

Centrum för solenergiforskning

Solar Energy Research Center

Solvärmesystem för hög täckningsgrad

Slutrapport från projekt 13770-1 inom
FUD-program solvärme 2001-2003

Svante Nordlander
Mats Rönnelid

SERC

Inst. För matematik

naturvetenskap och teknik

Högskolan Dalarna

781 88 Borlänge

Tel: +46 23 778000

Tel: +46 23 778701

Besöksadress/Street adress:

Forskargatan 6

Borlänge



HÖGSKOLAN
Dalarna

ISSN 1401 - 7555

ISRN DU-SERC--86--SE

April 2004

Sammanfattning

Dagens kombisolvärmesystem för enfamiljshus har i storleksordningen 10 m² solfångare och kan täcka i runda tal 10 – 30 % av det årliga värmebehovet. Ökar man solfångarytan för att öka solvärmetäckningsgraden uppstår det vanligtvis en överproduktion av värme sommartid vilket kan orsaka problem i form av termisk utmattning av material, att material förstörs eller att säkerhetsventiler utlöses med driftsstopp som följd. Vidare förkortas glykolens livslängd radikalt och detta kan ge följskador såsom korrosion, beläggningar i rören och t o m igensättning av systemet.

Ett sätt att undvika problemen med överhettning i solvärmesystem med hög täckningsgrad är att använda lastanpassade solfångare. Med detta menas solfångare som har en verkningsgrad som är beroende av solhöjden och varierar över året. Verkningsgraden är hög när värmelasten är hög (vanligtvis sen höst, vinter och tidig vår) medan verkningsgraden är låg då värmelasten är låg (vanligtvis sen vår, sommar och tidig höst).

I denna rapport visas att det är möjligt att bygga lastanpassade solfångarsystem med hög täckningsgrad för enfamiljshus med solfångarytor som täcker hela villatak (≥ 40 m²), utan att den termiska påfrestningen på systemet blir större än för vanliga solvärmesystem med 10 m² plana solfångare. Detta kan göras med samma systemkomponenter som finns i system med plana solfångare. De lastanpassade solfångarna levererar ungefär samma energimängd per m² som plana solfångare, men de bör kunna bli billigare, på grund av lägre materialkostnad. Det finns även en potential att konstruera lastanpassade solvärmesystem med begränsad stagnationstemperatur, vilket kan möjliggöra användandet av billigare material. En och samma solfångartyp är lämplig för såväl stora som små system och för olika takvinklar.

I rapporten redovisas optimerade solfångargeometrier för lastanpassade solvärmesystem, geometrier och optiska egenskaper för praktiskt möjliga solfångare samt beräkningar av förväntat årsutbyte, stagnationstemperaturer, stagnationstider och kostnader. Testresultat för två prototyper av lastanpassade solfångare presenteras. Optimeringsalgoritmer för design av optiken för lastanpassade solfångare i system samt ett ray-tracingverktyg och snabba men ändå tillräckligt noggranna simuleringsverktyg har utvecklats.

Summary

In a northern European climate a typical solar combisystem for a single family house normally may save between 10 and 30 % of the auxiliary energy needed for space heating and domestic water heating. It is considered uneconomical to dimension systems for higher energy savings. Overheating problems may also occur. One way to avoid these problems is to use a collector that is designed so that it has a low optical efficiency in summer, when the solar elevation is high and the load is small, and a high optical efficiency in early spring and late fall when the solar elevation is low and the load is large. The study investigates the possibilities to design the system and, in particular, the collector optics, in order to match the system performance with the yearly variations of the heating load and the solar irradiation. It seems possible to design practically viable load adapted collectors, and to use them for whole roofs ($\geq 40 \text{ m}^2$) without causing more overheating stress on the system than with a standard 10 m^2 system. The load adapted collectors collect roughly as much energy per unit area as flat plate collectors, but they may be produced at a lower cost due to lower material costs. There is an additional potential for a cost reduction, since it is possible to design the load adapted collector for low stagnation temperatures, making it possible to use less expensive materials. One and the same collector design is also suitable for a wide range of system sizes and roof inclinations.

The report contains descriptions of optimized collector designs, properties of realistic collectors, and results of calculations of system output, stagnation performance and cost performance. Test results for two collector prototypes are reported. Appropriate computer tools for optical analysis, optimization of collectors in systems and very fast simulations have been developed.

Abstract

Solar thermal combisystems with for systems with large solar fractions are presented. The report presents optimized load adapted concentrating collector designs, properties of realistic collectors, and calculated data for system output, stagnation performance and cost performance. Comparisons with traditional flat plate collectors are made. Test results for two load adapted collector prototypes are reported. Appropriate computer tools for optical analysis, optimization and fast simulations have been developed.

Förord

Detta är slutrapporteringen för projektet ”Solvärme för hög täckningsgrad”. Det huvudsakliga resultatet av projektet är den licentiatavhandling som Svante Nordlander kommer att lägga fram vid Uppsala Universitet hösten 2004 (Nordlander, 2004). I denna rapport beskrivs de huvudsakliga resultaten från projektet. För den som är intresserad av de mer teoretiska sambanden och resonemangen hänvisas till Nordlander (2004). Delar av projektet har också rapporterats i konferensbidrag (Nordlander och Lorenz, 2003), samt använts vid samverkan med andra forskargrupper som arbetar med likartad problematik (Helgesson *et al.*, 2002). Vidare har två examensarbeten med anknytning till projektet gjorts av studenter inom ESES-utbildningen, vid Högskolan Dalarna (Fiedler, 2002; Fares, 2002).

Vi vill tacka Frank Fiedler och Fares Mustafa som gjorde examensarbetena samt Anna Helgesson och Björn Karlsson för samarbete och kunskap kring höst/vår-Marecon. Vi vill även tacka medarbetarna vid SERC som uppmuntrat till detta arbete och hjälpt till vid mätningarna. Vidare vill vi tacka Sunstrip som skänkt absorbatörer och Skultuna Flexible AB som levererat reflektormaterial till prototyperna som byggts.

Projektet har bekostats av Statens Energimyndighet genom FuD-program Solvärme 2001-2003, projekt nr 13770-1, samt forskningsanslag från Högskolan Dalarna som möjliggjort genomförandet av licentiatarbetet för Svante Nordlander.

Innehåll

1. Inledning	6
1.1 Kombisolvärmesystem med hög solandel	6
1.2 Principen för lastanpassade solfångare:	7
1.3 Undersökningens syfte och förutsättningar	10
2. Termiska och optiska prestanda hos lågkoncentrerande solfångare	12
2.1 Värmeförluster	12
2.2 Projicering av strålning	13
2.3 Optisk prestanda	14
3. Beräkningsmetoder för lastanpassade solfångare	16
3.1 Optimering av optik	16
3.2 Simuleringar med TRNSYS och Excel	17
4. Egenskaper hos teoretiskt optimala lastanpassade solfångare	19
5. Praktiskt möjliga solfångare	22
5.1 Undersökta solfångartyper	22
5.2 Ray tracing	22
5.3 Resultat från beräkningar	22
5.4 Resultat från mätningar	24
5.5 Lastanpassade solfångare för olika systemstorlek	26
5.6 Utbytets beroende av taklutning	27
6. Ekonomi för system med lastanpassade solfångare	28
6.1 Materialkostnader	28
6.2. System med olika värmelast	29
7. Sammanfattande slutsatser	31
8. Möjlig och önskvärd fortsättning på projektet	33
Referenser	34

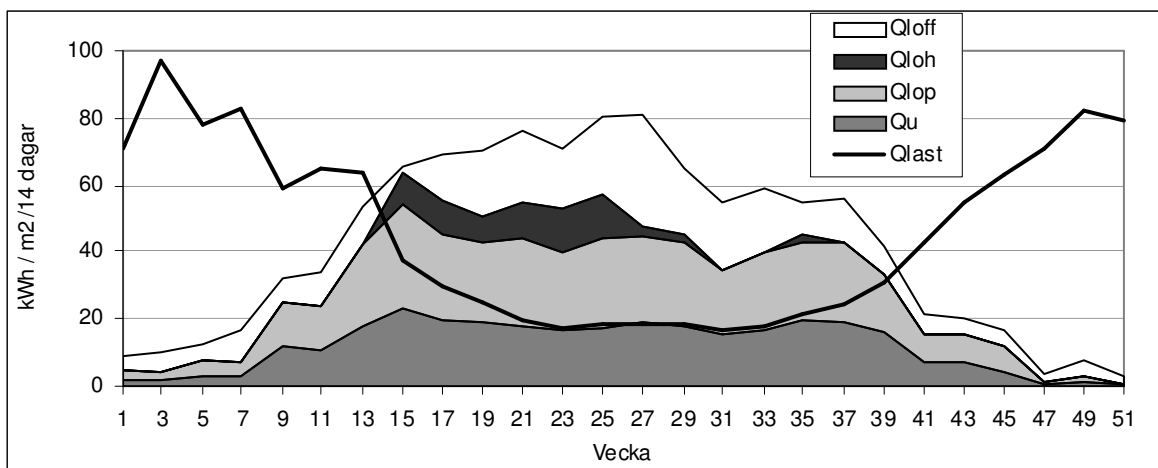
1. Inledning

1.1 Kombisolvärmesystem med hög solandel

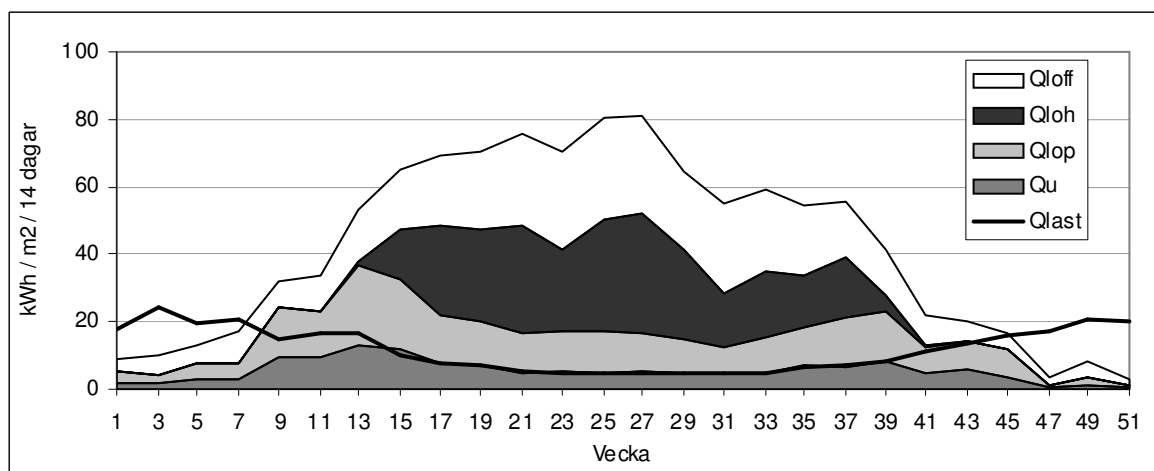
Dagens typiska kombisystem för solvärme ersätter i storleksordningen 10-30 % av den köpta energin för varmvatten och värme i ett normalt småhus. Denna inbesparing kan upplevas som så liten, jämfört med de insatser som krävs för att handla upp och installera systemet, att solvärmens inte betraktas som intressant även om energikostnaden är acceptabel.

Samtidigt finns det ett intresse för att installera system med hög täckningsgrad, för att därigenom minska beroendet av andra energislag. Detta kan göras t ex genom att solfångararean ökas markant, eller att högeffektiva solfångare med låga värmeförluster, t ex vacuumrör, används. I exempelvis Österrrike är det vanligt att solvärmesystem med 20-40 m² solfångare installeras på enfamiljshus (Weiss, 2003).

Stora solvärmesystem i förhållande till värmelastens storlek innebär dock allvarliga problem med överhettning då det inte finns avsättning för all värme som produceras sommartid. Detta illustreras i figur 1 och 2. Figur 1 visar utbytet från ett solvärmesystem med 10 m² plana solfångare och 750 l ackumulatortank i ett hus med total årlig värmelast på 12 MWh. Under sommarveckorna 21 – 36 täcker solvärmeutbytet värmebehovet helt, medan någon annan energikälla behövs under resten av året. Under veckorna 13-29 uppkommer perioder då ackumulatortanken är full. Solinstrålningen leder då till onödigt höga solfångartemperaturer (> 100°C) utan att nyttig värme kan produceras vilket är markerat som värmeförluster under stagnation (Q_{loh}) i figur 1. I figuren syns också att solvärmens kan täcka ca 25% av det totala värmebehovet på årsbasis. Om samma hus utrustas med 40 m² solfångare, som i figur 2, ökar andelen solvärme av det totala värmebehovet till 51%. Samtidigt ökar värmeförlusterna under stagnation med över 300% då man inte har nytta av den ökade värmeproduktionen under sommarmånaderna. Beräkningarna är gjorda med den TRNSYS-modell som beskrivs i kapitel 3.2.



Figur 1. Villasolvärmesystem med 10 m² plana solfångare. Figuren visar solfångarutbyte (Q_u), solfångarförluster då solfångaren är i drift (Q_{lop}), är i stagnation (Q_{loh}) eller då strålningsnivån är för låg för att solfångaren ska starta (Q_{loff}). Den heldragna linjen visar husets värmelast per m² solfångararea (Q_{last}).



