

Alfred Heller
Niels Kristian Vejen

Højtemperatursolfanger
Til solvarmecentraler

Indledende sammenligninger

Rapport
BYG•DTU R-013
2001

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-078-5

Højtemperatursolfanger til solvarmecentraler

Indledende sammenligninger

Alfred Heller

Niels Kristian Vejen

Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2001

1 Forord

Nærværende rapport danner bl.a. afslutningen for projektet ”Videnshjemtagning og prøvning af højtemperatursolfangere”. Projektet er gennemført med støtte fra Energistyrelsen under UVE-ordningen, J.nr.: 51181/00-0039.

Bevillingen er givet på baggrund af en ansøgning der indeholder afprøvning af solfangerne og en mangfoldighed af solfangertyper - heraf projekttitlen. Projektdelen om prøvning af højtemperatursolfangere er ikke bevilliget – heraf uoverensstemmelse mellem projekttitel og indhold. Det er stadig åbent, om prøvninger af sådanne solfanger ville kunne gennemføres her i landet. Prøvninger vil kunne give meget relevant indsigt i konstruktioner og deres indflydelse på solfangernes ydelser, samt mulighed for forbedringer i pris-/ydelsesforholdet. Dette er yderligere blevet aktualiseret ved at danske producenter nu også ser på fremstilling af højtydende solfangertyper til solvarmecentraler. Det er lagt ud til andre at støtte denne strategi der vil øge mulighederne for den danske solenergibranche.

Det er vigtigt at takke Energistyrelsen for deres støtte til dette relevante projekt. Herudover takkes solfangerproducenterne hos Marstal VVS A/S, ARCON Solvarme A/S og BATEC for deres indsats. Jeg tror nok at projektet vil være med til at støtte deres muligheder for at være med i den øgede internationale konkurrence som vi forskere allerede har været udsat for i en del år med de fordele og ulemper det fører med sig. Endvidere tak til COWI for deres meget professionelle indsats i forhold til at opstille retsgyldige dokumenter, en opgave vi forskere ikke er uddannet til at varetage.

Tak til Frank Pedersen, ph.d.-studerende på BYG*DTU for gennemlæsning af rapporten.

Resultaterne i den foreliggende rapport inkluderer første resultater fra koordinering med det igangværende arbejde der skal føre til designet for udvidelse af solvarmecentralen i Marstal. Udvidelsen er planlagt til årene 2002-2004. Her har Solenergicentret under ledelse af DTU fået støtte til at følge det ellers EU-finansierede projekt. Energistyrrelsens journalnummeret for det danske støtteprojekt er J.Nr 51181/01-0064.

2 Indholdsfortegnelse

1	FORORD	1
2	INDHOLDSFORTEGNELSE	2
3	SAMMENDRAG	3
3.1	SOLFANGEREFFEKTIVITETEN SOM KRITERIUM FOR SAMMENLIGNING	5
3.2	ANVENDELSE AF PRODUKTIONSTAL FRA PRØVNINGSRAPPORTERNE	5
3.3	ANVENDELSE AF PRODUCENT-OPLYSTE PRODUKTIONSTAL	5
3.4	FÆLLES FOR SIMULERINGSMETODERNE	5
3.5	ANVENDELSE AF MAX-FLOW SIMULERING	6
3.6	KRAV OM FAST TEMPERATURSTIGNING OVER SOLFANGERFELTET SOM METODE	7
3.7	SYSTEMSIMULERING	7
3.8	PRISER SOM KRITERIUM FOR VALG AF SOLFANGERE	8
3.9	PRIS-/YDELSESFORHOLD	8
3.10	NÆSTE TRIN I ANALYSEN	9
4	INDLEDNING	10
4.1	PROJEKTFORLØBET	10
4.2	RAPPORTINDHOLD OG LÆSEVEJLEDNING	11
5	TEORETISK GRUNDLAG	13
5.1	FORSKELLIGE SOLFANGERTYPER	13
5.2	EFFEKTIVITET	13
5.2.1	Effektivitet for plane solfangere	15
5.2.2	Effektivitet for vakuumrørsolfangere	16
5.2.3	Effektivitet for CPC-solfangere	17
5.2.4	Effektivitet for trough-solfangere	17
5.3	EFFEKTIVITET OG AREALER	17
6	DE UNDERSØGTE SOLFANGERE	19
6.1	ARCON HT	19
6.2	SUN FLOWER, SLU-1500/12	21
6.3	TROUGH /TRUG	23
6.4	VAC 2008	25
6.5	EFFEKTIVITETSUDTRYK OG INDFALDSVINKELKORREKTION	27
6.6	INDFALDSVINKELKORREKTION	28
6.7	ANDRE KORREKTIONER OG DERES INDFLYDELSE	29
7	SOLFANGERYDELSE VED KONSTANTE TEMPERATURER	30
7.1	EVALUERING AF REALITET I RESULTATERNE	34
	KONSTANT TEMPERATURKRAV METODE	38
	SYSTEMSIMULERING	38
8	ØKONOMISKE FORHOLD	40
9	KONKLUSIONER OG DISKUSSION	42
10	REFERENCER	43

3 Sammendrag

Projektet var ansøgt med tre hovedopgavestillinger:

- 1) Hjemtagning af viden om ydelse for solfangere
- 2) Hjemtagning af priser for opbygning af solfangerfelter
- 3) Afprøvning af valgte solfangere

Den sidste del blev ikke bevilliget og indgår derfor ikke i rapporten. Projektet var herefter planlagt til at skulle fokusere på simuleringer og videnshjemtagning vedr. ydelsen for højtemperatursolfanger. Problemer med hjemtagning af realistiske priser har dog vist sig at være en stor barriere for gennemførelse af projektet. Derfor var der behov for øget indsats til dette emne i forhold til planerne.

For at få realistiske priser for solfangerfelter der består af højtemperatursolfangere, er der indgået samarbejde mellem BYG•DTU og rådgiveren COWI. COWI har i denne sammenhæng udarbejdet et meget modent udbudsmateriale på engelsk der blev sendt til de fire solfangerproducenter der er udpeget i bevillingsskrivelse.

På trods af dette modne udbudsmateriale fik vi ikke de nødvendige priser. For at overkomme denne nyopdagede barriere blev danske fabrikanten indbudt til at samarbejde med de udenlandske producenter af de relevante højtemperatursolfangere. Hermed lykkes det så i et tredje tilløb at få realistiske priser, dog medførte de nævnte problemer en betragtelig forsinkelse af projektet. Dermed var et af de centrale formål med projektet ikke opfyldt, nemlig at kunne aflevere færdigrapporterede resultater til projektet om udvidelsen af solvarmecentralen i Marstal på Ærø hvor højtemperatursolfangere skal indgå i et overordnet koncept. For alligevel at kunne supportere Marstal-projektet, er resultaterne derfor direkte og løbende givet videre til deltagerne i udvidelsesprojektet. Dermed er et af hovedformål for projektet opfyldt, hvilket retfærdiggør den offentlige økonomiske støtte.

For at gøre resultaterne tilgængelig for en bredere målgruppe og i en mere sammenhængende form, nedfældes disse i den nærværende rapport som inspiration til nyttiggørelse af resultaterne og hermed forbedret pris-/ydelsesforhold for kommende projekter.

Det kan nævnes at dele af projektets resultater er præsenteret på den internationale solvarmekonference ISES World Congress i Australien i 2000.

Formålet med nærværende projekt var at afklare om der er mulighed for at forbedre pris-/ydelsesforholdet for solvarmecentraler ved anvendelse af højtydende solfangere, også kaldet højtemperatursolfangere. Dermed vil man kunne opnå lavere energipriser fra solvarmecentraler og dermed en øget konkurrenceevne for anlægstypen der nok er den mest effektive solenergiteknologi for tiden.

Metoderne:

For at kunne afklare spørgsmålet stillet i formålsbeskrivelsen, er der behov for at kunne bestemme ydelsen under danske vejrforhold og prisen for anlæg monteret i Danmark. Der findes en række metoder til disse formål. Der er i nærværende projekt anvendt to grundlæggende forskellige metoder, den ene bygger på data fra prøvninger, den anden bygger på anvendelse af simuleringsprogrammer til bestemmelse af ydelsen. Metoderne og deres mulige varianter er diskuteret for at finde frem til de mest brugbare metoder til vurdering af forskellige solfangertyper til et bestemt formål.

Priserne er, som nævnt ovenfor, fundet ved efterspørgsel for tilbud for det felt der skal bygges på Marstal i starten af 2002, dvs. et solfangerfelt på mellem 2000 og 4000 m² solfangerareal.

Rentabiliteten for investeringen i solfangerfeltet er bestemt ved simpel tilbagebetalingstid og en simpel metode til estimering af energiprisen ud fra en finansieringsfaktor der er gældende for store, offentlige investeringer uden mulighed for skattefradrag, til gengæld med meget lave rentesatser. Metoden har vist sig at være yderst realistisk for store investeringer og anvendes af flere rådgivende ingeniørfirmaer.

Usikkerheder for analysen: Der er flere usikkerheder forbundet med den nærværende analyse, hvilket skal tages med i vurdering og sammenligning af de enkelte solfangersystemer. Der er knyttet usikkerheder til såvel ydelsesestimater som til tilbudspriserne. Uanset metoden overstiger usikkerheden for priserne de svingninger der kan findes for ydelsesberegningerne. Mens ydelsen nok bestemmes med usikkerheder på 20% maksimalt, så kan priserne svinge for samme produkt afhængig af konjunktoren og konkurrenceparametre.

Priserne for de forskellige solfangertyper afhænger af udviklingsstadiet for den givne solfangertype, specielt i forhold til anvendelse i solvarmecentraler. Udviklingsstadiet for de plane solfangere er meget højt og disse er tilpasset solvarmecentraler ved at tilbyde store moduler der er optimeret til formålet. Dermed er priserne for de plane solfangermoduler velkendt. Udviklingsstadiet for trugsolfangerne er også højt da de er brugt til meget store anlæg i USA, Israel m.m. hvor der ønskes høje produktionstemperaturer (op til 800 °C). Prisen er dog mindre kendt da man ikke har erfaringer i Europa og overhoved ikke har undersøgt muligheden for anvendelsen i solvarmecentraler hvor temperaturerne er lave i forhold til de nævnte anvendelser. De koncentrerende solfangere, ud over trugene, CPC'ere er generel ikke undersøgt her. Den specielle CPC fra Sverige, kaldt MaReCo, er designet til store anlæg og også demonstreret enkelte steder, dog mangler en større, stabil produktion af solfangerne og der formodes store muligheder for forbedringer. Dermed er såvel udviklingsstadiet som prisen ret usikre. For vakuumrørsolfangere er forholdene endnu mere forvirrende da disse er teknisk yderst vedudviklede, dog kun til mindre anlæg. Der er ikke, undertegnede bekendt, udviklet nogle store moduler til solvarmecentraler. Små moduler medfører: 1) Arbejdsintensiv installation af mange små solfangere. 2) Da solfangerne er dimensioneret til få styk i serie er dimensionerne for koblingsrørene for små til at kunne forsyne mange solfanger i serie. Dermed skal der mange ledninger til at koble de mange små solfangere, evt. endda to rør langs hele rækkerne. Disse forhold medfører naturligvis uhensigtsmæssigt store udgifter for sådanne solfangerfelter. Udviklingen af store moduler vil løse disse problemer og herudover, med stor sandsynlighed, medføre en betydelig reduktion af produktionsprisen per kvadratmeter solfanger. Det forventes at produktionsprisen kan reduceres med samme 30% som blev opnået ved udviklingen af store, plane moduler. Dette kræver dog at en producent kan se et potentielt markedet for disse moduler, dvs. se potentialet i solvarmecentraler. Det kan i hvert fald konkluderes at priserne kan reduceres afgørende for sådanne store moduler med vakuumrørsolfangere.

En sidste reduktion af priserne vil være gældende for alle type solfangere hvis det var mulig at producere dem industrielt. Dette er dog ikke realistisk i de kommende år da en sådanne produktion vil kræve et enormt marked, og selv et sådant marked vil være vanskeligt for en stor-producent, da man er oppe imod så utroligt mange konkurrenter.

En videre usikkerhed er knyttet til de tekniske kundskaber for installatørerne og leverandørerne. For de plane solfanger er alle detaljer kendte, mens erfaringer i Europa er meget begrænsede i forhold til trug-solfangere og MaReCo, samt konfigurationerne for vakuumrørsolfangere ikke er dokumenteret på store felter overhoved.

Givet disse mange faktorer der kan ændre forholdene kan vi konkludere følgende:

3.1 Solfangereffektiviteten som kriterium for sammenligning

Den grundlæggende teori der gælder på solvarmeområdet beskriver de mange forskellige solfangers egenskab til at omdanne sollys til varme på en ensartet og rimelig simpel måde. Solfangereffektiviteten er en meget simpel og udbredt beskrivelse af effektiviteten for denne energiomvandling og beskrivelsen kan direkte bruges til sammenligning af forskellige solfangertyper, hvilket er den første metode der anvendes i foreliggende rapport til bestemmelse af en solfangers ydelse.

Effektiviteten for solfangere bestemmes ved prøvning hvor de fysiske forhold er veldefineret. Herudover bestemmes nogle korrektioner for forhold der afviger fra disse prøvningsforhold. Tages udgangspunkt i effektiviteten fra prøvningsrapporterne, uden hensyn til korrektionerne, så viser det sig, at såvel vakuumrør, CPC'er og trugsolfangerne kan være relevante i solvarmecentraler, specielt for forhold hvor der ønskes høje udløbstemperaturer fra solfangerfeltet, der her nogle gang kaldes "produktionstemperatur".

Da solfangerens overflade kan beskrives på mange måder og effektiviteten er givet for et bestemt areal, så er det relevant at tage hensyn til den aktuelle areal man ønsker at forholde sig til. Der kan være tale om det transparent areal (netto) eller det areal som hele solfangerkassen udgør (brutto). Bruges nettoarealet viser højtemperatursolfangerne at være yderst konkurrencedygtig, mens de taber lidt ved anvendelse af bruttoarealet som reference.

Inddrages prisen i sammenligningerne, bortfalder diskussionen vedr. arealer, da man naturligvis tager udgangspunkt i samme reference ved bestemmelse af ydelse og pris.

Som nævnt er effektivitetskurven et udtryk for produktionen under prøvningsforhold. En mere realistisk sammenligning vil medtage korrektioner for forhold der ikke ligner disse prøvningsforhold. Det er ikke eksplicit sket i foreliggende projekt, bl.a. fordi sådanne korrektioner naturlig indgår i simuleringsmetoderne. Vigtig her er at nævne at vakuumrørsolfangere vil få afgørende bedre værdier i sammenligningen ved inddragelse af en korrektion der afspejler ydelsens afhængighed af indfaldsvinklen.

Hvis grundarealet er meget dyrt skal dette medinddrages i sammenligninger mellem forskellige solfangertyper. Her kan nævnes at de plane og vakuumrørsolfangerne erfaringsmæssig anvender 2 gang så meget areal som de selv dækker, mens trugsolfangerne har behov for 3 gange solfangerarealet. Disse størrelser er bestemt for fritstående solfangerfelter og skyldes forhold pga. skyggevirksomheder mellem rækkerne.

3.2 Anvendelse af produktionstal fra prøvningsrapporterne

I de fleste prøvningsrapporter indgår produktionstal. Disse er dog beregnet ud fra forskellig modeller og afhænger af prøvestationens beliggenhed og land. Dermed kan disse ikke umiddelbar sammenlignes hvis de ikke er bestemt af standardforhold hvilket er indført gennem de seneste år på europæisk plan.

3.3 Anvendelse af producent-oplyste produktionstal

Det kan ikke anbefales at bruge producenterne angivelser af ydelse, da man ikke kender til den måde de er beregnet på.

3.4 Fælles for simuleringsmetoderne

Simulering kaldes metoden hvor der opbygges en model der gengiver de ønskede egenskaber af et system. I vore tilfælde er der altid tale om en model opbygget i et computerprogram som simulerer dele af, eller hele solvarmecentralen. Til formålet er der anvendt programmet TRNSYS da man har en veludviklet bibliotek af komponenter der indgår i solvarmesystemer.

