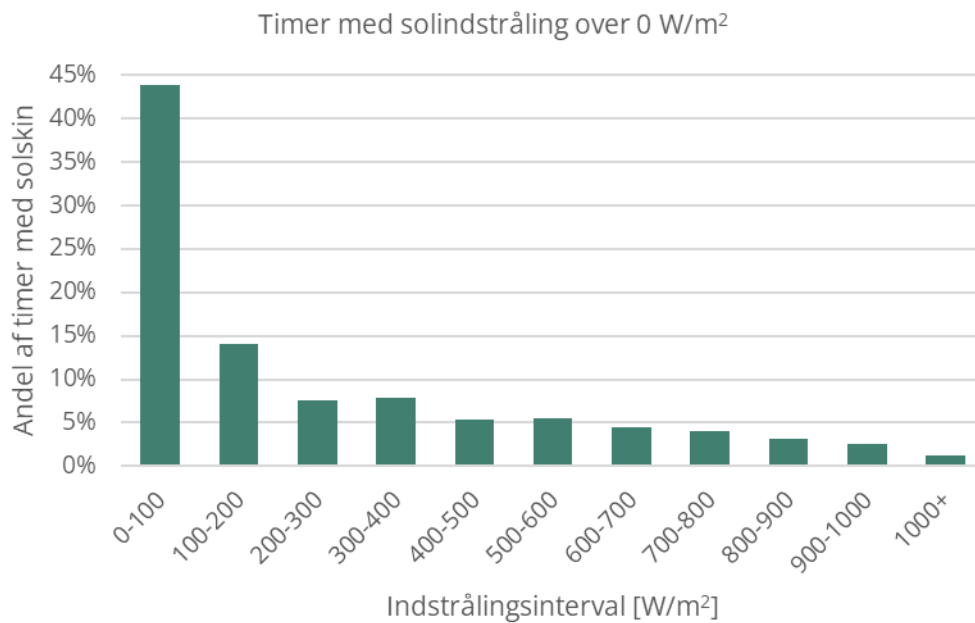
I dette afsnit beskrives de grundlæggende forudsætninger, som anvendes både i beregningerne for eksempler på enkeltstående driftssituationer og beregninger over et helt år. Metoden for årssimuleringer beskrives yderligere i afsnit 6.

4.1 Eksempel på fordeling af solindstråling

Hvis man betragter fordelingen af solindstråling på solfangerne målt hos Løgumkloster Fjernvarme for 2023 ses nedenstående fordeling over året (Figur 19) og i antallet af timer med et minimum af solskin (Figur 20).

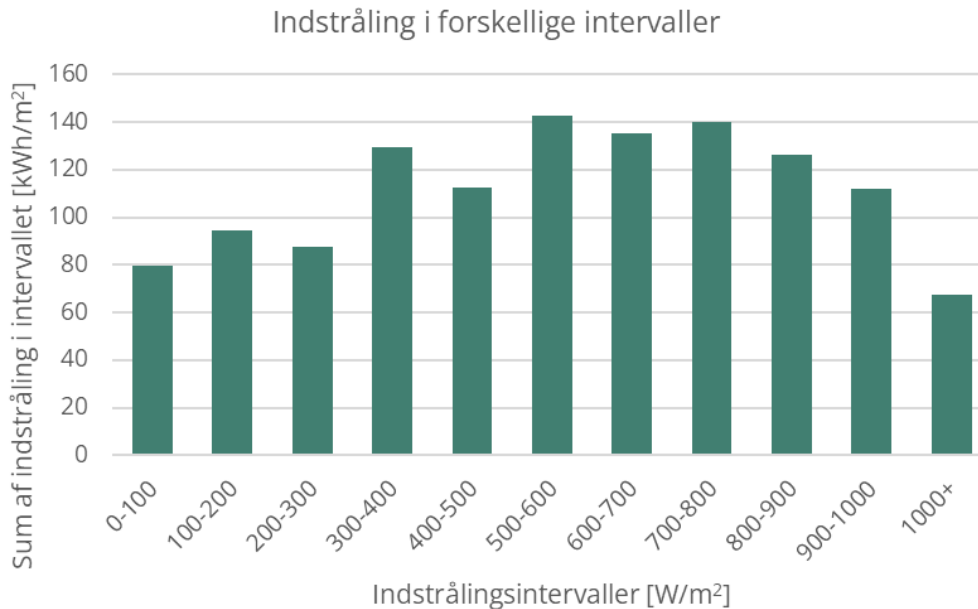


Figur 19: Månedsfordeling af solindstråling på solfangeres plan i 2023 for Løgumkloster.



Figur 20: Fordeling af timer med solindstråling over 0 W/m² i intervaller målt i Løgumkloster i 2023.

Opsummeres energien kategoriseret i tilsvarende indstrålingsintervaller ses at størstedelen af solenergien findes ved relativt høj solindstråling.



Figur 21: Summeret solindstråling på solfangernes plan i kWh/m², fordelt på indstrålingsintervaller, målt i Løgumkloster i 2023.

I antallet af timer ses at omkring 70% af timerne med solskin findes under 400 W/m², mens omkring 70% af energien findes over 400 W/m².

4.2 Grundlæggende parametre

I beregningerne er nedenstående antagelser anvendt som udgangspunkt, hvor intet andet er angivet. Udvalgte parametre varierer ifm. følsomhedsberegninger.

Der antages plane solfangere af en type, der typisk ses hos danske fjernvarmeværker. Det betyder at effekten af en reduceret temperatur i solfangerne og dermed gevinsten ved at drifte med lavere temperaturer i solfeltet (pga. reduktionen i varmetabet) er større end tilfældet vil være for vakuumrørsolfangere eller parabolske trug, som er mindre følsomme overfor driftstemperaturene.

Solvarmeanlæggets nøgleparametre:

- Starteffektivitet, η_0 : 0,773
- Førsteordens varmetabskoefficient, a_1 : 2,27 W/(m²K)
- Andenordens varmetabskoefficient, a_2 : 0,018 W/(m²K²)
- Indfaldsvinkelkorrektionsfaktor, K_θ v. 50°: 0,97
- Temperaturtab over varmeveksler, $\Delta T_{\text{varmeveksler}}$: 3 K.
- Solfangerareal: 9.000 m² (af typisk anvendt solfangertype)
- Rørtab i solfeltet: 3%
- Varmepumpens COP ved alm. drift: 3,0
- Varmepumpens COP ved køling af solfangere: 5,0 (udelukkende for processen til solkøling)
- Solkøling-kapacitet: 500 kW
- Årsvarmebehov i fjernvarmenettet: 32.600 MWh
- Fremløbstemperatur: 75 °C
- Returtemperatur: 45 °C
- Mellemtemperatur: 60 °C
- Middeltemperatur i solfeltet ved solkøling: 25 °C
- Løgumkloster-solindstråling for 2023 i timeværdier svarende til årligt ca. 1.200 kWh/m² på solfangernes plan (se evt. flere detaljer i afsnit 4.1)
- Løgumkloster-udetemperatur for 2023 i timeværdier svarende til ca. 10 °C i gennemsnit.

Følgende parametre negligeres:

- Elforbrug til styring, pumper mv. ud over den grundlæggende varmepumpeproces
- Inertien i solfeltet (varmekapaciteten af solfangervæsken, solfangerne og rørene)
- Begrænsninger i flowet i div. rør.

4.3 Ekstra kapacitet på varmepumpen

Der antages at køling af solvarme giver en ekstra kapacitet på varmepumpen, dvs. der skiftes ikke (helt eller delvist) varmekilde, men suppleres med ekstra varmekapacitet. Denne varmekapacitet er dog begrænset, så man eksempelvis ikke kan opnå ubegrænset kølekapacitet, men højst 25% af den køling der leveres af varmepumpen. Dette er inkluderet for at tage højde for, at varmepumpen ikke vil kunne levere eksempelvis 500 kW solkøling konstant over et døgn samtidigt med at den normale varmepumpe drift delaster til eksempelvis gennemsnitligt 600 kW_{varme}, hvis solkølingen betragtes som en del-proces af den primære varmepumpe drift.

Varmepumper baseret på udeluft som varmekilde designes til at skulle fungere ved et bredt spænd af udelufttemperaturer. Generelt ses en tydelig korrelation mellem varmekildens temperatur og varmepumpens COP og effekt. Der vurderes således ikke at være urealistisk, at der kan opnås en ekstra kapacitet, hvis anlægget har mulighed for at køle på et lager, som er varmere end udeluften. Det antages på den baggrund som udgangspunkt, at solkølingen medfører ekstra kapacitet på varmepumpen – maksimum 500 kW ekstra køleeffekt. En sådan ekstra kapacitet kan komme i form af tilslutning til economizerporten⁹, som findes på flere ammoniak-baserede varmepumpeanlæg i Danmark. Det er også muligt, at varmepumpeanlæg med indirekte fordampning vil kunne indføre varme fra en akkumuleringstank i en glykolkreds (ved varmeveksling), for på den måde relativt billigt at muliggøre solkølingen. Der findes forskellige muligheder, hvoraf en dedikeret varmepumpe til solkølingsformålet må betragtes som "worst case" – med andre ord: hvis ikke det kan gøres billigere, kan man købe en (lille) varmepumpe til formålet.

Som følsomhedsberegning undersøges et tilfælde, hvor man i stedet skifter varmekilde fra den primære kilde til akkumuleringstanken uden nogen antagelse om øget varmekapacitet eller COP.

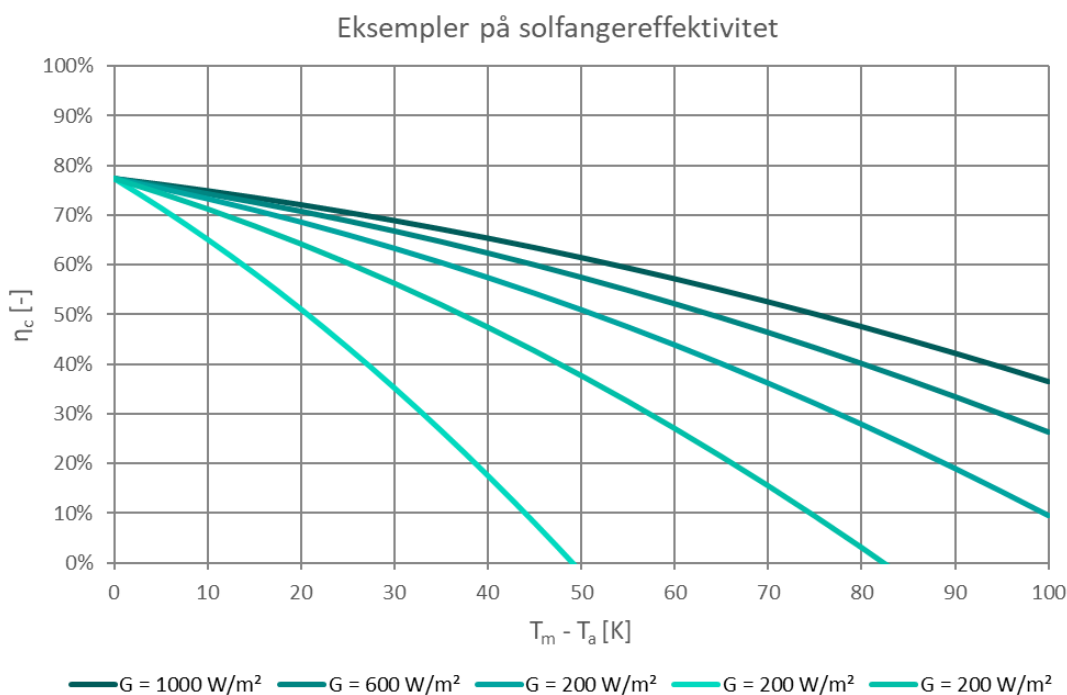
⁹ Beskrevet i artiklen "Thermo-economic analysis of a solar district heating plant with an air-to-water heat pump" om Ørum Varmeværk: "...the HP features an economizer, which is designed to utilize the medium to low-temperature water from the storage tank to boost the performance of the HP." <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121490>.

5 Resultater – eksempler på driftssituationer

5.1 Merydelse fra solfangere

Værdien af at reducere temperaturen i solfangerne er relevant at evaluere for at kunne afgøre, hvilken driftsform og hvilke temperaturniveauer, der er mest fordelagtige, så man får den billigste varmeproduktion (og laveste klimaaftryk).

Ofte illustreres solfangereffektiviteten (η) som funktion af temperaturforskellen mellem solfangerne og udeluften. Dette ses på Figur 22 nedenfor, hvor en solfanger ud fra forudsætningerne beskrevet i afsnit 4.2 er vist for en indstråling (G) på hhv. 200, 400, 600, 800 og 1000 W/m². Det ses hvordan kurven bliver stejlere med lavere solindstråling. Det betyder, at jo lavere solindstråling, jo mere forbedres effektiviteten ved en given temperaturreduktion i solfangerne.



Figur 22. Eksempler på solfangereffektivitet som funktion af temperaturforskellen mellem solfangerne og udeluften.

Herunder gennemgås hvordan "gevinsten" i form af merydelse fra solfangerfeltet påvirkes af driftsforholdene for solfangerne.

I en given situation (indeksnummer "l" herunder) er den specifikke solvarmeydelse q_{sol} (i W/m²_{solfanger}) beregnet således:

$$\text{Almindelig drift} \rightarrow q_{sol,l} = \eta_0 K_\theta G - a_1 (T_{m,l} - T_a) - a_2 (T_{m,l} - T_a)^2$$

hvor q_{sol} er solvarmeydelsen, η_0 er maksimal solfangereffektivitet, K_θ er indfaldsvinkelkorrektionsfaktoren, G er solindstrålingen, T_m er middeltemperaturen af solfangervæsken, T_a er udetemperaturen,

mens a_1 og a_2 er varmetabskoefficienter (som kan findes i datablad/testrapport for den givne solfanger).

I en næsten tilsvarende situation "II", hvor eneste ændring er en lavere temperatur i solfangerne forårsaget af køling akkumuleringsstanken (og dermed lavere temperatur T_m i solfangervæsken), bliver formelen tilsvarende som følger:

$$\text{Lavere temperatur i solfangerne} \rightarrow q_{sol,II} = \eta_0 K_{\theta} G - a_1 (T_{m,II} - T_a) - a_2 (T_{m,II} - T_a)^2$$

Merydelsen udgøres af forskellen mellem de to solfangerydelser. I udtrykket for forskellen $\Delta q_{sol} = q_{sol,II} - q_{sol,I}$ udgår leddene for $\eta_0 K_{\theta} G$ (som repræsenterer den absorberede solvarme¹⁰) og dermed bliver merydelsen fra solfangerne uafhængigt af solindstrålingen som illustreret herunder. Merydelsen Δq_{sol} for en given solfanger afhænger således alene af ændringen i T_m og T_a .

For at illustrere hvad de enkelte dele af formeludtrykket omhandler, er disse angivet med følgende farver:

Absorberet solvarme ☀

Varmetab fra solfangerne 📉

Varmeoutput 📈

$$\Delta q_{sol} = q_{sol,II} - q_{sol,I}$$

$$\Delta q_{sol} = \left(\eta_0 K_{\theta} G - a_1 (T_{m,II} - T_a) - a_2 (T_{m,II} - T_a)^2 \right) - \left(\eta_0 K_{\theta} G - a_1 (T_{m,I} - T_a) - a_2 (T_{m,I} - T_a)^2 \right)$$

$$\Delta q_{sol} = a_1 (T_{m,I} - T_a) + a_2 (T_{m,I} - T_a)^2 - a_1 (T_{m,II} - T_a) - a_2 (T_{m,II} - T_a)^2$$

$$\Delta q_{sol} = a_1 (T_{m,I} - T_{m,II}) + a_2 (T_{m,I} - T_a)^2 - a_2 (T_{m,II} - T_a)^2$$

Når en varmepumpe køler solfangervæsken, øges solvarmeproduktionen med en absolut størrelse uafhængigt af solindstrålingen.

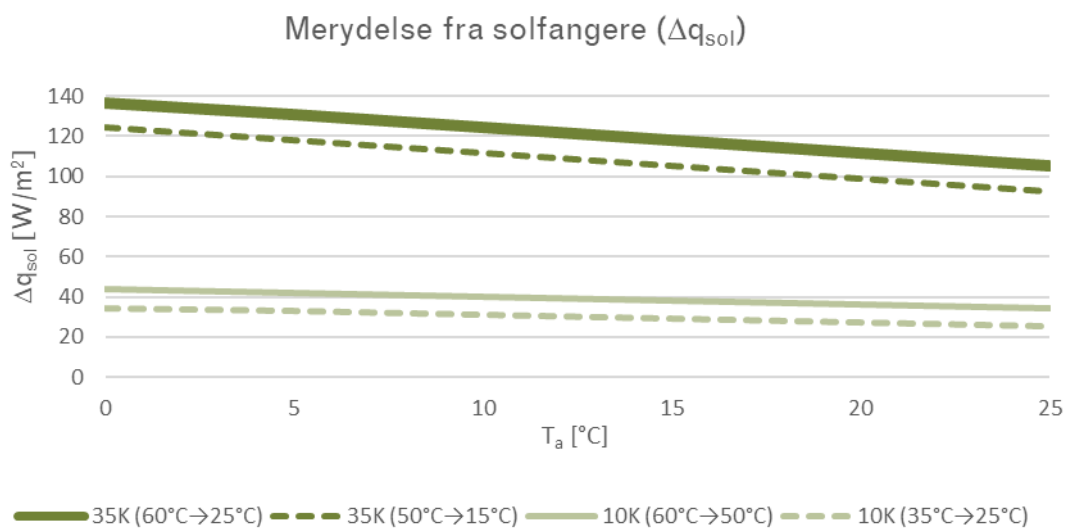
Nedenfor (Figur 23) er illustreret eksempler på merydelsen som funktion af udetemperaturen ved forskellige temperaturer i solfangerne (T_m). I eksemplet vises

- en sænkning af middeltemperaturen i solfeltets glykolvæske fra 63 °C til 28 °C (35 K) svarende til en sænkning fra 60 til 25 °C i fjernvarmevandet/vandet i tanken (tyk mørkegrøn)
- en sænkning af middeltemperaturen i solfeltet fra 53 °C til 18 °C (35 K) svarende til en sænkning fra 50 til 15 °C i fjernvarmevandet/vandet i tanken (mørkegrøn stiple)

¹⁰ Produktet af starteffektiviteten for solfangerne, indfaldsvinkelkorrektionsfaktoren og solindstrålingen på solfangernes plan.