Figur 2. Villasolvärmesystem med 40 m² plana solfångare. Figuren visar solfångarutbyte (Q_u), solfångarförluster då solfångaren är i drift (Q_{lop}), är i stagnation (Q_{loh}) eller då strålningsnivån är för låg för att solfångaren ska starta (Q_{loff}). Den heldragna linjen visar husets värmelast per m² solfångaryta (Q_{last}).

Stagnationsförhållandena innebär problem för hela solfångarsystemet, inte bara solfångaren. Även värmebäraren, ofta en blandning av vatten och glykol med olika tillsatser, riskerar att ta skada och kan brytas ner. Solfångaren kan råka ut för termiska påfrestningar vilket kan utmatta material som t ex lödningar och gummilister etc. Materialen i solfångaren och andra komponenter, t ex pumpar och ventiler, som kan påverkas av höga tryck eller temperaturer måste väljas och dimensioneras för att klara påfrestningarna under den värsta tänkbara stagnationen. Dessa material- och konstruktionsval fördyrar systemet, trots att de egentligen inte gör någon tjänst under normal drift. Det är också viktigt att komma ihåg att den kritiska parametern vid stagnation inte primärt är hur länge solvärmesystemet befinner sig i stagnation, utan snarare den maximala stagnationstemperaturen. Men även tiden har betydelse, till exempel är det så att nedbrytningshastigheten fördubblas för var tionde grads temperaturökning för polymermaterial. Solfångarsystem under stagnation behandlas utförligt av Weiss (2003).

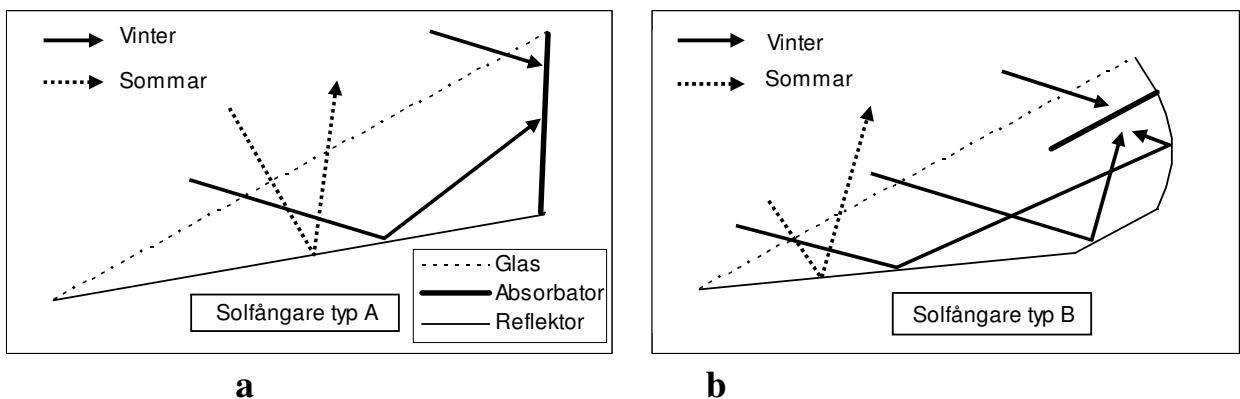
Lorentz och Perers (2004) har visat att säkerhetsprincipen med partiell förångning av glykolblandningen som är vanlig på kontinenten, kan fungera bra även i svenska kombisystem, förutsatt att solfångarna är konstruerade och monterade på ett sådant sätt att vätskan snabbt kan tryckas ned i ett expansionskärl. Denna metod skyddar glykolblandningen och det övriga systemet exklusive solfångarna från höga temperaturer och tryck, men själva solfångarna blir fortfarande utsatta för samma höga stagnationstemperatur.

1.2 Principen för lastanpassade solfångare:

Principen för lastanpassade solfångare är att de ska ha hög verkningsgrad då värmebehovet är stort, medan verkningsgraden är låg då värmebehovet är litet. Detta gör att system kan byggas med stora solfångarareor, t ex 40 m² i ett villasystem, samtidigt som överhettning undviks i så stor utsträckning som möjligt. Traditionellt kan detta delvis göras genom att solfångarna placeras mer eller mindre vertikalt mot söder. Detta medför ökat utbyte vintertid, jämfört med mer normal takplacering, samtidigt som överhettningrisken minskar. Men även om överhettningstiden minskar till hälften, kvarstår det vissa stagnationsproblem (Nordlander & Lorenz, 2003). Lastanpassningen kan också göras mekaniskt, t ex med rörliga solfångare. Om fast monterade solfångare ska användas finns i

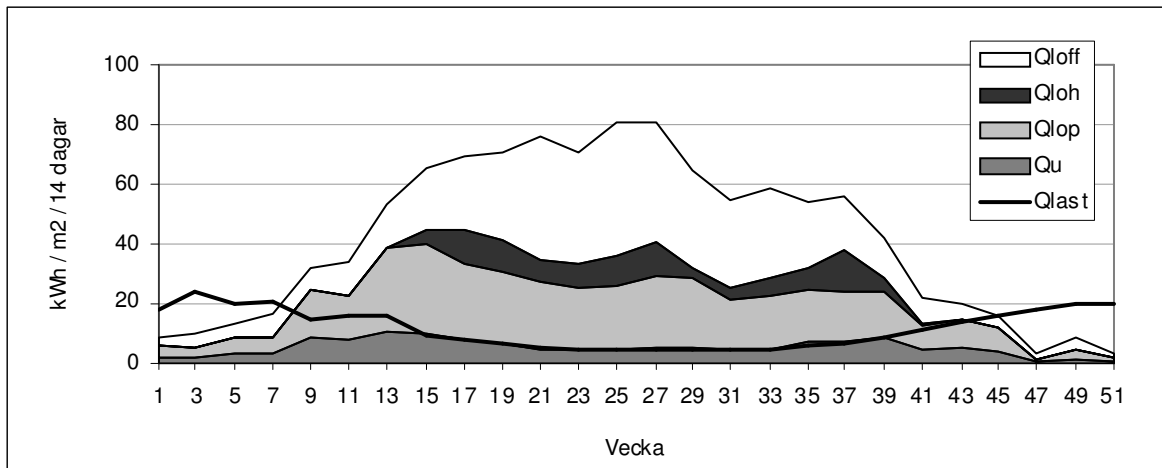
princip två parametrar att spela med, solfångarens optiska verkningsgrad och värmeförlusterna. Värmeförlusterna är mindre på sommaren på grund av den i allmänhet höga utomhustemperaturen under drift. Samtidigt vill man att värmeförlusterna ska vara små för att höja utbytet under den kallare delen av året. Solfångare med styrbara värmeförluster existerar inte. Termostatstyrd ventilering av solfångaren är en teoretisk möjlighet men kräver stora luftflöden och blir dyrt.

I detta arbete utnyttjas den optiska verkningsgradens beroende av solstrålningens infallsvinkel, så att solfångarnas optiska verkningsgrad blir hög under vinterhalvåret då solen står lågt medan verkningsgraden försämras under sommaren då solen står högt. Detta illustreras i figur 3 som även visar två av de solfångargeometrier som studerats. Bilderna visar principen för solfångaren och bara ett "reflektortråg". Ofta består en solfångare av ett flertal reflektortråg så att slutresultatet blir en solfångare av normal storlek och en tjocklek på ca 8-12 cm. Exempel på ett par byggda prototyper visas i figur 19 senare i denna rapport.

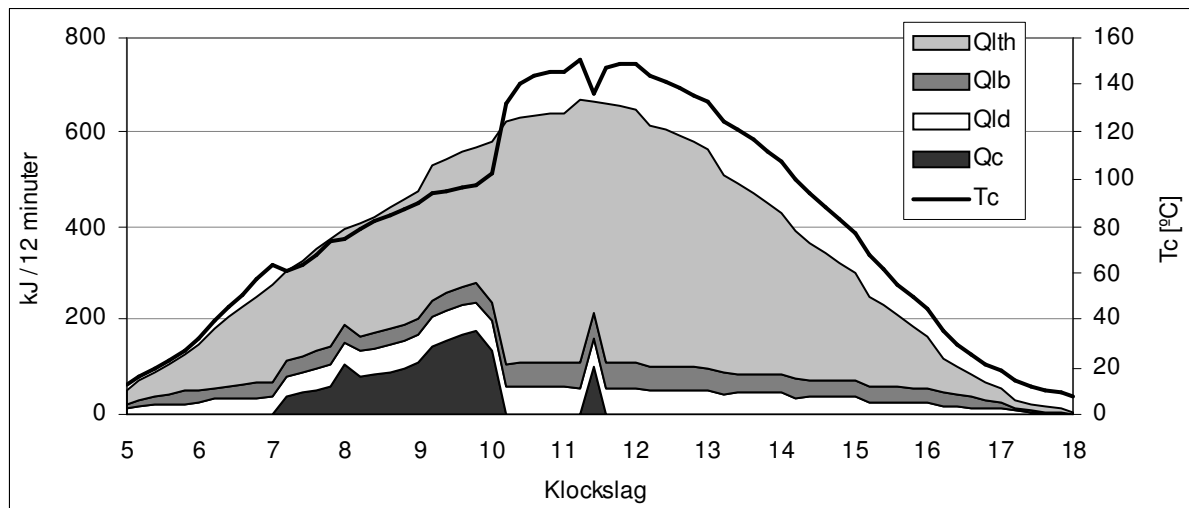


Figur 3. Exempel på lastanpassade solfångare. a) Typ A med enkelsidig absorbator. b) Typ B med dubbelsidig absorbator.

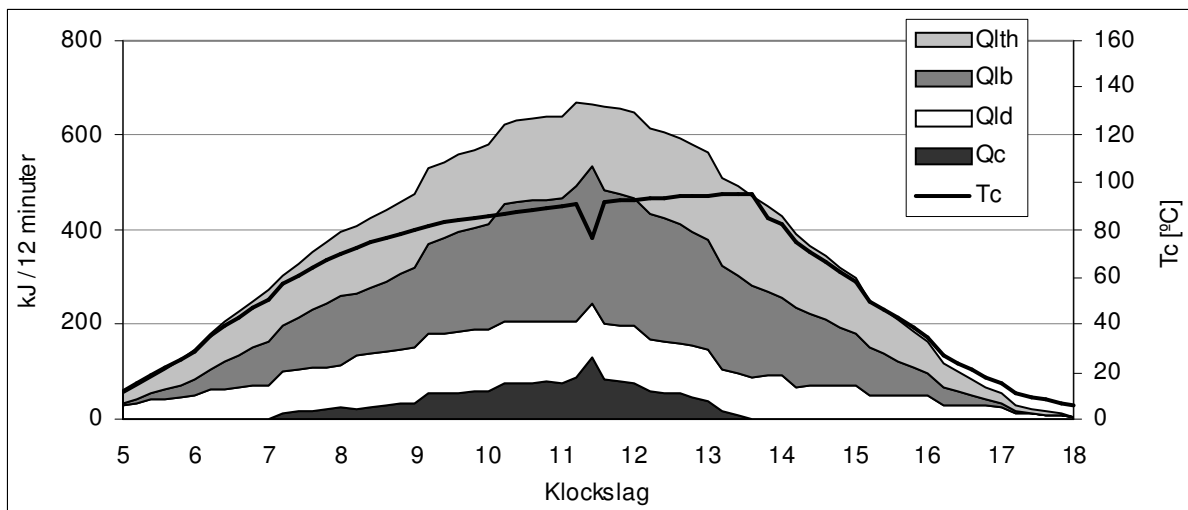
Figur 4 visar resultatet från en simulering med 40 m² lastanpassade solfångare i ett villasystem. Jämfört med figur 2 är årsutbytet snarlikt, men solfångarförlusterna under stagnation är betydligt lägre i det lastanpassade fallet. Skillnaden mellan lastanpassade och traditionella plana solfångare illustreras vidare i figur 5 och 6 som visar totala energibalanser för solfångarna i ett 40 m² solfångarsystem en klar dag i april. Figur 5 visar fallet med plana solfångare. Solfångarna startar klockan 7 och börjar leverera värme till tanken. Klockan 10 har tankens temperatur nått 95°C och flödet genom solfångarna stoppas för att undvika kokning i tanken. Samtidigt höjs solfångarens temperatur eftersom den inte längre kyls. Mellan kl. 11:20 och 11:40 går solfångarna igång eftersom det uppstår ett litet värmebehov; tanken har kylts ner en aning på grund av en varmvattentappning. Under större delen av dagen står dock systemet stilla, vilket leder till kraftiga övertemperaturer i solfångarna. Den tjocka linjen visar solfångartemperaturen som beräknats till närmare 150 °C som mest denna dag. Figur 6 visar motsvarande dag men med lastanpassade solfångare. Drifttiden är ungefär dubbelt så lång som i fallet med plana solfångare, men det totala utbytet under dagen är detsamma i de två fallen. Medan värmeförlusterna dominerar i systemet med de plana solfångarna, dominerar de optiska förlusterna i det lastanpassade fallet. Det förra leder till stagnationsproblem, medan det senare ger en lägre solfångartemperatur, vilken aldrig överstiger 100°C.



