

# Analyser av effektivitet til nyutviklet solfanger i polymermateriale

Jeanette A. Schakenda

Cand.scient. Hovedoppgave

August 2004



Fysisk institutt  
Universitetet i Oslo



---

## Forord / takketale

Etter å ha jobbet med miljøvern i 5 år på slutten av nittitallet var jeg kjempemotivert for å studere igjen - men det måtte bli noe innen ressursbevaring og/eller miljøvern. Møtet med min nåværende veileder, hvor jeg fikk høre om arbeidet og mulige hovedfagsoppgaver ved energigruppa, gjorde meg sikker på at dette ville jeg prøve.

Det har vært svært motiverende å arbeide i denne gruppa og motta spennende og nyttige innspill både til oppgaven og til energispørsmål generelt. Den første som fortjener en stor takk, er dermed min veileder, professor John B.Rekstad.

Underveis i arbeidet med oppgaven har Michaela G.Meir og Bjørnar Sandnes vært til uvurderlig hjelp.

Det er mange i tillegg til de jeg allerede har nevnt som fortjener en takk. Med Tine og Eldrid har jeg delt kontor og hatt inspirerende faglige diskusjoner og koselig ikke-faglig prat. En ekstra takk går til Eldrid for bildesession.

Det har vært flott å få være en del av den sosiale (med Sunniva i spissen) gruppa for kjerne- og energifysikk.

Jeg har vært meget fornøyd med å bruke Frame Maker som skriveprogram, derfor går en stor takk til Arnt Inge Vistnes med sitt hovedfagskurs, og til Armen S.Minassian for alle nyttige tips og god hjelp med både FM og Matlab.

For meg som fortsatt er en dataamatør, har mye frustrasjon blitt unngått takket være dataekspertene David, Ola og Akbar.

Takket være Finn Ingebretsen har musikk også vært en del av hverdagen på Fysisk institutt.

Utenfor Fysisk institutt er det spesielt moren min som fortjener en kjempetak. Uten hennes innsats som superbestemor, hadde nok ikke oppgaven blitt ferdig!

Mange er de som i tillegg til henne velvillig har stilt som barnepassere: "tante" Gro & "onkel" Avi i St.Hanshaugen barnepark, besteforeldre, onkler og søskenbarn fra Sunnmøre, naboer, familie og venner i Oslo, tante Kanne på Beitostølen og gode venner i Lom!

Morten har tatt pappapermisjon og støttet meg hele veien.

Sebastian og Lilli har dratt meg vekk fra matematiske analyser og inn i Hundremeterskogen og Askeladdens rike, og der gleder jeg meg til å tilbringe mer tid når denne oppgaven er levert.

En takk helt til slutt til de som har bidratt med nødvendig hjelp i innspurten; min nye "romkollega", Andres Olivares, Eldrid Svåsand, Per A.Gussgard, Katharina Brnic og Hanne-Lore Schakenda.

Blindern, august 2004  
Jeanette A.Schakenda

---

---

## Sammendrag

I denne oppgaven har forskjeller i effektivitet mellom to nyutviklede solfangermodeller blitt undersøkt. Det har blitt gjort sammenligninger av effektiviteten til solfangere ved forskjellige strømningshastigheter. I tillegg har beregninger av energimengde tilført solvarmesystemet i løpet av en dag, blitt utført. Effekten av redusert transmisjon ved økende innfallsvinkel, har blitt vurdert med et kritisk blikk.

Sammenligninger av de to modellene viser en svak forbedring av effektiviteten for den nyeste solfangermodellen. En sammenligning av det daglige energiutbyttet for systemet, viser samme tendens. Forskjellen er mest merkbar om man betrakter effektiviteten per  $m^2$ .

Et solvarmeanlegg består av en solfanger, et varmelager og et varmfordelings-system. Anlegget som har blitt undersøkt i denne oppgaven, har vann som varmbærende medium og ei pumpe som sirkulerer vannet gjennom solfangerne. Solfangerens essensielle elementer er absorptorplata som kan overføre energien fra sola og til vannet, og dekkplata. Sistnevnte skal hindre varmetap fra absorptorplata og får på den måten solfangerne til å fungere som et drivhus.

Effektiviteten forteller hvor godt solfangeren, eventuelt hele systemet klarer å utnytte solenergien.

I denne oppgaven har effektiviteten til solfangeren blitt analysert ved hjelp av en kalorimetrisk metode. Da brukes den store lagertanken som rommer nesten 500 liter, som et kalorimeter.

En enkel måte å måle effektiviteten til systemet på er å se på temperaturøkningen i varmelageret og den totale innstrålinga i løpet av en dag.

Undersøkelser foretatt av de nye solfangerne viser at opptil 50% av energien som blir tilført solfangerne i løpet av en dag, kan bli nyttiggjort.

Strømningshastigheten forteller hvor fort vannet strømmer gjennom absorptorplatene. Vannet mottar energi i form av varme fra absorptorplatene som er oppvarmet av sola. I eksperimentene ble tre forskjellige strømningshastigheter valgt manuelt. Verdiene lå mellom 0,85 og 2,01/(min · m<sup>2</sup>).

Effektiviteten blir ikke påvirket i særlig stor grad av strømningshastigheten i de aktuelle solfangerne.

---

---

## Abstract

In this thesis, variations in efficiency between two different solar collectors have been measured. Solar collector efficiency has been measured at different levels of flow. In addition, there has been made calculations of heat gained by the solar system in the course of a day.

The effect of reduced transmission at an increasing angle of incidence, has been discussed.

Comparisons of the two models show a minor improvement in efficiency in the latest solar collector models. Comparing daily energy gain for the system show the similar result. The difference is seen most clearly when considering efficiency per  $m^2$ .

A solar heating system consists of a solar collector, a heat store and a heat distribution system. The system examined in this thesis, has water as a heat carrier medium, and a pump that circulates the water through the solar collectors. The essential elements of a solar collector are the collector plate which can transfer energy from the sun to the water, and a cover sheet. The latter's function is to prevent heat loss from the collector plate, and as such it makes the solar collectors function as a green house.

Efficiency is an indicator of how well the solar collector, eventually the entire system, manages to exploit solar energy.

In the thesis, efficiency has been analysed using a calorimetric method. Here the large storage tank holding almost 500 litres is used as a calorimeter.

An easy way of measuring efficiency is looking at the increase in temperature in the heat store, and total radiation in the course of one day.

Studies of the new solar collectors show that as much as 50% of the energy received by the solar collectors in the course of a day is useful energy.

The flow rate tells us how fast the water flows through the collector plates. The water absorbs energy from the collector plates, which are heated by the sun. In the experiments, three types of flow were chosen manually. The flow rates were between 0.85 and  $2.0 l / (min \cdot m^2)$ .

Comparing data from both models show no significant difference in efficiency by changing the flow rate. The efficiency is apparently not affected by variations of flow rate in the solar collectors.





---

# Innholdsfortegnelse

1 Innledning . . . . .	3
2 Energi . . . . .	5
2.1 Energiformer . . . . .	5
Solenergi - fornybar energi . . . . .	6
Bruk av fornybar energi . . . . .	8
3 Bakgrunnsstoff . . . . .	11
3.1 Varmetransport . . . . .	11
3.2 Direkte solenergi . . . . .	16
Solfangere . . . . .	16
Solvarmeanlegg . . . . .	18
Forskning ved solenergigruppa . . . . .	19
Beregning av innfallsvinkel . . . . .	20
3.3 Metoder for å måle effektiviteten til solfangeren . . . . .	21
Standard metode . . . . .	21
Kalorimetrisk metode . . . . .	21
4 Oppsett og metode . . . . .	27
4.1 Utvendig utstyr . . . . .	28
Solfangerne . . . . .	28
Temperatursensorerene . . . . .	32
4.2 Utstyret inne i sollabben . . . . .	34
Rør mellom varmelager og solfangere . . . . .	35
Strømningsmåler . . . . .	36
Pumpa . . . . .	36
Styringsenheten . . . . .	36
Varmelageret . . . . .	37
Dataprogrammer og oppkoblinger . . . . .	39
4.3 Metode . . . . .	40
Beregning av effektiviteten . . . . .	40
Korleksjoner . . . . .	41
Daglig energiutbytte . . . . .	43
5 Supplerende eksperimenter . . . . .	45
5.1 Solfangerens effektivitet . . . . .	45
Korleksjon for lagring av varme i absorptorplata . . . . .	46
Korleksjon for varmetap . . . . .	47
5.2 Kalibreringer . . . . .	50
5.3 Tidsforskyvning . . . . .	51
6 Effektivitetsanalysene . . . . .	53

---

6.1 Eksperimenter utført i 2002 . . . . .	53
6.2 Effektivitetsanalyser fra våren 2004 . . . . .	62
6.3 Effektivitetsanalysene - oppsummering . . . . .	69
6.4 Daglig energiutbytte . . . . .	76
7 Diskusjon og konklusjon . . . . .	77
7.1 Effektivitetsanalysene . . . . .	77
2002 modell kontra 2004 . . . . .	77
Strømningshastighet . . . . .	79
Tidligere modeller av plastsolfangere . . . . .	79
7.2 Varmekapasitet til solfangeren . . . . .	80
7.3 Varmetapeksperimenter . . . . .	81
7.4 Måling av solinnstråling . . . . .	81
7.5 Kalibrering av temperatursensorene . . . . .	82
7.6 Sluttkommentar . . . . .	83
Nomenklatur . . . . .	85
Referanser . . . . .	87
Vedlegg A I	
Eksperimenter som var utført i 2002 . . . . .	II
Eksperimenter som var utført våren 2004 . . . . .	XVII
Matlab-kommandoer som fører fram til effektivitetsgrafene . . . . .	XXV
Vedlegg B XXVII	
Kalibreringsfigurene . . . . .	XXVII
Figurer til bestemmelse av solfangerens varmekapasitet . . . . .	XXX

# 1 Innledning

Solenergi er et tema innafor fysikken som folk uten fysikkbakgrunn kan forholde seg til. Mitt ønske har vært å presentere iallfall deler av oppgaven, på en slik måte at også personer uten veldig mye fysikkunnskaper skal kunne forstå det som er skrevet. Det er noe av årsaken til at flere av referansene i de to påfølgende kapitlene ikke er vitenskapelige artikler.

Alle har vel kjent hvordan sola varmer og gir energi til kroppen en tidlig sommerdag. I Norge er det ofte kaldt, og vi trenger oppvarming av boligen selv i perioder når sola sender mye stråling til oss.

Norge er et av de få landene i verden som fortrinnsvis bruker elektrisitet til oppvarming. Dette er en energikilde med høy kvalitet som burde spares til formål som krever slik energi. Nordmenn har generelt et høyt forbruk av energi. Det skyldes nok i stor grad at elektrisitet lenge har vært svært billig.

Størstedelen av elektrisiteten vi bruker kommer fra vannkraft, men siden 1993 har vi forbrukt mer elektrisitet enn vi produserer (Rekstad, 2001). Den importerte elektrisiteten kan være produsert fra olje, kull eller kjernekraft. Utvinning og forbrenning av ikke-fornybare energikilder som kull og olje, gir miljøskadelige utslipp. Vårt høye strømforbruk kan dermed bidra til økt drivhuseffekt med global oppvarming som følge.

Vi har hatt ENØK-kontorer som skulle hjelpe folk med strømsparing i over ti år, men først da strømprisen gikk kraftig opp vinteren 2002/2003, ble forbruket av elektrisitet kraftig redusert (SSB, 2004). Det gir signal om at prisen på energi betyr mye for oss.

I EU's medlemsland har beregninger blitt gjort for å se hva energien brukes til. Disse beregningene viser at 57% av energiforbruket i et bolighus, går til oppvarming og 25% går til oppvarming av varmt vann (Weiss, 2003). Til vann- og romoppvarming vil det være energiøkonomisk gunstig å velge andre energiformer enn elektrisitet.

EU har forpliktet seg til å dekke 12,5% av sitt energiforbruk gjennom fornybare energikilder innen 2010 (Thuesen, 2003), og i april 2004 refererte Dagsavisen til en spørreundersøkelse som viste at 3 av 4 nordmenn var positive til alternativ energi. Det er positivt i forhold til å finne andre energiformer enn elektrisitet til oppvarming.

Varmt vann i radiatorer eller i rør i gulv eller vegger gir mulighet til å velge energikilde fritt. Vannbåren gulvvarme blir anbefalt av Norges Astma- og Allergiforbund ut fra et helseperspektiv (Rekstad, 2003).

Solenergi kan brukes til å produsere elektrisitet eller brukes direkte til oppvarming. For å produsere varme kan solfangere som plasseres på sørveggen eller på taket av et bolighus benyttes.

Scheer (2002) mener at det å foreta en banebrytende overgang til en økonomi basert på solenergi (direkte og indirekte), vil gjøre mer for å sikre vår felles framtid enn noen annen form for økonomisk utvikling har gjort siden den industrielle revolusjonen

Ønsket om å finne alternative former for energi til oppvarming og vissheten om at folk er svært opptatt av pris, har vært motivasjon for denne oppgaven.

Solenergigruppa ved Fysisk Institutt har i flere år forsket både teoretisk og praktisk på utforming og effektivitet av solfangere. En stor del av arbeidet de seneste åra har dreid seg om utvikling av plastsolfangere i samarbeid med General Electric Plastics. Plastsolfangere har mange fordeler framfor tradisjonelle solfangere av metall.

En grundig innføring i utforming, bruk og effektivitet til solfangere, finnes i Duffie og Beckman (1991) og i Morrison (2001).

Målet med denne oppgaven har vært å vurdere ulike måter å forbedre effektiviteten til solfangere basert på polymermaterialer. Effektiviteten til to forskjellige solfangere har blitt målt og evaluert ved hjelp av praktiske eksperimenter. Disse solfangerne er helt nye og har en noe endret utforming enn de tidligere solfangertypene. De to forskjellige solfangermodellene har blitt sammenligna, i tillegg har eksperimenter blitt utført ved forskjellige strømningshastigheter for å se en mulig effekt av dette.

For å beregne effektiviteten har en kalorimetrisk metode blitt benytta. Bruk av denne metoden har vært en viktig del av oppgaven, da det har vist seg vanskelig å beregne effektiviteten til den nye solfangermodellen med standard metoder. (Rekstad, muntlig meddelelse)

## 2 Energi

### -kilder, transport og bruk

#### 2.1 Energiformer

Endring i et systems indre energi kan ofte beskrives med varme som kommer inn i systemet fra omgivelsene ( $\Delta Q$ ), og arbeidet som systemet utfører på omgivelsene ( $W$ ). Med  $U$  som systemets energi, får vi:

$$\Delta U = \Delta Q - W \quad (2.1)$$

Holter et al. (1998) beskriver energiens evne til å utføre arbeid, med begrepene eksergi og anergi. Eksergi er den delen som kan omvandles til en annen energiform. Det er altså den delen av energien vi kan utnytte. Anergi representerer ingen energiressurs fordi den ikke kan brukes til å utføre arbeid. Eksergiinnholdet i energien vil variere med omgivelsene, og energien vil vanligvis bestå av en andel av både eksergi og anergi.

Energi er ofte tilgjengelig i form av termisk energi, og det er mulig å beregne andelen eksergi av termisk energi ved en bestemt temperatur. Carnotvirkningsgraden ( $\eta_C$ ) er utledet for en ideell varmekraftmaskin som arbeider mellom et varmt og et kaldt reservoar.

I den ideelle varmekraftmaskinen endres ikke den indre energien. Slik at med  $\Delta Q_1$  som energi overført fra det varme reservoaret, og  $\Delta Q_2$  som energi avgitt til det kalde reservoaret, blir det tilgjengelige arbeidet

$$W = Q_1 - Q_2. \quad (2.2)$$

Hvis et system får tilført en varmemengde  $\Delta Q$ , ved en absolutt temperatur  $T$ , gir dette en entropiøkning på

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (2.3)$$

For den ideelle varmekraftmaskinen er det ingen endring i entropien, dermed er

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (2.4)$$

Ved å kombinere disse ligningene kan vi få Carnotvirkningsgraden som forteller hvor stor andel av energien som er eksergi:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.5)$$

$T_1$  er temperaturen på det varme området som overfører varme til det kalde området ( $T_2$ ).

Dette er den øverste grensen for virkelige varmekraftmaskiner.

### 2.1.1 Solenergi - fornybar energi

Solenergi til jorda er nesten ren eksergi. Hvis vi regner med en temperatur på jordoverflaten på 300K, får vi Carnotvirkningsgraden,

$$\eta_C = 1 - \frac{300}{6000} = 0,95$$

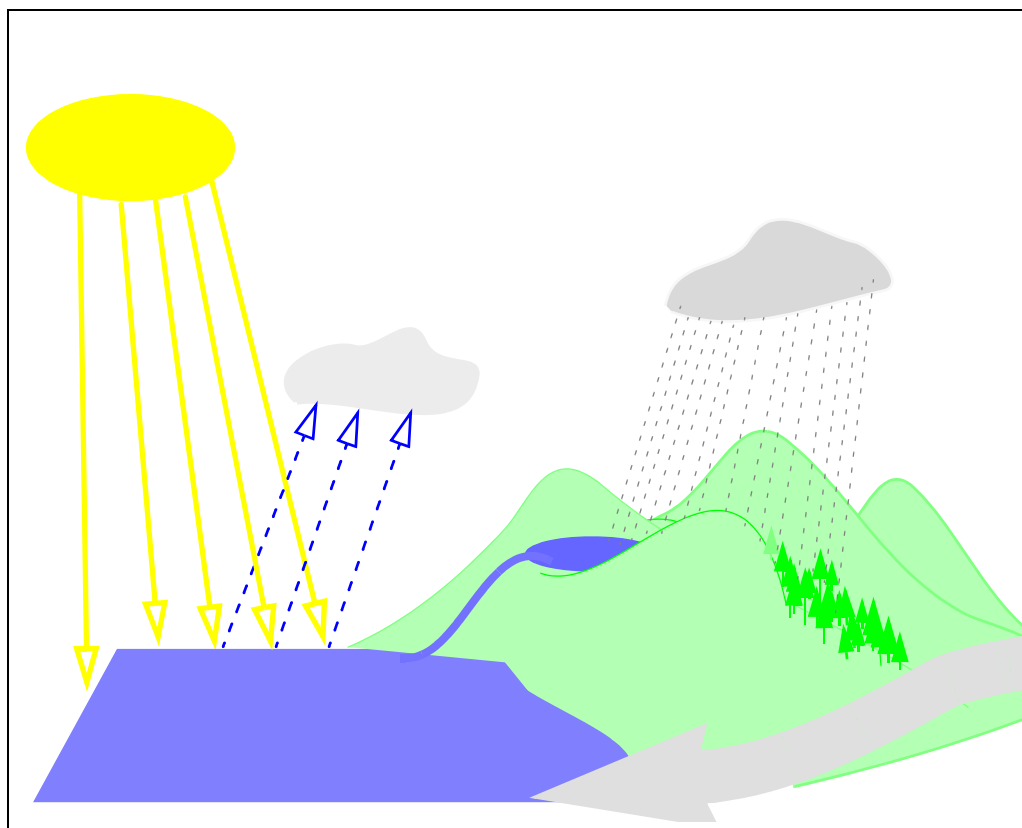
I fusjonsprosessene på sola forbrukes det 610 millioner tonn hydrogen hvert sekund. Selv med dette enorme forbruket er det estimert at sola vil brenne i fem milliarder år til. (Thuesen, 2003)

Det finnes nok solenergi til enhver tid, til å dekke menneskenes behov. En utfordring er at den ofte er tilgjengelig på steder og til tider behovet er minst. Selv i Norge som ligger langt mot nord, er den årlige energimengden som treffer vårt areal omlag 1700 ganger større enn det årlige innenlandske energiforbruket. (Salvesen, 2001)

Energien som stammer fra sola, kan deles inn i direkte eller indirekte solenergi.

Direkte solenergi kan brukes til å produsere strøm eller brukes direkte til oppvarming, dette står det mer om i avsnitt (3.2).

## Indirekte solenergi



**Figur 2.1** Energi lagret i form av biomasse, potensiell energi i vann og kinetisk energi i form av vind, har sitt opphav i solenergi.

Begrepet solenergi brukes ofte i vid forstand om vindenergi, biomasse og vannkraft også i tillegg til direkte solenergi. Vind oppstår når sola varmer opp jordas overflate. Plantene er avhengig av fotoner fra sola for å utføre den genuine fotosyntesen som kan skape biomasse. Biomasse kan brukes direkte til brensel som trevirke, organisk avfall og lignende, eller være omformet til alkoholer og hydrokarboner. Biomasse er den viktigste energiresursen for mange utviklingsland. Biomasse som pellets kan kombineres med sol som energikilder for å varme opp vann til romvarme eller varmt tappevann.

Det er varmen fra sola som fordamper vann som siden kan avsettes høyere enn havoverflaten og dermed skape potensiell energi. I moderne turbiner kan det oppnås virkningsgrader helt opp til 0,95. Vannkraftressursene i Norge er anslått til å utgjøre 1% av den globale vannkraftressursen. (Holter, et al., 1998)

De fleste fornybare energikildene har altså sin opprinnelse i solenergi og kan kalles indirekte solenergi.

## 2.1.2 Bruk av fornybar energi

I følge den 3. hovedrapporten til FN's klimapanel, er den vesentligste årsaken til global oppvarming, menneskelig aktivitet. Den viktigste kilden er utslipp av CO<sub>2</sub> fra forbrenning av kull, gass og olje (Salvesen, 2001).

Ved overgang fra fossile til fornybare energikilder, kan disse utslippene reduseres betraktelig. Weiss et al. (2004) har beregnet at de termiske solfangeranleggene som var installert i 2001, sparte verden for  $18,2 \cdot 10^6$  tonn CO<sub>2</sub>-utslipp det året.

### **Energibruk i Norge**

Norge er et av de få landene i verden som bruker elektrisitet til oppvarming. Det kommer først og fremst av at vi har hatt god tilgang til billig vannkraft. At elektrisitet har vært så billig, er nok hovedårsaken til at Norge har et svært høyt energiforbruk per innbygger.

I Norge hadde vi i 2003 en liten nedgang i det totale energiforbruket (0,4% i forhold til 2002). Ser vi på forbruket av elektrisitet var det 4,5% lavere enn i 2002. Forbruket var på 103,4 TWh, og det er det laveste forbruket av elektrisitet siden 1996. Den vinteren var prisen på elektrisitet opptil 100% høyere enn gjennomsnittet de siste årene (SSB, 2004).

### **Vannkraft**

Vannkraft har vært og er fortsatt svært viktig for bosetting, industri og elektrisitetsforbruk i Norge. Utvikling av tettsteder og industri var tidligere svært avhengig av mulighetene for å bygge vannkraftverk på stedet.

Vannkraften er fornybar og gir ingen skadelige utslipp, allikevel er det problemer knytta til vårt energibruk:

Helt siden slutten av 1960-årene har det vært omfattende debatt og protester omkring utbygging av de store vassdragene. Dette toppet seg med Alta-saken i 1979. Utbygginga av Alta-Kautokeino-vassdraget skapte voldsomme demonstrasjoner hvor både lokalbefolkninga (samer og nordmenn) og naturvernere fra resten av landet deltok. (Natur- og miljøleksikon, 1991)

I dag har vi et større forbruk av elektrisitet enn det vi produserer selv i Norge. Det fører til at vi importerer elektrisitet produsert fra kull, olje og kjernekraftverk. Elektrisiteten vi bruker er dermed ikke like miljøvennlig lenger.

### **Økning i bruk av fornybar energi**

Vi har sett fra vinteren 2003, at det er mulig å redusere energiforbruket. Et eksempel fra et naboland viser økning i bruk av fornybare energikilder.

I Danmark sank det faktiske energiforbruket med 1,6% i 2002. Selv om nettoeksporten av elektrisitet økte det året, ble CO<sub>2</sub>-utslippene redusert med 1,9%. At



CO<sup>2</sup>-utslippene kunne synke mer enn nedgangen i energiforbruk, skyldes overgang fra olje og kull til fornybar energi.

I 2002 økte produksjonen av fornybar energi med 7,8%. Det medførte at 12,5% av energiforbruket i 2002 kom fra fornybare energikilder. (Energistyrelsen, 2003)

Mye av denne økningen kommer fra vindenergi, men en del kommer også fra direkte solenergi.

På den danske øya Ærø ligger et solvarmeanlegg på 9000m<sup>2</sup>. Det dekker 14-15% av oppvarmingsbehovet til de 1350 husstandene i byen Marstal hvor anlegget ligger. (Traasdahl, 2002)



## 3 Bakgrunnsstoff

### 3.1 Varmetransport

Hovedkildene til dette kapitlet er Holter et al.(1998), Duffie og Beckman (1991) og Morrison (2001).

#### Varmeledning

Hvis det er forskjellig temperatur ( $T$ ) på områder som er i kontakt med hverandre, vil det overføres energi fra det varmeste til det kaldeste området. Vi får en varmestrøm ( $\dot{Q}$ ) gjennom et areal ( $A$ ):

$$\dot{Q} = A\dot{q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

hvor  $\dot{q}$  er varmestrømtettheten,  $\lambda$  er varmeledningsevnen til materialet og  $x$  er tykkelsen på materialet.

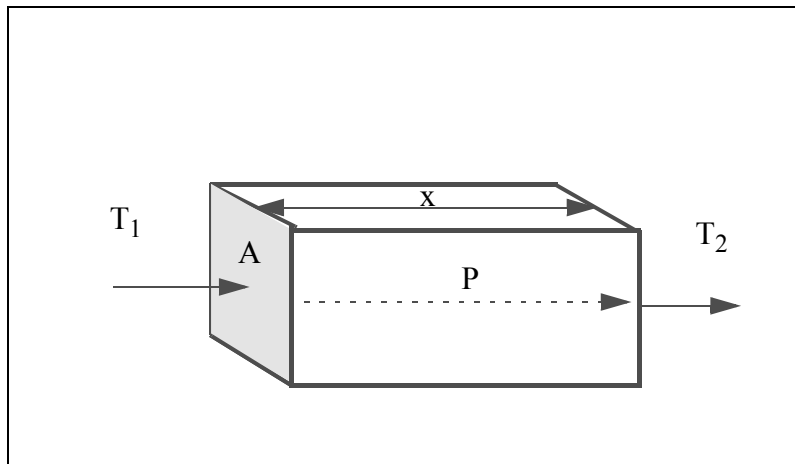
Varmestrømmen uttrykkes ofte v.h.a. varmegjennomgangskoeffisienten

$$U = \frac{\lambda}{x} \quad (3.2)$$

I solfangerterminologi brukes ofte  $P$  som symbol for varmestrømmen, og varmestrømmen gjennom et materiale med flateareal  $A$ , kan dermed uttrykkes som

$$P = UA(T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

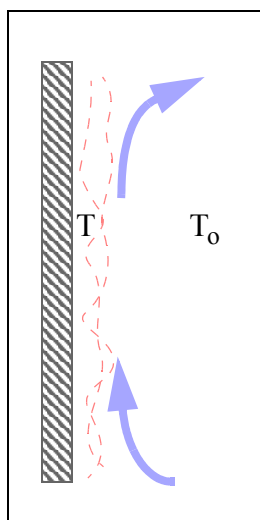
Strømmen går fra et område med høy temperatur ( $T_1$ ) til et område med lavere temperatur ( $T_2$ ), slik som skissert i figur (3.1).



**Figur 3.1** Varmestrøm ( $P$ ) gjennom et materiale, fra en side med høy temperatur  $T_1$  til en side med lavere temperatur  $T_2$ .

### Konveksjon

Inntil en vegg eller en solfanger som blir varmet opp av sola, vil temperaturen på lufta øke. Når temperaturen på lufta øker, vil tettheten ( $\rho$ ) minke.



**Figur 3.2** Konveksjon

Hvis temperaturen blir høy nok, vil kald luft strømme til området. Dette er skissert i figur (3.2).

Varmetapet ( $P$ ) på grunn av konveksjon, kan tilnærmes lineært ved

$$P = hA(T - T_0).$$

$h$  er konveksjonskoeffisienten som varierer med vindhastigheten,  $T_0$  er temperaturen på omgivelsene og  $T$  er temperaturen på veggen eller solfangeren som blir varmet opp.

## Stråling

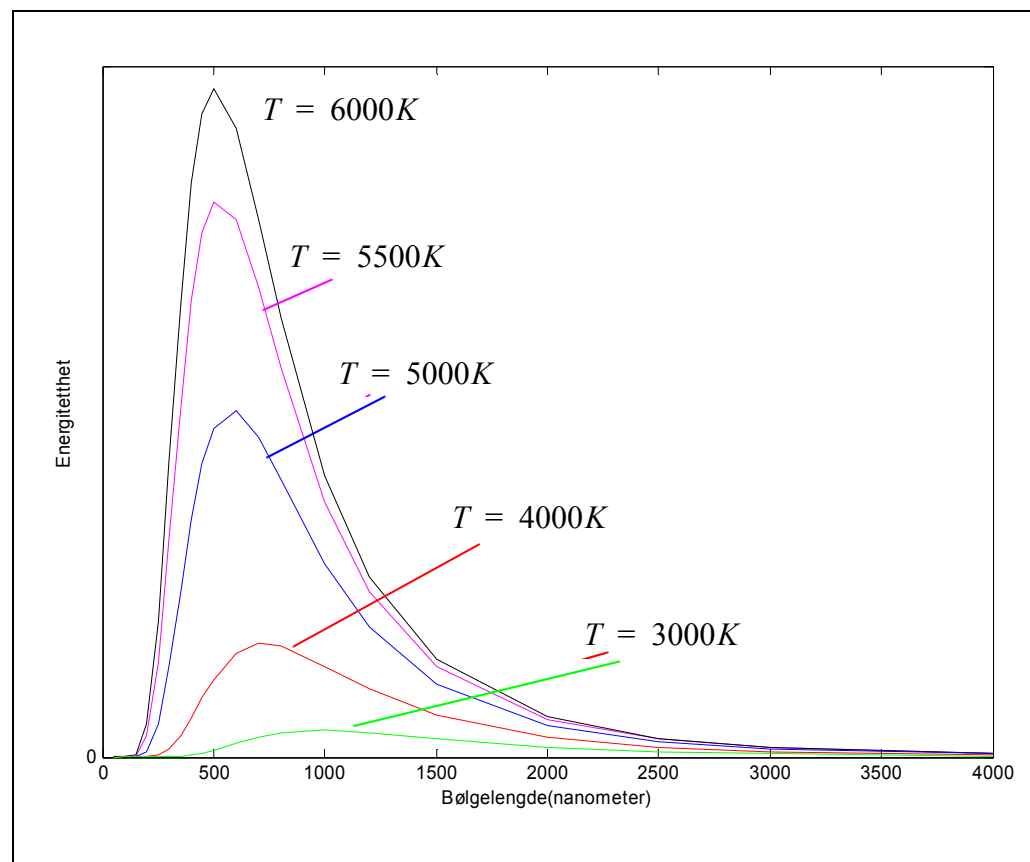
Alle legemer med en viss temperatur, stråler. Den utsendte effekten fra et sort legeme er

$$P = \sigma_B AT^4 \quad (3.4)$$

hvor  $\sigma_B$  er Stefan-Bolzmanskonstanten,  $A$  er arealet og  $T$  er temperaturen på legemets overflate.

Spektralfordelinga og mengden utstrålt energi, er avhengig av temperaturen på legemet. Et legeme med høy overflatetemperatur, vil sende ut stråling med høyere frekvens (kortere bølgelengde ( $\lambda$ )) enn et med lavere temperatur. Det er grunnen til at sola sender ut den høyeste andelen av energien i området for synlig lys, med et maksimum rundt  $500\text{nm}$ , mens en solfanger sender ut mest varme-stråling i området  $20\text{-}30\mu\text{m}$ .

Det varmeste legemet vil også sende ut mer energi totalt, da den totale utstrålinga vokser proporsjonalt med  $T^4$ .



**Figur 3.3** Figuren illustrerer hvordan den totale energimengden øker ved økende temperatur på legemet. Det er også mulig å se at maksimal utstråling finnes ved kortere bølgelengder når temperaturen på legemets overflate øker.

Spektralfordelinga ( $E_{\lambda b}$ ) av stråling fra et sort legeme, er gitt ved Planck's lov:

$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (3.5)$$

$h$  er Planck's konstant,  $k$  er Boltzmann-konstanten og  $c$  er lyshastigheten.

I figur (3.3) er ( $E_{\lambda b}$ ) plottet som funksjon av bølgelengden ( $\lambda$ ) for legemer med forskjellig overflatetemperatur.

### Diffus og rettet stråling

I strålingsteori kan det være fordelaktig å dele opp den innkommende strålinga i diffus og rettet stråling. De rettede strålene kommer direkte fra sola. De diffuse strålene har blitt spredt en eller flere ganger. Strålen har på sin vei fra sola til for eksempel en solfanger, truffet partikler eller molekyler i lufta, eller blitt reflektert fra bakken eller et annet legeme. (Thomas og Stamnes, 1999)

Perez et al. (2001) oppgir at følgende betingelse alltid gjelder for en skråstilt flate:

$$E_{gn} = E_{dn} + E_{rn} + E_s \cos \theta \quad (3.6)$$

$E_{gn}$  er den totale innfallende strålingsintensiteten på en vilkårlig flate,  $E_{dn}$  er den diffuse,  $E_{rn}$  er den bakkereflekterte og  $E_s$  er den direkte innfallende strålinga.  $\theta$  er innfallsvinkelen mellom strålenes retning og normalen til den aktuelle plata.

Zweibel (1990) oppgir at på helt skyfrie dager er 10% av sollyset diffust. Dette gjelder midt på dagen, men andelen er større om morgenen etter soloppgang og før solnedgang om kvelden. I den nordlige delen av Europa er andelen diffus stråling nesten 60% på årsbasis.

Målinger gjort i Anchorage som ligger på 61,2° nord i Alaska og målinger gjort ved NLH på Ås, viser en andel diffus stråling på 15 til 20 prosent på klarværsdager.

(Hansen og Grimenes, 2003)

(Bath og Renne, 1994)

Størstedelen av den diffuse strålinga har bølgelengder mellom 300nm og 550nm. (Perez et al., 2001)

### Emmisivitet

Overflaten til legemet er avgjørende for hvor stor utstrålinga er. Emmisiviteten ( $\epsilon$ ) forteller hvor mye et legeme utstråler i forhold til hvor mye et sort legeme ville strålt ved samme temperatur.

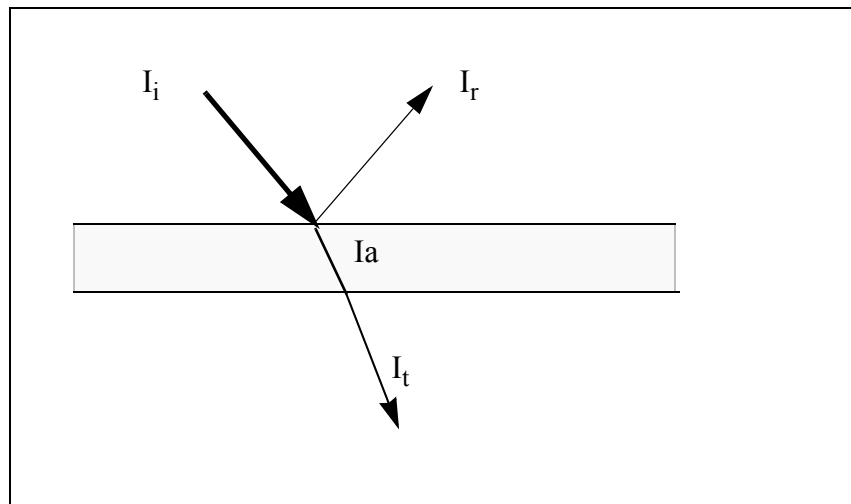
### Absorpsjon

Absorptans ( $\alpha$ ) er den brøkdelen av innfallende stråling som blir absorbert. Overflaten til legemet er avgjørende også for hvor mye stråling som blir absorbert.

### Transmisjon og refleksjon

I analyser av solfangere, er transmisjon en viktig faktor. Forskjellige dekkplater vil ha forskjellig transmisjon, og det er avgjørende for hvor mye av strålinga som når absorptorplata.

En del av den innkommende solstrålinga vil reflekteres. Hvor stor denne andelen er varierer med innfallsvinkel og materialvalg. Den andelen som ikke reflekteres, vil enten absorberes i eller transmitteres gjennom materialet. Dette er skissert i figur (3.4).



**Figur 3.4** Av den innkommende strålen vil en del reflekteres ( $I_r$ ) en del vil absorberes ( $I_a$ ) og resten vil transmitteres ( $I_t$ ).

### Total energitransport

Den totale energitransporten, for eksempel fra en solfanger eller fra et varmelager, vil bestå av stråling, konveksjon og ledning.

Varmetapskoeffisienten  $U$ , som ofte er oppgitt for et materiale, inneholder som oftest alle tre tapskildene.

## 3.2 Direkte solenergi

### **Produksjon av elektrisitet**

For å produsere elektrisitet er det mulig å bruke solfangere som oppnår veldig høy temperatur på det varmebærende mediet. Varmen kan brukes til å drive en dampturbin som produserer strøm.

For å produsere strøm direkte, brukes fotovoltaiske celler, solceller. I solcellene brukes et halvledermateriale som er tilsatt andre atomer med flere eller færre elektroner i det ytterste skallet. Se for eksempel Zweibel (1990) for nærmere beskrivelse av solceller, eller Kittel og Kroemer (2000) for beskrivelse av halvledere generelt.

### **Termisk solenergi**

Termisk solenergi kan brukes til passiv og aktiv oppvarming. Ved passiv solvarme benyttes den innstrålte solenergien til oppvarming (eller kjøling) ved hjelp av bygningskonstruksjonen.

Ved bruk av solenergi til aktiv oppvarming, brukes ofte et solvarmeanlegg som inneholder solfangere, et varmelager og et varmfordelingssystem.

### 3.2.1 Solfangere

I 1908 begynte Carnegie Steel Company i USA, å produsere solfangere for kommersielt bruk. Disse ble brukt til oppvarming av varmt tappevann.

I mange land er bruken av solfangere nå svært utbredt. I Japan får 5-6 millioner husholdninger som tilsvarer 11%, sitt varme tappevann fra solfangere. I USA er solfangere mye brukt til oppvarming av svømmebasseng, og i Israel får 83% av husstandene varmt tappevann fra solfangere. (Salvesen, 2001 og Hille, 2003) Ved utgangen av 2001 var det installert  $0,61 m^2$  med solvarmeanlegg per innbygger. Det tilsvarende tallet for Hellas er  $0,3 m^2$  per innbygger.

På verdensbasis var det ved utgangen av 2001 registrert omkring  $10^8 m^2$  installert solfangerareal. Norge har en liten andel av dette arealet, i 2001 ble det registrert knapt  $8000 m^2$  vannbaserte solvarmeanlegg totalt. De andre skandinaviske landene har betraktelig høyere andel av tak og fasader dekket med solfangere. I Danmark var det installert 35.000 solvarmeanlegg som tilsvarer nesten  $300.000 m^2$ , og i Sverige var ca.  $230.000 m^2$  tak og veggflater dekket med vannbaserte solvarmeanlegg. (Weiss et al., 2004)



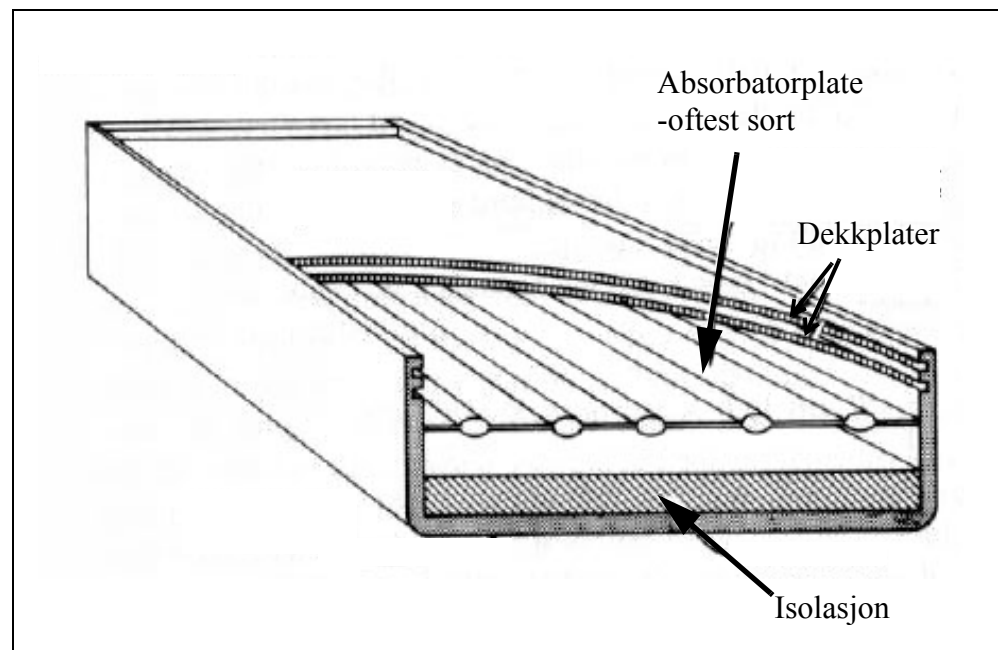
### Plane solfangere

De enkleste solfangerne består av en absorlatorplate i plast eller metall, uten dekkglass over. Disse vil normalt ha en høy effektivitet ved lave temperaturforskjeller (mellom solfangeren og omgivelsene). De blir i stor grad brukt til oppvarming av svømmebasseng hvor man ikke trenger så høy temperatur på vannet. I USA og Canada var det i 2001 installert udekkete solfangere i plast til oppvarming av svømmebasseng på et areal som var over 23 millioner  $m^2$ . (Weiss, 2004)

Ved stor temperaturforskjell mellom solfangeren og omgivelsene, synker effektiviteten raskt på grunn av varmetap.

Tapene består i varmeledning gjennom isolasjonen, konveksjon og infrarød stråling. Varmetapet på grunn av stråling er størst. Det vil derfor være effektivt å hindre varmestrålinga mest mulig. Ved å bruke dekkplate på solfangeren oppnås en form for drivhuseffekt, og den langbølgete utstrålinga blir sterkt redusert.

De fleste flatplatesolfangere har en absorlatorplate med ett eller to dekkglass over, som i figur (3.5). Absorbatorplata absorberer stråling, konverterer stråling til varme og hindrer varmetap. Dekkplata transmitterer sollys og hindrer varmetap.



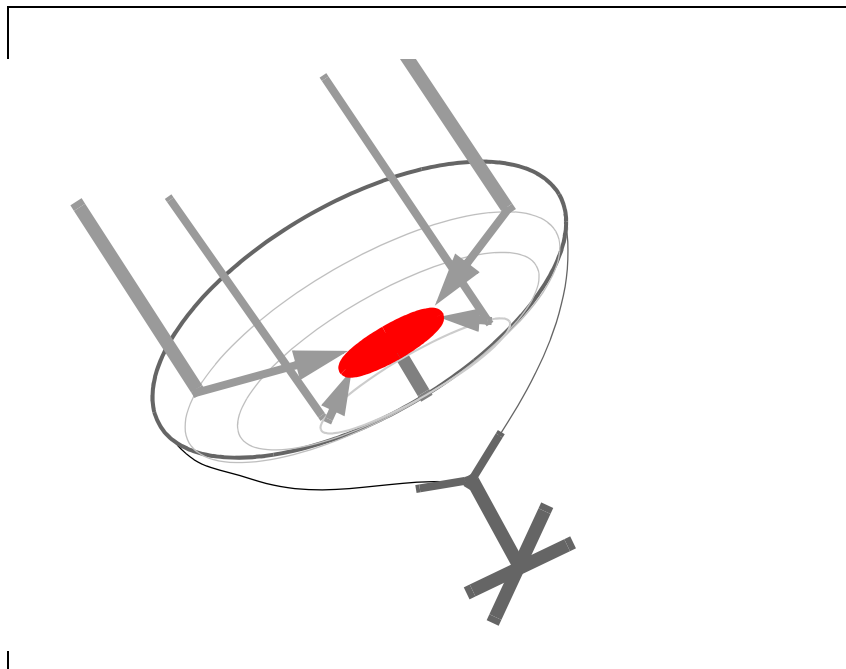
**Figur 3.5** En flatplatesolfanger har ofte en sort absorlatorplate med metallrør som vannet kan strømme gjennom. For å hindre varmetap, festes en eller to dekkplater over absorlatorplata. Dekkplatene er ofte av glass med høy transmisjon. Absorbator- og dekkplater monteres i rammer og isoleres på undersiden og som oftest mot kantene.