Der er opbygget to systemer: 1) Solfangerfeltet med forskellige former for styring. 2) Hele solvarmecentralen med fjernvarmeforbruget, tank, varmeveksler osv. Naturligvis indgår korrektioner for ikke-prøvningsforhold i simuleringerne. Solbestrålingsstyrken bestemmes ud fra det danske Design Reference Year (DRY) og der medtages skyggepåvirkningen mellem rækkerne. Systemet modelleres ved en størrelse der ligner Marstal-anlægget som der fremståede i 1999, dog med den forskel at volumen i tanken er på 300 liter/m², i stedet for de 260 i Marstal. Denne størrelse har vist sig at være en mere optimalt valg.

3.5 Anvendelse af max-flow simulering

Den mest simple simuleringsmetode kaldes her for "max-flow-metode" som er navngivet pga. den urealistisk store massestrøm der anvendes. Dette gøres for at opnå en sammenligning alene af solfangernes termiske egenskaber, uden påvirkning fra andre effekter. Den store massestrøm gennem solfangeren medfører at temperaturen kun stiger meget lidt, i vores tilfælde haves $\Delta T < 0,5$ °C. Dermed kunne man også kalde metoden for "minimal- ΔT -metode". Styringen af væskestrømmen er ligeledes simpelt. Pumpen kører, når en temperaturforøgelse kan opnås og ellers ikke (on-off styring). Metoden viser altså solfangerydelsen under ideelle forhold. I sammenligning med effektivitetsmetoden, inddrager den aktuelle metode korrektionerne for de ikke prøvningsmæssige forhold der bestemmes i hvert tidsskridt.

Den store fordel med metoden er at den er simpelt og reproducerbar. Den lider dog under urealistiske produktionestimater. Dette er dog underordnet i det aktuelle formål, da man ikke ønsker at finde den absolutte ydelse, men mere en sammenlignelig ydelse for forskellige solfangere.

Da temperaturændring over solfangeren er meget lille, kan indløbstemperaturen anses som gennemsnitstemperaturen for solfangerfeltet. Plottes ydelsen i forhold til denne temperatur kan forskellige solfangere sammenlignes på de givne temperaturniveauer.

Resultaterne viser tydelig at højtemperatursolfangere medfører højere ydelser ved høje temperaturer end de plane solfangere. Derimod er de plane, traditionelle solfangermoduler overlegen ved lave temperaturer. Dette bekræfter de forventninger som effektivitetskurverne hentyder til og som var inspirationen til foreliggende arbejde.

Det er interessant at vise at anvendelse af det transparente areal som reference vil medføre tilsvarende rangering af solfangerne som der er fundet ved de simple effektivitetsbetragtninger med den forskel at temperaturen hvor ydelsen af det plane solfanger overgås af de andre solfanger skubbes ca. 20 grader opad til ca. 40 °C. Det peger på at indførelse af korrektionerne og metodologiske forskelle reducerer temperaturafhængige forhold med denne simuleringsmetode i forhold til effektivitetsmetoden. Det første er omvendt til det der er postuleret i foregående afsnit. Konklusionen er at de plane solfangere kan konkurrere med højeffektive solfanger for en større temperaturområde end fundet ved metoden der baseres på effektivitetsudtrykkene.

Da metoden lider under mangel på realistiske forhold er der lavet nogle undersøgelser for at afdække om mere realistiske flowforhold vil påvirke de fundne resultater. Ved simpelthen at sænke det flow der anvendes i en on-off-styring er ydelsen for solfangerne genberegnet. Det viser sig at rangeringen ikke påvirkes, når man sammenligner samme strømningsmængder med hinanden. Dermed kan metoden anses at kunne give et realistisk sammenligningsgrundlag. Dog vil man ikke kunne bruge de absolutte værdier til vurdering af en egentlig anlægs ydelse.

3.6 Krav om fast temperaturstigning over solfangerfeltet som metode

Effektiviteten afhænger ikke kun af temperaturniveauet men også, i mindre grad, af den temperaturforøgelse der kræves over solfangeren. I samarbejde vedr. udbygning af solvarmecentraler i Marstal, inspirerede den rådgivende ingeniørfirma, Planenergi, med en metode hvor styringen for modellerne opbygges, så der holdes temperaturstigningen konstant i stedet for massestrømmen. Metoden kræver at man kan bestemme det flow der er nødvendig for at opnå en bestemt temperaturændring hvilket er simpelt i simuleringerne. Man skal dog være klar over at metoden ikke er entydig, og derfor skal temperaturerne vælges efter et entydigt kriterium, f.eks. at indløbstemperaturen er den styrende temperatur, eller som i det foreliggende projekt, at der anvendes gennemsnitstemperaturen til formålet.

Sammenlignes resultaterne fra ΔT -metoden med max-flow-metoden viser det sig at de to metoder har fuld overensstemmelse, hvis temperaturstigningen er meget lille. For øget temperaturstigning vokser forskellene naturligvis. For lave temperaturniveauer er forskellen på 5% mens den er på ca. 7% for høje temperaturer. Dermed kan der korrigeres mellem de to metoder og findes samme resultater. Vigtigst her er konklusionen at de to metoder medfører næsten samme rangering af solfangerne ud fra ydelsen. Hvis man inddrager pris-/ydelsesforholdet kan forskellen i metoderne dog medføre en forskellig rangering, da ydelsen ved ΔT -metoden er lavere end ved max-flow-metoden, hvilket dog kan håndteres. Det må fremhæves at usikkerhederne ved beregningerne er så store, at de overstiger denne forskel. Dermed kan man ikke entydigt afgøre hvilke metode der er til at foretrække på basis af ydelsen.

3.7 Systemsimulering

Systemsimulering inddrager en forbrugsmodel for f.eks. fjernvarmesystemet samt de tekniske installationer der har indflydelse på solfangernes ydelse. Her kan nævnes varmevekslere og akkumuleringstanke. Det viser sig at styringen er en parameter der har en enorm indflydelse på resultaterne.

Anvendes en simpel on-off-styring vil man finde resultater der ligner de ovennævnte. Anvendes derimod variabel flow-styring bliver ydelsen næsten uafhængig af temperaturniveauet, hvilket synes yderst mærkelig. Derfor er der gennemført en hel række beregninger for at kunne afklare dette forhold. Det viser sig at en styring med en så stor variationsområde for væskestrømmen regulerer på en sådan måde, at udløbstemperaturen fra solfangerfeltet bestemmes uafhængigt af effektiviteten. Dermed vil der i store perioder være meget lav ydelse med minimal effektivitet for at opnå høje udløbstemperaturer. Dermed vil man næsten ikke kunne se forskelle for temperaturer over et vist niveau. Inspireret af denne optagelse er der i andre projekter foreslået en styring der tager hensyn til lav effektivitet og undgår at producere ved disse forhold, da dette kan være spild af pumpeenergi eller spild af potential solenergi.

Rangeringen af solfangerne vil være domineret af starteffektiviteten og vil ikke, som før, ændre rækkefølgen ved højere temperaturer. En optagelse der af kollegaer anses at skyldes modelleringsfejl og skal derfor valideres af andre for at sikre dens gyldighed.

Her konkluderes at en rangering baseret på systemsimulering og anvendelse af variabelt flow er en god metode til valg af solfanger for et givent anlæg. Anvendes derimod variabelt flow, overstyres mange af solfangernes egne egenskaber og dermed vil en rangering afhænge af den måde styringen virker. Dette er naturligvis den mest realistiske bestemmelse af solfangernes ydelse da systemet er gengivet mest korrekt. Der er dog stor mulighed for at lave fejl og man skal kende sine modeller godt for at kunne stole på sine resultater.

3.8 Priser som kriterium for valg af solfangere

Hvis man tager udgangspunkt i priserne alene, vil højtemperatursolfangere ikke kunne konkurrere. De er typisk 2-4 gange dyrere. Derfor skal prisen og ydelsen knyttes sammen, hvilket gøres i følgende afsnit.

3.9 Pris-/ydelsesforhold

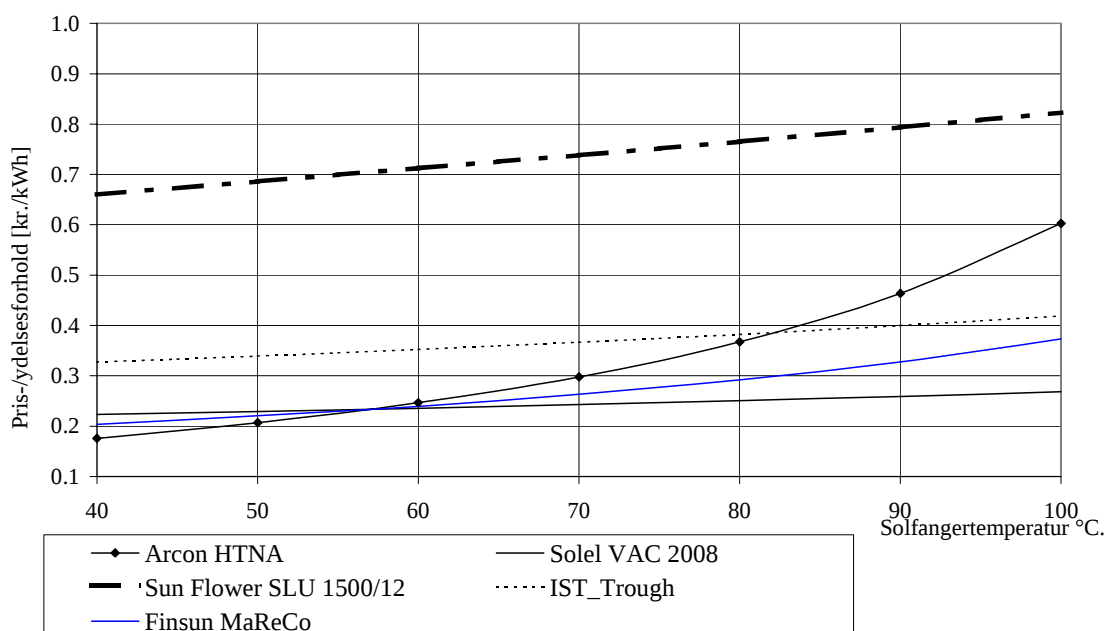
Vi har vist at ydelsen kan bestemmes på mange måder. Samme gør sig gældende for de økonomiske forhold. Prisen og dermed investeringen afhænger af mange ikke-tekniske forhold som f.eks. tro på kunden og de potentialer der ligger i et projekt, konjunkturer og meget mere. Rentabiliteten for en investering kan bestemmes på basis af forskellige metoder.

Den mest simple rentabilitetsmetode er, at tage prisen og dividere med ydelsen, kaldt pris-/ydelsesforhold. Man inddrager ingen rente og lignende.

En lignende metode er anvendt af rådgivende ingeniører. Ud fra erfaring fra flere gennemførte projekter bestemmes en finansieringsfaktor der skal ganges på investeringen og beskriver hvor meget man skal finansiere hvert år for renter, skatter, besparelser, afbetalingen af et lån over en givet periode – for solvarmecentraler typisk 20 år. Faktoren er bestemt til 6.7% og anvendes af flere rådgivende ingeniørfirmaer i deres kalkuler for store, offentlige investeringer.

De to nævnte metoder fører til lignende resultat, da finansieringsfaktoren kun skalerer resultaterne og ikke påvirker de indbyrdes forhold.

Ved anvendelse af finansieringsfaktormetoden og af ydelsen bestemt ved max-flow metoden, kan rangeringen af solfangerne bestemmes ved følgende plot.

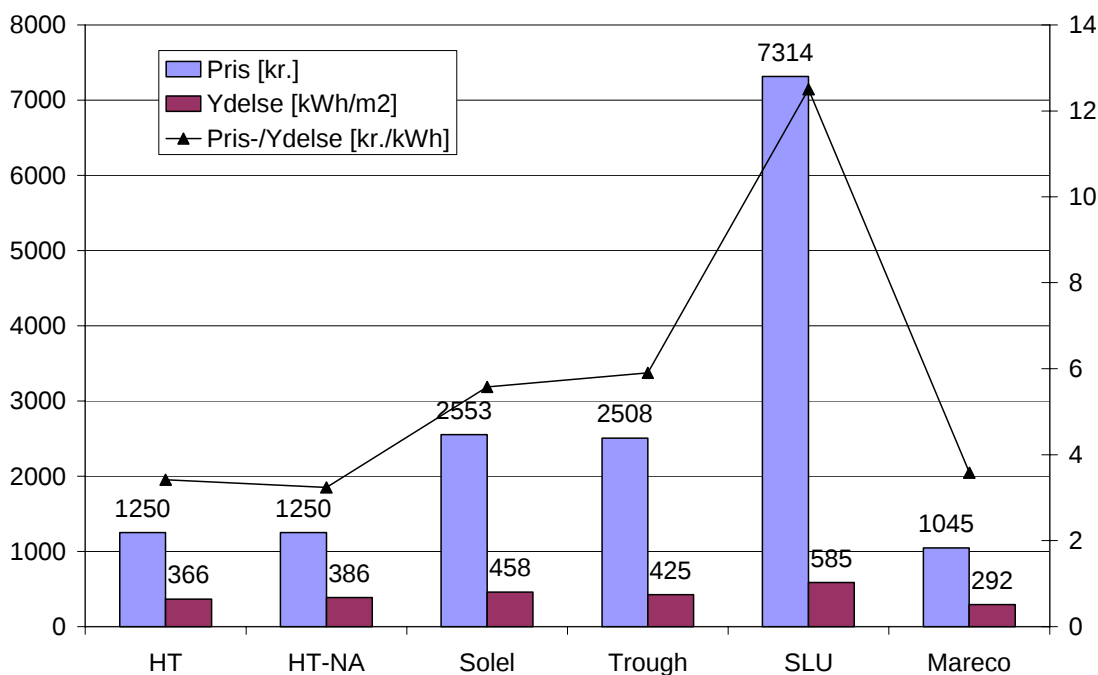


Figur 1. Pris-/ydelsesforhold for en plane, en trug-, en CPC, og to vakuumrørsolfangere.

Vi ser at den plane solfanger medføre den mindste pris for temperaturer under ca. 57 °C, hvorefter vakuumrørsolfangeren fra Solel medfører mindste pris-/ydelsesforhold. Den svenske CPC-solfanger MaReCo giver også meget gode resultater. Trugsolfangeren fra IST

kan lige overgå den plane solfanger ved temperaturer over 80 grader mens den meget dyre vakuumrørsolfanger fra Kina, Sun Flower SLU, ikke kan konkurrere da prisen er alt for højt.

Ved tilsvarende beregninger byggende på konstant ΔT -metoden medfører iflg. Planenergi at den plane solfanger udkonkurrerer de andre over en større interval. Dette overrasker da den plane solfanger vil have vanskeligere med høje temperaturforøgelser end højtemperatursolfangerne.



Figur 2. Pris, ydelsen og pris-/ydelsesforhold for to plane, en trug-, en CPC, og to vakuumrørsolfangere.

Anvendes en systemsimulering for et bestemt anlæg med bestemt styringsstrategi, forbrugsmønster osv., er det mulig at gengive pris, ydelse og pris-/ydelse i samme plot. Her bliver forholdet mellem de forskellige solfanger meget tydeligt. Hvis man samtidig plotter usikkerheden, kan det ses at solfangerne grupperes i tre grupper med lignende pris-/ydelsesforhold: 1) De to plane solfanger HT, MaReCo. 2) Solels vakuumrør og IST trugssolfanger. 3) SLU fra Sun Flower.

3.10 Næste trin i analysen

De viste resultater er ikke hele sandheden, da en vigtig pointe med anvendelse af højtemperatursolfangere går tabt. Plane solfanger og MaReCo har høj ydelse for lave gennemsnitstemperaturer og lav ydelse for høje temperaturer. Omvendt er egenskaberne for højtydende solfanger, at de ofte har relativ lav effektivitet ved lave temperaturer, men høj effektivitet ved høje temperaturer, sammenlignet med andre typer solfanger. Ved at anvende en kombination af solfangerne kan man øge den totale effektivitet for solfangerfeltet, da man udnytter hver solfanger i det temperaturområde hvor de yder bedst. Postulatet om højere total ydelse for et kombineret solfangerfelt bliver præsenteret og gennemregnet i en anden rapport af undertegnede i R-014 ved samme Institut.

4 Indledning

Solvarmecentraler er store solvarmeanlæg som leverer varme til store og små fjernvarmesystemer. Solvarmecentraler bliver introduceret i et undervisningsnotat fra DTU, (Heller, A., 2000).