- en sænkning af middeltemperaturen i solfeltet fra 63 °C til 53 °C (10 K) svarende til en sænkning fra 60 til 50 °C i fjernvarmevandet/vandet i tanken (lysegrøn)
- en sænkning af middeltemperaturen i solfeltet fra 38 °C til 28 °C (10 K) svarende til en sænkning fra 35 til 25 °C i fjernvarmevandet/vandet i tanken (lysegrøn stiplede)

Den mørkegrønne linje kunne repræsentere et forhold mellem normaldrift for solvarmeanlægget sammenholdt med solkøling. Den nederste grønne linje kunne repræsentere et forhold mellem mellemtemperatur for solvarmeanlægget sammenholdt med solkøling.



Figur 23: Eksempler på merydelse som funktion af udetemperaturen ved forskel i solfangertemperatur på hhv. 35 og 10 K. Ændring i middeltemperaturen på sekundærsiden af varmeveksleren (dvs. fjernvarmesiden) er angivet i parentes.

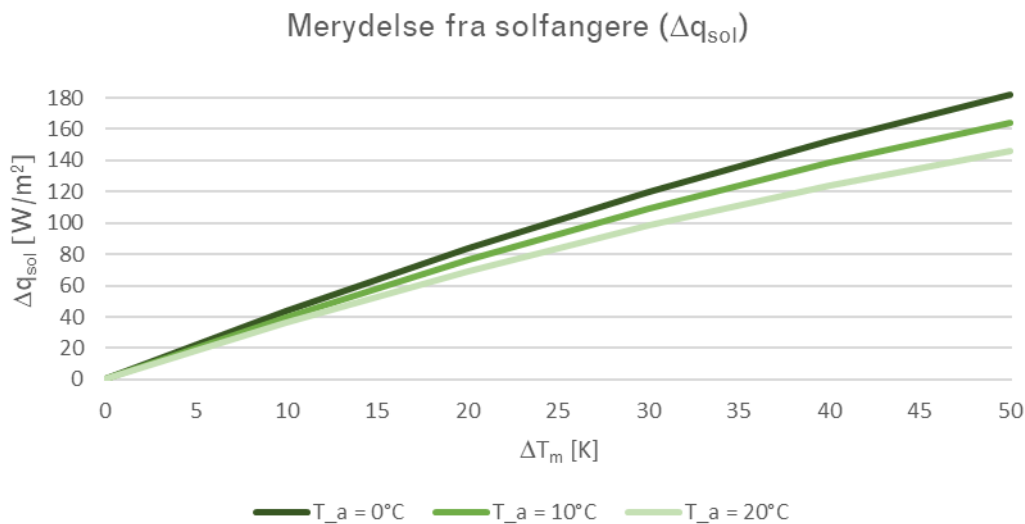
Som følge af at "gevinsten" i form af øget solvarmeydelse ikke ændrer sig med forskellige indstrålingsværdier, bliver den relative gevinst mindre med højere solindstråling. Med andre ord udgør fx ekstra 40 W/m² procentvis mindre hvis ydelsen er 400 W/m² (+10%) end hvis den er 160 W/m² (+25%).

Det ses af Figur 23 at

- størst merydelse fra solfangerne opnås, hvis man kan reducere temperaturen i solfangerne betragteligt (fx 35 K i stedet for blot 10 K)
- merydelsen er størst, når solfangertemperaturene er høje også selvom temperaturreduktionen er den samme (de fuldt optrukne linjer ligger højere end de stiplede).
- merydelsen reduceres når udetemperaturen øges (fordi varmetabet bliver mindre når udetemperaturen øges), jf. faldende tendens med øget T_a .

En anden måde at illustrere merydelsen fra solvarmeanlægget ses på Figur 24. Her ses merydelsen som funktion af, hvor meget man sænker solfangerens temperatur (angivet for tre forskellige eksempler på udetemperaturer). Det ses at det afgørende for merydelsen er hvor meget temperaturen i solfangerne sænkes – i højere grad end udetemperaturen eller (til dels) udgangspunktet for temperaturniveauet. Det ses at der kan opnås op til omkring 180 W/m² ekstra, men at det kræver at temperaturen

kan reduceres meget og at udetemperaturen gør udgangspunktet for varmetabet fra solfangerne relativt stort.

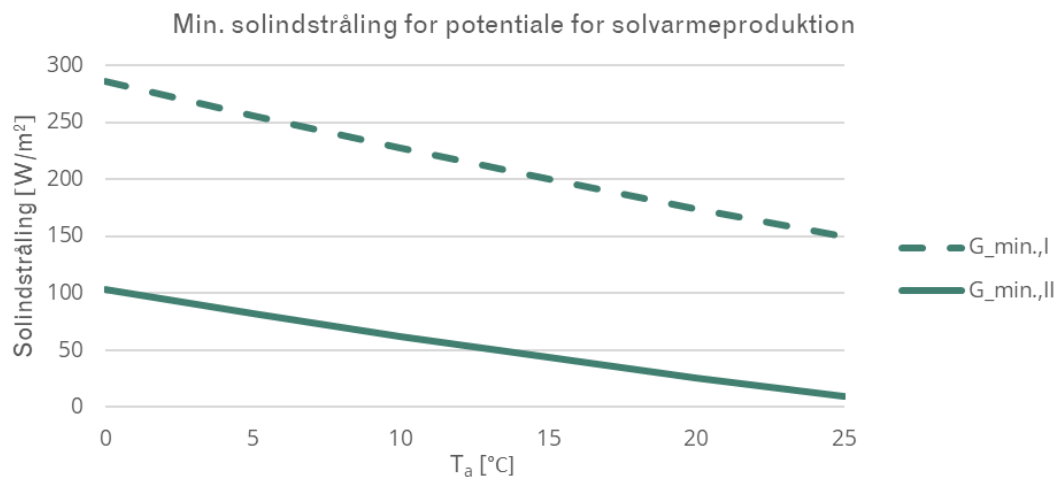


Figur 24: Eksempler på merydelse som funktion af ΔT_m , hvor ΔT_m er forskellen i solfangervæsketemperaturer T_m (dvs. $T_{m,i}$ minus $T_{m,u}$) – altså hvor meget man sænker gennemsnitstemperaturen i solfeltet. Eksemplerne er givet ved forskellige udetemperaturer (hver sin grønne kurve). Udgangspunktet for T_m er 63°C .

Det skal understreges, at merydelsen ikke opnås uanset referencesituationen. Hvis ydelsen for referencen (situation "I") beregnes til et negativt tal, fx -200 W/m^2 , vil der ikke opnås nogen solproduktion selv ved lavere temperaturer. Man kan forestille sig en situation med meget lav indstråling fx 50 W/m^2 . I dette tilfælde vil det være fysisk umuligt at producere eksempelvis 100 W/m^2 solvarme¹¹. Merydelsen skal således betragtes ift. den beregnede effekt for referencesituationen.

Antages en referencesituation som beskrevet i afsnit 4.2, vil der kræves mellem 150 og 300 W/m^2 solindstråling for at produktionen kan startes som vist på Figur 25. Det ses hvordan køling af solfangerne kan muliggøre drift af solvarmeanlægget ved lavere solindstråling end ved normal drift, dvs. solvarmeanlægget kan eksempelvis starte tidligere om morgenen og køre senere om aftenen.

¹¹ Teoretisk set kan der trækkes energi ud af luften, men solfangerne er ikke egnede til at være den slags energioptager og effektivitetsudtrykket er ikke repræsentative for solfangerens ydelse i sådanne tilfælde.



Figur 25. Solindstråling som giver en beregnet ydelse på 0 W/m² i hhv. referencesituationen (I) og i situationen med solkøling (II). Indstrålingen skal altså være højere end linjerne før der kan produceres solvarme.

5.2 Sammenligning på tværs af driftsformer

I tilfælde hvor solvarmen kombineret med varmepumpen kan dække hele varmebehovet, kan beregninger af solvarmeydelse og varmepumpedriften ved forskellige solindstrålinger indikere, hvornår man opnår det samlet set laveste elforbrug. I eksemplet herunder ses den procentvise fordeling af fjernvarmeproduktionen i tre (øjeblik)situationer med hhv. 200, 300, 400 og 500 W/m² indstråling på solfangerens plan.

Antagelser ud over de angivne i afsnit 4.2:

- Udetemperatur: 20 °C (alternativt 5°C)
- Fjernvarmebehov: 4 MW

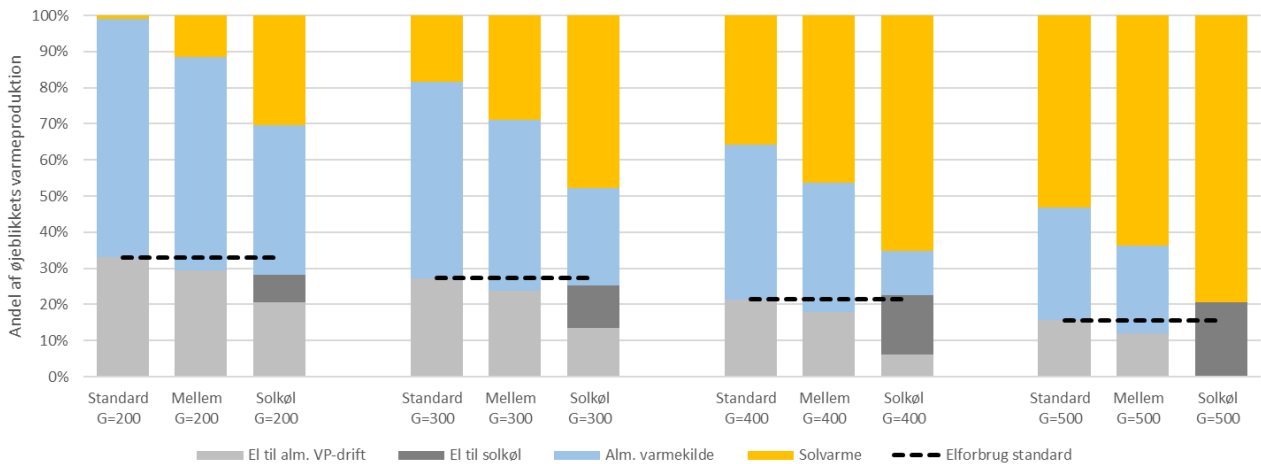
I sammenligningen evalueres elforbruget for de tre driftsformer (dvs. tre forskellige temperaturer i solfangerne, hhv. konfiguration 0, 2 og 5a, jf. afsnit 2.1.2). Det ses at ved lavere temperaturer i solfeltet fortrænges mere varme fra varmepumpens normale varmekilde (eksempelvis udeluft). Forudsat at varmepumpens varmekilde er gratis (eksempelvis udeluft), er det afhørende ikke mængden af solvarme, der produceres, men i stedet minimering af det samlede elforbrug.

Maksimering af solvarmeproduktionen er ikke et mål i sig selv; i stedet bør fokus være på at minimere de samlede omkostninger, hvilket er direkte koblet til at minimere det samlede elforbrug.

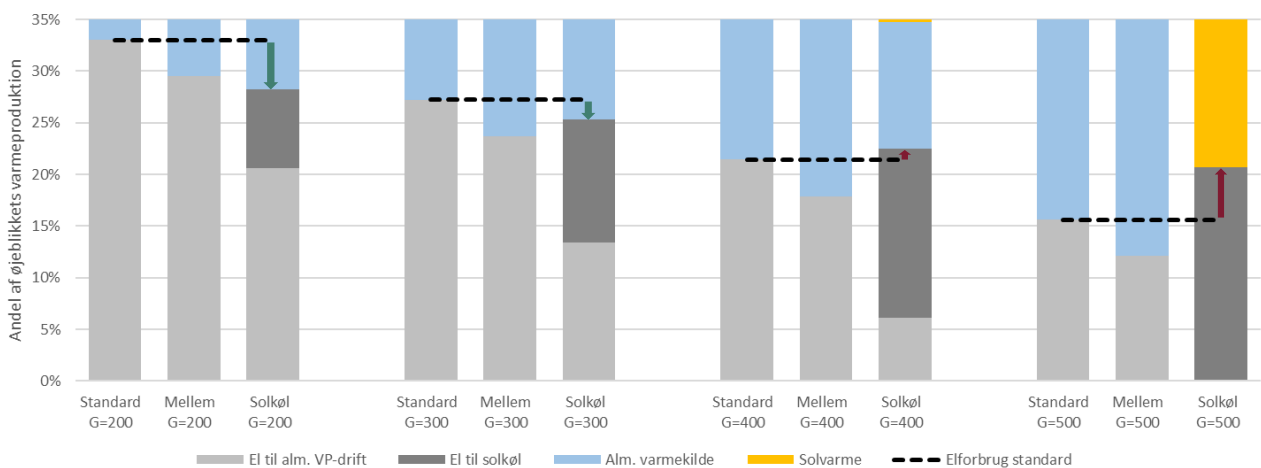
I dette eksempel bemærkes følgende:

- Ved 200 W/m² resulterer solkøling i laveste samlede elforbrug (grå søjler kombineret).

- Ved 500 W/m² resulterer solkøling i et højere elforbrug ift. både solvarme ved fremløb- og mellemtemperatur idet el til solkølingen betyder et unødigt højt elforbrug.
- Ved 300 og 400 W/m² ses omtrentligt samme elforbrug uanset om man vælger standarddrift eller solkøling – dog med størst fordel ved solkøling ifm. lavere indstrålingsværdier. I tilfældene for 300, 400 og 500 W/m² giver solvarme ved en mellemtemperatur dog laveste elforbrug.

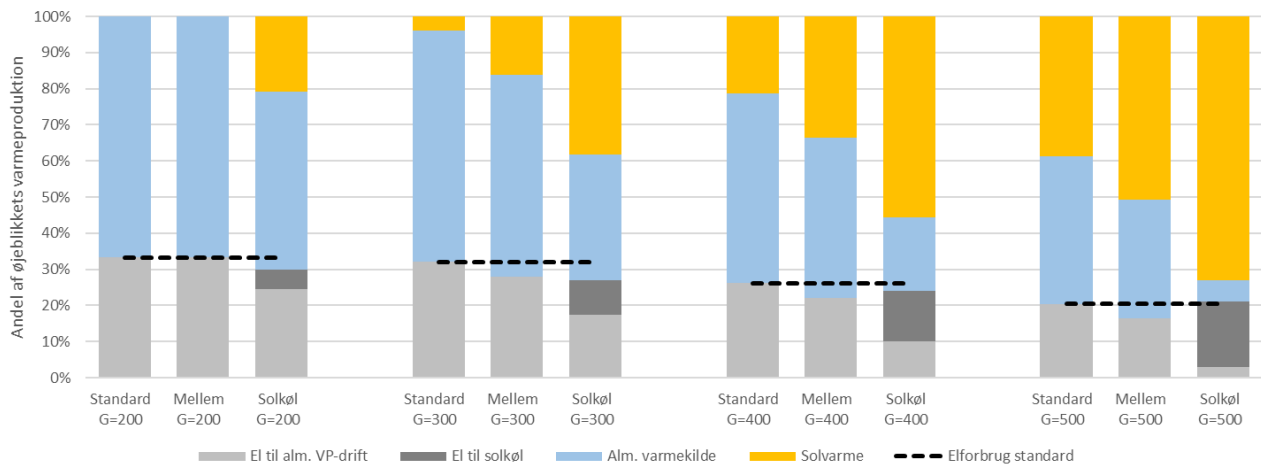


Figur 26: Fjernvarmeproduktionens fordeling i en situation med solindstråling på hhv. 200, 300, 400 og 500 W/m², hvor solfangerne skal levere hhv. fremløbstemperaturen i fjernvarmenettet ("standard"), en mellemtemperatur ("Mellem") eller hvor solfangerne køles af varmepumpen og leverer en lav temperatur ("Solkøl"). Udetemperatur: 20 °C.



Figur 27: Zoom af de nederste 35% af Figur 26 for at tydeliggøre forskelle mellem summen af grå stablede søjler (dvs. samlet elforbrug til varmepumpen). Grønne og røde pile indikerer hhv. reduceret og øget elforbrug ved køling af solfangerne sammenlignet med standard-drift.

En figur svarende til Figur 26 blot for 5 °C udetemperatur ses nedenfor på Figur 28. Lavere udetemperatur øger varmetabet fra solfangerne, hvilket reducerer solvarmydelsen (dvs. solvarmens gule søjler erstattes helt eller delvist af varmepumpens blå og grå søjler). Når det er koldt udenfor, opnås således en større reduktion i varmetabet ift. om sommeren, hvis temperaturen sænkes i solfangerne, hvormed denne driftsform (solkøling) bliver mere relevant.



Figur 28: Fjernvarmeproduktionens fordeling i en situation med solindstråling på hhv. 200, 300, 400 og 500 W/m², hvor solfangerne skal levere hhv. fremløbstemperaturen i fjernvarmenettet ("standard"), en mellemtemperatur ("Mellem") eller hvor solfangerne køles ("Solkøl"). Udetemperatur: 5 °C.

Af Figur 26/Figur 27 og Figur 28 ses at den mest energieffektive løsning (dvs. med mindst muligt elforbrug) ofte er ved at lade solfangerne producere ved mellemtemperatur. Det skal dog sikres, at der er basis for at bruge solvarme ved lav temperatur – enten ved at løfte temperaturen yderligere via en anden varmekilde (varmepumpen eller en kedel), dvs. i en seriekobling, eller ved at shunte med et flow ved højere temperatur. Figureerne viser øjeblikbilleder, men i praksis vil et varmelager kunne udjævne over døgnet.