Figur 4. Villasolvärmesystem med 40 m^2 lastanpassade solfångare. Figuren visar solfångarutbyte (Q_u), solfångarförluster då solfångaren är i drift (Q_{lop}), i stagnation (Q_{loh}) eller då strålningsnivån är för låg för att solfångaren ska starta (Q_{loff}). Den heldragna linjen visar husets värmelast per m^2 solfångaryta (Q_{last}).



Figur 5. Fördelning av energier i solfångarna i ett 40 m^2 villasystem med plana solfångare en klar dag (13/4). De olika ytorna representerar användbar energi från solfångarna (Q_c), optiska förluster från diffusstrålningen (Q_{ld}), optiska förluster för direktstrålningen (Q_{lb}) och värmeförluster från solfångarna (Q_{lth}). Den tjocka linjen visar solfångarens temperatur. I detta system dominerar värmeförlusterna.



Figur 6. Fördelning av energier i solfångarna i ett 40 m² villasystem med lastanpassade solfångare en klar dag (13/4). De olika ytorna representerar användbar energi från solfångarna (Q_c), optiska förluster från diffusstrålningen (Q_{ld}), optiska förluster från direktstrålningen (Q_{lb}) och värmeförluster från solfångarna (Q_{th}). Den tjocka linjen visar solfångarens temperatur. I detta system dominerar de optiska förlusterna.

1.3 Undersökningens syfte och förutsättningar

Syftet med den föreliggande studien är ”att ta fram grundläggande kunskaper om vad som krävs av system och solfångare för höga årstäckningsgrader”. En del studier av årstidsanpassade solfångare har gjorts, bl a av Adsten (2002) och Helgesson et al. (2002). I denna studie har solfångargeometrin optimerats utifrån en specifik lastprofil i ett kombisolvärmsystem. Redskap för att snabbt kunna optimera lastanpassade solfångare utifrån systemegenskaper (t ex tankvolym, relationen mellan last och solfångarearea samt restriktioner på högsta solfångartemperatur och samlad stagnationstid) har tagits fram.

Enligt projektansökan skulle projektet innehålla

- Analyser av värmsystem med olika lastprofiler, systemlösningar och solfångare med avseende på årstäckningsgrad
- Analyser och optimering av lastanpassade solfångare med interna reflektorer
- Ekonomisk utvärdering av solvärmsystem för hög täckningsgrad
- Tillverkning och testning av två eller tre solfångarprototyper för hög täckningsgrad.
- Implementering av TRNSYS-komponent för solfångare med valfritt biaxialt infallsvinkelberoende.
- En litteraturöversikt om system för höga täckningsgrader

Samtliga punkter har genomförts. En del av arbetet, t ex litteraturöversikten, presenteras i licentiat-rapporten (Nordlander 2004) och endast i begränsad omfattning här.

Undersökningar av olika lastprofiler enligt den första punkten har endast gjorts i begränsad omfattning. I avsnitt 6.2 jämförs utbyte och kostnader för kombisystem med lastanpassade respektive traditionella solfångare och med två olika värmelaster.

I denna studie genomförs endast studier av system för småhus. Om inte annat anges gäller beräkningarna för ett modernt småhus med en total värmelast (varmvatten och uppvärmning) på 11150 kWh/år, fördelat på 3100 kWh tappvarmvattenlast och resten uppvärmning. Lastprofilen är identisk med den last som använts av Lorenz (2001), vilket gör det möjligt att jämföra olika metoder för att öka solvärmestäckningsgraden i svenska

småhus. Det har antagits att solfångarna är riktade mot söder med en lutning på 30°. Denna lutning är långt ifrån optimal vad gäller lastanpassning, men överensstämmer med de taklutningar som är vanligast hos nybyggda hus idag. Som klimatdata används TRY (Test Reference Year) från Stockholm, vilket representerar ett statistiskt genomsnittligt år (Skartveit *et al.*, 1994).

I denna rapport redovisas de principiellt viktiga resultaten. För mer detaljerade resultat såsom detaljer vid optimering av lastanpassade solfångare och teoretiska resonemang hänvisas till Svante Nordlanders licentiatuppsats som läggs fram under hösten 2004 vid Uppsala Universitet (Nordlander, 2004).

2. Termiska och optiska prestanda hos lågkoncentrerande solfångare

För att förstå hur solfångare kan lastanpassas måste man känna till solfångarens fysik och vad som styr solvärmeutbytet. Solfångarens verkningsgrad kan beskrivas med olika grad av komplexitet, beroende på vad beräkningen syftar till. I detta projekt har en beskrivning enligt

$$q_c = \eta_{0b} G_b + \eta_{0d} G_d - c_o (T_m - T_a) - c_l (T_m - T_a)^2, \quad (1)$$

använts, där

q_c	Avgiven effekt per ytenhet	(W/m ²)
η_{0b}	Förlustfri verkningsgrad för direkt instrålning	(-)
G_b	Direkt instrålning	(W/m ²)
η_{0d}	Förlustfri verkningsgrad för diffus instrålning	(-)
G_d	Diffus instrålning	(W/m ²)
C_o	Temperaturoberoende värmeförlustkoefficient	(W/m ² °C)
C_l	Temperaturberoende värmeförlustkoefficient	(W/m ² °C ²)
T_m	Medeltemperatur hos värmebäraren i solfångaren	(°C)
T_a	Lufttemperaturen omkring solfångaren	(°C)

Uppdelningen av den optiska verkningsgraden i en del för direktstrålningen och en del för den diffusa är nödvändig för analyserna av solfångarens infallsvinkelberoende. Värmeförlusterna har modellerats med en temperaturberoende faktor för att de beräknade stagnationstemperaturerna ska bli någorlunda realistiska.

Både när det gäller värmeförlusterna och den optiska verkningsgraden hos solfångare med reflektorer spelar solfångarens koncentrationsfaktor C en viktig roll. Koncentrationsfaktorn definieras här som

$$C = \frac{\text{Absorbatoryta}}{\text{Glasad yta}} \quad (2)$$

Absorbatorytan för dubbelsidigt belysta absorbatörer beräknas som absorbatorns bredd * längd * 2.

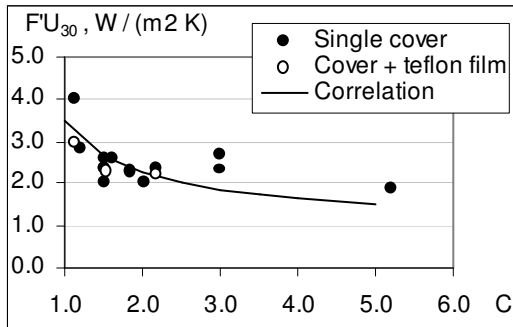
2.1 Värmeförluster

Då de lastanpassade solfångarna optimeras antas att värmeförlustkoefficienten vid ($T_m - T_a$) = 30°C kan beskrivas enligt

$$U_L = 1 + \frac{2,5}{C} \text{ [W/m}^2\text{, °C]} \quad (3)$$

Detta är en empirisk formel för värmeförlustkoefficienten vid $T_m - T_a = 30$ °C för lågkoncentrerande solfångare som föreslagits av Carvalho *et al.* (1985). Nordlander (2004) har gått igenom de senaste årens litteratur över lågkoncentrerande solfångare och de rapporterade värmeförlustkoefficienter stämmer väl överens med den empiriska formeln (3) ovan, vilket visas i figur 7. Anledningen att värmeförlustkoefficienten minskar med ökad

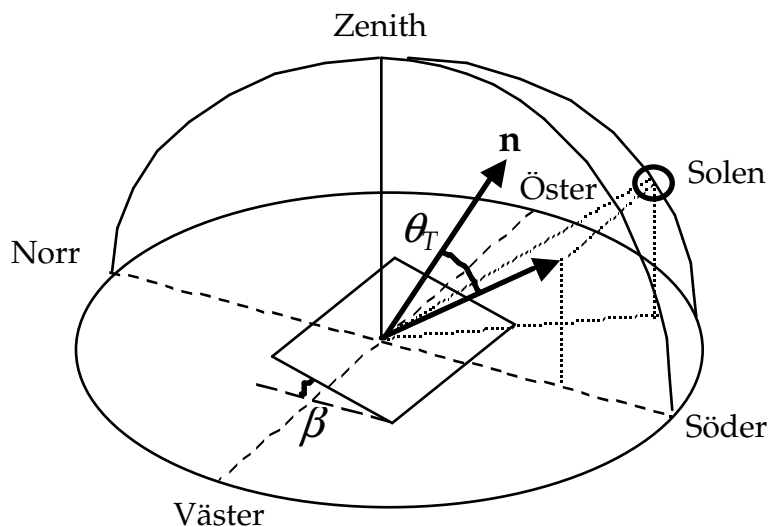
koncentration är att absorberingsytan minskar, vilket ger lägre konvektions- och strålningsförluster per glasad solfångaryta.



Figur 7. Värmeförlustkoefficient ($F'U_L$) vid $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ för 16 olika lågkoncentrerande solfångare rapporterade 1979 – 2002. Den helstreckade linjen är den empiriska relationen enligt ekvation 3. Två av solfångarna har identiska värden.

2.2 Projicering av strålning

Den optiska verkningsgraden för direktstrålning är beroende av infallsvinkeln. Förutom det normala infallsvinkelberoendet för transmittans och absorptans (som normalt beskrivs genom en b_0 -funktion, se t ex Duffie och Beckman, 1991) är infallsvinkeln i transversellt plan (vinkelrätt mot absorbatorns längdriktning) väsentlig, eftersom denna bestämmer huruvida en solstråle kommer att nå absorbatoren eller inte i en koncentrerande solfångare. För trågformade koncentrerande solfångare med reflektortrågen i öst-västlig riktning mäts den transversella infallsvinklingen i ett nord-sydligt plan, vilket illustreras i figur 8 där den transversella infallsvinkeln θ_T är vinkeln mellan solfångarens normal \mathbf{n} och solstrålens projektion i ett nord-sydligt plan. I detta arbete räknas θ_T som negativ då solens projektion är söder om normalen \mathbf{n} , annars positiv. Projektion av strålning behandlas mer utförligt i Rönnelid (1998).



Figur 8. Illustration av projektionsvinkeln θ_T , räknad för ett tak med lutningen β . θ_T räknas negativ då solens projektion är söder om normalen \mathbf{n} , vilket illustreras i bilden.

2.3 Optisk prestanda

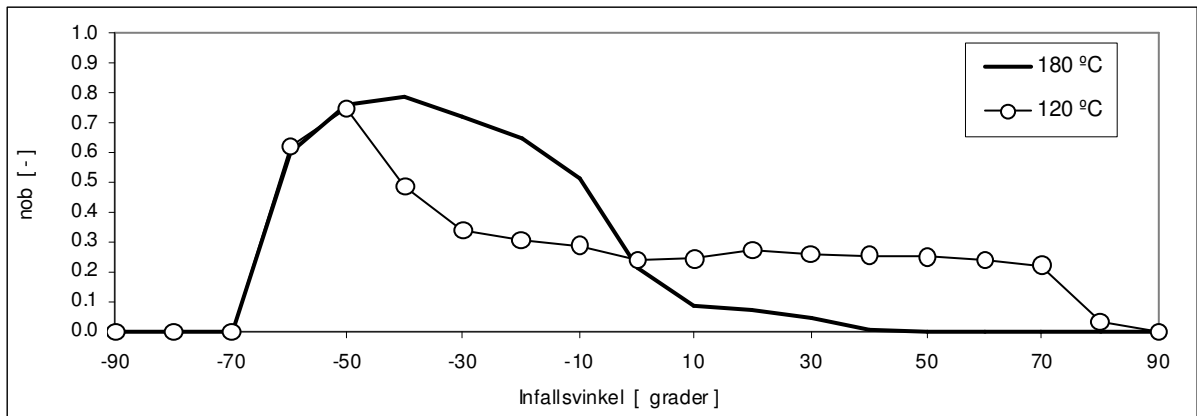
Den maximala mängden diffus strålning $G_{d,c}$ som en koncentrerande solfångare kan absorbera bestäms av koncentrationsfaktorn enligt

$$G_{d,c} \leq \frac{G_d}{C} \quad (4)$$

Ekvationen bygger på antagandet att den diffusa strålningen är isotrop och följer av den optiska principen att diffust ljus inte kan koncentreras. Intensiteten av isotropt diffust ljus på en absorbator i en koncentrerande solfångare kan med andra ord inte bli högre än vad den skulle varit utan en koncentrator. I beräkningarna som redovisas nedan har hänsyn även tagits till optiska förluster genom absorption och reflektion i glas, reflektor och absorbator, vilket gör att den förlustfria verkningsgraden för diffus instrålning är mindre än $1/C$. De optiska förlusterna gör också att solfångare med dubbelsidiga absorbatorer, som till exempel typ B i figur 3, får lägre förlustfri verkningsgrad för diffus instrålning än solfångare med enkelsidig absorbator som typ A i figur 3. Orsaken är att en större andel av den diffusa strålningen måste reflekteras innan den når absorbatorn i fall B jämfört med fall A.