Overordnet består solvarmecentraler af et solfangerfelt bestående af et solfangerareal på over 500 m². Solfangerne er opstillet i rækker hvor de enkelte moduler er sat i serie og rækkerne er parallelkoblede. Anlæggene kan være opbygget uden akkumuleringstank til foropvarmning af fjernvarmevæsken, eller som anlæg hvor der indgår tanke for korttids- til langtidslagring. Typisk er solfangerne placeret i store felter, enten på marker eller på tage.

Anlæggenes størrelse giver mulighed for optimering som ikke er tilstede på mindre anlæg. Herunder anvendes der variable væskestrømme gennem solfangerne for at opnå mindre forbrug af elektricitet til pumpning og for at opnå konstant høje udgangstemperaturer fra solfangerfeltet. Dermed er det muligt at undgå brug af ”supplerende” energikilde i længere perioder end ved anvendelse af konstante væskestrømme. En undersøgelse af disse forhold fremgår bl.a. af (Heller, A., 1998).

Hver solfanger har sin egen karakteristik i forhold til hvor meget solenergi der omdannes til varme og på hvilke temperaturniveau varmen kan gøres tilgængelig. På trods af forskellene er det fælles for alle solfangerne, at de yder mindre ved høje temperaturer. Der er dog stor forskelle i hvor meget de enkelte solfangertyper er påvirket af temperaturniveauet. Plane solfangerne yder bedst ved lave temperaturer, men taber dog en del til omgivelsen igen ved høje temperaturer. Omvendt kan der generelt siges om høj-effektive solfangerne, at de ikke taber lige så meget ved høje temperaturer. Det gælder dog for flere af dem at de ikke er helt så ydende ved lave temperaturer som de plane solfangerne. Der er altså fordele og ulemper ved begge typer solfangerne og det er formålet med foreliggende projekt at klargøre disse i forhold til solvarmecentraler hvor kravet til høje temperaturer typisk er strengere end til små anlæg. Mere konkret er formålet med det nærværende projekt at undersøge en række solfangertyper med hensyn til deres effektivitet ved høje væsketemperaturer. Gennem bevillingsskrivelsen fra Energistyrelsen er solfangertyperne forudbestemt.

Et mere generelt formål med projektet er naturligvis at afklare om pris-/ydelsesforholdet for solvarmecentraler kan forbedres ved anvendelse af højtydende solfangerne.

Et bi-produkt af undersøgelsen er at afdække, om der er mulighed for anvendelse af højtemperatursolfangere til andre formål som f.eks. industrielle processer og solar kemi.

De anvendte metoder er bl.a. simulering med computerprogrammer for at bestemme ydelsen for solvarmeanlæg. Herudover findes priser for solfangerfelter ved en licitation af feltet der skal opstilles på Marstal Fjernvarmen. Det er ikke muligt at gengive priserne detaljeret da disse ikke er givet til offentliggørelse. Derimod vil de summerede størrelser gengives til sammenligningerne på basis af pris-/ydelsesforholdet.

4.1 Projektforløbet

Projektet var ansøgt med tre hovedopgavestillinger:

- 1) Hjemtagning af viden om ydelse for solfangerne.
- 2) Priser for opbygning af solfangerfelter.
- 3) Afprøvning af valgte solfangerne.

Den sidste del blev ikke bevilliget. Derfor var projektet planlagt til at skulle fokusere på simuleringer og videnshjemtagning vedr. ydelsen for højtemperatursolfangere. Problemer

med at indhente priser har dog vist sig at være en stor barriere for gennemførelse af projektet, hvilket krævede mere opmærksomhed end forventet.

For at få realistiske priser er der indgået samarbejde mellem BYG•DTU og rådgiveren COWI. COWI har i denne sammenhæng udarbejdet et meget modent udbudsmateriale på engelsk der blev sendt til de fire solfangerproducenter der er udpeget i bevillingsskrivelse.

Af de fire producenter, der har fået tilsendt udbudsmaterialet, var der kun én der sendte materialet tilbage i udfyldt og tilstrækkelig detaljeret grad. To reagerede ved at de gerne vil levere komponenter til en europæisk samarbejdspartner, dog vil de ikke selv give tilbud. Den sidste reagerede ved at sende en enkelt priskurve.

Vanskeligheden med at få tilbud på det internationale marked tilskrives en af de grundlæggende problemer med solvarmebranchen, nemlig, at den stadig ikke er internationaliseret nok. Hvis man ikke har kontakterne i orden kan man ikke få opbygget en solvarmecentral og i hvert fald ikke med standardkomponenter. Dette har man ikke opdaget hidtil da de fleste opgaver er løst af nationale parthavere eller af gennemført af de 1-3 store, aktive virksomheder i nabolandene.

For at overkomme den opdagede barriere med tilbudsgivning, blev danske fabrikanten indbudt til samarbejde med de udenlandske producenter, hvilket gav resultater. De danske solfangerproducenter er ARCON Solvarme A/S og Marstal VVS A/S, som arbejder sammen med BATEC A/S. Samarbejdet har resulteret i aftaler for de danske solfangerproducenter med udenlandske producenter. Aftalerne forventes at medføre en styrket position på det internationale marked for store solvarmeanlæg og mulighed for anvendelse af højtemperatursolfanger til andre formål, el-produktion, procesvarme, køling m.m.

Da man ikke kunne få priser fra de internationale producenter, var tiden løbet fra projektets tidsplan. Derfor var et centralt formål med projektet overhalet af virkeligheden, nemlig at kunne overføre resultaterne til udvidelsen af solvarmecentralen i Marstal på Ærø. Her er planerne at udvide det ellers næststørste anlæg i Europa, med yderligere 10.000 m² solfanger til 20.000 m² og et damvarmelager på 10.000 m³. En konsekvens heraf er at det nærværende arbejde i sine sidste måneder er gennemført parallelt med de indledende projektaktiviteter i Marstal. Dette samarbejde var inspirerende og produktivt samt sikrer vidensoverføring til udvidelsesprojektet hvilket også er støttet gennem en økonomisk bevilling fra Energistyrelsen for projektet "Følgeprojekt til EU-projekt vedr. udvidelse af solvarmecentralen i Marstal", J.nr. 51181/01-0064.

For at sikre resultaterne til en bredere målgruppe, nedfældes disse i nærværende rapport som inspiration til nyttiggøre af resultaterne og hermed forbedret pris-/ydelsesforhold for kommende projekter.

4.2 Rapportindhold og læsevejledning

Rapporten introducerer først nogle grundlæggende begreber vedrørende solvarme og den bagvedliggende teori, specielt emnet effektivitet sat i relation til nogle andre størrelser som f.eks. de indgående arealer. Dette er meget fundamentalt og indgår i de indledende kurser på DTU. For at undgå misforståelser og sikre den grundlæggende forståelse, gennemgås disse begreber her.

Efter den teoretiske gennemgang beskrives de fire relevante solfangere med angivelse af producenter og andre relevante informationer.

Herefter er vi i stand til at sammenligne de valgte solfangere på basis af forskellige metoder, startende med helt enkelte sammenligninger af effektivitetskurverne over en simpel, dynamisk simuleringsmetode til en omfattende simulering af en hel solvarmecentral. Vi vil se om de forskellige metoder medfører forskellige resultater for valget af de mest egnede

solfangere. Sammenligningen baseres ikke på ydelsen alene men knyttes sammen med priser ved at anvende simple økonomiske metoder hertil og dermed være i stand til at sammenligne pris-/ydelsesforholdet for de forskellige solfangertyper.

I et afsluttende afsnit diskuteres de opnåede resultater.

5 Teoretisk grundlag

5.1 Forskellige solfangertyper

De fleste solfanger man ser i Danmark er plane solfangere, vist i Figur 4. Plane solfangere består grundlæggende af:

- En absorber, der sikrer en høj omdannelse af solens stråling til brugbar varme.
- Et transparent dæklag, der slipper sollyset igennem, men samtidig forhindrer varmen i at trænge ud. Denne dæklagskonstruktion består typisk af én eller to lag glas og/eller teflonfolie.
- Isolering der forhindrer varmetab gennem de ikke transparente dele.
- En kasse der holder det hele sammen og forhindrer indtrængning af regnvand, fugt etc.

Vakuumsolfangere består af to runde glasrør. Der er skabt vakuum som isoleringslag mellem de to rør. Der findes flere forskellige mekanismer for at få varmen i solfangerne til at blive transporteret væk. Et eksempel er vist i Figur 6. Solfangertypen er undersøgt på DTU og inspiration kan findes bl.a. i (Qin, L. and Furbo, S., 1999) og i undervisningsnotatet af (Furbo, S., 1998).

Såkaldte CPC-solfanger (Concentrating Parabolic Collectors) har til fælles at de udnytter parabolers egenskab til at "koncentrere" solstrålerne ind på et "fokusområde". En parabol fokuserer i et enkelt brændpunkt mens parabolkanaler fokuserer i en "brændlinie". Man finder udførelser med små paraboler eller parabolkanaler der er indbygget i plane solfanger og man finder dem som store paraboler og parabolkanaler der udgør en hel solfanger selv. I fokuspunktet eller fokuslinien hvor strålingen samles, placeres typisk en absorber som kan være konstrueret ved forskellige teknikker. Man finder simple "strips" der også anvendes i de plane solfanger som absorbere, og man kan finde avancerede vakuumsolfangere som absorber i CPC'er.

Trough/trug solfanger må anses som en afart af CPC-typen med den egenskab at de enkelte solfangermoduler sættes i serie til en lang række. Ofte er disse systemer tryksat, hvormed der opnås meget høje temperaturer ved høje tryk. For at undgå problemer med kogning anvendes der ofte olier som transportmedium. De høje produktionstemperaturer udnyttes bl.a. til produktion af elektricitet og i kemiske processer. Teknologien er gammel og velkendt i bl.a. Amerika.

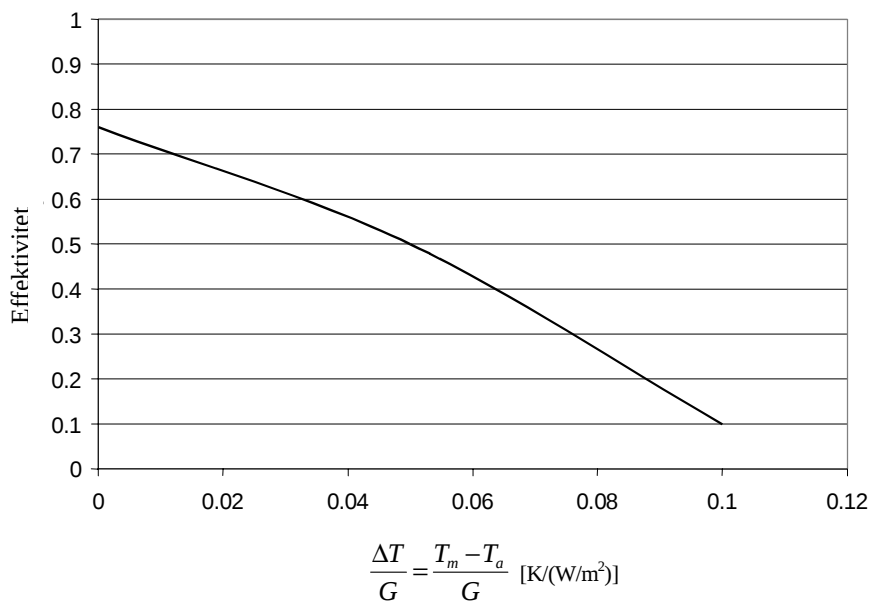
Det er således at de fleste plane eller vakuumsolfangerne typisk er monteret statiske, så de ikke føres efter solen, mens CPC'er, og i alle tilfælde trough-solfangerne, føres efter solen med forskellige mekanismer.

5.2 Solfangereffektivitet

Solfangernes effektivitet er en størrelse der fremgår af forholdet mellem den energi der falder på solfangeren og den energi som solfangeren formår at gøre udnyttelig i form af varme, dvs. ydelsen. Ydelsen kan beskrives som den energimængde der produceres i solfangeren, hvilket ikke er ret formålstjenlig da meget af varmen tabes på vej til forbrugeren. Derfor anvendes nettoydelsen i stedet. For solvarmecentraler, der er knyttet til fjernvarme, kan denne størrelse defineres på flere måder: Skal fjernvarmen køre pga. anvendelse af solvarme, så inkluderer nettoydelsen også det fulde varmetab i forsyningsnettet. Hvis fjernvarmen alligevel skal køre om sommeren, så er det vel rimelig at tilføre varmetabet til den ikke-solvarmerelaterede del af systemet.

Hvis al sollys omdannes til brugbar varme er effektiviteten 1. Dette er dog aldrig mulig da der er tab på forskellige niveauer. Strålingen bliver reflekteret og absorberet i dæklaget samt på absorberen. Absorberen er ikke i stand til at omdanne hele strålingen til varme, og al varme føres ikke ud til væskestrømmen. Herudover tabes så varmen til omgivelsen. Derfor er den højeste ydelse for alle solfanger lavere end 1.

Gennem eksperimentelt arbejde har forskere fundet frem til, at effektiviteten kan tilnærmes med et anden-grads polynomium der knytter effektiviteten sammen med solens bestrålingsstyrke, G , og temperaturforskellen mellem solfangeren og omgivelsen (lufttemperaturen), ΔT . En typisk effektivitetskurve er vist i figuren nedunder.



Figur 3. En typisk effektivitetskurve for en solfanger.

Vi ser altså at effektiviteten har sit højeste punkt på skæringen med y-aksen, hvor temperaturforskellen mellem solfangeren og omgivelsen er nul, den såkaldte starteffektivitet. Under disse forhold er der ingen varmetab til omgivelsen. Ved øget temperaturforskel tiltager varmetabet til omgivelsen, hvilket i mange tilfælde er tæt på en ret linie med aftagende hældning. Linien krummer dog lidt og derfor kræves der et højere ordens led i udtrykket for beskrive denne egenskab. Vi kan tænke os frem til at kurven også er påvirket af bestrålingsstyrken, da denne indgår i x-aksens størrelse. Højt bestrålingsstyrke vil formindske effektivitetsværdierne da denne indgår i nævneren. Dvs. at effektiviteten aftager med styrken af solindfaldet. Det er relevant allerede her at fremhæve at der er andre forhold der også gør sig gældende for effektiviteten. Disse bliver diskuteret senere i denne rapport.

Som vi ser er effektiviteten afhængig af en temperaturforskel. Denne forskel kan bestemmes ud fra flere temperaturer der findes på solfangeren. Derfor anvendes oftest middelvæske- og omgivelsestemperaturer til at bestemme denne forskel.

Effektiviteten bestemmes ved prøvning under veldefinerede forhold. Prøvningerne gennemføres efter normerede standarder på certificerede laboratorier, her i Danmark er det Teknologisk Institut i Taastrup. Forholdene under prøvningen fremgår af prøvningsrapporterne og databladene for solfangerne. Man har dog mulighed for at korrigere for andre forhold som ligeledes er bestemt i laboratoriet.

5.2.1 Effektivitet for plane solfangere

Udtrykket der beskriver effektiviteten, η , for plane solfanger er givet af:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{t_m - t_a}{G} - k_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad (1)$$

hvor η_0 er starteffektiviteten, når der ikke er varmetab til omgivelsen¹, skæring med y-aksen
 k_1 første ordens varmetabskoefficient i W/(m² K), hældning af kurven
 k_2 anden ordens varmetabskoefficient i W/(m² K²), bøjning af kurven
 t_m middelvæsketemperatur over solfangeren i °C
 t_a omgivelsestemperaturen i °C
 G bestrålingsstyrken i W/m².

Effektiviteten afbildes normalt på to måder: 1) som funktion af temperaturforskellen. 2) som funktion af temperaturforskellen divideret med bestrålingsstyrken. Omregningen mellem disse to grafer er ganske lige til. Man kan omregne x-aksens enheder ved at gange eller dividere med bestrålingsstyrken for den givne prøvning, som typisk er angivet for den foreliggende effektivitetsgraf.