For å absorbere mer av den kortbølgete strålinga, men hindre langbølget varmestråling ut, kan absorlatorflatas overflate gjøres selektiv. Det kan typisk være et metalloksidlag som legges på overflata.

### Fokuserende solfangere

Fokuserende systemer er enten sylindriske eller parabolske. I sylindriske systemer benyttes en åpen sylinder med et rør med sirkulerende væske inni. På innsiden av sylinderen er det speil som reflekterer solstrålinga til den fokale linja hvor røret med væske er plassert. Når væsken blir varm nok, kan den brukes til å drive en varmekraftmaskin.

Parabolske speil kan dreies om to akser. Parallelt innfallende lys reflekteres inn mot fokus (eller brennpunkt) slik som skissert i figur (3.6).



**Figur 3.6** I parabolske speil blir strålene reflektert fra speilet inn mot et brennpunkt. Temperaturen i et slikt brennpunkt kan komme opp i flere tusen grader Celsius hvis både utforminga og solinnstrålinga er optimal.

## 3.2.2 Solvarmeanlegg

### Høytemperatur

De første solvarmeanleggene i Norge varmet opp vann til radiatorer. Med slike punktkilder, trengs det en temperatur på vannet som er 20 til 30°C over ønsket romtemperatur.

Hvis varme avgis fra punktkilder som radiatorer, vil konveksjon stå for en stor andel av varmeavgivelsen. Dette kan gi en uheldig temperatursjiktning med den varmeste lufta oppunder taket. (Gundersen, 2002)

### Lavtemperatur

Hvis en isteden har oppvarming over en større flate, trenger ikke vannet ha så høy temperatur.

Ved å bruke lavt temperaturnivå på turvannet som skal brukes til romoppvarming, trengs det større varmeflater. Store flater gir en høyere andel av strålevarme, noe som gir et godt inneklima.

Ved bruk av store flater som gulv eller vegger, kan det oppvarmede vannet ha temperaturer som er et par grader over ønsket temperatur i rommet.

Effektiviteten av solfangere synker når temperaturforskjellen mellom lageret og omgivelsene øker. Det er derfor en stor fordel å kunne operere i et lavere temperaturområde. (Henden, 2000)

### 3.2.3 Forskning ved solenergigruppa

Solfangere i plast har hovedsaklig blitt brukt til oppvarming av svømmebasseng. Forskning på plastsolfangere har stort sett vært teoretisk. Bruk av plastmaterialer til solfangere har en rekke fordeler. Plast vil ikke forvitne i like stor grad som metall, plast er lettere, og det kan produseres på en enkel måte.

Cristofari har vist at vekten av solfangeren kan reduseres med over 50% i forhold til tradisjonelle metallsolfangere, ved bruk av polymermaterialer. (Cristofari, et al., 2002)

Solenergigruppa har i flere år hatt samarbeid med General Electric Plastics om å utvikle solfangere i plast med dekkplater også av plast. Utfordringa har vært å finne en plasttype som vil beholde fasong og egenskaper ved sterk oppvarming siden temperaturen kan bli veldig høy.

Utviklinga har dreiet seg om solfangere som brukes til oppvarming av vann til tappevann og romvarme. Et av forskningsfeltene har vært utvikling av kombianlegg med gulvvarme.

I siste halvdel av 90-tallet ble det utviklet plastsolfangere bestående av Noryl-plater med keramisk kuler (leca-kuler) inni. Effektiviteten av disse har bl.a. blitt beregna av Imenes (1999).

I 2002 ble det utvikla nye absorptorplater hvor kanalene hadde mindre diameter enn tidligere typer. Disse absorptorplatene ble tydelig deformerte etter bruk. De nye platene som ble tatt i bruk våren 2004, gjennomgikk derfor på forhånd en avspenningsprosess med sakte nedkjøling etter oppvarming.

### Sollabben

Sør for fysikkbygningen på Blindern ble det i 1997 bygget et lite standard trehus på  $20m^2$ . På tak og vegger kan det plasseres solceller, solfangere og annet måleutstyr. Disse kan kobles til lagertanker og måleutstyr på innsida. Sollabben

som den populært kalles, brukes blant annet til å teste effektiviteten til solfangere via den kalorimetriske metoden.

### 3.2.4 Beregning av innfallsvinkel.

For å finne effektiviteten av en solfanger ved hjelp av den kalorimetriske metoden, er det nødvendig å ta hensyn til om innstrålinga kommer rett på platene. Gjør den ikke det må det korrigeres for innfallsvinkelen ( $\theta$ ). Dette er vinkelen mellom innkommende direkte stråling og normalen til solfangeren, og den kan finnes ved

$$\begin{aligned}\cos\theta &= \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega\end{aligned}\quad (3.7)$$

For å finne  $\theta$  må man kjenne til

- breddegrad,  $\varphi$ ,
- planets helning,  $\beta$ , i forhold til horisontalplanet.
- planets asimutvinkel,  $\gamma$ , i forhold til sør. En plassering rett mot sør er 0, øst er positiv og vest negativ.
- deklinasjonen,  $\delta$ , som varierer i løpet av året. Med  $n$  som dagnummeret, finnes deklinasjonen

$$\delta \approx 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right)\quad (3.8)$$

- timevinkelen,  $\omega$ , som er definert som 0 ved middag soltid. Den er  $+15^\circ$  for hver time før, og  $-15^\circ$  for hver time etter 12:00 soltid. Klokketid 12:00 soltid er den tiden på dagen sola står rett i sør. I Oslo varierer det med årstiden fra 12:01 til 12:32 klokketid om vinteren, og fra 13:02 til 13:23 sommertid.

Se Holter et al. (1998) eller Duffie og Beckman (1991) for mer utfyllende beskrivelse av vinklene.

## 3.3 Metoder for å måle effektiviteten til solfangeren

### 3.3.1 Standard metode

Det finnes flere internasjonale standardmetoder for å måle effektiviteten av solfangere. Den vanligste metoden går ut på å lage et kontrollerbart oppsett og måle 3 parametere, nemlig strømningshastighet ( $\dot{m}$ ), utgangstemperatur ( $T_u$ ) og solinnstråling ( $I$ ).

Arealet av solfangeren ( $A$ ) og varmekapasiteten ( $C$ ) til vannet er kjent. Ved å holde innløpstemperaturen konstant, kan den nyttige effekten ( $P_{nyttig}$ ) bestemmes:

$$P_{nyttig} = \dot{m}C\Delta T_{(ut-inn)} \quad (3.9)$$

$\Delta T_{(ut-inn)}$  er temperaturforskjellen mellom vannet som går inn i solfangeren og vannet som kommer ut av solfangeren.

Det stilles en rekke krav til testene. Innstrålinga måles eller lages kunstig, men har et minstekrav til antall  $W/m^2$  i måleperioden. I tillegg skal det være stasjonære forhold, og innfallsvinkelen skal være  $0^\circ$ .

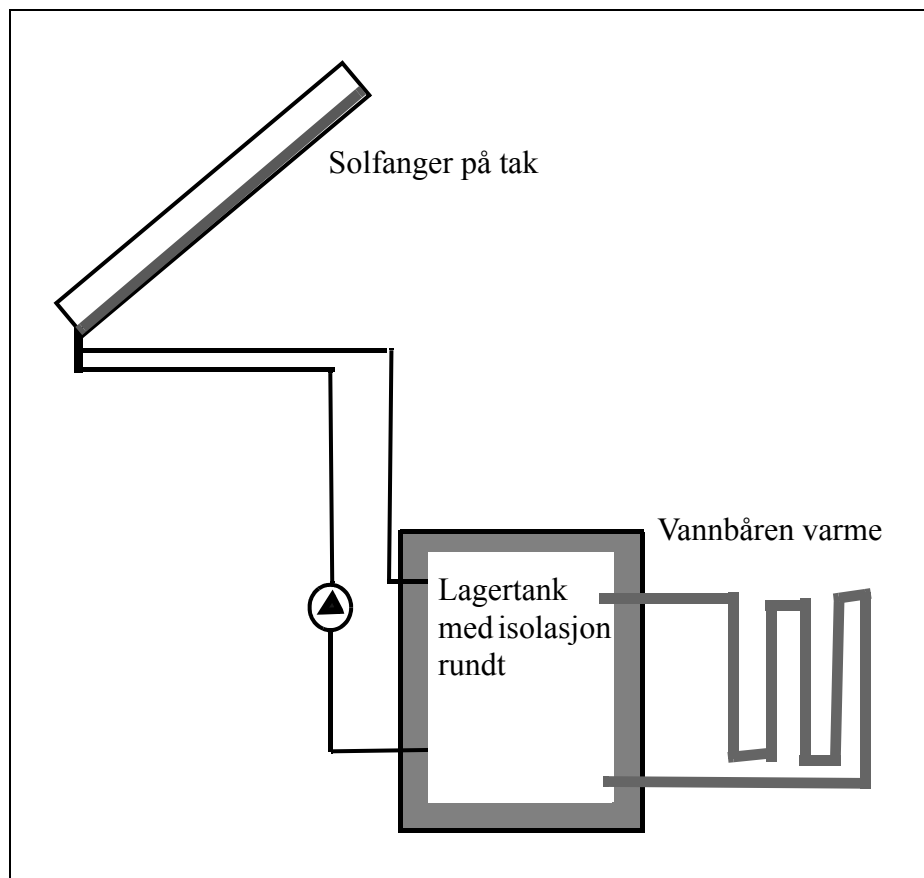
Effektiviteten til solfangeren ( $\eta$ ) er forholdet mellom nyttig og innstrålt effekt:

$$\eta = \frac{\dot{m}C\Delta T_{(ut-inn)}}{IA} \quad (3.10)$$

Energigruppa på Blindern baserer seg på en kalorimetrisk metode for å måle effektiviteten, og har videreutviklet denne metoden. Effektiviteten av hele systemet blir målt med tanken som et kalorimeter, og den kalles derfor kalorimetrisk metode. Ved hjelp av korreksjoner kan solfangerens effektiviteten finnes.

### 3.3.2 Kalorimetrisk metode

I den kalorimetriske metoden brukes et stort og godt isolert varmelager. Vann sirkulerer gjennom solfangerne og ned til varmelageret. Se figur (3.7). Energi blir overført fra solfangerne til det sirkulerende vannet og dette vil medføre at temperaturen i lagertanken øker. Ved kjennskap til lagerets varmekapasitet kan den lagrede energimengden beregnes.



**Figur 3.7** Solfangeranlegg med solfanger, lagertank og vannbåren varme (varmefordelingssystem).

Energiøkningen i lageret må sammenlignes med den innkomne energimengden for å finne effektiviteten til systemet. Under tilnærmet stasjonære forhold over en tidsperiode,  $\Delta t$  vil energimengden inn på solfangerne være gitt av

$$\int_{\Delta t} AI = A \langle I \rangle \Delta t \quad (3.11)$$

Likhetstegnet gjelder når innstrålinga måles med faste intervaller.  $A$  er den delen av solfangerarealet som mottar innstråling  $I$ , målt i  $W/m^2$ .

I standardmetoden beregnes det en momentan effektivitet. I den kalorimetriske metoden beregnes temperaturøkningen i en stor lagertank og for å se en reell økning må beregningene gjøres over et tidsintervall av en viss varighet. Intervalllengden bestemmes ut fra kriterier som jevn solinnstråling og lineær temperaturøkning i tanken. Innstrålinga blir registrert med jevne intervaller.

Med den kalorimetriske metoden er systemeffektiviten ( $\eta_{system}$ ), gitt ved:

$$\eta_{system} = \frac{\Delta Q_{lager}}{\Delta Q_{inn}} = \frac{C_{lager} \Delta T_{lager}}{AI \Delta t} \quad (3.12)$$

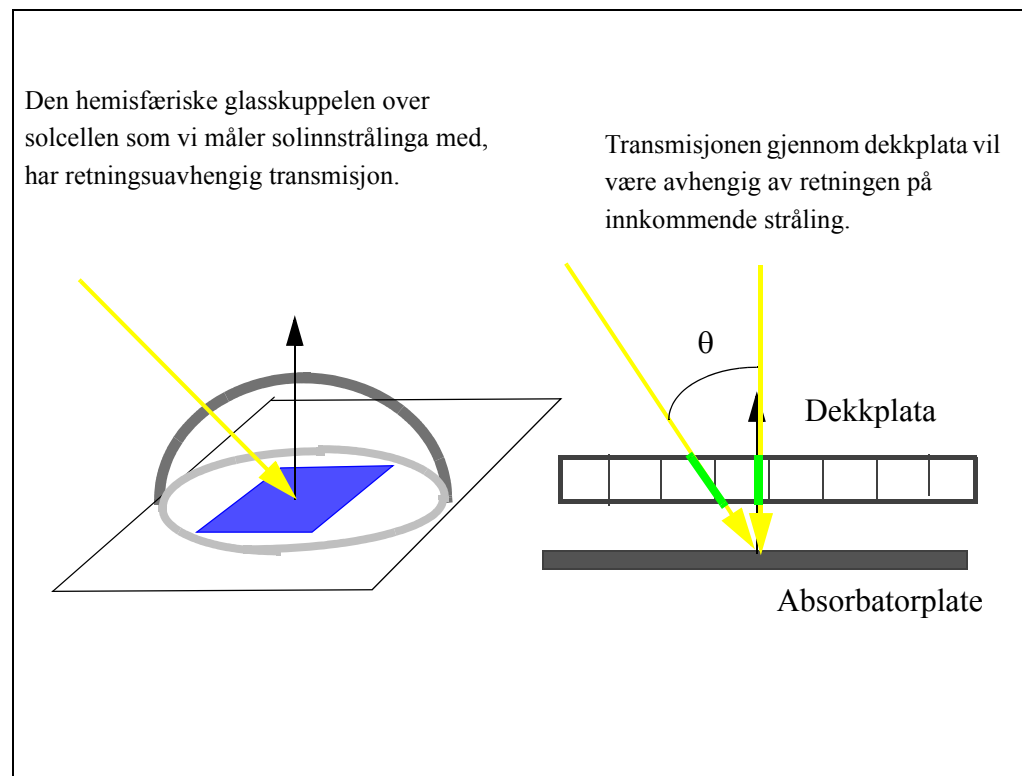
$\Delta Q_{lager}$  er energiendringa i lageret i tidsperioden  $\Delta t$  og  $\Delta Q_{inn}$  er den energien som blir tilført solfangerne i perioden. Energiendringa i lageret finnes ved å se på temperaturøkningen i lageret ( $\Delta T_{lager}$ ) og varmekapasiteten til hele lageret ( $C_{lager}$ ).

For å finne effektiviteten til solfangeren må det korrigeres for den energien som blir tilført eller går tapt på vei til lagertanken, og for energi som lagres i solfangeren. I tillegg må det korrigeres for at innstrålinga som treffer absorptorplata er avhengig av innfallsvinkelen slik som forklart under.

### Korreksjon for innfallsvinkelen

Transmisjonen gjennom dekkplata er vinkelavhengig, men transmisjonen gjennom kuppelen på solarimeteret skal ikke være det. Det innebærer at transmisjonen som blir målt på solarimeteret er høyere enn den reelle innstrålinga på absorptorplatene for  $\theta > 0^\circ$ .

Dette er illustrert i figur (3.8) under.



**Figur 3.8** Transmisjonen gjennom dekkplata er avhengig av retningen på strålinga.

Den korrigert innstrålinga ( $I_k$ ) er gitt ved  $I_k = I_m \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)}$

hvor ( $I_m$ ) er den målte innstrålinga.

$\tau(0)$  er transmisjonen vinkelrett på dekkplata. Hvordan transmisjonen ( $\tau$ ) gjennom dekkplata varierer med ( $\theta$ ), kan bestemmes eksperimentelt. Dette er gjort for en Lexanplate på  $6\text{ mm}$ , og beskrevet hos Henden (2000) og Imenes (1999).

Innfallsvinkelen ( $\theta$ ) kan beregnes for hvert enkelt analysepunkt etter ligning (3.7) på side 20.

### Solfangerens varmekapasitet

Noe av energien fra sola, vil gå med til å varme opp solfangeren. For å finne ut hvor mye energi som blir lagret her, kan man se på temperaturøkningen på solfangeren ( $T_{sf}$ ) i samme periode som innstrålinga måles. Når man vet varmekapasiteten til solfangeren ( $C_{sf}$ ), kan energiendringa ( $\Delta Q_{sf}$ ) beregnes:

$$\Delta Q_{sf} = C_{sf} \Delta T_{sf} \quad (3.13)$$

### Energitap fra tanken og rørene

Når anlegget er i drift, vil varme tapes fra lagertanken og rørene så lenge vannet er varmere enn omgivelsene.

Det kan gjøres målinger for å se hvor mye temperaturen synker i tanken når systemet ikke er i drift. Varmetapet fra rørene, kan måles, men ofte gjøres teoretiske beregninger.

Er varmetapskoeffisientene til materialene i rørene kjent, kan tapet beregnes ved

$$\Delta P = U_{eff} 2\pi r L \Delta T_{(l-i)}.$$

$2\pi r L$  er arealet av rørenes overflate og  $\Delta T_{(l-i)}$  er temperaturforskjellen mellom vannet i rørene (målt i lageret) og omgivelsene (inne i sollabben).

Den effektive varmetapskoeffisienten  $U_{eff}$  finnes ved

$$\frac{1}{U_{eff}} = \frac{1}{U_{roer}} + \frac{1}{U_{isolasjon}}$$



### Pumpeeffekt

Det er montert ei elektrisk pumpe som pumper vannet opp til solfangerne. Denne pumpa vil avgi varme til vannet når den jobber, slik at vannet får en ekstra oppvarming. Beregninger har vist at pumpa avgir omtrent all effekt til oppvarming av vannet, og denne energiendringa må trekkes fra energiøkningen i tanken.

### Korreksjoner for bruk av lagertemperatur langs x-aksen.

Det er vanlig å plote effektiviteten mot  $\frac{\Delta T}{I}$  hvor  $\Delta T = T_{sf} - T_{ute}$ .

Dette er en tilnærming hvor man ser bort fra høyere ordens ledd i  $\Delta T$ .

I den kalorimetriske metode måles temperaturen på lageret. Denne temperaturen vil være litt lavere enn temperaturen på solfangeren, noe som må korrigeres for.. Som variabel langs x-aksen, brukes derfor

$$\frac{(T_{lager} + \delta T) - T_{ute}}{I} \quad (3.14)$$

hvor  $\delta T$  tilsvarer halvparten av temperaturøkningen på solfangeren i perioden.

$\delta T$  kan bestemmes ved å se på den målte effekten inn i forhold til hva som blir transportert bort av vannet:

$$\delta T = \frac{1}{2} \frac{P}{\dot{m} c_{vann}} = \frac{1}{2} \frac{(C_{lager} \Delta T_{lager}) / \Delta t}{\dot{m}_{vann} c_{vann}}$$



## 4 Oppsett og metode

### Beskrivelse av oppsettet

Alle forsøkene er utført på energigruppas eget bygg som står på parkeringsplassen rett sør for Fysikkbygningen.

Bygget vil senere bli referert til som sollabben. Det ligger på 59,9<sup>de</sup> breddegrad og er orientert slik at den sørlige langsiden har en asimutvinkel på 18° vest. Taket har en helning på 32°.

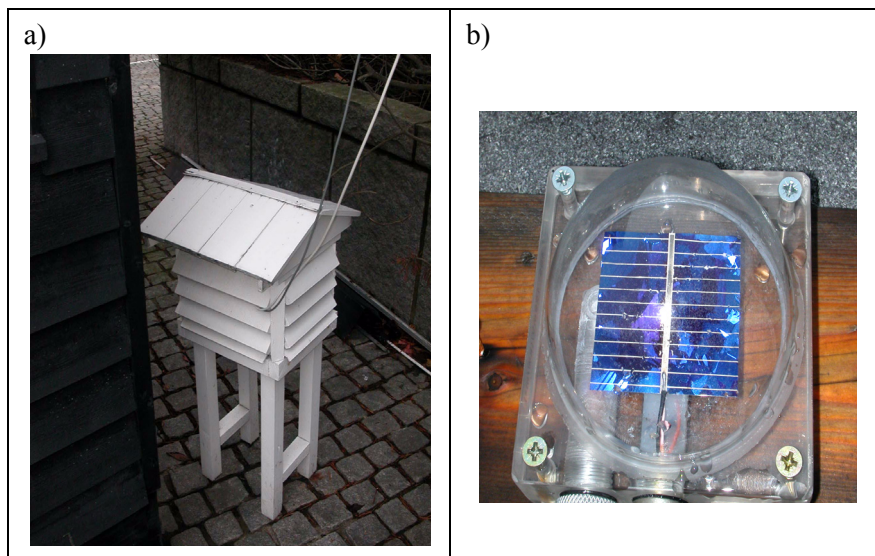


**Figur 4.1** Bilde av sollabben (sydsiden).

## 4.1 Utvendig utstyr

På taket mot sør er det montert fem solfangerer. Mellom absorbatorplata og dekkplata på den ene solfangeren, er det plassert en temperatursensor.

Det er plassert et solarimeter på taket i samme plan som solfangerne. På baksiden av sollabben er det plassert en sensor i et lite hus med god luftgjennomstrømning og lysreflekterende vegger, for å måle utetemperaturen.



**Figur 4.2** a) Huset hvor sensoren for måling av utetemperaturen er plassert.  
b) Solarimeteret

### 4.1.1 Solfangerne

Solfangerne som ble brukt til målingene sommeren 2002 og våren 2004, består av svarte absorbatorplater med dekkplater av plast. Bak absorbatorplatene er det 5 cm med mineralull. Det er også isolasjon ved endene av platene.

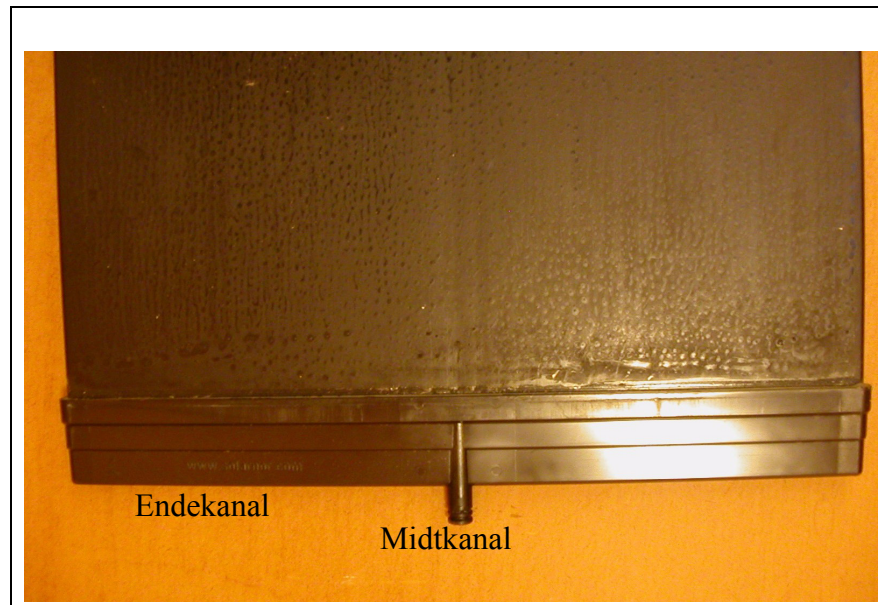
Det ble brukt 5 solfangerer, og de ligger i aluminiumsrammer som er koblet sammen. Se figur (4.1) på side 27.

Det vanlige bruksområde for denne typen solfangerer, er 20° - 60°C.

#### Absorbatorplaten

Platene som jeg har brukt i målingene, ble utviklet i samarbeid med General Electric Plastics og er produsert som et ledd i prosjektet; EUREKA project E!2286-EASP, 2002. Produktnavnet er NORYL<sup>®</sup> resin. De er laget av modifisert

polyfenylenoxid (PPO), med innhold av polystyren (PS). Platene er 10 mm tykke, 570 mm brede. De lages i forskjellige standardlengder. De som ble brukt i eksperimenter sommeren 2002, var 2,24 m lange med endekanaler og veide 4755 g. Hver endekanal er 0,6 m. Absorbatorplata er vist i figur (4.3) under.



**Figur 4.3** Her vises absorbatorplata med endekanalen hvor vannet blir fordelt utover hele plata, og midtkanalene hvor vannet renner tilbake fra toppen av absorbatorplata.



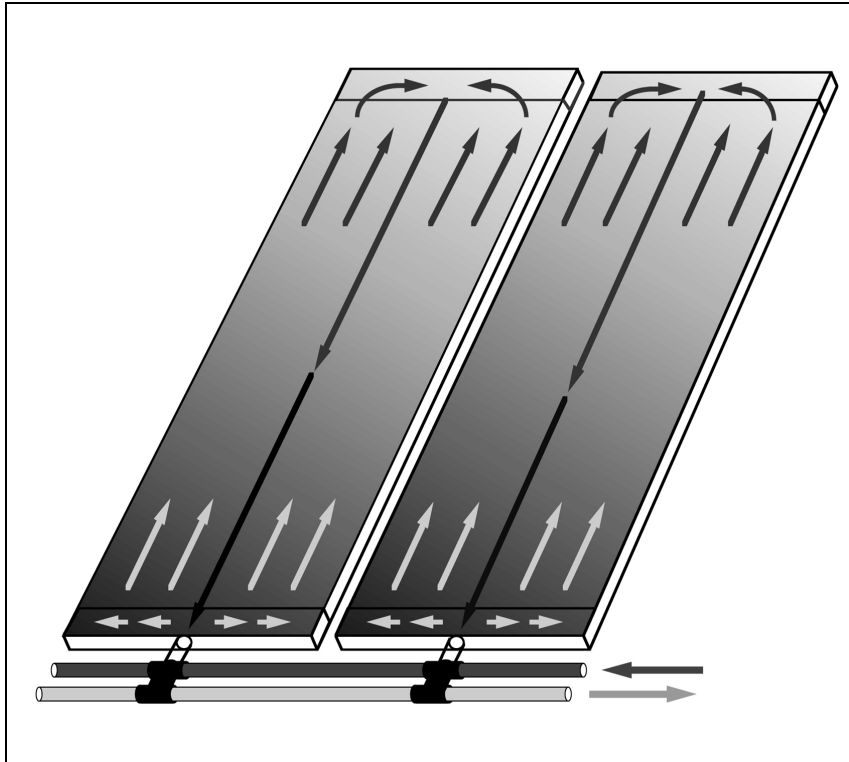
**Figur 4.4** Her vises kobberrørene med koblingen som fører vannet til og fra solfangerne. Over absorbatorplata (som er skjult på bildet) sees dekkplata.

Vannet strømmer til og fra hver enkelt solfanger gjennom kobberrør. Fra kobber-røret føres vannet opp til endekanalene og fordeles langs hele absorbatorplata. Absorbatorplatene har en 3-vegget struktur, med kanaler i den øverste delen av

plata som vannet strømmer gjennom. Platene som var i bruk i 2002, hadde kanaler formet som halvsirkler med diameter på  $4,5\text{ mm}$ . Disse er vist i figur (4.6) på side 31.

Platene som ble brukt våren 2004 hadde kanaler med rektangulære tverrsnitt.

I figur (4.5) er det skissert hvordan vannet blir pumpet opp gjennom kanalene i absorptorplata, renner ned gjennom midtkanalen og videre ut i det nederste kobberrøret.



**Figur 4.5** Skisse av vannstrømmen i absorptorplata. (Kilde: Meir, 2003)

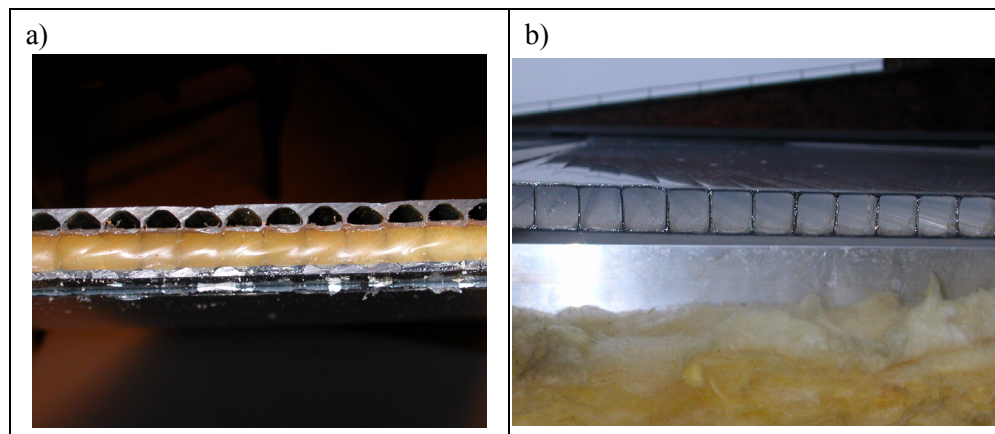
Våren 2004 ble det brukt absorptorplater som var  $1,71\text{ m}$  med endeplater. Solfangerne dekket dermed omtrent  $1,5\text{ m}^2$  mer av taket i 2002 enn i 2004.

Med lysareal menes normalt det arealet av dekkplata som lyset kan treffe. Solfangerne som vi har gjort eksperimenter med, har aluminiumsplater som dekker en større del av absorptorplata enn dekkplata. Det arealet som strålene kan treffe er derfor mindre enn det totale arealet. Endekanalene er dekket av den samme reflekterende plata. I tabell (4 – 1) har jeg notert arealet som ble brukt i analysene sommeren 2002 og våren 2004.



**Tabell 4 – 1** Areal av 5 solfangere som ble brukt til beregning av effektivitet (bestrålt areal), strømningshastighet (strømningsareal) og varmekapasitet (totalt areal).

	2002	2004
bestrålt areal	5,68 m <sup>2</sup>	4,23 m <sup>2</sup>
strømningsareal	5,89 m <sup>2</sup>	4,46 m <sup>2</sup>
totalt areal	6,05 m <sup>2</sup>	4,62 m <sup>2</sup>



**Figur 4.6** kamrene i absorbatorplata      b) Dekkplata.

### Dekkplaten

Produktnavnet til dekkplata er Lexan<sup>®</sup> Thermoclear<sup>®</sup> Multiwall polycarbonate sheet, 2RS. Dekkplatene er av ekstrudert polykarbonat (PC). De er 10 mm tykke og har et dobbeltvegget lag med rektangulære strukturer. Transmisjonen av solstråler gjennom dekkplata er avhengig av innfallsvinkelen. Når vinkelen mellom innkommende stråling og dekkplatas normal blir større enn 45°, vil andelen lys som transmitteres synke merkbart. Se avsnitt “Korreksjon for innfallsvinkelen” på side 23.

I tabell (4 – 2) er det samlet data om de forskjellige elementene i solfangeren. Solfangerne produseres for kommersielt bruk av Solarnor AS. De leveres da i tilpassede lengder med absorbatorplate og dekkplate i rammer av aluminium. Våren 2004 ble solfangerne montert på sollabben av Vero therma AS som er et datterselskap av Solarnor AS, men sommeren 2002 ble de montert av folk i solenergi-gruppa.

Tabell 4 – 2 Data til elementene i solfangerne

	Absorbtorplata	Dekkplata	Mineralull
Ledningsevne ( $\lambda$ )	$0,22 \left[ \frac{W}{mK} \right]$		$0,036 \left[ \frac{W}{mK} \right]$
Varmetap ( $U$ )		$3,5 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	
Tetthet ( $\rho$ )	$3,63 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$1,3 \left[ \frac{g}{(cm)^3} \right]$	$21 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
Transmisjon ( $\tau$ )		0,80±0,024 (synlig lys) 0,85 (solspekter)	
Absorbans ( $\alpha$ )	0,945 (sollys)		
Emmisivitet ( $\varepsilon$ )	0,79 (termisk)		

(Meir og Rekstad, 2003)

(SOLARNOR, 2003)

(General Electric, 1998)

### Solarimeter

Solinnstrålinga ble målt med et solarimeter av type HDX 485 fra SolData. Den har en hemisfærisk glasskuppel over seg slik at transmisjonen er uavhengig av innfallsvinkelen. Se figur (4.2) på side 28.

Solarimeteret leverer en spenning (i  $mV$ ) fra en fotovoltaisk silisiumcelle. Det er kalibrert av SolData, september 1997 til å gi  $129mV$  ved innstråling på  $1kW/m^2$ .

Apparatet ble også kalibrert mot et Kipp & Zonen instrument sommeren 2002 og 2003 av Katharina Brnic.

### 4.1.2 Temperatursensorerene

Temperaturene ble målt med Pt-100 sensorer hvor motstanden i sensorene endrer seg ved temperaturendring. Dette blir registrert og omregna til °C i Virtual Bench/Lab View. De har varierende kabellengde, men alle er kalibrert med full kabellengde.



I 2002 ble det på kanal 8 til 13 brukt Pt-100 sensorer, kjøpt våren 2002 (ELFA art.nr:76-808-87). På kanalene 2 - 7 ble det brukt Pt-100, M-FC sensorer laget av Bjørnar Sandnes (ELFA art.nr:76-689-32).

Sensorene som ble brukt våren 2004 var også Pt-100 sensorer. (ELFA, 2002)

Kanalnummerne viser til plassering på loggekortet. I tabellen under er plasseringa av sensorene angitt for alle kanalene.

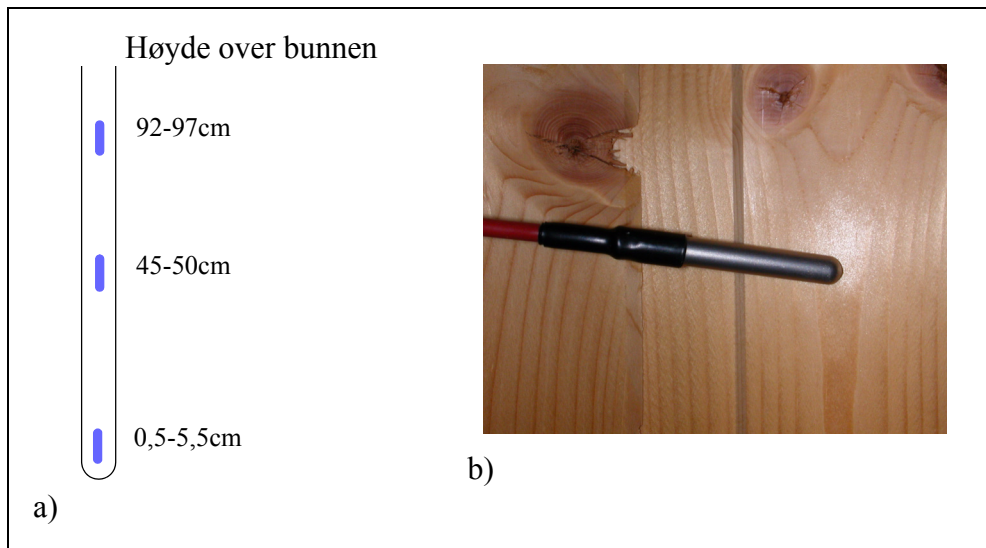
**Tabell 4 – 3 Plassering av sensorene**

Kanal	Plassering	
2	Tankhjørne (topp)	Ikke brukt i analysene
3	Tankhjørne (midten)	Ikke brukt i analysene
4	Tankhjørne (bunn)	Ikke brukt i analysene
5	Ute i sola	Ikke brukt i analysene
6	Ute i eget "hus"	Se figur (4.2) på side 28
7	På veggen inne i sollabben	Se figur (4.7) på side 34
8	Toppen av tanken	Se figur (4.7) på side 34
9	Midten av tanken	Se figur (4.7) på side 34
10	I bunnen av tanken	Se figur (4.7) på side 34
11	På solfangeren	Se figur (4.1) på side 27 <sup>i</sup>
12	Utløp fra solfangeren	Ikke brukt i beregninger <sup>ii</sup>
13	Innløpet til solfangeren	Ikke brukt i beregninger
14		Ikke i bruk
15	Solarimeteret	Se figur (4.1) på side 27 (Ikke temperatursensor)

- i. Våren 2004 ble denne sensoren montert høyere opp på solfangeren.
- ii. Verdiene fra 2002 er unøyaktige pga. dårlig plassering. Våren 2004 ble de montert inni rørene for å gi mer korrekte verdier.

Motstanden i sensorene vil kunne endre seg over tid, og det vil i tillegg være en viss motstand i kablen. Det er derfor viktig å kalibrere sensorene i forkant av eksperimentene.

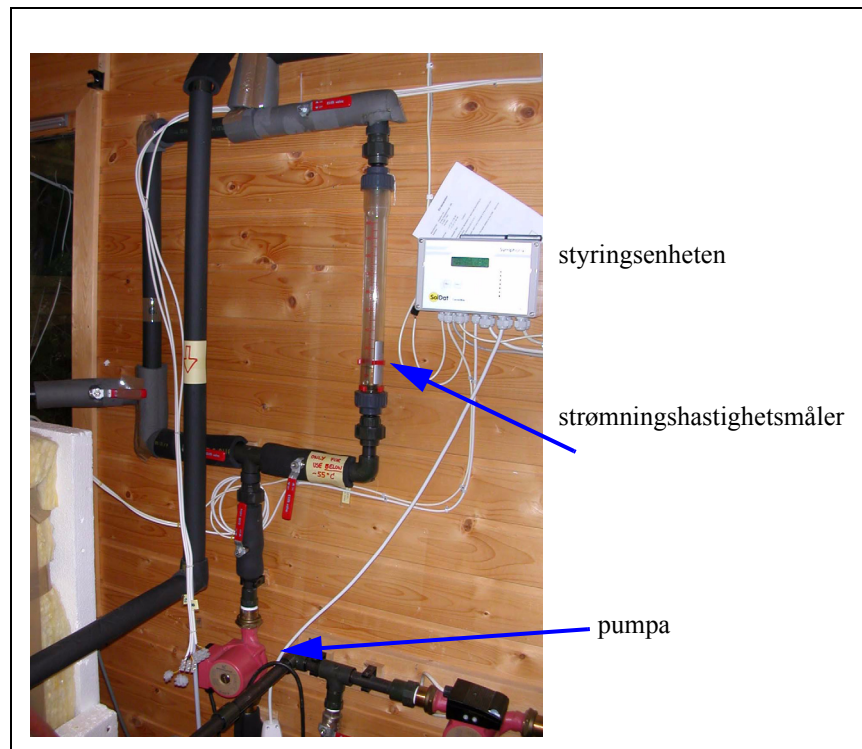
Alle sensorene ble kalibrert med full kabellengde mai 2002. I mars 2004 ble sensorene som skulle brukes på kanal 7 til 10, kalibrert på nytt. Se avsnitt "5.2 Kalibreringer" på side 50.



**Figur 4.7** a) Plassering av sensorene i tanken (målt fra bunnen av tanken og opp til sensoren). b) Pt-100 sensor (på veggen inne).

## 4.2 Utstyret inne i sollabben

Inne på sollabben står aluminiumstanken som ble brukt som lagertank i eksperimentene. Se figur (4.9) på side 37. Til tanken er det koblet inn- og utløpsrør og et rør hvor overskuddsvann kan renne ut. Utløpsrøret henter vann helt nederst i tanken. Midt i tanken står en glasskolbe med tre temperatursensorer inni. Figur (4.7) viser plassering av disse sensorene. Det var i perioder plassert en glasskolbe med tre sensorer i et hjørne av tanken, men data fra disse ble ikke brukt i beregningene.



**Figur 4.8** Rørene til og fra tanken

Ved drift av solvarmeanlegget blir vannet pumpet opp til solfangerne. Pumpa kan slås på manuelt, eller via en styringsenhet. Vannet kan ledes gjennom en glasskolbe hvor strømningshastigheten kan avleses. Fra solfangerne renner vannet tilbake øverst i tanken. Det går også rør fra tanken til et gulvvarmeanlegg, men disse rørene har vært lukket i eksperimentperioden.

#### 4.2.1 Rør mellom varmelager og solfangere

Inne i hytta er rørene i klorinert polyvinylklorid (C-PVC) med glavaflex omkring. Rørene fra og til tanken har betegnelsen C-PVC, PN25, med typenavn TUB HT 253. Rørene har en ytre diameter på  $25\text{ mm}$  og veggtykkelsen er  $2,8\text{ mm}$ .

Isolasjonen rundt C-PVC rørene er glavaflex med betegnelsen Glavaflex<sup>®</sup>F Tubes, serie 13. Den har en insidediameter på  $28\text{ mm}$  og veggtykkelse på  $13\text{--}17\text{ mm}$ .

(GEFLEX AS, 2002)

Rørstrekket fra innsiden til utsiden er av gummi isolert med glavaflex. Mellom absorptorplatene er det kobberør som er dekket med mineralull.

### 4.2.2 Strømningsmåler

Det er brukt et All-Plastic-Flowmeter, type D10A1287 fra Fischer & Porter. Den kan måle strømningshastigheter på 200 til 1600 l/h, men tåler kun temperaturer mellom -10 og 60°C.

Strømningshastigheten stilles inn manuelt, og ved drift av anlegget kan den variere med  $\pm 20 \text{ l/h}$ .

(Fischer & Porter, 1998)

### 4.2.3 Pumpa

Pumpa som brukes til å pumpe vannet opp til solfangeren har tekniske spesifikasjoner som vist i tabellen under. Den har stått på tredje nivå og dermed ytt en effekt på omtrent 90 W.

**Tabell 4 – 4**

Grundfos type	230V		$\frac{I(A)}{0,20}$	$\frac{P(W)}{45}$
OPS 25-60 B 180				
P/N 59736500	50Hz		0,30	65
PC:9719	2,5 $\mu$ F		0,40	90

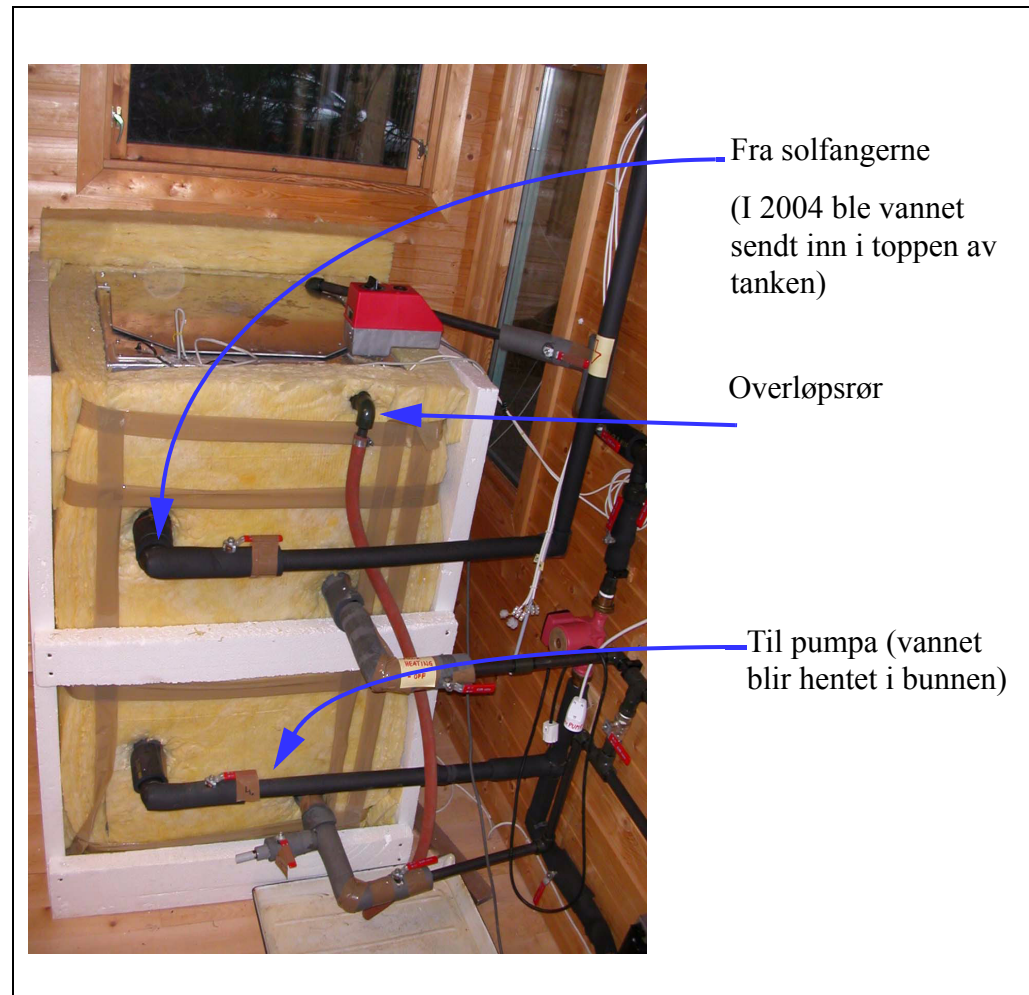
### 4.2.4 Styringsenheten

Styringssystemet er levert av Solarnor. Den består bl.a. av en styringsenhet (Comfort versjon Combi), temperaturføler for solfanger (PT1000-S) og temperaturføler for varmelageret (NTC-L). Den kan brukes for å slå av eller på solfangeranlegget og/eller gulvvarmeanlegget.