Verkningsgraden för direktstrålningen är direkt beroende av den transversella infallsvinkeln θ_T . Eftersom solfångaren är koncentrerande betyder det samtidigt att mängden diffust ljus som kan nå absorbatorn är begränsad enligt ekvation 4. Har man hög verkningsgrad för vissa vinkelområden måste det därför finnas andra vinkelområden för vilken verkningsgraden är lägre. Skulle detta *inte* vara fallet, utan t ex verkningsgraden vara hög för instrålning för alla infallsriktningar även om koncentrationen var väsentligt större än 1, skulle diffus strålning accepteras från alla infallsriktningar vilket motsägs av ekvation 4. **Detta faktum, att verkningsgraden kan ökas för vissa vinkelområden endast på bekostnad av andra, är centralt i denna studie.** Populärt kan det beskrivas som att optisk verkningsgrad kan förflyttas från ett vinkelområde till ett annat.

Ett exempel på detta (som även beskrivs närmare i kapitel 4) illustreras i figur 9 som visar optiska verkningsgraden för två teoretiska solfångare (solfångare med vissa antagna fysiska egenskaper) som båda har koncentrationsfaktorn $C = 2X$. I det ena fallet är η_{0b} hög för strålning som faller in med $-60^\circ < \theta_T < -10^\circ$ (heldragen tjock linje) medan η_{0b} är låg andra vinklar. I det andra fallet är η_{0b} hög för $-60^\circ < \theta_T < -40^\circ$ och sedan medelhög i intervallet $-30^\circ < \theta_T < 70^\circ$ (heldragen linje med cirklar). Båda solfångarna kommer att absorbera samma mängd diffus strålning, men kommer att absorbera direkt strålning från olika vinkelintervall olika bra. Resultatet blir att den senare accepterar ca 20% mindre energi på årsbasis, men att solfångarens temperatur under stagnation aldrig överskrider 120°C , till skillnad från den första som kan nå upp till 180°C . Begränsningen i stagnationstemperatur uppnås genom att den absorberade energimängden begränsas tack vare lågt η_{0b} för strålning med "farliga" infallsvinklar. Med en solfångarlutning på 30° är den transversella infallsvinkeln för direktstrålningen -30° mitt på dagen vid höst- och vårdagjämning och -7° på midsommaraftonen.



Figur 9. Den vinkelberoende optiska verkningsgraden bestäms av koncentrationsfaktor, solfångarens geometri och materialegenskaper. Ökas den optiska verkningsgraden inom ett vinkelintervall måste den minska i andra. Exemplet visar den optiska verkningsgraden som funktion av den transversella infallsvinkeln hos två teoretiska solfångare med koncentrationsfaktor $C = 2X$ som har designats för olika maximal temperatur.

3. Beräkningsmetoder för lastanpassade solfångare

En god lastanpassad solfångare för kombisystem ska samla in maximal mängd energi men undvika onödig överhettning av systemet. Med en viss antagen koncentrationsfaktor begränsas den optiska verkningsgraden, enligt resonemanget i avsnitt 2.3 och exemplet i figur 9. Det optimala utseendet hos kurvan för den optiska verkningsgraden beror på solfångarens värmeförlustkoefficient samt på solinstrålningens och lastens fördelning över året. Optimeringen av solfångarna har utförts med hjälp av två olika beräkningssystem som samarbetar intimt i ett och samma Excel-ark. Den ena delen utför en konventionell men mycket snabb årssimulering, och den andra delen varierar formen på den optiska verkningsgradskurvan. Optimeringsmetodiken och simuleringsmodellerna som här redovisas i korthet är i detalj beskrivna av Nordlander (2004).

3.1 Optimering av optik

Optimeringsproceduren förändrar formen på solfångarens optiska verkningsgradskurva (se fig 9), genom att stegvis flytta kurvans knutpunkter uppåt eller nedåt i mycket små steg. Varje kurva är uppbyggd av 17 punkter, en för var tionde grad (se figur 9). Om en marginell höjning av optiska verkningsgraden vid en viss vinkel resulterar i en högre årsinsamling behålls denna förändring, medan en ändring som resulterar i minskad insamling förkastas. När den marginella insamlingsökningen är lika stor vid alla punkter på kurvan är ingen ytterligare förbättring möjlig och optimeringen är klar. Hela proceduren är implementerad i ett Excel-ark och optimeringen av en solfångare i ett system tar ca 10 minuter.

Optimeringen med avseende på insamlad energi kan göras med bivillkor för maximal stagnationstemperatur eller maximal sammanlagd stagnationstid under ett år, eller en valfri kombination av dessa. Dessa ytterligare restriktioner minskar i vissa systemkombinationer den insamlade energin. Det beräknade årsutbytet från sådana solfångare kan till exempel användas för bedömning av hur olika materialval påverkar systemets kostnadseffektivitet. Optimeringen av den optiska verkningsgradskurvan innebär automatiskt en lastanpassning av solfångaren eftersom solfångaren ges högre verkningsgrad vid de infallsvinklar där det finns bäst behov av den insamlade energin.

Sex solfångare, med koncentrationsfaktorerna 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 och 4X valdes ut för optimering. En inledande manuell beräkning gav vid handen att en koncentrationsfaktor på 1,5X tillåter solfångaren att samla in nästan lika mycket solstrålning som en plan solfångare, vilket valdes som en undre gräns. Den övre gränsen, 4X, valdes för att ett system med mycket stor solfångarearea relativt lasten möjligtvis kunde klara sig på endast diffus instrålning under sommaren, och för att instrålningen under vintern är så låg att man kunde avstå helt från att försöka samla in den. Den begränsade optiska verkningsgraden för direktstrålning skulle då användas för insamlingen under höst och vår. En sådan solfångare skulle kunna ha en koncentrationsfaktor på ungefär 4X. Visserligen skulle den ge mindre energi, men på grund av mindre materialkostnad kanske den kunde vara kostnadseffektiv ändå.

Solfångarna antogs ha värmeförlustfaktorer enligt den heldragna linjen i figur 7 (framräknad med ekvation 3). Den möjliga optiska verkningsgraden för varje koncentrationsfaktor beskrevs med två parametrar, en för den diffusa verkningsgraden och en som begränsade den maximalt tillåtna verkningsgraden vid varje vinkel.

Storleksordningen av den möjliga diffusa verkningsgraden antyds av kurvorna i figur 11 där det tydligt framgår att ytan under verkningsgradskurvan minskar med ökande koncentrationsfaktor. En och samma relation mellan koncentration och diffus optisk verkningsgrad användes för solfångare med enkelsidiga (figur 3 a) och dubbelsidiga (figur 3 b) absorbatörer. Detta innebär en underskattning av solfångare med enkelsidig absorbatör. De har i allmänhet högre optisk verkningsgrad än de dubbelsidiga eftersom andelen strålning som träffar absorbatören utan reflektionsförluster är större.

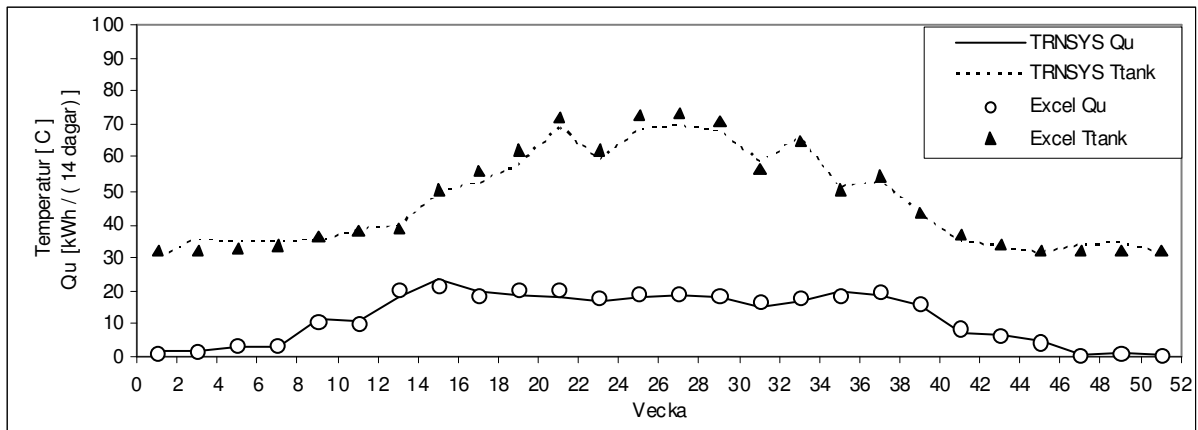
Solfångarna optimerades för system med solfångararea på 10, 20, 40, 60 och 80 m². 10 m² är normalt för ett svenskt kombisystem. De stora systemen på 60 och 80 m² ger lågt utbyte per m², men det är intressant att studera dem ändå, eftersom det inte är orimligt att tänka sig att en husägare vill täcka hela södersidan av taket med ett enhetligt material, av bland annat estetiska skäl. Alla systemen hade samma last, den som beskrivits tidigare i avsnitt 1.3.

3.2 Simuleringar med TRNSYS och Excel

Det vanligaste sättet att med god noggrannhet beräkna utbytet från ett solvärmesystem är att utföra en simuleringsberäkning, vilket ofta görs med beräkningsprogrammet TRNSYS (Klein *et al.*, 2002). Tidssteget för en sådan beräkning är normalt ca en minut. Körtider på mellan fem minuter och några timmar är vanliga. TRNSYS-beräkningar är lämpliga när man i detalj vill undersöka olika komponenter, t ex en lagringstank eller olika varianter på reglerstrategier för solfångarkrets eller värmesystem. När syftet med beräkningen är att jämföra prestanda mellan olika solfångare räcker det ofta med mindre detaljerade beräkningar. Det väsentliga är att solfångarens arbetstemperatur är någorlunda riktigt beräknad, samt att beräkningarna av optisk verkningsgrad och värmeförluster är noggranna. Samma värmelast och klimatdata som nämns i avsnitt 1.3 användes både för beräkningarna med TRNSYS och med den speciellt för detta projekt utvecklade Excel-modellen.

Beräkningen av solfångarens utbyte grundas i båda modellerna på ekvation (1), med några små skillnader. TRNSYS-versionen tar med solfångarens tidskonstant i beräkningen och har en fullständig beräkning av den optiska verkningsgradens 3-dimensionella infallsvinkelberoende. Excel-versionen beräknar infallsvinkelberoendet i nord-sydriktningen från en tvådimensionell kurva (som i figur 9) och beräknar inflytandet från öst-väst-dimensionen med hjälp av en traditionell b_0 -funktion som är lika för alla solfångare.

Excel-modellen skiljer sig i ytterligare två avseenden från TRNSYS-modellen. Den har ett längre tidssteg, en timma, och tankens tillstånd modelleras endast med hjälp av en genomsnittstemperatur. Med dessa förenklingar kunde beräkningstiden hållas så kort som 0,3 sekunder för en årtidssimulering, att jämföras med ca fem minuter för motsvarande TRNSYS-beräkning. Optimeringarna hade varit praktiskt omöjliga att genomföra utan denna snabba beräkning. Excel-modellen användes dessutom för övriga beräkningar där enda skillnaden mellan de jämförda systemen bestod i solfångartyp, solfångararea eller värmelast. För beräkningar av inverkan av solfångarens lutning samt för optimering av tankstorlek och värmeväxlare i solfångarkretsen har TRNSYS-modellen använts. Excel-modellen kalibrerades inledningsvis mot TRNSYS för att så nära som möjligt ge samma beräknade årsutbyte med olika solfångare och systemstorlekar. Detta exemplifieras med figur 10, som visar att överensstämmelsen vad gäller insamlingens tidsfördelning och beräknad tanktemperatur är tämligen god.

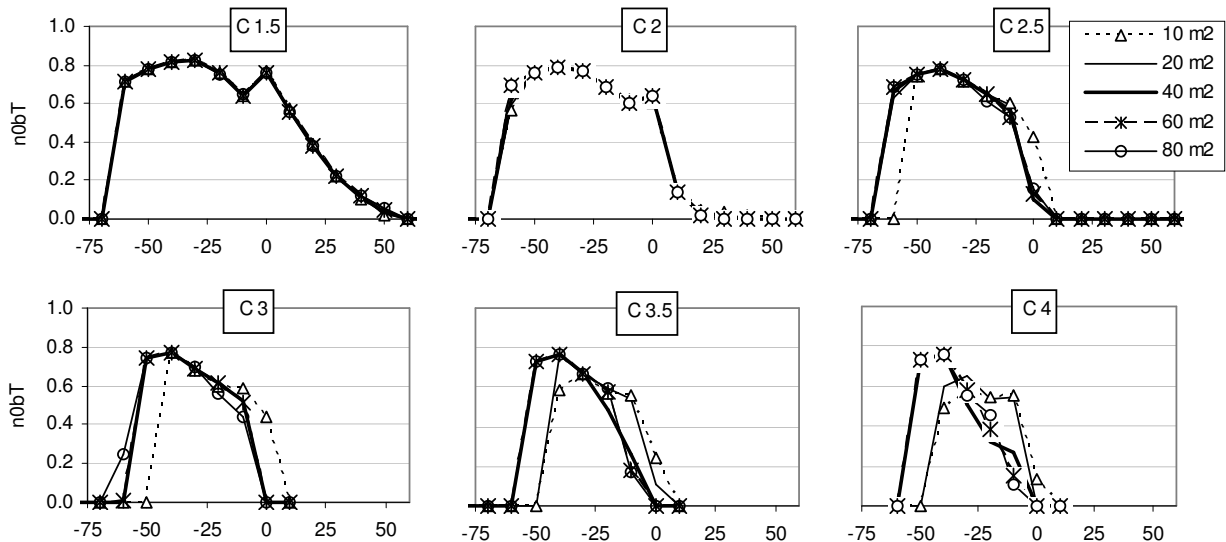


Figur 10. Jämförelse mellan årssimulering med TRNSYS och med Excel-modellen. Q_u avser nyttig solenergi och T_{tank} avser tankens medeltemperatur under de timmar solfångaren är i drift.