Effektiviteten bliver påvirket af de forhold de bliver målt under og dermed skal effektiviteten for andre forhold korrigeres iflg. (Svendsen, S., 1981) efter følgende udtryk:

$$\eta = k_M \left[k_G \eta_0 - k_s k_1 \frac{t_m - t_a}{G} - k_s k_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \right] \quad (2)$$

hvor k_M er korrektionsfaktoren for væskestrømmen,
 k_G korrektionsfaktoren for indfaldsvinklen
 k_s korrektionsfaktoren for solfangerhældningen.

De indgående faktorer findes af følgende udtryk.

Indfaldsvinkel: Da strålingen, der absorberes af solfangeren, bliver reflekteret og absorberet forskelligt afhængig af vinklen for indstrålingen, V , skal der korrigeres med følgende indfaldsvinkelkorrektion, k_G :

$$k_G = \frac{k_v G_{dir} + k_v(60^\circ) G_{dif}}{G} \quad (3)$$

hvor faktoren $k_v(60^\circ)$ er korrektionen af den diffuse del af solindstrålingen for en indfaldsvinkel på 60° og faktoren k_v er korrektionen af den direkte del af indstrålingen for den aktuelle indfaldsvinkel V . Koefficienterne findes af udtrykket:

$$k_\theta = 1 - \tan^a \left(\frac{V}{2} \right) \quad (4)$$

hvor koefficienten a afhænger af de optiske egenskaber for konstruktionen og bestemmes ved prøvningen for forskellig vinkelforhold. Der findes flere andre korrelationer til beskrivelsen af indfaldsvinkelkorrektionen, hvilket man skal være opmærksom på ved sammenligninger. Den her anførte tangens-korrektion er typisk anvendt ved de danske prøvninger.

¹ Dette er tilfældet når solfangertemperaturen er den samme som omgivelsestemperaturen.

Væskestrømmen: Prøvningen bliver gennemført med en konstant væskestrøm gennem solfangeren. Værdien fremgår af prøvningsrapporten. Ved andre strømningsforhold, specielt ved low-flow, dvs. små væskestrømme, vil effektiviteten påvirkes, da temperaturændringen for væsken gennem solfangeren vil øges og dermed effektiviteten påvirkes i nedadgående retning. Denne påvirkning kan beskrives med følgende lineære udtryk:

$$k_m = m_0 + m_1 M \quad (5)$$

hvor k_m er korrektionsfaktoren for væskestrømmen.
 m_0 og m_1 koefficienter der findes fra datablade eller bestemmes ved beregning eller prøvning.
 M er den aktuelle væskestrømmen i kg/s.

Hældningen: Prøvningen gennemføres ved en solfangerhældning, S , givet i prøvningsrapporten. For andre hældninger skal der omregnes efter følgende udtryk:

$$k_s = s_0 + s_1 S \quad (6)$$

hvor k_s er korrektionsfaktoren for solfangerhældningen.
 s_0 og s_1 koefficienter der findes fra datablade eller bestemmes ved beregning eller prøvning.
 S er den aktuelle hældning i grader.

Det er relevant at bemærke at de korrigerede effektivitetsudtryk vil kunne bestemmes ved hjælp af f.eks. programmet SOLEFF, der er udviklet på Institut for Bygninger og Energi på DTU der nu er del af BYG•DTU, eller med programmet Dimsol fra Teknologisk Institut. Det første program kan findes på instituttets Internetadresse <http://www.ibe.dtu.dk> og senere på <http://www.byg.dtu.dk> under publikationer og/eller programmer.

Det er vigtigt for det nærværende arbejde at fremhæve, at man ikke kan sammenligne solfangere for forhold der ikke ligner prøvningsforhold, da de ovennævnte korrektioner er solfangerafhængige.

Det synes oplagt at forskellige solfangerdesign medfører forskellige forhold for prøvning og for effektivitet. Det må siges at vi i Danmark mangler kendskab til afprøvning af ikke-plane solfangere. I de følgende afsnit skitseres nogle af de forhold der er anderledes for plane og ikke-plane solfangere.

5.2.2 Effektivitet for vakuumrørsolfangere

Såvel de optiske, som de forhold der gør sig gældende for omdannelsen af stråling til varme i absorberen, er forskellige for vakuumrørsolfangere fra de plane solfangere. Forskellen er diskuteret i (Shah, L. J., 1999). Her fremgår det tydeligt at korrektionen for indfaldsvinklen involverer to vinkler som skal bestemmes ved prøvning og som defineres ud fra et antaget plan i centrum af vakuumrøret: Dette skyldes naturligvis at et rundt glasrør påvirker strålegangen forskelligt fra en plan glasflade.

Langsgående indfaldsvinkel: Fremkommer af den vinkel der dannes af solindstrålingen og røret i længderetningen.

Tværgående indfaldsvinkel der dannes af solindstrålingen og den absorberens tværgående retning.

Man kan sige at de to vinkler er de vinkler der fremkommer ved at projicere indstrålingen på en langsgående og tværgående plan i hhv. langsgående og tværgående retning. Det må bemærkes at ved standardprøvning måles disse to retninger ikke. Hvis der overhovedet måles i to retninger, angives den langsgående korrektion kun for 50 graders hældning. Dermed er der en vis usikkerhed for de andre vinkler. Her er der mulighed at anvende de korrelationer der ellers anvendes til korrelationer af indfaldsvinkler for plane solfangere, typisk enten

lineare eller tangens-tilnærmelser. Det er ikke på nuværende tidspunkt klar hvilken der er bedst.

Indfaldsvinklen korrigeres herefter forskelligt for den direkte og den diffuse del.

Direkte del: Her ganges de to korrektioner med hinanden hvorefter de ganges ind på effektivitetsudtrykket som vist for en plan solfanger.

Diffus del: Mens man for en plan solfanger finder at en korrektion er repræsenteret af en indfaldsvinkel på 60 grader afhænger dette meget af indfaldsvinkelkorrektionen for den givne solfanger, da denne er systematisk anderledes end for en plan solfanger. Dette ses i Figur 11. Derfor findes vinklen for korrektionen i de to retninger ved at finde en gennemsnitsværdi ved integration over de værdier der findes ved måling. Herefter findes gennemsnittet af de to resultater, der anvendes til korrektionen.

Det fremgår ikke af ovenstående rapport hvordan man kan korrigere for evt. strømningsforhold og hældninger.

5.2.3 Effektivitet for CPC-solfangere

Korrektionen for CPC'er er ikke undersøgt på de danske institutter. Vi ser dog fra grundbøgerne at forholdene her er endnu mere kompleks end for vakuumrørsolfangere. Der skal her også tages hensyn til afhængighed af bestrålingen, dets ændringer i lysets spektrale egenskaber på grund af reflektorens optiske egenskaber. Herudover skal der også korrigeres for to indstrålingsvinkler hvor spejlingen nok spiller en mere betydelig rolle. Selve udformningen af solfangeren kan medføre skygger på sig selv, hvilket ikke var et emne ved de andre solfangere.

5.2.4 Effektivitet for trough-solfangere

Som nævnt før er trugsolfanger til at sammenligne med CPC'er. Dermed forventes sammenlignelige forhold for korrektionerne som der gælder for CPC'er. Fra prøvningsrapporten der er udført på Sandia National Laboratory, det amerikanske prøvningsinstitut, findes at der udelukkende korrigeres med en enkelt indfaldsvinkel. Der gælder dog formentlig samme forhold som for vakuumrørsolfangere at prøvningsprocedurerne er utilstrækkelige.

Bemærk at de amerikanske indfaldsvinkelkorrektioner anvender et andengrads polynomium med et konstant led der indeholder et cosinus-led af vinklen, i stedet for tangenskorrelationen der anvendes på de danske prøvningsrapporter. Sådanne forhold skal tages med i betragtning ved sammenligninger.

I det følgende opbygges effektivitetkurverne for de forskellige solfangertyper og forhold trin for trin, så det vil være mulig for ikke solenergiforskere at forstå forholdene.

5.3 Effektivitet og arealer

Effektiviteten for solfanger beskriver solfangerydelsen i forhold til prøvning og i forhold til et bestemt areal, normalt det areal som herunder defineres som nettoareal. Da effektiviteten ofte angives i produktion per areal over en hvis tid, så indgår arealet som en nævner og har derfor stort indflydelse på resultaterne. En sammenligning af forskellige solfanger kræver udgangspunkt i samme arealer og samme randbetingelser.

Definition af arealer: Der benyttes i det følgende tre forskellige arealer ved sammenligning af forskellige solfangernes effektivitet:

Nettoarealet er det mest anvendte areal og defineres som det transparente areal, på engelsk "aperture area". For plane solfanger er det glasarealet der ikke er påvirket af skygge fra

den bærende kasse-konstruktion, rammen. For vakuumrørssolfangerne er det tværsnitsarealet af glasrørene. For trug-solfangeren er det reflektorarealet der er nettoarealet.

Bruttoarealet er for plane- og vakuumrørssolfanger bestemt som produktet af solfangerens maksimumshøjde og –bredde. For trug-solfangeren er det reflektorarealet.

Grundarealet er defineret som jordarealet der kræves når disse opstilles i solfangerfelter. Denne størrelse er central i lande hvor grundarealet er meget dyrt og ved opstillinger hvor solfangerne placeres på tage.

6 De undersøgte solfangerere

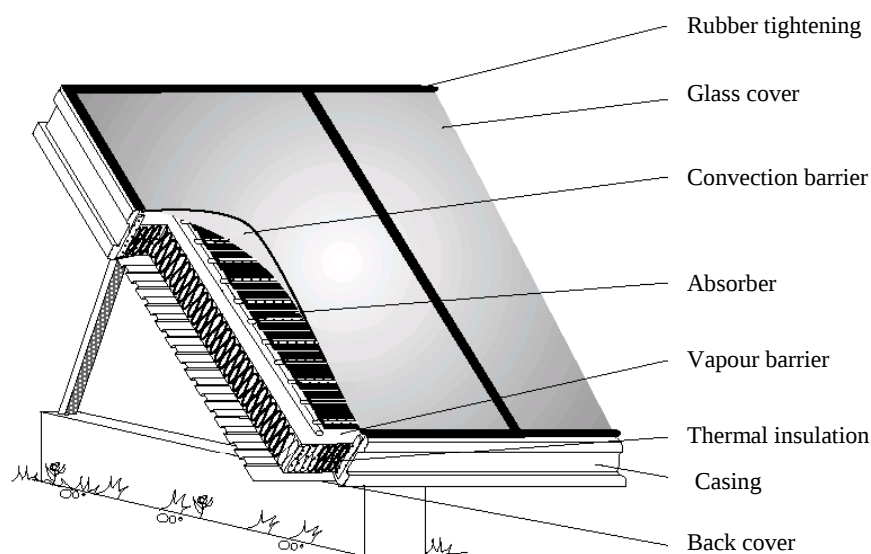
Der er undersøgt 4 forskellige solfangerere som beskrives i det følgende i detaljer ud fra datablade:

6.1 Arcon HT

Arcon HT fra danske ARCON Solvarme A/S er en traditionel plansolfanger med transparent areal på 12,5 m². Den bliver produceret i forskellige udgaver med forskellige glastyper. Her ses der udelukkende på den traditionelle opbygning.

Adresse: ARCON Solvarme A/S
Jyttevej 18
9520 Skørping
Tel. nr.: +45 98 39 14 77
Fax.: +45 98 39 20 05
E-mail: arcon@arcon.dk
Internet: <http://arcon.dk>

Figur 4 viser opbygningen af Arcon HT solfangeren.



Figur 4. Opbygningen af Arcon HT solfangeren.

I det følgende er de vigtigste tekniske data for solfangeren givet på databladet D2171 A fra Teknologisk Institut.

Solfanger:

Type:	Plan solfanger
Dimensioner l , b , h (m):	5,96 · 2,27 · 0,14
Vægt (tom):	300 kg

Transparentareal:	12,53 m ²
Bruttoareal:	13,53 m ²
Væskeindhold:	8,5 l
Varmekapacitet:	53,8 kJ/K

<u>Absorber:</u>	Sunstrip Niox. 16 vandrette parallelforbundne rør
Materiale:	Kobberrør, aluminiumsplade
Belægning:	Selektiv, Niox

<u>Dæklag:</u>	4 mm hærdet, antirefleksbehandlet, jernfrit glas 0,025 mm teflonfolie
----------------	--

<u>Solfanger effektivitet:</u>	$\eta = 0,784 - 2,97 \cdot x - 0,013 \cdot x^2$
(Baseret på det transparente areal)	
Indfaldsvinkelkorrektion:	$a = 3,0$ (tangenskorrektion)

6.2 Sun Flower, SLU-1500/12

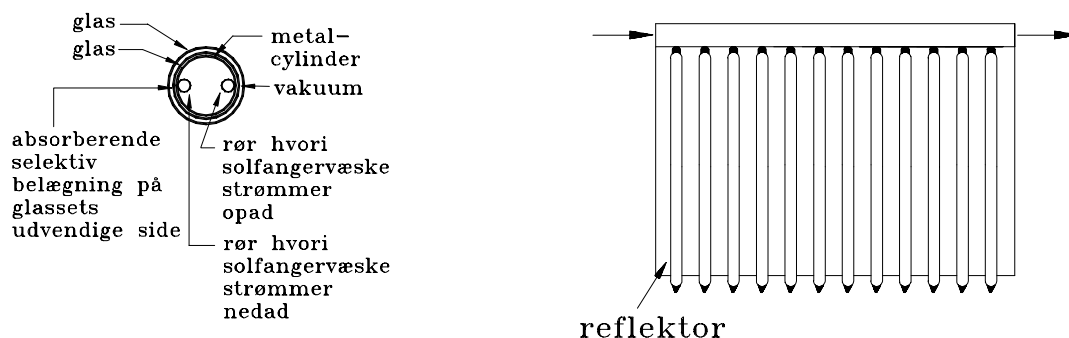
SLU-1500/12 er en kinesisk vakuumrørssolfanger fra Sun Flower (før Tsinghua Solar Co.) baseret på en konstruktion med to koncentriske glasrør, hvor mellemrummet mellem glasrørene er evakueret. De inderste glasrør er forsynet med en metalcylinder med et u-rør hvori solfangervæsken opvarmes. Solfangeren er forsynet med en plan aluminium-reflektor.

Adresse: Sun Flower
Beijing 100084
Kina

Tel. nr.: +86 10 62780196

Fax.: +86 10 62780198

Figur 5 viser opbygningen af SLU-1500/12 solfangeren og figur 6 viser et billede, hvor to SLU-1500/12 solfangere er installeret i instituttets udendørsforsøgsopstilling.



Figur 5 Opbygningen af SLU-1500/12.



Figur 6 Billede af to SLU-1500/12 installeret i instituttets forsøgsopstilling.

I det følgende er de vigtigste tekniske data for solfangeren givet jf. (Qin, L. and Furbo, S., 1999).

Solfanger:

Type : Vacuumrørssolfanger
 Dimensioner l , b , h (m): $1,67 \cdot 0,76 \cdot 0,14$
 Vægt: 35 kg
 Transparentareal: $1,60 \text{ m}^2$
 Bruttoareal: $2,44 \text{ m}^2$
 Væskeindhold: l
 Varmekapacitet: $13,4 \text{ kJ/K} \cdot \text{m}^2$

Dæklag /Absorber: 12 vertikale glasrør med fordelerrør øverst.
 Selektivbelægning på ydersiden af det inderste glasrør

Solfanger effektivitet: $\eta = 0,81 - 1,81 \cdot x$ (Baseret på det transparente areal)

Indfaldsvinkelkorrektion:

Tabel 1. Indfaldsvinkelkorrektionerne for SLU-1500/12 fundet af figur 4 i (Qin, L. and Furbo, S., 1999).

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$K^{\text{trans}}(\theta)$	1			1,145			1,371	1,282		0
$K^{\text{long}}(\theta)$	1			0,985			0,843	0,686		0

6.3 TROUGH /Trug

TROUGH fra amerikanske Industrial Solar Technology er en trug-solfanger. TROUGH solfangeren består af et absorberør der er omgivet af et glasrør samt en koncentrerende reflektor.

Adresse: Industrial Solar Technology
4420 McIntyre Street
Golden, Colorado 80403 – 1836
USA
Tel. nr.: 303 - 279 – 8108
Fax.: 303 - 279 – 8107
E-mail: industrialsolar@qwest.net
Internet: <http://www.industrialsolartech.com>



Figur 7 TROUGH solfangeren med reflektor og rør absorber. (Krüger, D., Heller, A., Hennecke, K., and Duer, K., 2000)

I det følgende er de vigtigste tekniske data for solfangeren givet jf. hjemmesiden samt (Krüger, D., Hoffschmidt, B., Hennecke, K., Pitz-Paal, R., Rietbrock, P., and Fend, Th., 2000).

