

Dobbeltsidig solfanger med monolitisk silica aerogel

Vurdering af fuldskala prototype

Kim Tursø-Finnich



Meddelelse nr. 259

Februar 1994

Danmarks Tekniske Højskole
Laboratoriet for Varmeisolering

Indledning

Denne rapport omhandler arbejdet på projektet "Solvarmeanlæg med silica aerogel".

Projektet er finansieret af Energiministeriet, som en del af forskningsområdet "Energianvendelse i bygninger" under ministeriets forskningsprogram EFP-89 med projektnummeret 1213/89-2.

Arbejdet er udført på Laboratoriet for Varmeisolering i perioden under medvirkning af følgende medarbejdere:

Svend Svendsen, lektor, Ph.D
Kim Tursø-Finnich, civilingeniør, HD
Hamid Jalali, teknisk assistent
Birthe Friis, overassistent
Martin Dandanell, maskinarbejder
Poul Dedenroth, maskinarbejder
Bo Mimik Jørgensen, studerende

Desuden rettes en tak til alle øvrige på laboratoriet, som har bistået med oplysninger, gode råd og kommentarer iøvrigt.

Indholdsfortegnelse

Indledning	2
Indholdsfortegnelse	3
Resumé	4
English Summary	5
1. Udvikling af konstruktion	6
2. Beregningsprogram og resultater	10
2.1. Generel beskrivelse	10
2.2. Indendørs opstilling i solsimulator, beregning af effektivitet, varmetab m.m.	11
2.3. Udendørs opstilling, beregning af effektivitet, varmetab m.m.	13
3. Indendørs forsøg og målinger	15
3.1. Lufttryk	15
3.2. Effektivitet	15
3.3. Tryktab	18
4. Udendørs forsøg og målinger	19
4.1. Lufttryk	19
4.2. Effektivitet	20
4.3. Stagnation	24
5. Sammenligning af beregninger og målinger	25
5.1. Indendørs opstilling i solsimulator	25
5.2. Udendørs opstilling	26
5.3. Årsager til forskelle mellem beregnede og målte effektiviteter	27
6. Beregning af årsydelser	32
6.1. Brugsvandsanlæg	32
6.2. Anlæg med konstant temperatur (Fjernvarmeanlæg)	34
7. Driftssikkerhed og holdbarhed	36
7.1. Lufttæthed	36
7.2. Termiske bevægelser	36
7.3. Øvrige forhold	38
Konklusion	39
Referencer	41
Bilag	43

Resumé

Dette projekt har resulteret i en solfanger med et godt og brugbart design, en god effektivitet og ydelse men desværre en utilstrækkelig holdbarhed af absorberen.

I projektets forløb er der skabt en dobbeltsidig, plansymmetrisk solfanger, inderst opbygget med en SunStrip-absorber, pålagt monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale og yderst 2 dækglass, hvor hele konstruktionen er holdt sammen af en rustfri stålramme. Den samlede konstruktion er evakueret for luft ned til et tryk lavere end 50 mbar, konkret ca. 1 mbar, for at opnå minimal varmetransmission igennem aerogelen.

Parallelt med den konstruktive udvikling er der blevet videreudviklet et edb-program til beregning af solfangerens effektivitet med forskellige opbygninger og under varierende vejrforhold, så de forskellige prøvningsituationer har kunnet beregnes.

Solfangeren er blevet prøvet for tæthed og tryktab samt effektivitet indendørs og udendørs, men ikke under stagnation, da absorberen gik i stykker umiddelbart inden.

Sammenligninger af beregninger og målinger af effektivitet indendørs og udendørs viser fin overensstemmelse for starteffektivitet (ca. 75%) og en rimelig overensstemmelse ved 100°C's overtemperatur (8 hhv. 12 pct-points afvigelse). I alt målt gennemsnitlige varmetabskoefficienter på ca. 2 W/m²K.

Beregninger af årsydelser ud fra målte effektiviteter viser, at den dobbeltsidige solfanger i et brugsvandsanlæg (10/50°C) kun yder 1/4 mere end en traditionel solfanger til brugsvandsanlæg, mens den yder dobbelt så meget ved opvarmning af returvand i et fjernvarmeanlæg (60/80°C). En traditionel solfanger til højtemperaturformål (med dæklag af glas & teflonfolie) vil have en ydelse, der ligger midt imellem disse 2 ydelser i begge anlægstyper.

Solfangeren har ikke gennemgået en egentlig driftssikkerhedsprøvning, men har indledningsvis og under effektivitetsprøvningserne indendørs og udendørs vist god holdbarhed mht lufttæthed, tæthed for dug og regn samt mekanisk styrke ved vindpåvirkning. Umiddelbart før stagnationsprøvning fik absorberen imidlertid træthedsskader som følge af utilstrækkelig frihed til termiske bevægelser, hvilket skyldtes stor friktion på grund af det ydre overtryk. Måling af stagnationstemperatur måtte derfor opgives, og den nuværende absorber har således ikke været tilstrækkeligt holdbar.

Overvejelser om forbedring af solfangeren bør derfor tage udgangspunkt i udvikling en ny absorber. Enten ved at nedsætte friktionen på absorberens overflade (vha. teflonfolie?) og/eller ved at anvende/udvikle et absorbermateriale med mindre varmeudvidelseskoefficient end aluminiums (fx rustfrit stål?). Alternativt undgå berøring og dermed friktion mellem absorber og aerogel (fx absorber lagt "løst" i en indre, lufttæt glaskasse). Under alle omstændigheder vil en absorber med plan overflade - i modsætning til SunStrip-absorberen - være at foretrække aht. samling med de plane skiver af monolitisk silica aerogel.

English Summary

This project resulted in a well designed solar collector showing good efficiency and yearly yield, but unfortunately unsatisfactory absorber durability.

During the project a double sided plane symmetrical solar collector was constructed. In the centre was placed a SunStrip-absorber, wrapped in tiles of monolithic silica aerogel, covered with glass on the outsides and framed by stainless steel with a butyl sealant. All was evacuated to a pressure less than 50 mbar (in fact 1 mbar) to obtain low heat loss in the aerogel.

During the constructive development, a computer program was developed for calculating the efficiency of different constructions under various weather situations. Hereby calculations of indoor (in solar simulator) and outdoor efficiency could be compared with measurements.

The solar collector was tested for airtightness, pressure drop, as well as efficiency in the solar simulator (only irradiation on the front side) and outdoor efficiency (irradiation on both sides, efficiency related to the irradiation on the front side) but no stagnation test because of fatigue fracture of the absorber.

Comparisons of calculations and measurements of efficiency in both test situations showed fine agreement of start efficiency: 75% (front side irradiated), 77% (both sides irradiated) and good agreement at a temperature difference of 100°C (Deviation: 8%point resp. 12%point). On average the overall heat loss coefficient was measured in the vicinity of 2 W/m²K.

Calculations of yearly yield on the basis of the measured efficiencies were carried out with the EURSOL program. Results show approx. 25% higher yield in a standard domestic hot water system (10°C/50°C) and approx. 100% higher yield when heating the return water in a district heating system (60°C/80°C) for the double sided solar collector compared to an ordinary solar collector for DHW-purposes. In both systems the yield of an ordinary solar collector for hightemperature purposes e.g. distict heating (with a 2-layer cover of glass and teflon foil) were exactly in between the two collectors yields.

The double sided solar collector did not pass an approved reliability test, but showed a satisfactory durability concerning airtightness, raintightness and mechanical strength during the efficiency tests. However, just before the (outdoor) stagnation test took place the absorber had a fatigue fracture due to thermal expansion and contraction caused by the external air pressure combined with high internal friction between the aerogel and the absorber surface. Therefore, measurements of the stagnation temperature could not be carried out. In all, the absorber showed unsatisfactory reliability and durability.

Development of the next prototype should begin with considerations about this problem. Three ways of solving the problem should be considered. Decreasing the coefficient of friction (e.g. adhesive teflon foil on the absorber), Finding/developing an absorber material with a lower heat expansion coefficient than that of aluminium (e.g. stainless steel or a new non-metallic compound material), Avoiding contact (friction) between absorber and aerogel (e.g. the absorber being placed in an airtight inner glass box only in contact with aerogel by the inlet and outlet tubes). In any case an absorber with a plane surface would be preferred to facilitate assembly with the plane surfaced aerogel tiles in the solar collector construction.

1. Udvikling af konstruktion

Udvikling af en ny prototype af en solfanger med monolitisk silica aerogel tog naturligt sit udgangspunkt i tidligere opsamlede erfaringer med sådanne solfangere. /1,2,3,4/.

Som konstruktion valgtes den tidligere foreslåede dobbeltsidige solfanger af flere årsager. Dels ønsket om at kunne opnå en enkel konstruktion, hvor man samtidig undgik en "metallunge" (som i /1/) til brug ved udvidelse af den indespærrede luft (ikke-evakueret solfanger). Dels ønsket om at kunne absorbere solstråling på begge sider og således forbedre solfangerens effektivitet og ydelse. Subsidiært ønsket om at kunne nøjes med at isolere med kun ét isoleringsmateriale, monolitisk silica aerogel.

Konstruktionen blev valgt, fordi tidligere dobbeltpladeabsorbere viste sig vanskelige at realisere pga. afgangning af vand fra mellemlægspladen (Isomax). Dette isoleringsmateriale er også forsøgt anvendt som randisolering i en tidligere, mindre prototype af en solfanger med monolitisk silica aerogel (Arcon), men med det tilsvarende problem til følge. Derfor tilstræbtes det at isolere solfangeren udelukkende med aerogel.

Konstruktionen blev opbygget indefra med en tube-in-plate absorber (Sun-Strip), omsluttet med monolitisk silica aerogel (Aerglass) og yderst 2 dækglas (Solite). Hele konstruktionen blev båret/afstivet af en stålramme (rustfri firkantør). Imellem ramme og dækglas lagdes en fuge (butyl). Målsat tegning af solfangeren og detaljer i konstruktionen fremgår af figurerne.

Pga. de meget høje temperaturer som kan forekomme i absorberen, og dermed i indløbsrøret og udløbsrøret, kunne stålrammen her lede varmen til den nærliggende fuge, som derved kunne beskadiges. For at forhindre dette, blev ind- og udløbsrørene isoleret med et stykke rør ("kapperør") med større diameter udenom og med granuleret monolitisk silica aerogel mellem de 2 rør. Kapperøret blev loddet på ind-/udløbsrøret 10 cm fra solfangeren.

Som absorber valgtes en Sun-Strip absorber (med plane finner), idet denne har vist sig meget holdbar fra andre, traditionelle solfangerkonstruktioner / højtemperatursolfangere. Begge sider af absorberen skulle forsynes med (stykker af) monolitisk silica aerogel. Som følge af Sun-Strip absorberens ikke-plane overflade blev den monolitiske silica aerogel på forsiden forsynet med fordybninger (egl. kantaffasninger ved sammenstødte aerogel-stykker), så de passede ned over absorberrørene. På bagsiden blev absorberoverfladen i stedet for udjævnet ved at lægge baner af glas imellem de enkelte absorberrør, så at aerogel-stykkerne kunne lægges direkte på uden forudgående afskæring. Hermed kunne de forskellige opbygninger sammenlignes.

Overvejelserne om absorberen angik også valget mellem en parallel opbygget absorber eller en seriel opbygget "serpentin"-absorber. På forsiden var absorberrørene fikseret på tværs i fordybningerne ved de sammenstødte aerogel-stykker (især efter evakuering/sammentrykning af solfangerkonstruktionen). Termiske længdeændringer af et fordelerrør ville netop foregå på tværs af absorberrørenes længderetning og kunne derved risikere at knuse den monolitiske silica aerogel omkring absorberrørene i fordybningerne. Af hensyn til minimalt varmetab ved enderne af solfangeren var stor isoleringstykkelse dvs. ind- og udløbsrør med så lille rørdiameter som muligt ønskeligt her. Af hensyn til at kunne beskytte butylfugen, var det ligeledes ønskeligt med så stor en isoleringstykkelse mellem kapperør og indløbsrør hhv. udløbsrør, dvs. så lille rørdiameter som muligt for ind- og udløbsrøret. Af disse grunde valgtes en seriel absorber dvs. at forbinde Sun-Strips'ene serielt med 10/8,4 mm kobberrør, der også blev brugt til ind- og udløbsrør.

Til at optage absorberrørenes termiske længdebevægelser ved enderne, blev der i aerogelen indlagt 2 skinner ("ekspansionsskinner"), hvori absorberrørene og rørvendingerne kunne bevæge sig. Til at optage ind- og udløbsrørets bevægelser forsynedes dette med en halv lyre.

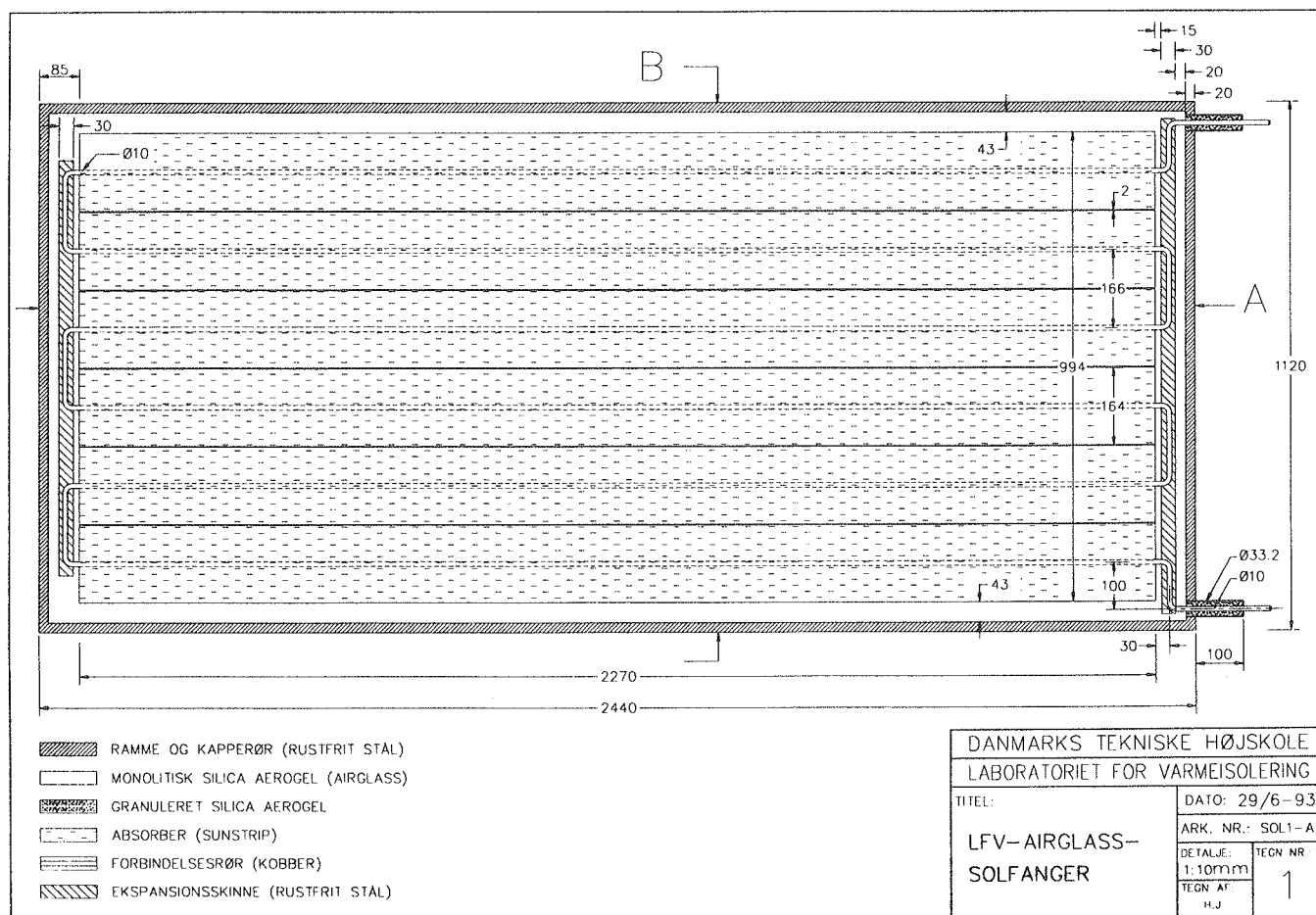
Absorberen blev fremstillet af firmaet Tekno-Term i Sverige efter vores forslag. På nær fremstillingen af de enkelte materialer, er alt øvrigt arbejde med tilvirkning, montage, tætning og samling udført på Laboratoriet for Varmeisolering, DTH.

På rammen blev sat en afspærringsventil samt et T-rørstykke til brug for evakuering af luft samt for måling af lufttrykket i solfangeren. Inden montering af absorberen blev rammen, der er hul, lukket og trykprøvet, så evakuering af aerogelen senere kunne ske i vished om at rammen med svejsninger var helt lufttæt. Derpå blev der boret huller i rammens inderside for at kunne evakuere aerogelen rimeligt hurtigt langs hele randen (og ud gennem ventilen).

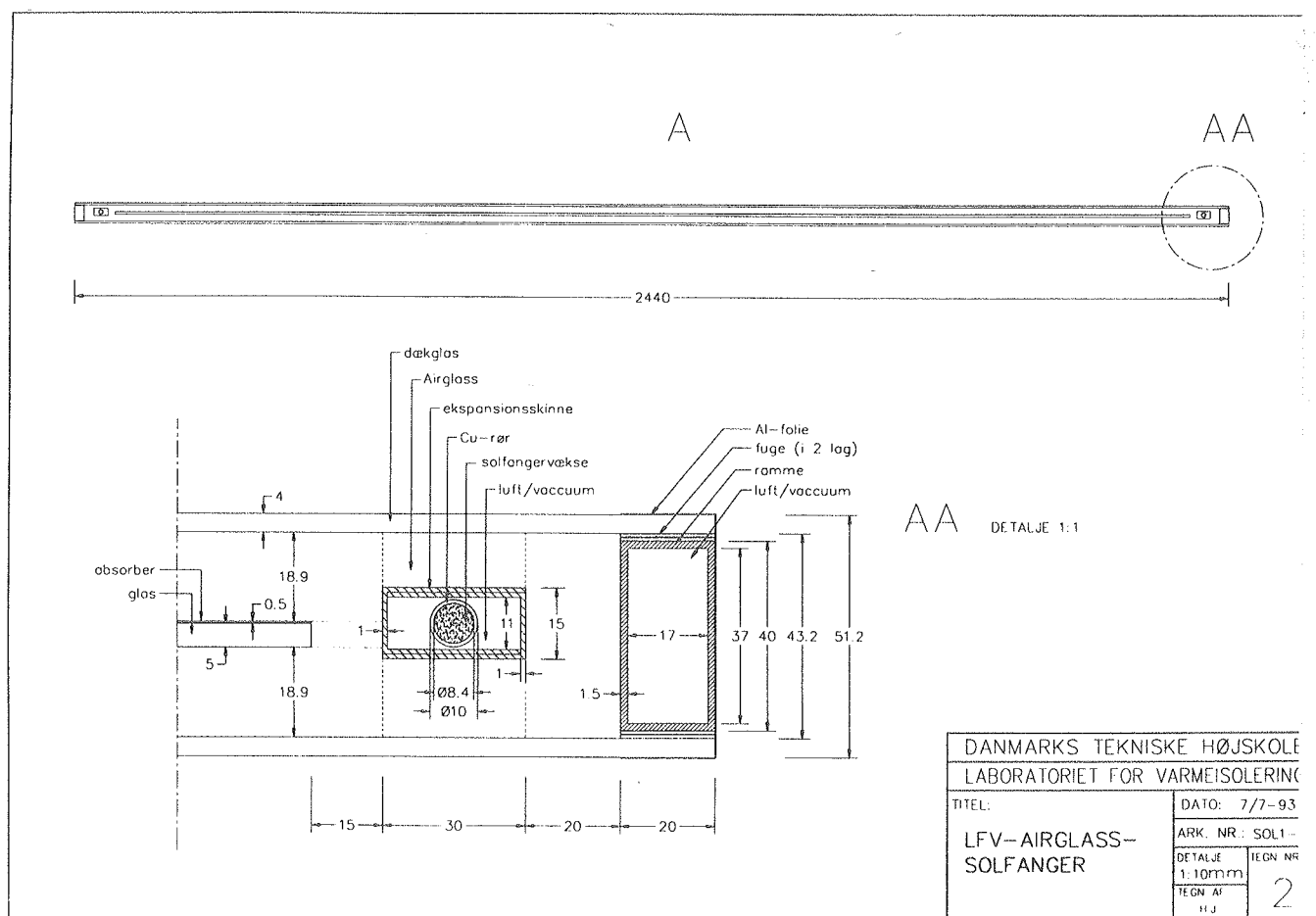
Dernæst blev alle dele af solfangeren gjort klar til samling, mens aerogel-stykkerne blev udtørret i ovn. De udtørrede aerogelstykker blev endeligt tildannet dvs. afskåret, så de ikke havde "høje" kanter og så de passede med arealet indenfor rammen.