4. Egenskaper hos teoretiskt optimala lastanpassade solfångare

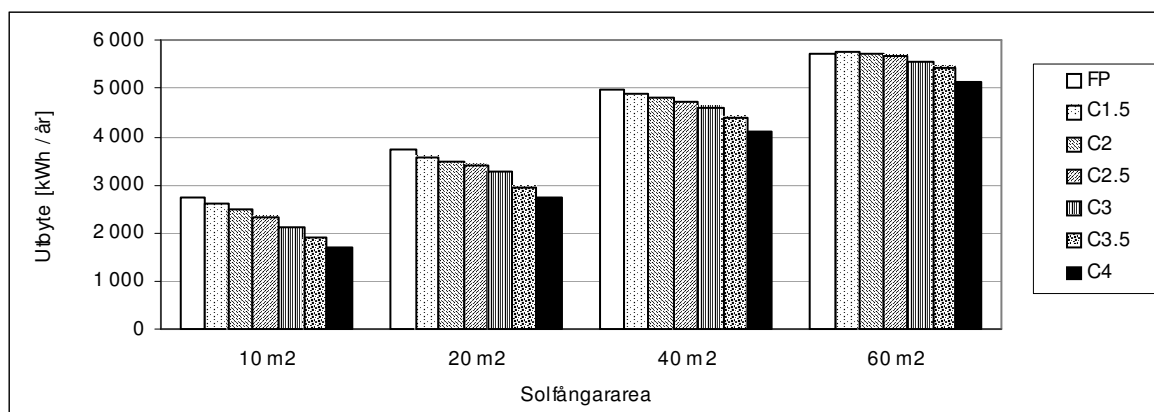
Figur 11 visar den framräknade optiska verkningsgraden hos sex olika teoretiska solfångare med koncentrationsfaktor från $C = 1,5 X$ till $4,0 X$. Figurerna visar samtidigt den optimala optiska verkningsgraden för solfångaren i system med olika storlekar, från 10 m^2 till 80 m^2 för ett hus. Optimeringarna är gjorda utifrån maximalt årsutbyte, med restriktionen att solfångarens stagnationstemperatur ej får överskrida 181°C , vilket är den högsta stagnationstemperaturen för den plana solfångaren som används som jämförelse. Den senare solfångaren har parametrarna $F'U_L, \Delta T_{=30^\circ\text{C}} = 3,8 \text{ [W/m}^2, ^\circ\text{C]}$, $\eta_{0b} = 0,83$ och $\eta_{0d} = 0,72$.

Det är iögonfallande att de olika solfångarna med koncentrationsfaktorer $1,5 < C < 2,5$ har praktiskt taget identiska optiska egenskaper oberoende av systemstorlek. Vid $C = 2,5X$ kan en mindre skillnad i optiska egenskaper skönjas för olika systemstorlekar, medan skillnaden mellan olika systemstorlekar är större för de högre koncentrationsgraderna. En praktisk slutsats av detta är att en lastanpassad solfångare med lägre koncentration än $3X$ kan ha samma geometriska form oberoende av systemstorlek.

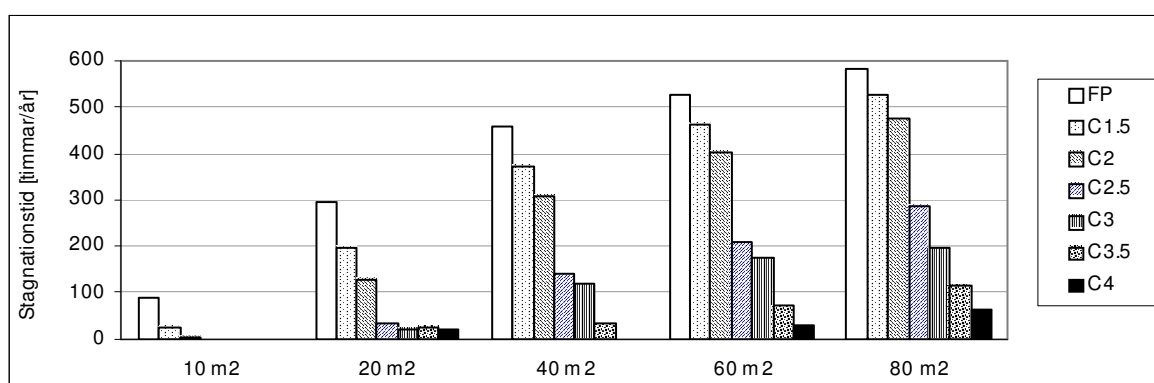


Figur 11. Optiska verkningsgraden för teoretiska lastanpassade solfångare med olika koncentrationsfaktor C och olika systemstorlekar mellan 10 och 80 m^2 solfångararea. Kurvorna är optimerade med avseende på årsutbyte. X-axeln visar θ_T .

Figur 12 visar det totala utbytet från solvärmeanläggningarna vid systemstorlekar mellan 10 och 60 m^2 . I de mindre systemen är utbytet märkbart högre från de plana solfångarna än från de lastanpassade, medan skillnaden blir mindre då systemstorleken ökar. Som exempel ger ett system med $C=2X$ ca 11% lägre utbyte än systemet med plana solfångare om solfångarstorleken är 10 m^2 , medan skillnaden minskat till 3% då solfångarstorleken är 40 m^2 . Figur 13 visar den totala tiden som systemet står i stagnation under ett år, för olika systemstorlekar och olika solfångartyper. Det syns tydligt att stagnationstiden under stagnation kraftigt minskar då lastanpassade solfångare används.



Figur 12. Årsutbyte för olika systemstorlekar och olika solfångartyper, inklusive plana solfångare, vilka betecknas med "FP" .



Figur 13. Total stagnationstid för olika systemstorlekar och olika solfångartyper.

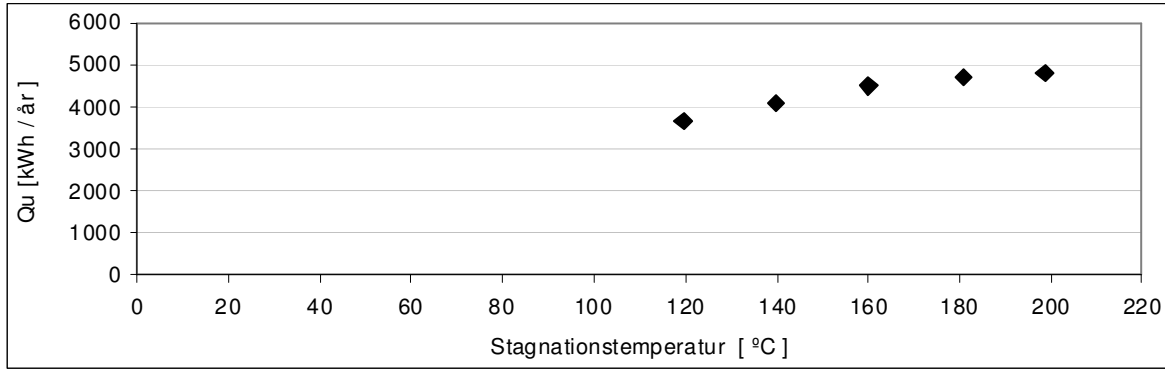
Figur 11-13 avser solfångare som optimerats med restriktionen att den maximala stagnationstemperaturen ska vara 181°C. I Nordlander (2004) ges exempel på andra bivillkor, t ex att tiden som solfångaren ska utsättas för stagnation begränsas. Detta medför att den optimerade optiska acceptanskurvan får annat utseende. Vilka bivillkor som ska sättas för optimeringen bestäms till exempel av vilka material man vill ha i solvärmesystemet och vilka termiska påfrestningar dessa kan tåla.

Vissa material i solvärmesystem, t ex gummi, kan utmattas både på grund av höga temperaturer och långvarigt exponering för höga temperaturer. Andra material är mer direkt känsliga för höga temperaturer, t ex plaster eller lödtenn som smälter vid viss temperatur. Det kan därför vara av intresse att kunna konstruera solvärmesystem med begränsad stagnationstemperatur. Detta är möjligt genom att välja en optik hos solfångaren så den maximalt absorberade mängden solstrålning begränsas.

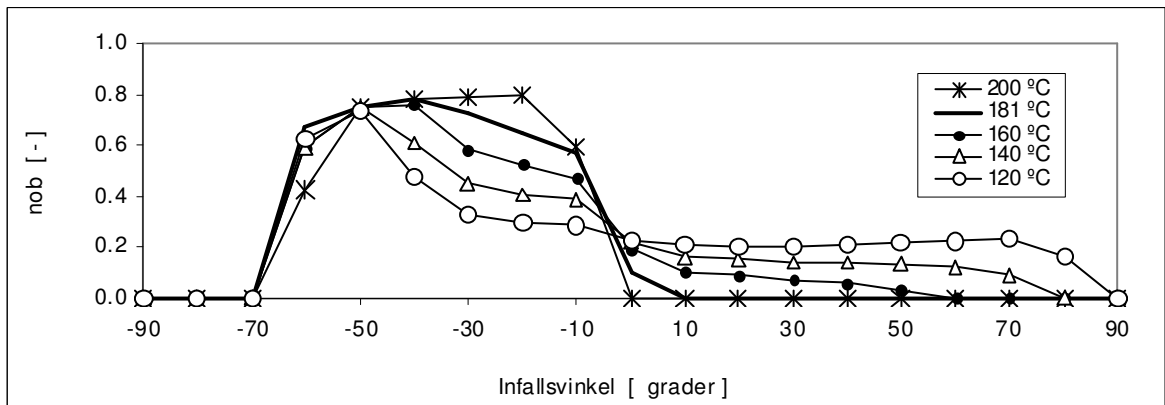
I figur 14 visas årsutbytet hos system med 40 m² solfångare, alla med koncentrationsfaktorn $C = 2,5X$, men med olika maximal stagnationstemperatur. Som väntat minskar årsutbytet med lägre stagnationstemperatur eftersom den optiska verkningsgraden "flyttats" till vinkelområden där solstrålningen inte förmår ge så höga temperaturer. Om den maximala stagnationstemperaturen sätts till 160 °C minskar årsutbytet med 5 % jämfört med system med stagnationstemperaturen 181 °C. Är den maximala stagnationstemperaturen 140 °C minskar årsutbytet med 13 % jämfört med ett system för 181°C. Om stagnationstemperaturen minskas till 120 °C bör det gå att använda betydligt billigare material än de som finns i dagens standardsolfångare. Detta gör att totalekonomin för systemet eventuellt kan bli

bättre, trots att den nyttiga producerade energimängden är 23 % lägre än om solfångarna byggs för att klara 181 °C.

Figur 15 visar den optiska verkningsgraden för solfångarna som är designade för olika stagnationstemperatur. Genom att ”flytta optisk verkningsgrad” från områden med $\theta_T < 0^\circ$ till områden med $\theta_T > 0^\circ$ så minskar man verkningsgraden i de områden där solen står högt på himlen, vilket reducerar stagnationstemperaturen.



Figur 14. Årsutbyte med lastanpassad solfångare med koncentrationsfaktor $C = 2,5X$, designad för olika maximal stagnationstemperatur.



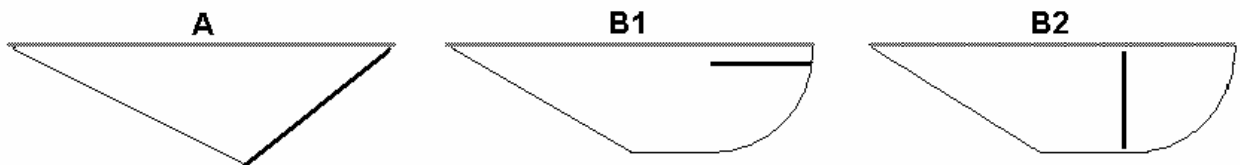
Figur 15. Optiska verkningsgradskurvor för solfångare med koncentrationsfaktor $C = 2,5X$, designade för olika maximal stagnationstemperatur.

5. Praktiskt möjliga solfångare

I kapitel 4 redovisades resultat från teoretiska beräkningar där den bästa möjliga formen på den optiska verkningsgradskurvan räknades fram. Ingen hänsyn togs till om det finns praktiska solfångare med de framräknade egenskaperna. I detta kapitel studeras möjliga solfångargeometrier som bedöms som möjliga att bygga eller som har byggts och som har optiska egenskaper liknande dem som har optimerats teoretiskt.