Solfanger:

Type :	Trug-solfanger
Dimensioner l , b (m):	6,1 · 2,3
Vægt (tom):	81 kg
Nettoareal:	13,2 m ²
Bruttoareal:	13,2 m ²

Reflektorer:

Materiale: Aluminium

Absorber:

Stålrør med selektiv belægning omgivet af et glastrør.

Solfanger effektivitet:

$$\eta = 0,6931 - 0,4755 \cdot x - 0,003128 \cdot x^2$$

(Baseret på nettoarealet)

Indfaldsvinkelkorrektion:

$$K = \cos(\theta) + 0,0003178 \cdot \theta - 0,00003985 \cdot \theta^2$$

6.4 VAC 2008

VAC 2008 fra israelske Solel Solar Systems Ltd. er en vakuumrørssolfanger med direkte gennemstrømning af solfangervæsken i et u-rør. VAC 2008 er opbygget af en parabolisk koncentrerende reflektor, et u-rør i rustfritstål med en selektiv belægning som absorber og et evakueret glastrør, som er antirefleksions behandlet samt en forsegling mellem glasset og absorberen.

Adresse: SOLEL Solar Systems Ltd.
Har Hotzvim P.O.B. 45033
Jerusalem 91450
Israel

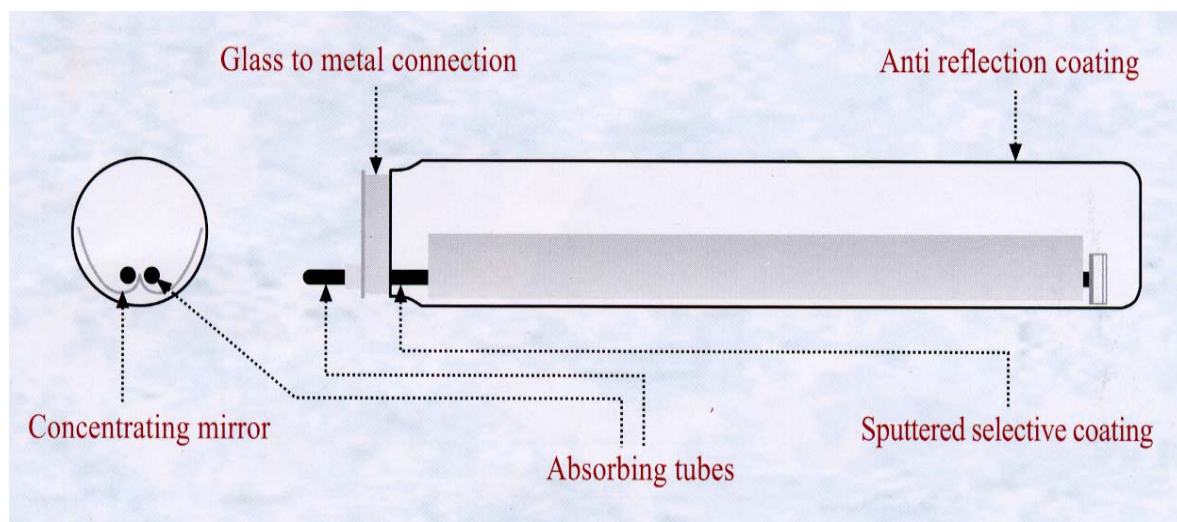
Tlf. nr.: 972-2-5323140

Fax.: 972-2-5323162

E-mail: solel3@netvision.net.il

Internet: <http://www.solel.com>

Figur 8 viser opbygningen af vakuumrørssolfangeren.



Figur 8 Opbygningen af VAC 2008 solfangeren.

I det følgende er de vigtigste tekniske data for solfangeren givet jf. oplysninger fra Solel Solar Systems Ltd.

Solfanger:

Type : vakuumrørssolfanger med u-rørs absorber og reflektor.

Dimension glastrør l , b , h (m): 3,975 · 1,110 · 0,220

Vægt: 145 kg

Transparentareal: 3,20 m²

Bruttoareal: 4,40 m²

Absorber: 5/8" rustfritstål med selektiv belægning

Glasrør: 3,0 mm antirefleksions behandlet BoSi glas

Solfanger effektivitet: $\eta = 0,791 - 0,375 \cdot x - 0,0023 \cdot x^2$
(Baseret på det transparente areal)

Indfaldsvinkelkorrektion:

Fra Solel har vi fået oplyst følgende indfaldsvinkelkorrektioner for VAC solfangerne.

Tabel 2. Indfaldsvinkelkorrektionerne for VAC2008.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$K(\theta_{\text{trans}})$	1,0	1,01	1,05	1,10	1,11	1,05	0,26	0,18	0,09	0,0
$K(\theta_{\text{long}})$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,99	0,97	0,90	0,71	0,34	0,0

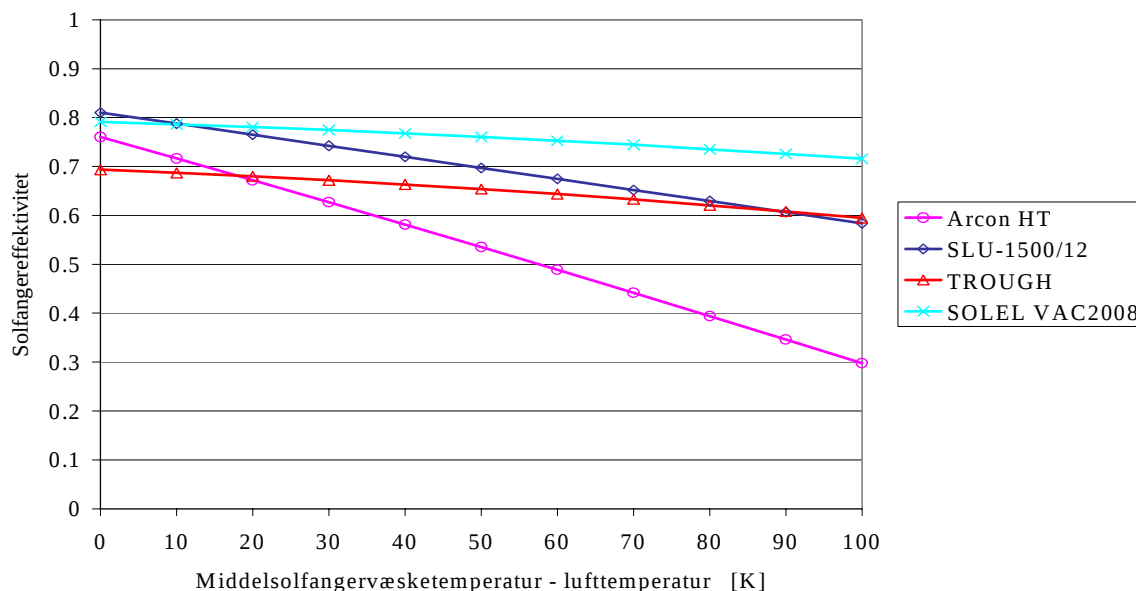
I beregningerne er følgende indfaldsvinkelkorrektioner benyttet:

Tabel 3. Indfaldsvinkelkorrektioner der er benyttet i beregningerne.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$K(\theta_{\text{trans}})$	1,0				1,11	1,05	0,26			0,0
$K(\theta_{\text{long}})$	1,0				0,99	0,97		0,71		0,0

7 Solfangereffektivitet og korrektioner

Som det fremgik ovenfor er effektiviteten givet i forhold til et bestemt areal. For at synliggøre dette forhold vises effektivitetsudtrykkene for solfangerne i Figur 9 og Figur 10 ved en direkte indstråling på 800 W/m^2 og en prøvningshældning på 40 grader for den plane solfanger og 45 grader for vakuumrørsolfangerne, baseret på henholdsvis netto- og bruttoarealet af solfangerne.



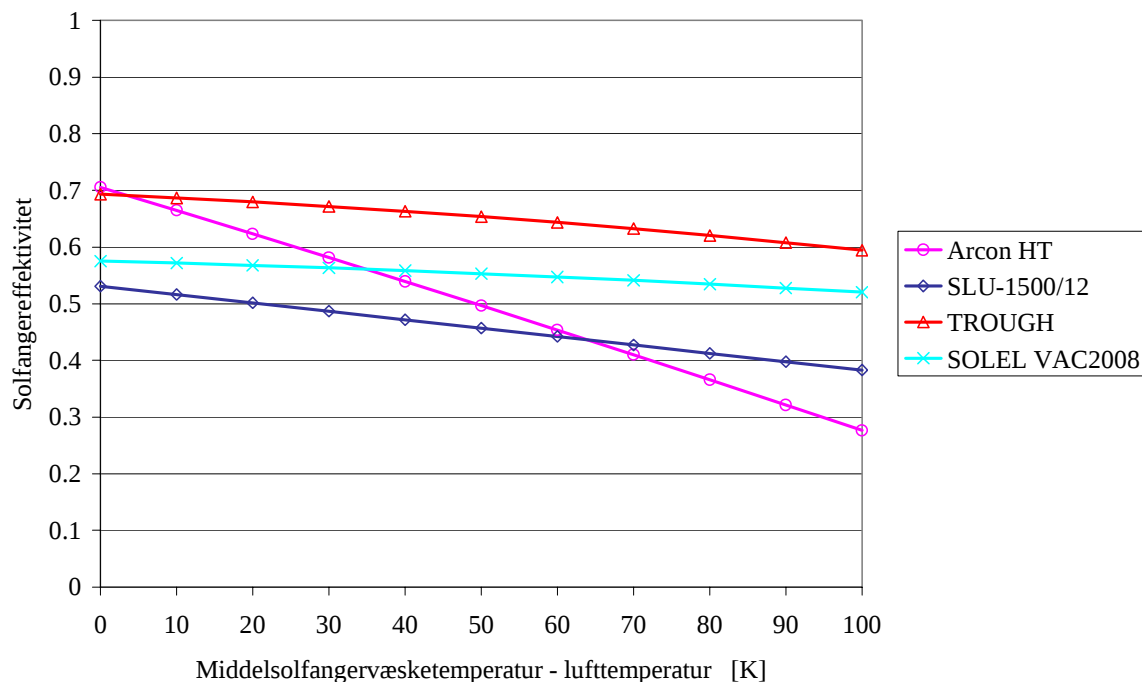
Figur 9. Solfangereffektivitet for indfaldsvinkel 0° og bestrålingsstyrken 800 W/m^2 . Effektiviteterne er baseret på nettoarealerne.

Ud fra nettoarealet findes følgende prioritering af solfangerne ud fra de ”nøgne” effektivitetsudtryk.

Tabel 4. Prioritering af solfanger ud fra simple effektivitetsudtryk og anvendelse af nettoarealet som referenceareal. Grå baggrund betyder ændret placering.

$T < 10^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C} < T < 20^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} < T < 90^\circ\text{C}$	$> 90^\circ\text{C}$
SLU	Solel	Solel	Solel
Solel	SLU	SLU	Trough
ARCON	ARCON	Trough	SLU
Trough	Trough	ARCON	ARCON

Det er formålet med nærværende arbejde at øge bevidstheden om at der eksisterer forskellige metoder til prioritering af forskellige solfanger og vise om disse medfører forskellige valg. På nuværende tidspunkt af gennemgangen er det muligt at foretage en prioritering på basis af effektivitetsudtrykket. Vi ser klart fra Tabel 1 at prioriteringen af solfangerne afhænger af temperaturniveauet. I det mest relevante område for temperaturer mellem 20 og 90 grader er rækkefølgen dog lige. Herudfra ville man vælge Solel, SLU, Trough og til sidst ARCON til sine anlæg.



Figur 10. Solfangereffektivitet for indfaldsvinkel 0° og bestrålingsstyrken 800 W/m^2 . Effektiviteterne er baseret på bruttoarealerne.

Ud fra nettoarealet findes følgende prioritering af solfanger ud fra de "nøgne" effektivitetsudtryk.

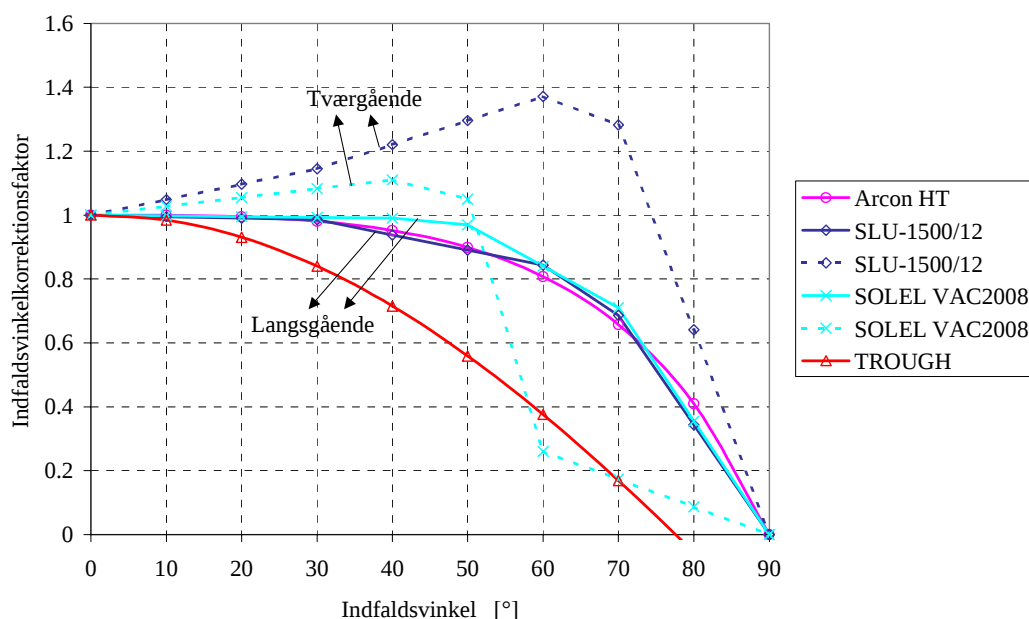
Tabel 5. Prioritering af solfanger ud fra en simpelt effektivitetsudtryk og anvendelse af bruttoarealet som referenceareal.

$T < 5^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$	$35^\circ\text{C} < T < 65^\circ\text{C}$	$> 65^\circ\text{C}$
ARCON	Trough	Trough	Trough
Trough	ARCON	Solel	Solel
Solel	Solel	ARCON	SLU
SLU	SLU	SLU	ARCON

Ved anvendelse af bruttoarealet som reference gælder der på lignende vis som for nettoarealet, at valget af solfangerne afhænger af temperaturniveauet. Vi ser dog tydelig fra Tabel 2 at de forskellige forhold mellem netto- og bruttoarealerne ændrer prioriteringen. Trugsolfangeren "Trough" er højest ydende i hele temperaturområdet, mens vakuumrørsolfangerne bliver rangeret lavere. Den plane HT-solfanger fra ARCON er god ved lave temperaturer, dog ikke helt så overbevisende ved høje temperaturer.

7.1 Indfaldsvinkelkorrektion

De to prioriteringsmetoder overfor lider under det forhold at de ikke tager hensyn til de forskellige korrektioner der skal foretages ved anvendelsen af solfangerne under ikke-eksperimentelle forhold. Den nok vigtigste korrektion er indfaldsvinkelkorrektionen, dvs. at tage hensyn til den vinkel som solstrålen rammer solfangeren. Indfaldsvinkelkorrektionerne for de undersøgte solfanger er vist i Figur 11.



Figur 11. Indfaldsvinkelkorrektionsfaktorer for de undersøgte solfangere.

Af Figur 11 ses at den tværgående indfaldsvinkelkorrektur for vakuumrørsolfanger adskiller sig afgørende fra de andre solfangertyper. Vi ser at effektiviteten overstiger 1, hvilket skyldes refleksioner og andre fysiske forhold. Indvirkningen heraf vil medføre at produktionen for lave tværgående indfaldsvinkler vil medføre en højere solvarmeproduktion for morgen og aftentimerne for sydvendte solfangere. Dette vil være af betydning i overgangsmånedene hvor solen vil kunne bestråle solfangerne hele dagen. Derimod vil der være mindre forskel om sommeren hvor solen står for højt på himlen for at kunne gøre afgørende forskel. Om vinteren er de tværgående vinkler så små at forskellen ikke er afgørende. Disse forhold afhænger af orientering og hældning af solfangerne og skal genovervejes for andre forhold end ved hældninger omkring 30-40 grader.