Styringssystemet ble brukt til å slå anlegget av eller på avhengig av temperaturforskjellen mellom vannet i tanken og solfangeren. Ved å sette styreren på auto, slo anlegget seg på når  $\Delta T_{\text{sol-f-lager}} \geq 4^\circ K$ , og det stoppet når  $\Delta T_{\text{sol-f-lager}} \leq 1^\circ K$ .

Styringssystemet ble også brukt når anlegget skulle gå kontinuerlig. Styreren ble da satt på Level 1 som var innstilt slik at pumpa skulle gå kontinuerlig. (Solarnor, 2000)

Våren 2004 ble det installert et nytt styringssystem. Dette ble også levert av Solarnor, og har de samme funksjonene som Comfort versjon Combi. Typenavnet er SOLARNOR gulv- og solvarmestyrer, modell mc:symphony. (SolarNor, 1999)



Figur 4.9 Bilde av tanken med inn- og utløpsrør.

#### 4.2.5 Varmelageret

Varmelageret består av en aluminiumstank kledd med mineralull og isopor. Den har et innsiddevolum på  $0,469m^3$ . Den utvendige høyden er  $1,255m$ , mens den største innvendige høyden for vannsøylen er  $1,210m$ . Tykkelsen av tankveggene er  $3,0mm$ .

Rundt hele tanken er det  $100mm$  mineralull. Utenfor dette er det på tre av sidene  $50mm$  isopor. I det ene hjørnet av tanken står det en hul sylinder av aluminium. Den har en diameter på  $0,13m$ . I motsatt hjørne er et elektrisk varmeelement på

30 kW. Varmeelementet består av en rørsøyfe som går nesten ned til bunnen av tanken. Røret har en diameter på ca. 0,01 m. Dette varmeelementet var ikke i bruk under eksperimentene.

Varmelageret fylles med vann og brukes som et kalorimeter. Ved beregning av energiøkningen i kalorimeteret, må det tas hensyn til at en del varme vil lagres i tanken og rørene. For å beregne varmekapasiteten til hele kalorimeteret har jeg brukt data gitt i tabell (4 – 5).

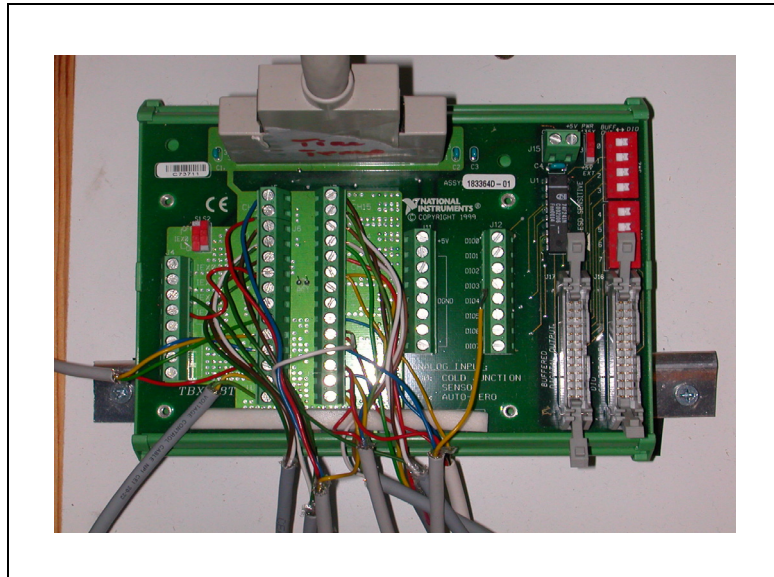
Det gir en varmekapasitet for hele lageret med unntak av vannet, på

$$C_{\text{tank, roer, isolasjon}} = (55 \pm 6) \frac{\text{kJ}}{\text{K}}.$$

**Tabell 4 – 5** I tabellen vises den oppgitte spesifikke varmekapasiteten for materialene, det målte volumet eller den oppgitte massen, og beregnet varmekapasitet.

	$c_p$ , spesifikk varmekapasitet $\left[\frac{J}{kgK}\right]$	Volum $[m^3]$	Varmekapasitet $\left[\frac{kJ}{K}\right]$
<b>Vann</b>	4178-4192	0,469	
<b>Aluminium</b>	913	0,012	$29,7 \pm 2,5$
<b>Al. (sylinder)</b>		0,002	$5,0 \pm 0,9$
<b>Mineralull</b>	670	0,363	$12,2 \pm 2,4$
<b>Stål (rørsøyfe)</b>	510	0,0002	$0,78 \pm 0,1$
<b>Glavaflex</b>	1000	0,02	$1,6 \pm 0,5$
		<b>Masse</b> [kg]	
<b>Jern (pumpa)</b>	480	2,6	$1,2 \pm 0,2$
<b>C-PVC</b>	1214	3,3	$4,02 \pm 0,06$

## 4.2.6 Dataprogrammer og oppkoblinger



**Figur 4.10** Koblingskortet

Alle sensorene var koblet til en koblingsboks fra National Instruments (NI TBX-68T). Fra koblingsboksen gikk en skjermet kabel inn til et loggekort/DAQ (data acquisition card), som var installert i PCI-bus i datamaskinen. Loggerkortet (NI 4351) er fra 1998 og gir en usikkerhet på  $\pm 0,12^{\circ}\text{C}$  når den brukes med RTD sensorer.

I 2002 ble signalene registrert og behandlet med 5 - 6 sekunders mellomrom av Virtual Bench. I denne perioden hadde vi problemer med loggingen, og en god del av måledataene fra sommeren 2002 gikk tapt grunnet problemene. I 2003 ble Virtual Bench byttet ut med Lab View fra National Instruments. Signalene fra sensorene ble derfor registrert og lagret i Lab View i 2004.

Lab View-programmet som registrerer signalene og omgjør dem til ønsket måleenhet, er laget av Bjørnar Sandnes og modifisert av Katharina Brnic. Kalibreringene ble lagt direkte inn i Lab View-programmet i 2004. (Sandnes et al., 2004)

Excel ble brukt til å hente fram (og kalibrere) loggedataene fra Virtual Bench og Lab View. Jeg brukte også excel til å beregne gjennomsnitt av solinnstråling og temperatur.

Solinnstråling og temperaturutvikling for de aktuelle dagene ble plottet i Origin. I de fleste beregningene ble Matlab 6.5 for Windows brukt. Matlab ble brukt til alle effektivitetsanalysene.

Teksten er skrevet i Framemaker 7.0 for Windows.

## 4.3 Metode

De første målingene ble gjort fra juni til september 2002. I forkant av målingene ble alle temperatursensorene og solarimeteret kalibrert som beskrevet i avsnitt 5.2 "Kalibreringer" på side 50.

Forsøk ble satt i gang først og fremst på dager med god værmelding. Enkelte dager ble tanken tømt tidlig om morgenen for å starte med så lav temperatur i tanken som mulig. Andre dager ble anlegget stoppet om natten, for så å bli startet med en allerede høy temperatur. Enkelte døgn fikk anlegget gå kontinuerlig for å få data til beregning av varmetap fra tank og rør.

Anlegget ble slått på manuelt eller automatisk, og strømningshastigheten ble satt manuelt til 300 - 500 eller 700 l/h. Det tilsvarte 1,0 - 1,67 og 2,33 l/(min · panel) og 0,85 - 1,4 og 2,0 l/(min · m<sup>2</sup>).

### Våren 2004

I 2004 ble det gjort målinger daglig fra de nye solfangerne ble montert, t.o.m. 3. juni da vi hadde hatt flere dager med jevn innstråling. Strømningshastigheten ble i denne perioden satt til 280, 300 eller 400 l/h.

### 4.3.1 Beregning av effektiviteten

Temperatur- og solstrålingsdataene ble plottet i Origin for å finne dager som kunne brukes til effektivitetsberegninger.

Data til effektivitetsanalyse ble tatt fra dager med jevn solinnstråling. Det er i utgangspunktet valgt en times stabiliseringstid i forkant av analysene. Kun tidsrom hvor temperaturen i tanken økte jevnt er tatt med. Punkter hvor innfallsvinkelen mellom normalen til solfangeren og solinnstrålinga er større enn 45° er ikke tatt med i de korrigerede effektivitetsberegningene av solfangeren.

Temperaturen ute, inne og i tanken ble midlet over et tidsintervall på 15 minutter. Temperaturøkningen i tanken ble beregnet over det samme tidsrommet.

Verdiene for varmekapasiteten til vann ble valgt slik at de samsvarte med temperaturen i tanken for hvert tidsintervall. Massen av vannet ble funnet ut fra temperaturen på vannet i tanken ved oppstart av anlegget.

$$m_{\text{vann}} = 0,469 \text{ m}^3 \cdot \rho_{\text{vann}}(T)$$

hvor  $\rho_{\text{vann}}(T)$  er den temperaturavhengige tettheten.

Det er en tidsforskyvning mellom innstråling på solfangere og temperaturøkning i tanken. Hvor stor denne tidsforskyvningen er, har jeg beregnet i avsnitt 5.3 "Tidsforskyvning" på side 51. Tidsintervallet for solinnstrålingsdata i effektivitets-



tetsanalysene begynner 3,5 til 4,5 minutter før intervallet med temperaturdataene.

Etter at dataen var midlet og beregnet for hvert tidsintervall, ble den ukorrigerede systemeffektiviteten ( $\eta_{system}$ ) beregnet ved:

$$\begin{aligned}\eta_{system} &= \frac{\Delta Q_{lager}}{\Delta Q_{inn}} \\ &= \frac{((mc_p)_{vann} + C_{tank, roer, isolasjon})\Delta T_{lager}}{AI_m \Delta t}\end{aligned}\quad (4.1)$$

### Våren 2004

For å se om det var mulig å få mindre spredning på punktene i effektivitetsanalysene, valgte jeg å bruke tidsintervall på 20 minutter for analysene fra 2004. Tidsforskyvningen mellom innstråling og temperaturøkning i tanken, ble satt til 3,5 minutter for alle eksperimentdagene.

Effektivitetsplottene viser at det ofte tar mer enn en time før stabilitet er oppnådd.

Ved de lineære tilpasningene har jeg derfor sett på analysepunktene, og eliminert de første punktene som viser en økning i effektiviteten med økende temperaturforskjell mellom lageret og utetemperaturen.

### 4.3.2 Korreksjoner

#### -systemeffektivitet kontra solfangereffektivitet

Systemeffektiviteten forteller hvor godt hele systemet klarer å overføre energi som kommer inn på solfangeren, til lagertanken. Det er denne effektiviteten som er mest aktuell for praktisk utnyttelse av anlegget. For å kunne sammenligne effektiviteten av solfangeren med andre solfangere, må det gjøres korreksjoner. Energien som tapes og tilføres fra andre elementer i systemet må beregnes. I mars 2004 gjorde jeg eksperimenter for å finne det totale energitapet fra rør og tank, samt energitilførsel fra pumpa. Fra data over temperaturutvikling på solfanger og i lagertanken, har jeg forsøkt å beregne varmekapasiteten for solfangeren. Det ble gjort for å kunne beregne hvor mye energi som lagres i solfangeren. Disse eksperimentene og beregningene er beskrevet i avsnitt 5.1 "Solfangerens effektivitet" på side 45.

I tillegg må det korrigeres for at den målte innstrålinga ikke samsvarer helt med den innstrålinga som solfangerne mottar så lenge innstrålinga ikke kommer vinkelrett på solfangeren.

Korreksjonen for innfallsvinkelen er beskrevet under kapitlet med bakgrunnsstoff. (Se avsnitt “Korreksjon for innfallsvinkelen” på side 23 og avsnitt 3.2.4 ”Beregning av innfallsvinkel.” på side 20.)

Innfallsvinkelen ( $\theta$ ) kan beregnes for hvert enkelt analysepunkt etter ligning (3.7) på side 20.

Følgende vinkler har blitt brukt for å finne ( $\theta$ ).

Breddegrad,  $\varphi = 59,91^\circ$

(Lengdegrad,  $\lambda = 10,72$ )

Planets helning,  $\beta = 32^\circ$

Asimutvinkel,  $\gamma = 18^\circ$

Timevinkelen ble funnet for hvert analysepunkt,

$$\omega = 180 - 15 \cdot t \quad (4.2)$$

hvor  $t$  er soltiden oppgitt som desimaltall.  
(Holter, 1998)

Differansen mellom soltid og klokketid ved  $\lambda = 10,72$  for de aktuelle dagene, er funnet fra tabell over solas stilling i Oslo gjennom hele året. (Brahde, 1970)

Henden (2000) og Imenes (1999) fant at transmisjonen for en 6mm Lexanplate, varierte med ( $\theta$ ) som

$$\tau(\theta) = 0,812 - 2,12 \times 10^{-3} \theta + 9,33 \times 10^{-5} \theta^2 - 1,82 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (4.3)$$

En del av den innkommende strålinga vil være diffus og ikke avhengig av innfallsvinkel. Andelen av diffus stråling vil være størst på slutten av dagen når innfallsvinkelen også er stor. Derfor gir korreksjonene for innfallsvinkel for store utslag når innfallsvinkelen blir stor. Ved korreksjonene for innfallsvinkel har jeg derfor valgt å la en del av strålinga være ukorrigert.

I korreksjonene for innfallsvinkel har jeg brukt ligning (4.3), men latt 30% være ukorrigert.

### 4.3.3 Daglig energiutbytte

For et solvarmeanlegg som skal benyttes i en bolig eller av en bedrift, kan det være interessant å vite det daglige energiutbyttet.

Dette ble beregnet fra dager hvor anlegget hadde fått gå mesteparten av dagen, og hvor solinnstrålinga var registrert hele dagen.

Den totale energitilførselen i løpet av en dag, ble regnet ut for 14. og 15. august, 2002, og for 23. mai og 2. juni, 2004. Energitilførselen ble beregnet ut fra lagerets temperatur ved oppstart og temperaturen når systemet ikke lenger ble tilført energi.

Energimengden inn ble summert over den tidsperioden anlegget var på. For 15. august, 2002 og 23. mai, 2004, ble energimengden inn i løpet av hele dagen summert.

$$\text{Daglig effektivitet} = \frac{(\Delta T \cdot C)_{\text{lager}}}{A \int I(dt)}$$

Her er  $\Delta T$  forskjellen i temperaturen i lageret fra oppstart og til systemet ikke lenger blir tilført energi.  $C$  er varmekapasiteten for hele lageret (vann, tank, rør og delvis isolasjon).

Innstrålinga ( $I$ ) ble integrert over hele dagen eller bare den perioden som systemet var i drift.



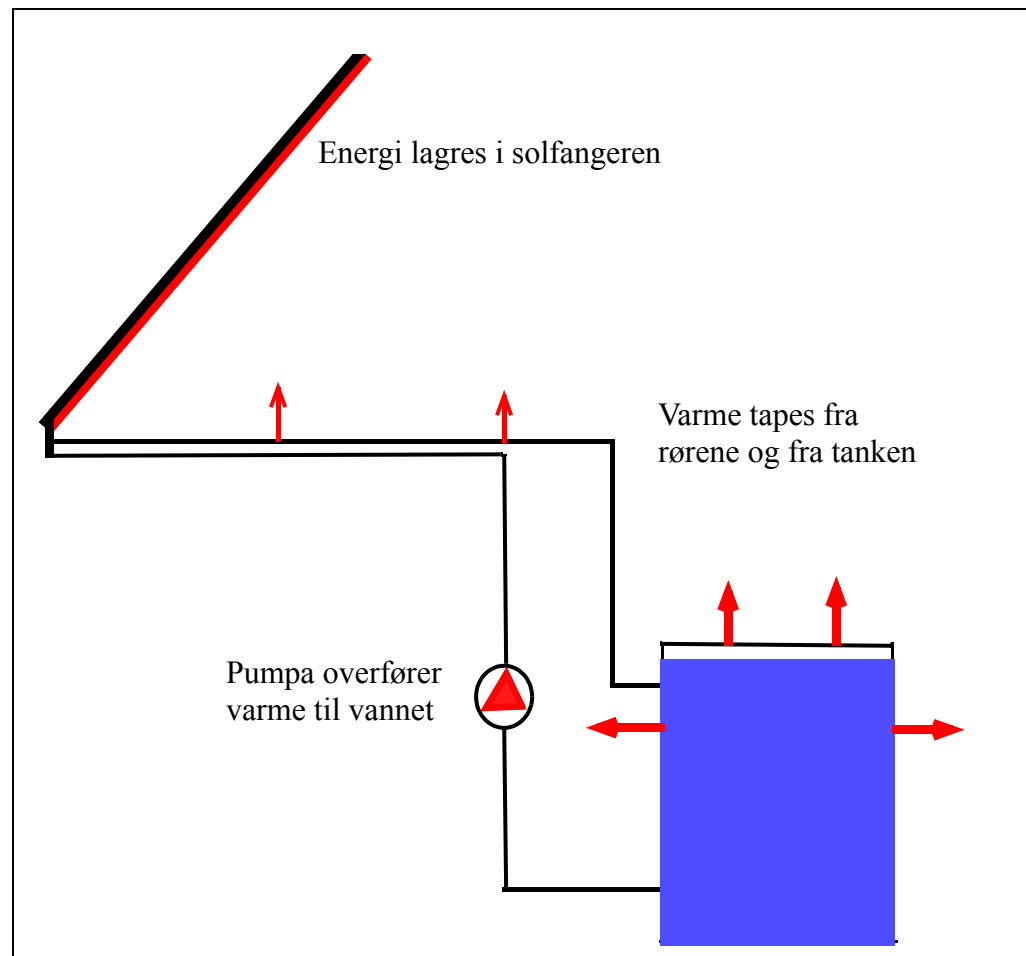
## 5 Supplerende eksperimenter

### -metode og resultater

#### 5.1 Solfangerens effektivitet

Systemeffektiviteten er gitt ved ligning (4.1) på side 41. For å finne effektiviteten til solfangeren, er det nødvendig å beregne energimengden som blir tilført fra andre kilder enn sola.

En del av den energien som blir tilført solfangerne fra sola, vil lagres i solfangerne og ikke bidra til energiøkning i lageret før innstrålinga blir veldig lav. Hvis temperaturen i varmelageret er mye større enn omgivelsestemperaturen, vil en del av varmen gå tapt som følge av varmeledning, konveksjon og stråling fra tanken og rørene, til omgivelsene. I figur (5.1) er den lagrede energien skissert sammen med tap og tilførsel av energi.



**Figur 5.1** Varmetap fra rør og fra lagertanken er skissert med piler. Varme lagret i solfangeren og varme tilført vannet fra pumpa er markert med rødt.

### 5.1.1 Korreksjon for lagring av varme i absorptorplata

En del av den innkommende solenergien vil lagres som varme i solfangeren. Denne energien kan uttrykkes ved:

$$\Delta Q_{sf} = C_{sf} \Delta T_{sf} \quad (5.1)$$

Temperatursensoren på solfangeren har ikke kontakt med vannet. I 2004 ble sensorene for innløp og utløp plassert i rørene slik at de skulle få kontakt med vannet. Allikevel viser sensorene både for solfangeren, innløp og utløp fluktuerende verdier som gir et dårlig bilde av temperaturøkningen i solfangeren. I korreksjonen for varme lagret i solfangeren ble derfor temperaturøkningen i tanken brukt i utregningene:

$$\Delta Q_{sf} = C_{sf} \Delta T_{lager}$$

For å finne varmekapasiteten til solfangeren ble temperaturutviklingen rett etter oppstart av anlegget studert. Se figur (5.2) på side 47.

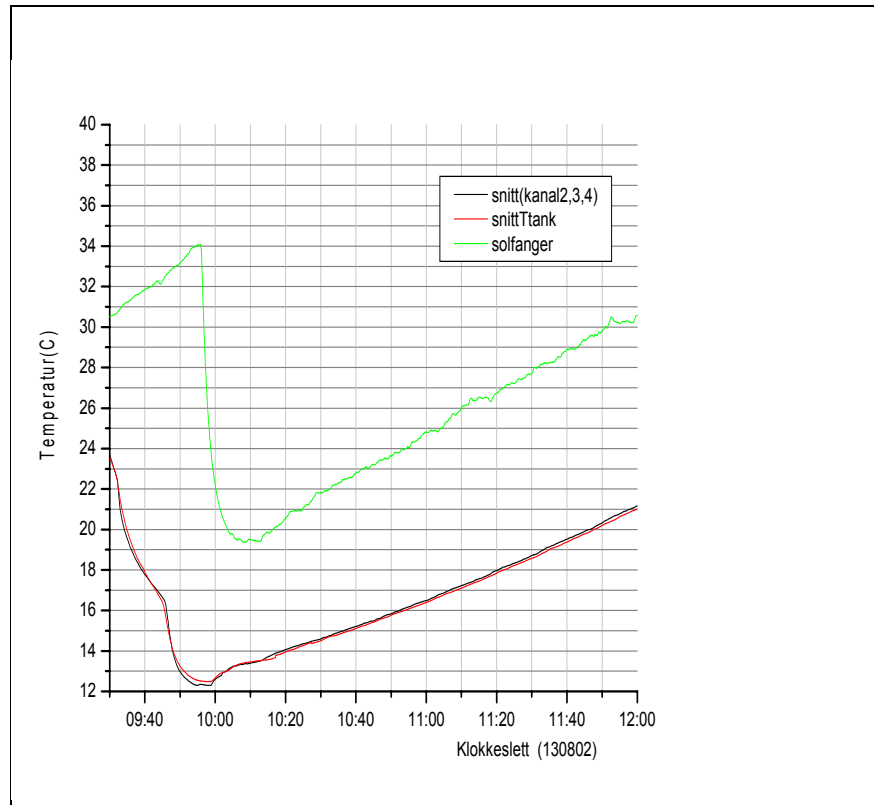
Dersom sola har fått skinne en stund på solfangerne uten vann i kamrene, vil en viss energimengde ha blitt lagret i dem. Ved oppstart av anlegget vil vannet som strømmer gjennom kamrene, motta energien fra solfangerne i form av varme. Ved å studere temperatursenkningen på solfangerne og temperaturøkningen i varmelageret over tilsvarende tidsperioder, vil varmekapasiteten til solfangeren kunne anslås.

$$C_{sf} = \frac{C_{lager} \times \Delta T_{lager}}{\Delta T_{sf}} \quad (5.2)$$

Det var vanskelig å bestemme eksakt hvor mye av temperaturøkningen i vannet som skyldtes frigjort energi fra solfangeren. Ved å studere temperaturutviklingen rett etter oppstart fra forskjellige dager, ble verdier fra 120 - 206 kJ/K funnet. ITW (Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik) i Stuttgart har beregnet varmekapasiteten til 33,13 (kJ/K) for en solfanger (165,65 (kJ/K) for fem solfangere) ut fra effektivitetsanalyser. (Meir, muntlig meddelelse, 2003) Dette gjelder den typen som ble brukt i 2002.

For analysene fra 2002 har jeg brukt (166±40) kJ/K for fem solfangere.

I analysene for 2004 ble det korrigert for forskjellen i areal av solfangeren. Det ble derfor brukt en verdi på (126±40) kJ/K for fem solfangere i 2004.



**Figur 5.2** Temperaturutvikling i solfanger og varmelager like etter oppstart 13.08.02. Kaldt vann ble pumpet opp til solfangerne som allerede hadde blitt eksponert for solinnstråling.

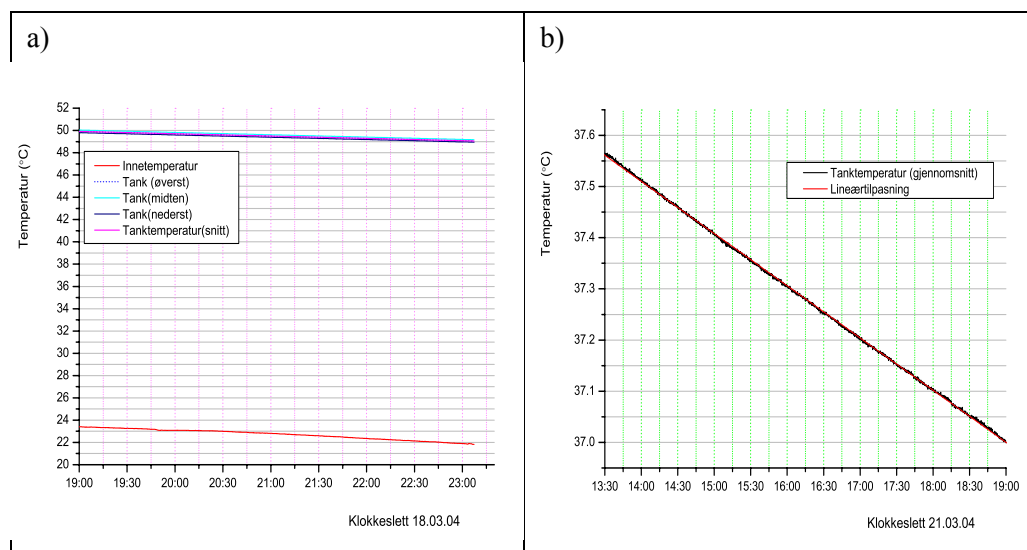
### 5.1.2 Korreksjon for varmetap

-fra tanken og rørene, og varmetilførsel fra pumpa.

Pumpa vil produsere varme mens den er i bruk. Det meste av varmen vil avgis til vannet som sirkulerer gjennom pumpa. Fra tanken og rørene vil det avgis varme til omgivelsene hvis temperaturen på vannet er høyere enn omgivelsestemperaturen.

For å finne mest mulig korrekte verdier for varmetap og -tilførsel, ble det gjort eksperimenter 18. og 21. mars, 2004. Rørene til og fra solfangerne ble koblet sammen rett innafør sydveggen på sollabben. Se figur (5.5) på side 49. Vannet i tanken ble varmet opp for å få en større forskjell mellom temperaturen på vannet i tanken/rørene og temperaturen inne i sollabben.

Pumpa ble så slått på manuelt. Vannet fikk sirkulere fra tanken opp til solfangerne og tilbake i tanken. Temperaturen inne, ute og fra de tre nivåene i tanken, ble målt, skrevet til fil og framstilt grafisk. Se figur (5.3) på side 48.



**Figur 5.3** Grafisk framstilling av temperaturløst i tanken.  
 a) Tanktemperatur vist sammen med innetemperatur.  
 b) Temperaturen i tanken synker lineært.

Gjennomsnittstemperaturen ble beregnet for hver halvtime, og temperatursenkningen i tanken ble beregnet over det samme tidsrommet. Forskjellen mellom innetemperaturen og snitttemperaturen i tanken ble så plottet mot energiendringa over 30 minutter i tanken. Dette er vist i figur (5.4)

Det ble foretatt regresjonsanalyse i matlab for å finne varmetapskoeffisienten.

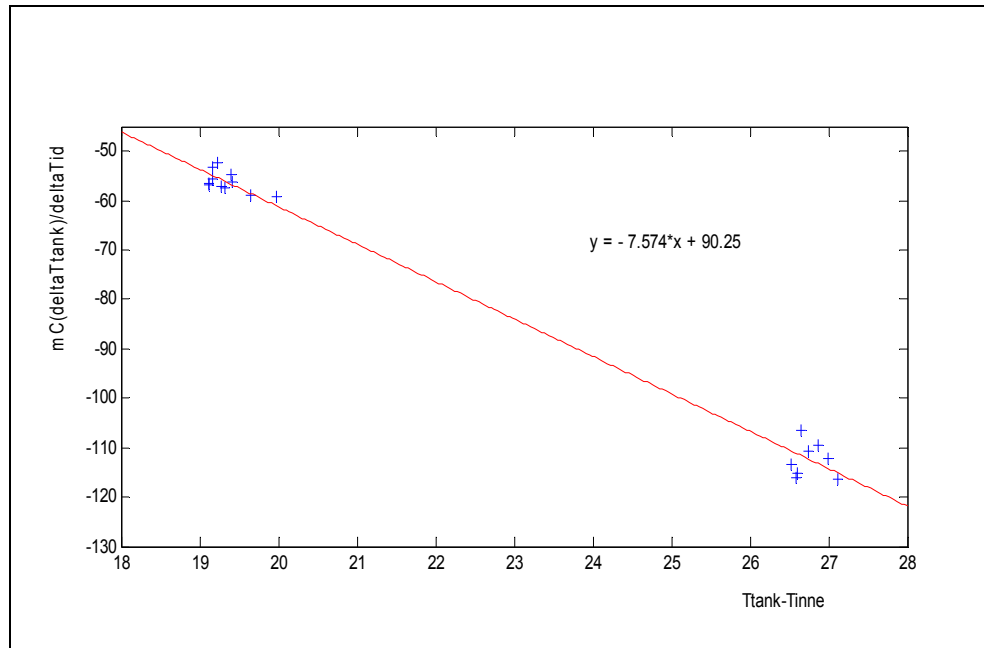
Ved en lineær tilpasning til punktene fant vi en effekt på  $90,25 \text{ W}$  når forskjellen mellom lagertemperaturen og innetemperaturen var  $0^\circ\text{C}$ . Utbyttet ved full effekt på pumpa, er fra produsenten oppgitt til  $90 \text{ W}$ .

Tapskoeffisient er bestemt til  $(7,57 \pm 0,03) \text{ J/Ks}$ .

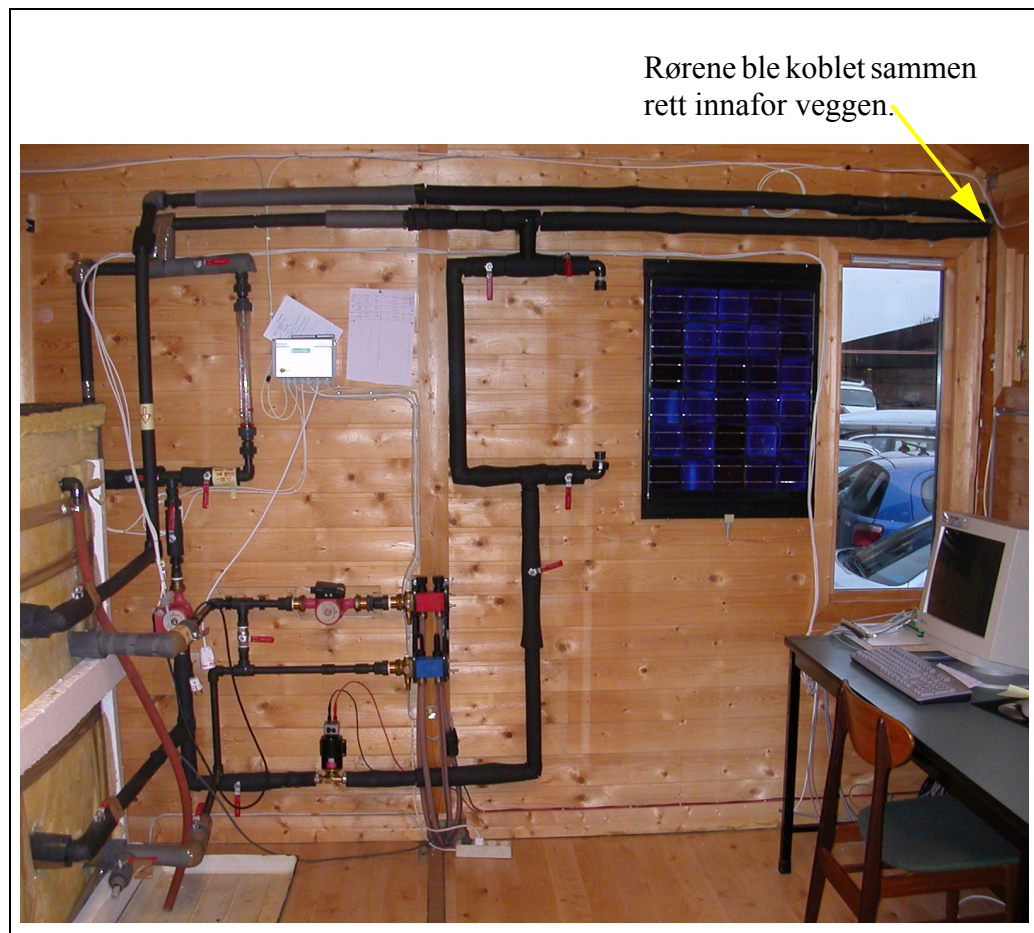
Energimengden som går tapt eller blir tilført ( $\Delta Q_{tap}$ ), kan da uttrykkes som

$$\Delta Q_{tap} = \{7,57(\text{W/K})\Delta T_{(l-i)} - 90(\text{W})\} \Delta t \pm 2(\text{J}) \quad (5.3)$$





Figur 5.4 Effekten av tap og tilførsel som funksjon av  $(T_{\text{lager}} - T_{\text{inne}})$



Figur 5.5 Rørapplegget inne i sollabben.

## 5.2 Kalibreringer

Temperatursensorene ble kalibrert ved flere anledninger. Sensorene på kanal 2 - 13 ble kalibrert i mai 2002.

Før varmetapsmålingene i mars 2004, ble sensorene på kanal 7 - 10 kalibrert.

Alle sensorene har blitt kalibrert med full kabellengde og så nærme opptil eksperimentene som mulig. Dette fordi motstanden er avhengig av kabellengden, og fordi motstanden i sensorene og i kablen kan endres over tid.

Til kalibreringene brukte vi et kvikksølvtermometer (TG Labortherm-N Skalenwert 0.1K (0 -100)° C. 11.89) som referanse.

Sensorene ble pakket inn i tette plastposer/-hansker og plassert i en termos (Isotherm RGW) fylt med isvann.

Siden ble isvannet byttet ut med vann med temperaturer mellom 10 og 90°C.

Lab View ble brukt til å registrere temperaturen på sensorene. (I 2002 ble Virtual Bench brukt). Etter en viss stabiliseringstid, ble kvikksølvtermometeret avlest og alle temperaturene notert i en excel-fil.

Temperaturpunktene for hver kanal ble så plottet mot referansetemperaturen, og det ble gjort en lineær tilpasning til punktene i matlab. I figur (5.6) er det vist et eksempel fra kalibreringa av kanal 9.

Grafisk framstilling av kalibrering for de andre kanalene, finnes i vedlegg B.

Temperatursensorene som var ute, ved innløpet, ved utløpet og på solfangeren, ble i 2004 kalibrert av Gunn Spikkeland og Øyvind Mathisen.

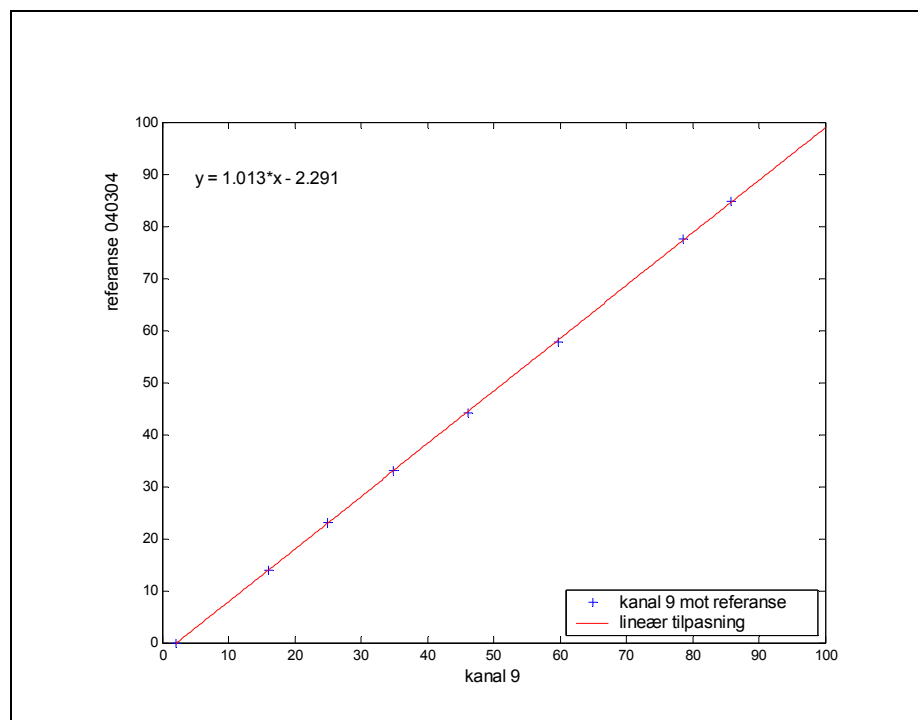
Tabell (5 – 1) viser alle kalibreringsligningene med tilhørende kanaler og plasseringer.

**Tabell 5 – 1** Kalibreringsligninger. Kanalnummer i parentes gjelder for 2004.

Kanal	Plassering	Kalibrering, mai 2002	Kalibrering, mars 2004
2	Tanken	$1,002x - 0,7317$	
3	Tanken	$0,9965x - 0,6332$	
4	Tanken	$0,9979x - 0,7024$	
5	Ute i sola	$0,9995x - 0,9294$	
6	Ute	$0,9996x - 1,8509$	$1,07x - 5,523$
7	Inne	$0,9995x - 0,8411$	$0,9953x - 1,574$
8	Øverst i tanken	$0,9971x - 1,2125$	$1,008x - 2,008$
9	Midt i tanken	$0,9943x - 1,1664$	$1,013x - 2,291$
10	Nederst i tanken	$0,9950x - 1,1664$	$1,004x - 2,108$
11	Solfanger	$0,9976x - 1,1812$	$1,001x - 1,858$

**Tabell 5 – 1** Kalibreringsligninger. Kanalnummer i parentes gjelder for 2004.

12 (5)	Innløp	$0,9950x - 1,2931$	$0,9944x - 2,0132$
13 (12)	Utløp	$0,9956x - 1,1739$	$0,9931x - 2,3472$

**Figur 5.6** Referansetemperaturen som funksjon av temperaturen på kanal 9 og lineær tilpasning av punktene.

Usikkerheten i temperaturen etter kalibrering av sensorene ligger i området  $\pm 0,09^\circ\text{C}$ .

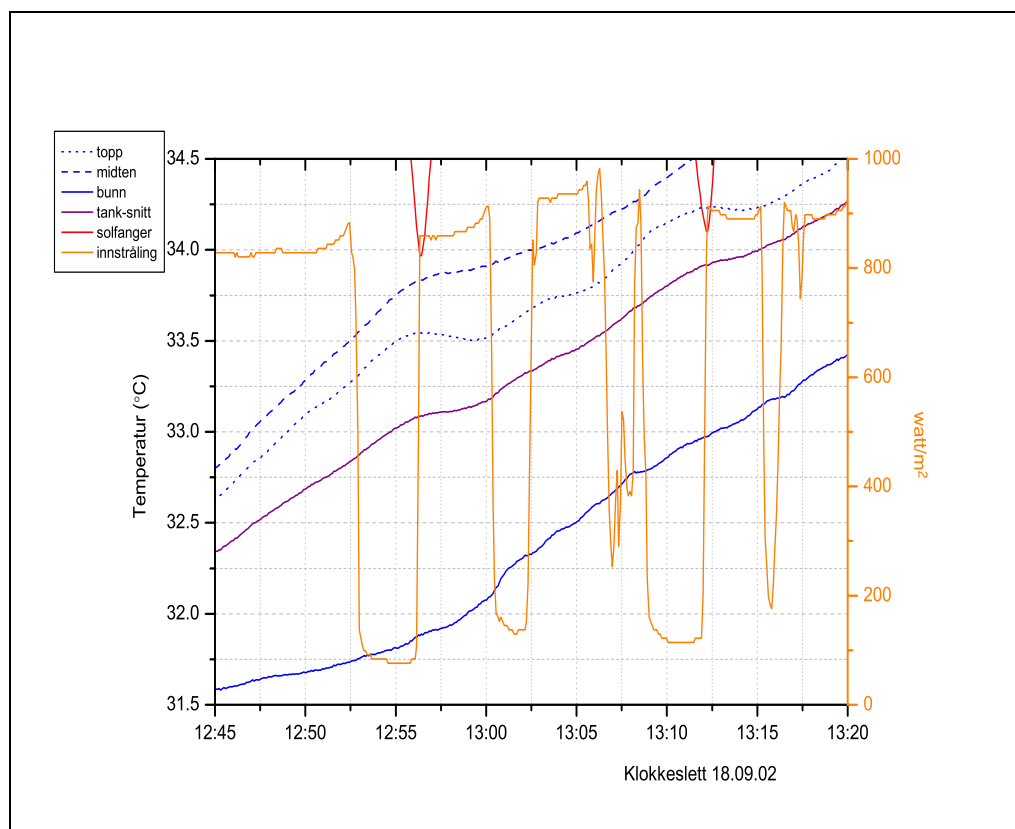
### 5.3 Tidsforskyvning

Ved bruk av den kalorimetriske metoden vil ikke temperaturøkningen i tanken samsvare eksakt i tid med solinnstrålingen. Det vil være en viss forsinkelse som avhenger blant annet av lengden på rørene fra solfangererne til tanken og strømningshastigheten.

For å finne lengden av denne tidsforskyvningen er det mulig å studere dager med høy solinnstråling avbrutt av skyer med lav transmisjon.

Figur (5.7) viser eksempel på dette. Ved å studere eksperimentdager fra 2002 med forskjellige strømningshastigheter, ble forskyvningen i tid anslått til 3,5minutter for 700l/h, 4,0min. for 500l/h og 4,5min. for 300l/h.

I målingene fra våren 2004, ble det valgt en forskyvning på 3,5 min. for alle dagene.



**Figur 5.7** Figuren viser hvordan temperaturutviklinga i tanken følger innstrålingsmønsteret. Den oransje linja viser solinnstrålinga. Innstrålinga er avbrutt av skyer slik at den synker til under 200 W/m<sup>2</sup>. Så fort skyen har passert, stiger innstrålinga raskt til rundt 900 W/m<sup>2</sup>. De blå linjene viser temperaturen i tanken og hvordan økningen i temperaturen følger innstrålinga.

## 6 Effektivitetsanalysene

### - resultater

I effektivitetsgrafene som følger er det de fleste dagene vist lineære tilpasninger til effektivitetspunktene hvor korreksjoner for solfangerens varmekapasitet og netto varmetap, er tatt med. Tilpasningene er bare gjort til de punktene hvor stabilitet er oppnådd i systemet. Punkter før dette er (til en viss grad) vist i figurene for å illustrere den lange stabiliseringstida.

En lineær tilpasning vil ikke gi et helt riktig bilde på hvordan effektiviteten synker når temperaturen i varmelageret øker. Varmestrålinga fra lageret er proporsjonal med  $T^4$ , og effektivitetsligningen vil derfor ikke være helt lineær, men ha høyere ordens ledd. Disse vil ha størst betydning ved høy temperatur i tanken.

Netto varmetap innbefatter varmetilførsel fra pumpa, varmetap fra tanken og fra rørene. I figurene er solfangerens effektivitet også vist. D.v.s. punkter hvor det også er korrigert for at transmisjonen gjennom dekkplata, reduseres ved økende innfallsvinkel ( $\theta$ ). Det er ikke gjort lineære tilpasninger til disse punktene, da så mange punkter må utelates på grunn av stor usikkerhet i punktene.