5.1 Undersökta solfångartyper

Tre huvudsakliga solfångartyper studeras, vilka illustreras i figur 16. Typ A har en enkelsidig absorptor och en plan reflektor, vilket gör konstruktionen enkel. Solfångare B1 har en dubbelsidig absorptor med absorptorn parallell med glaset, liknande ”Höst/vår-Mareco” (Adsten, 2002). Typ B2 liknar typ B1, men har absorptorn ställd vinkelrätt mot glaset vilket ger något annorlunda optiska egenskaper.



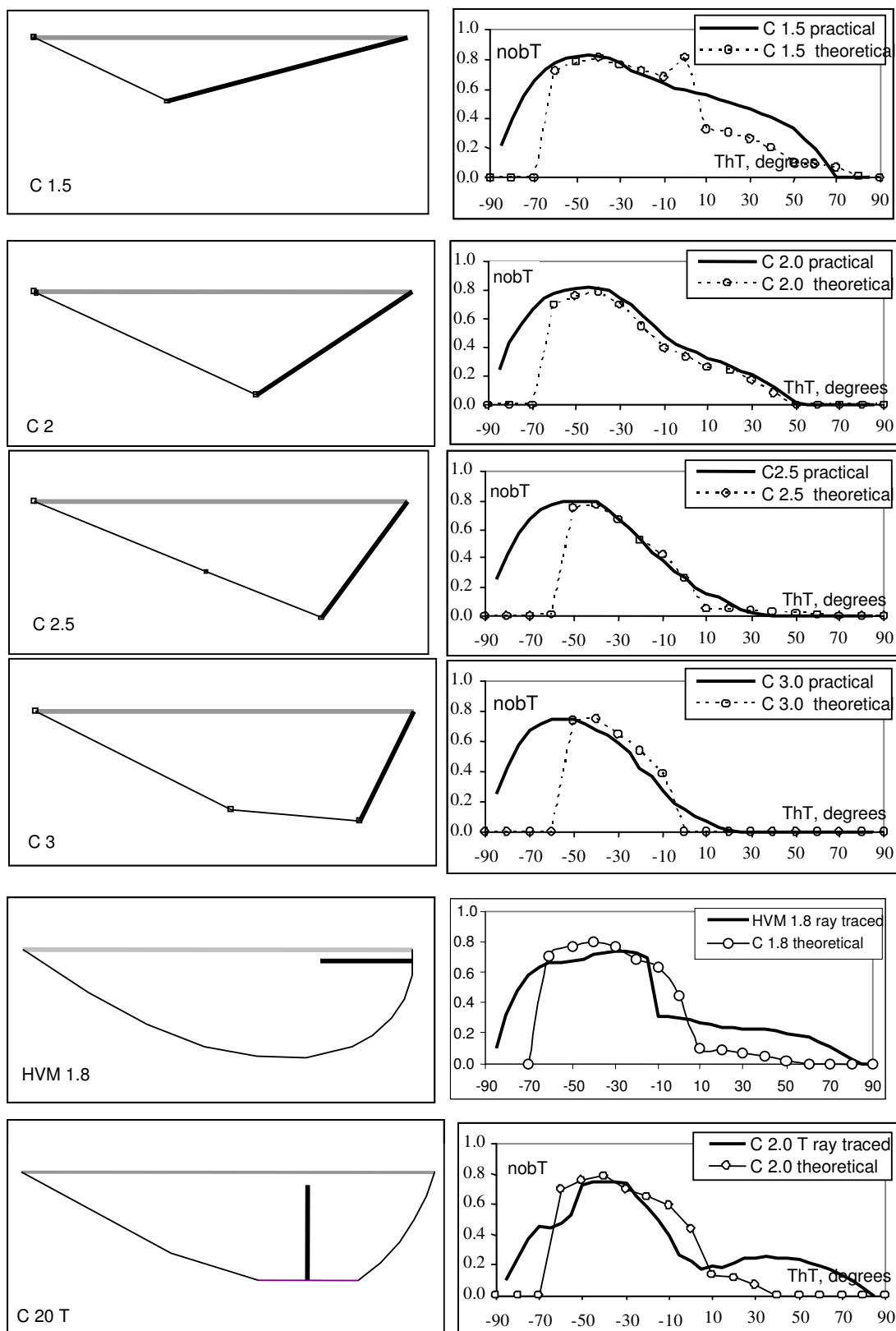
Figur 16. Olika typer av praktiskt möjliga lastanpassade solfångare.

5.2 Ray tracing

En ray-tracing-algoritm utvecklades i Excel för att beräkna optiska prestanda hos olika solfångargeometrier. Beräkningarna använder infallsvinkelberoende optiska egenskaper hos glaset och absorptorn, men använder en konstant reflektans på 0,85 hos reflektorn. För att tidsoptimera processen med att hitta lämpliga praktiska reflektorgeometrier gjordes först 2-dimensionella beräkningar (dvs endast θ_i som infallsvinkel) av olika varianter av geometrierna i figur 16 för att hitta reflektorformer som stämde överens med de framräknade optimala optiska verkningsgraderna. Då en lämplig reflektorform hittats gjordes beräkningar med en 3-dimensionell beräkningsalgoritm för att mer exakt beräkna solfångarens optiska prestanda och skapa indatafiler för systemsimuleringar. Beräkningsalgoritmen beskrivs utförligare i Nordlander (2004).

5.3 Resultat från beräkningar

Figur 17 visar sex olika solfångargeometrier som valdes ut för beräkningar av solvärmeutbyte och ekonomiska beräkningar. I figur 17 visas även den framräknade optiska verkningsgradskurvan, vilken kan jämföras med den teoretiskt optimerade för respektive koncentrationsfaktor i samma diagram.

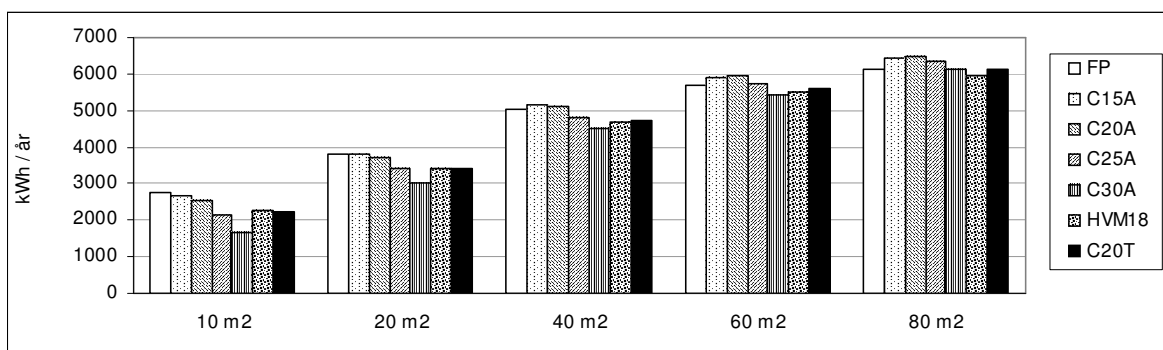


Figur 17. Undersökta praktiskt möjliga solfångare med optisk verkningsgrad nära de teoretiskt optimala. De teoretiska kurvorna har optimerats utifrån maximalt årsutbyte med bivillkoret att stagnationstiden över 120 °C ej ska överstiga 20h/år för system med 40 m² solfångare.

De teoretiska kurvorna har räknats fram för en maximal stagnationstemperatur på 171°C och att den maximala stagnationstiden vid temperaturer över 120 °C ej får vara högre än 20 h/år i ett 40 m²-system. Detta motsvarar ungefär den termiska påfrestningen hos dagens kombisystem. De fyra första geometrierna är av typ A. Den femte geometrin är för en höst/vår-Mareco, en koncentrerande solfångare utvecklad vid VUAB AB som är designad för reducerad verkningsgrad sommartid. I dessa beräkningar är höst/vår-Marecon definierad geometriskt med hjälp av data rapporterade i Adsten (2002), och sedan beräknad med ray-tracing på motsvarande sätt som de andra solfångarna. Den sista geometrin är av typ B2.

De fyra första solfångarna följer den teoretiskt optimala kurvan väl. Vid låga infallsvinklar ($\theta_T < -50^\circ$) samt för höga infallsvinklar i första fallet med $C = 1,5X$, är dock den framräknade kurvan högre än den optimala. Detta beror på att den uppskattning av förhållandet mellan koncentration och diffus verkningsgrad som användes som utgångspunkt för optimeringarna underskattar den optiska verkningsgraden för geometrier med enkelsidiga absorbatörer, vilket diskuterats i avsnitt 3.2. Överensstämmelsen mellan de framräknade och de optimala optiska verkningsgradskurvorna för de två dubbelsidiga solfångarna är något sämre, på grund av en mer komplicerad geometri vilken är svårare att optimera för maximalt utbyte.

Figur 18 visar resultatet av simuleringar med de olika geometrierna i figur 17 för systemstorlekar mellan 10 och 80 m². Även resultat av simuleringar med plan solfångare är med i figuren. För mindre solfångarytor på 10-20 m² ger systemen med plana solfångare större utbyte än alla lastanpassade solfångarna, men för större systemstorlekar är den relativa skillnaden ganska liten. En jämförelse mellan de två solfångarna med dubbelsidig absorbatör ger vid handen att typ B2 har något mindre utbyte än höst/vår-Mareco i små system, men något större utbyte i större system. Det beror på att B2 har högre verkningsgrad för instrålning mellan -50° och -30°, men lägre verkningsgrad än Marecon mellan -30° och 10°.



Figur 18. Årsutbyte för olika systemstorlekar och de solfångartyper som visas i figur 17. System med plan solfångare (FP) är medtagen som jämförelse.

5.4 Resultat från mätningar

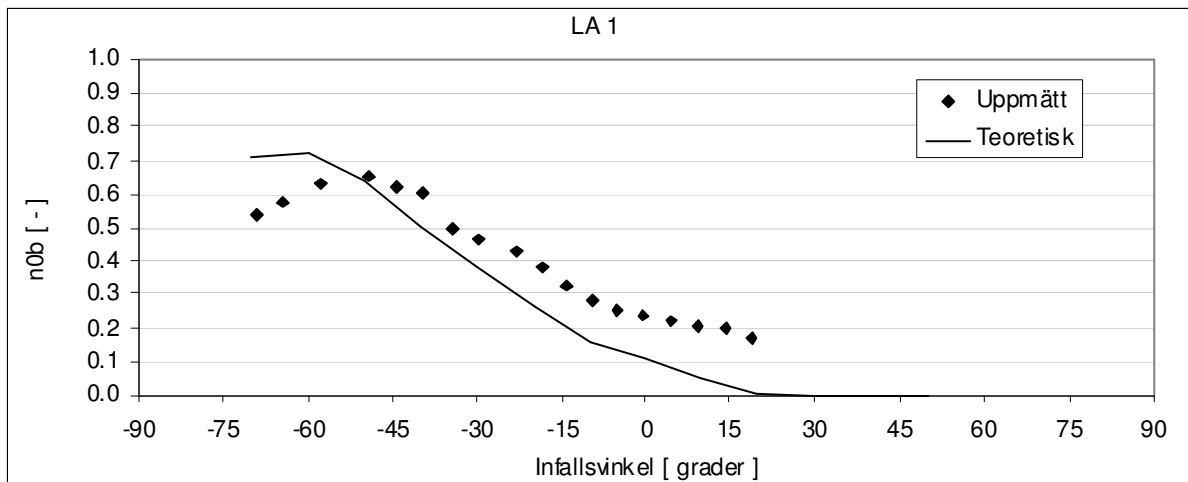
Två examensarbeten med anknytning till projektet har genomförts av studenter vid Högskolan Dalarna. Fares (2002) har genomfört teoretiska optiska beräkningar av olika lastanpassade solfångare medan Fiedler (2002) har genomfört utomhustester av lastanpassade solfångare. De två solfångare som undersöktes visas i figur 19. Den vänstra bilden visar en solfångare av typ A med koncentrationsgrad $C = 3X$, plan reflektor och enkelsidig absorbatör, medan den högra bilden visar en solfångare av typ B1 med $C = 1,5X$.