Det bemærkes, at hvis solkøling udgør en del-proces ifm. varmepumpedriften – altså at varmepumpen kun kan køle solfangerne *samtidigt* med den normale varmepumpedrift – er det ikke sikkert, at man vil kunne opnå netop de angivne forhold mellem hhv. el til almindelig varmepumpedrift (lysegrå søjler på Figur 26) og el til solkøling (mørkegrå søjler på Figur 26). Det ændrer dog ikke på princippet og konklusionen her: At man bliver nødt til at sammenligne forskellige potentielle situationer for at kunne evaluere hvilken driftsform, der giver det laveste elforbrug. Desuden er det periodevist muligt at producere mere varme end behovet udgør og så lagre i (toppen af) varmelageret eller i et andet (fx en anden separat akkumuleringstank). Desuden bemærkes det, at hvis varmebehovet er større end i eksemplet og varmepumpekapaciteten er tilsvarende større, vil andelen af el, der går til "solkøling", forholdsomt reduceres.

5.3 Tendenser for system-COP

5.3.1 Beregningsresultater for system-COP

Ved at beregne system-COP ved forskellige solindstrålingsværdier, kan man for anlægget i eksemplet illustrere system-COP som funktion af solindstrålingen. Figur 29 viser en sådan graf, hvoraf det ses at system-COP falder med øget solindstråling. Dette skyldes at merydelsen fra solfangerne er konstant (som beskrevet i afsnit 2.3), mens den mængde energi, der skal køles af varmepumpen (og dermed også den el, der går til denne proces) stiger med øget solindstråling.

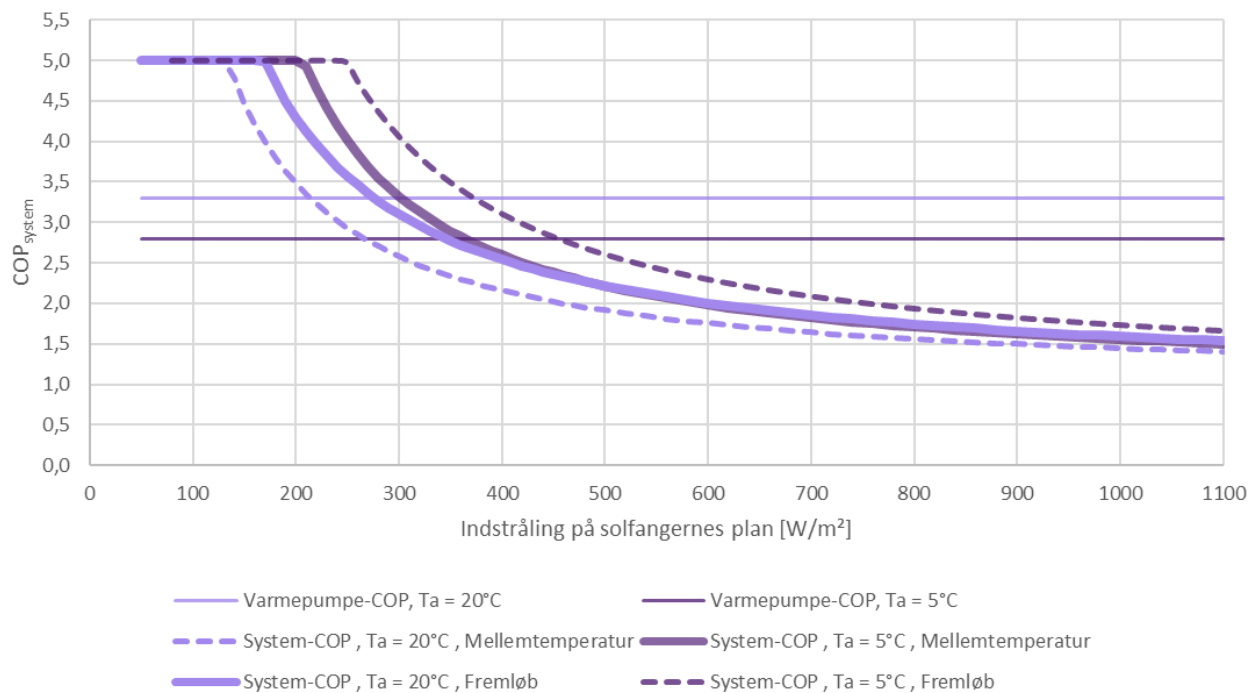
Ved de laveste indstrålinger, hvor solvarmeanlægget ikke kan levere noget varme medmindre varmepumpen benyttes til at sænke temperaturen i solfangerne, er al solvarme en "merydelse" (sammenlignet med en referencesituation med ingen solvarme). I så fald bliver System-COP lig varmepumpens COP for solkølingsprocessen (i afsnit 4.2 antaget at være 5,0). Hvis al solvarmen føres til fjernvarmenettet via varmepumpen, vil system-COP på intet tidspunkt overstige varmepumpens COP relateret til solkøling.

Eftersom system-COP defineres ud fra en *forskel* mellem to situationer, afhænger system-COP-værdien af, hvad et realistisk alternativ er – i dette tilfælde, hvilken temperatur solvarmeanlægget *ellers* ville driftes ved. De mest repræsentative system-COP-kurver ses med tykke linjer (delvist overlappende) på Figur 29. Da der oftere i perioder med lave udetemperaturer (fx ved en udetemperatur $T_a = 5\text{ °C}$) er mulighed for at operere solvarmeanlægget ved en mellemtemperatur (fordi solvarmen udgør en relativt lille andel af varmebehovet om vinteren), forventes den fuldt optrukne mørkelilla kurve på Figur 29 med " $T_a = 5\text{ °C}$, *Mellemtemperatur*" oftere være aktuel end " $T_a = 20\text{ °C}$, *Mellemtemperatur*" (stiplet lyslilla). Tilsvarende vil det ofte være oplagt at lade solvarmeanlægget levere fjernvarmenettets fremløbstemperatur i tilfælde, hvor udetemperaturen er højere (eksempelvis $T_a = 20\text{ °C}$) fordi der er tale om perioder med høj indstråling (illustreret som tyk, lyslilla kurve på Figur 29).

Til sammenligning er eksempler på en varmepumpes COP i normal drift angivet med tynde vandrette streger for at illustrere et typisk spænd mellem nedre og øvre grænser for normal drift. Eksemplerne kan evt. repræsentere afhængighed af varmekildens temperatur (fx udeluft) på hhv. 5 °C og 20 °C .

Antagelser ud over hvad der er beskrevet i 4.1:

- Varmepumpens COP ved normal drift, øvre værdi (evt. som $T_a = 20\text{ °C}$): 3,3
- Varmepumpens COP ved normal drift, nedre værdi (evt. som $T_a = 5\text{ °C}$): 2,8
- Mellemtemperatursolvarme leveret fra veksler: 60 °C .

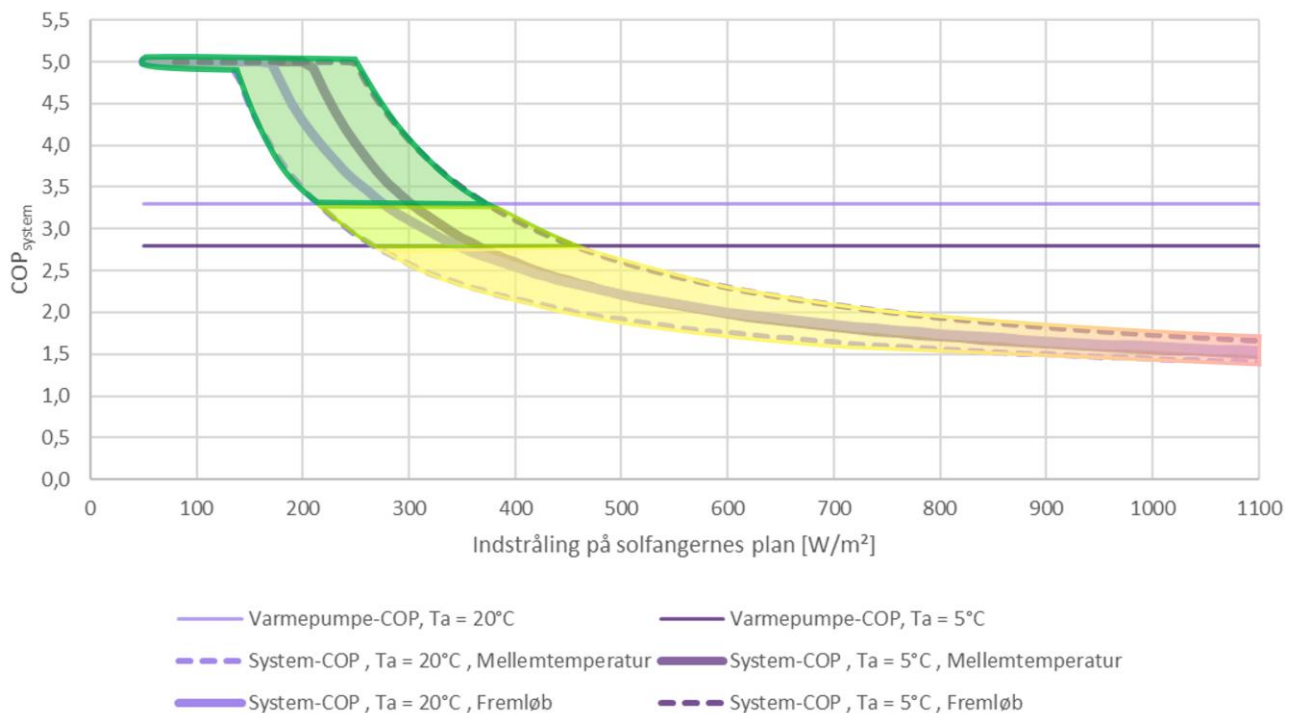


Figur 29: Eksempler på system-COP som funktion af solindstrålingen på solfangernes plan.

Selvom køling af solfangerne isoleret set giver varmepumpen en høj COP, er det ikke ensbetydende med, at denne driftsform altid er hensigtsmæssig, når man betragter systemet som en helhed.

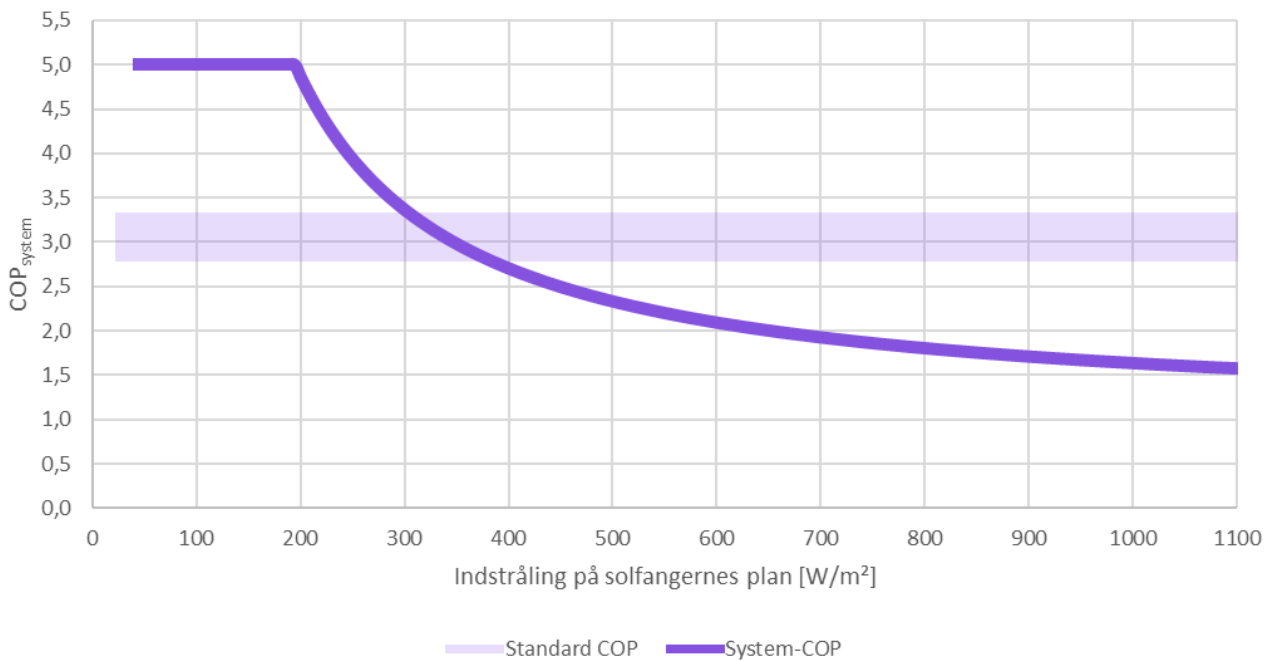
For at illustrere det mest relevante "arbejdsområde" for solkøling, er system-COP-figuren ovenfor tilføjet farvekoder på Figur 30:

- Mørkegrøn illustrerer situationer som er oplagt til solkøling da der er tale om højeffektiv udnyttelse af elforbruget til at realisere dette.
- Lysegrøn indikerer området, hvor relevansen afhænger af varmepumpens COP i normal drift. Er der overkapacitet på solvarme og varmepumpe tilsammen, skal system-COP være højere end varmepumpens normale COP før solkølingen giver energimæssig mening.
- Gult område indikerer lavere system-COP end typisk normaldrift af varmepumper. Hvis der er overkapacitet på solvarme og varmepumpe tilsammen, vil det derfor oftest være mere effektivt at drive varmepumpen i normal drift uden solkøling.
- Rødt område indikerer en lav system-COP samtidigt med høje solindstrålinger, hvilket betyder at man skal være opmærksom på, om solkøling giver mening, eller anden driftsform er mere fornuftig. I tilfælde af høj solindstråling samtidigt med højt varmeforbrug (eksempelvis tidligt forår), hvor varmepumpen mangler kapacitet, vil driftsformen dog kunne være fordelagtig.



Figur 30: Eksempler på system-COP som funktion af solindstrålingen på solfangernes plan med farvekoder til at indikere de mest relevante situationer for solkøling.

De mest repræsentative system-COP-kurver findes som nævnt omkring de fuldt optrukne, tykke linjer på Figur 29. Som en omtrentlig simplificeret figur kan system-COP illustreres som vist på Figur 31 herunder. En sådan vurdering af system-COP-niveauet er relevant ifm. beslutning af driftsform, jf. afsnit 5.4.4, som beskriver et beslutningstræ. Det bemærkes dog, at værdierne afhænger af både systemets egenskaber (type af solfanger osv.), ydre omstændighederne (såsom udeluftens temperatur) og valg af sætpunkter (bl.a. ift. solkølingen).



Figur 31: Simplificeret eksempel på system-COP som funktion af solindstrålingen på solfangernes plan.

**Værdien af køle solfangerne afhænger i høj grad af solindstrålingen
– system-COP er høj når solindstrålingen er lav
og omvendt er system-COP lav ved høj solindstråling.**

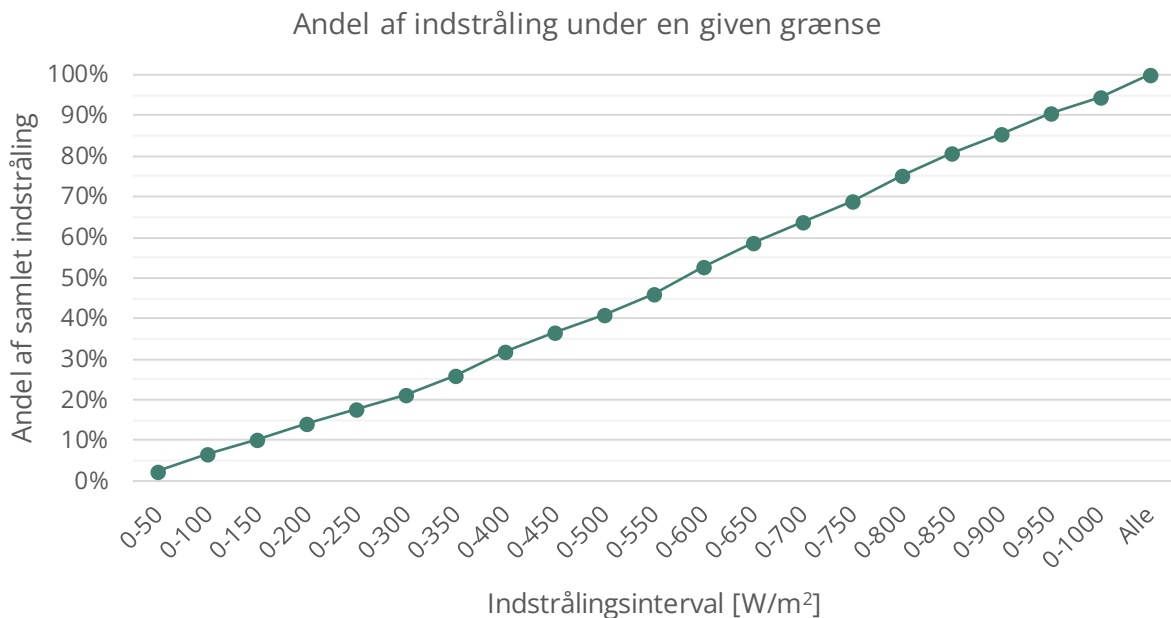
Det ses af Figur 29 og Figur 31 at system-COP i eksemplet er lavere end varmepumpens normale COP når solindstrålingen overstiger ca. 300-400 W/m². Dette indikerer, at når varmepumpe og solvarme kan dække hele varmebehovet, vil solkøling typisk kun være fordelagtigt ved lave værdier af solindstråling.

Hvis varmepumpe og solvarme derimod *ikke* kan dække hele varmebehovet, og alternativet er dyr kedeldrift, vil solkøling potentielt være rentabelt selv ved lavere værdier af system-COP. Sammenlignes fx med en elkedel (svarende til COP = 1,0), vil en system-COP på fx 2,0 være mere effektivt.