For å kunne sammenligne effektiviteten til de aktuelle solfangerne med andre modeller, er det nødvendig å ta med denne korreksjonen også.

### 6.1 Eksperimenter utført i 2002

For å beregne effektiviteten er det viktig å ha målinger hvor solinnstrålingen er tilnærmet konstant over en lengre tidsperiode. Det ble utført eksperimenter ukentlig fra mai til september 2002. Fra den perioden ble det valgt ut 11 dager hvor innstrålingen ble ansett som stabil nok til å kunne gjøre effektivitetsanalyser. Den anbefalte strømningshastigheten gjennom absorberplatene, er  $1,0\text{ l/min}$  pr.  $\text{m}^2$  solfanger.

(Solarnor, 2003)

I eksperimentene som ble utført i 2002, er det brukt tre forskjellige strømningshastigheter;  $0,85$ ,  $1,4$  og  $2,0\text{ l/min}$  per  $\text{m}^2$  solfanger.

#### **Strømningshastighet $0,85\text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$**

Figur (6.1) viser en dag hvor innstrålinga var stabil nesten hele dagen. Den oransje kurven viser målt innstråling på solarimeteret. Rundt klokka 10:00 har det sannsynligvis kommet en sky foran sola. Resten av dagen har innstrålingen økt jevnt mot 12:00 soltid, og så avtatt gradvis.

Utetemperaturen er plottet med grønn farge. De blå kurvene viser temperaturen i tanken. Den prikkete linja gir temperaturen øverst i tanken, den stiplede viser temperaturen midt i tanken, og den heltrukne linja viser temperaturen nederst i tanken. Se avsnitt 4.1.2 “Temperatursensorerene” på side 32, for plassering av sensorene.

Anlegget hadde vært i gang natt til 15. august, og temperaturen sunket til rett under 40°C ca. klokka 9:00. Rundt klokka 10:00 begynner temperaturen å øke, og den øker jevnt til omtrent 65°C. Da er innstrålinga for lav til å kunne gi en videre temperaturøkning. Hadde styreren stått på “auto”, ville anlegget slått seg av. Siden anlegget er satt til å gå hele tiden, ser vi at temperaturen begynner å synke etter kort tid. Dette skyldes hovedsaklig varmestråling fra solfangerne mot atmosfæren.

Den røde linja viser temperaturen på solfangeren. Temperatursensoren på solfangeren var plassert oppå absorptorplata og målte dermed temperaturen på lufta mellom absorptor- og dekkplata. Disse temperaturmålingene gir derfor ikke et korrekt bilde av temperaturen. Det ser vi ved at temperaturen i lageret fortsetter å øke selv om den målte temperaturen på solfangeren synker.

I den kalorimetrisk metode er effektiviteten av hele systemet gitt som forholdet mellom energiøkningen i lageret og energi inn på solfangeren.

$$\eta_{system} = \frac{\Delta Q_{lager}}{\Delta Q_{inn}} \quad (6.1)$$

Se avsnitt 3.3.2 “Kalorimetrisk metode” på side 21.

I figur (6.2) er effektiviteten plottet som en funksjon av  $\left(\frac{(T_{lager} + \delta T) - T_{ute}}{I_m}\right)$  for 15. august.

For nærmere beskrivelse, se avsnitt “Korreksjoner for bruk av lagertemperatur langs x-aksen.” på side 25.

De blå punktene viser varmelagerets energitilførsel i løpet av perioden i forhold til innstrålt energimengde, gitt av ligning (6.1).

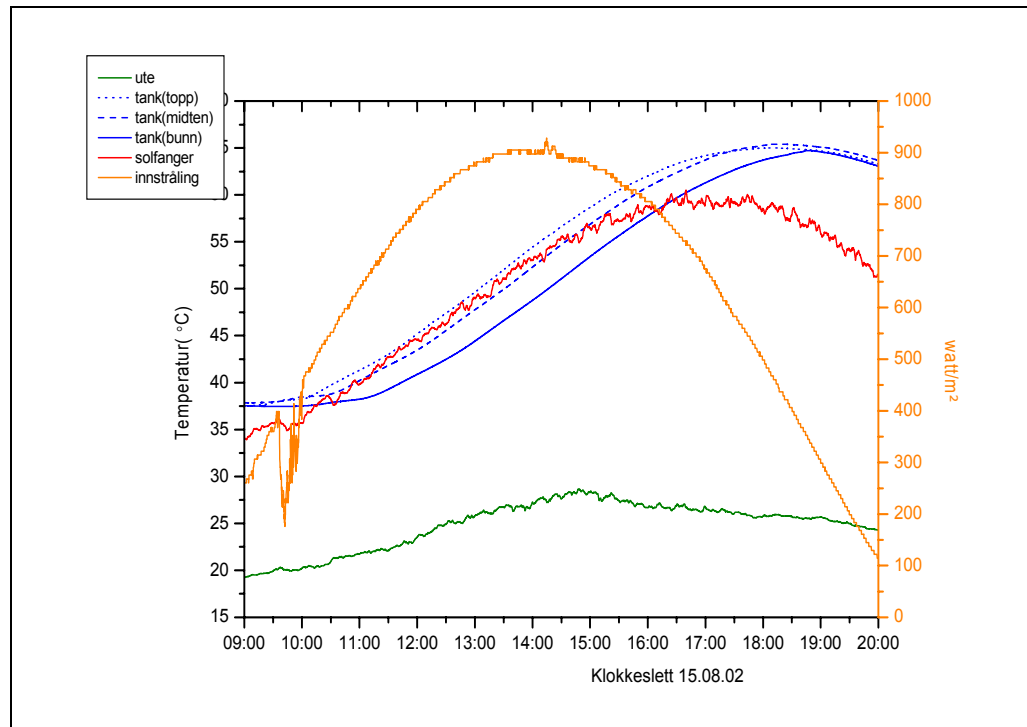
Effektiviteten vil være høyest når forskjellen mellom varmelagerets temperatur og temperaturen til omgivelsene er lav. Hvis varmelageret oppnår en veldig høy temperatur, vil mye av varmen tapes til omgivelsene og effektiviteten blir dårligere.

Korreksjonen for energi lagret i solfangerne er vist med grønne punkter, og korreksjonen for varmetap er vist med sorte punkter

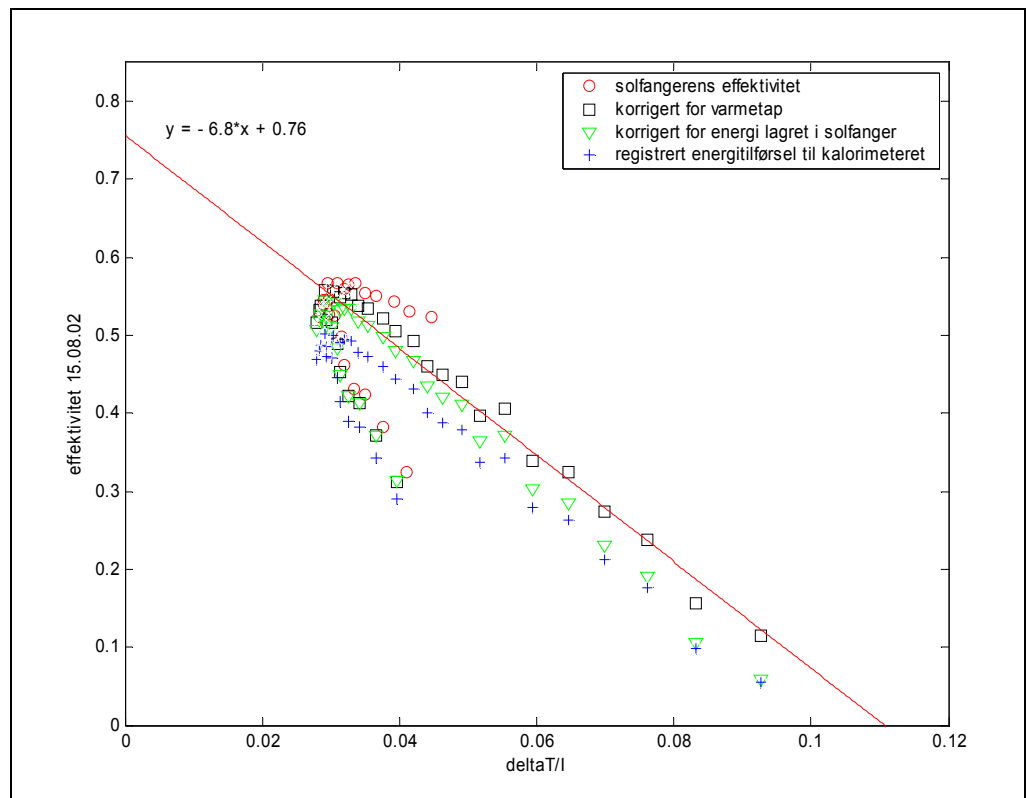
En lineær tilpasning med minste kvadraters metode til punktene hvor korreksjonen for innfallsvinkel er utelatt, gir

$$\eta = 0,76 - 6,8 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right)$$

$\eta_0$  vil ved en lineær tilpasning, variere etter hvilket temperaturområde målingene er gjort ved, det samme vil stigningstallet.



**Figur 6.1** Solinnstråling og temperaturutvikling 15. august 2002.



**Figur 6.2** Effektivitetskurve basert på data fra 15. august, 2002. Den lineære tilpasningen er gitt til solfangereffektiviteten uten korreksjoner for  $\theta$ .

Transmisjonen gjennom dekkplata er avhengig av innfallsvinkelen ( $\theta$ ) mellom solstrålene og normalen til dekkplata. Derfor vil den målte innstrålinga på solarimeter gi for høye verdier hvis  $\theta$  er større enn  $0^\circ$ . (Dette er forklart i kapitlet om bakgrunnsstoff.) Blir innfallsvinkelen større enn  $45^\circ$ , blir korreksjonene svært usikre, og disse punktene blir derfor som oftest utelatt. Det er de i figur (6.2) også, hvor den korrigerte systemeffektiviteten er vist med røde punkter.

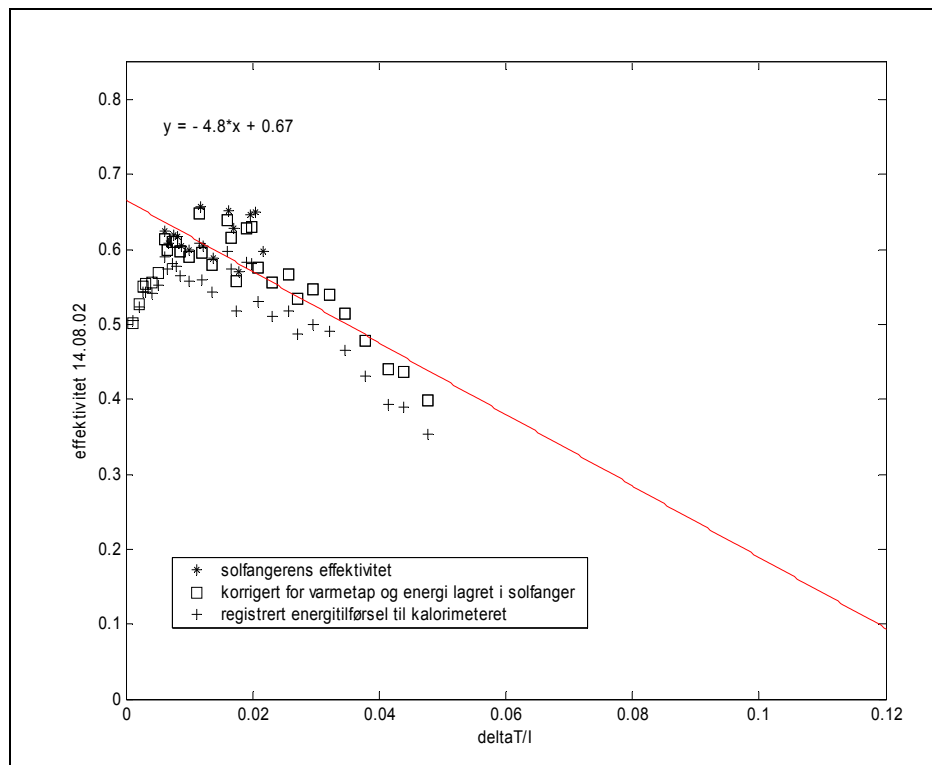
Verdiene som er korrigeret for innfallsvinkel, er plottet mot

$$\left( \frac{(T_{lager} + \delta T) - T_{ute}}{I_k} \right) \text{ hvor } I_k \text{ viser til korrigeret innstråling.}$$

Med disse korreksjonene er solfangerens effektivitet gitt ved

$$\eta = \frac{\Delta Q_{lager} + \Delta Q_{sf} + \Delta Q_{tap}}{\Delta Q_{inn}} \quad (6.2)$$

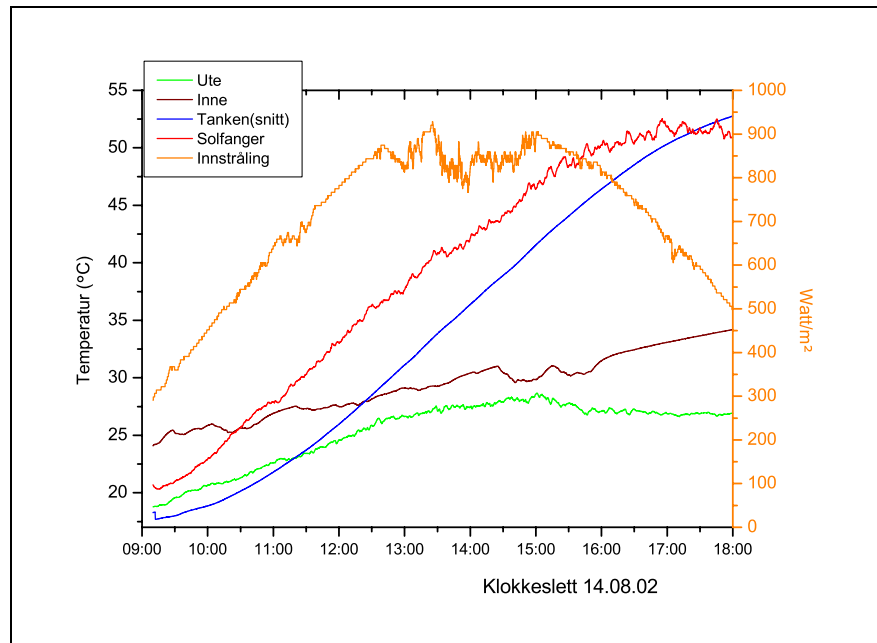
Figur (6.4) viser innstrålinga og temperaturutviklinga for 14. august, 2002. Innstrålinga fluktuerte en del mellom 12:45 og 15:00. I denne figuren er gjennomsnittet av tanktemperaturen vist. Innetemperaturen er vist med brun kurve. Denne vil endres raskt hvis døra til sollabben stadig åpnes og det kan være årsak til temperaturfallet rundt klokka 15.



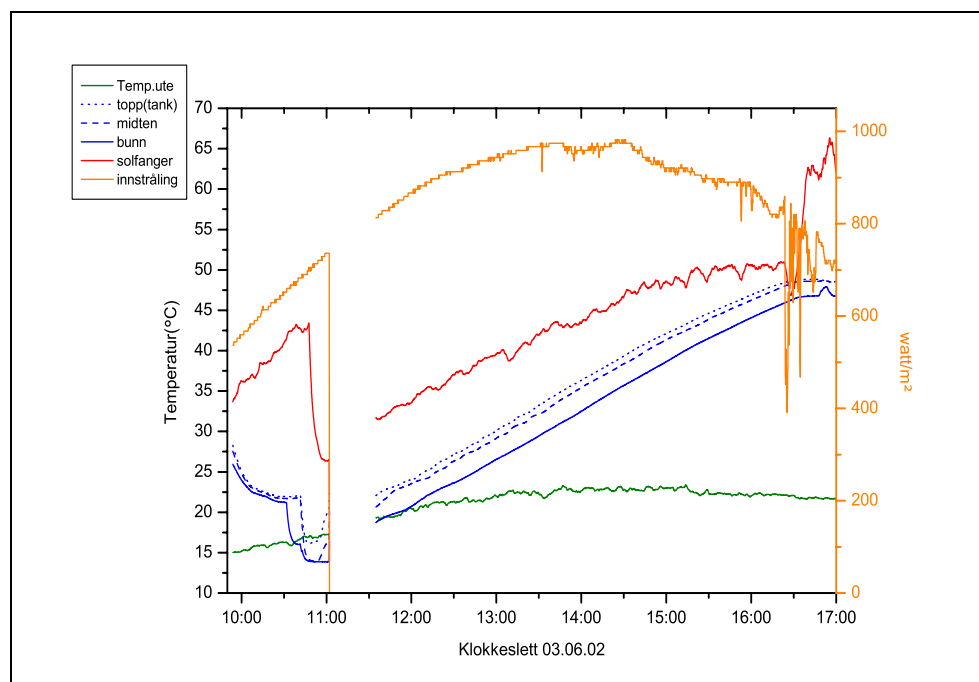
**Figur 6.3** Effektivitetskurve basert på data fra 14. august, 2002



I figur (6.3) er punkter for registrert energitilførsel til tanken vist med +. Punkter hvor korreksjonene for lagret varme i solfangeren, varmetap og -tilførsel, er tatt med, vises som kvadrater. Korrigerte punkter for solfangereffektiviteten vises også (\*). Vi ser her at det er forholdsvis stor spredning av punktene.



**Figur 6.4** Solinnstråling og temperaturutvikling 14. august, 2002.



**Figur 6.5** Solinnstråling og temperaturutvikling 3. juni, 2002

Det ble også gjort eksperimenter med strømningshastighet  $0,85 l / (min \cdot m^2)$  23. august og 3. september 2002. Grafisk framstilling av temperaturutvikling, solinnstråling og effektivitetskurver for disse to dagene, finnes i vedlegget, figur (A.3) og (A.4).

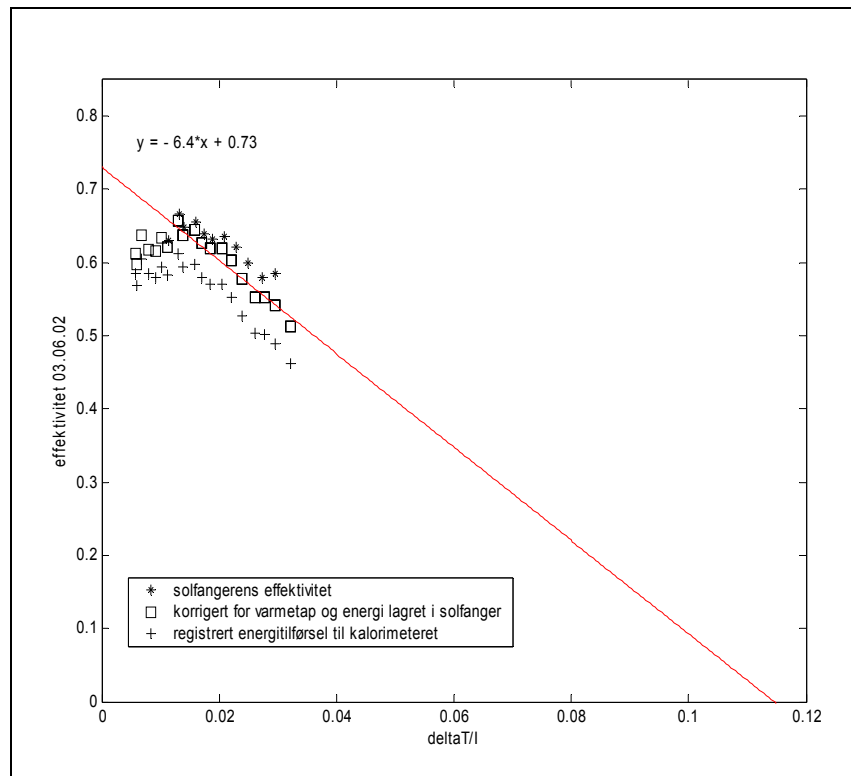
### **Strømningshastighet $1,4 l / (min \cdot m^2)$ .**

Eksperimenter med strømningshastighet på  $1,4 l / (min \cdot m^2)$  ble gjort i juni. Tre av eksperimentdagene viste en innstråling som var stabil i mer enn tre timer. Temperaturutvikling og innstrålingsdata fra 3. juni, er framstilt grafisk i figur (6.5). Denne dagen ble tanken fylt med kaldt vann om morgenen og anlegget ble satt i gang litt før klokka 11:00. Den røde kurven viser temperaturen på solfangeren, og vi kan se hvordan temperaturen synker på solfangeren når vannet begynner å sirkulere gjennom den. Like etter klokka 11:00 er det et område uten data. Det skyldes problemer med programmet som ble brukt til å registrere signaler i 2002. Fallet i innstrålinga (oransje kurve) er derfor ikke reelt.

Effektivitetsanalysen fra denne dagen er framstilt grafisk i figur (6.6). De sorte +-punktene er den ukorrigerede systemeffektiviteten. Vi kan se av punktene markert som \*, hvordan korreksjonen for innfallsvinkel øker langs  $(\Delta T / I)$ -aksen. Punkter utover denneaksen vil vanligvis samsvare med målinger seinere og seinere på dagen. Rundt 15:30 har disse korreksjonene blitt så store at den medfølgende usikkerheten gjør punktene lite egnet til analyseformål.

I punktene markert som kvadrater er alle korreksjonene unntatt de for innfallsvinkel, tatt med. Til disse punktene er det gjort en lineær tilpasning som gir

$$\eta = 0,73 - 6,4 \cdot \left( \frac{\Delta T}{I} \right).$$



Figur 6.6 Effektivitetskurve basert på data fra 3. juni, 2002.

### Strømningshastighet $2,0 l / (min \cdot m^2)$ .

Av eksperimentdager hvor strømningshastigheten var  $2,0 l / (min \cdot m^2)$ , har vi tre dager med brukbar innstråling, og en dag med solstråling helt uavbrutt av skyer. Figur (6.7) viser denne dagen (13. august, 2002). Tanken ble fylt med kaldt vann om morgenen og anlegget igangsatt. Denne dagen var styreren satt på auto. Av den blå temperaturkurven for tanken og den røde kurven for solfangeren, ser vi effekten av dette etter kl. 17:00.

Anlegget vil slå seg av hvis  $T_{sf} - T_{lager} \leq 1^\circ K$ .

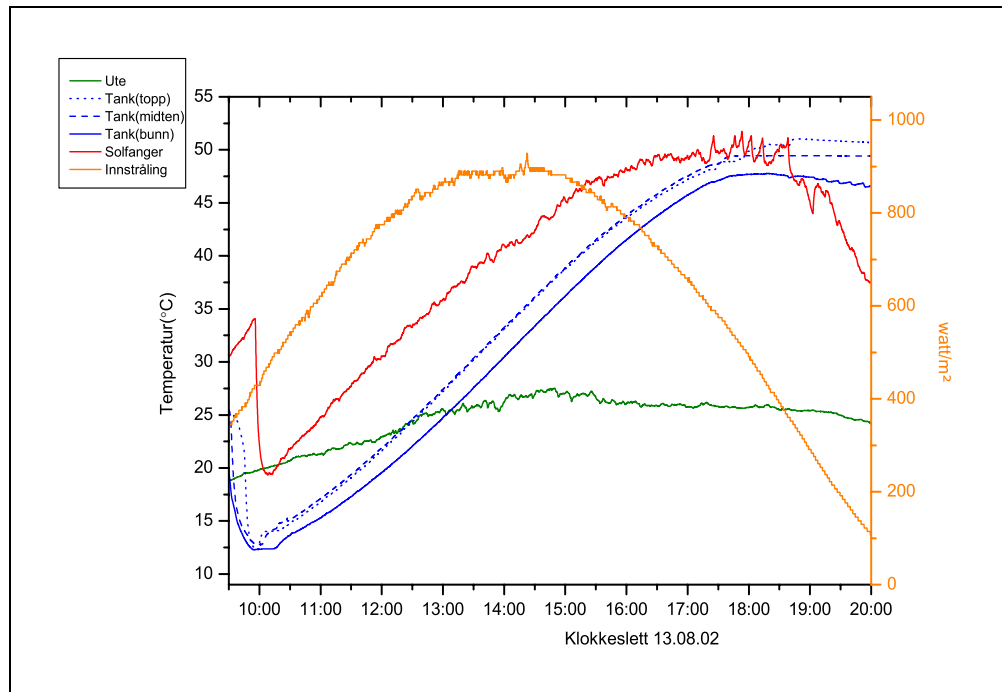
Så fort vannet slutter å sirkulere i solfangeren, vil temperaturen i denne stige.

Når  $T_{sf} - T_{lager} \geq 4^\circ K$  vil anlegget starte opp igjen.

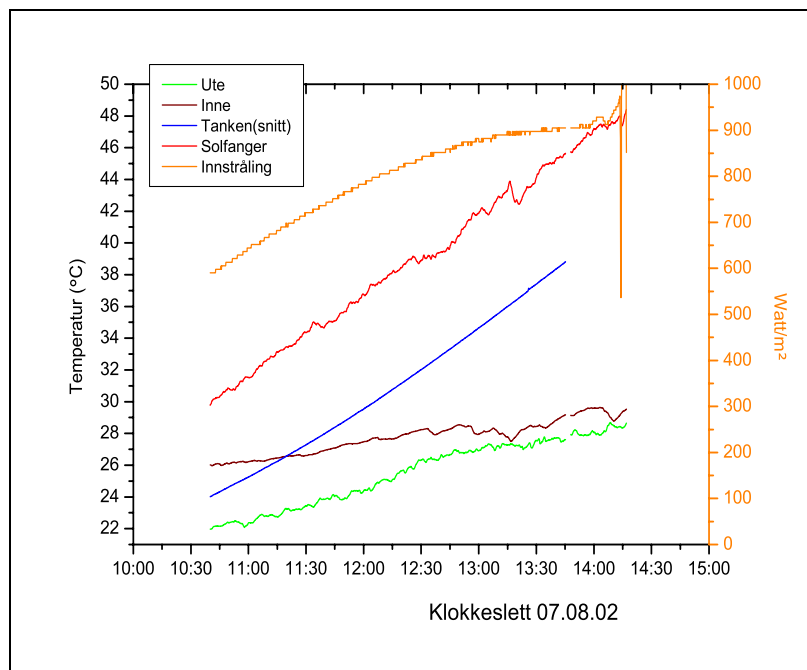
Effektivitetsdataene for 13. august er vist i figur (6.9). Analysepunktene er fra 12:15 til 17:00.

En lineær tilpasning til punktene hvor alle korreksjonene unntatt de for innfalls- vinkel er tatt med, gir

$$\eta = 0,72 - 6,7 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right)$$

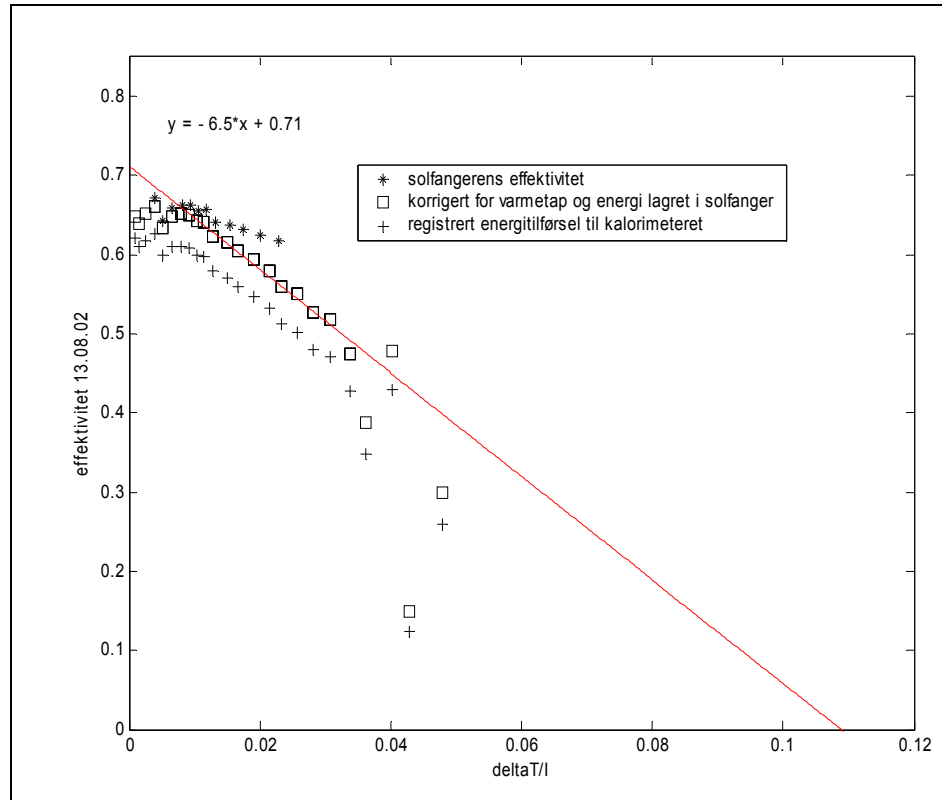


Figur 6.7 Solinnstråling og temperaturutvikling 13. august, 2002

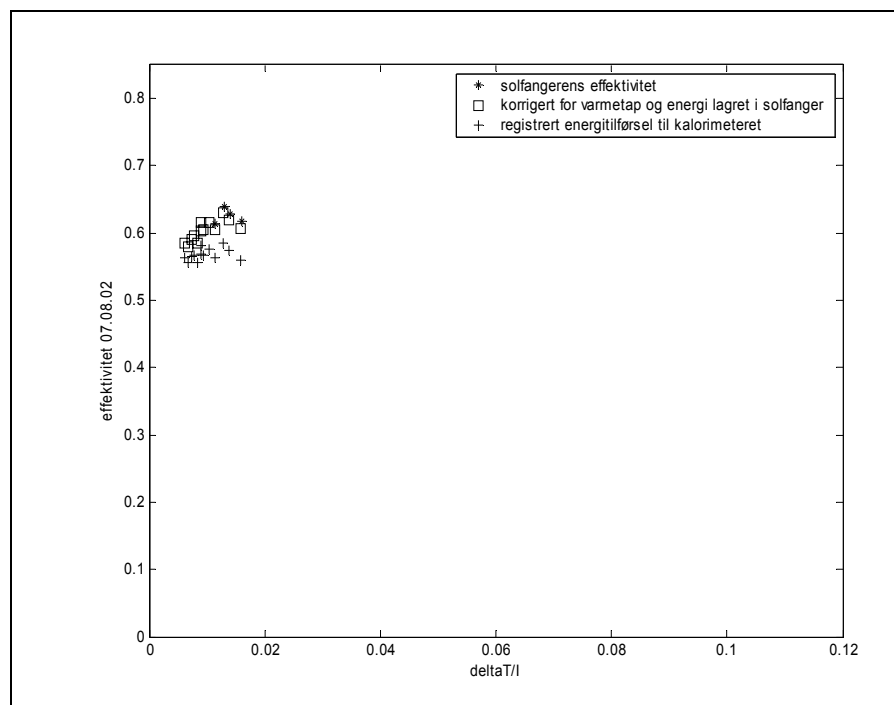


Figur 6.8 Solinnstråling og temperaturutvikling 7. august, 2002

I figur (6.8) ser vi at vi har gode data for innstråling 7. august, fra perioden mellom 10:30 og 14:00. Effektiviteten for denne dagen er framstilt grafisk i figur (6.10).



**Figur 6.9** Effektivitetskurve basert på data fra 13. august, 2002. Den lineære tilpassinga er gjort til den ukorrigerede solfangereffektiviteten.



**Figur 6.10** Effektivitetspunkter basert på data fra 7. august, 2002.

## 6.2 Effektivitetsanalyser fra våren 2004

Absorbatorplatene som ble brukt sommeren 2002, viste raskt tegn på deformering. Det var tydelig at polymermaterialet utvidet seg når temperaturen på solfangeren ble veldig høy. Noen av de første analysene av effektiviteten viste resultater som kunne tyde på at det hadde vært mindre lekkasjer fra kamrene i plata til midtkanalen hvor vannet renner ut.

I april 2004 ble det montert fem nye solfangere på taket. Disse var litt kortere enn forgjengerne. De hadde en midtkanal som gikk hele veien opp i absorbatorplata for å hindre muligheten for lekkasje mellom vannet som var på vei opp i solfangeren og returvannet. I tillegg hadde de gjennomgått en avspenning for å unngå at materialet i absorbatorplata skulle endre seg ved oppheting.

Det var ønskelig å se om disse forbedringene kunne øke effektiviteten, og det ble besluttet å gjøre målinger denne våren også.

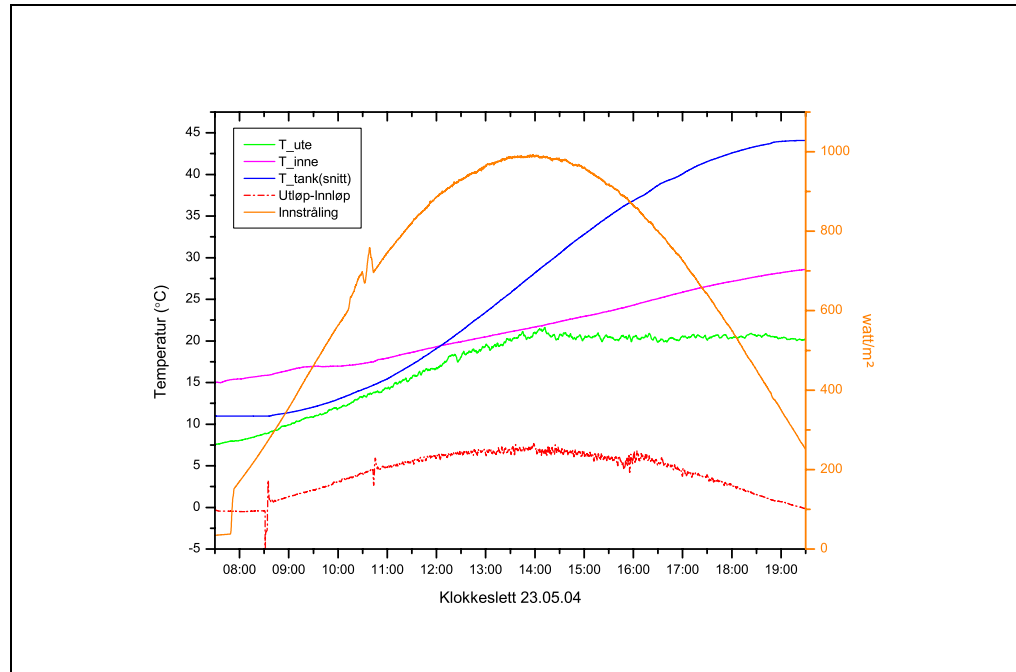
I påvente av dager med jevn solinnstråling, ble det gjort analyser av dager hvor innstrålingen tidvis ble avbrutt av skyer. Innstrålingskurver og effektivitetsanalyser fra disse dagene er tatt med i vedlegget.

I mai og juni 2004 ble strømningshastigheten satt til 280, 300 eller 400 l/h. Det tilsvarte en strømningshastighet per m<sup>2</sup> solfanger på 1,0, 1,1 og 1,5 l/(min).

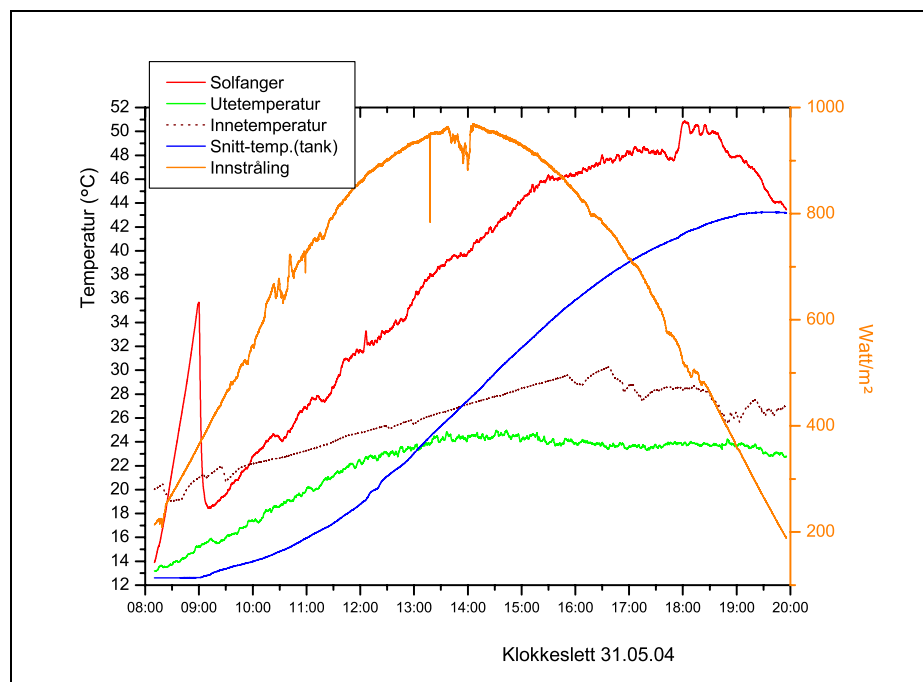
Strømningshastighet på 1,0 l/(min · m<sup>2</sup>) ble brukt 23. og 31. mai, og 3. juni. 1. og 2. juni ble det brukt en strømningshastighet på 1,5 l/(min · m<sup>2</sup>).

### **Strømningshastighet 1,0 l/(min · m<sup>2</sup>)**

I figur (6.11) viser den blå kurven en jevn temperaturøkning i tanken fra 12°C til 45°C. Solinnstrålinga (vist med oransje) var uavbrutt hele dagen, 23. mai, men viser en liten topp rundt klokka 10:30. Denne lille økningen var tydelig også flere andre dager uten at vi klarte å lokalisere årsaken til dette. Anlegget stod på auto denne dagen, men gikk kontinuerlig i analyseperioden pga. den lave temperaturen på vannet ved oppstart. Dette kan sees på den stabile forskjellen mellom utløp og innløp til solfangeren som er plottet med rødt i figuren. Temperatursensoren på solfangeren var ikke montert.

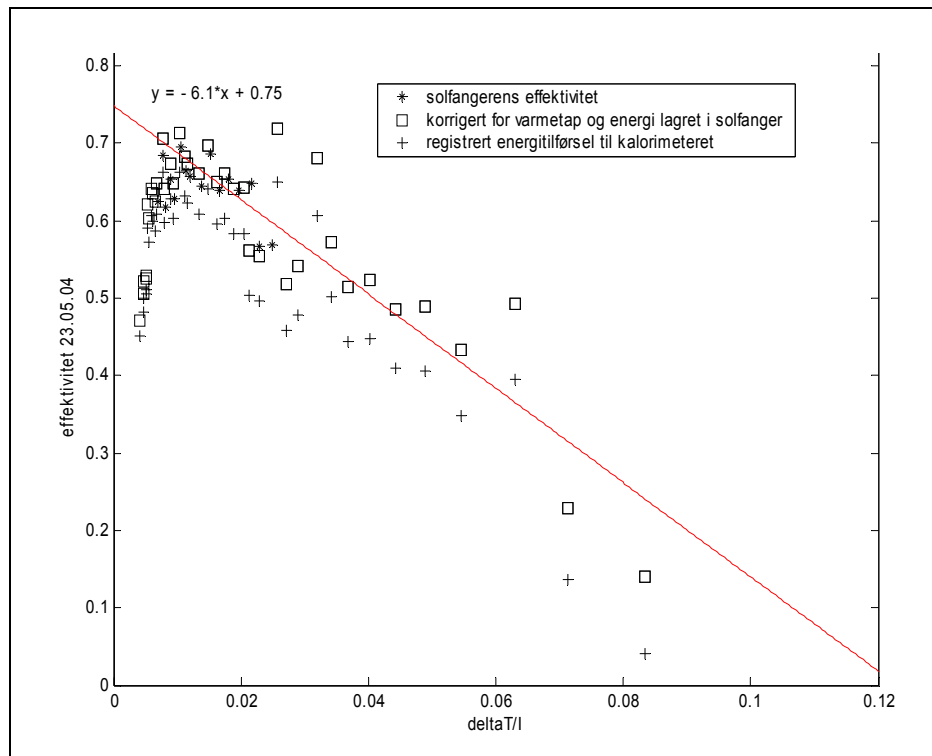


**Figur 6.11** Den oransje kurven viser innstrålinga, og de andre kurvene viser temperaturutviklinga 23.mai, 2004. Temperaturen i tanken er vist som gjennomsnittet av sensorene øverst, nederst og i midten av tanken (blå kurve). Den røde kurven viser forskjellen (i °C) mellom utløps- og innløpstemperaturen til solfangeren.

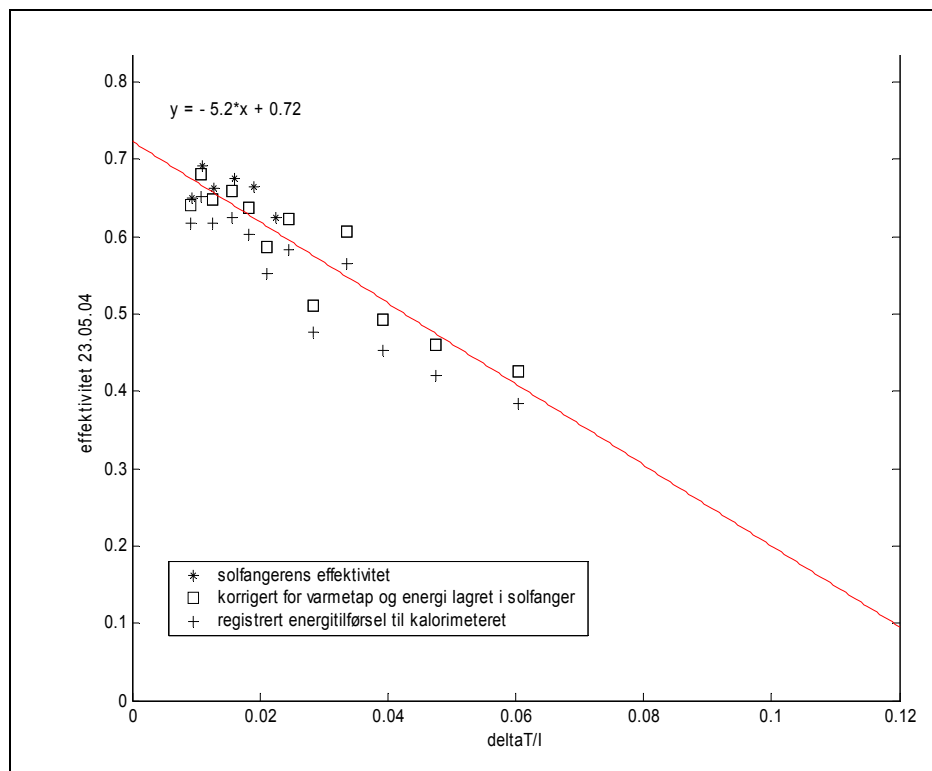


**Figur 6.12** Temperaturutvikling og innstråling 31.mai, 2004.

Effektiviteten er beregnet for systemet, og det er gjort korreksjoner for å finne solfangerens effektivitet. I figur (6.13) er effektiviteten framstilt grafisk for 23. mai, 2004.



Figur 6.13 Effektiviteten ( $\eta$ ) er plottet mot  $\Delta T/l$ , for data fra 23.mai,2004.



Figur 6.14 Effektivitetspunkter fra 23.05.04, beregnet med  $\Delta t = 30$  minutter.