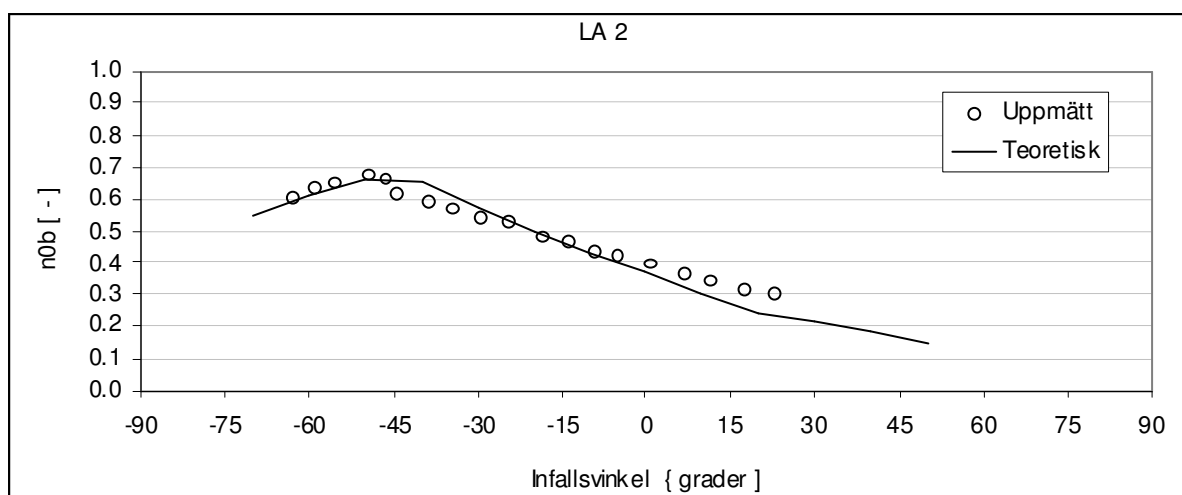
Figur 19. Foto på två testade solfångarprototyper. Den vänstra bilden är av typ A i figur 15, den högra solfångaren är av typ B1 i figur 16.

Figur 20 visar den optiska verkningsgraden, såväl den teoretiskt beräknade som den uppmätta, för solfångaren av typ A. Överensstämmelsen är dessvärre dålig, vilket delvis kan förklaras med att reflektorn delvis stöts av ett frigolitmaterial som mjuknade vid högre temperaturer. Reflektorn tenderade att ändra form med temperaturen vilket ytterligare försvårade mätningarna. Solfångaren av typ B1 tillverkades med mer stabil reflektor. Överensstämmelsen mellan den uppmätta och den teoretiska optiska verkningsgraden för B1 var god, vilket visas i figur 21. Detta tas som indikation på att ray-tracing-beräkningarna stämmer.

Värmeförlustkoefficienten vid $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ uppmättes till $2,47 \text{ [W/m}^2, ^\circ\text{C]}$ i båda fallen. Jämfört med förväntat värde för solfångaren av typ B1 är överensstämmelsen mycket god, medan värmeförlustkoefficienten är högre än det estimerade värdet enligt ekvation 3 för solfångaren av typ A. Orsaken kan delvis vara dålig isolering, men det kan också bero på att ekvation 3 tenderar att underskatta värmeförlustkoefficienten för enkelsidiga absorbatörer.



Figur 20. Uppmätt respektive teoretisk optisk verkningsgrad för solfångare av typ A (Figur 19, vänstra bilden).



Figur 21. Uppmätt respektive teoretisk optisk verkningsgrad för solfångare av typ B1 (Figur 19, högra bilden).

Utifrån uppmätta data på optisk verkningsgrad och värmeförlustkoefficienter kan den förväntade stagnationstemperaturen beräknas. För solfångaren av typ A har denna beräknats till 141°C medan solfångaren av typ B1 har stagnationstemperaturen 157°C. På motsvarande sätt har stagnationstemperaturen för en plan referenssolfångare (definierad i kapitel 4), beräknats till 181°C. Skillnaden i stagnationstemperatur mellan de två lastanpassade solfångarna beror på utseendet av den optiska verkningsgradskurvan.

5.5 Lastanpassade solfångare för olika systemstorlek

System med stora solfångare förväntas ge ungefär samma årsutbyte, vare sig de har plana solfångare eller lastanpassade. Värmeproduktionen sker dock under delvis skilda tillfällen. Även om den producerade energimängden är lika så kan effekten vara olika, vilket illustrerades av figur 5 och 6. Medan det lastanpassade solvärmesystemet levererar värme jämnt under dagen, levererar de plana solfångarna samma energimängd men under kortare tid under dagar då instrålningen är stor i förhållande till lasten. Därför undersöktes det om det finns någon skillnad i optimal tankstorlek och värmväxlarstorlek för de två olika systemtyperna.

TRNSYS-simuleringar på olika systemstorlekar och med plana solfångare respektive lastanpassade solfångare med $C = 2X$ genomfördes och den ekonomiskt optimala tankstorleken samt värmväxlarstorleken (mätt som UA-värde) identifierades. Resultatet ses i tabell 1 som också redovisar kostnaderna för de ekonomiskt optimala komponenterna. Kostnaderna avser slutpris till kund exklusive moms för en extern plattvärmväxlare och en färdigisolerad ackumulatortank. Tabellen visar att skillnaden i såväl komponentstorlek som komponentkostnad är liten och troligtvis försumbar i praktiska tillämpningar. Det kan konstateras att systemkostnaden (exklusive solfångare) ökar då solfångarean ökar. I reella värden är det dock ganska måttliga ökning av systemkostnaden, ca 10.000 kr då solfångarean ökas från 10 m² till 40 m². Övriga komponenter i systemet antas påverkas marginellt om man ändrar solfångarstorlek. Det är anmärkningsvärt att den optimala tankstorleken är så liten som ca 2,5 m³ även vid så stor solfångarearea som 80 m².

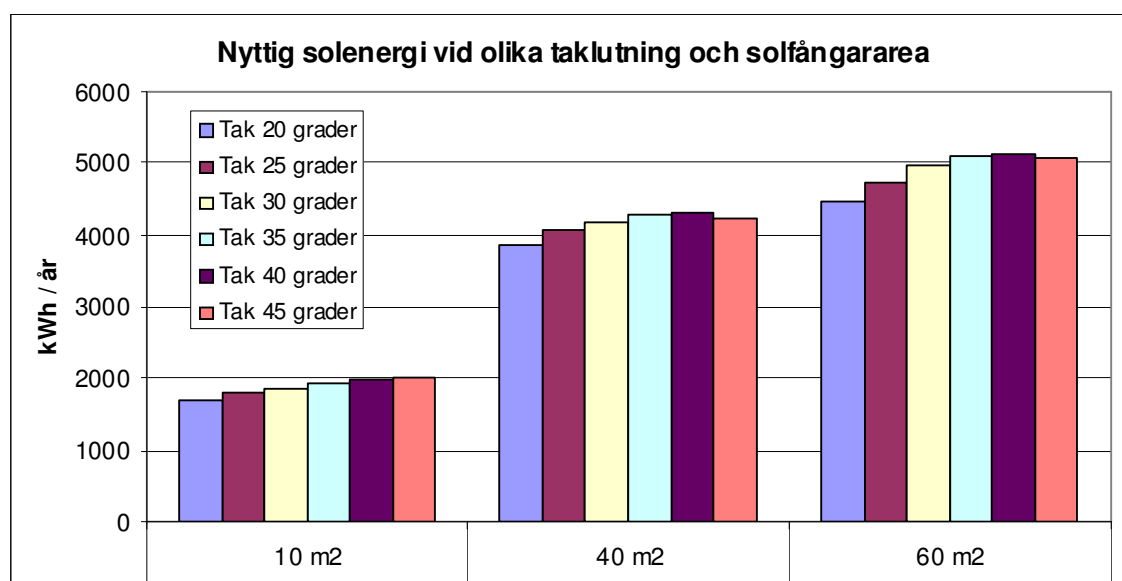
A_c	V_{FP}	V_{LA}	UA_{FP}	UA_{LA}	Kostnad FP	Kostnad LA
m^2	m^3	m^3	W/K	W/K	SEK	SEK
10	0.73	0.67	589	450	11200	10500
20	1.14	1.08	1121	937	15700	15000
40	1.78	1.56	2011	1840	22900	20600
60	2.30	2.45	2714	2690	28700	30200
80	2.52	2.57	3518	3305	31600	31900

Tabell 1. Optimala komponentstorlekar och sammanlagd kostnad för solvärmeväxlare och ackumulatortank för system med plana solfångare och lastanpassade solfångare. I tabellhuvudet betyder

- A_c solfångararea
- V_{FP} optimal tankvolym för plan solfångare
- V_{LA} optimal tankvolym för lastanpassad solfångare
- UA_{FP} optimal värmewäxlarkapacitet för plan solfångare
- UA_{LA} optimal värmewäxlarkapacitet för lastanpassad solfångare

5.6 Utbytets beroende av taklutning

Samtliga beräkningar i kapitel 3 – 5.4 har gjorts med antagandet av en takvinkel på 30°. Figur 22 visar hur årsutbytet förändras om takvinkeln förändras. Beräkningar har gjorts för en lastanpassad solfångare med $C = 2X$ enligt figur 17. Om takvinkeln minskar under 30° så minskar årsutbytet eftersom taket då får en mindre gynnsam vinkel mot direktstrålningen under de perioder då det samtidigt finns mycket sol och stort värmebehov, det vill säga omkring 15° - 30° solhöjd. Skillnaden blir inte så drastisk eftersom detta motverkas av att de lastanpassade solfångarna har högre optisk verkningsgrad vid lägre infallsvinklar. Om takvinkeln ökar över 30° så förändras utbytet också måttligt, eftersom den ökade instrålningen mot taket motverkas av den försämrade optiska verkningsgraden. Sammanfattningsvis kan sägas att en och samma lastanpassade solfångare passar bra för normala taklutningar i Sverige. Detta diskuteras mer i detalj i Nordlander (2004).



Figur 22. Årsutbyte från solfångarsystem med lastanpassade solfångare med $C=2X$ och olika taklutning. Solfångaren är ursprungligen designad för en taklutning på 30°.

6. Ekonomi för system med lastanpassade solfångare

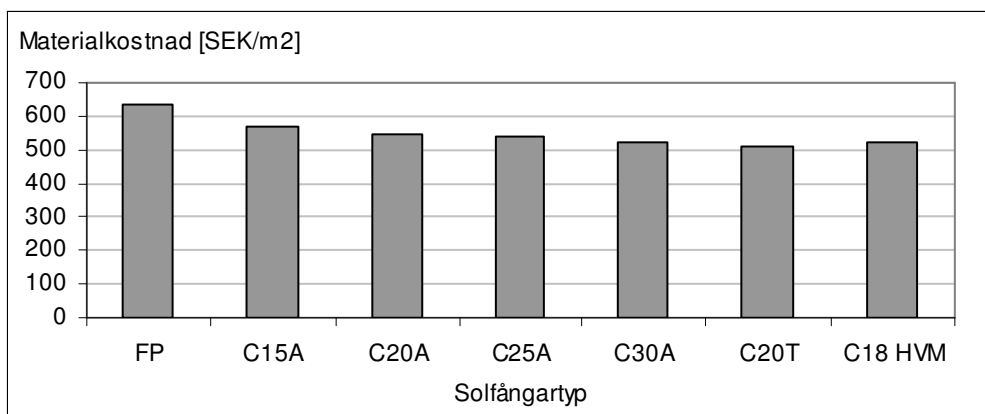
6.1 Materialkostnader

I ett försök att göra en uppskattning av de eventuella ekonomiska fördelarna med lastanpassade solfångare har materialkostnaderna för olika solfångartyper beräknats. Kostnaderna för de olika komponenter som ingår i solfångarna (de typer som visas i figur 17 samt plan solfångare) visas i tabell 2. Utifrån geometrin hos solfångarna har en total materialkostnad per solfångartyp räknats fram vilket visas i figur 23. Arbetskostnad för att tillverka solfångaren är inte inräknad, eftersom den kan antas vara i samma storleksordning för den plana som den lastanpassade solfångaren.

Materialkostnaden antas vara den viktigaste bestämmande faktorn för solfångarpriset i en storskalig produktion. Jämförs data från figur 23 med utbytet från de olika solfångarna som visas i figur 18 så kan det konstateras att solvärmen från de lastanpassade solfångarna har upp till 16 % lägre kostnad än solvärme från plana solfångare i stora system (40 m² och över). I Nordlander & Lorenz (2003) konstateras att solfångarna står för omkring 70 % av totalkostnaden i villasystem med stora area. Det betyder att kostnaden för värmen från lastanpassade solfångarsystem kan förväntas vara ca 10 % lägre än från motsvarande system med plana solfångare. Förutom den ekonomiska vinsten har man mindre problem med överhettning och därför även bättre förutsättningar för lång livslängd på anläggningen. Möjligen finns kan de lastanpassade solfångarna bli ännu kostnadseffektivare om man kan använda billigare material tack vare den lägre stagnationstemperaturen. I beräkningen har inte heller potentialen för inbesparat taktäckningsmaterial medtagits.

Material	Pris	Type	Type	Type	Type
	SEK/m ²	FP	C1.5 A C2.0 A	C2.5A C3.0A	C1.8 h/vM C2.0 B2
Absorbator 143 mm, es	223	X	X		
Absorbator 122 mm, es	255			X	
Absorbator 70 mm, ds	196				X
Reflektor	70		X	X	X
Isolering	50	X	X	X	
Baksida solfångarlåda	30	X	X	X	X
Glas	130	X	X	X	X
Sidoprofiler	150	X	X	X	X
Skruv, tätningar etc.	50	X	X	X	X

Tabell 2. Sammanställning av materialkostnader för olika solfångartyper. ”es” = enkelsidig; ”ds” = dubbelsidig. Priset avser kostnad per ytenhet material, inte solfångarearea. Kryss i rutan betyder att solfångaren i kolumnen är utrustad med materialet i fråga.