5.3.2 System-COP og fordeling af solindstråling

Hvis der er tilstrækkelig kapacitet på varmepumpe og solfangerne til at dække varmebehovet, vil eventuel solkøling fortrænge normal varmepumpedrift. I så fald bør system-COP være højere end varmepumpens COP ved normal drift for at opnå det mindst mulige samlede elforbrug. Hvis man betragter skæringen på Figur 31 mellem hhv. en varmepumpes COP i normal drift (lys lilla) og kurven for system-COP (mørk lilla) ses, at indstrålingsværdier over ca. 350 W/m² ikke giver højere system-COP end almindelig varmepumpedrift. Som en forsimplet beregning kan man betragte overslagsmæssigt, hvor stor

andel af solindstrålingsenergien, der findes op til en grænse på 350 W/m^2 . Figur 32 herunder viser en tilnærmelsesmæssig lineær sammenhæng mellem andelen af den samlede indstrålingsenergi på årsbasis og en given grænse for solindstråling. Desuden ses at ca. $\frac{1}{4}$ af solindstrålingsenergien findes for indstrålinger op til 350 W/m^2 . Selve det tekniske potentiale for solkøling er således begrænset, og det kan konkluderes, at man under alle omstændigheder ikke skal køle solfangerne ubegrænset, da det meget vel kan lede til et utilsigtet og unødvendig højt elforbrug.



Figur 32. Andel af årets samlede solenergi på solfangeroverfladen ved forskellige intervaller for solindstrålingseffekter.

5.4 Valg af driftsform for solvarmeanlægget

5.4.1 Høj temperatur fra solvarme blandet med lavere temperatur fra VP

Hvis varmepumpe og solvarme i fællesskab kan dække varmebehovet, er en mulig driftsform at lade solvarmeanlægget levere en høj temperatur, mens varmepumpen leverer en mellemtemperatur hvorefter disse blandes for at fjernvarmebehovet dækkes ved nettets fremløbstemperatur. Dette svarer til konfiguration 1 i afsnit 2.1.2. Hvilken temperatur, der skal leveres af varmepumpen, afhænger af, hvor meget energi der kommer fra solvarmeanlægget og fjernvarmevarmebehovet.

Værdien af denne driftsform afhænger i høj grad af, hvor meget varmepumpens COP kan forbedres ved at reducere den temperatur, der skal leveres af den. Som alternativ kunne man lade solvarmeanlægget levere fremløbstemperaturen ligesom varmepumpen (svarende til en standardløsning, hvor enhederne kører uafhængigt af hinanden (konfiguration 0 i afsnit 2.1.2)). Sammenlignet med standardløsningen vil ydelsen fra solfangerne være lavere, når der leveres en højere temperatur. Dermed skal varmepumpen levere en større andel af varmen. Til gengæld kan en akkumuleringstank lagre flere MWh

solvarme, når temperaturen øges. Desuden kan varmepumpens COP potentielt¹² forbedres, hvilket reducerer elforbruget pr. leveret varmeeenhed (MWh). Det samlede elforbrug kan dermed evalueres for at beregne, om det er en fordel at lade solvarmen levere en højere temperatur med det formål at øge COP for varmepumpen. Om ekstra høje temperaturer i solfangerne er hensigtsmæssigt, afhænger af, om en forbedret COP kan medføre lavere samlet elforbrug på trods af at der skal produceres mere varme fra varmepumpen (fordi solfangerne producerer mindre ved højere temperatur).

Der er gennemført beregninger af reduktionen i elforbruget til varmepumpen ved at vælge driftsform 1 (højtemperatursolvarme blandes med varme ved lavere temperatur fra varmepumpen) sammenlignet med driftsform 0 (solvarme og varmepumpe hæver begge fra returtemperaturen til fremløbstemperaturen), jf. afsnit 2.1.2. Resultaterne viser, at der skal være tale om høj solindstråling og høj udetemperatur før driftsform 1 med høj solvarmetemperatur kan være fordelagtigt i samspil med varmepumpen. (Dette hænger sammen med, at varmetabet fra solfangerne i dette tilfælde er mindre markant.) I sådanne tilfælde vil solvarmen typisk dække hele eller næsten hele varmebehovet. Ud over disse situationer, vil det i de fleste tilfælde give et øget elforbrug at hæve solfangertemperaturen over fremløbet, fordi varmepumpen dermed skal dække en større del af varmebehovet. Elforbruget øges samlet set, også selvom varmepumpen potentielt opnår en bedre COP ved at levere en lavere temperatur (som så kan blandes med den høje temperatur fra solfangerne).

Reduktionen i solvarmeydelsen (pga. en øget temperatur) er uafhængig af indstrålingen (jf. afsnit 5.1), hvilket betyder at denne "mistede" solvarmeydelse bliver relativt mindre afgørende, når solindstrålingen (og dermed den samlede solvarmeydelse) øges. Desuden afhænger reduktionen i solvarmeydelsen af udetemperaturen. Derfor kan der opnås størst fordel ved at levere en høj solvarmetemperatur, når udetemperaturerne er højest.

Selvom beregningerne er udført som øjebliksbilleder, kan man – ved at indtænke en akkumuleringstank som buffer – betragte et større varmebehov som en udjævning over en længere periode over døgnet med varmepumpedrift.

Hvis man reducerer størrelsen af solvarmeanlægget, bliver der flere tidspunkter, hvor højere temperatur i solfangerne kan være en fordel, men generelt er tendensen den samme. Dermed bliver en høj temperatur fra solfangerne primært et spørgsmål om at udnytte en begrænset lagerkapacitet – i højere grad end et ønske om at kunne reducere temperaturen ud af varmepumpen. Dog bemærkes at man med fordel kan levere en lavere temperatur fra varmepumpen i sommerperioder, hvis man alligevel har højtemperatursolvarme til rådighed i tanken og skal supplere med lidt varme fra varmepumpen for at dække varmebehovet.

¹² Eksempelvis ammoniak-varmepumper vil potentielt få en fordel af dette, mens COP for CO₂-varmepumper til sammenligning i mindre grad er følsomme overfor den leverede temperatur, jf. afsnit 2.3.3.

Høje temperaturer fra solfangerne vil typisk være relevant for at udnytte begrænset lagerkapacitet mest muligt – ikke primært for at kunne øge varmepumpens COP ved at den kan levere en lavere temperatur.

I praksis vil varmepumpen typisk designes (optimeres) efter den primære driftsform, hvilket betyder at en forbedring i COP ikke nødvendigvis følger det teoretiske maksimum, hvilket i praksis også skal tænkes ind i en konkret sammenligning af mulige driftsformer for et givet anlæg.

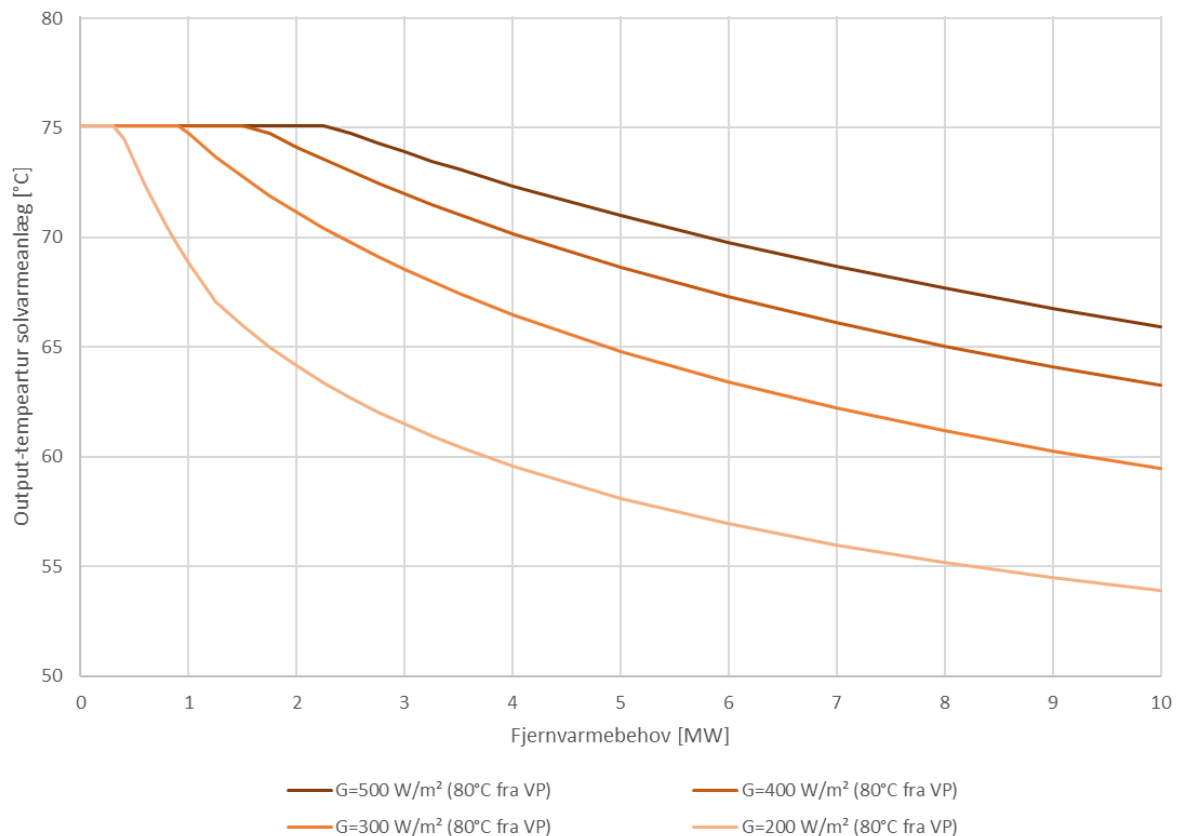
5.4.2 Solvarme ved lavere temperatur og varmepumpe ved høj temperatur

Hvis varmepumpen er i stand til at levere en højere temperatur end fremløbstemperaturen, kan solvarmeanlægget potentielt levere en lavere temperatur, der så iblandes den højere temperatur fra varmepumpen for at opnå fjernvarmenettets fremløbstemperatur. I beregningerne ses en tendens, som indikerer en fordel ved de laveste solindstrålinger, idet fordelene ved denne driftsform er størst ved lave solindstrålinger og ikke alt for høje udetemperaturer.

Som tidligere nævnt gælder der for nogle varmepumpetyper, at COP'en generelt er mindre følsom overfor den leverede fremløbstemperatur (dog naturligvis ikke ubegrænset). Eksempelvis kan nogle CO₂-varmepumper levere 80 eller 85 °C uden at varmepumpens COP reduceres betydeligt ift. 75 °C. I så fald kan man udnytte denne højere temperatur til at kombinere med en lavere temperatur fra solvarmeanlægget. Dette svarer til konfiguration 2 i afsnit 2.1.2.

Nedenfor på Figur 33 ses et eksempel på, hvilken temperatur, der skal leveres fra solvarmeanlægget, for at sikre en fremløbstemperatur på 75 °C, hvis der blandes med 80 °C fra fx en varmepumpe. Da fjernvarmenettets flow afgøres af varmebehovet, er der grænser for, hvor meget flow der kan sendes til hhv. solvarmeanlæg og varmepumpe. Ved højere solindstrålinger dækker solvarmeanlægget en større andel af varmen og "tager" derfor en større del af fjernvarmeflowet. Jo større solvarmeandel, des højere skal sætpunktstemperaturen være, når der fortsat skal sikres en resulterende fjernvarmetemperatur på 75 °C.

Solvarme-setpunktstemperatur ved forskellige solindstrålinger



Figur 33: Mulig ("mellem")temperatur fra solvarmeanlægget i tilfælde af at der shuntes med 80 °C vand fra en anden varmeproduktionsenhed, og den resulterende temperatur af fjernvarmens fremløb skal være 75 °C.

Mellemtemperaturvand kan også lagres, men der kan være mindre energi i fx en 1.000 m³ akkumuleringsstank, hvis der lagres ved 60 °C ift. lagring ved højere temperaturer. Til gengæld leveres solvarmen ikke døgnet rundt, dvs. efter solnedgang vil man kunne bruge natten på at få brugt lavtemperatursolvarmen inden dagen efter.

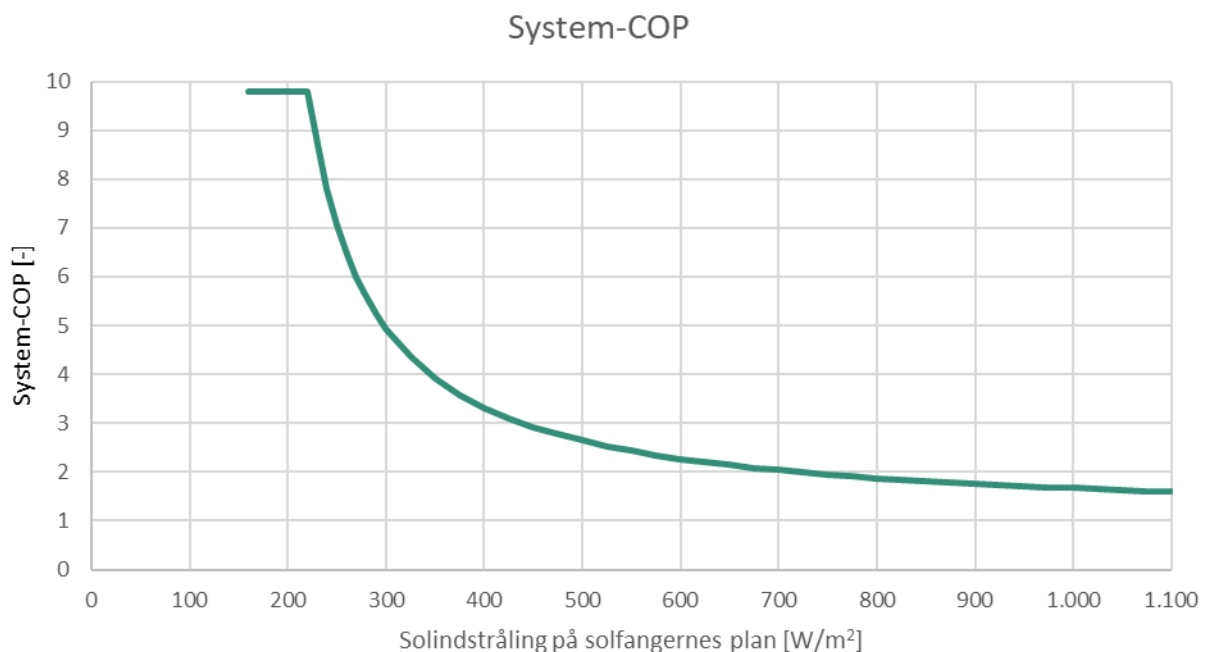
Højere solindstrålinger (og dermed mere solvarme) forkorter naturligvis tiden inden en tank fyldes op. Varmebehovet har tilsvarende betydning, fordi et større varmebehov modvirker, hvor meget der skal lagres (solvarmen bliver hurtigere brugt). Man skal – ud over at være opmærksom på, hvornår det giver energimæssig mening at sigte efter en sådan mellemtemperatur fra solfangerne ift. solkøling – både holde øje med, hvor meget "plads" der er i tanken, og have en plan for at aftage mellemtemperaturvandet i fjernvarmenettet (fx ved at shunte med en højtemperatur-varmekilde).

Man kan således regne sig frem til, hvilken lavere sætpunktstemperatur fra solfangerne, der er mulig, for at maksimere solvarmeydelsen, mens der stadig sikres plads i tanken og tilstrækkelig fremløbstemperatur i fjernvarmenettet.

5.4.3 Reduceret tilgangstemperatur til solfeltet

En tilgang mht. styring af anlægget er at køle solfangervæsken ned inden den sendes til solfangerne, hvor flowet fortsat styres efter samme afgangstemperatur. På den måde får man samme leverede temperatur fra solfangerfeltet, men aktiverer samtidigt¹³ solkølingen. I så fald skal flowet i solfangerne tilpasses (reduceres ift. normal drift) for at der fortsat opvarmes til fremløbstemperaturen. Dette svarer til konfiguration 5b i afsnit 2.1.2.

En illustration af system-COP ved denne driftsform ses på Figur 34. Princippet svarer til, at der opereres med solkøling hvor temperaturen i solfangerne blot er lidt højere end i de tidligere eksempler med solkøling i nærværende rapport (jf. afsnit 5.3) idet solvarmeanlægget ikke varmer op fra 20 til 30 °C, men fra 20 til 75 °C. Fordelen ved denne driftsform er, at ikke al solvarmen skal "igennem" varmepumpen, dvs. elforbruget reduceres ift. en situation, hvor al solvarmeproduktionen er ved lave temperaturer.

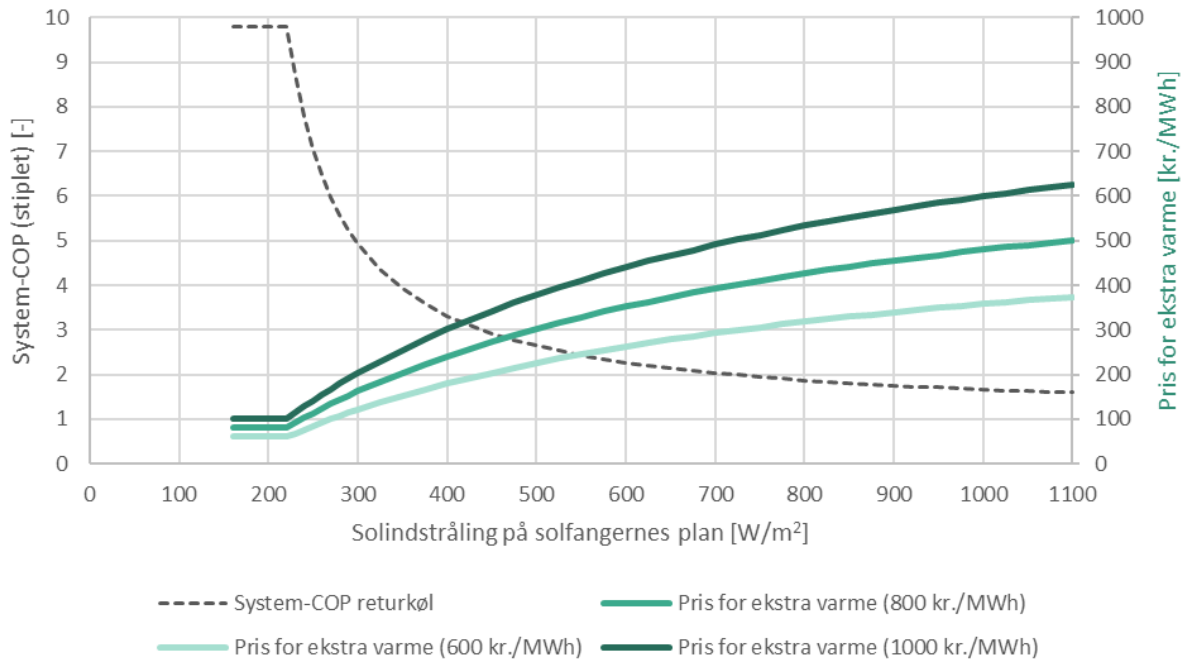


Figur 34: Eksempel på system-COP som funktion af solindstråling for drift med solkøling i starten af hver solfangerrække, mens solvarmeanlægget fortsat leverer fjernvarmenettets fremløbstemperatur.