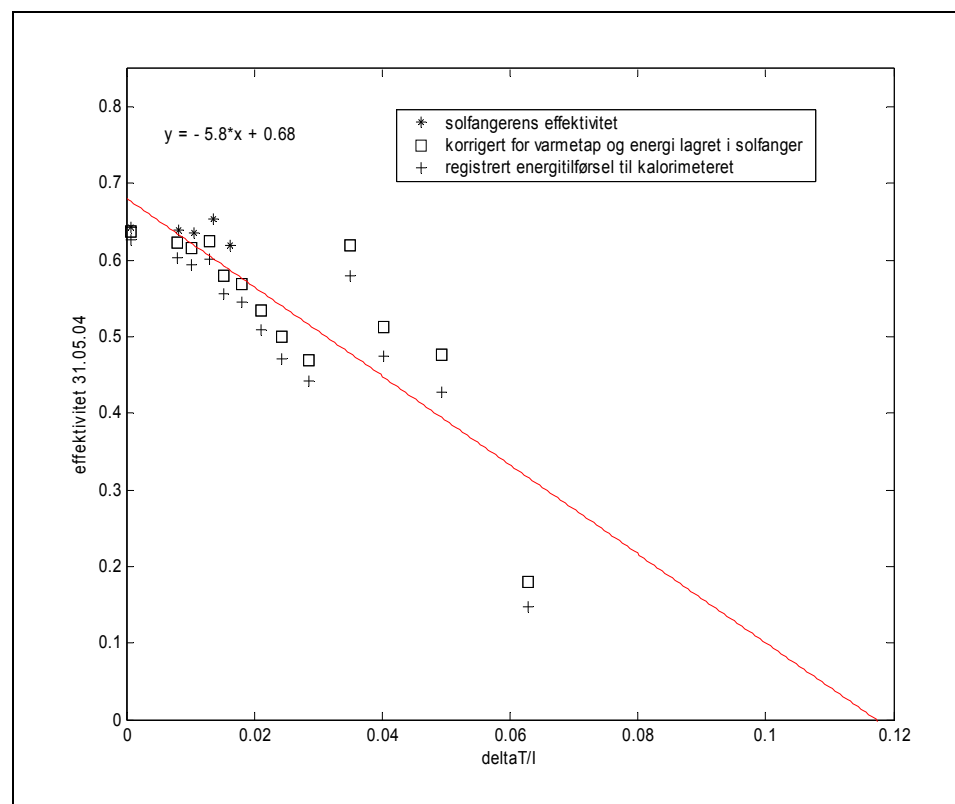
Kryssene viser den ukorrigerede systemeffektiviteten. De kvadratiske punktene viser effektiviteten når det er korrigeret for energi som er lagret i solfangeren, og for netto varmetap. Til disse punktene er det gjort en lineær tilpasning som gir

$$\eta = 0,75 - 6,1 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right)$$

Solfangerens effektivitet er vist med \*. Når innfallsvinkelen er større enn 45°, blir korreksjonene veldig usikre og det er derfor ikke gjort korreksjoner for disse punktene.

Effektivitetsplottet fra 23. mai, 2004, viste en uventa stor spredning av datapunkter. For å se om det var mulig å få mindre spredning av punktene, ble det gjort nye analyser hvor temperaturøkningen i tanken ble registrert over en lengre tidsperiode. Dette plottet hvor tidsperioden ( $\Delta t$ ) var en halv time, er vist i figur (6.14). Punkter før klokka 13:00 er utelatt, pga. at systemet da ikke var stabilisert.

Figur (6.12) viser innstråling og temperaturutvikling 31. mai, 2004. Det er en kort periode midt på dagen med svekket innstråling. Denne perioden er utelatt fra analysene. Effektiviteten beregnet for denne dagen er vist i figur (6.15).

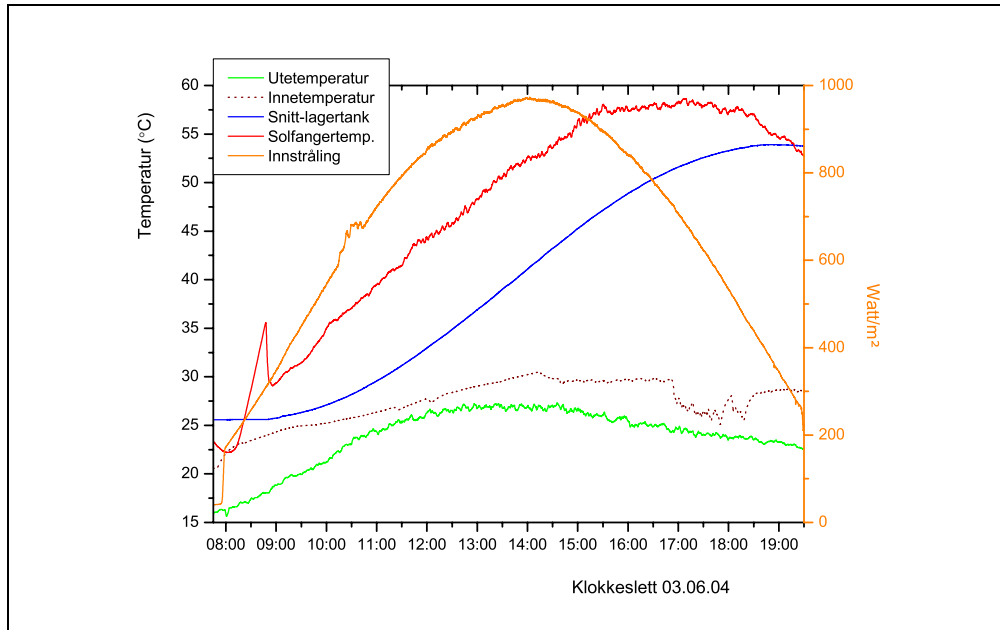


**Figur 6.15** Effektiviteten beregnet for data fra 31. mai, 2004.

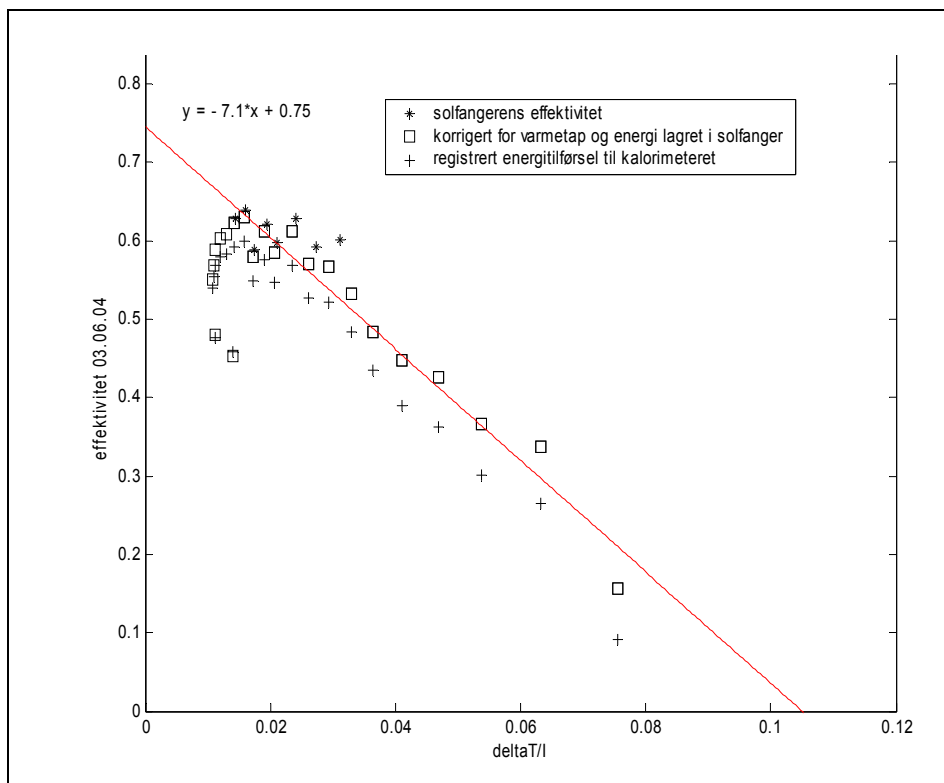
3. juni ble anlegget startet med 25°C i tanken ca. 08:45. Innstrålinga var god hele dagen og temperaturen i tanken økte til 54°C klokka 19:00. Det er vist i figur

(6.16). Effektivitetsanalysen fra denne dagen er framstilt grafisk i figur (6.17). Det er gjort en lineær tilpasning til effektivitetspunktene før korreksjonen for innfallsvinkel, og den gir

$$\eta = 0,75 - 7,1 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right).$$



Figur 6.16 Temperaturutvikling og innstråling 3. juni, 2004.



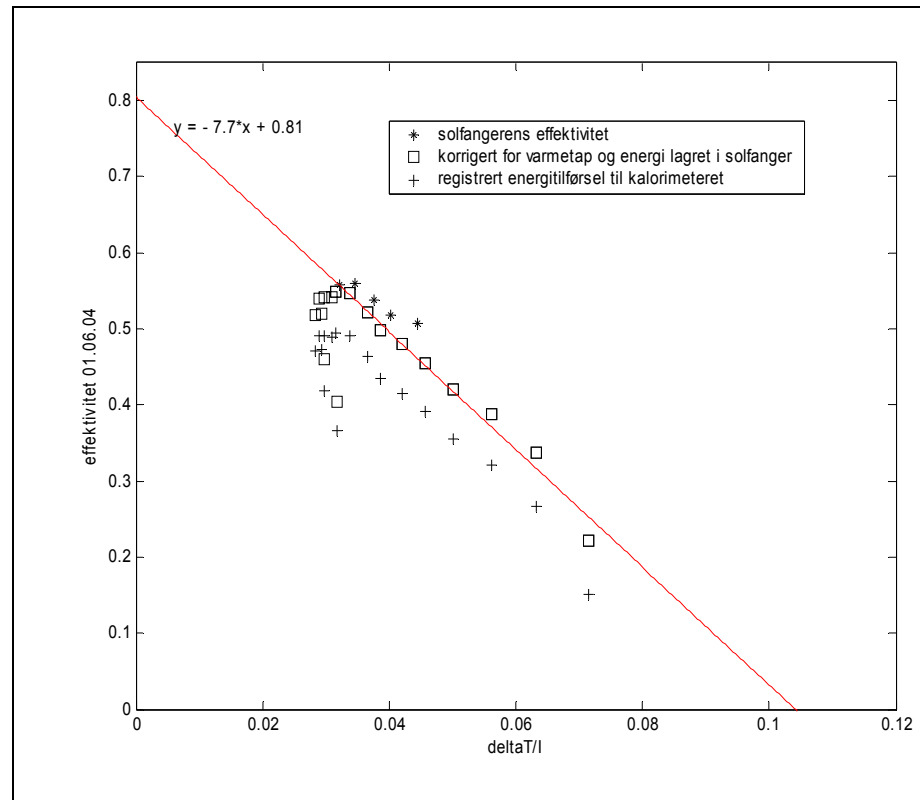
Figur 6.17 Effektiviteten beregnet for data fra 3. juni, 2004.

### Strømningshastighet 1,5 l/(min · m<sup>2</sup>)

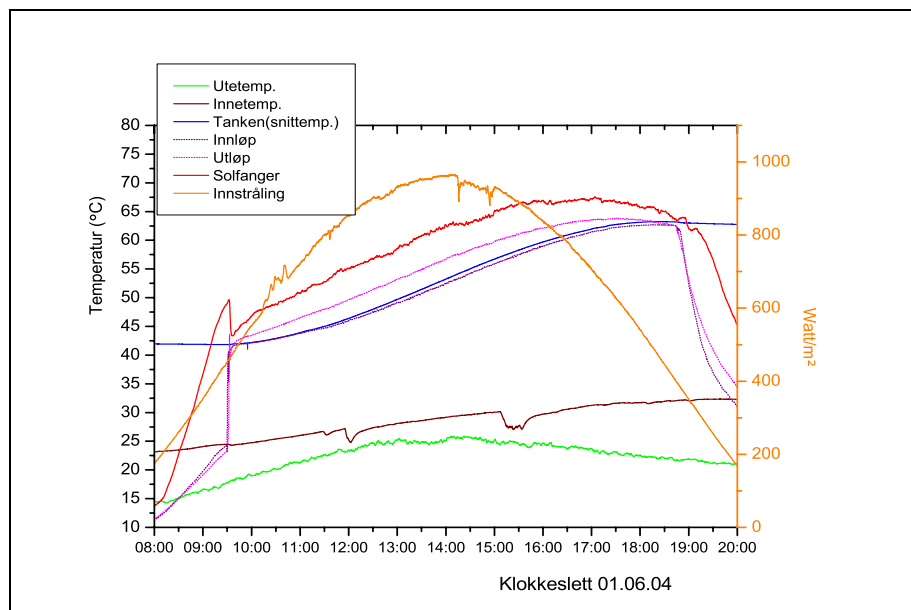
De to første dagene i juni var strømningshastigheten satt til 400l/h, og det tilsvarte 1,5 l/(min · m<sup>2</sup>). 1. juni var temperaturen i tanken 42°C ved start, og anlegget stod på auto. At anlegget stod på auto, medførte at det slod seg av når varmelageret oppnådde omtrent samme temperatur som solfangeren. Av figur (6.19) ser vi at det skjedde omkring 19:00. I denne figuren er også temperaturen på innløpet og utløpet fra solfangeren vist med stiplede linjer.

Effektivitetsanalysen for denne dagen er vist i figur (6.18). Den lineære tilpassinga som er gitt til punktene med solfangereffektiviteten (uten korreksjon for innfallsvinkel) gir

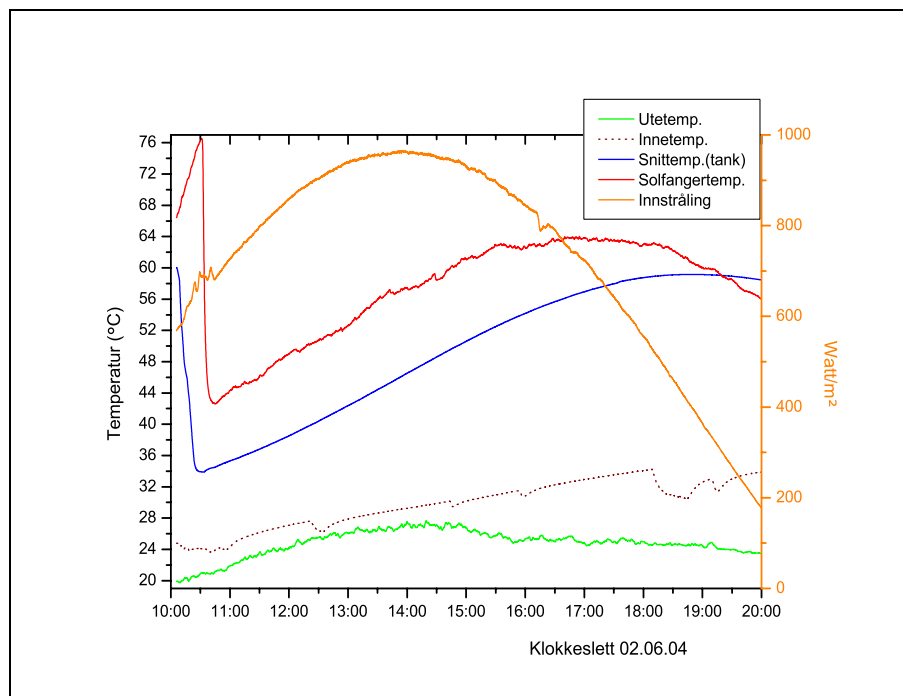
$$\eta = 0,81 - 7,7 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right)$$



Figur 6.18 Effektiviteten beregnet for data fra 1. juni, 2004.



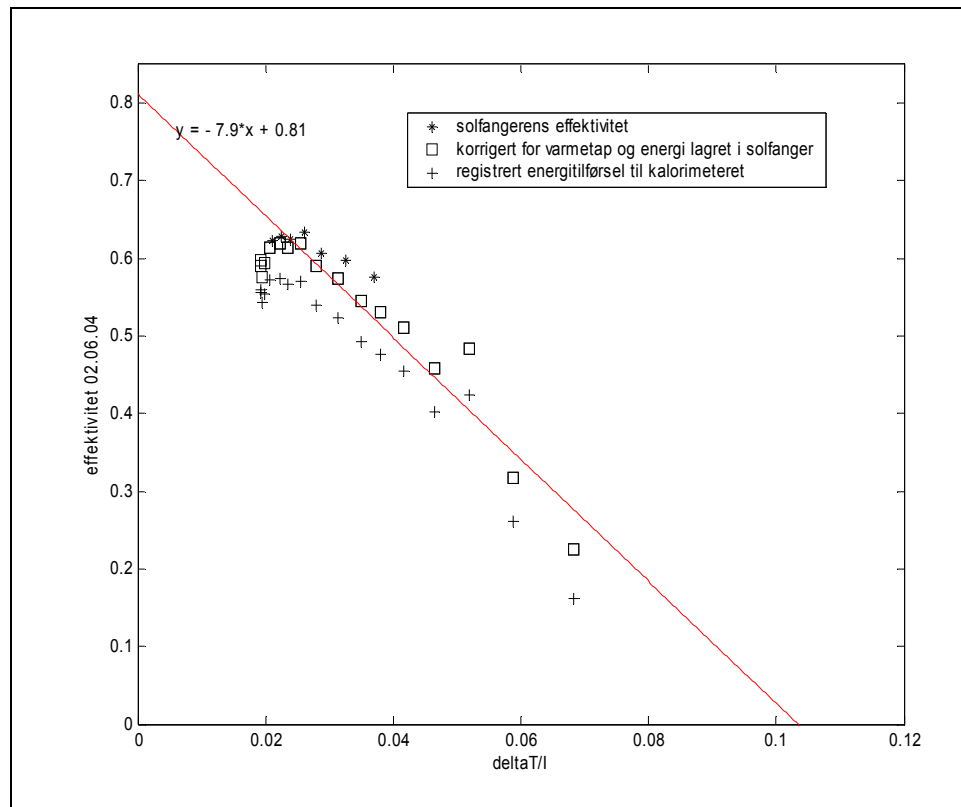
Figur 6.19 Temperaturutvikling og innstråling 1. juni, 2004.



Figur 6.20 Temperaturutvikling og innstråling 2. juni, 2004.

Temperaturutvikling og innstråling for 2. juni, er vist i figur (6.20), mens effektiviteten for denne dagen er framstilt i figur (6.21)

Den lineære tilpasningen gir  $\eta = 0,81 - 7,9 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right)$ .



Figur 6.21 Effektiviteten beregnet for data fra 2. juni, 2004.

### 6.3 Effektivitetsanalysene - oppsummering

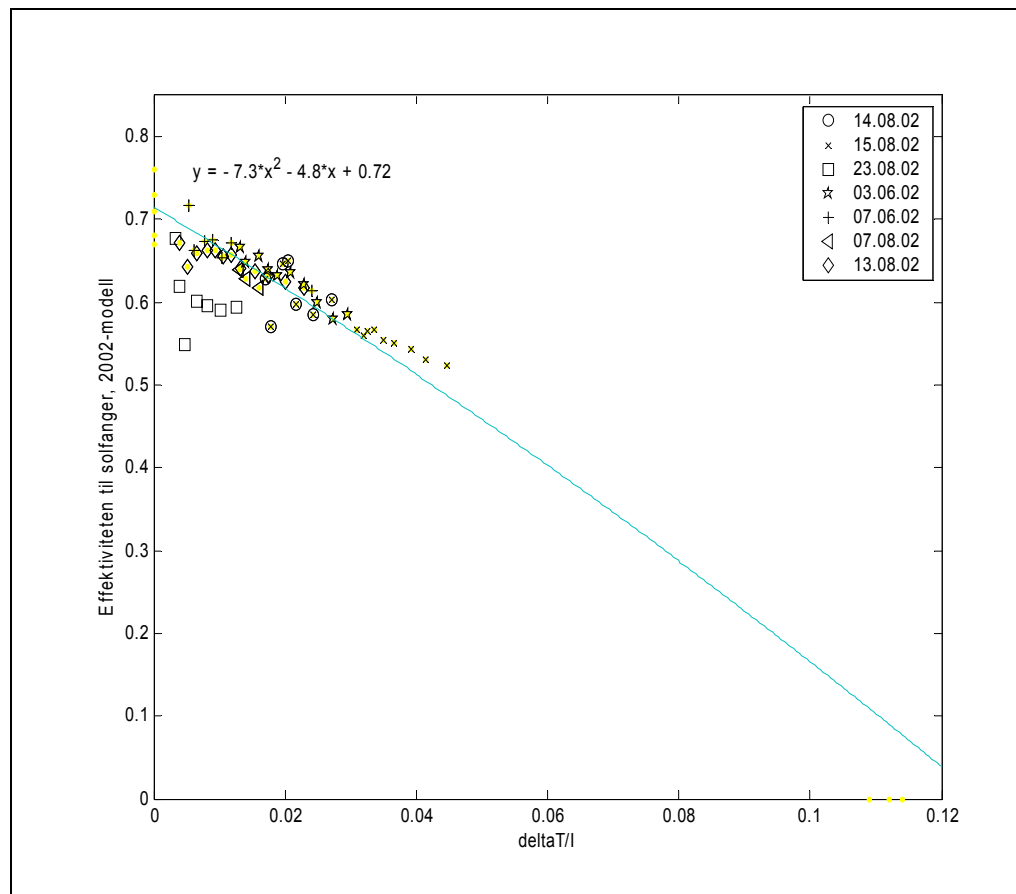
I tabell (6 – 1) har jeg samlet alle effektivitetsligningene fra 2002 og 2004. Med effektivitetsligninger mener jeg de lineære tilpasningene som er gjort til effektivitetspunktene ved minste kvadraters metode. Effektivitetspunktene er ikke korrigeret for redusert innstråling som følge av økende innfallsvinkelen utover dagen.

**Tabell 6 – 1** Effektivitetsligninger for systemet og solfangeren, beregnet uten negative punkter på x-aksen ( $\Delta T < 0$ ). En del av eksperimentdagene hadde for få punkter eller for mye sprik i punktene til å kunne gjøre realistiske effektivitetsberegninger. Det er derfor ikke gjort lineære tilpasninger til analysepunktene fra 6.juni, 7.august eller 18.september, 2002.

Dato	Strømningshastighet $l/(min \cdot m^2)$	Systemeffektivitet Ikke korrigert for $\theta$	Solfangereffektivitet Ikke korrigert for $\theta$
14.08.02	0,85	$\eta_{system} = 0,64 - 5,3\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,67 - 4,8\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
15.08.02	0,85	$\eta_{system} = 0,70 - 7,0\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,76 - 6,8\left(\frac{\Delta T}{I_k}\right)$
23.08.02	0,85	$\eta_{system} = 0,59 - 7,1\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,62 - 7,2\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
03.09.02	0,85	$\eta_{system} = 0,53 - 6,6\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,58 - 6,7\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
03.06.02	1,4	$\eta_{system} = 0,69 - 6,8\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,73 - 6,4\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
07.06.02	1,4	$\eta_{system} = 0,65 - 5,6\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,68 - 5,0\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
06.08.02	2,0	$\eta_{system} = 0,64 - 7,8\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,66 - 7,2\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
13.08.02	2,0	$\eta_{system} = 0,67 - 6,9\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,72 - 6,7\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
23.05.04	1,0	$\eta_{system} = 0,71 - 6,9\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,75 - 6,1\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
31.05.04	1,0	$\eta_{system} = 0,67 - 6,3\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,68 - 5,8\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
03.06.04	1,0	$\eta_{system} = 0,72 - 7,7\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,75 - 7,1\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
01.06.04	1,5	$\eta_{system} = 0,76 - 8,1\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,81 - 7,7\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$
02.06.04	1,5	$\eta_{system} = 0,77 - 8,2\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$	$\eta = 0,81 - 7,9\left(\frac{\Delta T}{I_m}\right)$

For å kunne sammenligne solfangerens effektivitet, er det nødvendig å se på de korrigerede verdiene. I figur (6.22) og figur (6.23) er de korrigerede effektivitetsverdiene vist for henholdsvis 2002 og 2004.

Punktene er tilpasset med lineære og annengrads polynomer. Til disse tilpasningene er det også tatt med verdier for  $\eta_0$  fra effektivitetsligningene i tabell (6 – 1), og verdier for  $\eta = 0$  funnet fra de samme ligningene. Ligningene som disse verdiene er hentet fra gjelder effektivitetspunkter beregnet uten korreksjon for innfallsvinkel.



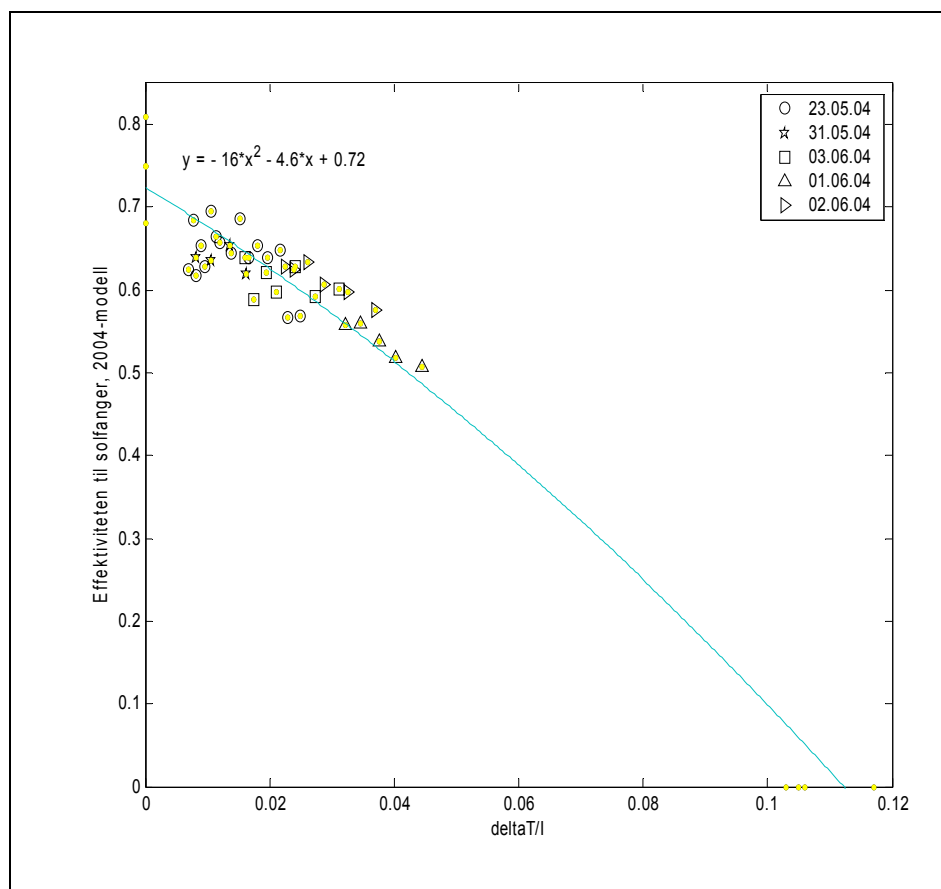
**Figur 6.22** Figuren viser korrigerede verdier for effektiviteten til solfangeren. Alle punktene gjelder modellen fra 2002. De forskjellige dagene er plottet med hvert sitt symbol. Det er tilnærmet et 2.grads polynom til punktene. I denne tilnærminga er data fra 23. august, 2002, utelatt. Det er tatt med punkter for  $\eta_0$  og for  $\eta = 0$  fra tabell (6 – 1). (Dette er diskutert i kapittel 7.)

En lineær tilpasning av punktene gir

$$\eta = 0,73 - 5,7 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right) \text{ for 2002, og}$$

$$\eta = 0,75 - 6,5 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I}\right) \text{ for 2004.}$$

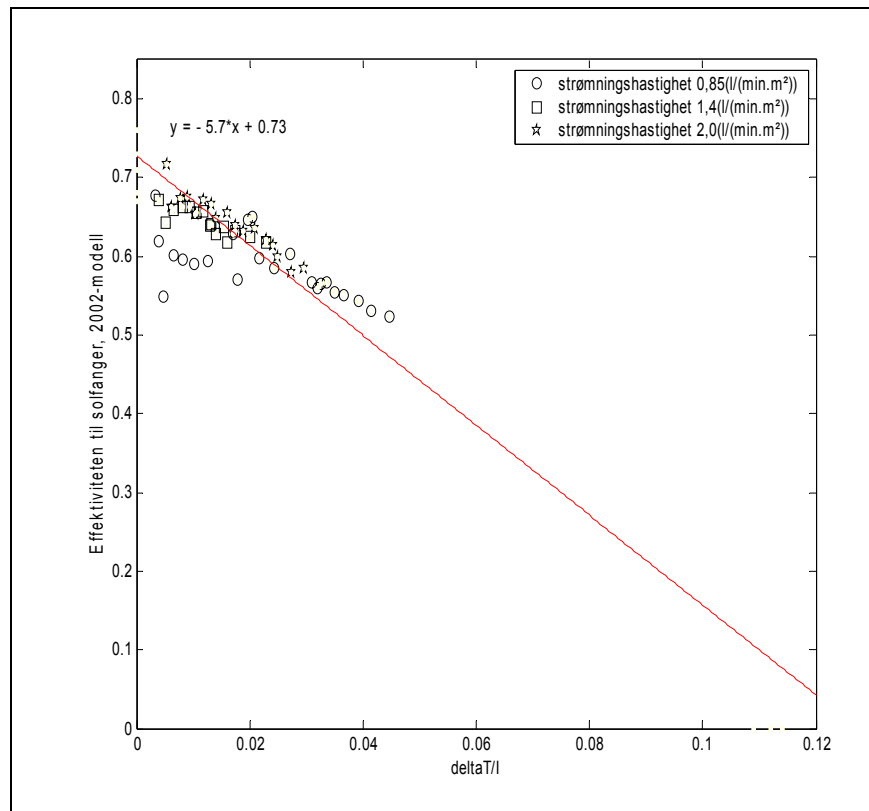
Polynom av 2.grad vil ikke være direkte sammenlignbart med data fra standard testmetoder da aksene er forskjellige.



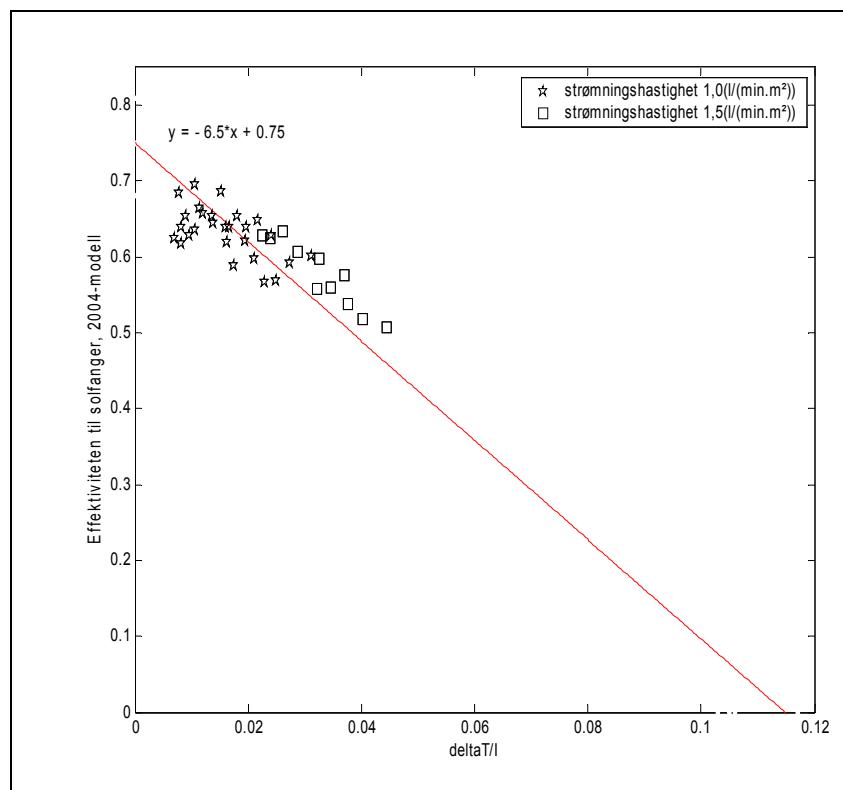
**Figur 6.23** Figuren viser effektivitetsdata fra 2004. Data fra de fem forskjellige dagene er plottet med hvert sitt symbol. Det er tilnærmet et 2.grads polynom til alle punktene. Det er tatt med punkter for  $\eta_0$  og for  $\eta = 0$ , fra tabell (6 – 1). (Dette er diskutert i kapittel 7.)

I figurene (6.24) og (6.25) har punkter med lik strømningshastighet, like symboler. I 2002 var det tre forskjellige strømningshastigheter, i 2004 var det to.





**Figur 6.24** Figuren viser solfangereffektiviteten for 2002-modellen.



**Figur 6.25** Figuren viser solfangereffektiviteten for 2004-modellen.

**Teoretisk verdi**

Absorpsjonskoeffisienten til absorptorplata er  $\alpha = 0,945$ , og transmisjonskoeffisienten for dekkplata er  $\tau = 0,85$ .

Det betyr at  $(\tau\alpha) = 0,80$ .

På grunn av tilbakerefleksjon fra dekkplata vil  $\eta_0$  være omtrent 1% større enn  $(\tau\alpha)$   
(Duffie & Beckman, 1991).

$$\eta_0 \cong 1,01\tau\alpha = 0,81$$

blir dermed den høyest mulige effektiviteten for den type solfanger som eksperimentene har blitt utført på.

**Usikkerhet i analysepunktene**

I en eksperimentell oppgave som er satt sammen av mange elementer, er det mye som kan bidra til usikkerhet i resultatene.

For å få et klarere bilde av usikkerheten, kan vi ta for oss analysepunktene hver for seg. I vårt tilfelle finnes usikkerheten i analysepunktene ved

$$\left(\frac{\Delta\eta}{\eta}\right)^2 = \left(\frac{\Delta A_1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_2}{A_2}\right)^2 + \dots \quad (6.3)$$

$$\text{for } \eta = \frac{\Delta Q_{lager}}{\Delta Q_{inn}} = \frac{A_1 A_2}{A_3 A_4}$$

$$\text{og } (\Delta m c_{lager})^2 = (\Delta m c_{vann})^2 + (C_{tank, roer, isolasjon})^2$$

(Squires, 1985)

**Eksempel fra 3.juni, 2004:****Tabell 6 – 2** Beregning av usikkerhet i virkningsgraden for utvalgte punkter, 3.juni, 2004.

Klokkeslett	9:45-10:05	13:55-14:15	16:25-16:45	18:30-18:50
$mc_{vann} \cdot \left[ \frac{kJ}{K} \right]$	1947,554 ±0,008	1947,087 ±0,008	1948,066 ±0,008	1948,859 ±0,008
$C_{tank, roer, isolasjon} \left[ \frac{kJ}{K} \right]$	55 ±6	55 ±6	55 ±6	55 ±6
$\Delta T_{lager} [^{\circ}C]$	0,61 ±0,08	1,42 ±0,08	0,85 ±0,08	0,09 ±0,08
$A_i [m^2]$	4,23 ±0,07	4,23 ±0,07	4,23 ±0,07	4,23 ±0,07
$I_m \cdot \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	529 ±15	969 ±29	769 ±23	408 ±12
$\langle T \rangle [^{\circ}C]$	27,05 ±0,09	41,69 ±0,09	50,72 ±0,09	53,88 ±0,09
$\eta_{system}$	0.45766	0.5761	0.43484	0.090811
$\Delta \eta_{system}$	<b>0,080</b>	<b>0,073</b>	<b>0,064</b>	<b>0,081</b>

**Usikkerhet i lineære tilpasninger.**

Det er gjort lineære tilpasninger til analysepunktene fra de forskjellige dagene, med minste kvadraters metode.

Man får da en ligning  $\eta = \eta_0 - Ux$ , hvor  $x = \frac{\Delta T}{T}$ ,

som skal uttrykke hvordan effektiviteten endrer seg med varierende  $\frac{\Delta T}{T}$ .

Den generelle usikkerheten til ligningen man får med denne metoden, er gitt som

$$(\Delta U)^2 \approx \frac{1}{D} \cdot \frac{\sum d_i^2}{n-2} \quad (6.4)$$

$$(\Delta \eta_0)^2 \approx \left( \frac{1}{n} + \frac{\langle x \rangle^2}{D} \right) \frac{\sum d_i^2}{n-2} \quad (6.5)$$

med  $d_i = y_i - Ux - \eta_0$ ,

og  $D = \sum (x_i - \langle x \rangle)^2$ .

Disse ligningene er utarbeida for tilfeller hvor usikkerheten ligger i y-verdien. I vårt tilfelle har vi usikkerhet også i x-verdiene. Imidlertid er det slik at den lineære tilpasningen som oftest blir god selv om ikke usikkerheten i x-verdiene blir tatt hensyn til.

## 6.4 Daglig energiutbytte

Den totale energitilførselen i løpet av en dag, har blitt beregnet for fire forskjellige dager. Energien som varmelageret har mottatt, ble beregnet ut fra lagerets temperatur ved oppstart og temperaturen når systemet ikke lenger ble tilført energi.

**Tabell 6 – 3** Tabellen viser den daglige effektiviteten. Energien som lageret har mottatt, er sett i forhold til innstrålinga hele dagen 15. august i 2002 og 23. mai i 2004. Forholdet mellom innstråling i driftsperioden og temperaturøkninga i samme periode er beregnet for alle dagene

Dato	Effektiviteten -beregnet for den perio- den anlegget var i drift	Effektivi- teten/m <sup>2</sup>	Effektiviteten -beregnet for hele dagen	Effektivi- teten/m <sup>2</sup>
15.08.02	0,40	0,07	0,37	0,06
14.08.02	0,54	0,10		
23.05.04	0,55	0,13	0,40	0,09
02.06.04	0,50	0,12		

---

# 7 Diskusjon og konklusjon

## 7.1 Effektivitetsanalysene

Målet med denne oppgaven var å vurdere ulike måter å forbedre effektiviteten til solfangere på.

Det har blitt utført eksperimenter over to sesonger, fra mai til september i 2002 og i mai og juni i 2004 med to forskjellige solfangermodeller.

Resultatene viser at det er nødvendig med eksperimentdager hvor solinnstrålinga er helt uavbrutt av skyer. Dessuten viser effektivitetsanalysene at systemet trenger en veldig lang stabiliseringstid, opptil fire timer.

Ved å studere innstrålingskurver og temperaturutvikling sammen med effektivitetsplottene ser man at gode eksperimentdager ofte gir effektivitetsplot med lite spredning av punktene.

Dette vises tydelig i figurene med temperaturutvikling og effektivitet fra f.eks 15. august i 2002 (figurene (6.1) og (6.2)), eller fra 1. og 2. juni i 2004 (figurene (6.18) til (6.21)).

Eksperimenter utført på dager med sol fra skyfri himmel gir dermed gode sjanser til å finne effektiviteten til solfangeren.

Figur (6.11) fra 23. mai i 2004 viser en uavbrutt innstråling og en jevn temperaturøkning i tanken hele dagen. Allikevel får vi et effektivitetsplot med stor spredning i punktene. I figur (6.14) er det vist et effektivitetsplot fra den samme dagen, men her er temperaturøkningen beregnet over 30 minutter istedenfor 20 min. Vi ser at dette gir betraktelig mindre spredning av punktene, men at de allikevel ikke følger hverandre helt lineært slik som forventet. Årsaken til dette har ikke blitt lokalisert.

### 7.1.1 2002 modell kontra 2004

I 2002 ble en ny solfangermodell utviklet i samarbeid med General Electric Plastics. I modellene forut for denne hadde absorlatorplatene kanaler som var fylt med små keramiske kuler. Hensikten med kulene var å bedre varmeoverføringen. I den nye absorlatorplata som ble tatt i bruk i 2002, var kanalene gjort mye mindre og kulene utelatt. Resultatet er en plate som veier lite og er lett håndterlig.

Etter erfaringene som ble gjort ved bruk av 2002-modellen, ble det gjort endringer i utformingen av absorlatorplatene. En ny solfangermodellen ble tatt i bruk våren 2004. Endringene gikk på å sikre at vannet skulle presses helt opp til toppen av solfangeren før det rant ned igjen gjennom midtkanalen for å se om

---

effektiviteten ble bedre. I tillegg hadde kanalene i absorberplate en mer rektangulærform i 2004-modellen mot en halvsirkelform i den første modellen fra 2002.

Etter nærmere analyser av data fra 2002 og 2004, ser det ikke ut til at forskjellene er så store som først antatt, men solfangerne fra 2004 har en litt høyere effektivitet enn den første modellen fra 2002.

Effektivitetsligningene fra 1. og 2. juni i 2004, har  $\eta_0 = 0,81$ . Det er identisk med den teoretiske verdien for  $\eta_0$ .

Effektivitetsligningene gjelder verdier som ikke er korrigert for innfallsvinkel. De beste verdiene for effektiviteten fra 2002 er  $\eta_0 = 0,76$  for 15. august og  $\eta_0 = 0,73$  for 3. juni. Siden effektivitetsligningene er tilpasset punkter hvor korreksjonen for innfallsvinkel ikke er gjort, kan man forvente å få høyere effektivitet.  $\eta_0$  behøver imidlertid ikke å bli høyere, da korreksjonen for innfallsvinkel ofte gir lavere verdi på stigningstallet og dermed lavere  $\eta_0$ .

I figur (6.23) og figur (6.25) er alle punktene fra 2004 hvor det var mulig å gjøre korreksjoner for innfallsvinkel, tatt med. Figurene (6.22) og (6.24) er tilsvarende for effektivitetspunkter fra 2002. En lineær tilpasning til disse punktene gir en høyere effektivitetsligning for 2004 i forhold til 2002.

Maksimalverdien for  $\eta_0$  og  $\Delta T/I$  ved  $\eta = 0$  er bestemt av materialene i absorberplate og i dekkplate. For å gjøre tilnærmingene mer realistiske, har jeg valgt å ta med verdiene for  $\eta_0$  og  $\eta = 0$  i de lineære tilpasningene i figur (6.22) til (6.25). Verdiene er hentet fra effektivitetsligningene og gjelder punkter som ikke er korrigert for innfallsvinkel. Disse punktene vil ikke være direkte overførbare, men de vil ligge i omtrent samme område.

## Daglig energiutbytte

Ser vi på det daglige energiutbyttet for to dager i 2002 og 2004, ser vi at også her er effektiviteten høyere for den nyeste modellen.

I eksperimentene fra 2002 er effektiviteten for 15. august er på 0,40 og på 0,37 hvis vi integrerer innstrålinga over hele dagen.

14. august er den på 0,54 beregnet i driftsperioden. Per  $m^2$  er effektiviteten for 15. august på 0,07 og 0,06, mens den er på 0,10 for 14. august (solinnstrålinga er integrert i driftsperioden).

I 2004 gir beregninger av data fra 2. juni en effektivitet på 0,50 og 0,12 regnet per  $m^2$ .

23. mai var effektiviteten i driftsperioden 0,55 og effektiviteten for hele dagen var på 0,40. Regnet per  $m^2$  var den på henholdsvis 0,13 og 0,09.

Beregningen av det daglige energiutbyttet er ikke gjort under like forhold. Det var stor forskjell i temperaturen på vannet om morgenen. 15. august, 2002 var temperaturen i lageret  $37^\circ\text{C}$  ved oppstart og 2. juni i 2004 var den på  $34^\circ\text{C}$ .

---

14. august, 2002 var temperaturen 18°C og 23. mai, 2004 var den 11°C da anlegget ble startet. Vi ser at den dagen med lavest temperatur på vannet ved oppstart har den høyeste dagseffektiviteten. Dagen med høyest temperatur på vannet ved oppstart har lavest effektivitet.

Det vil være naturlig å forvente at en lav temperatur ved start gir bedre mulighet til å utnytte energien når det er hele systemets effektivitet vi ser på.

### 7.1.2 Strømningshastighet

Fra produsenten av solfangerne (Solarnor, 2003) er det oppgitt en strømningshastighet på  $1,0\text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ .

Analysene fra 2002 viser en veldig svak økning i effektiviteten ved redusert strømningshastighet. Forsøkene som ble utført i 2004 viser på den annen side en svakt forbedret effektivitet med en strømningshastighet på  $1,5\text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  i forhold til  $1,0\text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ .

Resultatene viser dermed at strømningshastigheten ikke er avgjørende for effektiviteten av disse solfangermodellene.

### 7.1.3 Tidligere modeller av plastsolfangere

Det har vært utført analyser ved sollabben tidligere på andre typer plastsolfangere.

I 1998 og 1999 ble det utført flere tester av en lignende solfangertype med leca-kuler inni kamrene. Leca-kulene var der for å bedre varmeavgivelsen til vannet.