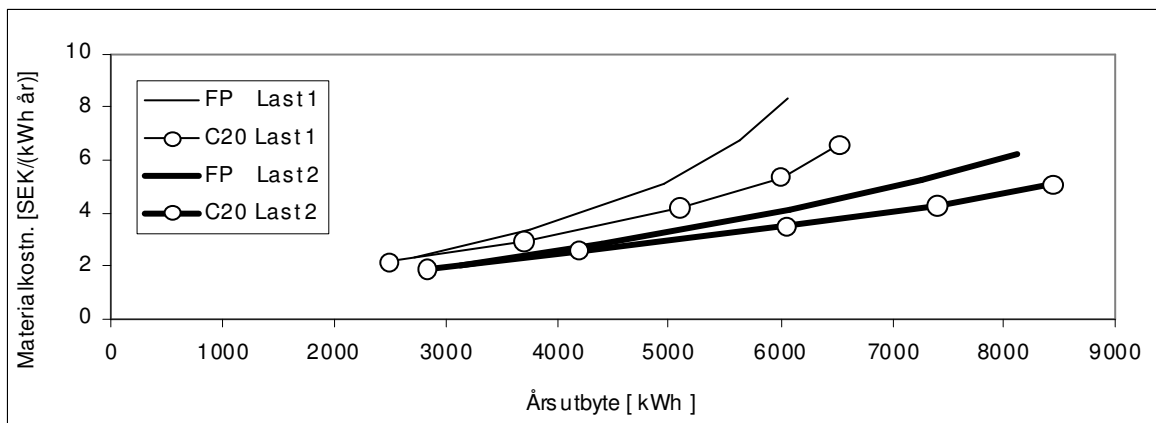


Figur 23. Total materialkostnad för plan solfångare samt för olika lastanpassade solfångare från figur 17.

6.2. System med olika värmelast

Ett viktigt mått på kostnadseffektiviteten för solfångarsystem är den specifika investeringskostnaden, definierad som den investering som behövs för att systemet ska leverera en årlig kWh nyttig solenergi. Eftersom kostnaden exklusive solfångare är ungefär densamma för system med plana eller lastanpassade solfångare, och eftersom kostnaden för en färdig industriellt tillverkad solfångare kan förväntas stå i proportion till materialkostnaden är det av intresse att jämföra den specifika materialkostnaden för olika solfångare, definierad som solfångarens materialkostnad, dividerad med mängden nyttig solenergi per år. Eftersom utbytet per kvadratmeter beror på systemstorleken och lastens storlek blir den specifika materialkostnaden olika beroende på systemstorlek och på lasten.

Den specifika investeringskostnaden för solfångarmaterialet undersöktes genom simuleringar med en plan solfångare och en lastanpassad med koncentrationsfaktor 2. Varje solfångare simulerades med 10, 20, 40, 60 och 80 m² area och med två olika värmelaster. Den lägre värmelasten är densamma som beskrivits i avsnitt 3.1 och som använts för övriga beräkningar i rapporten. Systemen simulerades också med en högre värmelast, 20.000 kWh i stället för 8.000 kWh för uppvärmning, men med samma tappvarmvattenlast. Resultaten visas i figur 24, där den specifika materialkostnaden plottats mot insamlad energi. De tunnare linjerna i diagrammet visar den specifika materialkostnaden för solfångare i system med den lägre värmelasten, och de feta linjerna visar kostnaden med den högre värmelasten. Som synes är materialkostnaden lägst och ungefär densamma för båda solfångartyperna och båda lasterna när solfångarearean är liten. Kostnaden ökar med systemstorlek, men olika mycket beroende på lasten och solfångartypen. Den lastanpassade solfångarens specifika kostnad ökar långsammare med systemstorlek, både i system med låg och med högre värmelast.



Figur 24. Specifika materialkostnaden för plan och lastanpassad solfångare som funktion av årlig insamlad nyttig solenergi, för system med olika solfångararea, solfångartyp och last. Last 1 är på totalt 11.500 kWh och last 2 är på totalt 23.400 kWh.

7. Sammanfattande slutsatser

Projektet har inneburit viktiga framsteg såväl när det gäller konkreta resultat som utveckling av beräkningsmetoder. De viktigaste specifika praktiska resultaten kan sammanfattas med följande punkter:

- Det går att bygga lastanpassade solfångare med koncentrerande optik och enkel design som inte bör vara svårare att tillverka än en plan solfångare. En lämplig lastanpassad solfångare har en koncentrationsfaktor mellan $C = 1,5X$ och $C = 3X$. Dessa solfångare har ungefär samma tjocklek och tyngd som plana solfångare.
- Lastanpassade solfångarsystem för enfamiljshushåll kan byggas i ytor som täcker hela villatak ($\geq 40 \text{ m}^2$) utan att den termiska påfrestningen på värmesystemet behöver bli större än för ett konventionellt solvärmesystem med 10 m^2 plana solfångare.
- Lastanpassade solfångare i solvärmesystem levererar ungefär samma mängd värme per m^2 som plana solfångare om systemstorleken är $\geq 20 \text{ m}^2$.
- Lastanpassade solvärmesystem behöver inte ha annorlunda systemkomponenter än motsvarande system byggda med plana solfångare. Ackumulatortanken behöver inte vara större än $2,5 \text{ m}^3$, även för systemstorlekar upp till 80 m^2 .
- En och samma lastanpassade solfångare kan användas för ett brett intervall av olika taklutningar och systemstorlekar.
- Lastanpassade solfångare kan designas för en maximal stagnationstemperatur. Detta möjliggör att de kan byggas av billigare material än de traditionella plana solfångarna. Begränsning av stagnationstemperaturen på detta sätt begränsar dock årsutbytet från solvärmesystemet. En lastanpassad solfångare med 140° maximal stagnationstemperatur producerar ca 14 % mindre energi per år än en solfångare med drygt 180°C stagnationstemperatur.
- Lastanpassade solfångarsystem har lägre materialkostnader än motsvarande system med plana solfångare. Om stora solfångarytor byggs ($\geq 20 \text{ m}^2$) är kostnaden för den levererade energin från system med lastanpassade solfångare i storleksordningen 10% lägre än om motsvarande system byggts med plana solfångare.
- Den specifika kostnaden för värmen från lastanpassade solvärmesystem är lägre om värmelasten (i form av uppvärmning) är högre. Den ekonomiska fördelen gentemot system med plana solfångare finns både för system med lägre och högre värmelast.
- Sammanfattningsvis innebär användande av lastanpassade solfångare i stora villasolvärmesystem att överhettningproblemen kan reduceras samtidigt som den producerade värmen kan bli billigare än om traditionella plana solfångare skulle användas.

Projektet har även inneburit resultat i form av utveckling av användbara redskap och metoder:

- En optimeringsalgoritm för design av optiken för lastanpassade solfångare i system har tagits fram. Metoden optimerar årsutbytet från ett lastanpassat solvärmesystem där man kan sätta bivillkor för maximal stagnationstemperatur eller maximal stagnationstid.
- En beräkningsmodell i Excel för att beräkna årsutbytet från solvärmesystem har utvecklats i samband med optimeringsarbetet. Modellen använder klimatdata med timvärden och visar god överensstämmelse i jämförelse med detaljerade TRNSYS-

beräkningar. Beräkningstiden är ca 1/1000 av tiden för en motsvarande beräkning i TRNSYS vilket möjliggör omfattande optimeringsberäkningar.

- En TRNSYS-komponent för solfångare med valfritt biaxialt infallsvinkelberoende har vidareutvecklats, på basis av den modell som använts inom IEA task 26 (Weiss 2003).
- Analys av optiken hos lastanpassade solfångare visar att en jämnt avtagande optisk verkningsgradskurva (som funktion av projicerad infallsvinkel) är viktig för att begränsa stagnationstemperaturen.

8. Möjlig och önskvärd fortsättning på projektet

Projektet har visat att det är möjligt och ekonomiskt rimligt att bygga lastanpassade solvärmesystem. Vår bedömning är också att det finns en uppenbar marknadsnisch för lastanpassade solfångare i Sverige. I länder som Österrike (som har störst försäljning av solfångare per capita av alla länder i Europa) är ett av de viktigaste marknadssegmenten för solvärme just stora system (20 – 40 m²) för enfamiljshus (Weiss, 2003). Dessa system byggs med plana solfångare och med partiell förångning som överhettningsskydd.

I Sverige säljs få stora system för enfamiljshus, men företrädare för solvärmebranschen vi talat med vittnar om att det finns ett påtagligt intresse för stora system som täcker stora takytor och klarar en stor del av husets värmebehov. Med utvecklade lastanpassade solfångare finns möjlighet att bygga sådana system både billigare och med mindre överhettningsproblem än med plana solfångare. Möjlighet finns att täcka hela takytor, vilket skulle göra solfångarinstallationen mer estetiskt tilltalande.

Vi anser det därför önskvärt att installationer av lastanpassade solfångare i enfamiljshus gjordes både i demonstrationssyfte och i experimentbyggnadssyfte. Det skulle vara önskvärt med en demonstrationsbyggnad i storleksordningen 40 –60 m² i ett enfamiljshus med lastanpassade solfångare av typ A, vilket är en form av solfångare som tidigare ej provats i stor skala i Sverige. Utvecklingen och tillverkning av solfångaren skulle kunna göras vid SERC som har personella resurser för detta, medan projektering och installation görs i samarbete med en erfaren solvärmeinstallatör. Demonstrationsprojektet skulle visa på möjligheten att bygga stora villasolvärmesystem även i Sverige, men även visa på potentialen för en ny typ av solfångare som kan ge lägre energikostnad i stora system jämfört med dagens teknik.

En mer djärv men lika intressant experimentbyggnation vore att utveckla en enklare variant av lastanpassad solfångare som består av enklare material men konstruerad för lägre stagnationstemperatur. Anläggningen skulle kunna byggas på SERCs solgård i Borlänge och skulle vara i storleksordningen 10-20 m². Anläggningen byggs för att demonstrera principen för maximal stagnationstemperatur samtidigt som det beräknade utbytet verifieras. Resultatet skulle därmed kunna vara utgångspunkt för fortsatt utveckling av billiga lastanpassade solfångare, gärna tillsammans med tillverkande industri.

Vi tror att en av de stora potentialerna för lastanpassade solfångare är den begränsade stagnationstemperaturen, vilket kan förlänga livslängden hos material samtidigt som nya material kan användas i solfångarproduktion. Det är vår övertygelse att det finns utrymme för fortsatta studier kring överhettning och materialval, t ex möjligheten att använda billigare reflektorer och mindre isolering, men även möjligheten att använda helt nya materialtyper som t ex olika plaster och till och med nya absorbatormaterial. Skall tekniken utvecklas till en att bli kommersiellt gångbar behövs även fler systemstudier av samband mellan utbyte, värmelast och stagnationstemperatur och även designstudier för icke söderriktade tak. Inte minst viktigt är att även nya solfångartyper har låga värmeförluster, för att möjliggöra betydande värmeproduktion under höst och vår.

Referenser

- Adsten, Monica. (2002). *Solar thermal collectors at high latitudes*. Doktorsavhandling, Uppsala Universitet.
- Carvalho M. J., Collares-Pereira M., Gordon J. M. och Rabl A. (1985). Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection. *Solar Energy* **35**, 393-399.
- Duffie J. A. och Beckman W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*, 2:a upplagan. Wiley-Interscience, New York.
- Fiedler, Frank (2002). Optical and thermal performance of load adapter solar collectors. Outdoor tests and evaluation. Master thesis. Högskolan Dalarna
- Fiedler, Frank (2004). Personlig kommunikation.
- Helgesson Anna, Karlsson, Björn och Nordlander, Svante. (2002). Evaluation of a Spring/Fall Mareco. *Proc. Eurosun 2002*, Bologna, Italy (CD-rom).
- Klein *et al* (2002). TRNSYS 15. Madison, Wisconsin, USA.
- Lorenz, Klaus (2001). Kombisolvärmesystem – utvärdering av möjliga systemförbättringar. Licentiatuppsats, Institutionen för installationsteknik, Dokument D59:2001, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Mustafa, Fares (2002). Optical and thermal performance of load adapted solar collectors. Optical modelling of two load adapted collectors. Magisteruppsats. Högskolan Dalarna
- Nordlander, Svante och Lorenz, Klaus (2003). Economic analysis of combisystems for high solar fractions. *Proceedings ISES Solar World Congress*, Göteborg, Sverige (CD-ROM).
- Nordlander, Svante (2004). *Load adapted solar thermal combisystems*. Licentiatuppsats som läggs fram vid Uppsala Universitet, hösten 2004. Opublicerat manuskript.
- Perers B., Lorenz, K., Rönnelid, M (2004). Partiell förångning i solfångarsystem
- Rönnelid, Mats (1998). *Optical design of stationary solar concentrators at high latitudes*. Doktorsavhandling, Uppsala Universitet.
- Skartveit, A., Lund, H. Och Olseth, J.A. (1994). *The design reference year*. DNMI-report No. 11/94, The Norwegian Meteorological Institute, Blindern, Norge.
- Weiss, Werner, (editor) (2003). *Solar heating Systems for Houses – A design handbok for solar combisystems*. James & James, London.