Det er vigtigt at forholde sig til, hvilken kølekapacitet der er til rådighed, og om der kan planlægges tilstrækkelig præcist forud til at have forudsætningerne for den ønskede driftsform. Forestiller man sig eksempelvis 6 timer med solindstråling på 800 W/m² for et anlæg som angivet i afsnit 4.2, kræves ca. 12 MWh solkøling, hvilket svarer til 24 timers konstant køling med 500 kW.

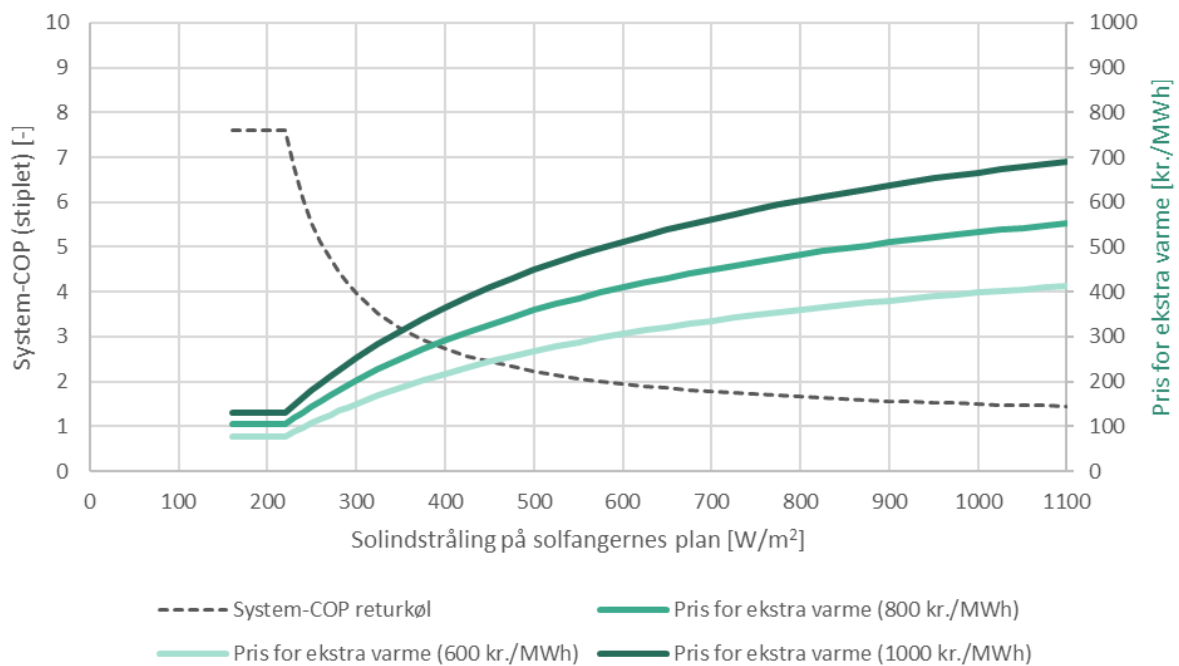
¹³ Dette kan også adskilles tidsmæssigt vha. en akkumuleringstank til afkølet vand, men mængden skal koordineres nøje for at behovet for koldt vand tilpasses solvarmeproduktionen.

Til vurdering af værdien af merydelsen fra solfangerne sammenholdt med elbehovet til køling af solfangerne, kan man udregne elbehovet ganget med en antaget elpris for at afgøre den omtrentlige varmeproduktionspris. Nedenfor er dette gennemført for en samlet elpris på hhv. 600, 800 og 1.000 kr./MWh.



Figur 35. Varmeproduktionspris for ekstra solvarme fra køling af starten af solfangerrækkerne.

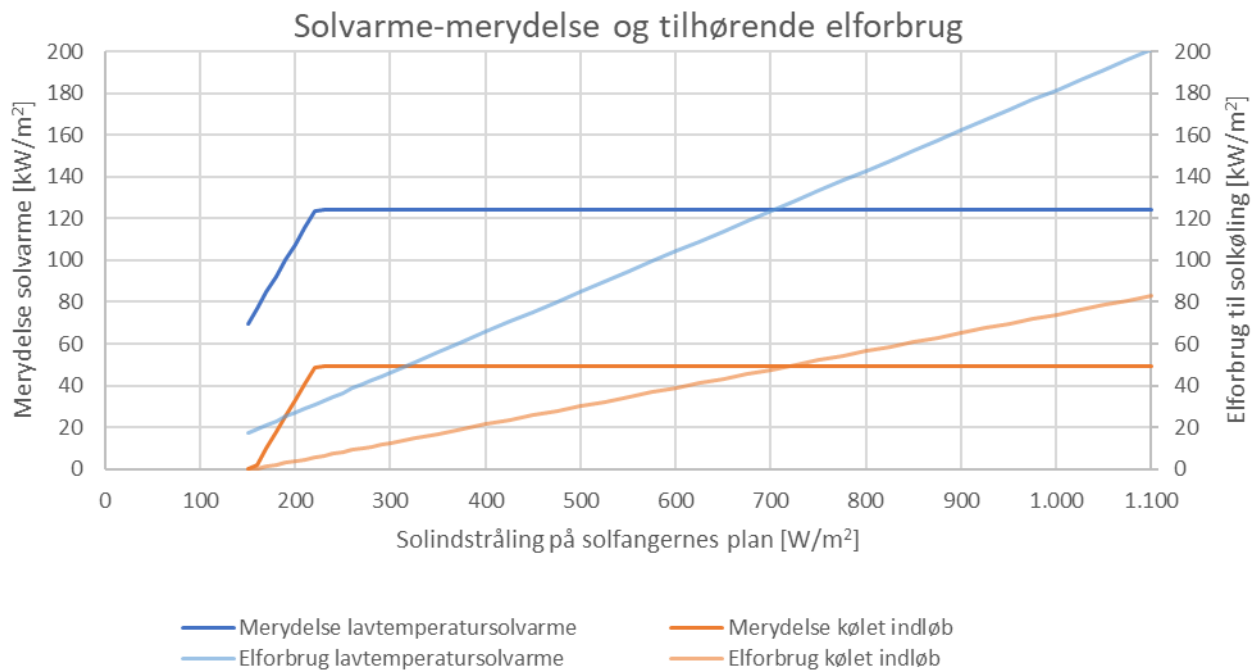
Hvis der ikke kan opnås den antagne COP-forbedring på varmepumpens solkølingsfunktion, reduceres gevinsten og den beregnede produktionspris øges. Nedenfor ses en beregning svarende til Figur 35, dog med en COP for varmepumpen på 4,0 i stedet for 5,0.



Figur 36. Varmeproduktionspris for ekstra solvarme fra køling af starten af solfangerrækkerne med lavere COP på solkølingen (4,0) som følsomhedsberegning.

På trods af den potentielt høje system-COP ved at køle indløbet af solfangerfeltet, ses i absolutte tal ikke lige så høj merydelse ved denne driftsform (konfiguration 5b) sammenlignet med køling af al solvarmen (konfiguration 5a). På Figur 37 nedenfor ses, hvordan køling af *a/* solvarmen giver en større solvarme-merydelse, men samtidigt kræver mere el til processen. Særligt hvis der er mangel på kapacitet, vil det typisk være relevant at få mest muligt merydelse fra solfangerne.

Årsagen til at merydelsen ikke er kontant ved de laveste solindstrålinger er, at der sammenlignes med en reference på minimum-ydelse på 0 W/m² og ikke negative værdier som beskrevet i afsnit 5.1.



Figur 37. Solvarme-merydelse og tilhørende elforbrug til solkøling ved hhv. at køle al solvarmen (blå, konfiguration 5a) og ved at sænke temperaturen der sendes til solfangerne, som derpå leverer fremløbstemperatur (orange, konfiguration 5b).

5.4.4 Beslutningstræ

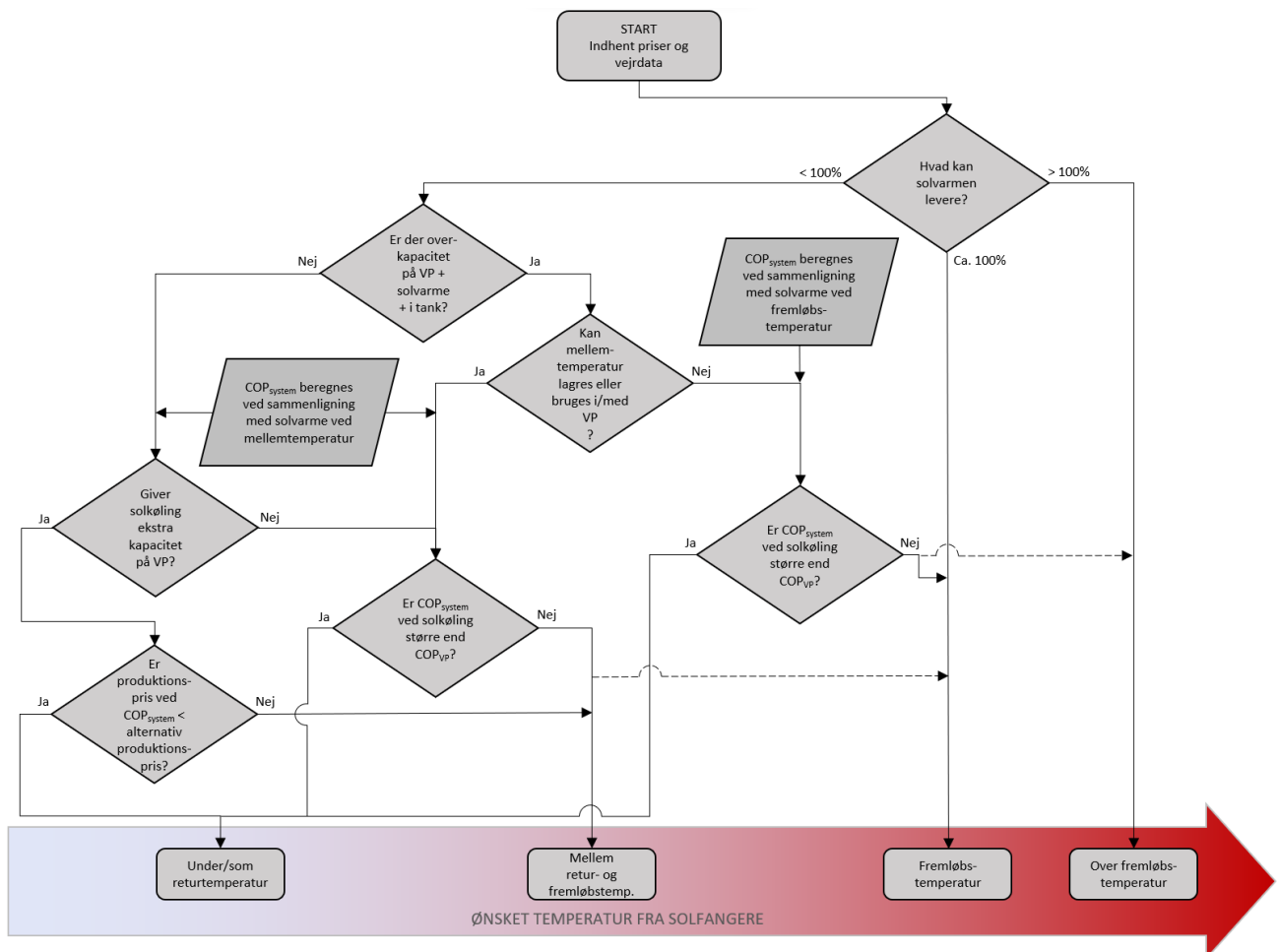
I den daglige drift af anlæg med flere muligheder, kan beslutning vedr. driftsform afgøres ved at beregne de samlede varmeproduktionspriser for forskellige driftsformer og vælge den mest hensigtsmæssige. Dette kan automatiseres og udføres som en "baggrundsproces", der gentages løbende og som kan tjene til beslutningsgrundlag for driftspersonalet. En sådan proces ville overordnet set bestå i følgende:

- Indhent data for elpriser og vejr inkl. forventninger til de kommende dage.
- Beregn hvilken sætpunktstemperatur fra solvarmeanlægget (dvs. hvilken "mellemtemperatur") der er muligt at benytte i samspil med varmepumpen eller at lagre (jf. afsnit 5.4.2).
- Beregn de samlede varmeproduktionspriser for de kommende timer/dage ved forskellige driftsformer/konfigurationer.
- Vælg den driftsform, der giver laveste varmeproduktionspris samlet set over perioden.
- Gentag løbende og tilret, når det bliver mere relevant med en anden driftsform.

Punkt c kræver ikke alene en sammenligning af solvarmeproduktionen ved høj temperatur, fremløbstemperatur, mellemtemperatur (fra punkt b) og lav temperatur (kølet), men også af varmepumpens ydelse og elforbrug ved de forskellige konfigurationer samt behovet for øvrige varmekilder.

På Figur 38 ses en simplificeret udgave af et beslutningstræ til at indikere generelle tendenser inden for valget af relevant driftsform mht. ønsket temperatur ud af solvarmeanlægget. For at forklare valgene er "beslutningerne" punktvis uddybet under figuren (der findes i en større udgave som Bilag C). Det bemærkes, at dette ikke er tiltænkt som et konkret styringsværktøj, men til en generel beskrivelse, da den

samlede økonomi også afhænger af parametre som forholdet mellem prisen for el og prisen for øvrig varme (eksempelvis fra en kedel).



Figur 38: Eksempel på beslutningstræ ifm. valget af driftsform for solvarmeanlægget (og dermed også varmepumpen).

"Hvad kan solvarmen levere?"

- **Ca. 100%:**
Hvis solvarmen kan dække hele varmebehovet – set over flere døgn, hvor lagerkapaciteten benyttes til at udjævne produktion og behov – er det fordelagtigt at levere en temperatur, der kan bruges direkte i fjernvarmenettet for helt at undgå at der skal suppleres med øvrige varmeproduktionsenheder.
- **>100%:**
Hvis solvarmen endda leverer *mere* end dette, vil det være fordelagtigt at hæve temperaturen i solfeltet¹⁴ for at kunne udnytte lagerkapaciteten yderligere.

¹⁴ Dette benyttes også til tider for bevidst at reducere solvarmeydelsen en smule, hvis der er for meget solvarme og ikke behov nok i fjernvarmenettet til at kunne aftage varmen. Alternativer til dette er natkøling, hvor varmen cirkuleres i solfeltet om natten for aktivt at køle noget varme væk, eller i tørkølere, som kan afsætte varme, hvis behovet opstår.

- <100%:
Hvis solvarmen ikke alene kan dække behovet, er det væsentligt om varmepumpen (typisk betragtet som den næst-billigste varmeproduktionsenhed) sammen med solvarmen er tilstrækkelig til at dække varmebehovet, altså om der er overkapacitet, jf. spørgsmålet herunder.

“Er der overkapacitet på VP + solvarme + i tank?”

- *Nej:*
Når solvarme og varmepumpe tilsammen ikke kan dække varmebehovet, er der typisk tale om en vintersituation, hvor den mest fordelagtige solvarmedrift enten vil være en nedsat fremløbstemperatur fra solfangerne eller solkøling.
Hvis alternativet til solkøling er solvarme ved mellemtemperatur, beregnes system-COP i sammenligning med mellemtemperatursolvarme.
Giver solkøling ekstra kapacitet på VP?
A. *Ja:*
Hvis solkøling giver en ekstra kapacitet på varmepumpen, kan denne ekstraproduktion sammenlignes med den varmeproduktion, der fortrænges (*Er produktionspris ved $COP_{system} < alternativ produktionspris?$*) I så fald vil solkøling være at foretrække. Hvis ikke, er det mere fordelagtigt at drifte solvarmeanlægget ved en mellemtemperatur.
B. *Nej:*
Hvis solkøling ikke giver en ekstra kapacitet på varmepumpen, erstatter driften med solkøling alternativ drift på varmepumpen. Det vil kun være fordelagtigt hvis system-COP er større end COP for varmepumpen under almindelig drift (*Er COP_{system} ved solkøling større end COP_{vp} ?*). Hvis ikke driftes med mellemtemperatursolvarme.
- *Ja:*
Hvis der er overkapacitet på solvarmeanlæg og varmepumpe tilsammen, hvilket typisk er tilfældet i forår, (sommer) og efterår, er det væsentligt, om der er mulighed for enten at afsætte mellemtemperatursolvarme i et varmelager og/eller at iblande med højere temperatur/”booste” temperaturen med varmepumpe/kedel:
A. *Kan mellemtemperatur lagres eller bruges i/med VP?*
Dette har betydning for hvordan system-COP beregnes.
A. *Nej, mellemtemperatur kan hverken lagres eller bruges i/med VP:*
Hvis ikke det er muligt at aftage mellemtemperatursolvarme, skal system-COP beregnes ud fra en sammenligning med solvarme ved normal drift (ved fjernvarmenettets fremløbstemperatur). (*COP_{system} beregnes ved sammenligning med solvarme ved fremløbstemperatur*).
Solvarmens driftsform fastlægges efter om system-COP er større ved solkøling end for varmepumpens normaldrift: “Er COP_{system} ved solkøling større end COP_{vp} ?”
- *Ja:*
I så fald driftes med solkøling.
- *Nej:*
Drift ved normal (eller evt. høj¹⁵) solvarmetemperatur.
B. *Ja, mellemtemperatur kan lagres eller bruges i/med VP:*
Hvis det er muligt at aftage mellemtemperatursolvarme, skal system-COP beregnes ud fra en sammenligning med solvarme ved mellemtemperatur. Solvarmens

¹⁵ Se forklaring i afsnit 5.4.1.

driftsform fastlægges efter om denne system-COP er større end COP for varmepumpens normaldrift: "Er COP_{system} ved solkøling større end COP_{vp} ?"