Effektivitetskurvene fra disse forsøkene, varierer mye i begge leddene, men verdiene ligger i samme område som ligningene fra 2004. (Imenes, 1999)

I tidligere tester har korreksjonene for innfallsvinkel ofte gitt en merkbar forbedring i effektivitetsligningene. Hvis det blir funnet bedre måter å korrigere for innfallsvinkelen i effektivitetstester av de nyeste solfangerne, vil sammenligningen bli enklere.

#### **Lineær tilpasning**

Energien som sendes ut fra et legeme med en viss temperatur  $T$ , er proporsjonal med  $T^4$ . Varmetapet vil derfor øke med økende temperaturforskjell mellom lageret og omgivelsene. En lineær tilpasning gir derfor ikke et riktig bilde når lagertemperaturen blir veldig høy. Jeg har likevel valgt å oppgi effektivitetslig-

---

ningene som ligninger av 1. orden, for å gjøre muligheten til å sammenligne, større.

Jeg har gjort tilpasninger med 2.grads polynomer til solfangereffektiviteten i figurene (6.22) og (6.23).

Ved å sammenligne de to første leddene med effektivitetsligning beregnet ved ITW (Collector test report, DIN 4757, 1998) ser det ut til at effektiviteten er litt lavere for de nye solfangerne ( $\eta_0 = 0,77$  mot  $\eta_0 = 0,72$ , og

$k_1 = 4,88(W/(m^2K))$  mot  $k_1 = 4,6(W/(m^2K))$  i 2004).

Tidligere studier (blant annet Imenes, 1999) viser at varierende værforhold fra dag til dag, kan påvirke resultatene. Man vil sjelden få helt entydige resultater. Dette kan gjøre det vanskelig å sammenligne forskjellige parametre. Dette er en svakhet med den kalorimetriske metoden hvis målet er å kunne gjøre nøyaktige sammenligninger. På den annen side ser det ut til at effektiviteten for den nyeste solfangermodellen, er vanskelig å finne med standardmetoder (Rekstad, muntlig meddelelse).

## 7.2 Varmekapasitet til solfangeren

Ved utregningene av varmekapasiteten til solfangeren fant jeg verdier fra 120 til 206  $kJ/K$ , med en snittverdi på 163  $kJ/K$  som samsvarer godt med verdien på 166  $kJ/K$  gitt fra ITW.

I beregningene av solfangerens varmekapasitet, sammenlignet jeg temperatursenkningen på solfangeren med temperaturøkningen i tanken innafor samme tidsintervall. Å finne temperaturdifferansen på solfangeren bød ikke på problemer, men å finne den aktuelle temperaturøkningen i tanken var vanskeligere. Solfangerne fikk stå eksponert for solinnstråling før anlegget ble satt i gang. Da vannet begynte å sirkulere var solfangerne fortsatt eksponert for solinnstråling. Temperaturen på solfangerne begynte derfor å øke igjen straks etter at det kalde vannet hadde tatt med seg den opplagrede energimengden. Dette førte videre til at temperaturen i varmelageret fortsatte å øke etter temperaturøkningen som skyldtes energitilførsel fra solfangeren.

For å få bedre resultater kunne man sørge for at solfangeren ikke lenger ble eksponert for sol når anlegget ble igangsatt.

ITW-verdien jeg brukte var beregnet teoretisk ut fra effektivitetsanalyser. Den var beregnet for en solfanger fra 2002. I 2004 var solfangerne kortere og kamrene hadde litt annerledes utforming. Dette gjør at verdien for 2004 er usikker.



---

## 7.3 Varmetapseksperimenter

Varmetapseksperimenter ble satt i gang for å få et bedre mål på mengden energi som tapes og tilføres. Den ga en effekt fra pumpa når temperaturen på vannet og omgivelsene var like, på  $90\text{ W}$ . Dette samsvarte godt til pumpeeffekt oppgitt av produsenten.

Ved teoretiske beregninger av varmetap og -tilførsel skal varmen som pumpa overfører til vannet beregnes. Energien som tapes pga. temperaturforskjellen mellom lageret og omgivelsene må beregnes. Varme som tapes fra tanken, er avhengig av isolasjonen. Fra rørene vil energitapet være avhengig av lengden på rørene og hvor godt de er isolert. Det betyr at det er mange kilder til usikkerhet.

Det vil være et varmetap fra solfangerne også mens vannet sirkulerer der. Ved de eksperimentelle varmetapsberegningene, fikk jeg målt tilførselen fra pumpa samtidig med tap fra tanken og rørene. På den måten ble noe av usikkerheten eliminert.

Svakheten i forsøket ligger i at tapet bare er målt for rørene som går på innsiden av hytta. De delene av rørene som er utenfor hytteveggen er ikke med i beregningene. Varmetap fra solfangerne blir heller ikke målt i forsøket.

Selv med disse svakhetene, tror jeg eksperimentet gir et bedre bilde av det totale varmetapet enn teoretiske beregninger.

Varmetapseksperimentene er utført to forskjellige dager og de har gitt opphav til analysepunkter rundt  $\Delta T_{l-i} \approx 27\text{ K}$  og  $\Delta T_{l-i} \approx 19 - 20\text{ K}$ .

Det optimale ville vært å hatt analysepunkter i hele området fra  $0\text{ K}$  og opp til iallfall  $40\text{ K}$ . Da ville man kunne se om en lineær tilpasning gir gode resultater i hele området.

## 7.4 Måling av solinnstråling

- og korreksjoner for  $\theta$ .

Flere av analysene har vist at en stabiliseringstid på opptil fire timer kan være nødvendig for en tank på nesten  $0,5\text{ m}^3$ . Korreksjonene for synkende transmisjon i dekkplata med økende innfallsvinkel har normalt bare blitt gjort for vinkler opp til  $45^\circ$ . Noe som tilsvarer omtrent tre timer før og tre timer etter 12:00 soltid.

Fra alle eksperimentdagene hadde det vært ønskelig med flere analysepunkter som kunne korrigeres for innfallsvinkel. For å oppnå dette, måtte systemet ha stabilisert seg før innfallsvinkelen sank under  $45^\circ$ . Det kan imidlertid være vanskelig å få til i praksis.

---

Ut fra et ønske om å kunne bruke flere av analysepunktene, ble det sett på mulige årsaker til at utslagene i korreksjonene for innfallsvinkelen, blir så store når  $\theta$  øker.

### **Solarimeteret**

I solarimeteret er den oppgitte usikkerheten på 3%. Sammenligning av kjente innstrålingsmaksimum med de kalibrerte verdiene tyder på at usikkerheten er en del større etter kalibrering.

### **Diffus stråling**

Det er kun for strålene som kommer direkte fra sola, ikke for de som har blitt spredt, at transmisjonen vil variere etter hvilken tid på dagen det er. Jo seinere på dagen det er, jo høyere andel diffus (spredt) stråling vil vi ha. For å unngå for store korreksjoner ble det valgt å la 30% av innstrålinga være ukorrigert. Midt på dagen vil andelen diffus stråling være lavere, men på denne tida av dagen er også korreksjonene veldig små.

Solspekteret har en forholdsvis stor andel stråling i områdene 1100-1400nm og 1500-1800nm. Den relative andelen øker med perioder lengre vekk fra middag soltid. Lexan-plata transmitterer mest mellom 380 og 2000 nm. (General Electric, 1998)

Et vanlig solarimeter registrerer stråling fra 300nm, stigende til 1000nm og faller så brått til 0 ved 1200nm. (King og Myers, 1997)

Dette kan bety at en del av strålinga seint på dagen, ikke blir registrert av solarimeteret, og at dette også bidrar til at korreksjonene blir for store.

For å bringe klarhet i dette, kunne innstrålinga blitt målt med et pyranometer som gir bedre måleresultater over en større del av spekteret.

## **7.5 Kalibrering av temperatursensorene**

Beregninger av usikkerhet i analysepunktene viser at temperatursensorene bidrar vesentlig til en stor usikkerhet i hvert enkelt analysepunkt. Det er en usikkerhet i sensorene som varierer med kvaliteten på sensorene. I tillegg må sensorene kalibreres med full kabellengde for å ta hensyn til motstand i kabelen. Sensorene ble kalibrert mot et kvikksølvtermometer hvor selve avlesningen la begrensninger på nøyaktigheten.

Når vi er opptatt av små temperaturintervaller i effektivitetsanalysene, kan dette gi store utslag på usikkerheten.

Imidlertid er det slik at de enkelte analysepunktene er mindre viktig enn sammenhengen mellom punktene, og usikkerheten i et enkelt punkt er av mindre betydning.

---

## 7.6 Sluttkommentar

Ved å gjøre forbedringer har den siste solfangermodellen fått høynet effektiviteten. Selv om effektiviteten ikke er bedre enn tidligere modeller, har den andre fordeler som gjør at det er verdt å satse kommersielt på den.

De viktigste momentene er at den er lett og at den tåler fysiske og kjemiske påkjenninger godt.

Den kalorimetrisk metoden egner seg godt til å beregne effektiviteten av solfangeren, spesielt hvis det er mulig å finne bedre måter å korrigere for redusert transmisjon som følge av økende innfallsvinkel.

Målinger av hele systemets effektivitet er enkle og anvendelige i praktisk (kommersielt bruk).

Så lenge den nye solfangermodellen har en rekke fordeler framfor tidligere modeller, er ikke effektiviteten av så stor betydning. Det kan derfor være en fordel å satse på effektivitetstester av systemer, og gjøre disse ved forskjellige værtyper og til forskjellige tider på året.



---

# Nomenklatur

## -for kapitlene 4 til 7

$A$	Totalt bestrålt solfangerareal [ $m^2$ ]
$C_{lager}$	Varmekapasiteten til hele lageret [ $\frac{J}{K}$ ]
$C_{sf}$	Varmekapasiteten til fem solfangere [ $\frac{J}{K}$ ]
$C_{tank, roer, isolasjon}$	Den totale varmekapasiteten til tanken, rørene, isolasjonen og pumpe [ $\frac{J}{K}$ ]
$I_k$	Innstråling korrigert for innfallsvinkel [ $\frac{W}{m^2}$ ]
$I_m$	Innstråling målt med solarimeter [ $\frac{W}{m^2}$ ]
$m_{vann}$	Massen av vannet brukt som varmelager [ $kg$ ]
$(mc_p)_{vann}$	Varmekapasiteten til vannet [ $\frac{J}{K}$ ]
$\Delta Q_{sf}$	Energimengde lagret i solfangerne [ $J$ ]
$\Delta Q_{lager}$	Økning (eller reduksjon) i energimengden i varmelageret [ $J$ ]
$\Delta Q_{inn}$	Energimengden inn på solfangerne [ $J$ ]
$\Delta Q_{(inn, m)}$	Energimengden inn på solfangerne [ $J$ ] Ukorrigerte verdier, innstrålingen er ikke korrigert for $\theta$ .
$\Delta Q_{tap}$	Totalt varmetap og -tilførsel fra tank, rør og pumpe [ $J$ ]
$\Delta t$	Tidsintervall [ $s$ ]
$T_{inne}$	Innetemperaturen [ $^{\circ}C$ ]
$T_{lager}$	Temperaturen i varmelageret [ $^{\circ}C$ ]
$T_{stag}$	Stagnasjonstemperaturen til solfangeren [ $^{\circ}C$ ]
$T_{sf}$	Temperaturen på solfangeren [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ute}$	Utetemperaturen [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta T_{lager}$	Temperaturendring i varmelageret [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta T_{sf}$	Temperaturendring på solfangeren [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta T_{(l-i)}$	Forskjellen mellom temperaturen i lageret og inne i sollabben [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta T_{(l-u)}$	Forskjellen mellom lagerets temperatur og utetemperaturen [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta T_{(u-i)}$	Temperaturforskjellen mellom utløp og innløp til solfangeren [ $^{\circ}C$ ]

---

$U$	Varmetapskoeffisienten $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
$\alpha$	Absorptansen (til absorbatorplata).
$\beta$	Planets helning
$\delta$	Deklinasjonen
$\varepsilon$	Emmisiviteten (til absorbatorplata)
$\gamma$	Asimutvinkelen
$\lambda$	Ledningsevnen $\left[\frac{W}{mK}\right]$
$\eta$	Effektiviteten til solfangeren
$\eta_0$	Effektiviteten for $\frac{\Delta T}{T} = 0$
$\eta_{system}$	Effektiviteten for hele systemet
$\rho_{vann}(T)$	Vannets tetthet (temperaturavhengig)
$\theta$	Innfallsvinkel (Mellom normalen til solfangeren og direkte innstråling)
$\tau(0)$	Transmisjonen når strålene kommer vinkelrett på solfangeren.
$\tau(\theta)$	Transmisjonen ved en innfallsvinkel $\theta$
$\varphi$	Breddegrad
$\omega$	Timevinkel

---

## Referanser

Bath TD, Renne D (1994)

Solar Radiation Data Manual for Buildings. Renewable Resource Data Center (RReDC) [online]. Tilgjengelig fra: [http://rredc.nrel.gov/solar/old\\_data/nsrdb/bluebook/](http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/bluebook/) [Hentet 12.august, 2004]

Brahde R (1970)

Solas stilling i Norge. Tabeller som gir retningen til sola, beregnet for 204 steder, gjennom hele året. Universitetsforlaget.

Cristofari C, Notton G, Poggi P, Louche A, 2002

Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector. Solar Energy Vol.72, No.2, 99-112.

Duffie JA, Beckman WA (1991)

Solar engineering of thermal processes. Second edition. John Wiley & Sons Wiley-Interscience, New York

ELFA (2002)

Miljøinstrument, kopi av side 1663 og 1665. Mer informasjon er tilgjengelig [online] fra: <http://www.elfa.se>

Energistyrelsen (2003)

Energiforbruget falt i 2002. [online] Tilgjengelig fra: [http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Statistik/stat\\_02/03\\_Hurtigt\\_overblik.htm](http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Statistik/stat_02/03_Hurtigt_overblik.htm) [Hentet 12. mai 2004]

Fischer & Porter (1998)

Fischer & Porter GmbH, datablad, 1998.

GEFLEX AS (2002)

GLAVAFLEX® F Tubes. Product data, oct.2002

General Electric (1998)

GE Structured Products. Techn.sheet, Man LTC/Eng/5M/0698 BG4883

Gundersen P (2002)

Energifleksible, lavtemperatur varmeanlegg. Prosjektrapport 317, BYGG-FORSK, Norges byggeforskningsinstitutt.

Imenes AG (1999)

Effektivitetsanalyse for termisk solenergianlegg ved kalorimetrisk metode. Hovedfagsoppgave i fysikk, Norges Landbrukshøgskole

Hansen VT, Grimenes AA (2003)

Meteorologiske data for Ås 2002. Institutt for tekniske fag, Norges landbrukshøgskole [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.nlh.no/imt/fagklim/Mai04.pdf> og <http://www.nlh.no/imt/fagklim/metdata2002.pdf> [Hentet, august, 2004]

- 
- Henden L (2000)  
Design and performance studies of a polymer solar collector.  
Doktorgradsoppgave, fysisk Institutt, Universitete i Oslo
- Henden L, Rekstad J, Meir M (2001)  
Thermal performance of combined solar systems with different collector efficiencies. *Solar Energy* Vol.72, Issue 4, 299-305.
- Hille J (2003)  
Solenergi. [online] Tilgjengelig fra: <http://ide.idebanken.no/Redskapsbua/solstart.html> [Hentet 12. mai 2004]
- Holter Ø, Ingebretsen F, Parr H (1998)  
Fysikk og energiressurser. 2.utgave. Universitetsforlaget, Oslo
- King DL, Myers DR (1997)  
Silicon-photodiode pyranometers: Operational characteristics, historical experiences, and new calibration procedures. 26th PVSC, Anaheim, CA.
- Kittel C, Kroemer H (2000)  
Thermal Physics. Second edition. Freeman and company, USA.
- Meir M, Rekstad J (2003)  
Der Solarnor Kunststoffkollector - the development of a polymer collector with glazing, i Proceedings of polymeric solar materials. Erstes Leobener Symposium, Leoben.
- Meir M, Rekstad J, Peter M, Henden L, Sandnes B (2000)  
Determination of the performance of solar systems with the calorimetric method. *Solar Energy* Vol.73, Issue 3, 195-207.
- Morrison GL (2001)  
Solar collectors, i: Solar energy, the state of the art, ISES position papers. Gordon J (ed.). James & James Ltd, UK
- Natur- og miljøleksikon (1991)  
Kunnskapsforlaget, utgitt i samarbeid med Norges naturvernforbund, Oslo.
- Perez R, Aguiar R, Collares-Pereira M, Dumortier D, Estrada-Cajigal V, Gueymard C, Ineichen P, Littlefair P, Lund H, Michalsky J, Olseth JA, Renné D, Rymes M, Skartveit A, Vignola F, Zelenka A (2001)  
Solar resource assessment: A review, i: Solar energy, the state of the art, ISES position papers. Gordon J (ed.). James & James Ltd, UK
- Rekstad J (2001)  
Forelesninger i FYS 375 ved UiO, høsten 2001.
- Rekstad J (2003)  
Energifleksible oppvarmingssystemer. SOLARNOR AS og Universitetet i Oslo
- Salvesen F (2001)  
Nye fornybare energikilder. Revidert utgave (2.utgave). Utgitt av Norges forskningsråd i samarbeid med Norges vassrags- og energidirektorat, Oslo.



- 
- Sandnes B (1999)  
A Combined Thermal and Photovoltaic Solar Energy Collector. Hovedfagsoppgave i fysikk, Universitetet i Oslo
- Sandnes B, Bjerke B, Brnic K, Meir M, Rekstad J, Svåsand E, Sørensen GFR (2004)  
Instrumentation for PV and thermal solar energy systems, i: Exergy Efficient Production, Storage and Distribution of Solar Energy, Sandnes B. Dr.scient avhandling, Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo, 2004.
- Scheer H (2002)  
The Solar Economy, Renewable Energy for a Sustainable Global Future. Earthscan Publications Ltd., London.
- SolarNor (1999)  
SolarNor gulv- og solvarmestyrer, modell mc:symphony. Brukerveiledning, versjon 1.2, SOLARNOR 15-8-1999.
- SolarNor (2000)  
SolarNor AS, monterings- og bruksanvisning - ModellComfort/Combi. Rev.4/2000
- SOLARNOR (2003)  
Solarnor Solfanger, type SOLNOR NL10. Teknisk datablad, SOLNOR NL6, rev. 01-2003-versjon B.
- Squires GL (1985)  
Practical physics. Third edition, Cambridge University Press.
- Statistisk sentralbyrå, SSB (2004)  
Overgang fra elektrisitet til olje. [online] Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/emner/01/03/10/energiregn/> [Hentet 12. mai 2004]
- Svåsand E (2003)  
Facade integration of colored solar collectors. Hovedfagsoppgave i fysikk, Norges Landbrukshøgskole
- Tennent RM (ed.) (1998)  
Science data book. Twenty-second impression. Oliver & Boyd, UK
- Thomas GE, Stamnes K (1999)  
Radiative transfer in the atmosphere and ocean. Cambridge University Press, USA
- Thuesen NP (2003)  
Fornybare energier. Norsk Fakta Forlag.
- Traasdahl T (2002)  
Verdensmester i solvarme. Folkevett 4/5 2002. Framtiden i Våre Hender, Oslo.

---

Weiss W (2003)

Solar combisystems and the global energy challenge, i: Solar heating systems for houses - a design handbook for solar combisystems. Weiss W (ed.) James & James Ltd., UK

Weiss W, Bergmann I, Faninger G (2004)

Solar Heating Worldwide. Markets and contribution to the energy supply 2001. IEA Solar Heating & Cooling Programme, Østerrike.

Zweibel K (1990)

Harnessing Solar Power: The Photovoltaics Challenge. Plenum Press, NY.

# Vedlegg A

## A Effektivitetsanalysene

For alle eksperimentdagene som det har blitt gjort analyser fra, er følgende data med i dette vedlegget:

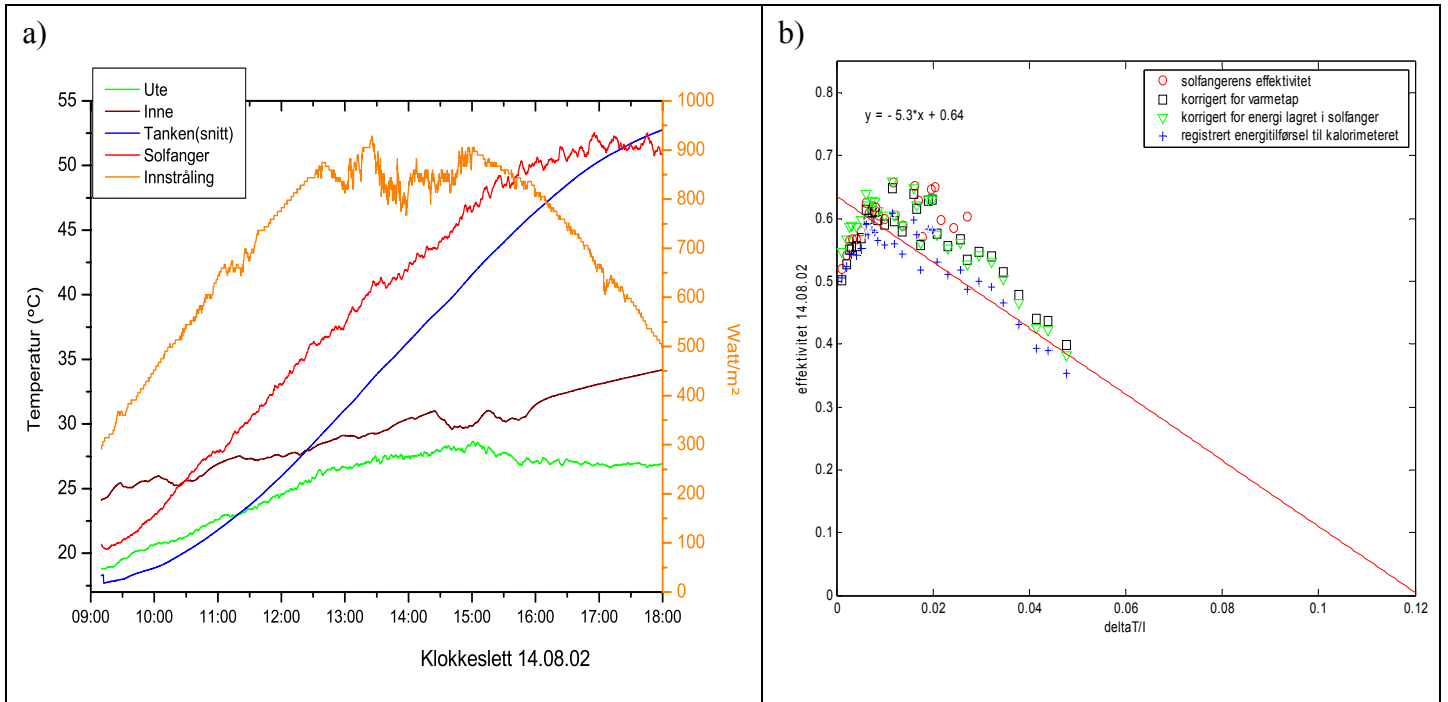
- Først kommer en tabell med rådataene for den aktuelle dagen. Klokkeslett i kolonne en er vist som desimaltall. Den tredje kolonnen viser gjennomsnittstemperaturen i tanken, mellom den øverste, midterste og nederste sensoren, i tidsperioden ( $\Delta t$ ).  $\Delta t$  var 15 minutter i 2002 og 20 minutter i 2004. Fjerde kolonne viser temperaturøkningen i tanken over samme periode. Verdiene langs  $\Delta T/I$ -aksen oppgis. I sjette kolonne vises den ukorrigerede effektiviteten. Så kommer innfallsvinkelen, og til slutt den korrigerede effektiviteten i kolonne åtte.
- Etter tabellen med rådata blir det vist to grafer. En som viser solinntensiteten gjennom dagen sammen med bl.a. temperaturutvikling i lageret, og en som viser effektiviteten. Generelt er den ukorrigerede systemeffektiviteten vist med blått. (Den ukorrigerede systemeffektiviteten er den registrerte energitilførselen til lageret i perioden  $\Delta t$ .) Til disse punktene er det i de fleste grafene gjort lineære tilpasninger. Korreksjonene for energi som er lagret i solfangeren er vist med grønne punkter, korreksjonene for varmetap fra tanken og rørene, samt varmetilførsel fra pumpa, er vist med sorte ruter. Til slutt er de punktene hvor  $\theta < 45^\circ$ , korrigert for innfallsvinkel. Disse punktene er vist med rødt.

## A.1 Eksperimenter som var utført i 2002.

- Data fra dager hvor strømningshastigheten var satt til 300l/h.

Tabell A – 1 Rådata fra 14. august, 2002.

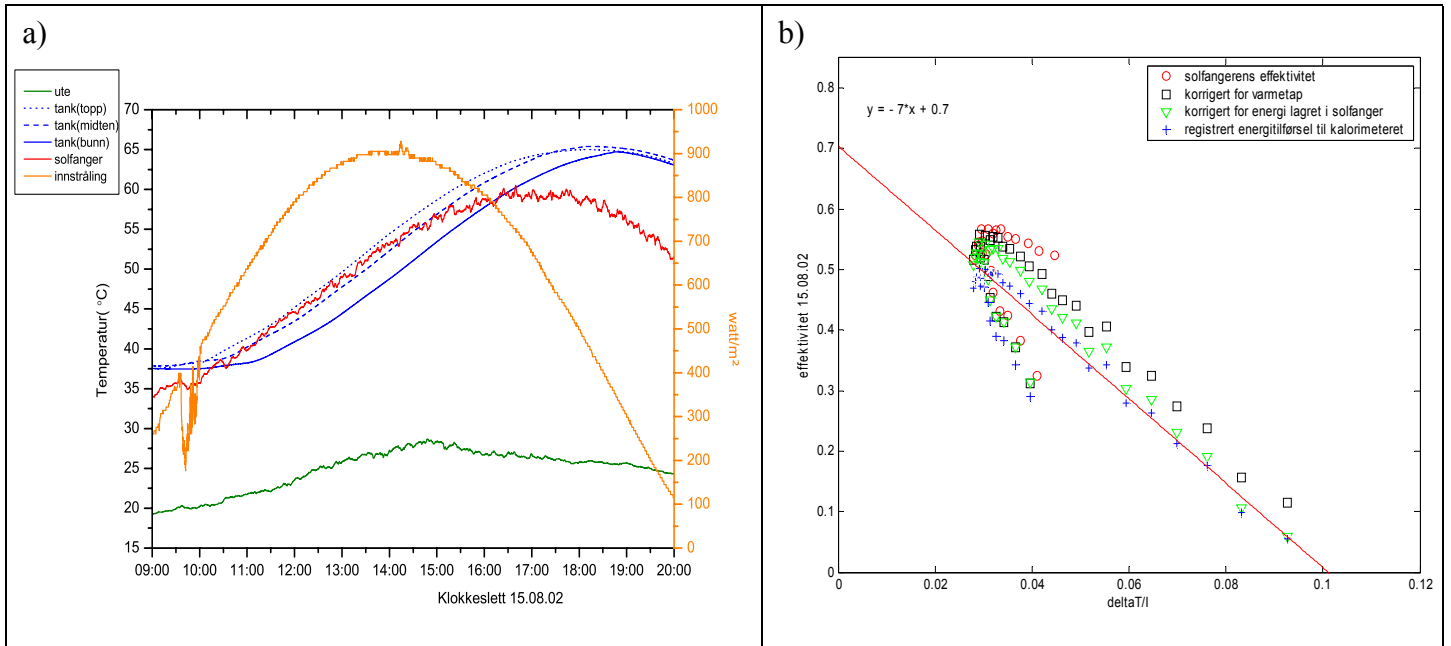
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.208	477.52	19.316	0.64526	0.0011262	0.50616	36.898	0.52009
10.458	517.43	20.02	0.72336	0.0021444	0.52366	33.758	0.54209
10.708	559.87	20.786	0.81155	0.0026884	0.54297	30.68	0.56495
10.958	609.62	21.651	0.88443	0.0032001	0.54323	27.689	0.56639
11.208	657.4	22.581	0.95109	0.0041118	0.54143	24.819	0.56631
11.458	670.56	23.55	0.98981	0.0051149	0.55214	22.117	0.57958
11.708	721.38	24.619	1.1379	0.0061189	0.59002	19.655	0.62454
11.958	762.04	25.777	1.1689	0.0066272	0.57348	17.538	0.60864
12.208	799.01	26.991	1.2425	0.0074205	0.58139	15.904	0.61958
12.458	834.4	28.274	1.2919	0.0080518	0.57843	14.915	0.61832
12.708	861.36	29.587	1.3041	0.0085644	0.56529	14.701	0.60554
12.958	841.62	30.893	1.2578	0.0099374	0.55802	15.296	0.59873
13.208	855.27	32.202	1.3963	0.01153	0.60919	16.612	0.65752
13.458	900.05	33.604	1.3495	0.011976	0.55908	18.496	0.60524
13.708	834.89	34.876	1.2161	0.013567	0.54315	20.792	0.5889
13.958	807.51	36.158	1.2964	0.015934	0.59823	23.379	0.65128
14.208	844.45	37.462	1.3016	0.016604	0.57396	26.169	0.62768
14.458	835.82	38.697	1.1643	0.017366	0.51875	29.102	0.57006
14.708	842.11	39.929	1.318	0.01906	0.58238	32.138	0.6464
14.958	880.57	41.317	1.3772	0.019843	0.58155	35.248	0.65106
15.208	888.48	42.645	1.266	0.020918	0.52999	38.412	0.59827
15.458	868.04	43.865	1.1934	0.023066	0.51095	41.616	0.58474
15.708	847.59	45.079	1.1846	0.025616	0.51897	44.849	0.60306
15.958	830.27	46.229	1.0895	0.027219	0.48724	48.104	
16.208	799.31	47.31	1.0759	0.029583	0.49942	51.374	
16.458	763.22	48.356	1.009	0.032109	0.49062	54.653	
16.708	729.2	49.334	0.91507	0.034663	0.46531	57.938	
16.958	685.02	50.19	0.79522	0.037761	0.43044	61.224	
17.208	636.24	50.923	0.67605	0.041375	0.394	64.509	
17.458	609.1	51.59	0.63991	0.043906	0.3892	67.79	
17.708	568.44	52.177	0.54275	0.047632	0.35373	71.062	



**Figur A.1** a) Solinnstråling og temperaturutvikling 14.08.02  
b) Effektivitetspunkter for 14.08.02. Den lineære tilpasningen er gjort til systemeffektiviteten.

Tabell A – 2 Rådata fra 15. august, 2002.

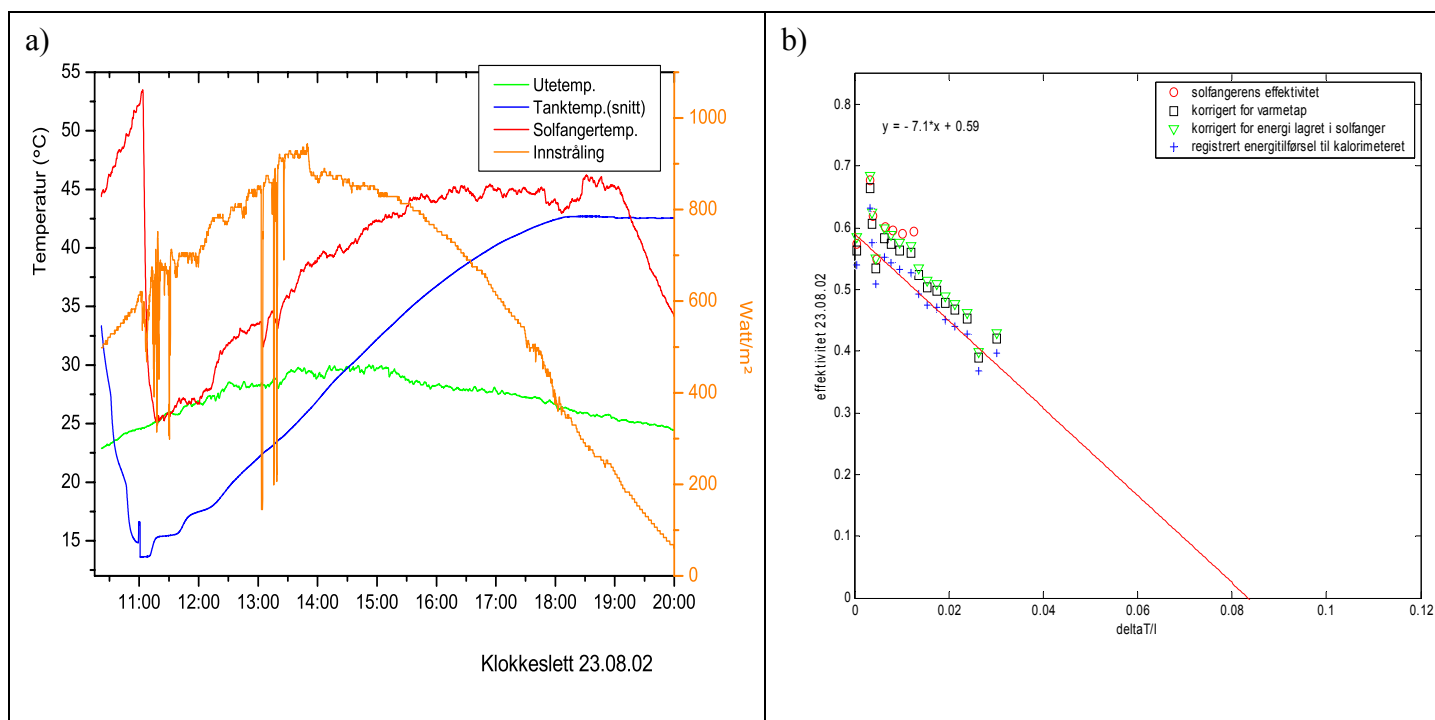
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.208	480.08	38.298	0.35541	0.039664	0.28976	37.059	0.32381
10.458	530.68	38.718	0.46519	0.036541	0.34311	33.927	0.38296
10.708	574.05	39.241	0.56058	0.034169	0.38193	30.86	0.42324
10.958	616.51	39.829	0.61361	0.032609	0.38927	27.882	0.4311
11.208	659.37	40.487	0.70086	0.031442	0.41572	25.027	0.46209
11.458	697.97	41.247	0.79679	0.030935	0.44618	22.345	0.49786
11.708	738.78	42.102	0.89142	0.030086	0.47159	19.907	0.52531
11.958	773.29	43.025	0.93788	0.029391	0.47375	17.815	0.52741
12.458	830.64	44.974	0.99715	0.028032	0.46891	15.235	0.52365
12.708	853.51	46.007	1.0645	0.028469	0.48675	15.025	0.54573
12.958	870.27	47.086	1.0712	0.028439	0.47998	15.609	0.54063
13.208	883.07	48.203	1.1379	0.029116	0.50262	16.903	0.56614
13.458	895.73	49.337	1.1146	0.029286	0.48497	18.761	0.54724
13.708	902.44	50.487	1.1584	0.030456	0.50027	21.033	0.56626
13.958	903.15	51.642	1.1405	0.031459	0.49169	23.598	0.55989
14.208	903.75	52.789	1.1461	0.032005	0.49397	26.37	0.56485
14.458	901.86	53.933	1.1421	0.032911	0.49282	29.288	0.56622
14.708	889.23	55.053	1.0953	0.034018	0.4789	32.312	0.55364
14.958	882.55	56.148	1.0744	0.035457	0.47331	35.412	0.55159
15.208	869.76	57.21	1.0312	0.037618	0.46053	38.569	0.54314
15.458	853.88	58.217	0.97544	0.039439	0.44392	41.767	0.53011
15.708	832.31	59.168	0.92435	0.041976	0.43111	44.997	0.52321
15.958	816.04	60.065	0.84304	0.044015	0.40102	48.248	
16.208	793.36	60.893	0.79361	0.046191	0.38831	51.515	
16.458	760.35	61.667	0.74319	0.049122	0.37904	54.793	
16.708	729.31	62.356	0.63396	0.051779	0.33709	58.077	
16.958	695.14	62.971	0.61533	0.055391	0.34346	61.364	
17.208	651.88	63.525	0.47037	0.059323	0.27967	64.649	
17.458	604.57	63.967	0.40965	0.06468	0.26263	67.931	
17.708	563.66	64.33	0.31016	0.069914	0.21328	71.205	
17.958	520.67	64.609	0.2368	0.076155	0.17628	74.47	
18.208	472.96	64.797	0.11938	0.083126	0.097829	77.722	
18.458	424.41	64.88	0.059659	0.092685	0.054484	80.959	



**Figur A.2** a) Solinnstråling og temperaturutvikling 15.08.02  
 b) Effektivitetspunkter for 15.08.02

Tabell A – 3 Rådata fra 23. august, 2002.

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
12.033	701.74	17.529	0.44	-0.011227	0.23496	19.624	0.21767
12.284	763.05	18.262	1.1995	-0.0068995	0.58908	18.398	0.61114
12.533	783.53	19.732	1.46	-0.0048891	0.69797	17.791	0.73374
12.783	804.89	21.047	1.1958	-0.0041544	0.55631	17.864	0.58048
13.533	911.93	24.463	1.2384	-0.00092992	0.50795	21.777	0.53559
13.783	922.94	25.773	1.3332	0.00055508	0.54005	23.98	0.57345
14.033	878.94	27.18	1.4859	0.0032429	0.63176	26.462	0.6775
14.283	875.62	28.636	1.3518	0.0037722	0.57678	29.152	0.62006
14.533	863.3	29.885	1.1778	0.0046237	0.50939	31.995	0.54871
14.783	851.47	31.106	1.2617	0.0064225	0.55295	34.954	0.60159
15.033	843.45	32.367	1.2274	0.0077679	0.54301	37.999	0.5959
15.283	829.66	33.564	1.1849	0.0096681	0.53255	41.11	0.59123
15.533	814.9	34.756	1.1527	0.011968	0.52746	44.271	0.59358
15.783	792.84	35.856	1.0498	0.013684	0.49339	47.471	
16.033	762.37	36.872	0.97103	0.015443	0.4746	50.699	
16.283	736.51	37.829	0.93027	0.017354	0.47037	53.949	
16.533	702.48	38.719	0.85169	0.019278	0.4515	57.215	
16.783	668.13	39.543	0.78934	0.021336	0.43961	60.492	
17.033	625.28	40.312	0.71807	0.02381	0.42733	63.775	
17.283	580.67	40.947	0.57464	0.026327	0.36824	67.061	
17.533	534.11	41.528	0.5702	0.030183	0.39698	70.347	

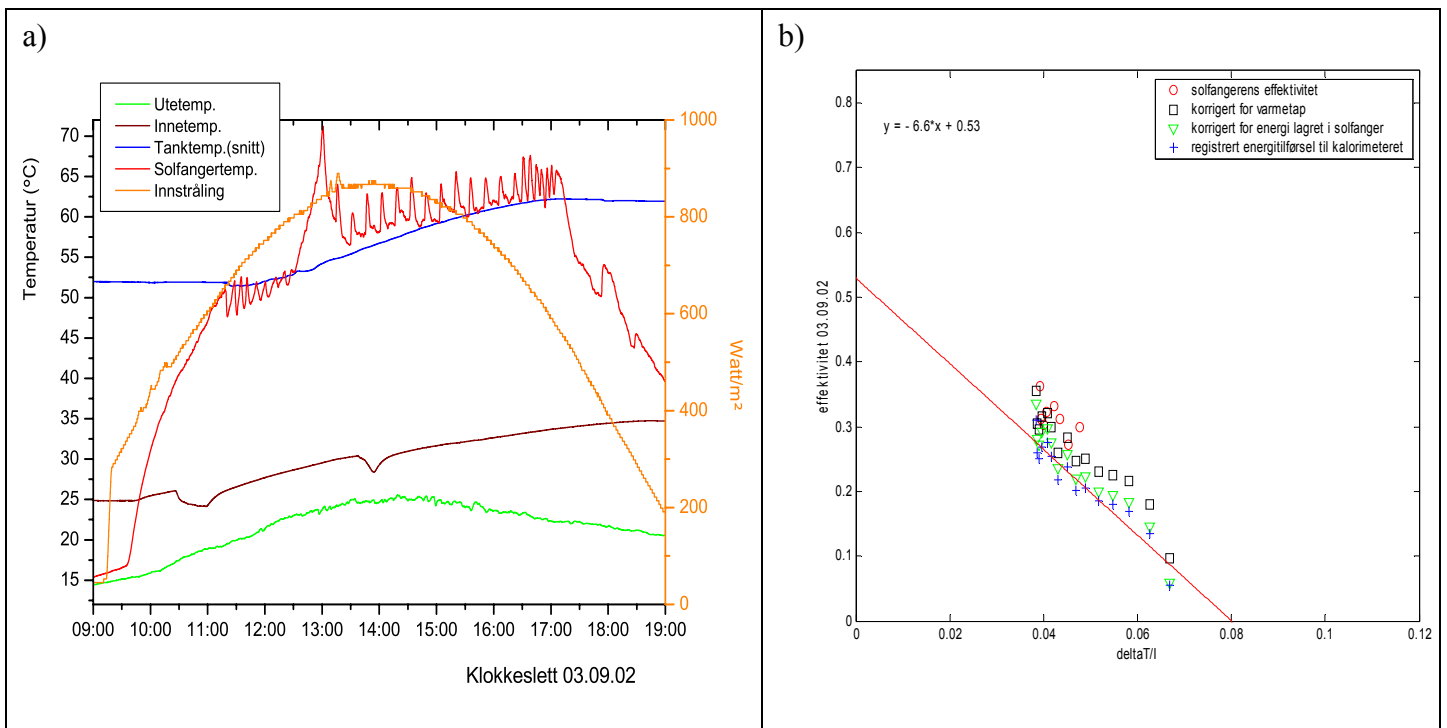


Figur A.3 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 23.08.02  
b) Effektivitetspunkter for 23.08.02



Tabell A – 4 Rådata fra 3. september, 2002.

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
13.533	860.92	55.496	0.72036	0.038393	0.30953	25.649	0.36332
13.783	866.5	56.198	0.60927	0.038573	0.2601	27.67	0.3115
14.033	868.82	56.799	0.58933	0.039095	0.25092	29.972	0.30282
14.283	863.28	57.407	0.62843	0.039628	0.26902	32.495	0.32345
14.533	858.61	58.064	0.63902	0.040836	0.27517	35.19	0.33229
14.783	848.84	58.689	0.58301	0.041745	0.25394	38.02	0.31117
15.033	834.6	59.224	0.49043	0.043127	0.21702	40.954	0.27265
15.283	817.76	59.744	0.52556	0.045034	0.23736	43.972	0.29987
15.533	800.51	60.216	0.43856	0.046851	0.20234	47.055	
15.783	775.75	60.665	0.43163	0.048911	0.20549	50.19	
16.033	747.1	61.06	0.3749	0.051819	0.18515	53.366	
16.283	715.41	61.42	0.34732	0.054689	0.17913	56.574	
16.533	680.03	61.741	0.31125	0.058183	0.16887	59.808	
16.783	641.15	62.029	0.23431	0.062591	0.13484	63.061	
17.033	600.42	62.182	0.089559	0.066865	0.055034	66.329	



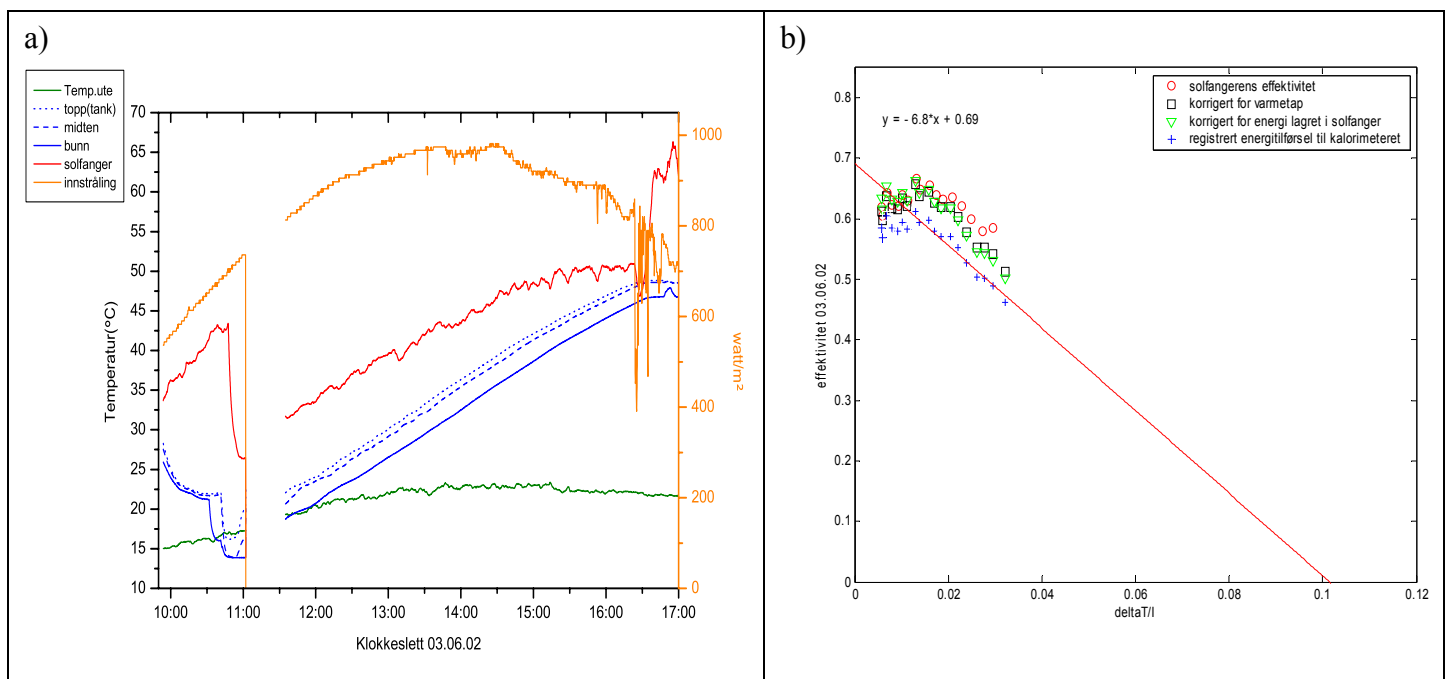
Figur A.4 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 03.09.02  
 b) Effektivitetspunkter for 03.09.02

3. september stod anlegget på auto. Det betyr at anlegget slo seg av når tanktemperaturen i varmelageret ble like høy som solfangerens temperatur. Usikkerheten er derfor stor i effektivitetsanalysen for denne dagen.