Trugsolfangere føres med solen hvilket medfører at indfaldsvinklen i den ene retning ikke ændres mens der i den anden retning (øst-vest) vil være korrektioner på basis af indfaldsvinklen.

Ud fra disse overvejelser kan vi forudsige, at inddragelse af indfaldsvinkelkorrektioner vil medføre en højere rangering af SLUs vakuumrørsolfanger, mens rangeringen af Solels vakuumrørsolfangere er mere kompliceret da den medfører højere værdier i det ene interval og lavere værdier i det andet interval.

7.2 Andre korrektioner og deres indflydelse

Ud over indfaldsvinklen skal der korrigeres for hældning og massestrømmen gennem solfangeren. Andre forhold der ikke er beskrevet i korrektionerne er f.eks. at højtemperatursolfangere har forskellig evne til at opfange diffus og/eller direkte sollys. Mens vakuumrørsolfangere er gode til at omdanne diffus stråling (også det der kommer fra bagsiden), så kan trugsolfangere ikke udnytte denne del af solens stråling. Trugsolfanger skal drejes til en sikker position ved høje vindhastigheder hvilket reducerer produktionen. Hvor meget er ikke bestemt endnu.

Trugsolfangere kan køre tryksat og med olie som medium hvorefter disse er i stand til at producere på meget høje temperaturer som udnyttes til produktion af elektricitet. Dette emne er ikke undersøgt, da det danske vejr ikke synes helt oplagt hertil.

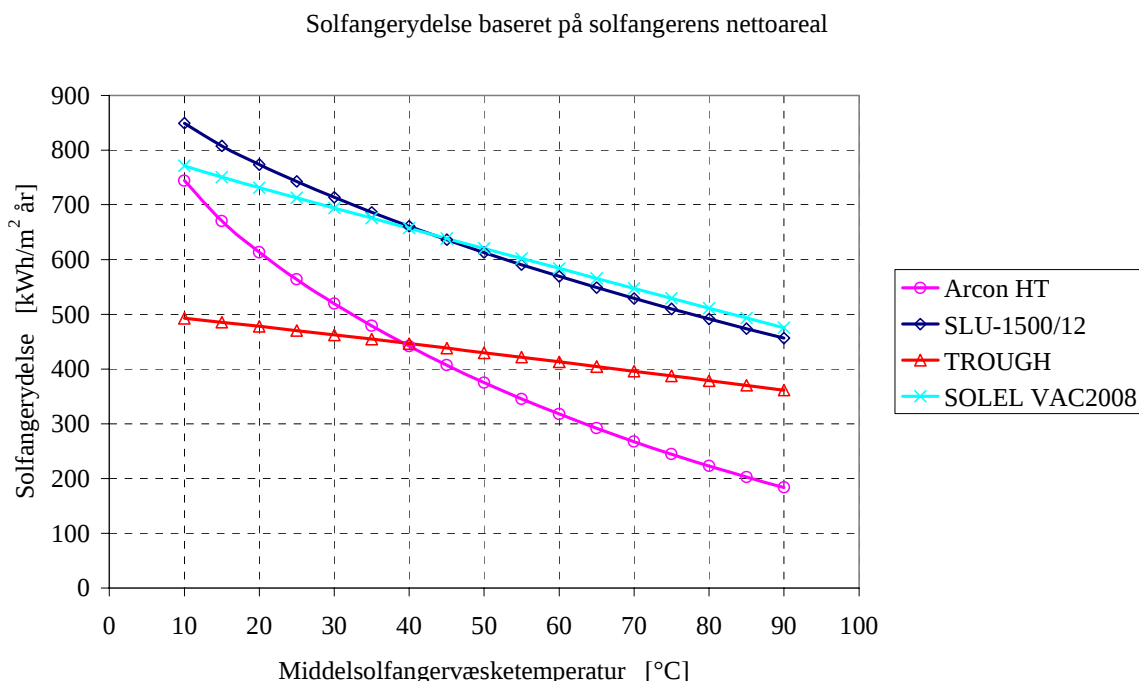
8 Solfangerydelse ved konstante temperaturer

Metoden: For at undersøge den årlige ydelse for de forskellige solfangerer er der foretaget simuleringer af solfangerne ved konstant driftstemperatur over hele året. Dette er gjort ved at påtrykke solfangerne en konstant indløbstemperatur og et meget højt flow, således at udløbstemperaturen kun bliver lidt højere ($<0,5^{\circ}\text{C}$) end indløbstemperaturen. Beregningerne er gentaget med indløbstemperaturer fra 10°C – 90°C i spring på 5°C . Der er regnet med sydvendte solfangere med en hældning på 45° (mens solfangere i felterne typisk står med en hældning på 40°) og med vejrdata fra det danske referenceår DRY.

Metodediskussion: Det skal allerede her fremhæves at metoden er nok den mest anvendte i litteraturen for sammenligning af forskellige systemer, da den er ret simpel og reproducerbar. Det betyder dog ikke at metoden viser sandsynlige resultater, da den viser produktionen under fuldstændig optimale og urealistiske forhold. Metoden tager f.eks. ikke hensyn til andre systemdele som tanke og forbrugsmønstre. Ud fra de overvejelser om korrektion som fremgår i afsnittene ovenfor, er det relevant at bemærke at simuleringerne løbende korrigerer for indfaldsvinklen, hældning, flow, diffus og direkte stråling osv.

Til forskel fra foregående sammenligninger beskrives de følgende resultater ikke som effektivitet men som solenergi der er nyttiggjort i solfangerfeltet. Da denne ydelse dog ikke står i forbindelse med den energi der kan anvendes af brugerne kaldes den her for bruttoydelse. I det følgende er solfangerydelserne vist som funktion af driftstemperaturen af solfangerne for forskellige referencearealer.

Figur 12 viser den beregnede årlige solfangerydelse pr. m^2 solfanger som funktion af middelsolfangervæsketemperaturen for de undersøgte solfangere baseret på nettoarealerne.



Figur 12 Årsydelse pr. m^2 solfanger som funktion af middelsolfangervæsketemperaturen. Baseret på nettoarealet af solfangerne.

Det ses i figur 12 at ydelsen fra solfangerne formindskes når driftstemperaturen øges. Jo højere temperaturen bliver desto større bliver fordelene for vakuumrør- og trugsolfangere i sammenligning med de plane solfanger.

Anvendes nettoarealet som referenceareal på "max-flow-metoden" bliver prioriteringen af solfangerne gjort afhængig af det temperaturniveau man beregner for. I følgende tabel vises prioriteringen for et sæt temperaturintervaller.

Tabel 6. Prioritering af solfanger ud fra en max-flow simuleringsmetode og anvendelse af nettoarealet som referenceareal.

T < 40 °C	T > 40 °C		
SLU	Solel		
Solel	SLU		
ARCON	Trough		
Trough	ARCON		

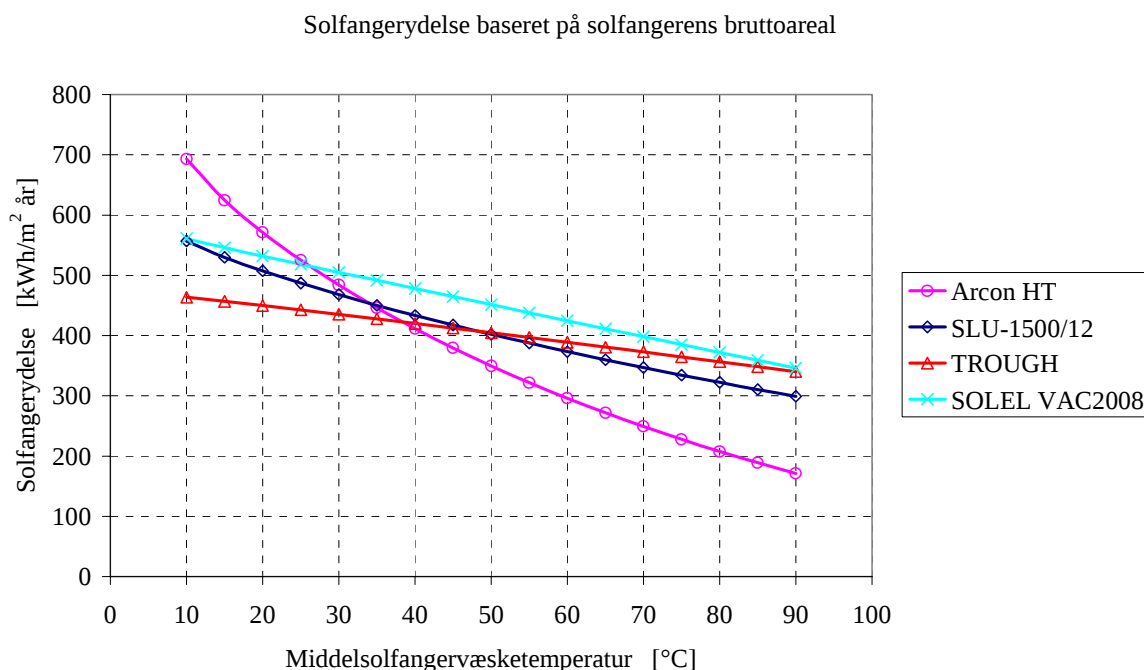
Det fremgår af tabellen at prioriteringen kan afgøres ud fra nogenlunde samme temperaturområde med skel ved 40° C. Her ombyttes prioriteringen af solfangerne, dog er vakuumrørsolfangerne de andre overlegne under alle forhold.

Tabel 7 viser nettoarealet for vakuumrør- og trugsolfangeren som vil medføre den samme ydelse som den plane solfanger. Værdier over 1 betyder at der skal mere solfangerareal til end for HT-solfangeren. For værdier under 1 spares der arealer.

Tabel 7. Forholdet mellem solfangerarealerne og HT-solfangerarealet, som resulterer i den samme årlige ydelse.

Solfangertype				
Driftstemperatur °C	HT	SLU-1500/12	TROUGH	Solel, VAC2008
10	1	0,88	1,51	0,96
20	1	0,79	1,28	0,84
30	1	0,73	1,12	0,75
40	1	0,67	0,99	0,67
50	1	0,61	0,87	0,60
60	1	0,56	0,77	0,54
70	1	0,51	0,68	0,49
80	1	0,45	0,59	0,44
90	1	0,40	0,51	0,39

Figur 13 viser den beregnede årlige solfangerydelse pr. m^2 solfanger som funktion af middelsolfangervæsketemperaturen for de undersøgte solfanger baseret på bruttoarealerne.



Figur 13 Årsydelse pr. m^2 solfanger som funktion af middelsolfangervæsketemperaturen. Baseret på bruttoarealet af solfangerne.

Beregningerne af solfangerydelsen pr. m^2 bruttoareal af solfangerne er vist i Figur 13 og fremgår endvidere af Tabel 8.

Tabel 8. Prioritering af solfanger ud fra en max-flow simuleringsmetode og anvendelse af bruttoarealet som referenceareal.

$T < 25^\circ\text{C}$	$25^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$	$35^\circ\text{C} < T < 55^\circ\text{C}$	$> 55^\circ\text{C}$
ARCON	Solel	Solel	Solel
Solel	ARCON	SLU	Trough
SLU	SLU	Trough	SLU
Trough	Trough	ARCON	ARCON

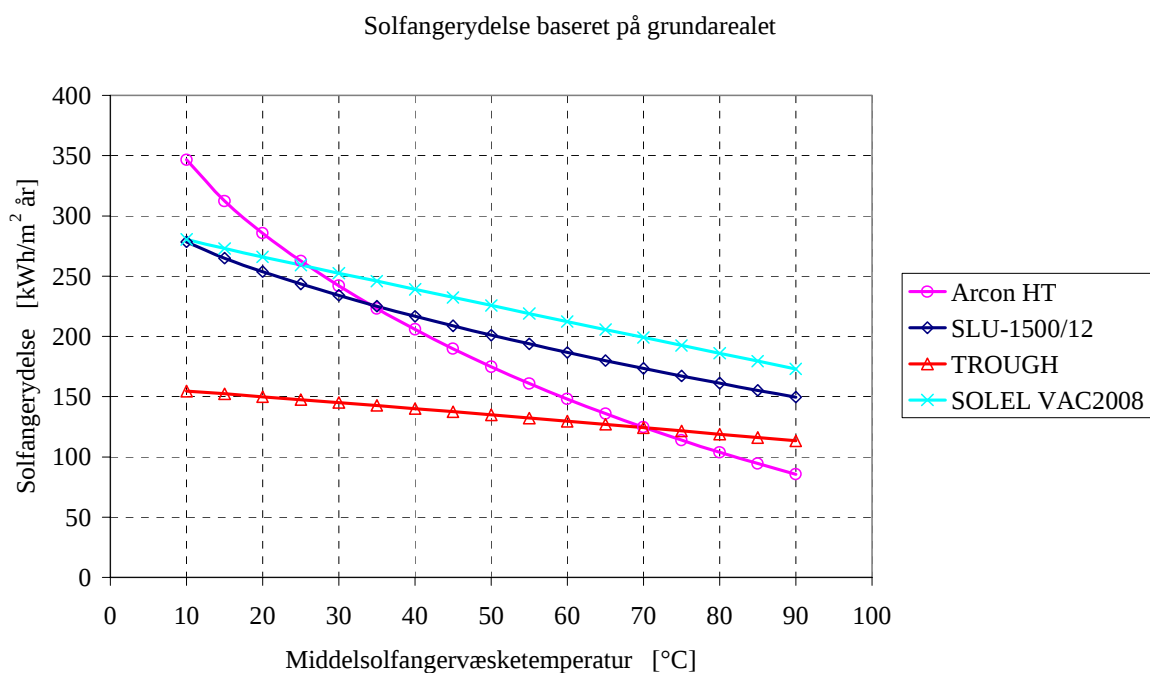
Ved at anvende max-flow-metoden er prioriteringen blevet mere afhængig af temperaturintervallet som solfangerne skal køre under. Vi ser at den plane ARCON-solfanger producerer bedst ved meget lave temperaturer, taber dog i prioriteringen ved høje temperaturer. SLU-vakuumsolfangeren holder førerpositionen over hele området over de andre solfangertyper, kun overgået af ARCON for lavere temperaturer. Trugsolfangeren fra IST slår SLU-solfangeren for meget højere temperaturer over 60° .

I Figur 14 er vist den beregnede årlige solfangerydelse pr. m^2 grundareal som funktion af middelsolfangervæsketemperaturen for de undersøgte solfanger. Hvis grundprisen er høj i det

område hvor man ønsker at opfører en solvarmecentral har det betydning for hvor meget energi man kan producere pr. arealenhed.

Grundarealet for solfangerfelter af de undersøgte solfangere er bestemt ud fra typiske rækkeafstande for de enkelte solfangere. For den plane solfanger og vakuumrørsolfangerne betyder det at grundarealet bliver ca. 2 gange bruttoarealet af solfangerne mens trugsolfangeren kræver et grundareal som er ca. 3 gange dens bruttoareal.

Bemærk at fremgangsmåden er ret umoden og man skulle foretrække sammenligning af grundarealer der er fundet som optimal afstand mellem solfangerne og hældningerne. Dette vil med stort sandsynlighed vise at vakuumrørsolfangerne kan pakkes tættere end plane solfanger af forskellige grunde.



Figur 14 Årsydelse for solfangerne pr. m^2 grundareal som funktion af middelsolfangervæske-temperaturen.

Figur 14 viser det samme billede som Figur 13 for den plane og vakuumrørsolfangerne, mens trugsolfangeren bliver straffet fordi den kræver større grundareal.

Vi finder nu følgende prioritering ved anvendelse af grundarealet som referenceareal.

Tabel 9. Prioritering af solfangere ud fra en max-flow simuleringsmetode og anvendelse af grundarealet som referenceareal.