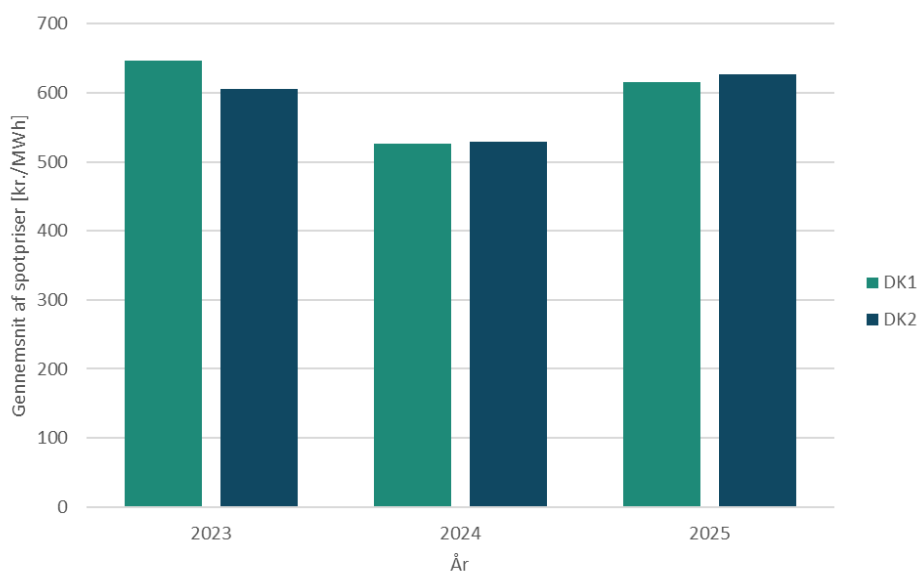
- *Ja:*
Drift med solkøling.
- *Nej:*
Drift med solvarme ved mellemtemperatur (eller ved fremløbstemperatur jf. nederste stiplede linje på Figur 38).

6 Metodebeskrivelse – årssimuleringer

Med udgangspunkt i Løgumkloster-varmebehovet samt solindstråling på solfangernes plan og udetemperatur for 2023, er solvarmeproduktionen fra et solvarmeanlæg beregnet time for time sideløbende for forskellige driftsformer, for at sammenligne ydelserne og værdien i køling af solfangerne. På grund af undersøgelserne beskrevet i afsnit 5, er udgangspunktet, at der i perioden fra midten af oktober til midten af marts er varmebehov nok til at solfangerne kan driftes ved lav temperatur, mens sætpunktet for solvarmeanlægget i den øvrige del af året er sat til fjernvarmenettets fremløbstemperatur (på sekundærsiden af veksleren).

I praksis vil der være mulighed for at køle tanken hen over natten for på den måde at have lavere temperatur klar til solfangerne dagen efter. Derfor kan man ikke beregne om solkøling er relevant eller ej for én time ad gangen. Valget af driftsform er derfor gennemført på døgnbasis selvom der regnes på solvarmeydelser mv. time for time over et år. System-COP er således beregnet ud fra døgnets samlede drift. På denne baggrund antages i beregningerne, at lagerkapaciteten er tilstrækkelig til udjævning på døgnbasis. For hver dag beregnes energiproduktion og energiforbrug (baseret på timeværdier) og de tilhørende omkostninger til at dække varmebehovet. Som udgangspunkt driftes med solkøling iht. beslutningstræet beskrevet ovenfor, mens det kontrolleres at driftsformen er rentabel som en forudsætning før solkøling betragtes som aktiveret i opgørelsen.

Af økonomiske antagelser er valgt Elspotpriser for 2023 for Vestdanmark (DK1) som udgangspunkt til grundberegningerne (disse svarer således tidsmæssigt til data for solindstråling og udetemperaturer). Sammenlignes disse priser med 2024 og 2025-data ses en overordnet lighed i gennemsnitsværdierne. Øvrig varmepris (dvs. til den del, der ikke kan dækkes af solvarme eller af varmepumpe) antages som udgangspunkt at koste 600 kr./MWh. Denne værdi varieres dog i en følsomhedsberegning jf. afsnit 7.3.2.



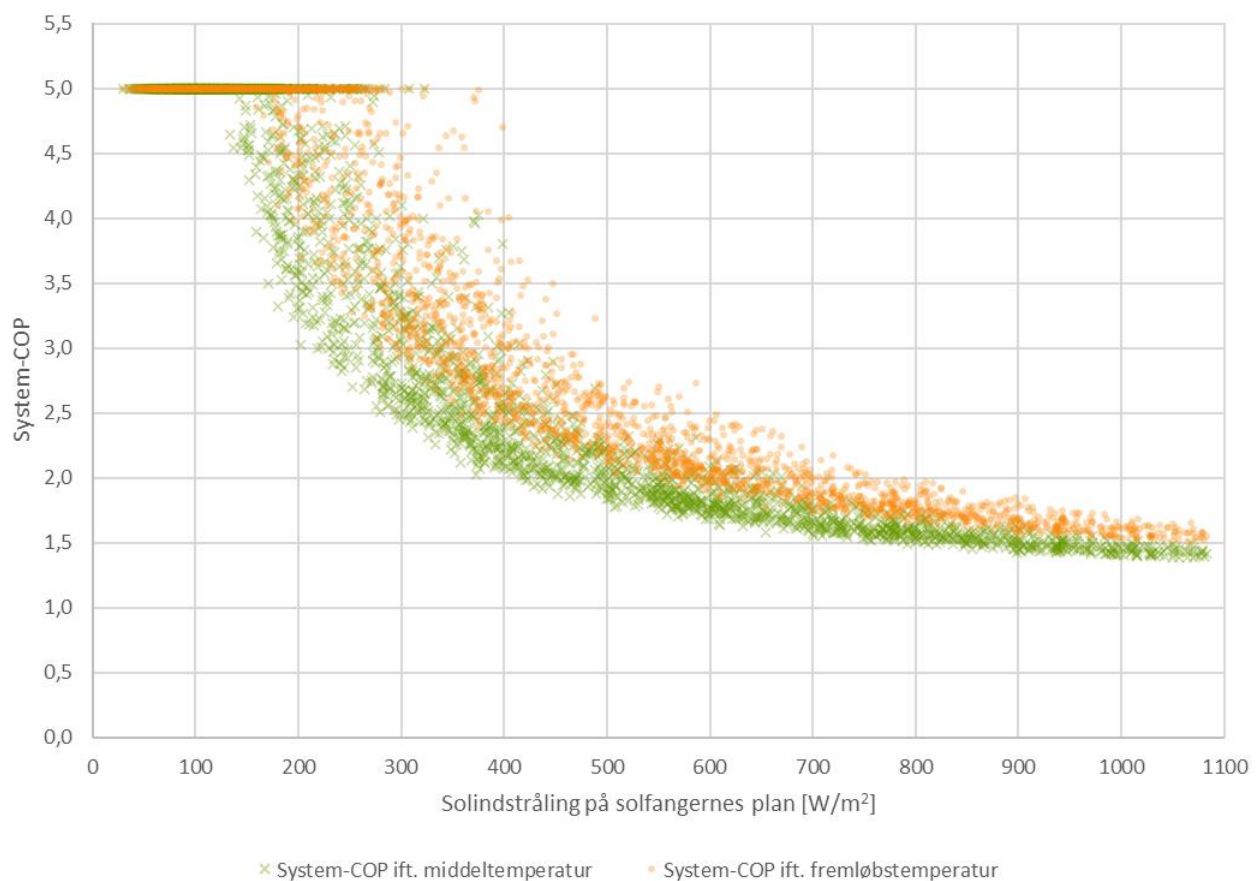
Figur 39. Årgennemsnit af elspotprisen i Vestdanmark og Østdanmark for hhv. år 2023, 2024 og 2025.

7 Resultater – årssimuleringer

7.1 Energiberegninger

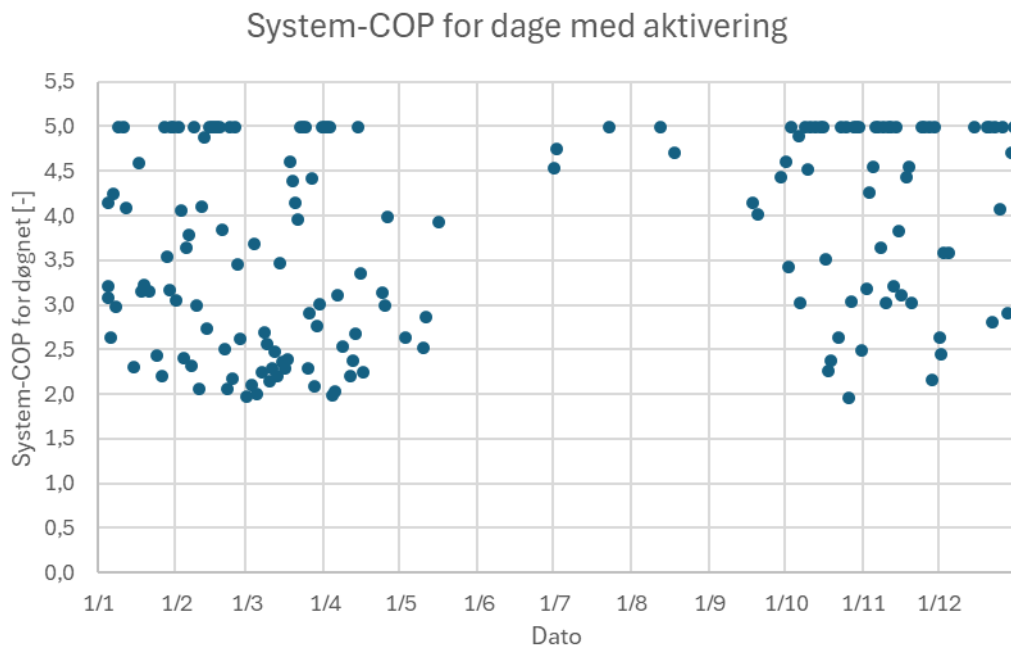
7.1.1 System-COP time for time og døgn for døgn

Simuleres system-COP for hver time over et år, kan nedenstående figur udledes. Forudsætningerne er baseret på data for udetemperatur og solindstråling på solfangernes plan fra Løgumkloster for 2023 samt antagelser som angivet i afsnit 4.2.



Figur 40: System-COP beregnet time for time over et år baseret på to driftsformer, hvor solfangerne leverer hhv. fjernvarmenettets fremløbstemperatur eller en middeltemperatur (dvs. mellem fjernvarmenettets retur- og fremløbstemperatur).

Gennemsnittet for system-COP vægtet mht. solvarme-merydelsen per døgn bliver set over hele året 3,3. På Figur 41 er system-COP angivet for hvert døgn solkøling er aktiveret i årssimuleringen. Det ses at der er få døgn i løbet af sommerperioden, hvor solkøling er relevant og dermed aktiveret. At system-COP ligger *under* varmepumpens COP ved normal drift i nogle dage, hvor solkøling alligevel er rentabelt illustrerer, at relevansen af solkøling (bl.a.) kommer i perioder med mangel på kapacitet på varmepumpen, hvor der kan fortrænges dyrere spidslastenheder.

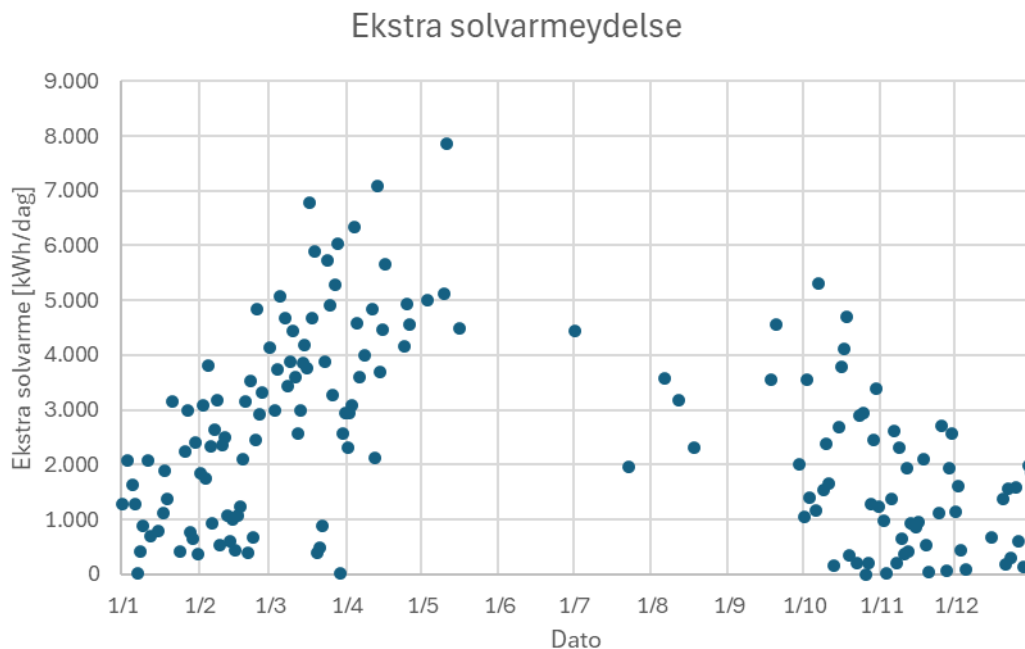


Figur 41. System-COP for døgn med en potentiel økonomisk gevinst ved solkøling.

7.1.2 Energimæssige forbedringspotentialer

Ved at aktivere solkøling på døgn, hvor der kan opnås en økonomisk gevinst, kan der opnås en solvarmeydelse, der er ca. 9% højere end en referencesituation uden solkøling. Solvarmeydelsen kan potentielt øges yderligere, men dette er resultatet ved at sigte efter alene at aktivere solkølingen, hvor dette er rentabelt ud fra beregningsforudsætningerne. I det konkrete eksempel svarer dette til en merydelse på ca. 390 MWh årligt. Dette kommer pba. et ekstra elforbrug på ca. 3% svarende til ca. 170 MWh/år for at køle på solfangerne. Samlet set opnås en besparelse på øvrig varmforsyning på ca. 5% svarende til ca. 500 MWh. Hvis el til varmepumpe og energi til øvrig varmforsyning sidestilles, kan man betragte dette som en energimæssig gevinst på $500 - 170 = 330$ MWh eller 2% af det samlede energibehov (dvs. summen af el til varmepumpe og øvrig varmforsyning). Sammenholdes denne "netto-energiebesparelse" med solvarmeydelsen ved mere traditionel solvarmedrift, bliver det en netto-forbedring af solvarmeydelsen på 8%.

De 390 MWh ekstra solvarme svarer ikke til netto-energiebesparelsen ($500 - 170 = 330$ MWh). Grunden til dette er, at i tilfælde med overkapacitet på solvarme & varmepumpe, vil solkøling i nogle tilfælde fortrænge normal varmepumpedrift for på den måde spare el (fordi solkølingsdriften er antaget mere effektiv end køling af den normale varmekilde). Solvarmen fortrænger i så fald noget energi fra den normale varmekilde (fx luft), og derfor reducerer den ekstra solvarme ikke det øvrige energibehov 1:1.

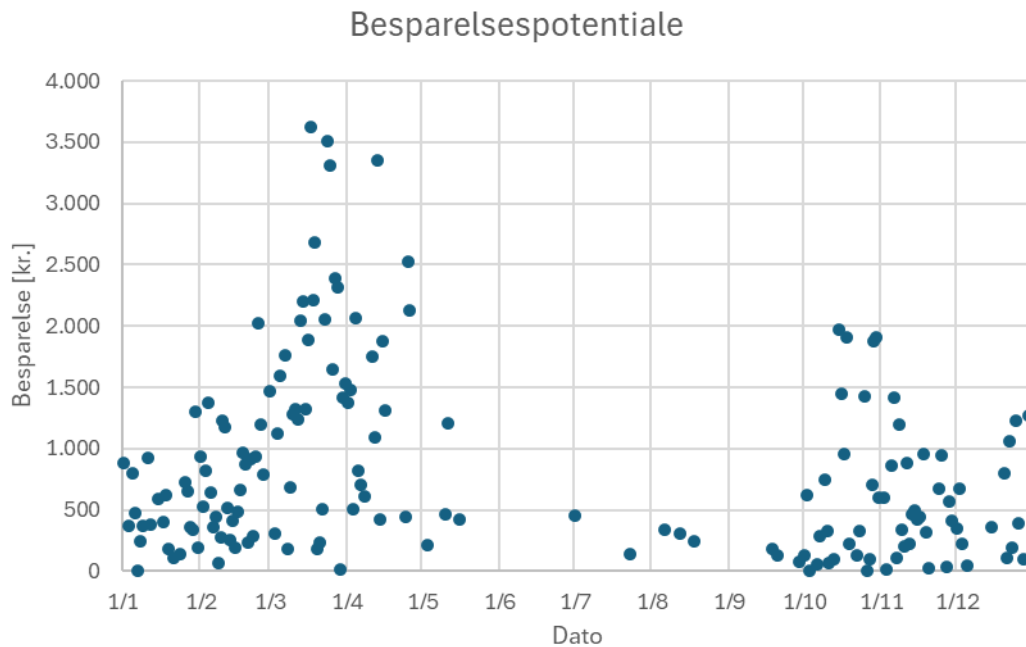


Figur 42. Ekstra solvarmeydelse for døgn med økonomisk relevans i solkøling.