- Data fra dager hvor strømningshastigheten var satt til 500l/h.

Tabell A – 5 Rådata fra 3. juni, 2002.

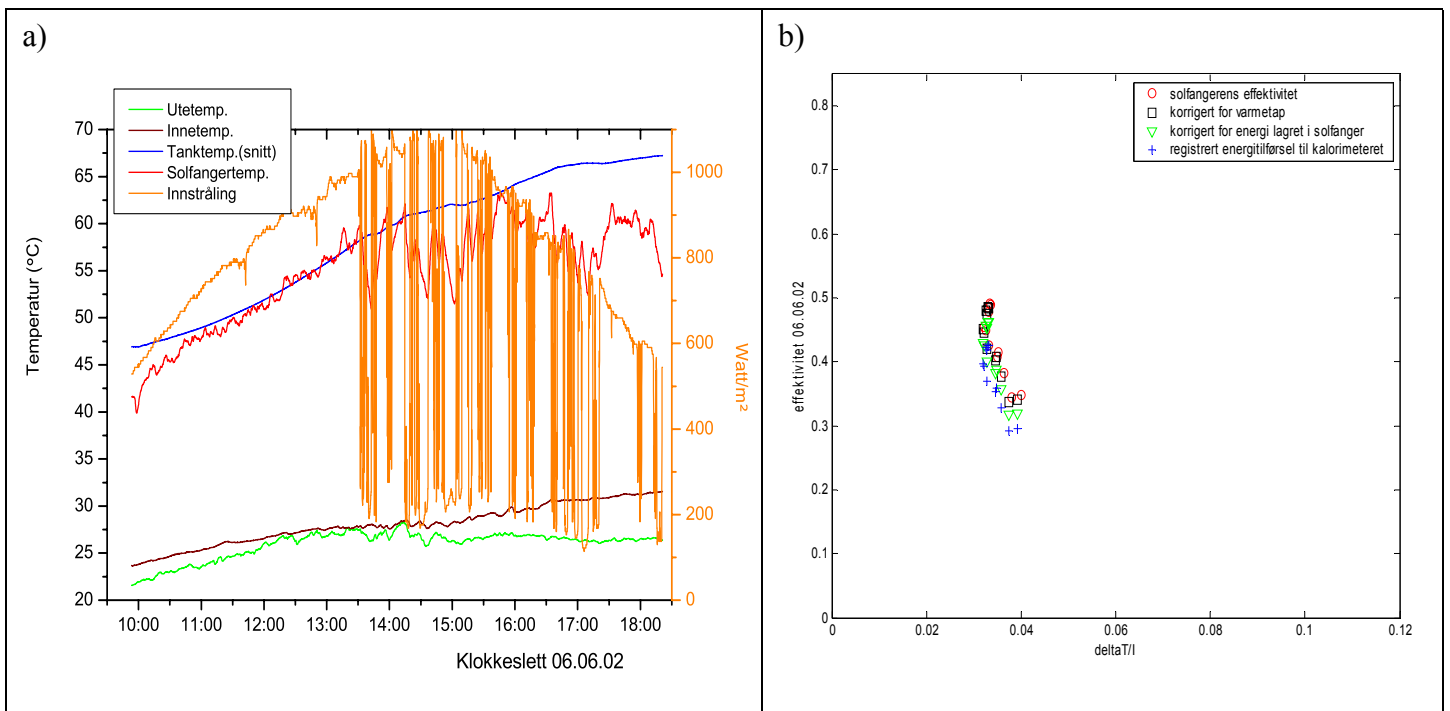
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.775	829.36	21.725	1.2962	0.0057252	0.58519	12.115	0.61991
12.025	861.55	22.931	1.3111	0.0059101	0.56952	9.4361	0.60405
12.275	890.21	24.371	1.4388	0.0068368	0.60459	7.3567	0.64367
12.525	910.4	25.811	1.4238	0.0079854	0.58469	6.4843	0.62361
12.775	926.19	27.241	1.4385	0.009272	0.58041	7.2681	0.62153
13.025	940.98	28.726	1.4975	0.010192	0.59455	9.2977	0.63989
13.275	954.48	30.248	1.4895	0.011205	0.58266	11.954	0.62983
13.525	965.56	31.766	1.5862	0.013114	0.61303	14.903	0.66617
13.775	971.3	33.368	1.5466	0.013931	0.59374	18	0.64781
14.025	957.53	34.905	1.5363	0.015776	0.59825	21.179	0.65571
14.275	964.81	36.431	1.5015	0.017167	0.5799	24.405	0.63868
14.525	975.89	37.942	1.4956	0.018426	0.57071	27.66	0.63211
14.775	951.31	39.428	1.4579	0.020402	0.57027	30.931	0.6356
15.025	925.4	40.831	1.3743	0.022192	0.55263	34.213	0.62086
15.275	916.02	42.176	1.3008	0.023987	0.52803	37.498	0.59905
15.525	898.92	43.463	1.2194	0.026131	0.50412	40.785	0.57936
15.775	890.7	44.674	1.2025	0.027832	0.50173	44.068	0.58468
16.025	875.02	45.853	1.1544	0.029627	0.48986	47.347	
16.275	833.8	46.959	1.0388	0.032162	0.46262	50.618	



Figur A.5 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 03.06.02  
b) Effektivitetspunkter for 03.06.02

Tabell A – 6 Rådata fra 6. juni, 2002.

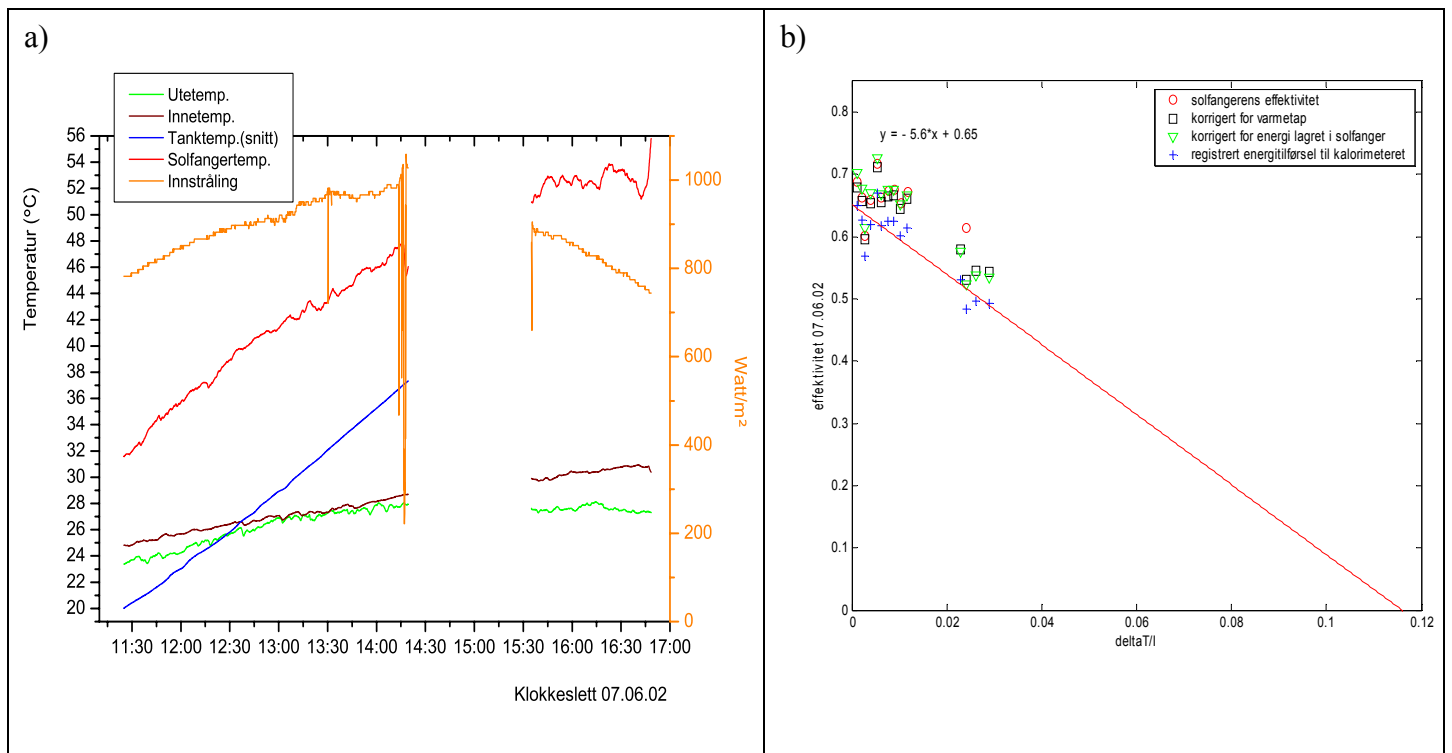
Klokka	Innstråling	T <sub>tank</sub> (snitt)	Økn.(T <sub>tank</sub> )	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.692	660.98	48.264	0.52535	0.039199	0.29497	25.771	0.34819
10.942	705.21	48.81	0.55618	0.037336	0.29269	22.523	0.34404
11.192	744.57	49.433	0.66069	0.035755	0.32902	19.309	0.3827
11.442	778.79	50.14	0.7533	0.034719	0.35866	16.152	0.41419
11.692	791.74	50.895	0.75424	0.034585	0.35323	13.097	0.40843
11.942	843.91	51.693	0.84223	0.032869	0.36973	10.241	0.42539
12.192	870.66	52.585	0.92285	0.032251	0.39283	7.8063	0.44997
12.442	903.78	53.537	0.96964	0.031979	0.39722	6.3073	0.4545
12.692	907.29	54.552	1.0267	0.032799	0.41897	6.4354	0.47921
12.942	923.75	55.587	1.0655	0.033227	0.42669	8.1139	0.48929
13.192	975.25	56.682	1.1134	0.032573	0.42231	10.631	0.4854
13.442	990.2	57.836	1.1422	0.032878	0.42647	13.526	0.49189



Figur A.6 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 06.06.02  
 b) Effektivitetspunkter for 06.06.02

Tabell A – 7 Rådata fra 7. juni, 2002.

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.608	792.58	20.918	1.1627	-0.0007642	0.54951	14.051	0.57684
11.858	821.78	22.252	1.4257	0.0011049	0.64962	11.102	0.68796
12.108	851.58	23.723	1.4254	0.002059	0.62612	8.4729	0.66359
12.358	872.96	25.027	1.3263	0.0026294	0.56801	6.5622	0.60105
12.608	893.82	26.516	1.481	0.003934	0.61948	6.0912	0.65907
12.858	904.63	28.056	1.6236	0.0053008	0.67051	7.3427	0.71749
13.108	914.87	29.538	1.5133	0.0061049	0.61759	9.6688	0.66281
13.358	947.63	31.127	1.5846	0.0075897	0.62397	12.481	0.67334
13.608	965.65	32.767	1.6149	0.0088202	0.62402	15.516	0.67628
13.858	963.66	34.356	1.5545	0.01026	0.6015	18.664	0.65429
14.108	975.58	35.941	1.6097	0.011548	0.61484	21.873	0.67164
15.775	877.58	45.103	1.256	0.022823	0.53143	43.707	0.61391
16.025	861.25	46.323	1.1227	0.024201	0.48404	46.983	
16.275	828.55	47.43	1.1076	0.026198	0.49596	50.252	
16.525	796.04	48.535	1.0572	0.02902	0.49286	53.511	

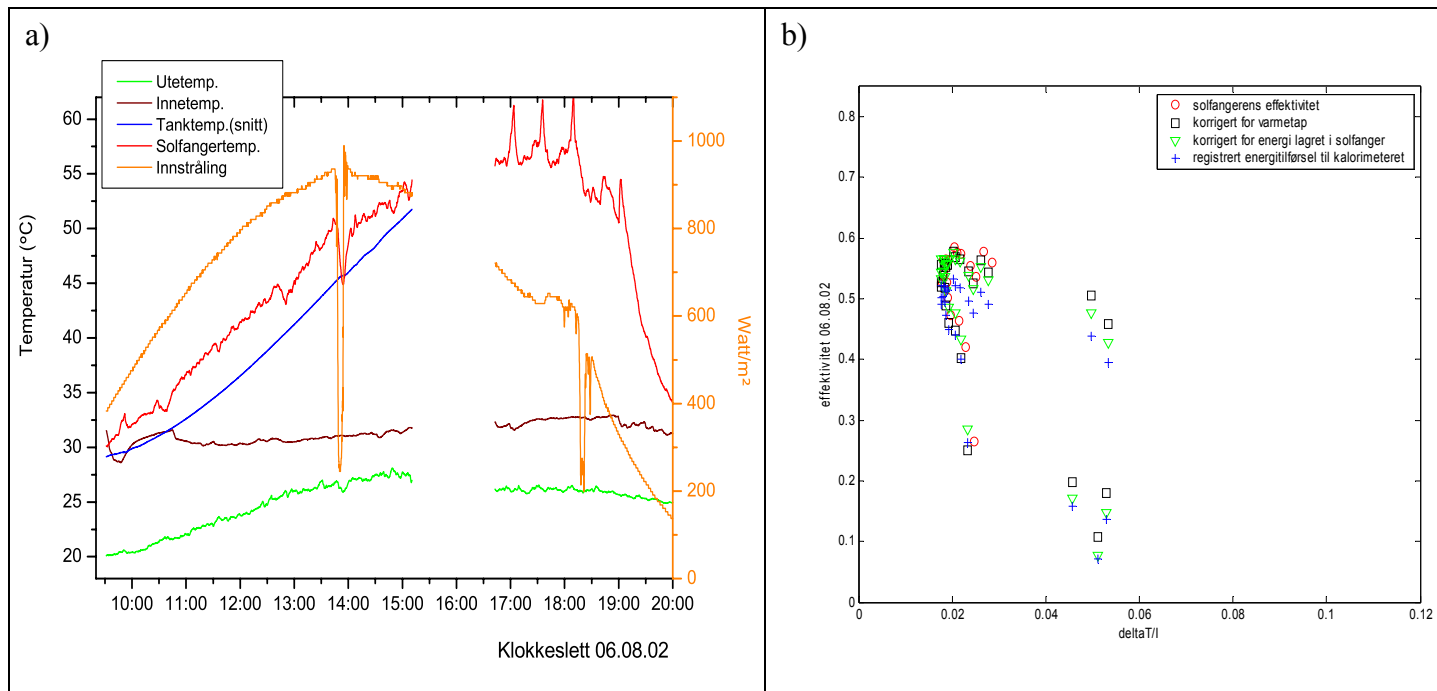


Figur A.7 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 07.06.02  
 b) Effektivitetspunkter for 07.06.02

- Data fra dager hvor strømningshastigheten var satt til 700l/h.

Tabell A – 8 Rådata fra 6. august, 2002.

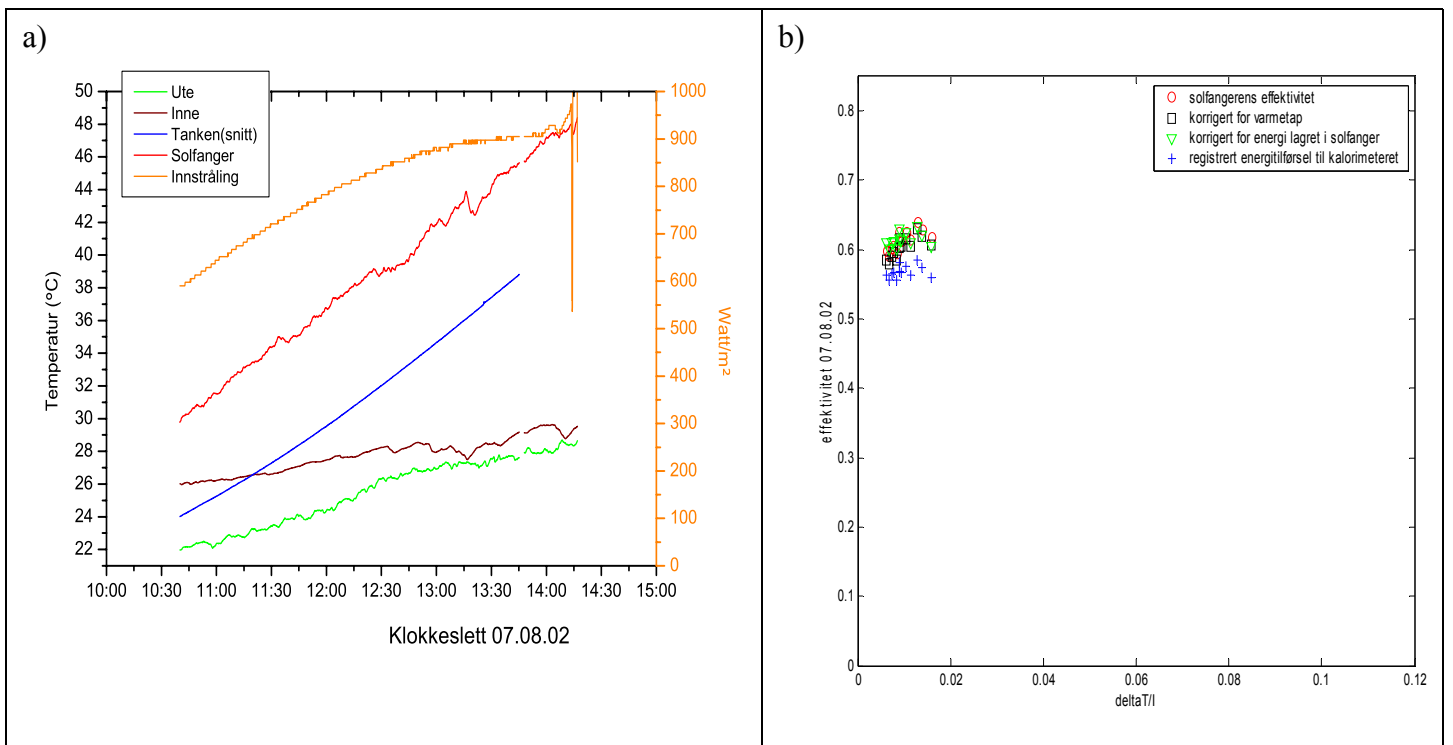
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
9.7083	407.41	29.404	0.2863	0.023765	0.26238	42.67	0.26467
9.9583	457.04	29.764	0.4902	0.022512	0.40047	39.415	0.41989
10.208	504.91	30.303	0.59596	0.021357	0.4407	36.181	0.46366
10.458	551.35	30.953	0.66268	0.019823	0.44877	32.979	0.47293
10.708	593.5	31.666	0.75292	0.019264	0.47339	29.821	0.50141
10.958	636.11	32.468	0.84321	0.019137	0.49465	26.727	0.52801
11.208	677.44	33.353	0.91086	0.018456	0.50135	23.722	0.5376
11.458	715.12	34.294	0.94207	0.01833	0.49121	20.849	0.52805
11.708	747.68	35.29	1.0479	0.018515	0.52225	18.174	0.56402
11.958	781.19	36.35	1.0575	0.018769	0.50443	15.797	0.54593
12.208	810.79	37.458	1.1349	0.019123	0.5212	13.877	0.56573
12.458	834.48	38.621	1.1627	0.019154	0.51888	12.624	0.56441
12.708	860.19	39.82	1.186	0.019361	0.51303	12.245	0.55981
12.958	879.57	41.026	1.2168	0.019864	0.51442	12.82	0.56363
13.208	890.54	42.272	1.2749	0.020995	0.53234	14.232	0.5852
13.458	909.24	43.552	1.2782	0.021493	0.52244	16.264	0.57648
13.708	926.91	44.852	1.2935	0.022398	0.51861	18.715	0.57452
14.208	922.22	47.056	1.2347	0.024227	0.49674	24.344	0.55502
14.458	917.58	48.187	1.1799	0.025288	0.47721	27.37	0.53637
14.708	905.9	49.526	1.2476	0.026893	0.51067	30.48	0.57719
14.958	895.92	50.702	1.1849	0.028403	0.49041	33.648	0.55896
16.9	701.6	57.883	0.29912	0.046014	0.15763	59	
17.15	669.3	58.33	0.79519	0.050446	0.43927	62.28	
17.4	643.65	58.899	0.12481	0.051299	0.071695	65.552	
17.65	634.17	59.09	0.67866	0.053944	0.39523	68.815	
17.9	641.06	59.758	0.23597	0.053206	0.13595	72.064	



**Figur A.8** a) Solinnstråling og temperaturutvikling 06.08.02  
 b) Effektivitetspunkter for 06.08.02

Tabell A – 9 Rådata fra 7. august, 2002.

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.875	610.75	24.793	0.92082	0.0061325	0.56396	27.899	0.59754
11.125	652.1	25.743	0.97028	0.006718	0.55629	24.873	0.5908
11.375	690.29	26.756	1.042	0.0073008	0.56435	21.966	0.60128
11.625	726.17	27.83	1.1007	0.007734	0.56627	19.235	0.60503
11.875	759.96	28.955	1.1299	0.0083907	0.55544	16.769	0.59438
12.125	792.26	30.139	1.2344	0.0089024	0.58175	14.703	0.62477
12.375	818.68	31.386	1.2467	0.0090189	0.56824	13.227	0.61143
12.625	844.2	32.66	1.2828	0.0094729	0.56701	12.553	0.6119
12.875	865.1	33.972	1.3382	0.010369	0.57681	12.809	0.62464
13.125	882.06	35.313	1.3346	0.011313	0.5638	13.942	0.61326
13.375	893.67	36.687	1.4026	0.012739	0.58481	15.765	0.63887
13.625	899.47	38.098	1.3854	0.013802	0.57358	18.069	0.62844
14.158	929.13	41.078	1.3963	0.015797	0.55883	23.918	0.61756

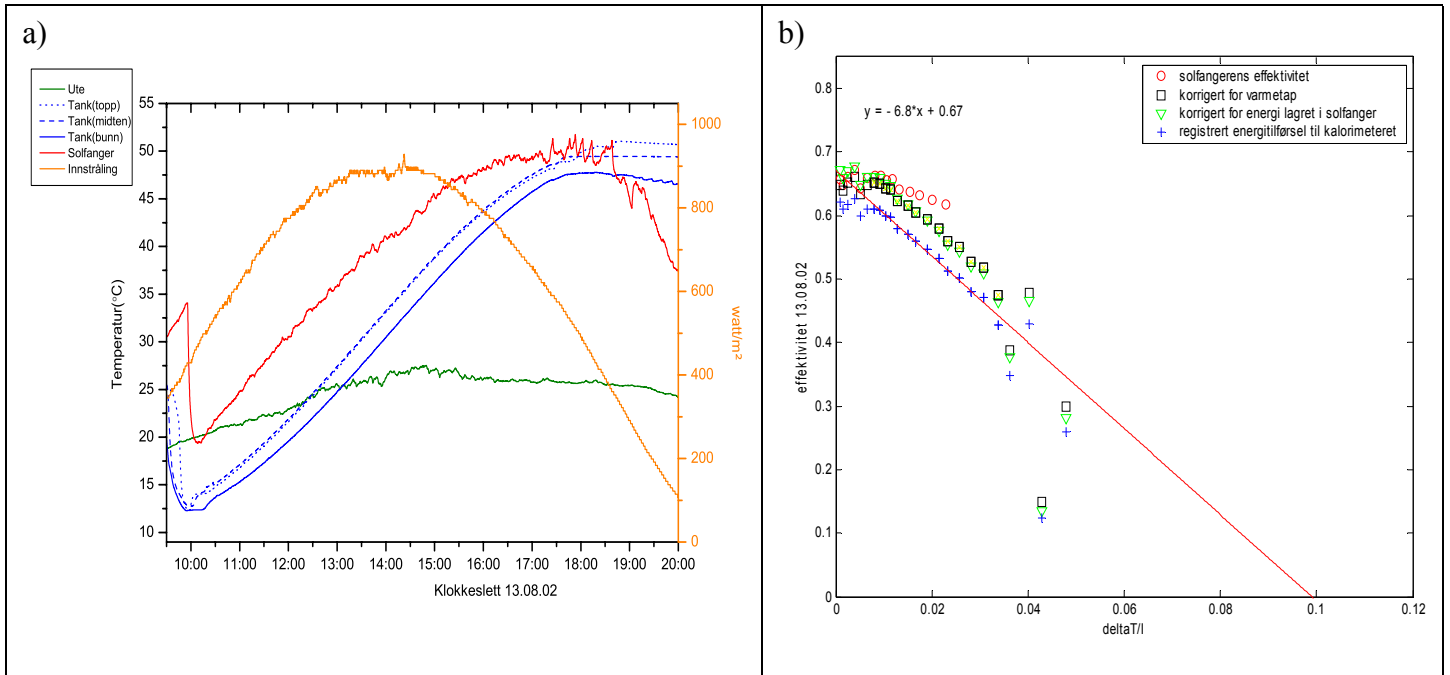


Figur A.9 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 07.08.02  
 b) Effektivitetspunkter for 07.08.02

*Tabell A – 10 Rådata fra 13. august, 2002. Punkter med negativ x-verdi, er ikke tatt med i effektivitetsplottet*

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.292	488.53	13.79	0.80399	-0.011031	0.61769	35.897	0.63465
10.542	535.5	14.677	0.8519	-0.0093049	0.59708	32.763	0.61465
10.792	575.78	15.593	0.96299	-0.007446	0.62755	29.695	0.65038
11.042	618.04	16.583	1.0234	-0.0055521	0.62129	26.719	0.64636
11.292	661.43	17.65	1.107	-0.0040786	0.62715	23.87	0.65528
11.542	705.52	18.786	1.1634	-0.0026743	0.61793	21.204	0.64816
11.792	739.68	19.989	1.2394	-0.0010698	0.62764	18.799	0.66132
12.042	774.28	21.239	1.2517	-5.3422e-005	0.60531	16.769	0.63902
12.292	797.92	22.541	1.324	0.0009033	0.62099	15.267	0.6581
12.542	830.83	23.894	1.3539	0.0015307	0.60953	14.46	0.64843
12.792	841.95	25.278	1.3927	0.0025016	0.61842	14.464	0.66039
13.042	861.4	26.689	1.4431	0.0038636	0.62635	15.279	0.67121
13.292	877.14	28.136	1.4057	0.005159	0.5987	16.787	0.6435
13.542	885.65	29.59	1.4484	0.0065345	0.61062	18.821	0.65925
13.792	883.48	31.042	1.4471	0.0079944	0.61121	21.229	0.6624
14.042	882.61	32.503	1.4411	0.009166	0.60923	23.898	0.66276
14.292	889.88	33.949	1.4315	0.010354	0.59981	26.748	0.65553
14.542	896.66	35.389	1.4381	0.011469	0.59763	29.725	0.65737
14.792	887.81	36.804	1.379	0.0129	0.57879	32.794	0.64111
15.042	878.62	38.181	1.3462	0.014977	0.57057	35.928	0.63719
15.292	859.68	39.519	1.2934	0.01672	0.55984	39.111	0.63128
15.542	838.87	40.797	1.2333	0.019006	0.54708	42.329	0.62553
15.792	815.03	41.997	1.1677	0.021396	0.53274	45.573	0.61841
16.042	793.53	43.147	1.0947	0.023284	0.51267	48.835	
16.292	765.83	44.209	1.0349	0.02574	0.50222	52.109	
16.542	729.48	45.202	0.94201	0.028203	0.47949	55.392	
16.792	694.24	46.119	0.88027	0.030822	0.47081	58.677	
17.042	659.37	46.943	0.76051	0.033694	0.42826	61.964	
17.292	618.82	47.658	0.57999	0.036288	0.34783	65.247	
17.542	581.7	48.259	0.67396	0.040219	0.42998	68.524	
17.792	540.53	48.664	0.18063	0.042954	0.12402	71.793	
18.042	495.27	49.018	0.3476	0.047932	0.26023	75.05	

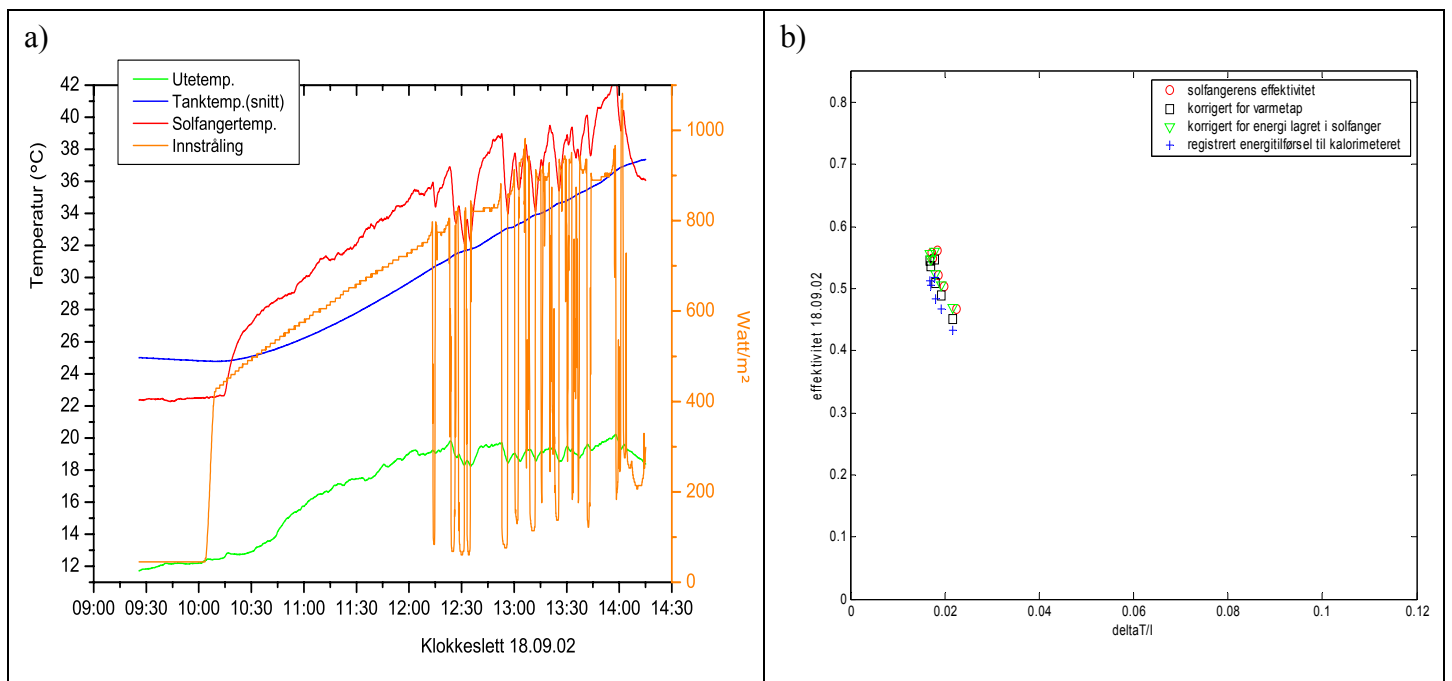




**Figur A.10** a) Solinnstråling og temperaturutvikling 13.08.02  
 b) Effektivitetspunkter for 13.08.02

Tabell A – 11 Rådata fra 18. september, 2002.

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
10.85	544.18	25.827	0.63118	0.021653	0.43365	36.294	0.46702
11.1	584.54	26.51	0.73038	0.019276	0.46715	34.103	0.5042
11.35	623.8	27.293	0.807	0.01813	0.48344	32.16	0.52255
11.6	663.61	28.162	0.91918	0.017915	0.51747	30.514	0.561
11.85	700.55	29.098	0.9487	0.017035	0.50563	29.215	0.54863
12.1	734.53	30.092	1.0094	0.016898	0.51311	28.311	0.558



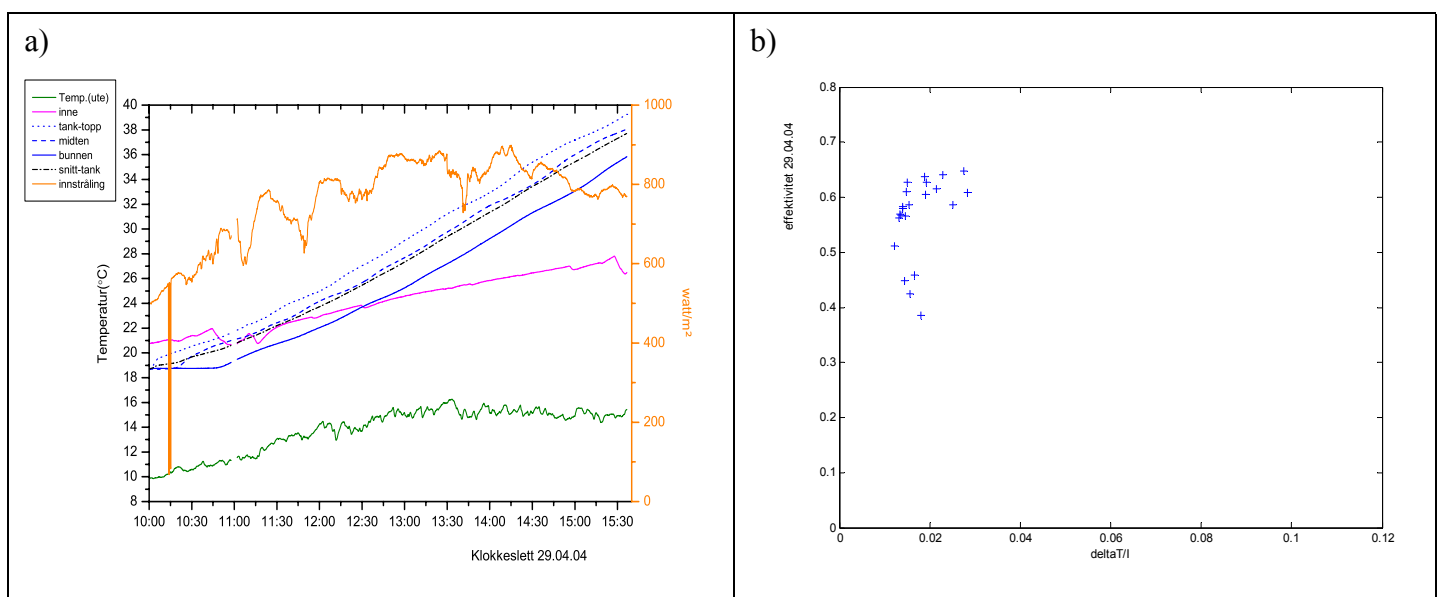
Figur A.11 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 18.09.02  
 b) Effektivitetspunkter for 18.09.02

## A.2 Eksperimenter som var utført våren 2004.

- Data fra dager hvor strømningshastigheten var satt til 280l/h.

Tabell A – 12 Rådata fra 29. april, 2004.

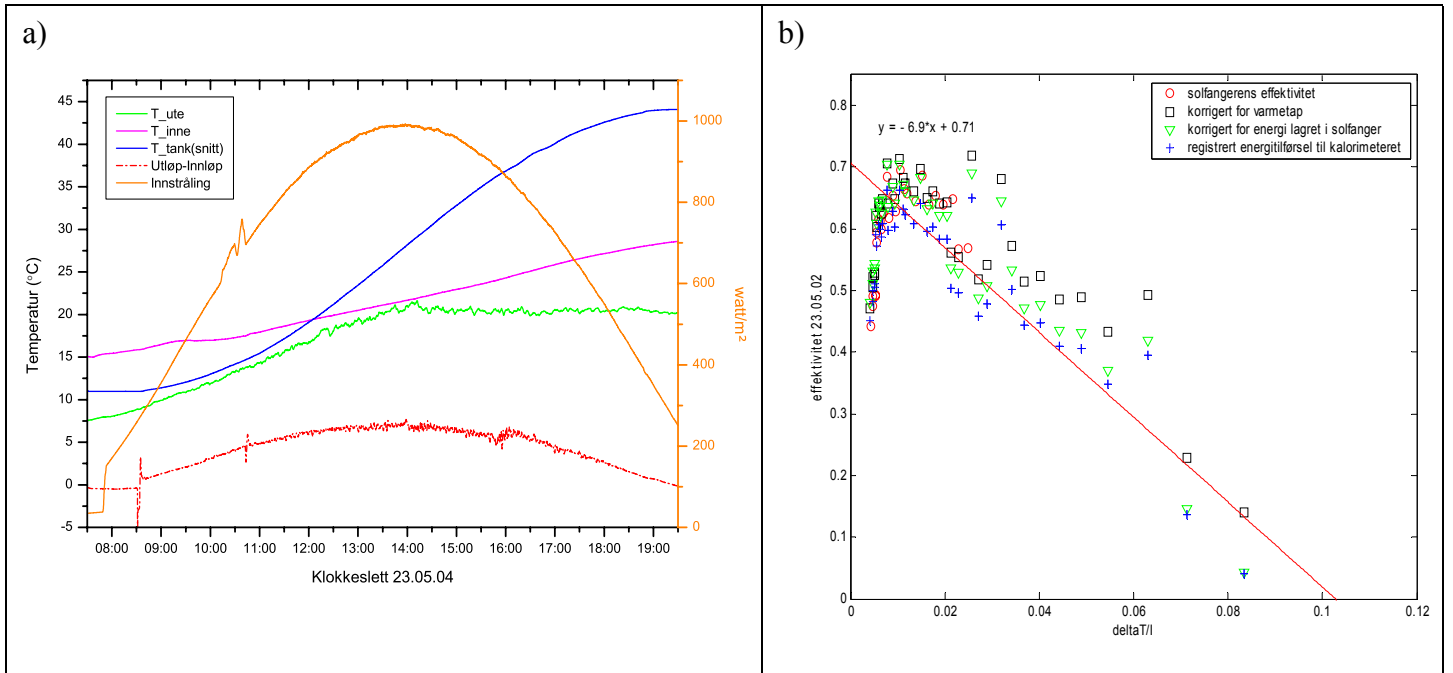
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta
10.083	495.82	18.907	0.36785	0.018129	0.38563
10.333	527.41	19.277	0.46627	0.016582	0.45952
10.583	573.55	19.819	0.46867	0.01569	0.42474
10.833	638.86	20.289	0.55204	0.014357	0.44915
11.233	658.7	21.376	0.71734	0.014617	0.56605
11.483	766.16	22.139	0.75423	0.01221	0.51169
11.733	714.11	22.875	0.78154	0.013437	0.56886
11.983	724.77	23.678	0.79196	0.013548	0.56797
12.233	806.29	24.503	0.87326	0.013123	0.56296
12.483	772.41	25.408	0.90584	0.014844	0.60958
12.733	810.97	26.332	0.90437	0.014108	0.57965
12.983	869.86	27.266	0.97451	0.013996	0.58232
13.233	858.39	28.272	1.0367	0.015106	0.62777
13.483	866.48	29.313	0.97866	0.015522	0.58708
13.733	805.81	30.287	0.98741	0.018931	0.63692
13.983	829.89	31.277	0.96539	0.019143	0.60465
14.233	881.85	32.278	1.0651	0.01916	0.62778
14.483	840.61	33.349	0.99582	0.021505	0.61576
14.733	843.55	34.349	1.0406	0.022922	0.64121
14.983	806.74	35.354	0.91135	0.025193	0.58718
15.233	776.28	36.293	0.96625	0.027488	0.64698
15.483	787.84	37.247	0.92272	0.028252	0.60877



Figur A.12 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 29.04.04  
b) Effektivitetspunkter for 29.04.04, kun systemeffektivitet.