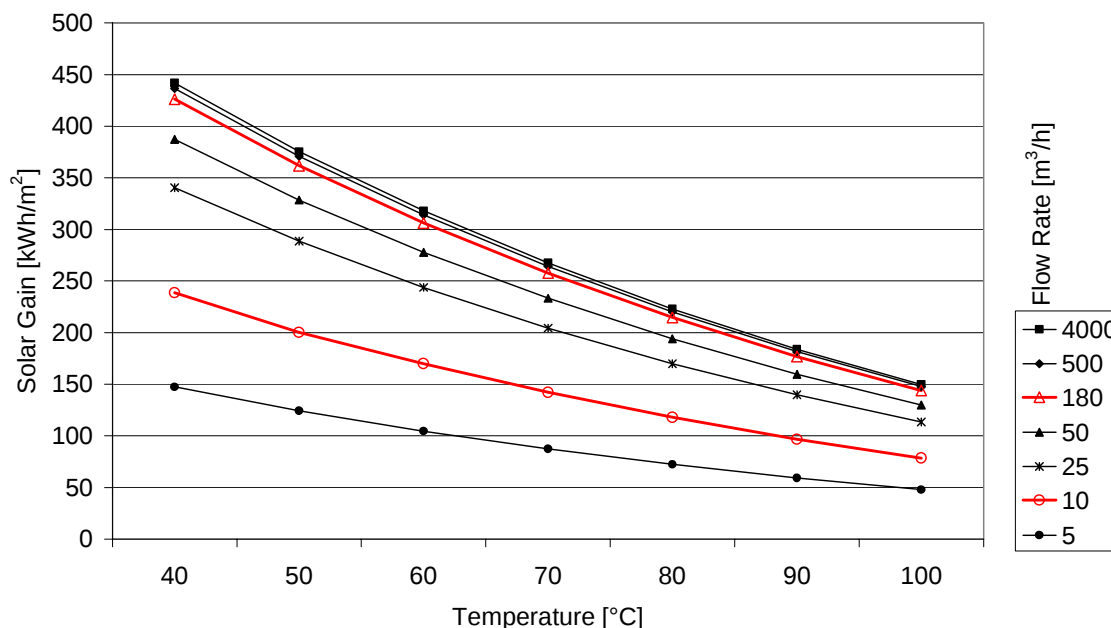
$T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$25\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$35\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	$> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
ARCON	Solel	Solel	Solel
Solel	ARCON	SLU	Trough
SLU	SLU	Trough	SLU
Trough	Trough	ARCON	ARCON

8.1 Evaluering af realitet i resultaterne

Som tidligere nævnt, anvendes ved max-flow-metoden væskestrømme, der er så store at de ikke vil forekomme på rigtige anlæg. Derfor undersøges i denne afsnit spørgsmålet:

Medfører Max-Flow-Metoden nogle egenskaber der medfører en u hensigtsmæssig rangering af solfangere?

Udgangspunktet for første undersøgelse er de ydelser der findes for den tidligere nævnte HT-solfanger. Reduceres den konstante massestrøm for max-flow metoden så den kommer til at gengive mere realistiske forhold, fremkommer kurverne i Figur 15.



Figur 15. Ydelse for ARCON HT solfangeren beregnet ud fra max-flow metoden med forskellige væskestrømme.

Det fremgår af Figur 15 at mindre væskemængder gennem solfangerne medfører mindre produktion, hvilket var forventet. Vi ser at væskestrømmen kan reduceres ret betragtelig, fra 4000 m³/h til under 180 m³/h, før kurven falder afgørende. Det vigtige her er at kurveformen ikke grundlæggende ændres for forskellige massestrømme.

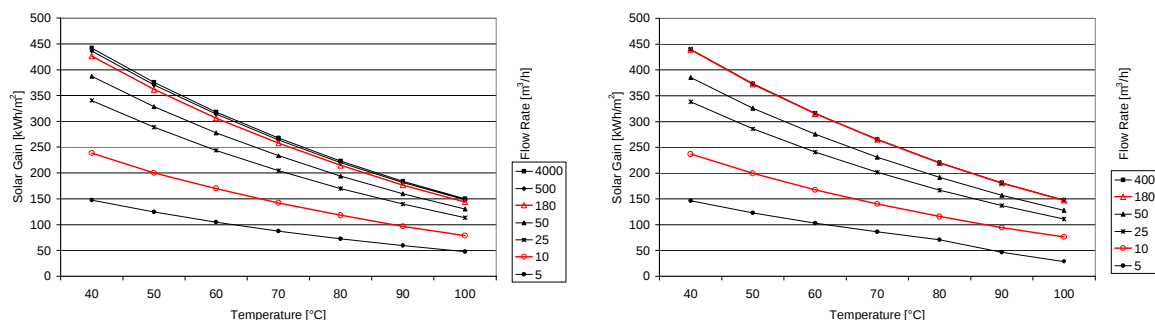
I figuren er to linier trukket frem for at vise den maksimale og minimale væskestrøm der kan opnås på solvarmecentralen i Marstal. En egentlig produktion vil altså ligge mellem disse to linier.

I de næste grafer vises de påvirkninger der findes ved at inddrage de mest relevante indflydelser / parametre som indgår i en solvarmecentrale i et virkelig anlæg. Vi ser på følgende egenskaber:

- Opstartsbetingelser for pumpen i solfangerfeltet med konstant væskestrøm (On-Off)
- Variabel væskestrøm

Indflydelsen af opstartsbetingelsen for pumpen i solfangerfeltet er vist i Figur 16. På venstre side gentages resultat der er fundet ovenfor. Her er strategien for opstarten, at temperaturen ud af solfangeren skal være større end indløbstemperaturen.

I figuren til højre er resultaterne bestemt ved at anvende en mere realistisk opstartsbetingelse, nemlig at solindstrålingen skal være over en bestemt værdi, typisk 100 W/m^2 hvilket også er anvendt i den foreliggende simulering. Ved udelukkende at anvende dette opstartskriterium vil produktionen i tilfælde af lave omgivelsestemperaturer være negative. Derfor skal kriteriet om en temperaturstigning stadig anvendes. Ved et rigtig anlæg vil dette ikke være nødvendig da man kun trækker varme ud af systemet hvis der produceres i solfangerkredsen. I Marstal er situationen kontrolleret ved at introducere krav om en positiv forventet effektivitet.

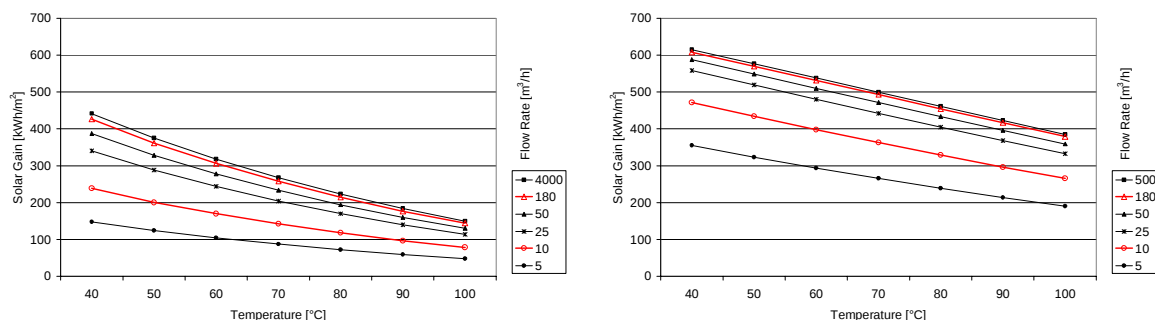


Figur 16. Indflydelse af opstartsbetingelse på ydelsen for ARCON HT solfangeren beregnet ud fra max-flow metoden med forskellige væskestrømme.

Det fremgår af Figur 16 at ydelsen næsten ikke er påvirket i det relevante strømningsområde mellem de to fremhævede linier. For meget små strømningshastigheder og høje temperaturer reduceres ydelsen afgørende. Disse ændringer ligger dog udenfor normalområdet for solvarmeproduktionen og ses i det følgende bort fra.

Vi kan altså konkludere at opstartsbetingelsen ikke har afgørende indflydelse på ydelsesberegningerne.

Kan man bruge max-flow sammenligninger eller fører de til forkerte beslutninger i sammenligning med en metode der inkluderer varmetab? Ser man på den ydelsesmæssigt mest lovende vakuumrørsolfanger og sammenligner resultaterne med den plane solfanger findes følgende sammenhænge mellem produktion og massestrømme.

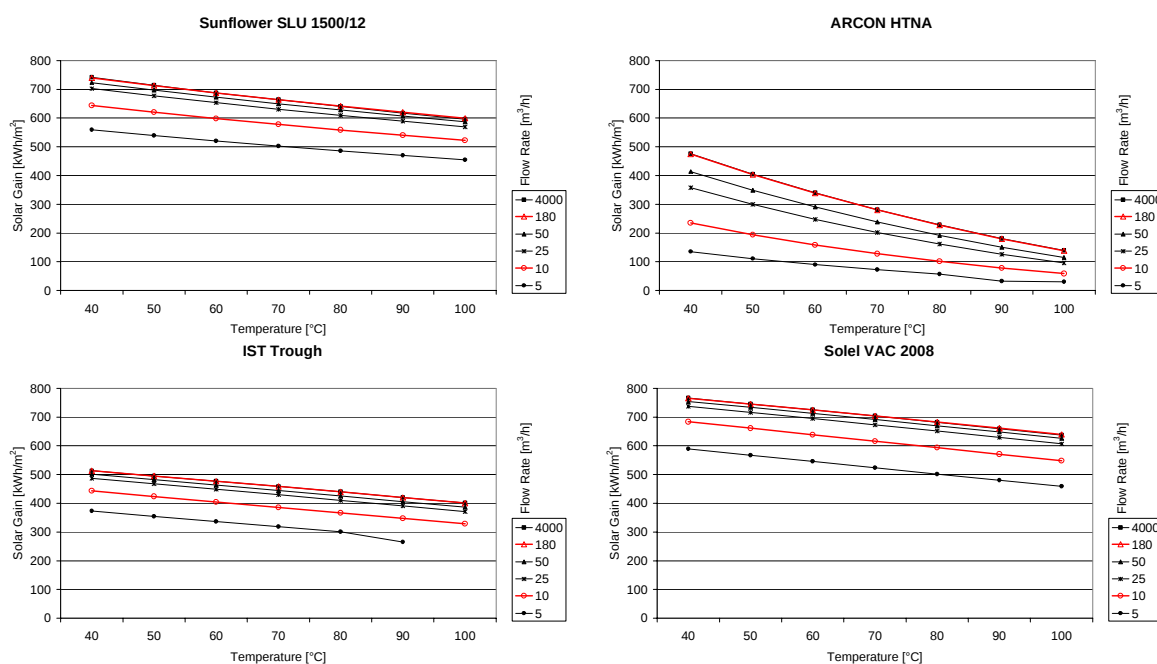


Figur 17. Ydelse for ARCON HT (venstre) og Solels vakuumrørsolfangeren beregnet ud fra max-flow metoden med forskellige, konstante væskestrømme.

Vi ser ved sammenligning af de to figurer at der findes samme rangering af solfangertyperne uafhængigt af massestrømme og temperaturniveau. Heraf kan man konkludere at en sammenligning af solfangere er meget tolerant overfor den væskestrøm man anvender.

Uafhængigt af denne observation kan man sige at et realistisk valg af massestrømsforholdene vil kunne give de mest anvendelige resultater, da også disse værdier kan anvendes, mens de er urealistisk høje ved anvendelse af max-flow-forhold.

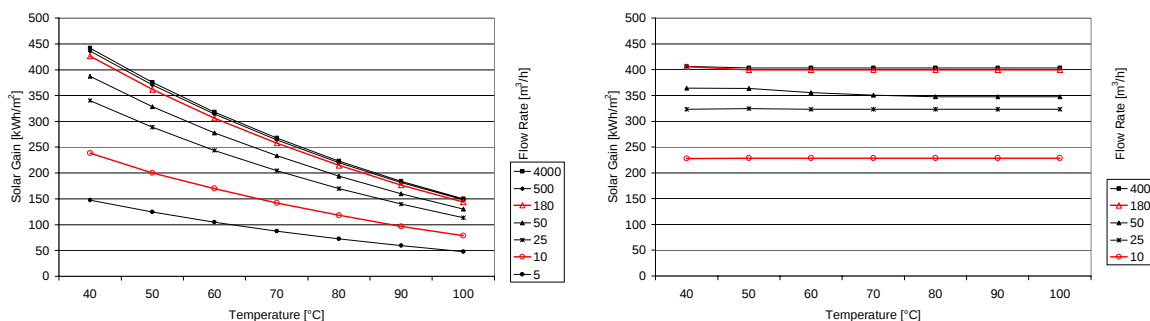
For de fire valgte solfangere findes følgende kurver med max-flow-metoden.



Figur 18. Ydelse for de fire valgte solfangere beregnet ud fra max-flow metoden med forskellige, konstante væskestrømme.

Ved sammenligning af hvert strømningsplot for de fire solfangere fremgår det at Sun Flower SLU og Soles VAC 2008 får højere prioritet end de andre og at prioriteringen er den samme for alle grafer. Herefter følger, afhængig af temperaturniveauet, enten den plane HTNA-solfanger eller IST-truget. Her er det afgørende at trugsolfangeren ikke er lige så sensitiv overfor flow og temperatur. HT'eren taber meget i ydelse med lav gennemstrømning og høje temperaturer. Ud fra disse betragtninger vil man dermed nok foretrække trugsolfangeren frem for den plane.

Styres solfangerkredsen med en ON-OFF-strategi, og dermed konstant væskemængde, gælder resultatet i Figur 16 ligeledes. Anvendes derimod en variabel styring som på solvarmecentralen i Marstal for at opnå en konstant og høj udløbstemperatur fra solfangerfeltet, så findes ydelser som vist i Figur 19.



Figur 19. Indflydelse af opstartsbetingelse på ydelser for ARCON HT solfangeren beregnet ud fra max-flow metoden med forskellige, dvs. variable væskestrømme for at opnå høje udløbstemperaturer.

Vi ser nu helt klart at en styring som i Marstal medfører en produktion der er næsten uafhængig af temperaturniveauet. Dermed finder vi samme tendens som dominerer resultaterne for en systemsimulering vist nedunder. Og endnu vigtigere for den foreliggende opgave er det specielle tilfælde for høje temperaturer. Resultatet er meget overraskende og er allerede angrebet af kollegaer som usandsynligt. Derfor er der behov for at eftervise eller omstøde resultaterne for systemsimuleringen. Hvis man derimod accepterer observationen som at være tilfældet, kan vi konkludere følgende forklaring og konklusioner for den nærværende undersøgelse:

Når styringen skal opnå lave temperaturer ud af solfangerne er effektiviteten høj. Når man kræver høje temperaturer for længere perioder bliver effektiviteten i lange perioder lav. Efter nogen tid vil man "presse systemet" så hårdt at der ikke fremkommer noget nævneværdigt effektivitetstab og resultatet vil være stabilt, som vist. Anvendes variabelt flow er situationen helt anderledes, men det er udløbstemperaturerne fra solfangerfeltet også (lavere og varierende).

Ud fra simuleringer vil vi finde følgende rangering over hele temperaturområdet:

Tabel 10. Prioritering af solfanger ud fra en max-flow simuleringstype med variabel flowstyring.

Solel
SLU
Trough
ARCON

Da produktionen ikke påvirkes af temperaturen kan en max-flow-metode med variabelt flowkontrol ikke anbefales. I stedet vil en systemsimulering kunne give mere indblik i de ydelser der kan forventes i en bestemt anlæg.

9 Konstant temperaturkrav metode

Til valg af solfanger der skal demonstreres på Marstal-anlægget, har det rådgivende ingeniørfirma Planenergi anvendt en model til simulering af solfangerfelter der ligner max-flow metoden. I stedet for at holde massestrømmen konstant bliver denne beregnet, så man opnår en konstant temperaturstigning over solfangeren. Man forventer umiddelbar mere realistiske resultater end fundet ved max-flow-metoden.

Resultaterne for ΔT -metoden fremkommer ved at tilpasse modellen fra forrige afsnit. Fra resultaterne kan der vises, at man findes overensstemmelse for de beregnede ydelser, når ΔT sættes til en minimal værdi. Dette viser at metoderne er grundlæggende sammenlignelige. For større temperaturstigninger øges forskellen mellem metoderne. Når $\Delta T=40$ fås en produktion der er ca. 5% mindre for lave temperaturer i forhold til resultaterne fundet vha. max-flow-metoden, samt ca. 7% mindre for høje temperaturer. Dermed giver ΔT -metoden og max-flow-metoden samme rangering. Forskellen viser sig dog ved inddragelse af økonomien som diskuteres nedunder.