7.2 Økonomi

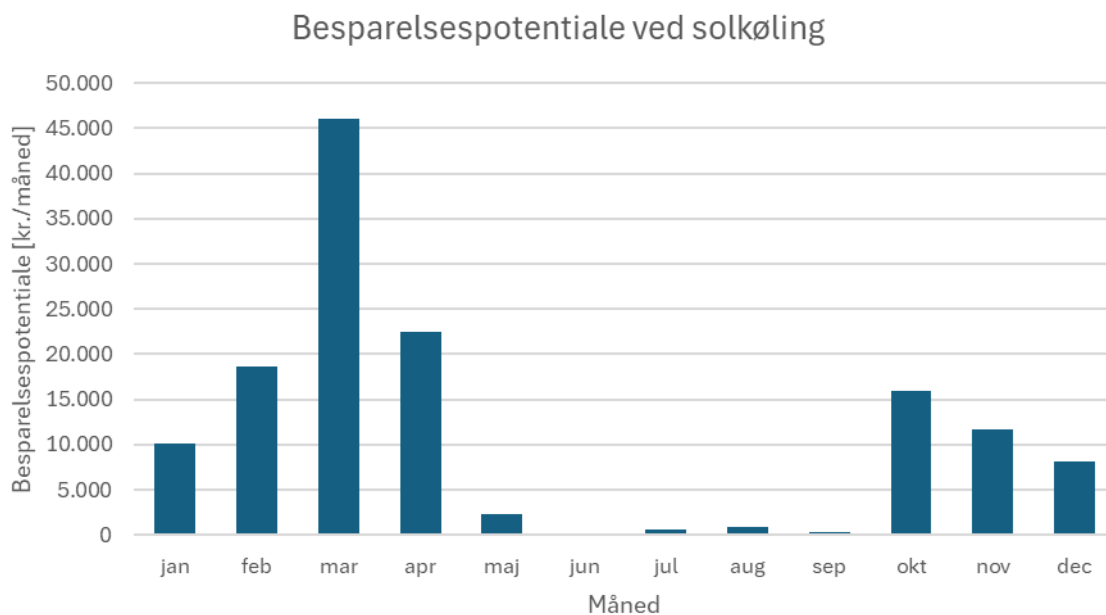
7.2.1 Driftsbespareselsmuligheder

Hvis varmepumpen har en ekstra kapacitet på 500 kW (køleeffekt), viser beregningerne en potentiel besparelse på ca. 140.000 kr./år, svarende til ca. 1% af varmeproduktionsomkostningerne. På Figur 43 ses fordelingen af besparelsen fordelt på de døgn, hvor solkøling giver en forbedret driftsøkonomi. Det ses at den økonomiske gevinst især findes i det tidlige forår, hvor mængden af solenergi er betydelig samtidigt med at der fortsat er et væsentligt varmebehov. Til gengæld er gevinsten meget begrænset om sommeren (grundet system-COP og muligheden for at dække størstedelen af behovet med solvarme alene) og i mindre grad om vinteren, hvor mængden af solindstråling er begrænset.



Figur 43. Beregnede døgnværdier for økonomisk besparelsespotentiale over et år med de angivne forudsætninger.

Opsummeres døgnværdierne fra Figur 43 ses at det økonomiske besparelsespotentiale især koncentrerer omkring det tidlige forår.



Figur 44. Beregnet økonomisk besparelsespotentiale med de angivne forudsætninger opsummeret på månedsbasis.

7.2.2 Merinvesteringer

Hvis der kræves en merinvestering for at muliggøre solkølingen, skal man opveje den potentielle driftsbesparelse med en sådan merinvestering. En løsning med tilslutning til en economizerport eller glykol-kreds, vil generelt være billigere end en dedikeret varmepumpe til formålet. Herunder antages som eksempler en merinvestering for en

- konfiguration med indbygget solkølingsfunktion: 0,6 millioner kr.
- dedikeret varmepumpe til solkøling: 2,0 millioner kr.

Med disse merinvesteringseksempler, vil den simple tilbagebetalingstid for investeringerne være

- 0,6 millioner kr. / 0,14 millioner kr./år ~ 4 år for en konfiguration med solkølingsfunktion eller
- 2,0 millioner kr. / 0,14 millioner kr./år ~ 14 år for en dedikeret varmepumpe til solkøling.

Det bemærkes dog, at overvejelser vedr. en varmepumpe "dedikeret til solkøling" potentielt kunne indebære, at den konfigureres til at have flere funktioner, hvormed økonomien potentielt kunne forbedres.

Det ses af ovenstående beregning, at man skal være opmærksom på, hvor stor merinvesteringen vil være sammenlignet med den potentielle økonomiske gevinst, hvis man ønsker at forfølge muligheden for solkøling. Omvendt kan det konkluderes, at der kan være en økonomisk gevinst, hvis funktionen er tilgængelig og styringen af anlægget sikrer optimal drift.

7.2.3 Alternativ investering

Enhver merinvestering kan sammenlignes med alternative relevante investeringsmuligheder (ud over muligheden for at spare merinvesteringen). Som alternativ til en merinvestering for at muliggøre 500 kW solkøling, kunne man i stedet investere pengene i en lidt større varmepumpe (eller i et lidt større solvarmeanlæg).

Med de angivne forudsætninger kunne der investeres i ca. 1.000 m² ekstra solfangere for at opnå ca. samme årlige besparelse. Alternativt kunne en varmepumpe med 100 kW ekstra nominel ydelse give samme besparelse som ovenfor angivet. Hvis der er tale om en ny solvarme og/eller varmepumpeinvestering, og varmekilden ikke er begrænset, vurderes det således relevant at evaluere mulighederne – eksempelvis at øge kapaciteten for varmepumpens normale drift – for på den måde at kunne sammenligne de økonomiske potentialer for forskellige konfigurationsmuligheder. Det bemærkes desuden, at varmepumpen i eksemplet måske med fordel kunne være opskaleret i dimensioneringsfasen, inden en konkret evaluering af værdien i en solkølingsfunktion gennemføres.

Det understreges at resultaterne er følsomme overfor forudsætninger såsom priser på el og varmeproduktionsprisen på øvrige enheder, da disse er afgørende for værdien af at fortrænge øvrig produktion.

7.3 Følsomhedsberegninger

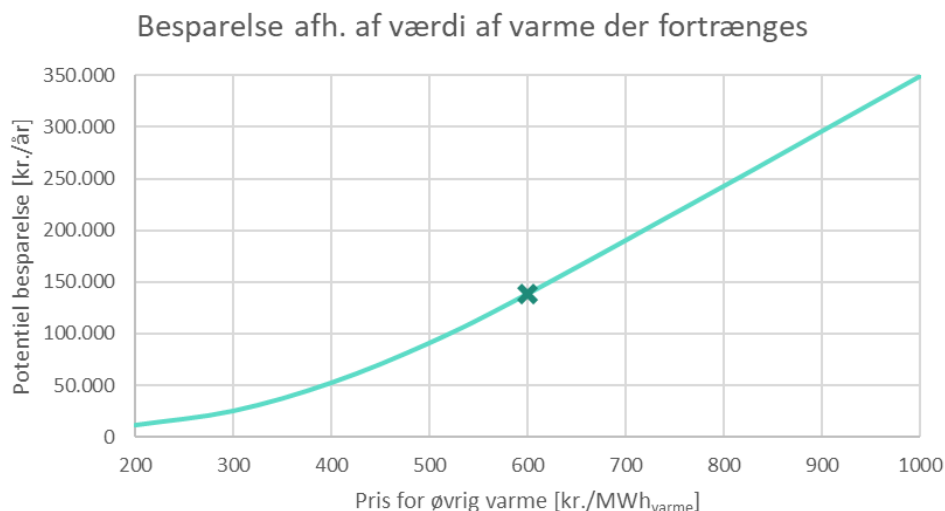
Mens der ovenfor præsenteres resultater fra grundberegningen – dvs. beregninger pba. de grundlæggende parametre angivet i afsnit 4.2 – beskrives herunder udvalgte følsomhedsberegninger for at evaluere afhængigheden af de valgte antagelser og undersøge robustheden af konklusionerne.

7.3.1 Varmepumpekapacitet flyttes fra normal varmepumpedrift

Hvis solkølekapaciteten ikke supplerer varmepumpen, men flyttes fra varmepumpens normale varmekilde, reduceres den energimæssige gevinst på solvarmeanlægget fra ca. 9% til ca. 3%, mens den økonomiske besparelse reduceres ca. 140.000 kr./år til ca. 10.000 kr./år. Hvis el til varmepumpe og energi til øvrig varmeforsyning sidestilles, kan den energimæssige gevinst ses at være omtrentligt 0. I store træk forsvinder gevinsten, hvis varmepumpen blot skifter fra at køle eksempelvis udeluft til at køle solvarme. Det vil således som udgangspunkt ikke være relevant at investere i, at anlæg skifter varmekilde fra en ubegrænset kilde til solvarme, medmindre der samtidigt opnås en ekstra varmekapacitet og/eller der er øvrige fordele ved løsningen.

7.3.2 Prisen for øvrig varme

Prisen for øvrig varme er som udgangspunkt antaget at være 600 kr./MWh_{varme} inkl. afgifter. Ændres denne pris til 400 kr./MWh reduceres den økonomiske gevinst fra ca. 140.000 kr./år til ca. 50.000 kr./år. Tilsvarende øges besparelsen til ca. 240.000 kr./år, hvis prisen for øvrig varme sættes til 800 kr./MWh eller ca. 350.000 kr./år, hvis prisen for øvrig varme sættes til 1.000 kr./MWh. I det sidstnævnte tilfælde vil den simple tilbagebetalingstid for en dedikeret varmepumpeenhed til solkøling (jf. afsnit 7.2.2) reduceres fra ca. 14 år til ca. 6 år. Dette indikerer, at man skal være opmærksom på, at værdien af solkøling er særdeles følsom overfor prisen på den varme, der fortrænges. På Figur 45 nedenfor ses, at den årlige besparelse øges med 500 kr. for hver krone den øvrige varme bliver dyrere (svarende til ekstra 50.000 kr./år sparet for hver 100 kr. øget pris for den varme der fortrænges).



Figur 45. Beregnet potentiel besparelse ved solkøling afhængig af værdien af den øvrige/alternative varme der fortrænges i varmeproduktionen. (Værdien i grundberegningen er angivet med et kryds.)

Varieres prisen for øvrig varme i beregningen for øget varmepumpekapacitet for varmepumpens normale drift (uden mulighed for solkøling, jf. afsnit 7.2.3) ses at besparelsen følger samme tendens som ovenfor. En pris for øvrig varme på 400 kr./MWh resulterer i ca. 50.000 kr. i årlig besparelse, mens en pris på 800 kr./MWh resulterer i ca. 230.000 kr./år.

7.3.3 Elpris

Øvrig varme kommer fra elkedler

Antages at al varme produceres enten af solvarme, varmepumpe eller en elkedel, øges værdien ved at fortrænge elkedeldrift vha. øget solvarme. Den årlige besparelse stiger til ca. 2% eller ca. 320.000 kr./år også selvom energimikset ikke ændres i betydelig grad (solvarmeydelsen er ca. 9% højere end i situationen med mere traditionel solvarmestyring). Dette indikerer, hvordan særligt fortrængning af dyr spidslast kan forbedre rentabiliteten af solkøling.

Billigere el til solkøling

Antages at man med solkøling kan vælge de bedste tidspunkter på døgnet til at aktivere solkølingen, så man dermed kan reducere prisen for el ift. døgnmiddelværdien, bliver solkøling lidt oftere relevant og besparelsen øges til ca. 220.000 kr./år, mens solvarmeydelsen samlet øges med 9%. De overordnede konklusioner ift. drift er ikke meget afhængige af denne faktor, mens den absolutte værdi af driftsbesparelsen naturligvis påvirkes af prisen for el til solkøling.

7.3.4 COP for varmepumpen

Varmepumpens COP i normaldrift

De økonomiske resultater er ikke meget følsomme overfor antagelsen om varmepumpens COP under normal drift. Konklusionerne ændres ikke selvom varmepumpens COP eksempelvis antages at være 2,8 eller 3,2.

COP ved solkøling

Hvis COP for solkølingsprocessen er 4,0 i stedet for 5,0 reduceres den ekstra solvarmeydelse fra 390 MWh/år til knap 350 MWh/år, mens den økonomiske besparelse reduceres fra ca. 140.000 kr./år til ca. 120.000 kr./år. Dette indikerer, at selvom COP for solkølingsprocessen ikke er en uvæsentlig parameter, er det ikke afgørende for konklusionerne, om solkøling kan give en COP på 5,0 som antaget i grundberegningerne.

7.3.5 Varmepumpens kapacitet

Øges varmepumpens normale kapacitet fra 3 MW til 4 MW eller 5 MW, bliver den vægtede system-COP hhv. 3,6 eller 3,8. Dette skyldes at solkøling ikke lige så ofte kommer i spil, da denne driftsform er "i konkurrence med" almindelig drift på varmepumpen, når der er samlet set er overkapacitet på solvarme og varmepumpeanlæg. Dermed er det i højere grad ved høje system-COP-værdier, at solkølingen

kommer i spil. Den økonomiske gevinst bliver reduceret til hhv. ca. 100.000 kr./år og 60.000 kr./år for hhv. 4 MW og 5 MW varmepumpekapacitet. Værdien af solkøling er således i høj grad afhængig af, at der er begrænset kapacitet på varmepumpen.

7.3.6 Solfangerareal

Hvis solfangerarealet halveres til 4.500 m², mens øvrige antagelser er uændret, bliver den årlige besparelse ca. 100.000 kr. og solfangerydelsen kan forbedres med ca. 13% ved solkøling. Til gengæld bruges ca. 2% ekstra el for at fortrænge 3-4% øvrig varme. Sammenholdes "netto-energiebesparelsen" med solvarmeydelsen ved mere traditionel solvarmedrift, bliver det en netto-forbedring af solvarmeydelsen på ca. 11%. Der er således en relativt større forbedringspotentiale for solkøling for anlæg med lavere forhold mellem solfangerareal og varmepumpekapacitet (her $4.500 \text{ m}^2_{\text{solfangere}} / 3.000 \text{ kW}_{\text{varme}} = 1,5$ hvilket kan sammenlignes med udgangspunktets $9.000 \text{ m}^2_{\text{solfangere}} / 3.000 \text{ kW}_{\text{varme}} = 3,0$ angivet i afsnit 7.1.2).

7.3.7 Kapacitet af solkøling og kombination med øvrig solvarmedrift

Solkøling-kapacitet

Antages det at solkølingen kun kan køle 250 kW i stedet for 500 kW, kan der stadig opnås en energimæssig gevinst på ca. 6% og en økonomisk besparelse på ca. 110.000 kr./år. Dette indikerer at selv den halve solkølingskapacitet ift. udgangspunktet, vil kunne give størstedelen af besparelsen.

Kombineret solvarmedrift

Som udgangspunkt antages det, at hvis der er mere solvarmepotentiale end solkølingskapacitet, kan der suppleres med almindelig solvarmedrift. Hvis man i stedet forestiller sig at solvarmeanlægget alene driftes med solkøling i det omfang det er teknisk muligt, reduceres den energimæssige og den økonomiske gevinst med ca. 1/3.

7.3.8 Temperaturniveau for køling

Potentialet for merydelse fra solvarmeanlægget afhænger af, hvad temperaturniveauet i solfangerne sænkes til vha. solkølingen. I beregningerne antages 25 °C middeltemperatur på sekundærsiden, dvs. temperaturen på fjernvarmesiden af varmeveksleren (svarende til vandet der føres fra og til akkumuleringsstanken). Hvis man i stedet antager at der køles ned til 20 °C middeltemperatur, med samme effektivitet for varmepumpen, forbedres den økonomiske gevinst med 24% i beregningerne. Solvarmeanlæggets ydelse forbedres i så fald med 11% ift. mere traditionel drift. Regnes der modsat med en middeltemperatur i solfangerne på 30 °C, bliver den økonomiske gevinst til gengæld 22% ringere, og solvarmeanlæggets ydelse forbedres med 7% ift. mere traditionel drift. Beregningerne indikerer, at både solvarmeydelsen og den økonomiske gevinst påvirkes af, hvilket temperaturniveau solkølingen kan realiseres ved, men at konklusionerne overordnet set fastholdes – også selvom temperaturniveauet ved solkøling afviger fra værdien i grundberegningen.

7.4 Opsummering af årssimuleringer

Beregninger for system-COP hen over et år viser, hvordan timeværdierne følger tendensen beskrevet i afsnit 5.3.

Med solkøling aktiveret på tidspunkter, hvor det giver økonomisk gevinst (med de angivne forudsætninger), ses en 7-11% højere solvarmeydelse end en referencesituation uden solkøling. Dette kræver dog ca. 3% ekstra elforbrug end i referencesituationen, hvilket betyder en samlet optimering af energiforbruget på ca. 2% på årsbasis.

Økonomisk kan der opnås besparelser ved at optimere samdriften også selvom muligheden for at køle solfangerne kommer med en omkostning (merinvestering i det samlede anlæg). Gevinsten afhænger dog meget af forudsætninger som elpriser og prisen for den varmeproduktion (eksempelvis fra en kedel), som kan fortrænges ved en øget solvarmeproduktion. Desuden er det afgørende, at varmepumpens kapacitet i et eller andet omfang øges i forbindelse med solkølingsfunktionen.

I evalueringen af, om investering i en solkølingsfunktion er rentabel, er merinvesteringen for at muliggøre en sådan driftsform naturligvis afgørende. Beregningerne indikerer dog, at der er basis for at undersøge muligheden nærmere, eftersom tilbagebetalingstiden potentielt kan blive relativt kort sammenholdt med anlæggets levetid. I en sådan evaluering bør dog også indgå øvrige investerings-/dimensioneringsmuligheder.

8 Konklusion og anbefalinger

Det ses af beregningerne at optimering af solvarmedriften ved køling med en varmepumpe er komplekst at definere entydigt og kan være styringsmæssigt udfordrende, at optimere uden at risikere fejl-disponeringer. Generelt er der muligheder for driftsbesparelser, hvis det gennemføres hensigtsmæssigt. Det skal dog overvejes, hvilke investeringer der kræves for at muliggøre dette og evt. sammenlignes med alternative relevante investeringer. Herunder oplistes generelle konklusioner og anbefalinger.

Kompleksiteten øger risikoen for fejl-disponering

- Optimeringen er kompleks. I et forsøg på at optimere driften er der – grundet kompleksiteten – en indbygget risiko for at træffe dårlige beslutninger, som kan gøre det dyrere og/eller mindre effektivt at forsøge en optimering ift. traditionel drift.
- Mange faktorer spiller ind på valget af den optimale driftsform. Kompleksiteten gør, at man skal være opmærksom for at undgå u hensigtsmæssige valg i forsøget på optimeringen. Driftsformer, der kan virke umiddelbart tillokkende, kan i nogle tilfælde vise sig at være dyrere og mere ineffektive end alternativer.
- Det er vigtigt at overveje *hvad der sammenlignes* i komplekse beregninger, hvor bedste løsning afhænger af mange faktorer.
- Udsving i løbet af samme driftstime, kan påvirke hvilken driftsform der er mest optimal. Eksempelvis vil solindstrålingen stige kraftigt inden for en enkelt time ifm. solopgang.

Tendenser for relevant driftsform

- Det er typisk u hensigtsmæssigt at køle solfangerne ved høj solindstråling, og det er samtidigt mindst relevant, hvis der i forvejen er tilstrækkelig kapacitet på solvarme sammen med varmepumpen. Dette skyldes, at ekstra solvarmeproduktion fortrænger varmepumpens normale varmekilde. Derfor skal el til solkøling som minimum medføre et tilsvarende reduceret elbehov til normal varmepumpedrift. Det faktum, at størstedelen af den årlige solindstråling findes ved høje solindstrålingsniveauer, begrænser det tekniske potentiale for optimering via solkøling.
- Solvarmeanlægget kan med fordel levere en lavere temperatur end fremløbstemperaturen for på den måde at forbedre effektiviteten, så længe solvarmen dækker en mindre andel af forbruget, dvs. typisk relevant i vinterhalvåret. Det skal sikres, at den reducerede temperatur kan afsættes – eksempelvis ved at blande med en højere temperatur fra varmepumpe eller kedel, for at opnå fjernvarmenettets fremløbstemperatur. Lagerkapaciteten kan ofte blive en begrænsende faktor for muligheden for denne driftsform (til udjævning over døgnet). Tilstrækkelig lagerkapacitet kan muliggøre øget solvarmedrift ved lav temperatur.
- Hvis solkøling/køling af varmelageret resulterer i ekstra varmekapacitet på varmepumpen – og der er begrænset kapacitet på solvarme, lager og varmepumpe tilsammen – kan driftsformen fortrænge varmeproduktion fra spidslastenheder.
- I det merydelse fra en varmepumpe og fortrængning af spidslast primært er relevant i vinterhalvåret, er det særligt relevant for varmepumper baseret (primært) på udeluft, hvor ydelse og COP netop falder ved lave udetemperaturer. Dette gør generelt solkøling mere relevant for varmepumper baseret på udeluft som varmekilde ift. eksempelvis overskudsvarme fra industri.

- Hvis varmepumpens ydelse forbedres af, at den leverer en lavere temperatur, bør det overvejes, om varmepumpens sætpunkt for leveret temperatur på den varme side, kan sættes ned i perioder, hvor der alligevel suppleres med andre varmekilder af højere temperatur (eksempelvis spidslastkedler i vinterperioden). Tilsvarende kan der nøjes med en lavere temperatur fra varmepumpen, hvis solvarmeanlægget dækker næsten al varmebehovet om sommeren og begrænsninger i lagerkapaciteten gør, at man alligevel har høj temperatur til rådighed fra solvarmen (eller andre produktionsenheder).

Økonomisk potentiale

- Der er potentiale for en ikke ubetydelig energimæssig og økonomisk gevinst ved at kunne køle akkumuleringsstanken for at sende koldt vand til solfangerne. Dette er særligt relevant hvor denne funktion muliggør fortrængning af (dyr) drift på spidslastenheder. I valget af konfigurationsmuligheder bemærkes desuden, at flere driftsformer øger fleksibiliteten og dermed modstandsdygtigheden. Hvis man med solkøling kan dække en større andel af varmebehovet uden et brændselsforbrug, kan det medføre en reduceret afhængighed af eksterne forhold som brændselspriser.
- Hvis der – i forbindelse med valg af varmepumpe og -konfiguration – er brug for en merinvestering, bør man overveje om denne investering kan give merværdi ved at investere i øget kapacitet på varmepumpen som alternativ til solkølingskonfigurationen.
- Solkøling giver mere fleksibilitet i driftsformer og dermed mindre afhængighed af elpriser – dog medfølger der typisk en øget investering.

Konkrete tiltag

- Det anbefales at man ifm. anlæg, hvor solvarme og varmepumper kombineres, undersøger mulighederne for, og merinvesteringer i, at kunne drifte disse anlæg på forskellige måder. Som beskrevet i nærværende rapport kan en merinvestering for at kunne køle solfangerne (via et varmelager) eksempelvis sammenlignes med mere traditionelle driftsformer, for på den måde at evaluere, om en sådan merinvestering forventes at være rentabel, eller om pengene er bedre brugt på andre tiltag. Det bemærkes i denne sammenhæng, at fleksibilitet mht. driftsformer også har den fordel, at det giver flere muligheder for optimeringer på den lange bane, hvor man ikke kender rammevilkårene.
- I anlæg hvor muligheden for at styre solvarmeanlægget i samspil med en varmepumpe, allerede er til stede i dag, henvises til en implementering af en styring ud fra følgende principper (i prioriteret rækkefølge afhængig af ambitionsniveau):
 - A. Driftsstrategi udarbejdes pba. konkrete beregninger – i tråd med metoder i nærværende rapport – for det enkelte værk, for at definere styringsstrategi i forskellige situationer.
 - B. Nuværende driftsstrategi gennemgås for at sammenholde eventuelle konflikter med principperne beskrevet i nærværende rapport.
 - C. Driftsstrategien tilpasses i grove træk iht. punkterne under "Tendenser for relevant driftsform" ovenfor.

9 Nomenklatur

Hvor intet andet er angivet henviser m^2 til solfangerareal (brutto).

9.1 Symbolforklaring og forkortelser

a_1	Førsteordens varmetabskoefficient for solfangerne	$W/(m^2K)$
a_2	Andenordens varmetabskoefficient for solfangerne	$W/(m^2K^2)$
Δ	Ændring	-
η	Effektivitet/virkningsgrad	-
G	Solindstråling	W/m^2
K_θ	Indfaldsvinkelkorrektionsfaktor	-
Q	Energi	Wh
q_{sol}	Specifik solvarmeydelse	W/m^2
T	Temperatur	$^\circ C$
VP	Varmepumpe	-
COP	Coefficient Of Performance	-

Temperaturniveauer:

Høj	Over fremløbstemperatur i fjernvarmenettet
Frem	Fremløbstemperatur i fjernvarmenettet
Mellem	Mellemting mellem Retur og Frem
Miks	Blanding af Mellem og Retur
Retur	Returtemperatur i fjernvarmenettet
Kølet	Kølet vand (lavere end Retur)

9.2 Præfikser

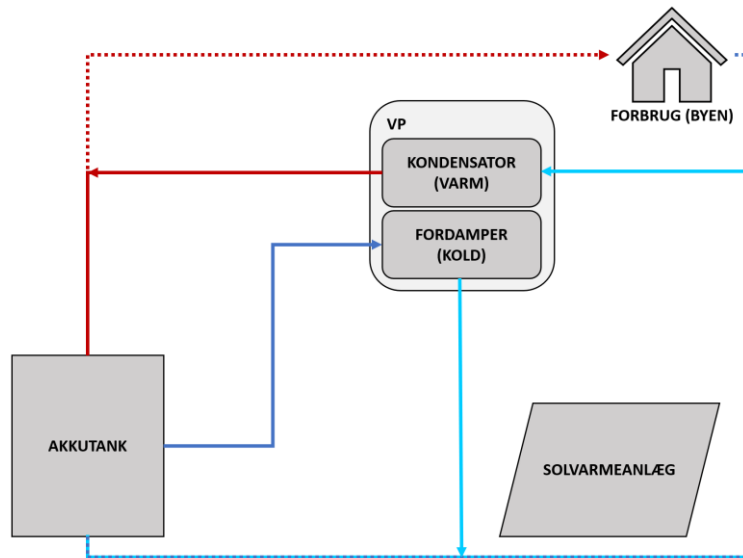
a	omgivelsestemperatur (luft)
f	Fremløbstemperatur for fjernvarmenettet
ind	Indløb til en enhed (fx ind på varmepumpens varme side)
m	Middelvæsketemperatur (fx gennemsnittet af indløb og udløb af væsken i solfeltet)
r	Returtemperatur for fjernvarmenettet
[Romertal]	Angives for at differentiere mellem forskellige situationer
sol	Solfanger/solvarme
solkøl	Solkøling (anvendes ifm. varmepumpens COP når der køles på solvarme)
system	Systemet (anvendes ifm. evaluering af fordel ved solkøling)
ud	Udløb fra en enhed (fx ud af varmepumpens varme side)
VP	Varmepumpe

Bilag A – Køling af returvand

Konfiguration 6

Varmepumpen bruger akkumuleringstanken som varmekilde

Hvis akkumuleringstanken kobles til fjernvarmenettet, mens den er kølet ned og der ikke tilføres solvarme, bliver der – alt andet lige – ikke tilført energi udefra til systemet ud over el til varmepumpen. Akkumuleringstanken bliver således til en varmekilde, som varmepumpen opvarmer igen (evt. via fjernvarmenettet). Dette vil som udgangspunkt oftest ikke være en hensigtsmæssig løsning. (I eksemplet her producerer solvarmeanlægget ikke varme.)



Figur 46: Konfiguration 6 – Varmepumpen køler akkumuleringstanken uden at solvarmeanlægget genopvarmer.

I princippet kan der dog være tilfælde, hvor køling af akkumuleringstanken kan give mening – også uden at det er solvarme, der genopvarmer tanken. Fordelene kan særligt bestå af to forhold:

- Den tidsmæssige forskydning kan have betydning for driftsøkonomien, hvis varmepumpen øger kapaciteten og/eller COP på det givne tidspunkt – eksempelvis en kort spidslastsituation, hvor denne metode potentielt fortrænger dyrere drift på spidslastenheder. Der er dog "en regning, der skal betales", idet varmepumpen efterfølgende skal levere varme til tanken, for at den bringes tilbage til en temperatur svarende til fjernvarmenettets returvand.
- Køling af vandet, der sendes til varmepumpens varme side, kan hjælpe på varmepumpens COP og/eller kapacitet. På denne måde kan der tilføres ekstra energi til systemet både i form af el og i form af ekstra energi fra varmekilden (fx udeluft). I nogle tilfælde gør denne effekt en dedikeret varmepumpeenhed til formålet relevant. Dette ses i flere tilfælde på fjernvarmeverker med en relativt høj returtemperatur i fjernvarmenettet, hvor der i nogle tilfælde installeres eksempelvis en (mindre) isobutan-varmepumpe (R600a/C₄H₁₀) til at køle returvandet, inden det sendes til den primære CO₂-varmepumpe, for på den måde at forbedre driften af CO₂-varmepumpen. Den samlede COP for kombinationen kan på den måde være højere end for CO₂-varmepumpen alene. I anlæg der etableres med køling af fjernvarmereturvandet inden det sendes til CO₂-varmepumpen, kunne man forestille sig, at kombinere denne funktion med muligheden for at køle akkumuleringstank/solfangere.

Bilag B – Øvrige opmærksomhedspunkter

Kondensering i solfangerne

Man skal være opmærksom på, at undgå kondensering i solfangerne på dage, hvor dugpunktet i udeluften ligger over temperaturen, der sendes til solfangerne. En foranstaltning kan være en styring, der sikrer, at temperaturen for solfangervæsken er eksempelvis minimum 20 °C. Dette er særligt relevant, hvis man har et varmelager, som køles længere ned end i beregningerne vist i nærværende rapport.

Allokering af lagerkapacitet

Det bør overvejes ifm. fastlæggelse af driftsstrategien, at hvis lageret (eller en del af det) er allokeret til koldt vand til solfangerfeltet, kan dette lagervolumen ikke samtidig bruges til andre formål som fx varme fra en elkedel, der leverer systemydelser til elnettet. Dette er særligt relevant i perioder, hvor man ikke forventer at solvarmeanlægget kan levere nogen væsentlige bidrag – eksempelvis en grå, snefyldt januar.

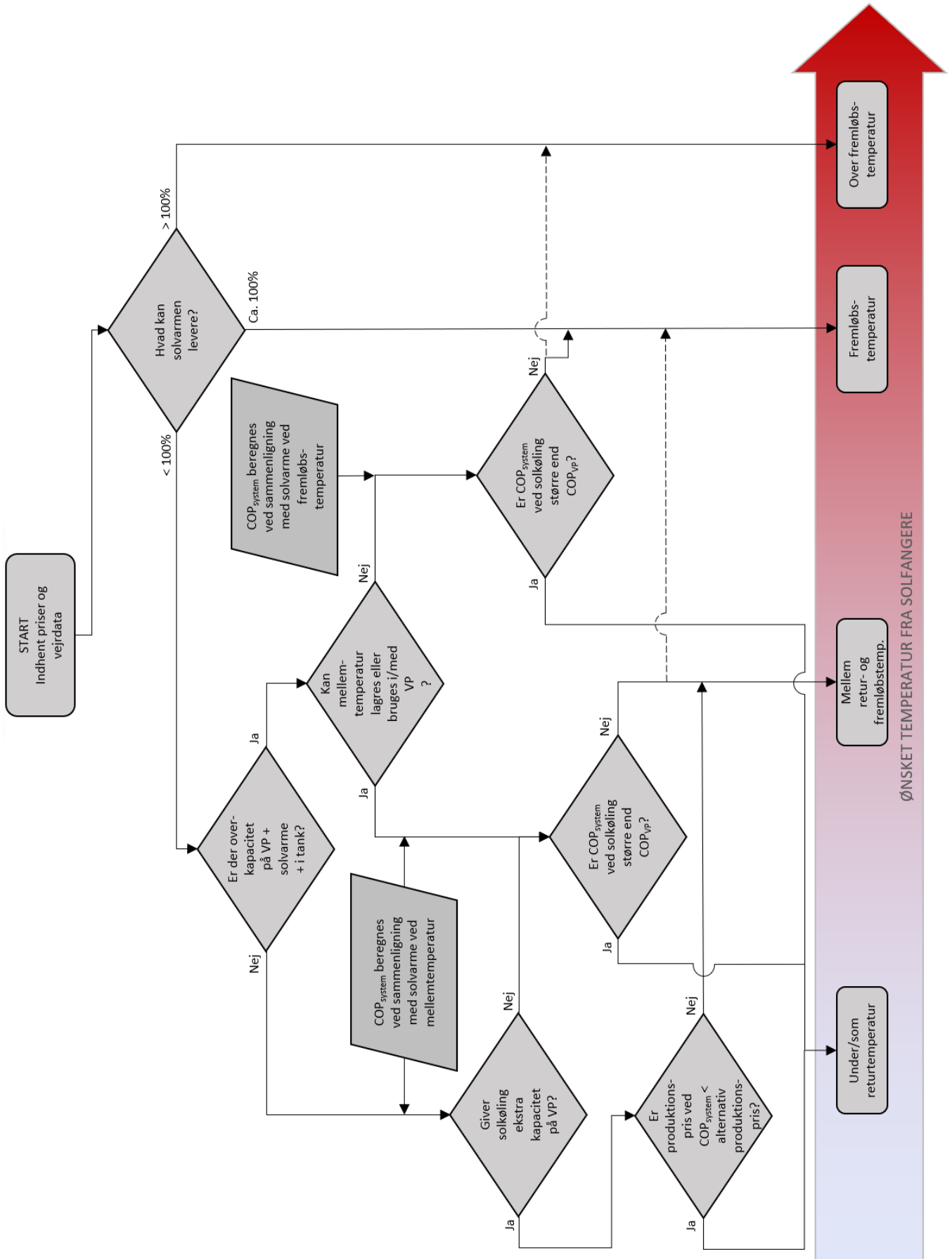
Sæsonvarmelagre

Det bemærkes at nærværende rapport ikke behandler værdisætning af varmepumper til køling af sæsonvarmelagre. I forbindelse med anlæg, hvor kombinationen af solfanger og et varmelager, som til sammen skal dække en større andel af årsvarmebehovet, vil der ofte kunne opnås en fordel ved at inkludere en (evt. dedikeret) varmepumpe til at trække varme ud af lageret. Varmepumpen vil i det tilfælde muliggøre at lagerkapaciteten øges (for et givet volumen) – eller at man reducerer det krævede lagervolumen. Hvis man eksempelvis har et lager med et givet volumen, som kan lades op til maksimalt 90 °C, og det *uden* en varmepumpe kun bliver afladet til en fjernvarmereturtemperatur på 50 °C, vil man kunne fordoble kapaciteten af lageret ved, at en varmepumpe køler lageret ned til 10 °C. I designfasen kan man således optimere kombinationen af varmepumpekapacitet og vandvolumen.


Absorptionsvarmepumper

Nærværende rapport har ikke specifikt fokus på absorptionsvarmepumper. Særligt for absorptionsvarmepumper er, at de potentielt vil kunne køle et solvarmeanlæg uden øget brændselsforbrug. I så fald vil det dermed ofte være fordelagtigt, at køle vandet til solfangerne for på den måde at øge solvarmeydelsen. Denne driftsform kræver dog, at en væsentlig andel af varmen leveres af drivvarmen til absorptionsvarmepumpen (fx en biomassekedel). Man skal derfor være opmærksom på, ikke at lade denne driftsform stå i vejen for, at solvarmen dækker varmebehovet alene eller tilnærmelsesvis alene, så solkølingen binder driften til et unødigt brændselsforbrug. Forskellige driftsformer bør således sammenlignes for at afgøre, hvordan brændselsforbruget minimeres.

Bilag C - Beslutningstræ





 solvarmepumper