Herefter fyldtes granuleret silica aerogel i de 2 kapperør, som blev lukket til med en lodning på hhv. indløbs- og udløbsrøret.

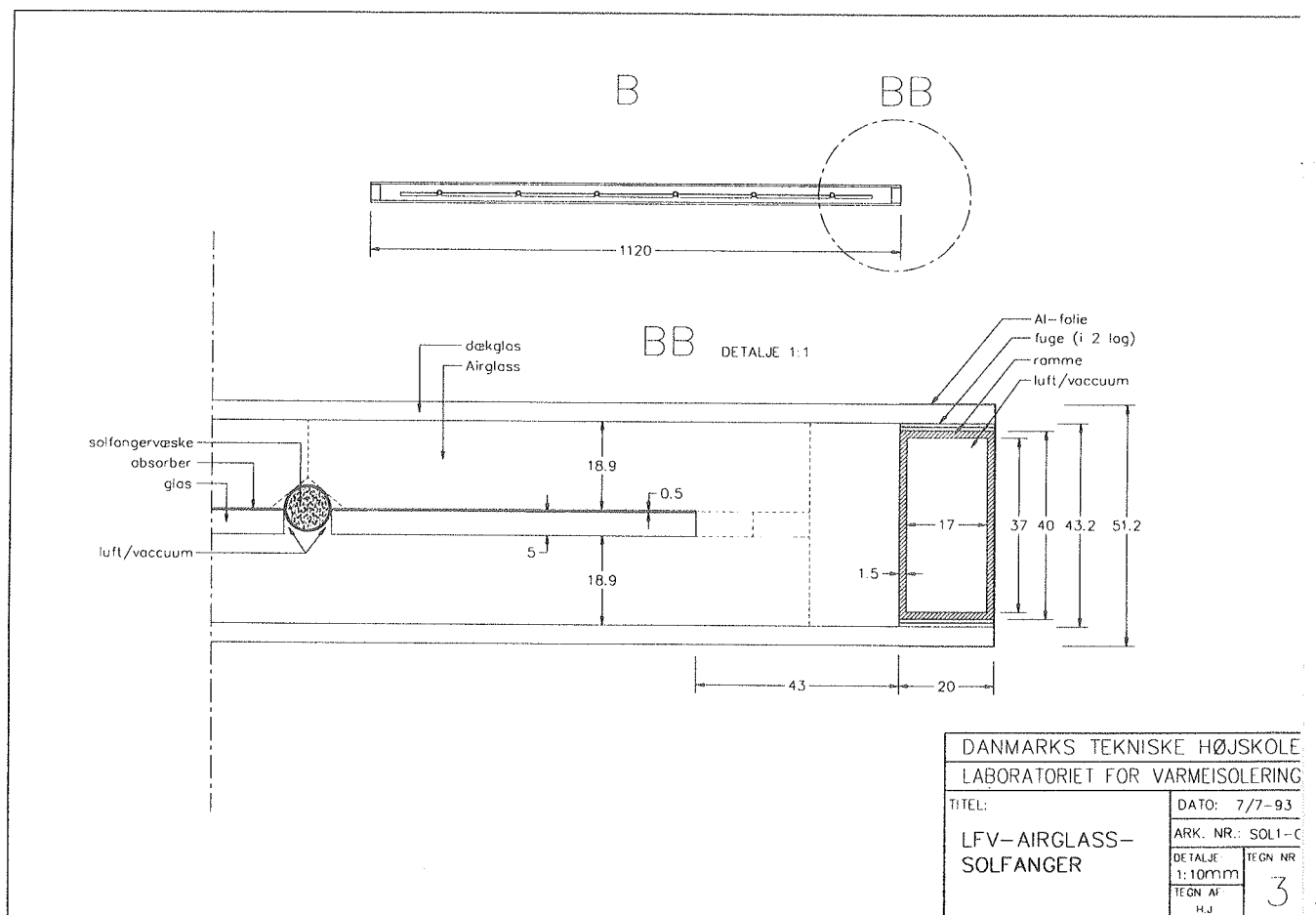
Solfangeren kan både placeres med den korte eller lange side vandret. Sidstnævnte er valgt.



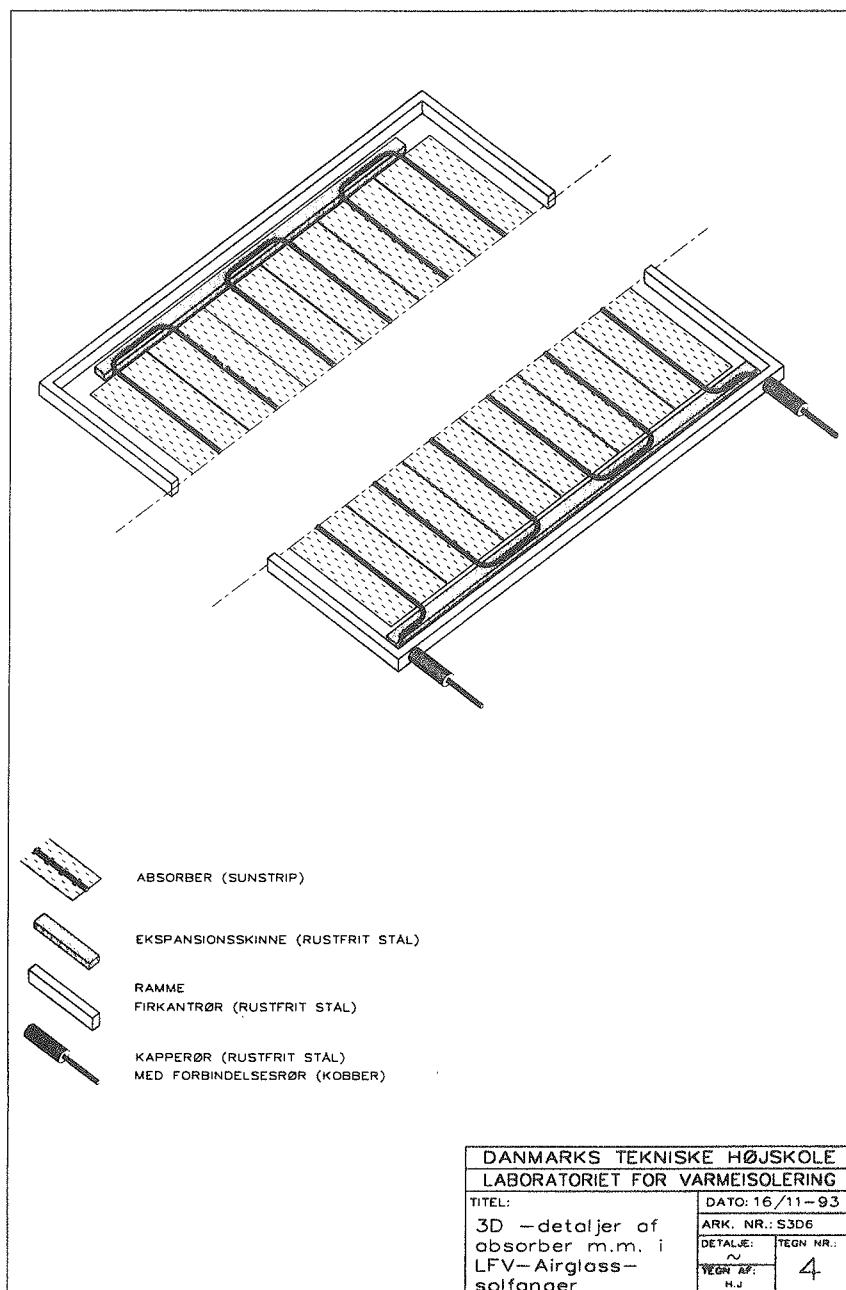
Figur 1.1. Plansnit af dobbeltsidig solfanger med monolitisk silica aerogel.



Figur 1.2. Længdesnit med detalje af ende af solfanger



Figur 1.3. Tværsnit med detalje af side af solfanger



Figur 1.4. 3-dimensionale detaljer af ender af solfanger (uden aerogel, glas og fuger)

2. Beregningsprogram og resultater

2.1. Generel beskrivelse

Til beregning af solfangerens effektivitet mm., er der blevet udviklet et edb-program. Programmet er en videreudvikling af et tidligere program, som er blevet udvidet betydeligt.

I det flg. gives en kvalitativ beskrivelse af edb-programmet, "MSASOL" (i Pascal). Et eksempel på inddata (MSASOLIN.DAT) og resultater (MSASOLUD.DAT) kan ses i bilag 1.

Som inddata behøves 2 sæt af parametre, vejrrparametre og konstruktionsparametre.

I) Vejrrparametre

Først og fremmest behøves solstrålingens styrke og geometriske forhold. (indfaldsvinkel, bestrålingsstyrke for direkte hhv. diffus stråling på forsiden, samt diffus stråling på bagsiden Endvidere indikation for opstilling i solsimulator eller ej)

Dernæst behøves omgivelsestemperaturen (fælles temperatur for luft og jordoverflade) I programmet udregnes himmelstrålingstemperaturen.

Endvidere kræves vindhastigheden oplyst.

II) Konstruktionsparametre

Absorberen antages at være en flad rektangulær kasse, hvortil målene må angives (længde, bredde og tykkelse) og strålingsmæssige egenskaber (absorptans og emmittans) samt udvendig diameter på ind-/udløbsrøret. Absorbertykkelsen er sat lig tykkelsen af finnerne, og der således ikke er taget hensyn til absorberens større tykkelse dvs. aerogelens mindre tykkelse lokalt ud for absorberens på sider uden indre glas. Desuden opgives afstanden fra absorberende til ydersiden af ekspansionsskinne.

Indre glas, som på bagsiden af den aktuelle solfanger, kan indlægges i programmet i form af materialeoplysninger (tykkelse og ekstinktionskoefficient). Glasset forudsættes at dække hele de(n) pågældende absorberside(r). Reelt er der ikke glas lokalt over absorberens.

Monolitisk silica aerogel antages at være det eneste isoleringsmateriale, som omgiver absorberen, dog forudsættes granuleret silica aerogel i de 2 kapperør. Aerogelen forudsættes evakueret til et lufttryk på mindre end 50 mbar, så varmetransporten bliver minimal. Som inddata gives geometriske mål og densitet (tykkelse på siderne (ens), tykkelse ved enderne (ens), tykkelse langs sider (ens) samt densiteten). Øvrige materialeparametre er givet på forhånd.

Dæklagene forudsættes at være af glas og ens på begge sider. Ligesom for de indre glas oplyses materialeparametre (tykkelse og ekstinktionskoefficient).

De 2 kapperør antages ligeledes at være ens. Fælles for disse angives geometriske mål og materialeparametre, herunder for kapperørsisoleringen. (længde, ydre diameter, godstykkelse bredde af lodning samt varmeisoleringsevne for kapperør og -isolering).

For rammen oplyses bredden, så solfangerens udvendige mål (areal m.m.) kan udregnes.

For hele solfangeren angives endvidere hældningen.

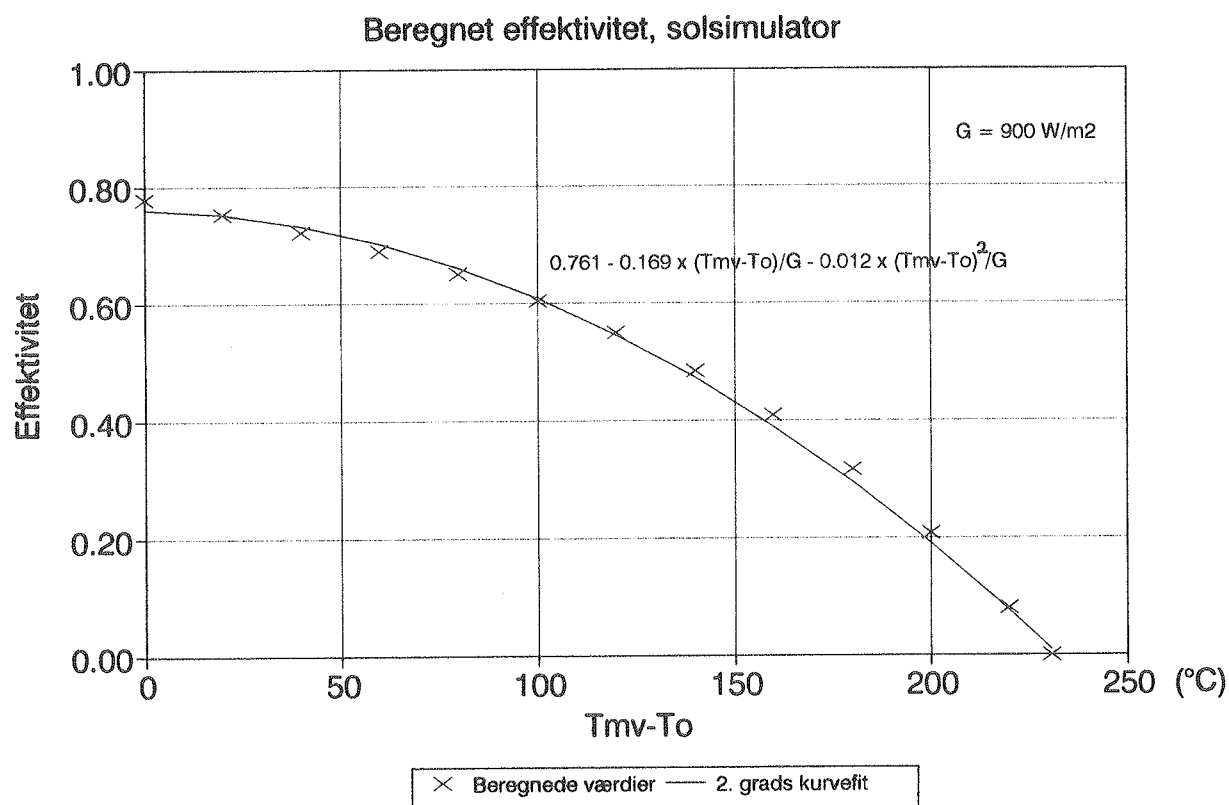
Ud fra disse input, beregner programmet forskellige resultater/output.

For hver side udregnes transmittans-absorptans produktet for det samlede dæklag, dvs. for dækglas-aerogel-absorber eller dækglas-aerogel-indre glas-absorber. Det transparente areal er sat lig absorberarealet. Desuden beregnes randareal, overfladeareal af kapperøret samt solfangerens areal og dens samlede overfladeareal.

For hver absorbertemperatur beregnes temperaturer af dækglas foran og bagpå samt ved kapperørets befæstelse til rammen, varmestrømme, samlet varmetab og varmetabskoefficient samt effektivitet indtil stagnationstemperaturen nås.

Den præcise teoretiske model for varmetransport bl.a. i monolitiske silica aerogel inkl. de respektive ligninger er anført i samtlige tidligere relevante referencer /1,2,3/, hvorfor de ikke er gentaget her. Dog kan anføres, at varmetransporten i den evakuerede aerogel antages at foregå endimensionalt som en kombination af ledning og stråling. Langs de 4 kanter (og hjørner) regnes geometrisk som gennem en halvcylinder (og kvart kugle), med en middeltykkelse, bestemt ud fra tykkelsen af aerogel ved den pågældende kant (hjørne). Desuden er varmetransportforholdene ved kapperøret undersøgt detaljeret og indarbejdet i programmet. Stålramme med luft og glas er ikke tillagt nogen isoleringsevne, ligesom aerogel ved enderne mellem absorberfiner og ekspansionsskiner. Endelig er det forudsat, at absorberens finnefaktor, F og solfangerens effektivitetsfaktor, F' begge er lig 1.

2.2. Indendørs opstilling i solsimulator, beregning af effektivitet, varmetab m.m.



Figur 2.1. Beregnet effektivitet, solsimulator. Kurvefit på alle datasæt.

Til beregning af solfangerens effektivitet, opstillet indendørs i solsimulatoren, er benyttet ind-data jfr. bilag 1a. Resultaterne fremgår af bilag 1b og er indtegnet med kurvefit på figur 2.1. som funktion af forskellen mellem middelvæsketemperaturen og omgivelsernes temperatur.

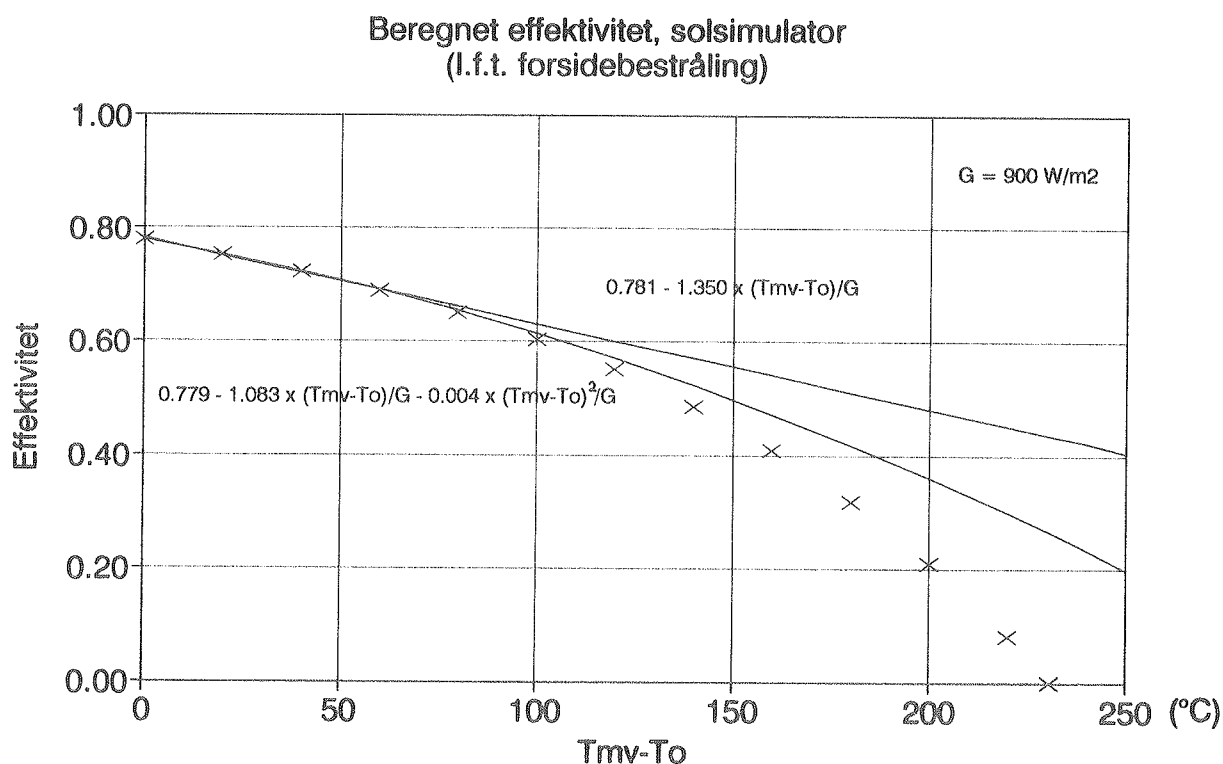
Beregningerne er foretaget ved samme vejrparametre som ved de efterfølgende effektivitetsmålinger i solsimulatoren aht. senere sammenligning. Dvs. en bestrålingsstyrke på 900 W/m^2 (på forsiden) og en omgivelsestemperatur på 30°C samt en vindhastighed på 5 m/s .

Disse første beregninger viser desværre, at kurvetilpasning på baggrund af alle datasæt giver fysisk lidet troværdige værdier for regressionskonstanterne, dvs. for optisk effektivitet og varmetabskoefficient, uanset om der benyttes 1. eller 2. grads kurvetilpasning.

Kurvetilpasning med 2. grads udtryk giver en for flad kurve i begyndelsen, hvilket medfører en urealistisk lille varmetabskoefficient på ca $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ samt en lidt for lille starteffektivitet på ca. $0,76$ i forhold til den beregnede optiske effektivitet (første datasæt) på $0,78$. Omvendt vil tilpasning med et effektivitetsudtryk af 1. grad til en så krum effektivitetskurve slet ikke stemme godt overens med de målte værdier og derfor give en starteffektivitet, der er meget for stor, samt give en forkert varmetabskoefficient for næsten alle temperaturer.

På grund af effektivitetskurvens udseende (høj stagnationstemperatur i forhold til traditionelle solfangere) bør kurvetilpasning på basis af alle beregnede datasæt således undlades.

I stedet er udført kurvetilpasning på de "inderste" datasæt, dvs. for temperaturforskelle op til ca. 60°C , analogt til regression på målte datasæt fra effektivitetsprøvninger. Herved er koefficienterne beregnet til (2. grads) $0,779 - 1,083 \cdot (T_{mv} - T_o)/G - 0,004 \cdot (T_{mv} - T_o)^2/G$ (korr.koeff. $> 0,9999$!) hhv. (1. grads) $0,781 - 1,350$ (korr.koeff. $= 0,997$), igen ved 900 W/m^2 , 30°C m.m. Se figur 2.2.



Figur 2.2. Beregnet effektivitet, solsimulator. Kurvefit på inderste datasæt.

Som det ses opnås en fin overensstemmelse for de laveste temperaturer. Starteffektiviteten er i begge tilfælde 0,78 og varmetabskoefficienterne er nu mere realistiske. Det lineære udtryk kan anvendes med god overensstemmelse op til $\Delta T \approx 100^\circ\text{C}$ og 2. grads udtrykket kan benyttes op til ca. 140°C , hvilket skulle være dækkende for de fleste såkaldte højtemperaturformål (fjernvarme, kogning, desinfektion o.a.)

2.3. Udendørs opstilling, beregning af effektivitet, varmetab m.m.

Ved udendørs opstilling af solfangeren er der mulighed for at absorbere solstråling på forsiden og på bagsiden. Derfor kan der udregnes 2 effektiviteter.

En effektivitet kan beregnes i forhold til indstrålingen på forsiden af hensyn til sammenligning med traditionelt opbyggede solfangere, og en anden effektivitet kan beregnes i forhold til den totale indstråling på begge sider af solfangeren. Sidstnævnte må betegnes som den sande effektivitet, men er ikke sammenlignelig med effektiviteten af traditionelle solfangere, som jo kun modtager solstråling på forsiden. Pga. de forskellige vejrparametre ved indendørs og udendørs opstilling kan effektiviteterne inde og ude ikke sammenlignes.

På grund af senere sammenligning med udendørs målinger er beregningerne udført med de tilsvarende vejrforhold som inddata. Vejrparametrene er gennemsnit af de faktisk forekommende forhold, der iøvrigt kun varierede lidt omkring middelværdierne (se afsnittet om udendørs forsøg). Inddata er iøvrigt vist i bilag 2a og resultaterne er vist i bilag 2b. Her skal kun anføres bestrålingsstyrkerne;

	Inddata:	Målt gennemsnit:
Direkte stråling på forside (7°):	850 W/m ² (*)	
Diffus stråling på forside:	125 W/m ² (*)	
Samlet stråling på forside:	975 W/m ²	($\approx 976 \text{ W/m}^2$)
Diffus stråling på bagside:	75 W/m ²	($\approx 77 \text{ W/m}^2$)
Total stråling på forside og bagside:	1050 W/m ²	($\approx 1053 \text{ W/m}^2$)

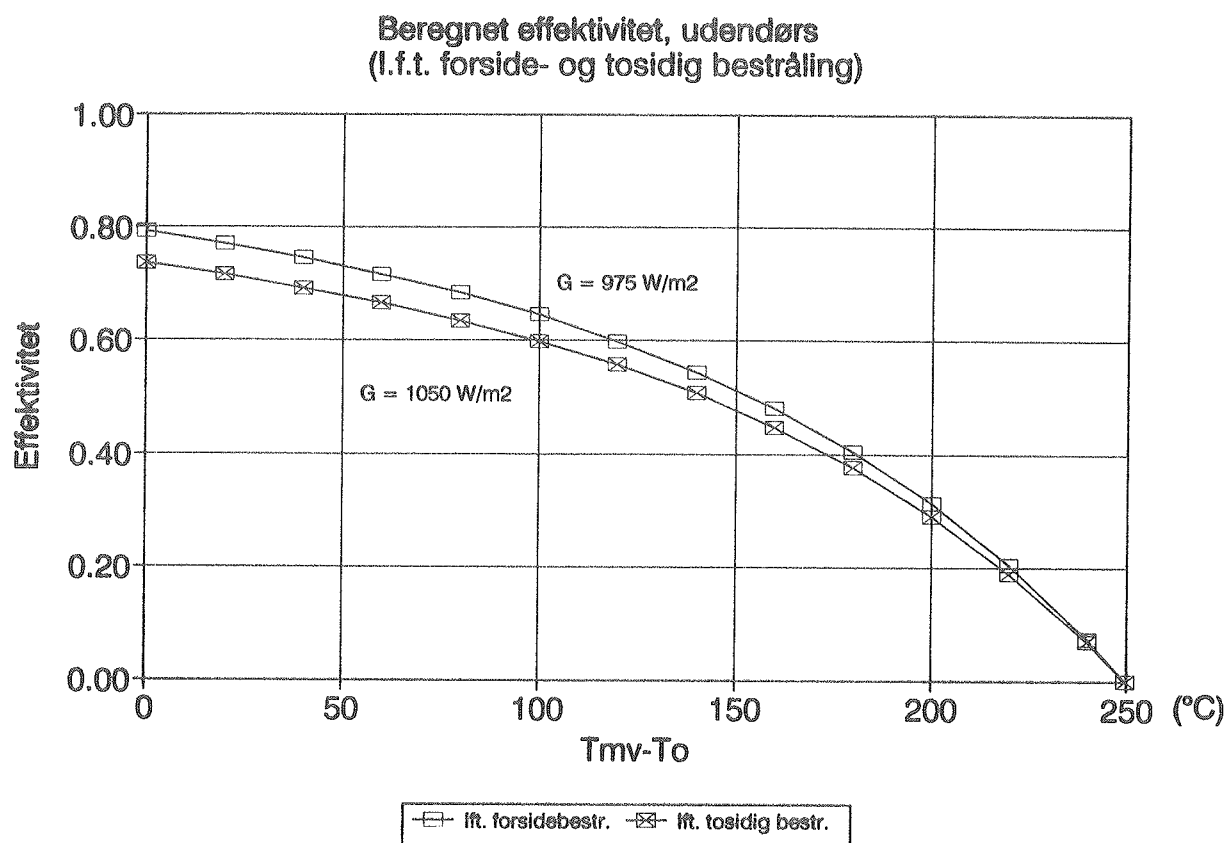
(*): Skønnet fordeling ved 35° hældning på baggrund af målt fordeling ved 45° (10 minutters værdier i samme perioder som stationære forhold blev opnået under effektivitetsmålingerne).

De beregnede effektiviteter er dels udregnet i forhold til indfalden solstråling på forsiden og dels i forhold til indfalden solstråling på begge sider og er optegnet sammen på figur 2.3.

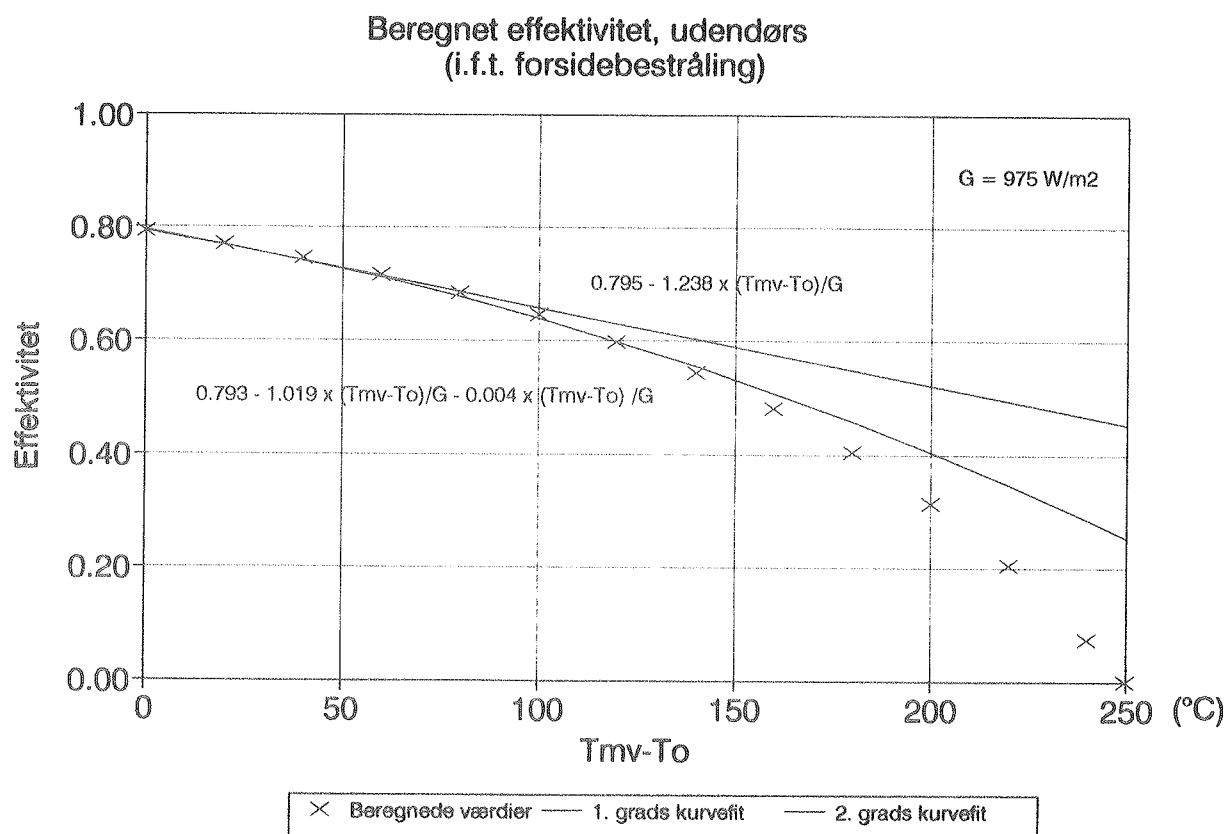
I sagens natur vil en effektivitet i forhold til forsideindstrålingen altid være større end i forhold til indstråling på begge sider. Tillægget i starteffektivitet er beregnet til at være ca. 6 procent-point, herefter svagt aftagende indtil den fælles stagnationstemperatur ved $\Delta T = 250^\circ\text{C}$.

På figur 2.4 er hver af de beregnede effektiviteter indtegnet med tilhørende 1. og 2. grads kurvefit. Disse er beregnet ud fra de 4 "inderste" datasæt af hensyn til sammenligning med målinger, analogt til ved beregning af effektivitet indendørs, dvs. i solsimulatoren.

For begge effektiviteter kan det forsvares at anvende det lineære kurvefit op til $\Delta T \approx 100^\circ\text{C}$ og det 2. grads kurvefit op til $\Delta T \approx 140^\circ\text{C}$.



Figur 2.3. Beregnet effektivitet, udendørs, ift. til bestråling på forsiden og på begge sider.



Figur 2.4. Beregnet effektivitet, udendørs, ift. forsidebestråling. Kurvefit på inderste datasæt

3. Indendørs forsøg og målinger

3.1. Lufttryk

Førend målingerne kunne påbegyndes måtte aerogelenen i solfangeren evakueres for luft ned til et tryk under 50 mbar for at opnå den lave varmeledningsevne.

Inden absorberen var blevet placeret i rammen, var rammen, som nævnt, blevet forsynet med små huller ind mod aerogelen, således at evakuering kunne foregå relativt hurtigt og med færrest mulige spændingsassymetrier i aerogelen.

Solfangeren blev derpå evakueret for luft ned til et tryk på ca. 0,5 mbar. Herefter blev solfangeren effektivitetsprøvet. Under prøvningen fortsattes evakueringen, og lufttrykket lå konstant mellem 0,5 og 1,0 mbar.

Efter effektivitetsprøvningen blev tætheden af solfangeren testet (indendørs). Luften blev evakueret til et lidt lavere tryk, 0,1 mbar.

Solfangerens ventil blev lukket, og derefter stod hele systemet dvs. den afspærrede solfanger, samt den afspærrede rest (pumpe, pumpe slang, T-stykke med trykmåler) urørt i ca. 1 måned, hvor lufttrykket (i slang og T-stykke) blev aflæst hver dag.

Efter 1 måned var lufttrykket steget til ca. 1,0 mbar, målt i slang og T-rør. Lufttrykket i solfangeren var mindst 0,1 mbar, men endnu ikke præcist kendt. For ikke at lufttrykket i slang og T-rør skulle fordele sig ind i solfangerens volumen, blev lufttrykket i slang og T-stykke pumpet ned til ca. 0,1 mbar. Efter åbning af ventilen til solfangeren stabiliserede lufttrykket sig straks ved 0,3 mbar (konstant i ca. 2 timer). Det meste af trykstigningen fra ca. 0,1 mbar til 1,0 mbar forekom således udenfor solfangeren pga. en lille / langsomt virkende utæthed i pumpe slangen og T-stykket. På 1 måned steg lufttrykket i solfangeren kun med 0,2 mbar. Derfor blev det vurderet, at solfangeren var tilstrækkelig tæt til at kunne opstilles udendørs.

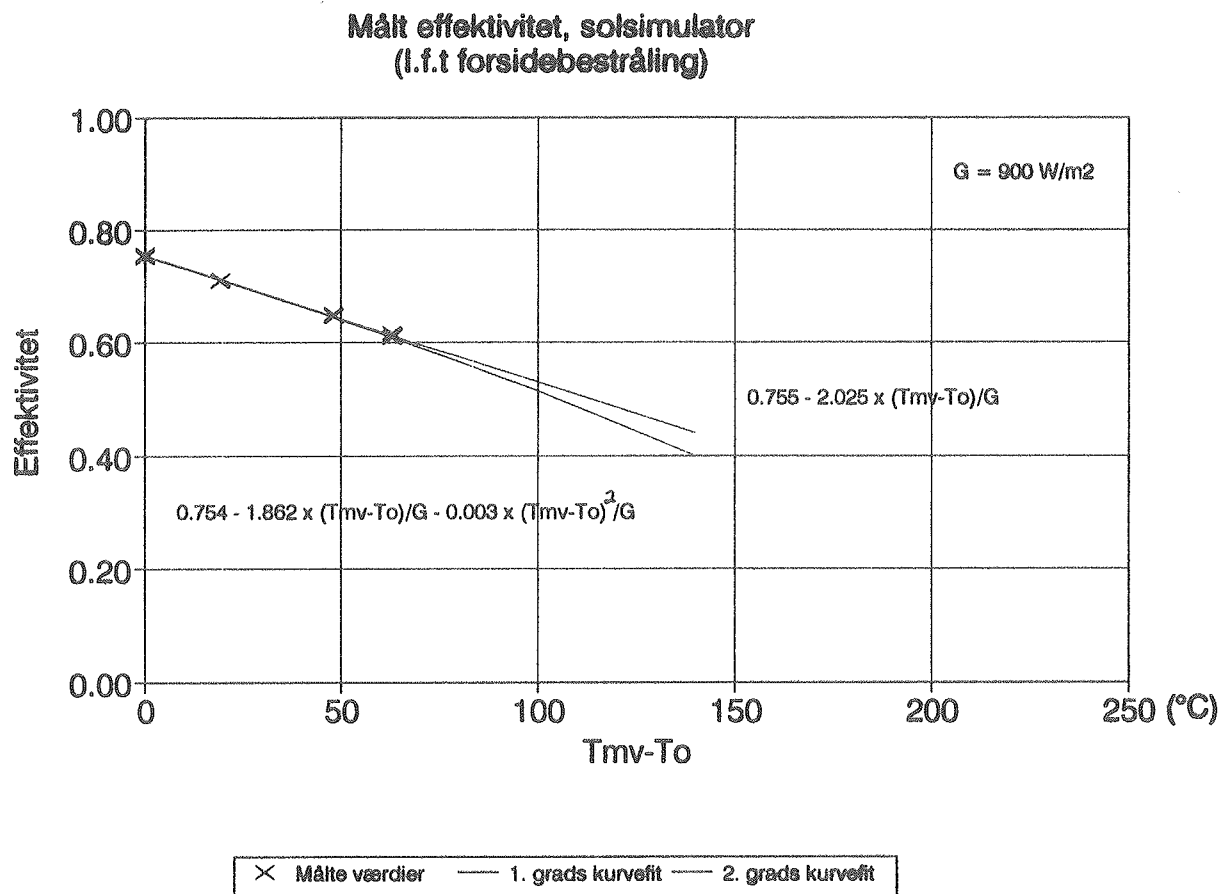
3.2. Effektivitet

For at kunne sammenligne solfangeren med andre, bl.a. traditionelt opbyggede solfangere, blev solfangeren effektivitetsprøvet i solsimulatoren, dvs. kun med solstråling på forsiden.

Under prøvningen blev luften i solfangeren (med et formodet, naturligt indhold af vanddamp) suget ud så tit som muligt, dvs. undtagen ved opmålingerne af "solen" i solsimulatoren imellem de 4 enkelte delprøvninger. Dette var for at undgå, at vanddamp ved lave damptryk skulle diffundere ud gennem aerogelen og kondensere på indersiden af det "kolde" dækglas, med risiko for at vand kunne opsuges yderst og derved ødelægge aerogelen, der ville blive hvid og uigennemsigtig.

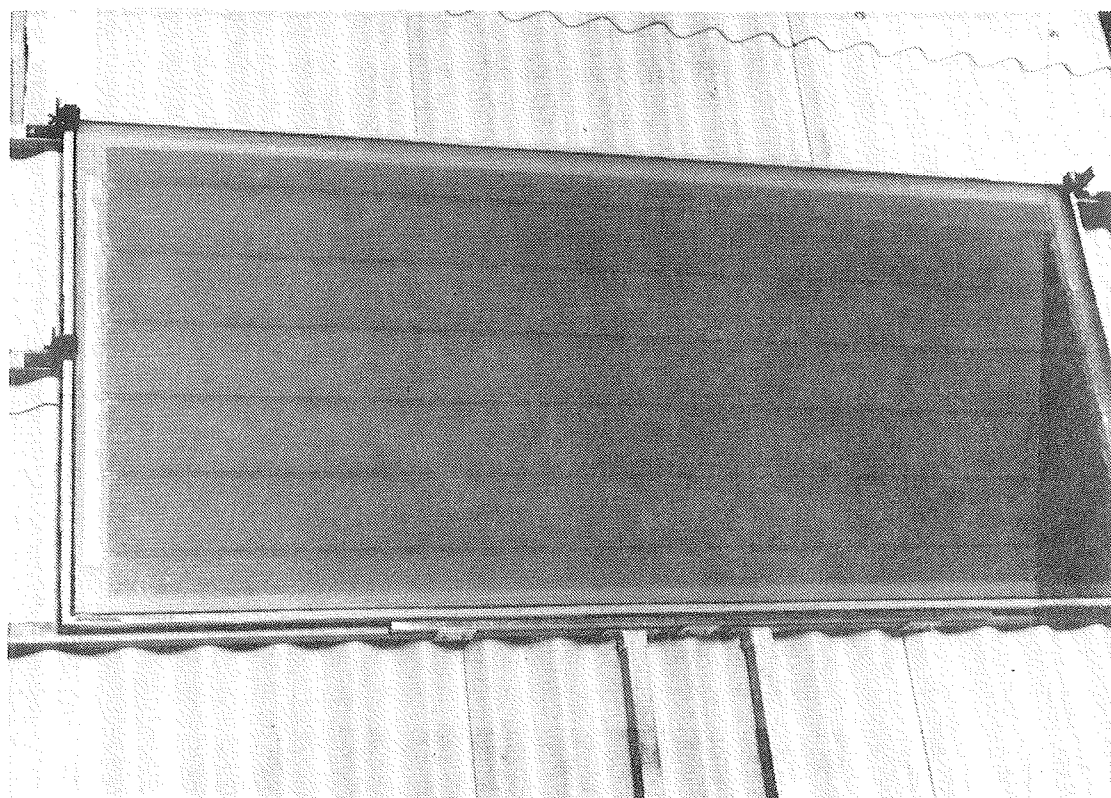
Resultaterne af en iøvrigt helt ordinær effektivitetsprøvning (dvs. stråling kun på forsiden) gav efter regression på 4 x 4 målepunkter følgende koefficienter til effektivitetsudtrykkene:

2. grads udtryk:	0,754	-1,862	-0,003
1. grads udtryk:	0,755	-2,025	-

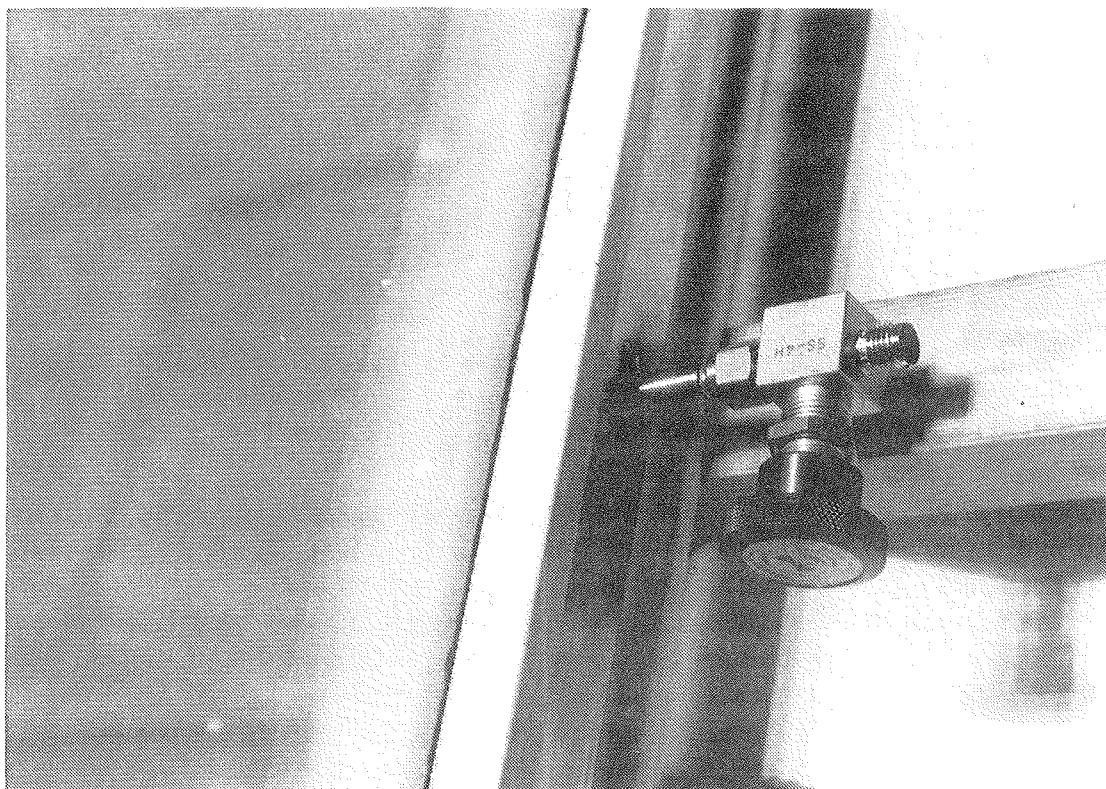


Figur 3.1. Målt effektivitet, indendørs i solsimulator (kun forsidestråling)

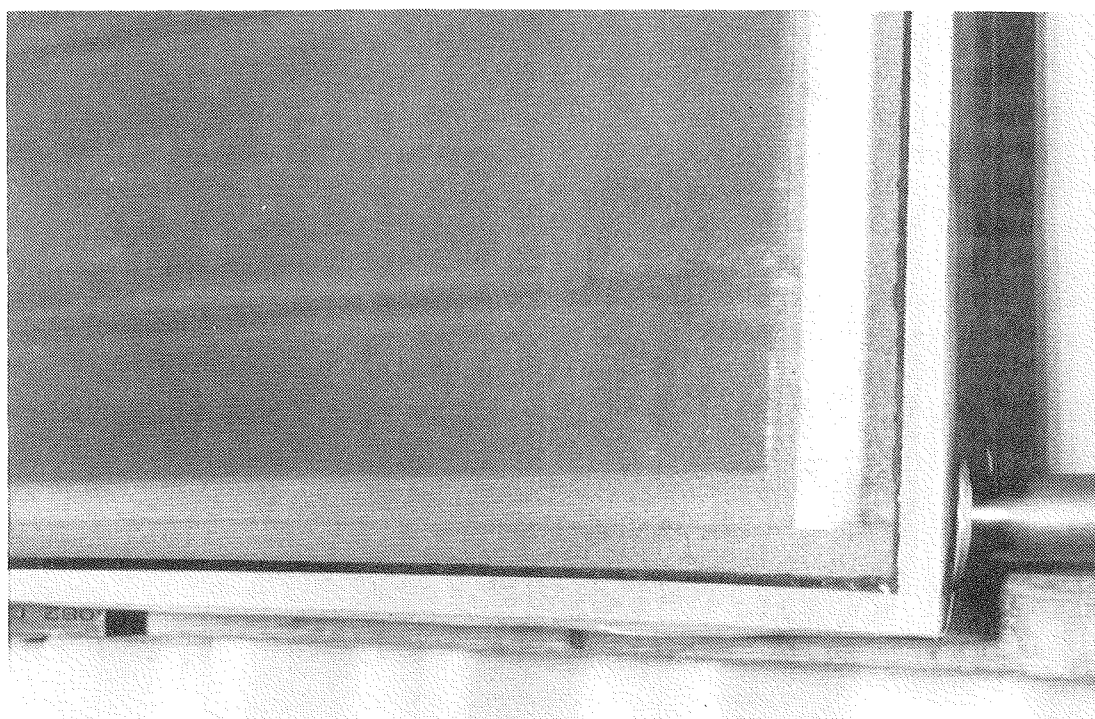
På billedet nedenfor ses solfangeren (med forsiden udad) monteret på prøvebordet i solsimulatoren.



Figur 3.2. (Forside af) solfanger på prøvebord i solsimulator.



Figur 3.3. Detalje af rand og afspærringsventil.



Figur 3.4. Detalje af randhjørne med absorber, indløbsrør, ekspansionsskinne, aerogel, ramme samt kapperør.

Indendørs stagnationsprøvning blev ikke foretaget pga. risikoen for eventuelle skader på solfangeren inden den udendørs opstilling. Sandsynligheden for at der ville indtræffe en skade var svær at vurdere, men omfanget/konsekvensen vurderedes som betydelig og dermed vanskelig og dyr at reparere, hvis overhovedet muligt.

3.3. Tryktab

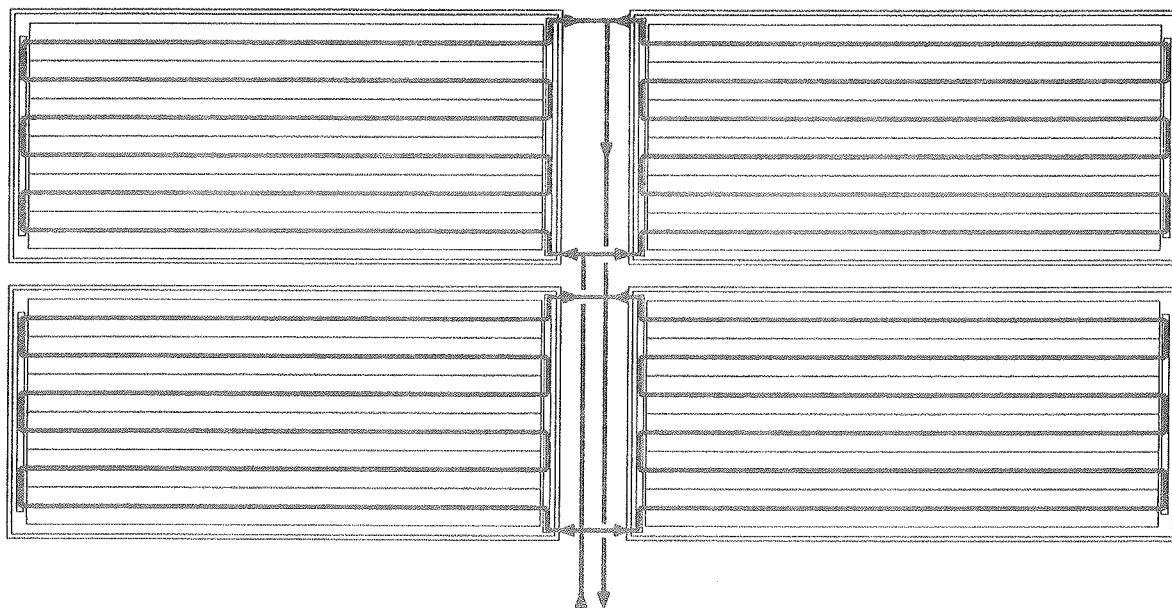
Desuden blev tryktabet med vand igennem solfangeren målt. På basis af 5 målinger af sammenhørende værdier af massestrøm, M , (kg/s) og tryktab, ΔP , (kPa) udførtes en regression som gav:

$$\Delta P = a \cdot M^b = 1752 \cdot M^{1.513}, \quad (\text{kPa})$$

Ved en massestrøm på 0,05 kg/s svarende til ca. 1,2 l/m²min fås et tryktab på 18,8 kPa.

Den relativt høje a-værdi indikerer at absorberen er serielt opbygget.

Ved at koble 4 solfangere parallelt som 1 modul, monteret på et fælles stativ, kan man imidlertid opnå et lavere tryktab end for hver af solfangerene. Herved kan man seriekoble moduler uden at få et abnormt stort tryktab i anlægget.



Figur 3.5. Eksempel på 1 modul (parallel sammenkobling af 4 solfangere)

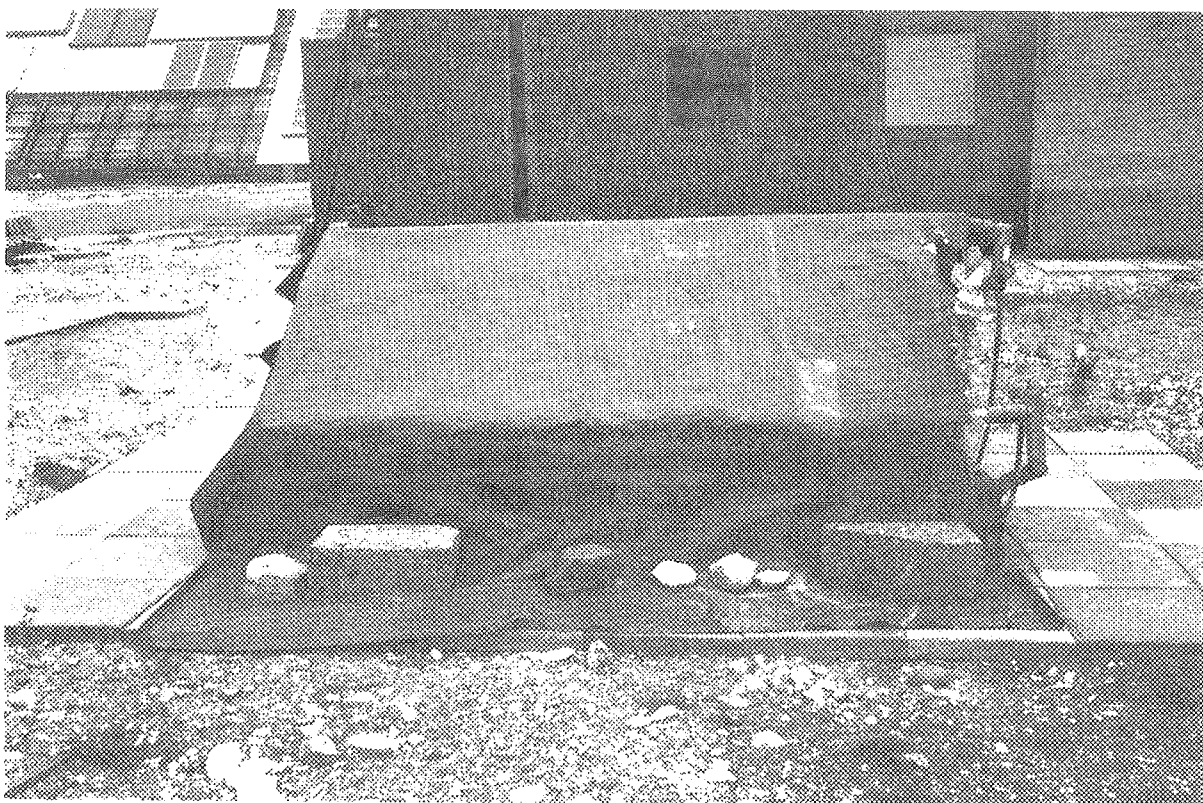
4. Udendørs forsøg og målinger

Efter afslutningen af de indendørs prøvninger blev solfangeren opstillet udendørs på laboratoriets forsøgsareal.

4.1. Lufttryk

Inden udsætningen på stativ blev lufttrykket målt til ca. 0,3 mbar.

Indtil de udendørs målinger om sommeren var solfangerens forside og bagside dækket af en pressenning, så solfangeren ikke kom i stagnation ved meget høje temperaturer.



Figur 4.1. Overdækket solfanger.

Inden effektivitetsmålingerne skulle tætheden af solfangeren eftervises. Ca. 4 måneder senere blev lufttrykket i solfangeren målt til ca. 1,5 mbar (med sol på solfangeren). Heraf skyldes en del af trykstigningen, ca. 0,2 mbar, den "medfølgende" luft i det T-rør, som nødvendigvis må påsættes solfangerens afspærringsventil for at kunne måle lufttrykket i solfangeren. Desuden kan ca. 0,4 mbar henregnes til temperaturstigningen i den monolitiske silica aerogel. Dvs. ialt en "netto"-trykstigning på ca. 0,6 mbar på 4 måneder (i overdækket tilstand).

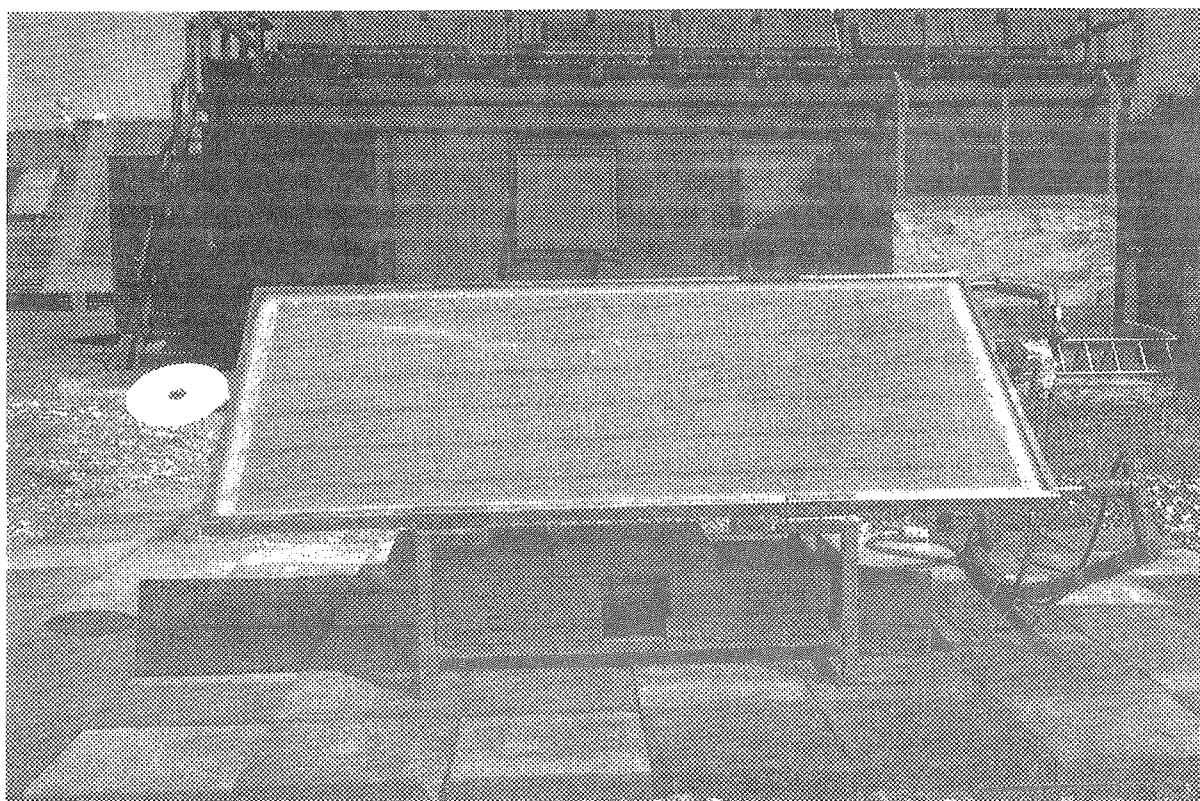
Under effektivitetsmålingerne blev lufttrykket målt 3-4 gange om dagen. Afhængigt af temperaturen var lufttrykket hele tiden mellem 1 og 2 mbar.

4.2. Effektivitet

Som det ses af figur 4.2 og til dels af figur 4.1. blev solfangeren opstillet på stativ mod syd og med en hældning på 35° . I store solfangeranlæg med solfangere opstillet i lange rækker efter hinanden, vil solfangere med denne hældning - og med et forhold mellem solfangerhøjde og rækkeafstand på ca. 2 - optimere årsydelsen (solstråling på forsiden) jfr /5/. Solfangeren blev monteret, så dens forkant var løftet ca. 0,5 m over underlaget, hvilket skulle medvirke til at kunne give en bagsideindstråling på ca. 15% i sommerhalvåret jfr /2/. Som ballast mod at solfangeren skulle vælte pga. vindstød blev der lagt 8 fliser eller ca. 200 kg nederst på stativet.

Underlaget bestod af almindelige lysegrå fliser udlagt i et areal på ca. 15 m^2 under/bagved solfangeren.

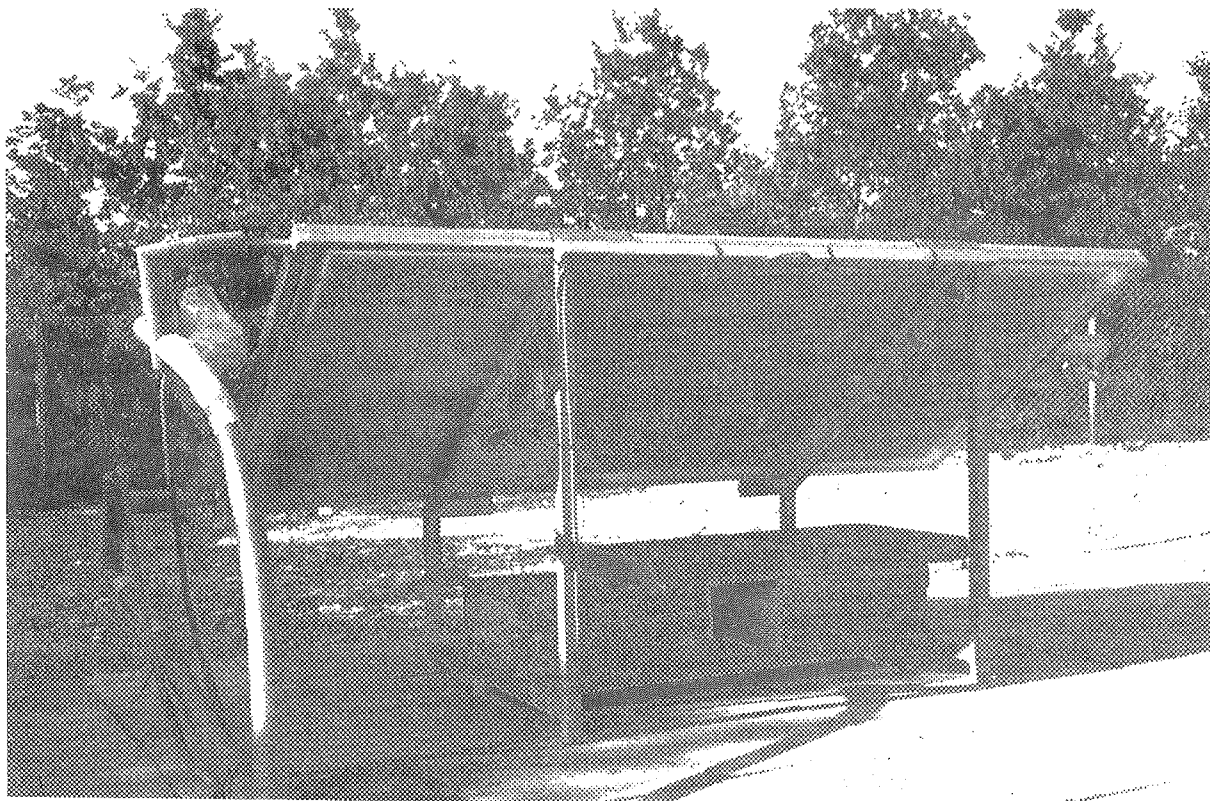
På billederne nedenfor ses solfangeren forfra, bagfra samt detalje af trykmåleopstillingen.



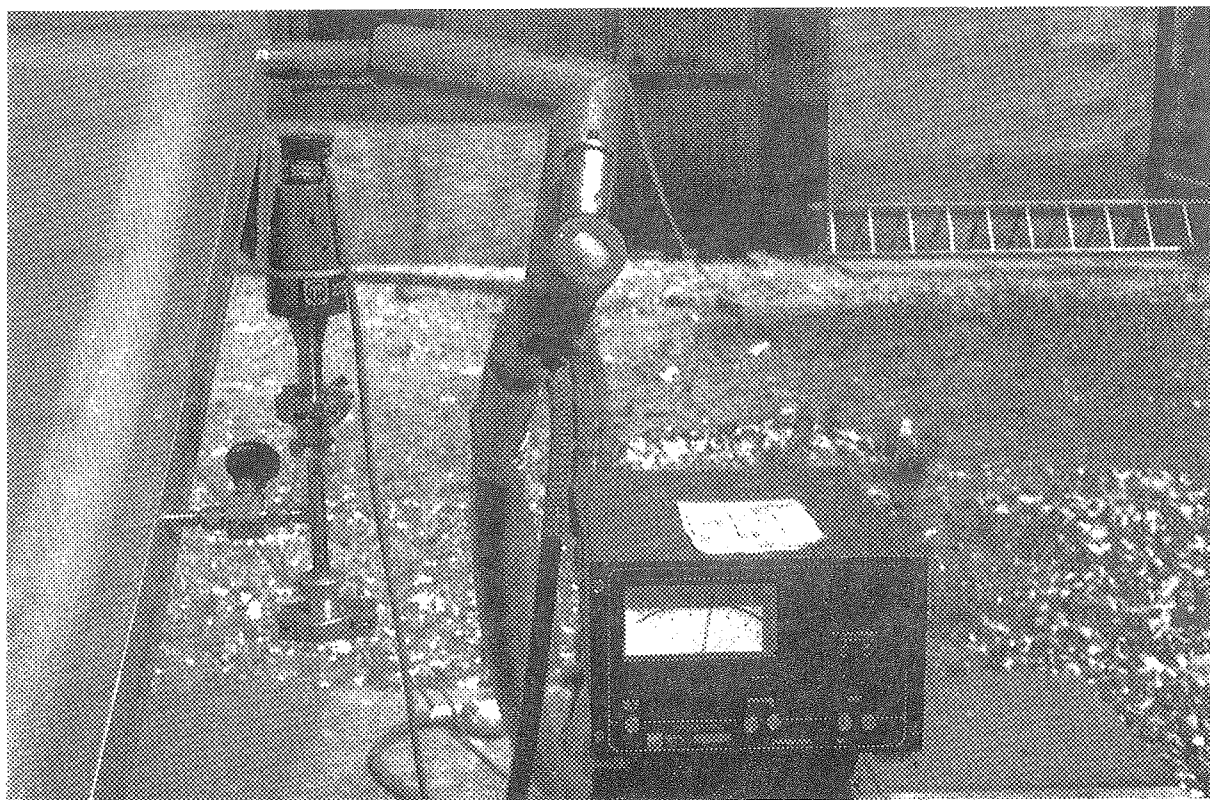
Figur 4.2. Solfangeren set forfra.

Til måling af solfangerens effektivitet behøvedes desuden et væskesystem og et måle- og registreringssystem, som blev placeret i huset bag ved solfangeren.

Solfangeren blev koblet til et velgennemprøvet væskesystem, der tidligere var blevet benyttet til standardafprøvninger af solfangeres effektivitet, varmetab og stagnation indendørs.



Figur 4.3. Solfangeren set bagfra.



Figur 4.4. Detalje af trykmåleopstilling: Afspærringsventil, T-rør, trykmålerør & trykmåler.

Væskesystemet består i hovedsagen af en solfangerkreds, varmeveksler samt en køle- (og varme-) kreds, begge med vand i. I systemet er indbygget en flowmåler på solfangerkredsen, samt en temperaturstyring af varmevekslingen mellem solfangerkreds og kølekreds samt

forskelligt andet udstyr som pumper, ventiler m.m. Styringen fungerer ved at der sættes en ønsket fremløbstemperatur, som opnås ved at køle det varme vand fra solfangeren ned til ca. 1-2°C under den ønskede fremløbstemperatur og lade det efterfølgende varmelegeme hæve temperaturen til den ønskede fremløbstemperatur.

Måle- og registreringssystemet bestod af følgende:

I hele effektivitetsprøvningsperioden var trykmålerøret monteret på det lille T-rør, umiddelbart på ydersiden af solfangerens afspærringsventil (og beskyttet mod vejrliget med en plastpose og tape). Ved måling af lufttrykket 3-4 gange om dagen blev trykmåleren tilsluttet.

Foran og bagpå solfangeren monteredes nyligt kalibrerede solarimetre til måling af den indfaldende solstråling. På forsiden blev solarimetret placeret på det samme stativ som solfangeren, således at det sad med samme hældning umiddelbart ved siden af solfangeren, så solarimeteret ikke skyggede for solfangeren. På bagsiden af solfangeren blev solarimeteret også placeret på stativet, men inde under solfangeren. Her var det vigtigere at måle korrekt inde på solfangeren end at undgå at skygge for en svagt bidragende diffus stråling (reflekteret stråling og diffus himmelstråling).

Inden målingerne blev iværksat, var der enkelte gange blevet konstateret kondens i kuplen i solarimeteret på forsiden. Derfor blev fugtsugepatronen (med gryn af silica aerogel!) i solarimetret på forsiden udskiftet umiddelbart inden starten på effektivitetsmålingerne for at undgå, at eventuel kondens skulle nedsætte den målte bestrålingsstyrke.

Til måling af indløbstemperatur og udløbstemperatur og temperaturdifferens i solfangeren blev der monteret 2 termosøjler i ind- og udløbsrøret. Udendørstemperaturen blev målt med termotråd, der var placeret i et lille, åbent rør, beskyttet mod stråling fra omgivelserne.

Til registrering af solbestrålingsstyrkerne foran og bagpå anvendtes en 2-kanals skriver. Temperaturdifferensen over solfangeren blev udskrevet på en 1-kanals skriver. Ind- og udløbstemperaturen og udendørstemperaturen blev alle registreret med et digitalt "hånd"-instrument dvs. uden opsamling af data, ligesom tællerværket på solfangerkredsens pumpe. Ved den manuelle aflæsning kunne den udskrevne temperaturdifferens således kontrolleres hele tiden.

Måleprocedure:

Målingerne blev gennemført over 3½ dag med sol fra en stort set skyfri himmel. Systemet kørte fra ca. kl. 8.30 til ca. kl. 16.30 (sommertid) og som følge af behovet for manuel indstilling og aflæsning var der en person til stede i det meste af tiden.

Med den naturlige variation i solbestrålingsstyrke (og udetemperatur og vindhastighed) blev fremløbstemperaturen sat fra lidt over udetemperaturen til ca. 80°C, svarende til udløbstemperaturer på op til 90°C.

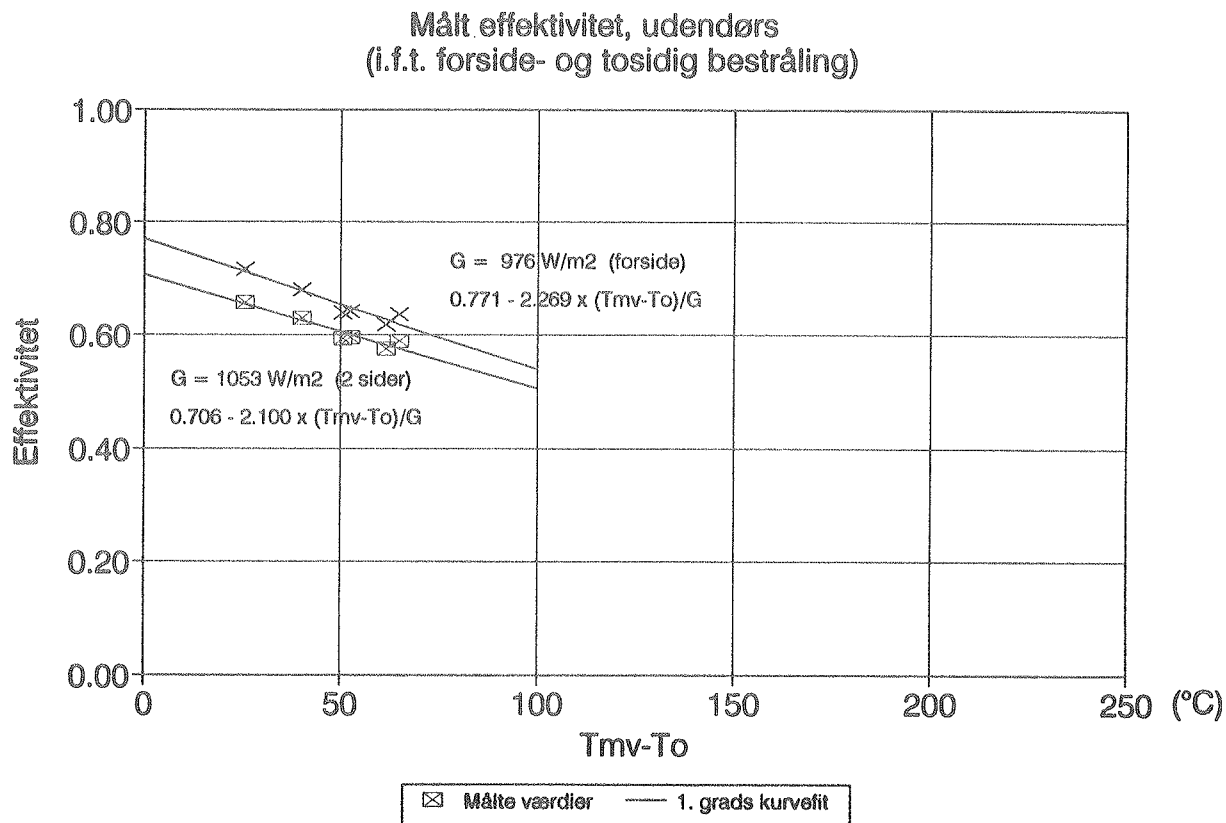
Trods den vedvarende (men svage) ændring i solbestrålingsstyrken lykkedes det med velafbalanceret styring at få en konstant fremløbstemperatur i solfangerkredsen (inden for +/- 0,2°C), typisk 20-40 minutter efter justering af fremløbstemperaturen. Af og til var det nødvendigt med flere justeringer af fremløbstemperaturen.

Resultater:

Ialt blev der foretaget 12 målinger, der principielt var brugbare, dvs. hvor flow og temperaturdifferens var konstante. De forskellige målinger blev nødvendigvis foretaget ved forskellig bestrålingsstyrke (og udetemperatur og vindhastighed). Imidlertid viste det sig, at bestrålingsstyrkerne ved 6 af målingerne var næsten ens (total stråling begge sider, middel = 1053 W/m^2 , spredning = 23 W/m^2 , dvs. mindre end 2 % af middel), der i gennemsnit fordelt med 853 W/m^2 direkte stråling og 123 W/m^2 diffus stråling på forsiden og 77 W/m^2 på bagsiden. Udetemperaturerne og vindhastighederne var ligeledes nogenlunde ens (Udetemp.: middel $21,5^\circ\text{C}$, spredning $1,7^\circ\text{C}$. Vindhast.: middel $2,5 \text{ m/s}$, spredning $0,6 \text{ m/s}$).

Ved målingerne benyttedes vand som solfangervæske. De målte effektiviteter blev derfor omregnet til effektiviteter med vand/propylenglycol 50%/50% som solfangervæske. De målte (og korrigerede) effektiviteter er optegnet på nedenstående figur. Det ses, målepunkterne tilsammen danner en svag opadkrum kurve(!), svarende til en svagt faldende varmetabskoefficient, hvilket fysisk ikke passer. Årsagen hertil må søges unøjagtighed ved målingerne, og derfor kan kun lineær kurvetilpasning benyttes.

Efter lineær regression over de 6 målte og korrigerede effektiviteter fandtes koefficienterne i effektivitetsudtrykket til 0,706 og -2,10 (målt i forhold til tosidig bestråling) som relateret til forsideindstrålingen fandtes til 0,771 og -2,269.



Figur 4.5. Målt effektivitet, udendørs. Med tosidig bestråling.

Strålingen på solfangerens bagside udgjorde ca. 8% af forsidestrålingen eller kun lidt under halvdelen af det forventede niveau på 15-20% jfr. /2/. Dette må dels den høje bunke af fliser under solfangeren, dels en mindre overfladereflektans af de lysegrå fliser end forventet (0,5 i /2/), dels de omkringliggende, afskærmende bygninger samt en ret lav overfladereflektans fra det ujævne lag af stabilt grus udenom flisearealet.

4.3. Stagnation

Efter den udendørs effektivitetsprøvning var afsluttet stod solfangeren endnu væskefyldt men overdækket.

Da det senere blev solskinsvejr igen, blev solfangeren tømt for væske og pressenningen taget af. Således stod solfangeren i ca. 1½ døgn (eksponeret for solskin om dagen og næsten 0°C om natten) indtil målingerne skulle gennemføres.

Den følgende morgen var absorberen imidlertid gået i stykker, idet 1 SunStrip midt på solfangeren var trukket over. Det ydre tryk på solfangeren og dermed mellem absorberen og den monolitiske silica aerogel (foran) hhv. det indre glas (bagpå) havde bevirket, at SunStrip-absorberen ikke havde kunnet bevæge sig tilstrækkeligt frit, således at de termiske bevægelser havde forårsaget metaltræthed midt på absorberørret med brud til følge.

Ved bruddet var lufttrykket i aerogelen derfor steget til atmosfæretrykket, og under disse trykforhold ville det være forkert at måle stagnationstemperaturen. For at kunne evakuere solfangeren igen, var det nødvendigt at plumbere indløbsrør og udløbsrør med en lufttæt kobberslutning. Plomberingen gjorde det umuligt at placere en termotråd i det øverste solfangerrør, hvorfor måling af stagnationstemperaturen udendørs (såvel som i solsimulatoren) desværre måtte opgives.

5. Sammenligning af beregninger og målinger

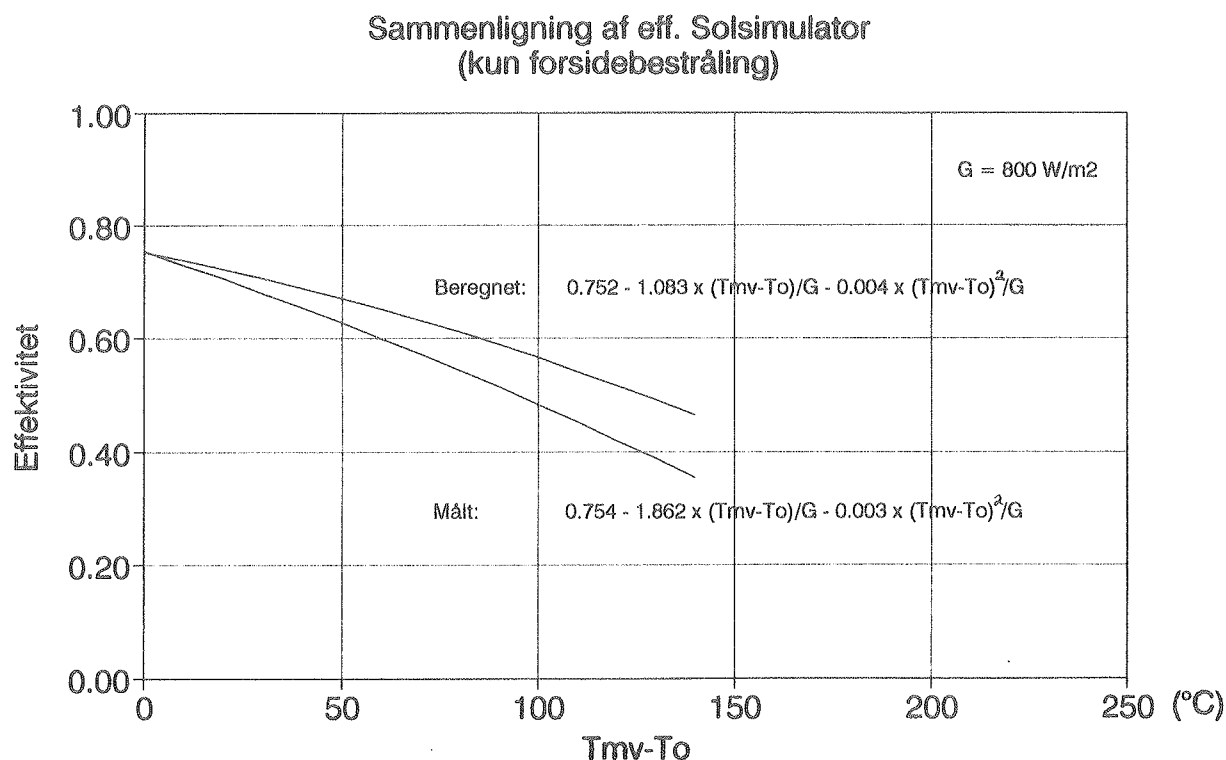
De forskellige "vejrforhold" inde og ude - fx bestrålingsstyrken og fordelingen på sider - indebærer, at solfangerens effektiviteter indendørs og udendørs ikke er direkte sammenlignelige. Udviklingen af edb-programmet har imidlertid gjort det muligt at sammenligne den teoretisk, beregnede effektivitet med den i praksis målte effektivitet for hhv. opstilling i solsimulator og udendørs på stativ.

I de målte effektiviteter indgår de virkelige værdier for F og F' . For en absorbergeometri som den anvendte Sun-Strip absorber med et standardflow på $1,2 \text{ l/m}^2\text{min}$, som er benyttet både udendørs og indendørs, kan den indvendige varmeovergangskoefficient mellem solfangervæske og absorber beregnes til ca. $2500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Med en målt samlet varmetabskoefficient på ca. $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (lidt lavere i solsimulator, lidt højere udendørs) kan man beregne $\underline{F'} = 0,965$. Den rent optisk beregnede starteffektivitet, $(\tau\alpha)$ skal da reduceres til $\eta_0 = (\tau\alpha)/F'$.

5.1. Indendørs opstilling i solsimulator

De beregnede effektiviteter er udført under forudsætning af, at finnefaktoren, F , og absorberens effektivitetsfaktor, F' , begge var lig 1, svarende til at absorberemperaturen, T_a , var sat lig middelvæsketemperaturen, T_{mv} . T_o er omgivelsestemperaturen.

Den teoretiske effektivitet er beregnet ved samme vejrforhold som i solsimulatoren, bl.a. en solbestrålingsstyrke på 900 W/m^2 , og der er udført regressioner på datasæt i det samme temperaturområde som de målte datasæt. Nedenfor er den beregnede og den målte effektivitetskurve optegnet ved standardbestrålingsstyrken på 800 W/m^2 , og effektivitetskonstanterne anført.



Figur 5.1. Beregnede og målte effektiviteter i solsimulator.

Fra de tidligere beregninger af effektiviteten vides det, at regressionsudtrykket for effektiviteten stemmer overens med de beregnede værdier op til $\Delta T \approx 140^\circ\text{C}$. Da begge regressionsudtryk er baseret på data i det samme område for ΔT (op til ca. 65°C) vurderedes det ikke at være forsvarligt at ekstrapolere effektivitetskurverne til højere temperaturforskelle end $\Delta T = 140^\circ\text{C}$.

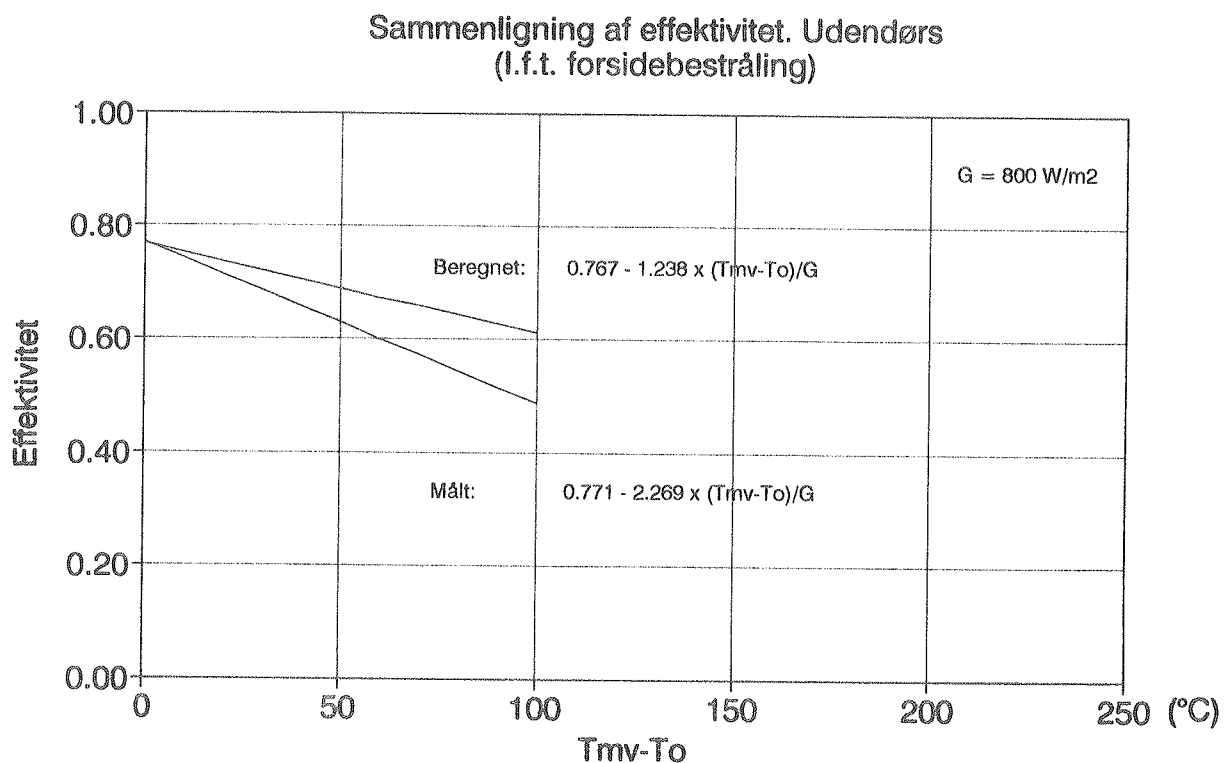
Som det umiddelbart ses på figur 5.1., er effektivitetskurverne ikke sammenfaldende. Dog er der fin overensstemmelse mellem den beregnede og målte starteffektivitet på godt 75 %. Ved $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ er den beregnede effektivitet ca. 8 pct-point større. Dette aflæses også af, at den målte varmetabskoefficient ca. $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ eller 72 % større end den beregnede.

Af edb-beregningerne, der ligger til grund for de kurvefittede effektivitetskonstanter, fremgår det, at stagnationstemperaturen i solsimulatoren vil være ca. 260°C (jfr. bilag 1b), hvilket desværre ikke kan sammenlignes med målinger. Dog vides det fra /4/ at for en lidt mindre prototype med et transparent areal på $1,4 \text{ m}^2$ målt en stagnationstemperatur på ca. 220°C .

5.2. Udendørs opstilling

For den udendørs opstilling på stativ med tosidig bestråling kan der kun udregnes lineære effektivitetsudtryk. Fra beregning af effektiviteten vides det, at det retliniede regressionsudtryk kun med god overensstemmelse kan bruges op til en temperaturforskel på $\Delta T \approx 100^\circ\text{C}$.

Til brug for sammenligning med traditionelle solfangere er de beregnede og målte effektiviteter relateret til indstrålingen på forsiden - her optegnet ved en forsideindstråling på 800 W/m^2 .



Figur 5.2. Beregnede og målte effektiviteter, udendørs.

Igen konstateres en fin overensstemmelse mellem beregnet og målt starteffektivitet på ca. 77%. Ved $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ er forskellen mellem målt og beregnet effektivitet ca. 12 pct-point, hvilket også aflæses af den målte varmetabskoefficient, der er ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ eller 83 % større end den beregnede.

5.3. Årsager til forskelle mellem beregnede og målte effektiviteter

Starteffektivitet, $\eta_0 = F'(\tau\alpha)$:

Såvel for opstilling i solsimulator som udendørs på stativ er der fin overensstemmelse mellem de beregnede og målte starteffektiviteter η_0 , og dermed også mellem de optiske effektiviteter, $(\tau\alpha)$.

Dækglassene har små "noprer" ($\ll 1 \text{ mm}$) på den ene side (her: indersiden). Dette skulle jfr. producenten medføre en lidt højere transmittans end for plant glas ved små indfaldsvinkler. Omvendt er der her på laboratoriet i en anden sammenhæng (i.f.m. solvægge) blevet målt en lidt lavere transmittans end for plant glas, jfr. /7/.

Antagelsen om plane flader for de noprede dækglas, der indgår i et dobbelt dæklag (på forsiden) eller i et tredobbelt dæklag (på bagsiden) - så den traditionelle optiske teori ("ray chasing technique") har kunnet anvendes - har dermed vist sig at være holdbar.

Arealet inden for rammen er ca. 14% større end selve absorberarealet. Dette betyder, at meget skråt indfaldende solstråling opfanges helt ud til kanten af absorberen, i modsætning til konstruktioner, hvor solfangerens kant er tættere på absorberens kant.

Ved almindelige effektivitetsprøvninger af solfangere med fx. 5 cm højere kant end absorberplanet, dvs. hvor kantskyggerne på absorberen alt andet lige vil være større end for aerogel-solfangeren, tages der ikke hensyn til denne skyggereduktion, idet denne vurderes som værende forsvindende, og dermed mindre end usikkerheden på målingerne (2%).

Varmetabskoefficient, U :

Årsagerne til en større målte varmetabskoefficienter end beregnet kan skyldes flere forhold:

Kvalitativt:

- Tyndere aerogel over absorberrør på forsiden og over de to ekspansionsskiner,
- For optimistisk model af varmetab langs rand
- Mellemrum og revner i aerogel (især foran, hvor stykkerne er opskåret og stødt sammen)

Iøvrigt vurderes den generelle usikkerhed.

Kvantitativt:

Vurdering af betydningen af:

Mindre isoleringstykkelse lokalt over absorberrør og ekspansionsskiner:

På forsiden, hvor aerogelstykkerne var skåret til og stødt sammen over absorberrørene, blev isoleringstykkelsen nødvendigvis mindre: 10-12 mm over midten af absorberrøret svarende

til 14-15 mm i gennemsnit over hele absorberrørets ydre bredde (15 mm). Ved enkelte sammenstødninger var der desuden ca. 1 mm bredde mellemrum, formodentlig fordi det var meget svært at afskære samtlige aerogelstykker i præcist mål. Over absorberrørene, hvor solfangervæsken er i, er det netop vigtigt med en god isoleringsevne.

Tykkelsen af aerogelen over ekspansionsskinnerne er ligeledes lidt mindre end på absorberens forside og bagside, nemlig ca. 14 mm.

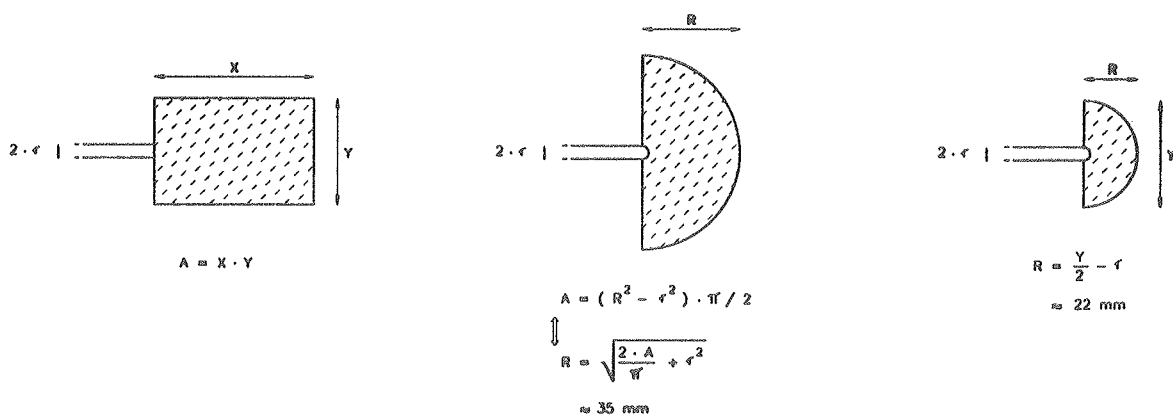
Derfor blev der udført beregninger med kun 14 mm isoleringstykkelse. For opstilling i solsimulator beregnedes en varmetabskoefficient på $U=1,373+0.0056 \cdot \Delta T$. For udendørs opstilling med 14 mm aerogel blev U-værdien beregnet til 1,575 W/m²K. I begge tilfælde varmetabskoefficienter, der er 27-30% større end med 19 mm ved temperaturforskelle op til 100°C, men da kun ca. 7% af overfladearealet har en isoleringstykkelse på 14 mm, betyder det ialt kun ca. 2% forøgelse af varmetabskoefficienten.

Varmetabskoefficienten vil derfor kunne være ca. 2% større end beregnet.

Vurdering af betydning af:

Model for varmetab langs randen:

For at kunne regne endimensionalt på varmetabet via randisoleringen, hvis tværsnit naturligvis er rektangulært, er tværsnittet af randisoleringen omformet til en halvcylinder med samme tværsnitsareal, se figuren nedenfor.



Rektangel (i virkeligheden)

Halvcylindere (beregningmæssigt)

Figur 5.3. Beregningsmæssig omformning af randisoleringens tværsnit.

Med en isoleringstykkelse på forside og bagside, som er noget mindre end isoleringstykkelsen ud for kanten af absorber (& indre glas), er den faktiske isoleringsevne noget mindre end modelleret vha. en halvcylinder, som er det optimale geometriske tværsnit isoleringsmæssigt. Derfor har randvarmetabet i virkeligheden været større end beregnet i edb-programmet.

Forudsat en større isoleringstykkelse langs randen (her fx: 43 mm i siderne) end på forsiden og bagsiden (her: ca. 19 mm), vil varmetabet langs randen maksimalt kunne svare til

varmetabet gennem en halvcylinder med samme radius som tykkelsen af forside- (= bagside-) isoleringen plus halvdelen af absorbertykkelsen inkl. det indre glas (her: $r \approx 22$ mm). De tidligere udregninger er regnet med radius $r \approx 35$ mm.

Det virkelige varmetab må da ligge imellem disse to beregnede varmetab.

En gennemregning med en isoleringstykkelse langs randen svarende til forside- og bagside-isoleringen har givet lidt større varmetabskoefficienter.

For beregning af opstilling i solsimulator med maksimalt randvarmetab fandtes koefficienterne 0,752 1,107 0,0045 mod 0,752 1,083 0,004 i de tidligere beregninger, hvilket svarer til en forøgelse af U-værdien på 2-5 % for temperaturforskelle op til 100°C. Randvarmetabet var forøget med ca. 25 % ift. de tidligere beregninger.

For beregning af udendørs opstilling med maksimalt randvarmetab fandtes koefficienterne til: 0,767 1,263 mod 0,767 1,238 i de tidligere beregninger, hvilket svarer til en forøgelse af U-værdien på ca. 2 %. Randvarmetabet var forøget med ca. 33 % ift. de tidligere beregninger.

I begge tilfælde blev stagnationstemperaturen ca. 4°C lavere pga. det forøgede varmetab.

Varmetabskoefficienten vil af denne grund være 2-5 % større end beregnet.

Vurdering af betydningen af:

Mellemrum og revner i aerogelen:

I forbindelse med evakuering af solfangeren opstod der kun få revner i aerogelen, flest i aerogelen i nærheden af afspærringsventilen, hvor luften blev suget ud. Arealet af revner og mellemrum er groft opgjort til ca. 1 %. Varmetransporten i disse sker dels ved stråling og dels ved luftledning, idet lufttrykket i solfangeren konstant ikke har været under 0,1 mbar under prøvningerne. Fra /2/ vides det, at varmetabskoefficienten da vil forøges med ca. 3 %.

Varmetabskoefficienten vil af denne grund være ca. 3 % større end beregnet.

Efter absorberbruddet og plombering af absorberen men inden den efterfølgende gen-evakuering af solfangeren kunne man ved inspektion af solfangeren om morgenen konstatere at dug/rim på forsiden var forsvundet/fordampet i tynde striber over alle sammenstødningerne af aerogelstykkerne. Dette skyldes formodentlig dels konvektion i sammenstødningerne/revnerne, da disse nu er luftfyldte, men indikerer også at kuldebroen ved samlingerne i den evakuerede tilstand kan være større end de anførte 3 %.

Vurdering af betydning af:

Generel måleusikkerhed:

Usikkerheden fra målinger og prøvninger varierer med det anvendt måleudstyr. Ved målinger i solsimulatoren er den samlede måleusikkerhed vurderet til ca. 2 %.

Den samlede måleusikkerhed for udendørs væske- og måleopstilling er sværere at vurdere,

Væskesystemet fra en tidligere solsimulatoropstilling vurderes at have usikkerhed på flowmåleren på 2-3 %.

De benyttede nyligt kalibrerede solarimetre (type CM-5) vurderes at have en usikkerhed på ca. 3% ved måling af store bestrålingsstyrker ved høje solhøjder (på forsiden) og iøvrigt i størrelsesordenen 5% (på bagsiden). Bagsidestrålingen er dog meget mindre end forsidestrålingen, hvorfor den samlede, vægtede usikkerhed for den samlede bestrålingsstyrke må forventes at være i overkanten af 3%.

Som følge af præcis nulstilling af skrivere om morgenen på hver måledag samt valg af en høj opløsning i udskriften, var aflæsningsunøjagtigheden maksimalt 1%. De benyttede digitale "hånd"termometre har en absolut visnings-nøjagtighed på 0,2°C. Måling af temperatur-differens foregik, som tidligere nævnt, både vha. "hånd"termometer og skriver, således at når skriveren registrerede en helt konstant temperaturforskelle blev termometrene aflæst og differensen kontrolleret. Altså en unøjagtighed på temperaturdifferensen også på 0,2°C. For temperaturdifferenser over solfangeren på 8-10°C fås en relativ usikkerhed på 2-3%.

Sammenlagt vurderes måleusikkerheden ved de udendørs effektivitetsmålinger at være i størrelsesordenen 5-7%.

Vurdering af betydning af:

Øvrige forhold:

Den udendørs opstilling var placeret således, at de omkringliggende lave træer og buske ikke kastede nogen skygge på solfangeren i tidsrummet ca. kl. 9-14.30, hvor målingerne foretoges. Udenom flisearealet, hvor solfangeren var opstillet, bestod overfladen blot af stabilt grus. For at begrænse betydningen af støv og snavs herfra blev solfangerens for- og bagside tørret af et par gange om dagen under målingerne.

Ved beregning af varmetabskoefficienten, ud fra regression af beregnede eller målte effektiviteter, har det stor betydning, hvilke data (i.e. fra hvilket temperaturområde) der fittes på samt hvilken grad (1. eller 2.) af regressionsudtryk, som sammenlignes. Disse potentielle, matematiske fejlkilder er der taget højde for, ved at fitte på effektiviteter fra de samme temperaturområder og ved netop at sammenligne varmetabskoefficienter (og starteffektiviteter) fra regressionsudtryk af samme grad.

Samlet vurdering:

Lægges alle de forhold sammen, som kan give større varmetab, vil de beregnede varmetabskoefficienter kunne øges med 8-10%. Lægges hertil yderligere 2% hhv. 5-7% måleusikkerhed fra den indendørs hhv. udendørs opstilling giver ovennævnte overvejelser en forøgelse på maksimalt ca. 15% af de beregnede varmetabskoefficienter.

De målte varmetabskoefficienter er imidlertid 72% hhv. 83% større.

Årsagen til den resterende afvigelse kan så skyldes

- flerdimensionale varmestrømme ved rand/revner (> sum af endimensionale varmestrømme)
- restfugt i aerogel trods tørring eller opslugning af luftfugtighed inden samling
- areal/perimeter-forholdet (relativ stor randoverflade som afkøles konvektivt)

Desuden kan afvigelsen skyldes, at den beskrevne model ikke er korrekt eller for unøjagtig.

Præcise målinger af kombineret ledning og stråling i den evakuerede aerogel, som benyttes

konkret i den næste solfanger må bruges til at verificere modellen for varmetransporten. Modellen for varmeovergang fra dækglas til omgivelserne er hentet fra Keller /9/ og Krischer /10/ og skulle være alment anerkendt og godtaget.

Endelig er de benyttede algoritmer for varmetransport igennem aerogel og fra solfanger til omgivelser blevet grundigt checket, således at edb-programmet ikke skulle indeholde nogen fejl.

6. Beregning af årsydelser

Til vurdering af den dobbeltsidige solfanger, sammenlignes den med to traditionelle solfanger, dels en solfanger, der fortrinsvis benyttes til almindelige brugsvandsanlæg (Batec BA 22), dels en solfanger til højtemperaturformål (ARCON HT), der ofte anvendes i fjernvarmesystemer, dvs. anlæg med konstant temperatur. Effektivitetskonstanterne for de 3 solfangere:

Batec BA 22:	0,75	4,85	0,016	
AR-CON HT:	0,76	3,50	0,002	
Airglass (I.eff.):	0,75	1,86	0,003	
(U.eff.):	0,77	2,27	-	(ift. forsidestråling)

(I.eff.): Effektivitet målt i indendørs i solsimulator. Ensidig bestråling.

(U.eff.): Effektivitet målt udendørs. Tosidig bestråling.

For at kunne vurdere betydningen i forskellene på effektivitetskonstanterne beregnes og sammenlignes årsydelserne for et brugsvandsanlæg og et anlæg med konstant temperatur.

Solfangerne har forskellige transparente arealer hhv. 2,19 m², 12,56 m², og 2,26 m². For at kunne få sammenlignelige resultater, antages alle arealerne at være lige store: 2,26 m², samtidigt med at effektivitetskoefficienterne er de samme.

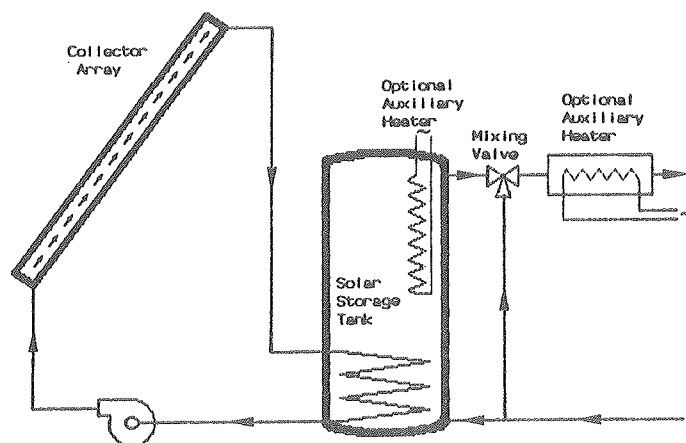
Til beregning af årsydelserne er simuleringsprogrammet EURSOL benyttet. I begge anlægstyper sammenlignes de energimængder, som solfangeren umiddelbart producerer.

6.1. Brugsvandsanlæg

I dokumentationen for EURSOL /8/ er der anført forskellige standardanlæg, heriblandt et brugsvandsanlæg (10/50°C) med en sydvendt, 45° hældende solfanger og vejrdato for København. Systemskiten er gengivet på figur 6.1. I de anførte inddata er kun ændret oplysninger for de forskellige solfangere, mens alle øvrige informationer om rør, pumper, isolering, styring, varmelager, supplerende energi samt fordeling af vandforbrug er fastholdte.

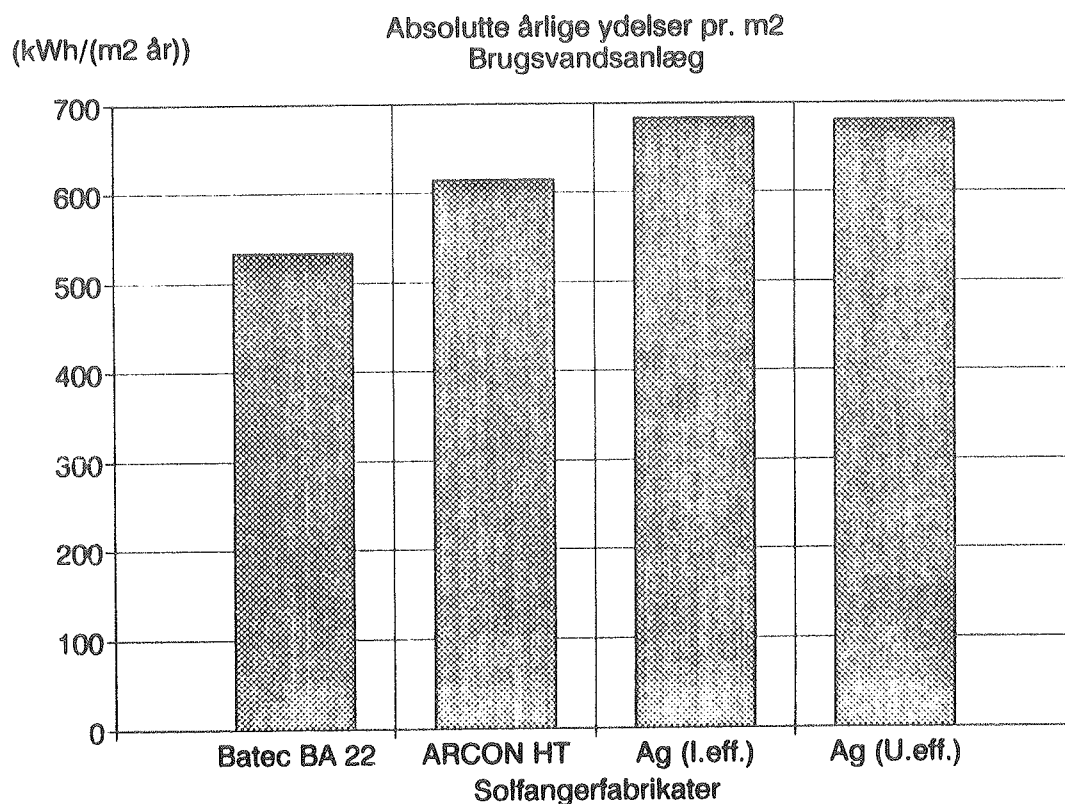
System Type 3: One Tank Solar Water Heater.

optional component: immersion heater in the tank.

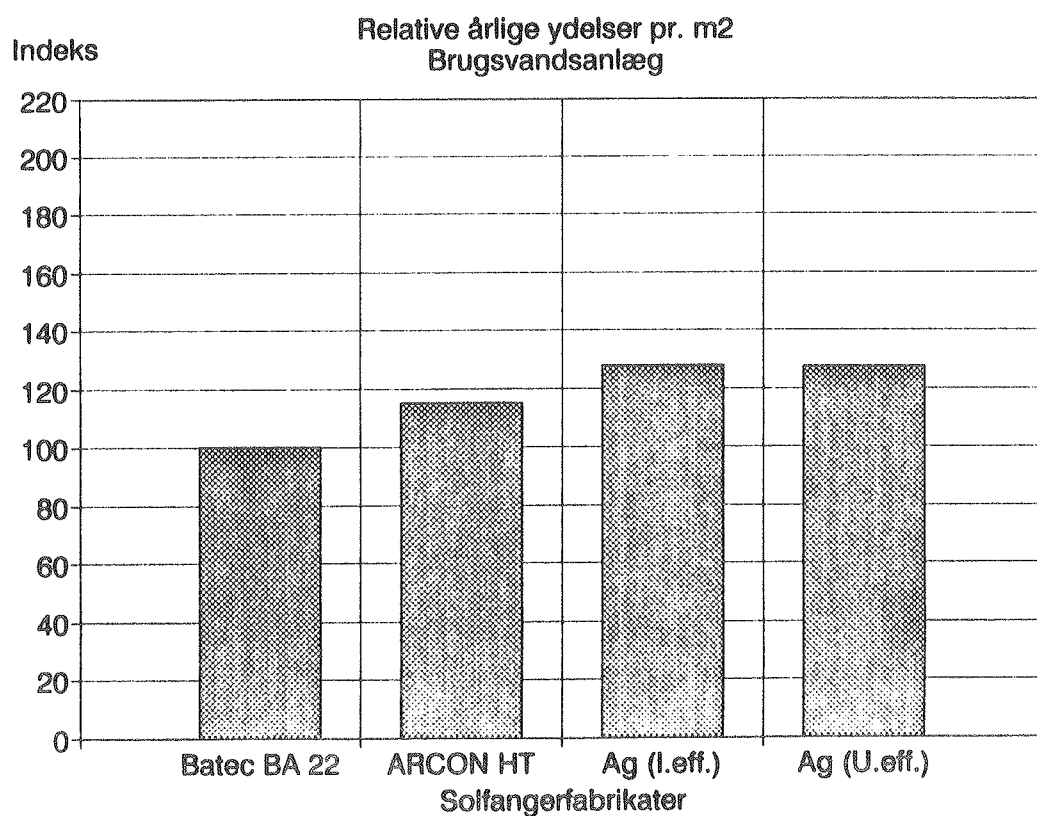


Figur 6.1. Skematisk systemopbygning af standard brugsvandsanlæg i EURSOL.

De beregnede energimængder er sammenlignet på nedenstående figurer.



Figur 6.2. Absolutte årlige solfangerydelser pr. m².



Figur 6.3. Relative årlige solfangerydelser pr. m².

Som det ses, yder aerogelsolfangeren næsten 700 kWh/(m² år), eller ca. 30% mere end Batec BA 22 og ca. 15% mere end ARCON HT, hvilket var forventet jfr. effektivitetskonstanterne.

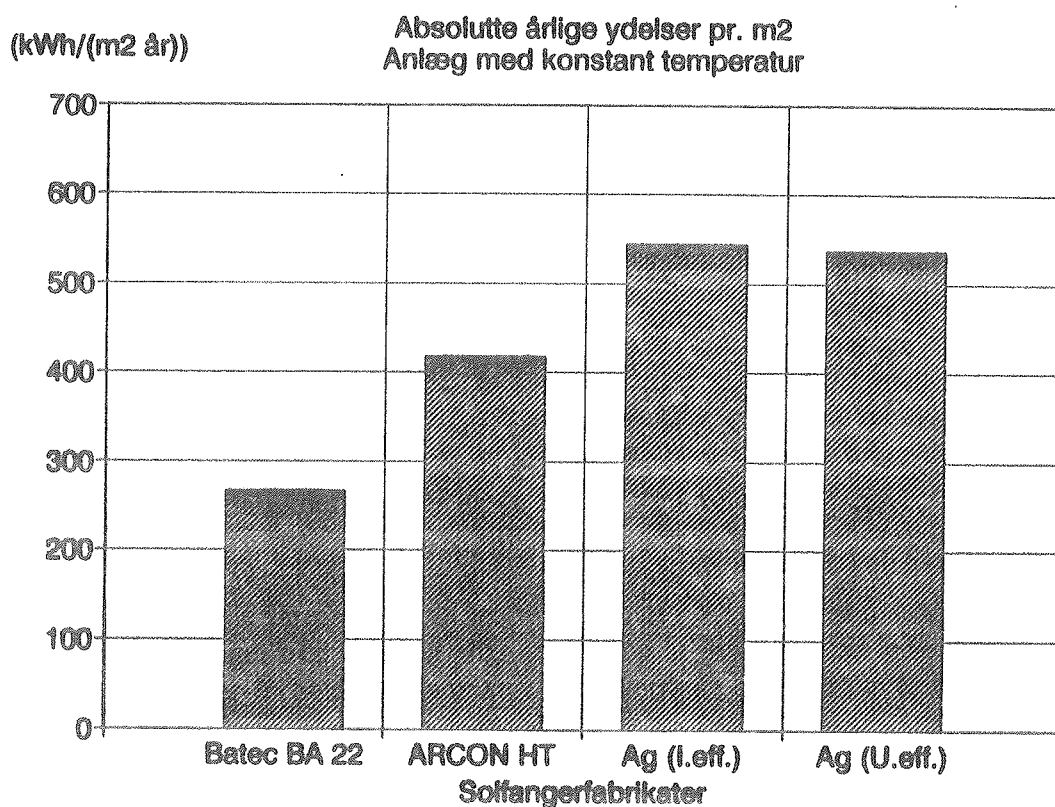
Som følge af den lidt større varmetabskoefficient for den udendørs opstilling i forhold til i solsimulatoren, bliver den årlige ydelse lidt mindre, på trods af bestråling på to sider. Bagsidebidraget er dog beskedent (8 % diffus og reflekteret stråling), og forsidebidraget indeholder ca. 15 % diffus stråling, i modsætning til solsimulatorens udelukkende direkte stråling.

6.2. Anlæg med konstant temperatur (Fjernvarmeanlæg)

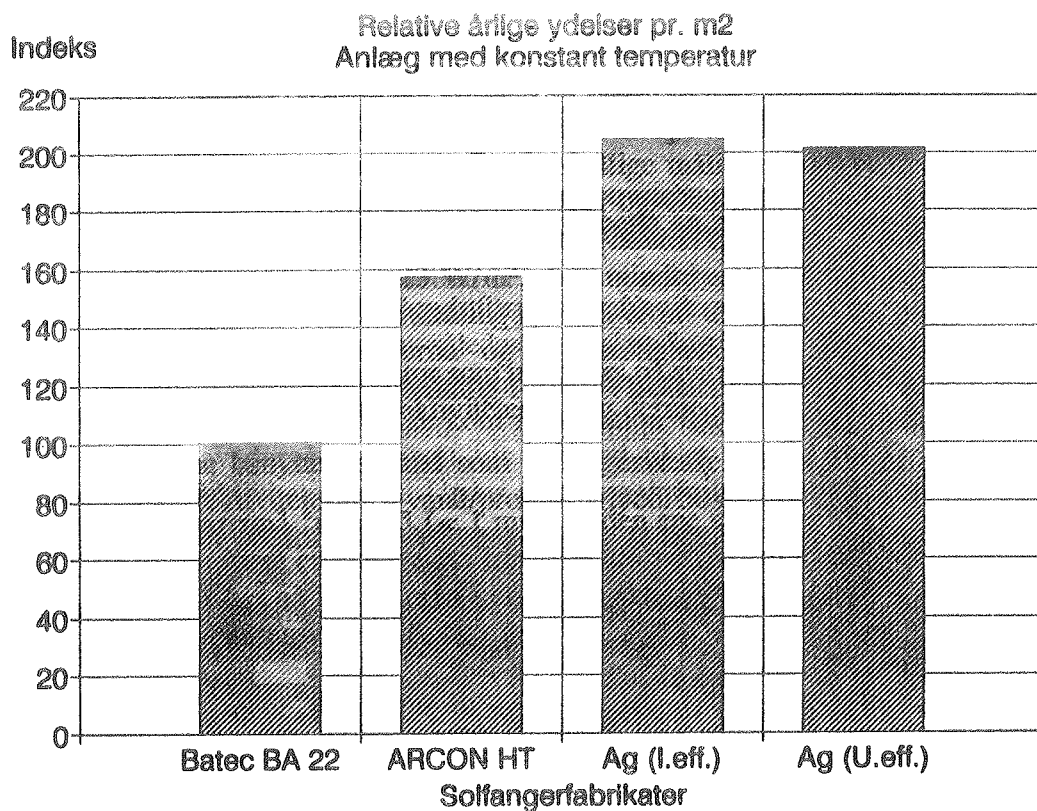
I EURSOL eksisterer der intet decideret fjernvarmeanlæg eller procesvarmeanlæg. I stedet er der ved modifikation af brugsvandsanlægget søgt skabt en anlæg til opvarmning af vand fra en returledning i et fjernvarmeanlæg med en returtemperatur på 60°C og 80°C i fremløb.

Med det samme solfangerareal 10-dobles varmeoverføringskoefficienterne i lagertanken, der fastholdes på 300 l, men nu uden suppleringskilde. Herved modelleres en gennemstrømningsvarmeveksler, som man antagelig vil benytte i systemet. Gennemstrømningsvarmeveksleren tilføres "koldtvands"-mængde på 10 gange forbruget af brugsvand, jævnt fordelt over døgnet og ugen. Solfangerens hældning er sat til 35°, som jfr. /5/ skulle være optimal mht. det årlige (forside-)udbytte for solfangere opstillet i uendeligt lange, sydvendte rækker.

Varmetabet fra solfangerkredsen vil sandsynligvis have større betydning for årsudbyttet for dette anlæg end for et brugsvandsanlæg pga. de højere temperaturer. Såvel længden af rørsystemet som varmetabet herfra er vanskeligt at vurdere. Da beregningerne har til formål at sammenligne solfangernes ydelser, fremfor at fokusere på systemets samlede ydelse, er det "forstyrrende" varmetab elimineret ved at sætte rørlængde og varmetab til nul.



Figur 6.4. Absolutte årlige solfangerydelser pr. m²



Figur 6.5. Relative årlige solfangerydelser pr. m².

Det ses, som forventet, at Airglass-solfangeren er markant bedre end traditionelle solfangere til mellem- og højtemperaturformål.

Airglass-solfangeren yder næsten 550 kWh/(m² år), hvorimod en traditionel højtemperatur-solfanger som ARCON-HT yder ca. 400 kWh/(m² år) mindre og en almindelig solfanger til brugsvandsanlæg godt ca. 250 kWh/(m² år). Relativt vurderet i.f.t. Batec BA 22 yder Airglass-solfangeren dobbelt så meget, mens ARCON HT har en ydelse, der ligger ca. midt imellem disse to solfangere.

7. Driftssikkerhed og holdbarhed

Forløbet af projektet har vist, at der især er 2 forhold vedrørende driftssikkerhed og holdbarhed, der bør kommenteres nærmere: Lufttæthed og termiske materialebevægelser i solfangeren. Dvs. om evakuering, bevaring og evt. gen-evakuering ("reparation") af lufttrykket i solfangeren samt om de forskellige materials (forsøg på) termiske bevægelser trods fastholdelsen fra det ydre tryk.

7.1. Lufttæthed

Lufttætningen i solfangeren består, som tidligere nævnt, af de 2 butylfuger mellem dækglass og stålramme. Hver fuge er ca. 2 cm bred og ca. 1,6 mm høj.

Med den til rådighed værende pumpe varede det ca. 2 døgn at få pumpet lufttrykket i solfangeren (dvs. i den hule stålramme og i aerogelen) fra atmosfæretrykket på ca. 1000 mbar ned til ca. 1 mbar, både ved den første evakuering og ved den senere evakuering efter bruddet på absorberen. Erfaringsmæssigt har det været svært at opnå lavere tryk end 0,1-0,2 mbar inden for en rimelig kort sugeperiode (nogle dage).

Generelt har der ikke været problemer med tætheden under evakueringen, formodentlig fordi stålrammen yder en tilstrækkelig bred og fast understøtning for de 2 dækglass.

Efter trykstigningen ved absorberbruddet havde bagsideglasset dog sluppet butylfugen ved enderne af solfangeren. I den ene ende måtte der påsættes planker og skruetvinger for at få fugen tæt igen. Trods ihærdige forsøg lykkedes det ikke efterfølgende at få fugen tæt med metalklemmer, som solfangeren var fastholdt til stativet med, og gentagen evakuering (3. gang) måtte derfor opgives.

Inden da var lufttrykket i solfangeren steget således:

- Indendørs, efter prøvning: $\Delta p = 0,2$ mbar på 1 måned
 - Udendørs, før prøvning, overdækket: $\Delta p = 0,6$ mbar på 4 måneder
- dvs. i størrelsesordenen 2-2.5 mbar/år (ikke eksponeret for sol).

Lufttætheden af solfangeren udsat for sol - og dermed større temperatursvingninger - kan der desværre ikke siges noget konkret om. I bedste fald vil lufttrykket stige med samme størrelsesorden, men formodentlig hurtigere reelt. Lufttrykket i aerogelen bør holdes under 50-100 mbar aht. minimal varmetransmission. Forudsættes: lineær trykstigning i solfangerens levetid, et starttryk på 1 mbar og en krævet levetid på 20 år, må trykstigningen for en solfanger udsat for sol således ikke være meget højere end 3-5 mbar/år, dvs. maksimalt det dobbelte af det målte.

7.2. Termiske bevægelser

I solfangerkonstruktionen er 3 elementer udsat for betydelige termiske bevægelser: Absorber, monolitisk silica aerogel, og det indre dækglass på bagsiden.

Varmeudvidelseskoefficienten for den monolitiske silica aerogel kendes ikke nøjagtigt, men formodes at være i samme størrelsesorden som glas, $6-9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, så der skulle ikke være termiske bevægelsesproblemer mellem disse to materialer. Begge materialer har da også et stort indhold af Kvarts (SiO_2)

For SunStrip-absorberen, der næsten helt består af aluminium, er varmeudvidelseskoefficienten $24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, dvs. ca. 3 gange så stor som for aerogel. Årsagen til bruddet på absorberen skyldes, at det ydre tryk har været tilstrækkeligt stort til at kunne hindre glidning af absorberfinnerne i forhold til den monolitisk silica aerogel hhv. indre glas, således at der ved (forsøg på) termiske bevægelser er opstået metaltræthed og brud på absorberen.

Der er principielt 3 måder at løse dette problem på ved fremtidige konstruktioner.

Én mulighed er at nedsætte friktionen mellem absorber og monolitisk silica aerogel/indre glas. Dette kan fx gøres ved at indlægge en tynd, glat (og transparent) teflonfolie mellem absorberen og den monolitiske silica aerogel, eventuelt klæbet på absorberen inden samling af solfangeren. Måske vil et indre glas også på forsiden være glat nok, men det nedsætter transmittansen og dermed det så vigtige bidrag på forsiden.

Alternativt kan friktionen mindskes ved ikke at have et så lavt tryk i aerogelen, og dermed ikke får så stort et tryk på absorberfladen. I så fald må man acceptere en højere varme-"lednings"evne i aerogelen. Uevakueret monolitisk silica aerogel har en varmeledningsevne på ca. $0,025 \text{ W/mK}$ ($\approx$ PUR-skum) eller ca. 4 gange højere end, når det er evakueret.

En anden mulighed er at finde/udvikle et absorbermateriale, med samme varmeudvidelseskoefficient som monolitisk silica aerogel, så snart der foreligger nærmere oplysning herom.

Indtil da kan man eventuelt forsøge sig med et absorbermateriale med en mindre varmeudvidelseskoefficient end aluminiums ($24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Umiddelbart forekommer kobber ($17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) eller rustfrit stål ($12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) som realistiske materiale-alternativer. Der er set eksempler på strips af kobber, men den endnu lavere varmeudvidelseskoefficient for rustfrit stål gør dette materiale mere fordelagtigt. I værste tilfælde er varmeudvidelseskoefficienten dog stadig dobbelt så stor som for monolitisk silica aerogel.

Alternativt bør man overveje og finde/udvikle ikke-metalliske absorbere med lav varmeudvidelseskoefficient og samtidig stor varmeledningsevne. I /6/ har DTI m.fl. foretaget indledende undersøgelser af forskellige plasttyper og keramiske materialer (ligesom aerogel).

Endvidere vil det være mere bekvemt med en absorber med plane begrænsningsflader aht. opbygning og samling af solfangeren.

En tredje mulighed består i at undgå friktion ved at undgå berøring mellem absorber og monolitisk silica aerogel. En sådan konstruktion kunne fx udformes ved at lade det indre glas omslutte absorberen som en indre, lufttæt glaskasse, som ikke berører absorberen undtagen ved indløbs- og udløbsrøret. Samlingen af en sådan indre glaskasse samt glas-metal-samlingen ved indløb og udløb vil dog nok være problematisk og dermed relativt dyr, ligesom det er svært at vurdere, hvor skrøbelig en sådan solfanger vil være.

Umiddelbart virker en løsning med en SunStrip af rustfri stål eller kobber, belagt en tynd teflonfolie på begge sider, som mest realistisk og nærliggende på kort sigt. På længere sigt vil det være bedre, om der kunne udvikles en plan absorber med en varmeudvidelseskoefficient som monolitisk silica aerogels og med en stor varmeledningsevne som metalabsorberne.

Parallelt med undersøgelse af en ændret absorberkonstruktion, bør resultaterne (materiale-værdier) af den løbende udvikling med aerogeler/xerogeler/carbogeler inddrages og udnyttes.

7.3. Øvrige forhold

Denne prototype har ikke været udsat for en decideret driftssikkerhedsprøvning, hvorfor der ikke kan gives standardiserede oplysninger herom.

Erfaringerne med holdbarhed fra effektivitetsprøvningerne i solsimulatoren og udendørs viser imidlertid, at solfangerens ydre skal (2 dækglas, fuger samt metalrammen) er tilstrækkelig lufttæt og meget vejrbestandig. Dog skal butylfugerne beskyttes mod nedbrydning af UV-stråling fx af en dækkende alu-folie, eller bedre med en gummibelagt ramme, der samtidig kan fastholde dækglassene ved punktering af solfangeren.

Konklusion

Dette projekt har i korte træk resulteret i en solfanger med et godt design, en god effektivitet og ydelse, men desværre med en ringe holdbarhed af absorberen.

Konstruktionsmæssigt er det lykkedes at opbygge en prototype på en dobbeltsidig solfanger med monolitisk silica aerogel som en plansymmetrisk konstruktion. I midten en SunStrip-absorber med plane finner, der er omsluttet af en ca. 2 cm tyk aerogel på forside og bagside, dog med glas inderst ved absorberen på bagsiden og lidt mere aerogel langs randen. Her afstives konstruktionen af en rustfri stålramme og yderst lukkes konstruktionen af 2 dækglass med en bred butylfuge under. For at opnå aerogelens gode isolerende egenskaber, er lufttrykket i solfangeren pumpet ned til mindre end 50 mbar, konkret ca. 1 mbar.

Til beregning af solfangerens effektivitet er et grundlæggende edb-program blevet videreudviklet til at kunne regne på forskellige solfangeropbygninger under forskellige vejrforhold, ligesom edb-programmet er blevet gjort mere brugervenligt.

Efter indledende, succesfulde forsøg med evakuering og lufttæthed indendørs, blev solfangerens effektivitet målt i solsimulatoren, dvs. med bestråling på forsiden. Desuden blev tryktabet gennem solfangeren målt. Efter at have fået bekræftet tætheden indendørs, blev solfangeren opstillet på stativ udendørs i overdækket tilstand og viste sig stadig at holde tæt. Herefter gennemførtes effektivitetsprøvninger udendørs, da vejret tillod det. Den planlagte efterfølgende stagnationsprøvning kunne desværre ikke gennemføres, da en af stripsene i absorberen blev trukket over forinden. Årsagen bestod i det høje ydre tryk på absorberen (som følge af evakuering af aerogelen) kombineret med stor friktion mellem absorberen og aerogel/indre glas, som medførte træthedbrud af absorberen i.f.m. de termiske bevægelser.

Sammenligning mellem beregninger og målinger af effektiviteten viste fin overensstemmelse mht. starteffektiviteten og en rimelig overensstemmelse mht. varmetabskoefficienten.

Ensidigt bestrålet i solsimulatoren var starteffektiviteten ca. 75%. Opstillet på stativ udendørs med ca. 8% diffus og reflekteret stråling på bagsiden var starteffektiviteten ca. 77% (i forhold til forsidestrålingen). Ved bl.a. at fjerne skyggegivende ballaststen under solfangeren forventes en bagsidestråling på 10-12% evt. højere med fliser med højere reflektans.

De 2 beregnede effektivitetskurver (i solsimulator og udendørs) afveg lidt fra de målte effektivitetskurver. Ved en temperaturforskel på 100°C var den målte effektivitet i solsimulatoren ca. 8 pct-point lavere og udendørs ca. 12 pct-point lavere end beregnet. Ialt måltes gennemsnitlige varmetabskoefficienter på ca. 2 W/m²K.

Dette skyldes større varmetab end beregnet. Beregningsmæssigt har det kun været muligt at gøre rede for en del af det større varmetab. Det større varmetab findes dels fra randen, dels fra mellemrum og revner i aerogelen, dels fra den tyndere aerogel over absorberrør og ekspansionsskiner. Det resterende varmetab, som der ikke kan redegøres præcist for, stammer formodentlig fra flerdimensionale effekter og/eller fra restfugt i aerogelen og/eller fra det relativt store forhold mellem areal af randaral og transparent areal, med relativt stort ydre konvektionstab fra randen til følge.

På grundlag af de målte effektiviteter blev der udført beregninger af årsydelser for et brugsvandsanlæg (10/50°C) samt for et anlæg med konstant temperatur (~ returløb på et

fjernvarmeanlæg med 60/80°C). I brugsvandsanlægget yder den dobbeltsidige solfanger med monolitisk silica aerogel kun ca. 1/4 mere end en traditionel solfanger til brugsvandsformål, mens den i fjernvarmeanlægget yder ca. dobbelt så meget. For begge anlægstyper ligger ydelsen af en traditionel solfanger med dæklag af glas og teflonfolie til højtemperaturformål ca. midt imellem disse 2 solfangeres ydelser.

Årsydelsen af den dobbeltsidige solfanger er nogenlunde den samme beregnet ud fra effektiviteten i solsimulator som opstillet udendørs. Dette skyldes, at bagsidebidraget er beskedent, og at forsidebidraget indeholder en del diffus stråling.

Mht. driftssikkerhed og holdbarhed har solfangeren vist sig at være robust udadtil men problematisk sammensat indadtil. Før og under drift har solfangeren vist sig at være lufttæt, regntæt og med tilstrækkelig mekanisk styrke til at kunne modstå almindelige ydre vejr-påvirkninger. Under stagnation (egl. cykler mellem stagnation ved høj og lav temperatur) kunne absorberen, som nævnt, ikke bevæge sig tilstrækkeligt frit, og fik derfor træthedsbrud. Den nuværende prototype har således ikke været tilstrækkelig holdbar.

Videre undersøgelser for udvikling af en sådan solfanger bør derfor især fokusere på at opnå en mere holdbar absorber. Dette kan gøres på 3 måder. Én mulighed er at nedsætte friktionen enten ved fx at indlægge en glat teflonfolie eller ved at hæve trykket i aerogelen, men sidstnævnte kan give kondensproblemer i aerogelen. En anden mulighed består i at finde eller udvikle et absorbermateriale med lavere varmeudvidelseskoefficient - måske rustfrit stål - der har mindre termiske bevægelser end aluminium. Måske kan ikke-metalliske materialer vise sig fordelagtige her. En tredje mulighed består i helt at undgå berøring mellem absorber og monolitisk silica aerogel/glas ved at lade absorberen ligge løst i en indre, lufttæt glaskasse.

Under alle omstændigheder vil det være en fordel, hvis den næste absorber har plane er kasseformet dvs. med plane begrænsningsflader aht. de plane aerogelstykker. Herved kan man undgå at skære aerogelskiverne op og begrænse antallet af sammenstødninger og således begrænse varmetabet.

En solfanger med en ny og mere holdbar absorberkonstruktion bør udsættes for en total driftssikkerhedsprøvning, især stagnationsprøvning. Driftssikkerhedsprøvningen bør suppleres med en evakueringstest, som kan simulere punktering med efterfølgende gen-evakuering: (sænke tryk - hæve tryk - sænke tryk). Herved kunne man undersøge aerogelens holdbarhed, fx. tendensen til revnedannelse i aerogelen ved reparation af en solfanger.

Prøvning af den næste prototypes effektivitet bør suppleres med målinger af ydelse, side-by-side en traditionel solfanger til højtemperaturformål, og evt. sammen med en traditionel solfanger til brugsvandsformål, for at få bekræftet forholdet mellem solfangernes ydelser.

Referencer

- /1/: "Solfanger med Airglass - beregnet og målt",
Karsten Ingerslev Jensen og Svend Aage Svendsen,
Rapport nr. 87-17,
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (1987).
- /2/ "Dobbeltsidig solfanger med evakueret monolitisk silica aerogel",
Kim Tursø-Finnich,
Eksamensprojekt,
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (1988).
- /3/ "Højisolerende transparent dæklag",
Karsten Ingerslev Jensen,
Energiministeriets solvarmeprogram. Rapport nr. 49,
Meddelelse nr. 204,
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (1989).
- /4/ "Solar Collector with Monolithic Silica Aerogel"
S. Svendsen,
Paper at 3. International Symposium on Aerogels,
Würzburg, (1991).
- /5/ "Projektering af større solvarmeanlæg",
Svend Erik Mikkelsen,
Energiministeriets solvarmeprogram. Rapport nr. 48,
Meddelelse nr. 194,
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (1988).
- /6/ "Ikke-metalliske materialer til solfangerabsorbere",
N.B. Andersen, C.H. Hansen, U.D. Nielsen, J. Sørensen,
Energiministeriets Forskningsudvalg for Energianvendelse i bygninger,
Energiteknologi, DTI og Plastconsult,
Taastrup, (1993)
- /7/ "Energimæssig undersøgelse af solvægshus",
Kaj Lynggaard Isaksen,
Eksamensprojekt,
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (1993).
- /8/ "Simulation of Water Based Thermal Solar Systems.
EURSOL - An Interactive Program",
Willie L. Dutré,
Katholieke Universiteit Leuven,
Heverlee, Belgien, (1991).

- /9/ "Characterization of the thermal performance of uncovered solar collectors by parameters including the dependence on wind velocity, humidity and infrared sky radiation as well as on solar irradiance",
Keller, J.,
Swiss Federal Institute for Reactor Research,
Wuerenlingen, Schweiz.
- /10/ "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik", 1. bind,
Krischer, O og Kast, W.,
Berlin, Tyskland, (1978).

Bilag

- Bilag 1a: Inddata til edb-program ved beregning af effektivitet m.m. i solsimulator.
- Bilag 1b: Resultater fra do.
- Bilag 2a: Inddata til edb-program ved beregning af effektivitet m.m. udendørs.
- Bilag 2b: Resultater fra do.

1a

 * Inddata og Resultater for solfanger med Airglass *

Følgende INDDATA er benyttet:

Vejrparametre:

Solstråling:

- indfaldsvinkel for direkte stråling,	i	=	0.000 °
- direkte solstråling på forside,	q_s_dir_f	=	900.000 W/m ²
- diffus solstråling på forside,	q_s_dif_f	=	0.000 W/m ²
- diffus solstråling på bagside,	q_s_dif_b	=	0.000 W/m ²
- solfanger opstillet i solsimulator?.....Ja.....,	solsim	=	1 -

Øvrige:

- temperatur af omgivelser, (luft og jordoverflade),	T_o	=	30.000 °C
- lufthastighed,	V_luft	=	5.000 m/s

Solfangerparametre:

Dækglas (2 ens):

- tykkelse,	d_g	=	0.004 m
- ekstinktionskoefficient,	a_g	=	4.000 1/m

Airglass:

- tykkelse, forside og bagside,	d_Ag	=	0.019 m
- tykkelse, ved rand/ender (korte sider),	l_Ag	=	0.020 m
- tykkelse, ved rand/sider (lange sider),	b_Ag	=	0.043 m
- densitet,	dens_Ag	=	150.000 Kg/m ³

Indre glas:

- nej,	igf	=	0 -
- tykkelse på forside	d_igf	=	0.000 m
- ekstinktionskoefficient,	a_igf	=	0.000 1/m
- ja ,	igb	=	1 -
- tykkelse på bagside	d_igb	=	0.005 m
- ekstinktionskoefficient,	a_igb	=	17.000 1/m

Absorber:

- længde (= Transparent længde),	l_a	=	2.270 m
- bredde (= Transparent bredde),	b_a	=	0.994 m
- tykkelse,	d_a	=	0.0005m
- længde af ekspansionszone,	l_ekspzone	=	0.0450m
- absorptans,	alfa_a	=	0.950 -
- emittans,	e_a	=	0.150 -
- ydre diameter for forbindelsesrør (ind-/udløbsrør),	dy_fr	=	0.010 m

Kapperør (2 ens):

- længde,	l_kpr	=	0.100 m
- ydre diameter,	dy_kpr	=	0.034 m
- godstykkelse,	gt_kpr	=	0.002 m
- bredde af lodning,	b_kpr_lodn	=	0.003 m
- varmeledningsevne af kapperør og lodning,	vle_kpr	=	15.000 W/m/K
- varmeledningsevne af kapperørsisolering,	vle_kpr_isol	=	0.020 W/m/K

Ramme:

- bredde af rammeprofil,	b_rp	=	0.020 m
--------------------------	------	---	---------

Solfanger:

- hældning af solfanger,	s_solf	=	67.000 °
--------------------------	--------	---	----------

RESULTATER af beregning

Transparent areal, A_t , er sat lig absorberareal, A_a , (ens på begge sider).
Reelt er det transparente areal lidt større. Alle varmestømme er i.f.t. A_t .

Absorber	Forside				Bagside			
$A_a = 2.26 \text{ m}^2$	$(ta)(0^\circ) = 0.78$		$(ta)(60^\circ) = 0.61$		$(ta)(0^\circ) = 0.69$		$(ta)(60^\circ) = 0.51$	
T_a ($^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	$q_{a,g}$ (W/m^2)	$q_{abs,g}$ (W/m^2)	$q_{g,o}$ (W/m^2)	T_g ($^\circ\text{C}$)	$q_{a,g}$ (W/m^2)	$q_{abs,g}$ (W/m^2)	$q_{g,o}$ (W/m^2)
30.0	32.1	-1.00	61.30	60.30	30.0	-0.00	0.00	0.00
50.0	32.5	8.75	61.30	70.05	30.3	9.75	0.00	9.75
70.0	32.8	19.78	61.30	81.08	30.7	20.78	0.00	20.78
90.0	33.3	32.45	61.30	93.76	31.2	33.44	0.00	33.44
110.0	33.8	47.19	61.30	108.49	31.7	48.16	0.00	48.16
130.0	34.4	64.51	61.30	125.81	32.3	65.47	0.00	65.47
150.0	35.1	85.02	61.30	146.32	33.0	85.95	0.00	85.96
170.0	36.0	109.42	61.30	170.72	33.9	110.33	0.00	110.33
190.0	37.0	138.53	61.30	199.83	34.9	139.40	0.00	139.41
210.0	38.2	173.27	61.30	234.57	36.2	174.10	0.00	174.11
230.0	39.6	214.70	61.30	276.00	37.6	215.49	0.00	215.50
250.0	41.3	264.02	61.30	325.31	39.3	264.75	0.00	264.77
260.7	42.3	294.22	61.30	355.51	40.4	294.92	0.00	294.93

Absorber	Kapperør & Rand			Samlet				
$A_a = 2.26 \text{ m}^2$	$2 \cdot A_k = 0.02 \text{ m}^2$		$A_r = 1.13 \text{ m}^2$	$A_{solf} = 2.73 \text{ m}^2$		$OA_{solf} = 5.76 \text{ m}^2$		
T_a ($^\circ\text{C}$)	$T_{kpr,solf}$ ($^\circ\text{C}$)	$q_{kpr,o}$ (W/m^2)	$q_{a,r}$ (W/m^2)	$T_{g,mid}$ ($^\circ\text{C}$)	$q_{a,tab}$ (W/m^2)	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)	ϵ_{tal} (-)	ϵ_{ta2} (-)
30.0	30.0	0.00	-0.06	31.1	-1.06	ej def	0.779	0.779
50.0	30.3	2.95	1.20	31.4	22.66	1.133	0.753	0.753
70.0	30.7	5.92	2.88	31.8	49.36	1.234	0.723	0.723
90.0	31.0	8.89	5.09	32.2	79.87	1.331	0.689	0.689
110.0	31.3	11.86	7.99	32.8	115.20	1.440	0.650	0.650
130.0	31.7	14.85	11.73	33.4	156.55	1.565	0.604	0.604
150.0	32.0	17.84	16.52	34.1	205.33	1.711	0.550	0.550
170.0	32.3	20.84	22.60	34.9	263.19	1.880	0.485	0.485
190.0	32.6	23.84	30.25	36.0	332.02	2.075	0.409	0.409
210.0	32.9	26.86	39.78	37.2	414.01	2.300	0.318	0.318
230.0	33.3	29.88	51.56	38.6	511.63	2.558	0.209	0.209
250.0	33.6	32.92	66.00	40.3	627.68	2.853	0.080	0.080
260.7	33.9	35.96	75.02	41.3	700.11	3.034	-0.000	0.000

Stagnationstemperatur, $T_s = 260.7 \text{ C}$

 * Inddata og Resultater for solfanger med Airglass *

Følgende INDDATA er benyttet:

Vejrparametre:

Solstråling:

- indfaldsvinkel for direkte stråling,	i	=	7.500 °
- direkte solstråling på forside,	q_s_dir_f	=	850.000 W/m ²
- diffus solstråling på forside,	q_s_dif_f	=	125.000 W/m ²
- diffus solstråling på bagside,	q_s_dif_b	=	75.000 W/m ²
- solfanger opstillet i solsimulator?.....Nej...,	solsim	=	0 -

Øvrige:

- temperatur af omgivelser, (luft og jordoverflade),	T_o	=	21.500 °C
- lufthastighed,	V_luft	=	2.500 m/s

Solfangerparametre:

Dækglas (2 ens):

- tykkelse,	d_g	=	0.004 m
- ekstinktionskoefficient,	a_g	=	4.000 1/m

Airglass:

- tykkelse, forside og bagside,	d_Ag	=	0.019 m
- tykkelse, ved rand/ender (korte sider),	l_Ag	=	0.020 m
- tykkelse, ved rand/sider (lange sider),	b_Ag	=	0.043 m
- densitet,	dens_Ag	=	150.000 Kg/m ³

Indre glas:

- nej,	igf	=	0 -
- tykkelse på forside	d_igf	=	0.000 m
- ekstinktionskoefficient,	a_igf	=	0.000 1/m
- ja ,	igb	=	1 -
- tykkelse på bagside	d_igb	=	0.005 m
- ekstinktionskoefficient,	a_igb	=	17.000 1/m

Absorber:

- længde (= Transparent længde),	l_a	=	2.270 m
- bredde (= Transparent bredde),	b_a	=	0.994 m
- tykkelse,	d_a	=	0.0005m
- længde af ekspansionszone,	l_ekspzone	=	0.0450m
- absorptans,	alfa_a	=	0.950 -
- emittans,	e_a	=	0.150 -
- ydre diameter for forbindelsesrør (ind-/udløbsrør),	dy_fr	=	0.010 m

Kapperør (2 ens):

- længde,	l_kpr	=	0.100 m
- ydre diameter,	dy_kpr	=	0.034 m
- godstykkelse,	gt_kpr	=	0.002 m
- bredde af lodning,	b_kpr_lodn	=	0.003 m
- varmeledningsevne af kapperør og lodning,	vle_kpr	=	15.000 W/m/K
- varmeledningsevne af kapperørsisolering,	vle_kpr_isol	=	0.020 W/m/K

Ramme:

- bredde af rammeprofil,	b_rp	=	0.020 m
--------------------------	------	---	---------

Solfanger:

- hældning af solfanger,	s_solf	=	35.000 °
--------------------------	--------	---	----------

RESULTATER af beregning

Transparent areal, A_t , er sat lig absorberareal, A_a , (ens på begge sider).
 Reelt er det transparente areal lidt større. Alle varmestømme er i.f.t. A_t .

Absorber	Forside				Bagside			
$A_a = 2.26 \text{ m}^2$	$(\tau_a)(8^\circ) = 0.78 \quad (\tau_a)(60^\circ) = 0.61$				$(\tau_a)(8^\circ) = 0.68 \quad (\tau_a)(60^\circ) = 0.51$			
T_a ($^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	q_{a_g} (W/m^2)	q_{abs_g} (W/m^2)	q_{g_o} (W/m^2)	T_g ($^\circ\text{C}$)	q_{a_g} (W/m^2)	q_{abs_g} (W/m^2)	q_{g_o} (W/m^2)
21.5	18.6	1.31	18.74	20.05	21.2	0.14	1.44	1.59
41.5	19.1	10.55	18.74	29.29	21.7	9.38	1.44	10.82
61.5	19.6	20.90	18.74	39.64	22.2	19.73	1.44	21.17
81.5	20.2	32.71	18.74	51.45	22.9	31.53	1.44	32.97
101.5	21.0	46.36	18.74	65.09	23.6	45.18	1.44	46.62
121.5	21.8	62.33	18.74	81.06	24.5	61.16	1.44	62.59
141.5	22.8	81.17	18.74	99.91	25.5	80.01	1.44	81.46
161.5	24.0	103.55	18.74	122.29	26.7	102.40	1.44	103.85
181.5	25.4	130.22	18.74	148.96	28.1	129.10	1.44	130.53
201.5	27.0	162.07	18.74	180.81	29.8	160.97	1.44	162.43
221.5	29.0	200.09	18.74	218.85	31.8	199.03	1.44	200.46
241.5	31.3	245.43	18.74	264.18	34.1	244.40	1.44	245.83
261.5	34.0	299.36	18.74	318.10	36.9	298.38	1.44	299.81
271.4	35.5	329.55	18.74	348.29	38.4	328.60	1.44	330.02

Absorber	Kapperør & Rand			Samlet				
$A_a = 2.26 \text{ m}^2$	$2 \cdot A_k = 0.02 \text{ m}^2 \quad A_r = 1.13 \text{ m}^2$			$A_{solf} = 2.73 \text{ m}^2 \quad OA_{solf} = 5.76 \text{ m}^2$				
T_a ($^\circ\text{C}$)	T_{kpr_solf} ($^\circ\text{C}$)	q_{kpr_o} (W/m^2)	q_{a_r} (W/m^2)	T_{g_mid} ($^\circ\text{C}$)	q_{a_tab} (W/m^2)	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)	ϵ_{tal} (-)	ϵ_{2} (-)
21.5	21.5	0.00	0.08	19.9	1.53	ej def	0.793	0.736
41.5	22.0	2.31	1.20	20.4	23.42	1.171	0.771	0.716
61.5	22.5	4.64	2.69	20.9	47.96	1.199	0.745	0.692
81.5	23.0	7.00	4.65	21.6	75.89	1.265	0.717	0.666
101.5	23.5	9.38	7.23	22.3	108.14	1.352	0.684	0.635
121.5	24.0	11.76	10.57	23.1	145.81	1.458	0.645	0.599
141.5	24.5	14.17	14.87	24.1	190.21	1.585	0.599	0.557
161.5	25.0	16.58	20.35	25.3	242.88	1.735	0.545	0.507
181.5	25.5	19.00	27.27	26.7	305.59	1.910	0.481	0.447
201.5	25.9	21.44	35.93	28.4	380.41	2.113	0.404	0.376
221.5	26.4	23.89	46.67	30.4	469.68	2.348	0.313	0.291
241.5	26.9	26.35	59.90	32.7	576.08	2.619	0.204	0.189
261.5	27.3	28.83	76.06	35.4	702.63	2.928	0.074	0.069
271.4	27.8	31.31	85.26	36.9	774.73	3.101	-0.000	0.000

Stagnationstemperatur, $T_s = 271.4 \text{ C}$