Tabell A – 13 Rådata fra 23. mai, 2004

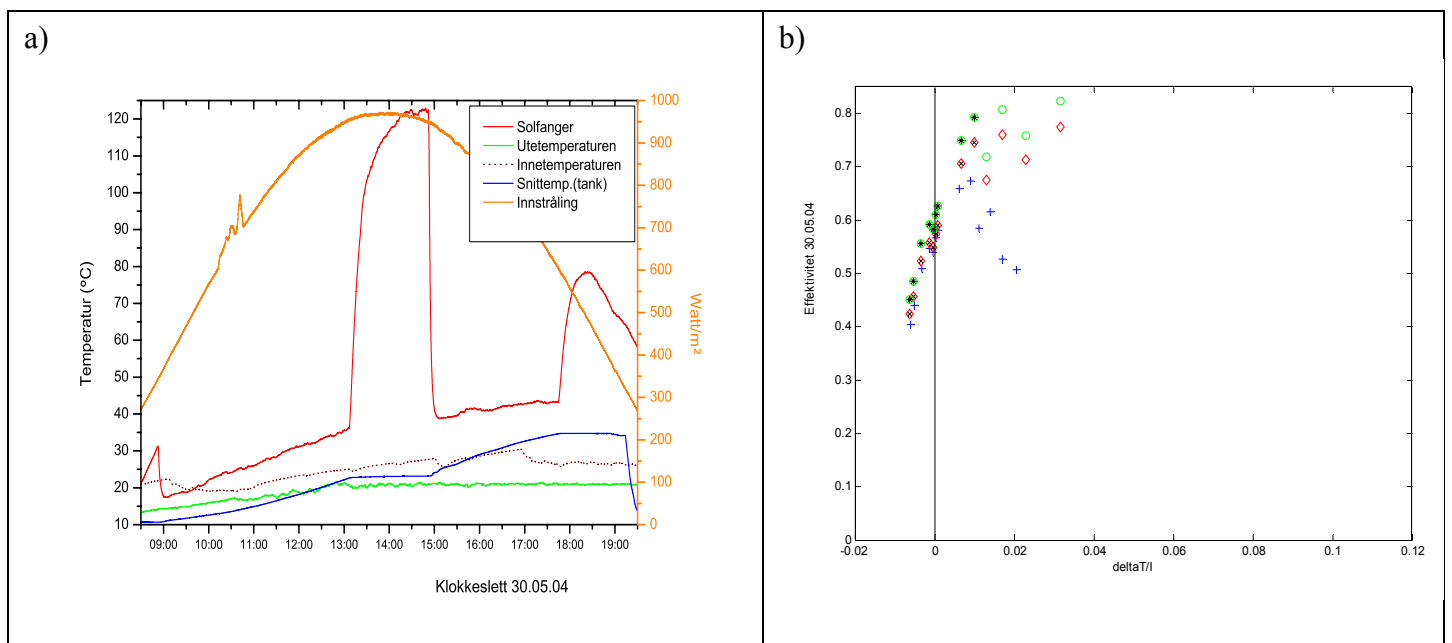
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.625	830.55	17.618	0.95226	0.0058863	0.60595	14.542	0.61622
11.875	862.1	18.591	0.97874	0.0062388	0.6	11.863	0.61163
12.125	891.63	19.586	0.99046	0.0064539	0.58708	9.6476	0.59933
12.375	914.88	20.648	1.0539	0.0067937	0.60881	8.2779	0.62436
12.625	934.27	21.766	1.1703	0.0077054	0.66203	8.1913	0.6837
12.875	950.43	22.895	1.0758	0.0080469	0.59788	9.4232	0.61746
13.125	967.08	24.028	1.1502	0.0089499	0.62823	11.559	0.65303
13.375	978.17	25.194	1.1159	0.009442	0.6026	14.195	0.62821
13.625	986.33	26.373	1.2361	0.010326	0.66196	17.1	0.695
13.875	987.77	27.579	1.182	0.011201	0.63191	20.156	0.66525
14.125	988.32	28.769	1.1647	0.011681	0.6223	23.302	0.6577
14.375	983.3	29.91	1.1319	0.013486	0.6079	26.504	0.6451
14.625	978.72	31.109	1.189	0.01479	0.64153	29.742	0.6855
14.875	967.78	32.265	1.0904	0.016168	0.59501	33.002	0.63929
15.125	954.22	33.347	1.0898	0.017386	0.60307	36.276	0.65369
15.375	932.98	34.441	1.0316	0.018782	0.58387	39.559	0.63928
15.625	911.65	35.475	1.0079	0.020478	0.58381	42.845	0.64753
15.875	886.89	36.437	0.84715	0.021354	0.50439	46.131	
16.125	857.56	37.259	0.80691	0.02289	0.49685	49.414	
16.375	824.83	38.181	1.0141	0.025772	0.64926	52.691	
16.625	790.73	39.076	0.68682	0.027027	0.4587	55.96	
16.875	754.04	39.697	0.68256	0.028896	0.47803	59.219	
17.125	714.97	40.506	0.82035	0.031887	0.60592	62.465	
17.375	671.95	41.234	0.63799	0.034125	0.5014	65.697	
17.625	629.4	41.817	0.52817	0.036743	0.44315	68.911	
17.875	583.65	42.327	0.49473	0.040331	0.44764	72.107	
18.125	537.51	42.795	0.41629	0.044242	0.40908	75.28	
18.375	486.83	43.201	0.37427	0.048856	0.40607	78.429	
18.625	437.89	43.534	0.28829	0.054499	0.34774	81.55	
18.875	387.11	43.863	0.28906	0.063036	0.39441	84.64	
19.125	337.34	44.02	0.087363	0.07122	0.13679	87.696	
19.375	287.59	44.076	0.02174	0.083395	0.039928	90.713	



**Figur A.13** a) Solinnstråling og temperaturutvikling 23.05.04  
 b) Effektivitetspunkter for 23.05.04, lineær tilpasning til systemeffektiviteten.

Tabell A – 14 Rådata fra 30. mai, strømningshastigheten var 300l/h denne dagen.

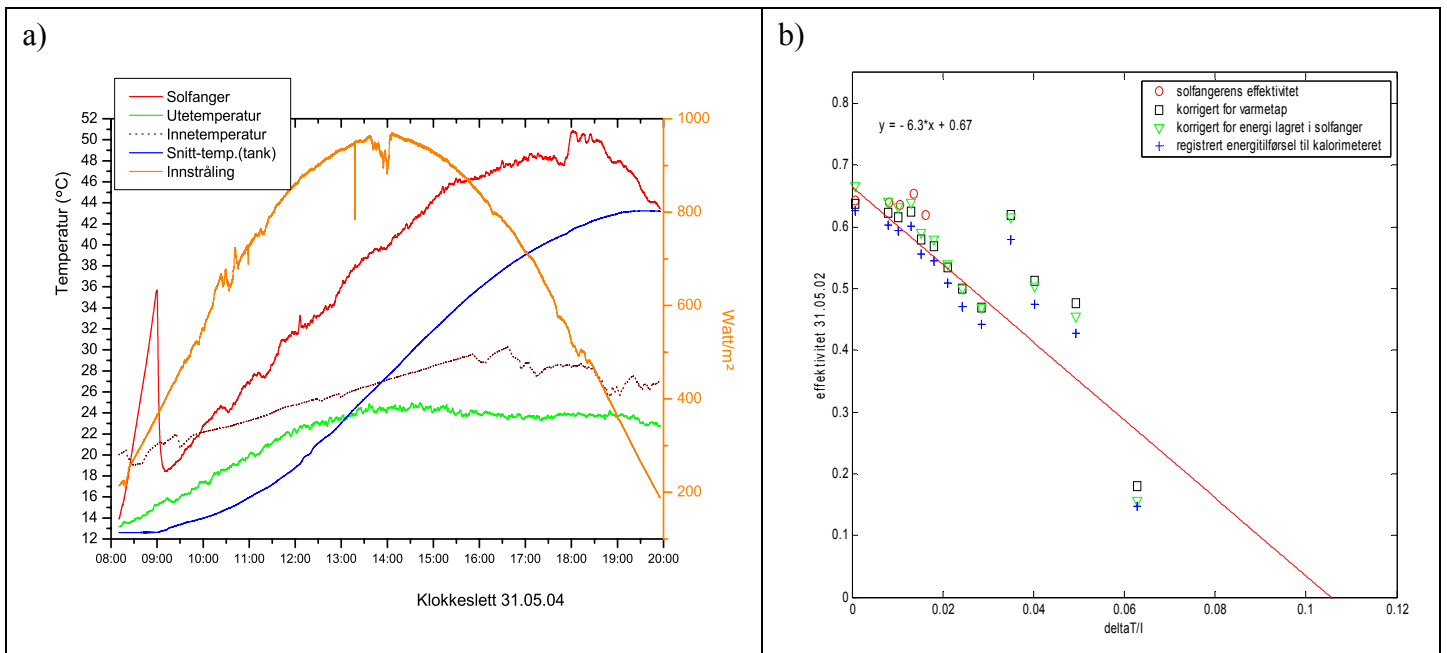
Klokka	Innstråling	T <sub>tank</sub> (snitt)	Økn.(T <sub>tank</sub> )	x-akse	etta	tetta
10	554.85	12.603	0.57132	-0.0059736	0.40484	34.859
10.41	658.32	13.373	0.73773	-0.0051194	0.44059	29.485
10.83	724.41	14.457	0.93796	-0.0032242	0.50907	24.024
11.25	766.98	15.653	---	-0.0026488	---	18.665
11.67	823.68	17.057	1.145	-0.0013029	0.54657	13.551
12.08	873.63	18.499	1.2009	-0.00036764	0.53997	9.2149
12.5	911.21	20.112	1.3136	0.00028794	0.56628	6.9011
12.917	938.76	21.821	1.3884	0.00077375	0.58093	8.6374
15.5	904.75	26.518	1.5176	0.0062541	0.65851	40.587
15.92	863.42	28.633	1.4822	0.0089633	0.67378	46.104
16.33	824	30.204	1.2268	0.011207	0.58434	51.474
16.75	770.66	31.785	1.2078	0.013885	0.61514	56.95
17.166	712.31	33.103	0.95841	0.016986	0.52806	62.337
17.58	642.2	34.246	0.8298	0.020648	0.50711	67.654



Figur A.14 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 30.05.04  
 b) Effektivitetspunkter for 30.05.04, blå + er systemeffektivitet.

Tabell A – 15 Rådata fra 31. mai, 2004

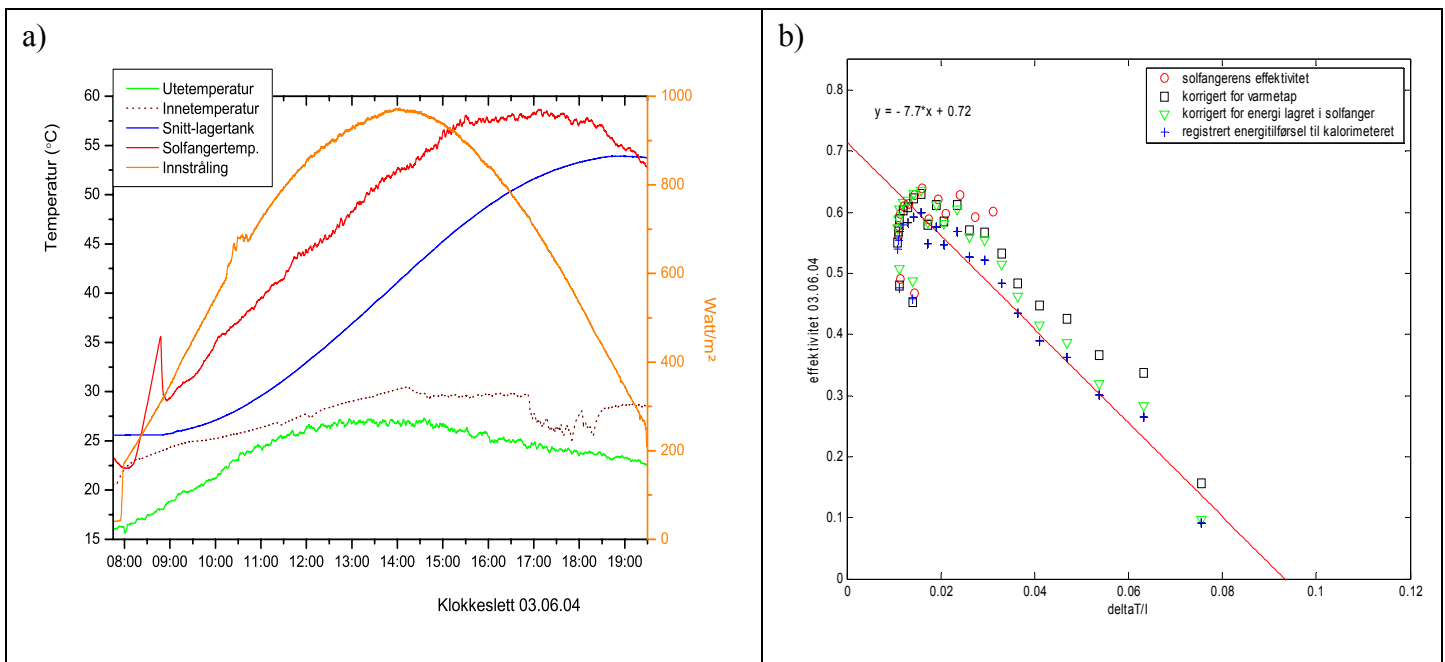
Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.167	748.16	16.5	0.78969	-0.0023939	0.41875	19.658	0.40619
11.583	809.38	17.627	1.0597	-0.0014865	0.51894	14.501	0.51762
12	859.97	19.054	1.4791	0.00050806	0.68175	9.8675	0.6956
12.417	894.89	20.952	1.5537	0.0022468	0.68817	6.9249	0.70537
12.833	923.98	22.543	1.4612	0.0030973	0.62649	7.8824	0.6431
14.667	945.28	30.72	1.4397	0.010418	0.60321	29.599	0.63853
15.083	923.26	32.453	1.3856	0.012588	0.59439	35.064	0.63604
15.5	891.42	34.182	1.3532	0.015385	0.60119	40.541	0.65423
15.917	850.22	35.774	1.1931	0.017452	0.55573	46.013	
16.333	800.39	37.216	1.1007	0.020271	0.54462	51.47	
16.75	753.16	38.52	0.96679	0.023027	0.50841	56.899	
17.167	694.46	39.628	0.8256	0.026201	0.47086	62.292	
17.583	614.18	40.576	0.68466	0.03031	0.44152	67.641	
18	528.02	41.503	0.77254	0.037182	0.57948	72.933	
18.42	474.92	42.274	0.56826	0.042066	0.47391	78.156	
18.833	395.22	42.838	0.4261	0.050933	0.42711	83.298	
19.25	314.05	43.174	0.11684	0.063371	0.14739	88.343	



Figur A.15 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 31.05.04  
 b) Effektivitetspunkter for 31.05.04, lineær tilpasning til systemeffektiviteten.

Tabell A – 16 Rådata fra 3. juni, 2004

Klokka	Innstråling	T <sub>tank</sub> (snitt)	Økn.(T <sub>tank</sub> )	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
9.9167	528.89	27.055	0.61355	0.013917	0.45766	35.784	0.46789
10.333	628.04	27.928	0.75955	0.011116	0.477	30.313	0.49156
10.75	686.41	29.018	0.93865	0.010692	0.53935	24.871	0.56065
11.167	746.72	30.256	1.0489	0.010892	0.55402	19.502	0.57837
11.583	803.28	31.654	1.1596	0.011254	0.56935	14.309	0.59722
12	851.3	33.192	1.2517	0.012005	0.57988	9.6009	0.60997
12.417	888.15	34.774	1.3119	0.013027	0.58255	6.5507	0.61361
12.833	917.46	36.457	1.3799	0.014316	0.59316	7.5532	0.62809
13.25	941.23	38.168	1.4287	0.015776	0.59868	11.6	0.63849
13.667	960.15	39.908	1.3368	0.017194	0.54914	16.591	0.58898
14.083	968.58	41.689	1.4147	0.019092	0.5761	21.883	0.62212
14.5	961.38	43.446	1.3331	0.020707	0.54705	27.292	0.59751
14.917	942.13	45.146	1.3591	0.023503	0.56912	32.751	0.6293
15.333	911.03	46.761	1.2165	0.02619	0.5268	38.226	0.59316
15.75	869.3	48.223	1.1475	0.029368	0.52089	43.701	0.60043
16.167	823.48	49.563	1.0113	0.032885	0.48462	49.161	
16.583	768.9	50.723	0.84728	0.036363	0.43484	54.598	
17	707.09	51.716	0.69931	0.040999	0.39028	60	
17.417	637.45	52.521	0.5852	0.046978	0.36241	65.36	
17.833	564.69	53.146	0.4306	0.053781	0.30103	70.666	
18.25	484.91	53.602	0.32613	0.063278	0.26551	75.909	
18.666	407.98	53.88	0.09385	0.075547	0.090811	81.066	



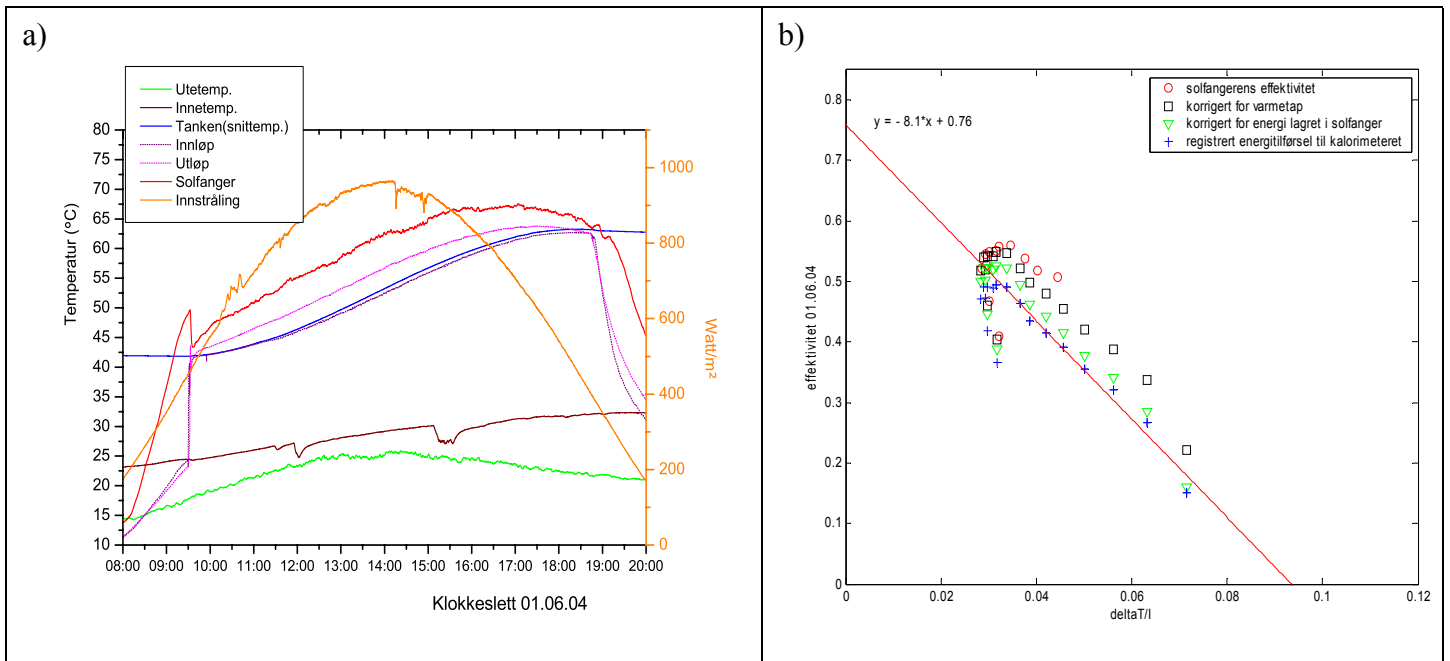
Figur A.16 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 03.06.04  
 b) Effektivitetspunkter for 03.06.04, lineær tilpasning til systemeffektiviteten.



• Data fra dager hvor strømningshastigheten var satt til 400l/h.

Tabell A – 17 Rådata fra 1. juni, 2004

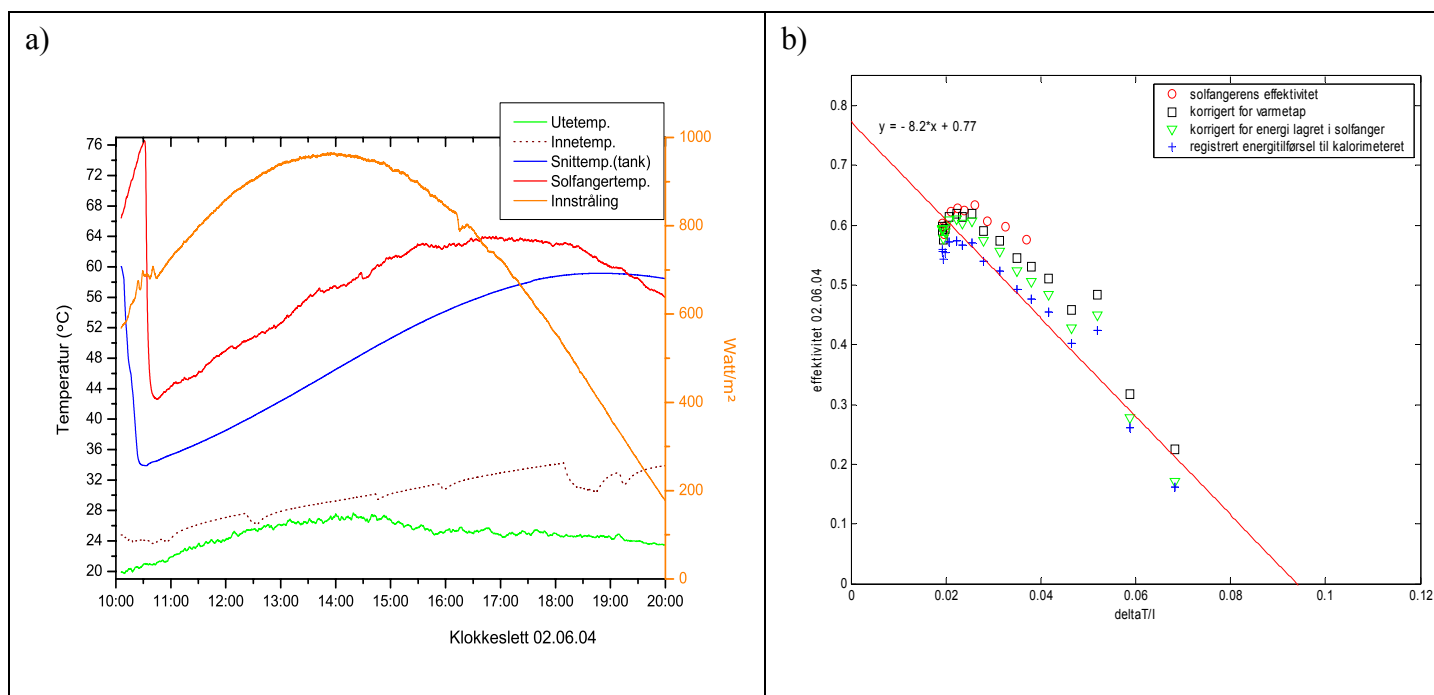
Klokka	Innstråling	T <sub>tank</sub> (snitt)	Økn.(T <sub>tank</sub> )	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.166	748.48	44.398	0.69518	0.031726	0.36565	19.611	0.41016
11.583	805.85	45.358	0.85742	0.029825	0.41887	14.437	0.46719
12	853.58	46.578	1.024	0.029292	0.4723	9.7732	0.5265
12.417	893.55	47.905	1.0673	0.028326	0.47038	6.7938	0.52229
12.833	913.71	49.309	1.1382	0.028993	0.49055	7.7643	0.54545
13.25	941.41	50.758	1.175	0.029771	0.49152	11.747	0.5493
13.666	954.94	52.252	1.1877	0.031033	0.48978	16.694	0.55042
14.083	962.34	53.749	1.2064	0.031543	0.49387	21.976	0.55803
14.5	939.24	55.225	1.1701	0.033808	0.49076	27.377	0.55957
14.917	921.34	56.63	1.0863	0.036597	0.4645	32.831	0.53726
15.333	904.01	57.942	0.99678	0.038711	0.43458	38.302	0.51875
15.75	866.08	59.174	0.91388	0.042114	0.41588	43.782	0.50748
16.166	819.02	60.263	0.81193	0.045774	0.39072	49.236	
16.583	768.22	61.218	0.6913	0.050158	0.35467	54.68	
17	706.29	62.051	0.57399	0.05623	0.3203	60.091	
17.417	641.71	62.698	0.43513	0.063256	0.2674	65.455	
17.833	571.32	63.066	0.21913	0.071565	0.15125	70.764	



Figur A.17 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 01.06.04  
 b) Effektivitetspunkter for 01.06.04, lineær tilpasning til systemeffektiviteten.

Tabell A – 18 Rådata fra 2. juni, 2004

Klokka	Innstråling	T_tank(snitt)	Økn.(T_tank)	x-akse	etta	tetta	etta_3kor
11.583	807.4	37.302	1.1141	0.019361	0.54425	14.369	0.58431
12	858.38	38.756	1.2116	0.019205	0.55674	9.6843	0.59788
12.417	897.6	40.324	1.2735	0.019172	0.5596	6.6689	0.6035
12.833	928.77	41.969	1.3044	0.019782	0.55395	7.6568	0.59937
13.25	948.65	43.645	1.3757	0.02077	0.57209	11.671	0.62224
13.667	958.55	45.377	1.3967	0.022204	0.57482	16.645	0.62888
14.083	960.82	47.133	1.3801	0.023499	0.56666	21.928	0.62398
14.5	951.78	48.861	1.3769	0.02557	0.57087	27.333	0.63339
14.917	936.09	50.526	1.2806	0.027878	0.53986	32.79	0.60697
15.333	909.58	52.116	1.2049	0.031286	0.52273	38.265	0.59714
15.75	870.41	53.575	1.0849	0.034904	0.49206	43.74	0.57611
16.167	821.55	54.896	0.98999	0.038089	0.47571	49.202	
16.583	775.59	56.058	0.89429	0.041634	0.45519	54.64	
17	722	57.084	0.7368	0.046547	0.40286	60.044	
17.417	656.65	57.94	0.70384	0.051979	0.42334	65.407	
17.833	585.92	58.632	0.38771	0.058705	0.26134	70.716	
18.25	509.49	59.005	0.20816	0.068176	0.16137	75.962	



Figur A.18 a) Solinnstråling og temperaturutvikling 02.06.04

b) Effektivitetspunkter for 02.06.04, lineær tilpasning til systemeffektiviteten.

### A.3 Matlab-kommandoer som fører fram til effektivitetsgrafene

```

Import Wizard created variables in the current workspace.
>> I_0306=eff1b_030604(:,6);
Ttank_Tute0306=eff1b_030604(:,2);
Ttank_Tinne0306=eff1b_030604(:,3);
Ttank_0306=eff1b_030604(:,4);
deltaTtank_0306=eff1b_030604(:,5);
deltaTid=repmat(1200,22,1);
A_solfangere=repmat(4.23,22,1);
tau_0=repmat(0.85,22,1);
c_5solfangere=repmat(165650.*0.9234./1.2096,22,1);
tapskoeffisient=repmat(7.574,22,1);
C_vann0306=[4179.3;4178.2;4178.2;4178.2;4178.2;4177.9;4177.9;4177.9;4177.9;4178.3;4178.3;4178.3;4179.2;4179.2;4179.2;4180.4;4180.4;4180.4;4180.4;4182.1;4182.1;4182.1;4182.1];
m_vann030604=repmat(466,22,1);
mc_vann0306=m_vann030604.*C_vann0306;
C_lageruvann=repmat(55000,22,1);
deltaQkalorimeter_0306=(C_lageruvann+mc_vann0306).*deltaTtank_0306;
C_vann0306=mc_vann0306./466;
dT_0306=((55000+mc_vann0306).*deltaTtank_0306.*3600000)./(2.*deltaTid.*C_vann0306.*280.*996);
xakse_0306=((Ttank_0306+dT_0306)-Tute_0306)./I_0306;
deltaQsoll_0306=A_solfangere.*I_0306.*deltaTid;
deltaQsolfangere_0306=c_5solfangere.*deltaTtank_0306;
Klokka_0306=eff1b_030604(:,1);
deltaQpumpe_roer_tank0306=tapskoeffisient.*Ttank_Tinne0306.*deltaTid;
etta_0306=deltaQkalorimeter_0306./deltaQsoll_0306;
>> save effdata_030604
>> deklinasjon_0306=repmat(sin((284+155)*2*pi/365)*23.45,22,1);
timevinkel_0306=180-15.*(Klokka_0306-1.25);
costetta_0306=sin(2.*pi./360.*deklinasjon_0306).*0.733986755-sin(2.*pi./360.*deklinasjon_0306).*0.252448508+cos(2.*pi./360.*deklinasjon_0306).*cos(2.*pi./360.*timevinkel_0306).*0.42479291+cos(2.*pi./360.*deklinasjon_0306).*cos(2.*pi./360.*timevinkel_0306).*0.436198103+cos(2.*pi./360.*deklinasjon_0306).*sin(2.*pi./360.*timevinkel_0306).*0.163754058;
tetta_igrader_0306=360./(2.*pi).*acos(costetta_0306);
tau_tetta0306=0.85-2.12.*10.^(-3).*tetta_igrader_0306+9.33.*10.^(-5).*tetta_igrader_0306.^2-1.82.*10.^(-6).*tetta_igrader_0306.^3;
I_kor0306=I_0306.*tau_tetta0306./tau_0;
>>I_2kor0306=I_0306.*0.3+I_kor0306.*0.7;
etta_0306_tapkor=(deltaQkalorimeter_0306+deltaQsolfangere_0306+(deltaQpumpe_roer_tank0306-repmat(108000,22,1)))/deltaQsoll_0306;
etta_2305_sfkor=(deltaQkalorimeter_2305+deltaQsolfangere_2305)/deltaQsoll_2305;
xakse_lkor0306=((Ttank_0306+dT_0306)-Tute_0306)./I_2kor0306;
deltaQsollkor_0306=A_solfangere.*I_2kor0306.*deltaTid;
etta_0306_solffanger=(deltaQkalorimeter_0306+deltaQsolfangere_0306+(deltaQpumpe_roer_tank0306-repmat(108000,22,1)))/deltaQsollkor_0306;
save effdata_030604
plot(xakse_lkor0306(1:15),etta_0306_solffanger(1:15),'ro')
hold
plot(xakse_0306,etta_0306_tapkor,'ks')
plot(xakse_0306,etta_0306_sfkor,'gv')
plot(xakse_0306,etta_0306,'+')
xlabel('delta T/I');
ylabel('effektivitet 03.06.04')
axis([0 0.12 0 0.85]);
legend('solffangerens effektivitet','korrigeret for varmetap','korrigeret for energi lagret i solffanger','registrert energitilførsel til kalorimeteret')

```

Figur A.19 Kopi av et kommandovindu i Matlab med kommandoene for å få fram effektivitetsplot.

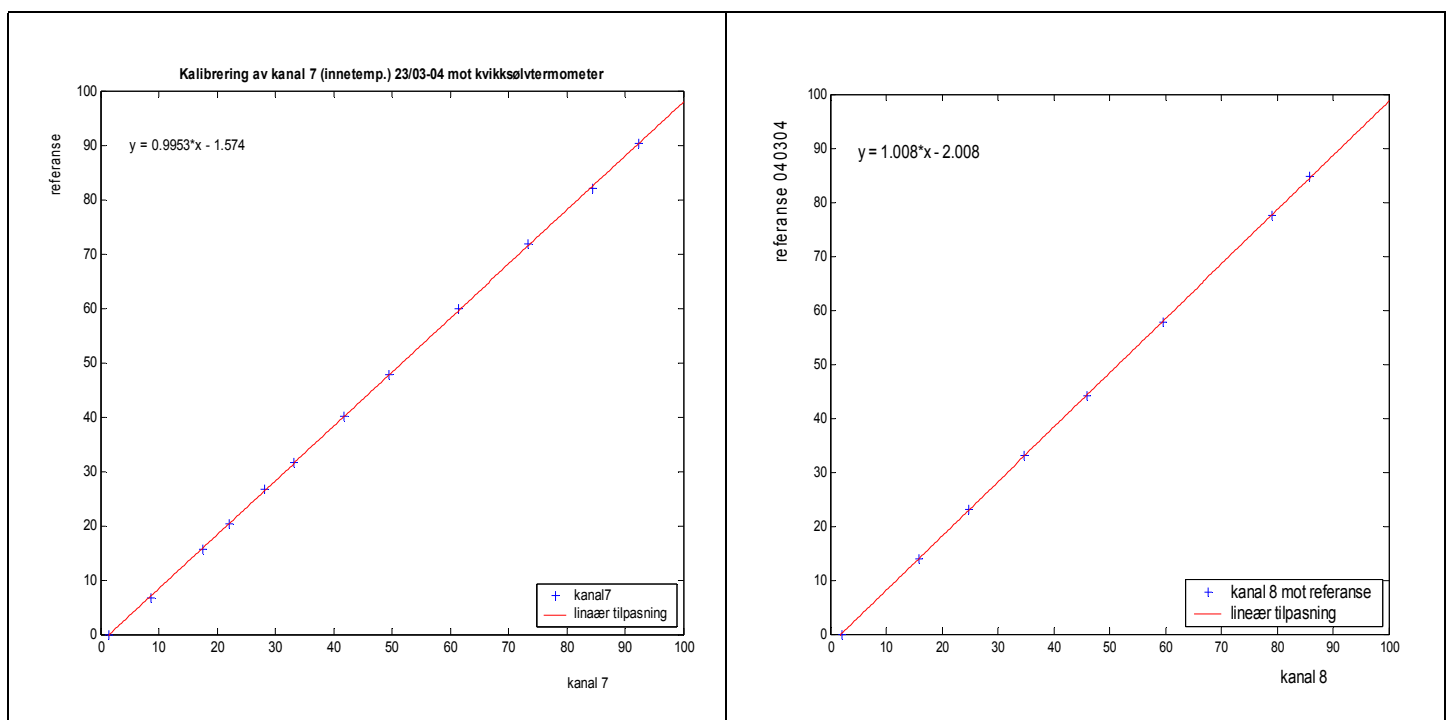


# Vedlegg B

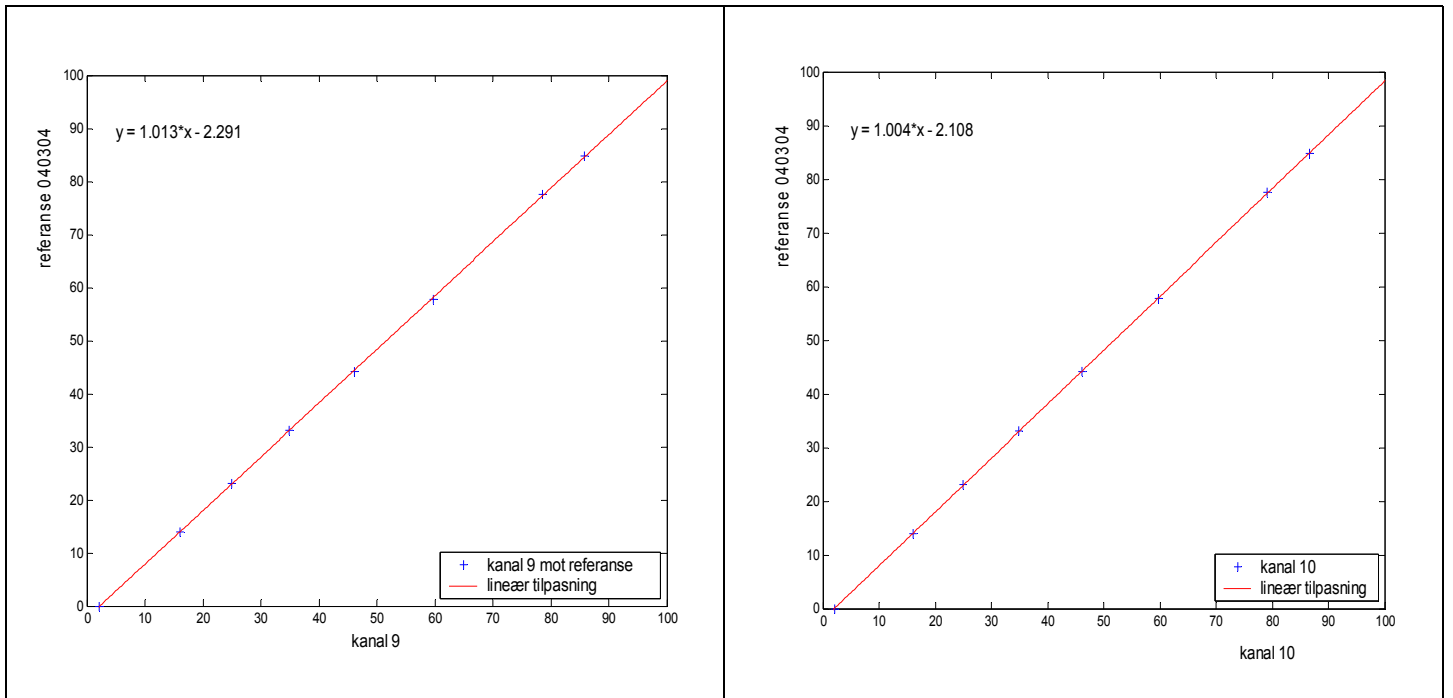
## B Supplerende beregninger

### B.1 Kalibreringsfigurene

- Kalibreringer gjort i mars, 2004 i samarbeid med Gunn Spikkeland.

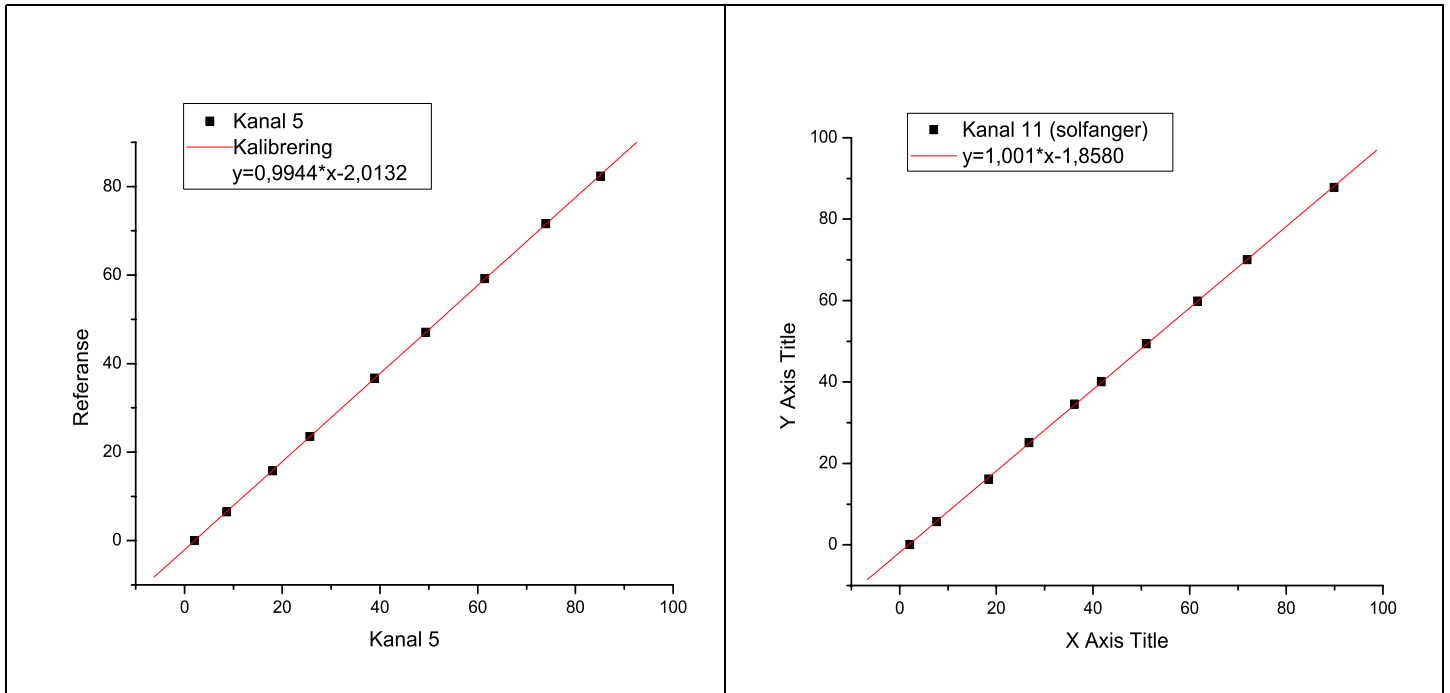


**Figur B.1** Kalibrering av sensor til kanal 7 og kanal 8. Et kvikksølvtermometer er brukt som referanse. Lineær tilpasning er gjort ved minste kvadraters metode.

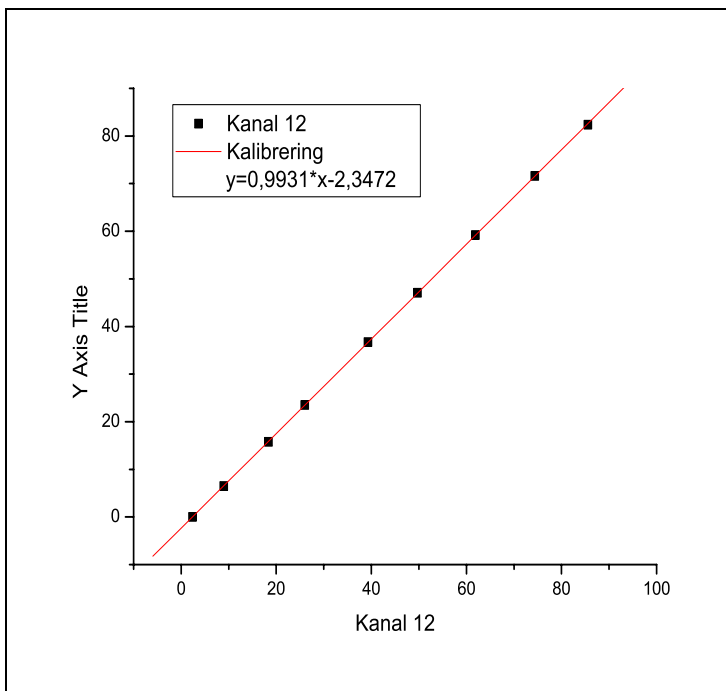


Figur B.2 Kalibrering av sensor til kanal 9 og 10.

- Kalibreringer gjort av Gunn Spikkeland og Øyvind Mathisen



**Figur B.3** Kalibrering av sensor til kanal 5 og kanal 11.



**Figur B.4** Kalibrering av sensor til kanal 12.

For mer informasjon om kalibrering av temperatursensorene, henvises det til Spikkeland G, hovedoppgave i fysikk, ferdig våren 2004.

### • Kalibrering av solarimeteret

Solarimeteret ble kalibrert av Katharina Brnic sommeren 2002.

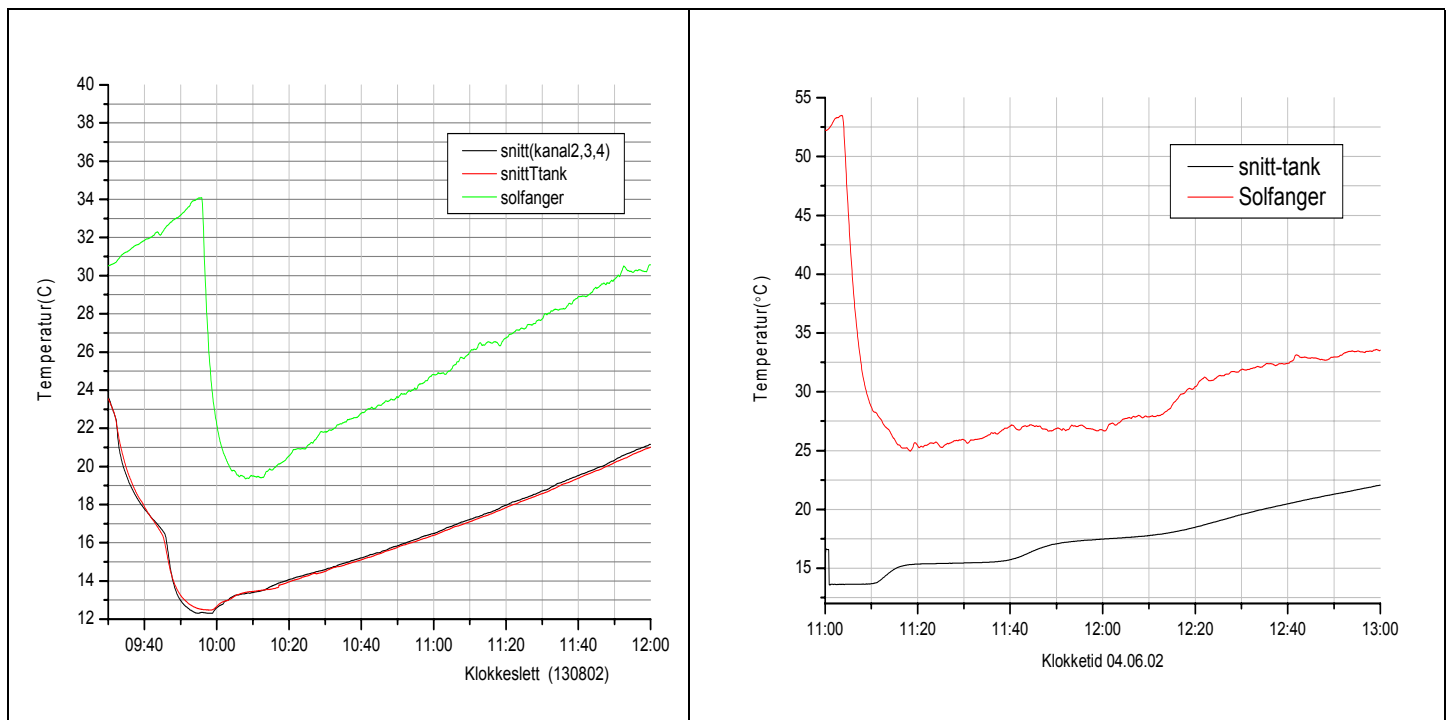
Kalibreringsligning som ble brukt i 2002:

$$\left(\frac{9905x}{1,29} + 6,83 \pm (1,05)\right) (W/m^2)$$

når innstrålinga måles i Volt.

For mer informasjon om kalibrering av solarimeteret, henvises det til Brnic K, hovedoppgave i fysikk, ferdig høsten 2004.

## B.2 Figurer til bestemmelse av solfangerens varmekapasitet



Figur B.5 Temperaturutvikling etter oppstart i tanken og på solfangeren for 13.august og 4.juni, 2002.