10 Systemsimulering

Ved systemsimuleringen repræsenterer den anvendte model hele systemet, solfangerfelter, rør, varmevekslere, tanke m.m. Systemet beskrives ved grænsebetingelser for systemet der er individuelle for anlæggene, herunder varmebehovet i fjernvarmesystemet. Dermed er en systemsimulering case-afhængig og vanskelig at reproducere. Til gengæld er resultaterne de mest realistiske i sammenligning med de andre metoder. For indledende undersøgelser er de andre metoder at foretrække, mens systemsimuleringen er at foretrække ved en detaljplanlægning.

For de anlæg der dimensioneres i Danmark de sidste år har man i mange tilfælde indført variabel flowkontrol. Dermed er de resultater der er fundet ovenfor også gældende her, nemlig at variabelt flow medfører at ydelsen bliver uafhængig af temperaturniveauet som styringen sikrer. Resultatet skal reproducere af andre før det kan betragtes som gyldigt. Derfor skal denne observation tages med forbehold.

I de foreliggende beregninger anvendes en model med følgende overordnede egenskaber som er inspireret af Marstal-anlægget:

- 4000 m² transparent solfangerareal (bestemt i projektbevillingen)
- 300 liter tankvolumen per solfangerareal (Marstal har 260 liter/m²)
- Temperatursetpunkt fra solfangerfeltet er 82° C.
- Fjernvarmenettets forsyningstemperaturen på 72° C og returen på 40° C om sommeren og 35° C om vinteren.

Modellen stammer fra Ph.d.-arbejdet dokumenteret i bl.a. (Heller, A., 2001). Heri dokumenteres valideringen af modellen på basis af målinger fra 1996 til 2000. Dermed anses denne model for at være pålidelig. Det er her centralt at bemærke at styringsstrategien på Marstal-anlægget vil forsøge at styre væskestrømmen igennem solfangerfeltet således at udgangstemperaturen fra feltet holdes tæt på et konstant setpunkt. Det er vist at styringen opnår dette med en ret overraskende nøjagtighed.

Hvis læseren er interesseret i dette omfattende arbejde kan den hentes fra Internettet på adressen <http://www.ibe.dtu.dk/medarbej/ajh/ajhdk.htm>.

For de fire valgte solfanger findes produktionstal vist i Tabel 11.

Tabel 11. Årlig nettoydelse beregnet for en 4000 m² anlæg med egenskaber som solvarmecentralen i Marstal for udvalgte solfangere, sorteret efter ydelsen.

Bemærk at produktionstallet pga. styringen er lav i forhold til de målte værdier. Sammenligningen er dog realistisk.

Solfangeridentifikation	Total årlig nettoydelse pr. netto-m² solfanger
Sun Flower SLU 150/12	585
Solel VAC 2008	458
IST-Trough	425
ARCON HT-NA	386
ARCON HT (old)	366

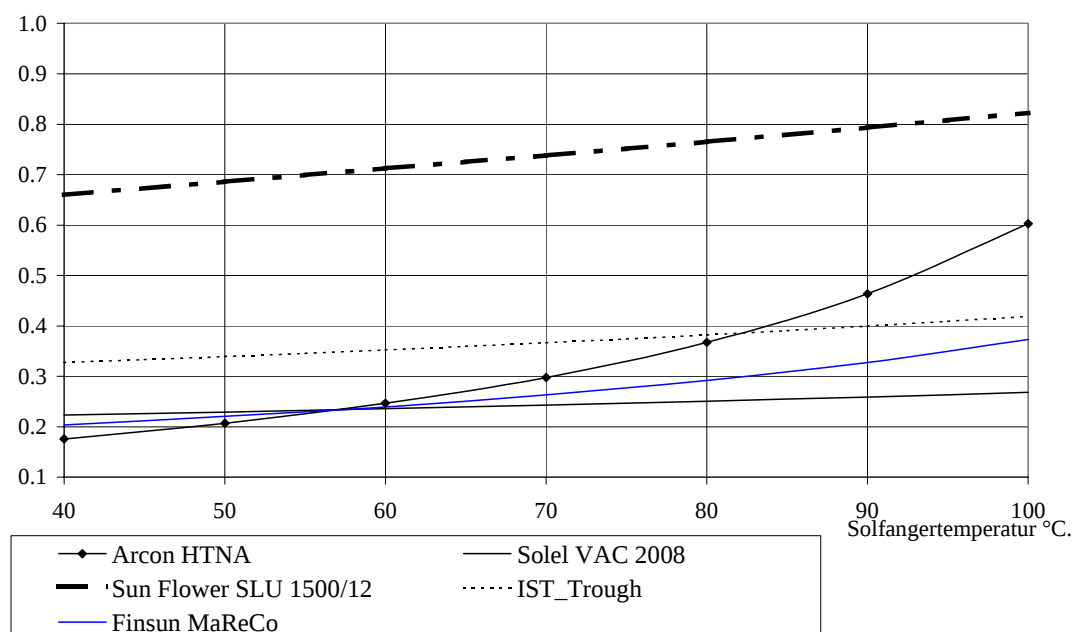
Sammenlignes resultatet med de max-flow simuleringer der inddrager variabel styring overrasker det at Solels og Sun Flowers vakuumrørsolfangere har byttet plads. Ellers er rækkefølgen éns. Naturligvis kan sammenligningen bygges på brutto- og grundarealbetragningen og man får så en ny inddeling. Det overlades til læseren at gennemføre denne simple øvelse.

11 Økonomiske forhold

I det foregående afsnit bygger sammenligningen af solfangere på deres varmeydelse. I dette afsnit inddrages investeringen og rentabiliteten for investeringen. Ligesom man kan bestemme ydelsen på flere måder er det ligeledes tilfældet for rentabiliteten. Her anvendes to meget simple modeller for at undgå komplicerede forklaringer for valg af bestemte parametre. Den ene metode beskriver pris-/ydelsesforholdet hvor prisen (investeringen) divideres med ydelsen. I den anden metode ganges priser med en finansieringsfaktor som er fundet gennem flere års erfaring med anlægsprojekter som solvarmecentraler og fjernvarmesystemer. Finansieringsfaktoren er fundet til 6,7% og de resulterende størrelser er energiprisen som en 20-årig finansiering medfører. Metoden bliver anvendt af flere rådgivende ingeniørfirmaer, herunder Planenergi på udvidelsen i Marstal.

Selve priserne for sammenligningen er beregnet af danske producenter der er gået i samarbejde med de udenlandske producenter af solfangerne. Priserne er lidt forskellige med hensyn til f.eks. detaljeringsgrad, modenhed i tilbudsgivning og specifikationer. Efter gennemgang af de resulterende priser findes de følgende resultater. Der må bemærkes at priserne ikke gengives da enkelte tilbud er givet med tilsagn om hemmeligholdelse.

Anvendes max-flow-metoden til at bestemme ydelsen findes pris-/ydelsesværdier som vist i Figur 20.



Figur 20. Energiprisen for valgte solfangere og temperaturniveauer ved anvendelse af max-flow-metoden.

Før egentlige konklusioner drages må følgende fremhæves:

- Sensitiviteten i forhold til priser er afgørende større end sensitiviteten i forhold til ydelsen.
- Usikkerheden i forhold til priser er meget større end i forhold til ydelsen.

I Figur 20 er der sammenlignet solfangernes pris-/ydelsesforhold (p/y) for forskellige temperaturer. Herfra findes en rangering af solfangerne for givne temperaturintervaller som er vist i Tabel 12.

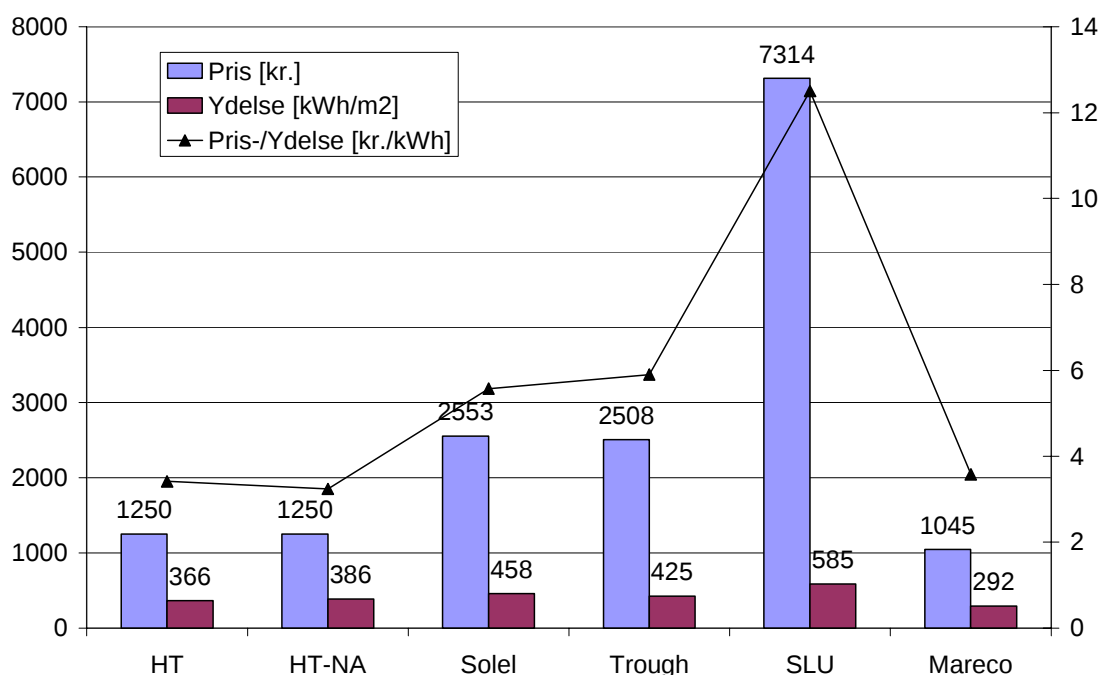
Tabel 12. Prioritering af solfanger ud fra en max-flow simuleringsmetode og anvendelse af grundarealet som referenceareal.

$T < 57\text{ }^{\circ}\text{C}$	$57\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
ARCON	Solel	Solel
MaReCo	MaReCo	MaReCo
Solel	ARCON	Trough
Trough	Trough	ARCON
SLU	SLU	SLU

Af figuren og tabellen kan der konkluderes en række forhold:

- Den plane solfanger er de andre solfangere overlegen for lave produktionstemperaturer.
- Vakuumsolfangeren fra Solel er den bedste for temperaturer over ca. 57 grader, dvs. for næsten hele temperaturområdet.
- MaReCo viser overraskende gode resultater for høje temperaturer, hvilket hovedsagelig skyldes den meget lave pris der endda ligger under prisen for plane solfangere. Usikkerheden ligger dog i at denne type solfanger ikke er produceret i større mængder endnu, hvilket giver stor usikkerhed med hensyn til priserne.
- Trough-solfangerne kan konkurrere med de plane solfanger for temperaturer over ca. 80 grader, dog stadig slået af den ene af vakuumsolfangere.
- Det bliver klart af sammenligningen at vakuumsolfangeren fra Kina (Sun Flower SLU) ikke har nogle chance for at komme i nærheden af en fornuftig pris-/ydelsesforhold. Det viser altså at ydelsen kan være fejlvisende hvis prisen ikke medinddrages. Det må dog forventes at priserne daler afgørende når Kina indgår i det internationale marked.
- Sammenligningen mellem veldokumenterede og mindre dokumenterede solfanger er en nødvendighed, hvis informationerne mangler, men skal dog undgås på længere sigt. Her er usikkerheden i forhold til kinesiske produkter, usikkerheden i forhold til montering og kobling af solfangerne ganske afgørende for resultatet.

Til sidst sammenlignes de valgte solfangere ud fra de beregnede, årlige nettoydelse for en hel solvarmecentral. Vi finder hermed pris-/ydelsesforhold som vist i Figur 21.



Figur 21. Pris-/ydelsesforhold for valgte solfangere og temperaturniveauer ved anvendelse af dynamisk systemsimulering.

Vi ser fra den sidste sammenligning i Figur 21, at de plane solfanger er meget økonomiske, da bl.a. temperaturniveauet igennem hele året er ret lave. Vi finder også at MaReCo medfører god pris-/ydelsesforhold. Solels vakuumrør- og ISTs trugsolfanger har sammenlignelige pris-/ydelsesforhold, mens Sun Flowers vakuumrørsolfanger har på trods af en meget høj ydelse et alt for højt pris-/ydelsesforhold, da prisen er urealistisk høj.

Det forhold, at tilbudene er begrænset til "lokale" producenter, kan nok forsvares med bl.a. de uhensigtsmæssigt store volumener der skal transporteres, og de få lande der anvender sådanne anlæg. Da markedet for solfangercentraler endnu er begrænset medfører det at ikke alle potentielle producenter har meldt sig på markedet. Gennem samarbejde mellem danske og udenlandske parthavere har nærværende projekt været med til at få nogle af disse producenter til at indse mulighederne i specielt vakuumrør- og trugsolfangere. Der skal dog et større marked til før disse producenter tilpasser deres standardprodukter til solvarmecentraler.

Et andet forhold der skal drages med i sammenligninger for solfangerer er, at solfangerfelter af vakuumrør ikke er optimeret til formålet. Det indgår relativ små standardmoduler, hvilket medfører en alt for stort pris for komponenterne og endnu større for rørarbejdet. Endvidere er strømningsforholdene, fastgørelsesforholdene m.m. ikke optimeret til store anlæg. Antages disse tilpasset store moduler vil man kunne forvente prisreduktioner på mindst 30% som det var tilfældet for de plane solfanger fra de små til store moduler. Det kan altså forventes at prisen for vakuumrørsolfanger opbygget som store moduler vil medføre andre konklusioner for det foreliggende projekt. Disse forhold gør sig ikke gældende for trugsolfangere som anvendes til meget store anlæg til produktion af elektricitet i bl.a. USA og for nylig også i Europa og Asien.

Bemærk: Konklusionerne og diskussionen heraf er gengivet i den indledende opsummering af rapporten.

12 Referencer

- Furbo, S. (1998) *Vakuumrørsolfangere - Fremtidens solfanger?* Undervisningsnotat U-029, Institut for Bygninger and Energi, Danmarks Tekniske Universitet, Brovej 1, DTU, 2800 Lyngby.
- Heller, A. (1998) *Optimering af styringsstrategien for solvarmecentralen i Marstal*. Sagsrapport SR 9910, Institut for Bygninger and Energi, Danmarks Tekniske Universitet.
- Heller, A. (2000) *Solvarmecentraler*. Undervisningsnotat, U-043, Institut for Bygninger and Energi, Danmarks Tekniske Universitet, ISSN 1396-402X.
- Heller, A. (2001) *Lagre Scale Solar District Heating - Evaluation, Modelling and Designing*. R-046. Ph.D.-Thesis, Dept. of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, ISSN 1396-4011, ISBN 87-7877-050-5, Building 119, DTU, DK-2800 Lyngby.
- Krüger, D., Heller, A., Hennecke, K. & Duer, K. (2000) *Parabolic Trough Collectors for District Heating Systems at High Latitudes?* Eurosun 2000, Copenhagen.
- Krüger, D., Hoffschmidt, B., Hennecke, K., Pitz-Paal, R., Rietbrock, P. & Fend, Th. (2000) *Results from Parabolic Trough Collectors for process Heat at the DLR Cologne*. Proceedings of the 10th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, pp. 113-120 .
- Qin, L. & Furbo, S. (1999) *Vakuumrørsolfangere fra Kina- Vacuum tube solar collectors from China*. Rapport R-032, Institut for Bygninger and Energi, Danmarks Tekniske Universitet, Brovej 1, DTU, 2800 Lyngby, ISSN 1396-4011, ISBN 87-7877-032-7.
- Shah, L. J. (1999) *Indfaldsvinkelkorrektioner for vakuumrørsolfangere*. Sagsrapport SR-9922, Institut for Bygninger and Energi, Danmarks Tekniske Universitet , Brovej 1, DTU, 2800 Lyngby, ISSN 1396-402X.
- Svensden, S. (1981) *Solfangeres effektivitet- Målt og beregnet*. Meddelelse Nr. 109, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet.