



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Solassisterede ventilationstårne på Frederiksberg

Delrapport 2 Virkemåde og effektivitet af soltårne



Maj 2002



SOLENERGICENTRET

SEC-R-25

Solassisterede ventilationstårne på Frederiksberg

– Delrapport II Virkemåde og effektivitet af soltårne

Maj 2002

Trine Dalsgaard Jacobsen

Solassisterede ventilationstårne på Frederiksberg
– Delrapport II Virkemåde og effektivitet af soltårne
SEC-R-25
1.udgave, 1. oplag 2002
© Teknologisk Institut, 2002
Energidivisionen

ISBN: 87-7756-664-5
ISSN: 1600-3780

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	2
1.1	Baggrund	2
1.2	Projektets formål	3
1.3	Beskrivelse af bebyggelsen	3
2.	Ventilationsprincip	6
2.1	Soltårne	6
2.2	Varmevekslere	8
2.3	Ventilation i lejligheder	9
3.	Måleprogram	10
3.1	Målepunkter i solvæg	10
3.2	Målepunkter i lejlighed	11
3.3	Målepunkter på loft	12
4.	Måleresultater	13
4.1	Målinger fra kølig periode	13
4.2	Målinger fra varm sommerperiode	16
4.3	Skygger på soltårnene	19
4.4	Solfangereffektivitet	22
4.5	Temperaturer i soltårn	23
4.6	Varmeveksler	25
4.7	Samlet systemvirkningsgrad	27
4.8	Varmetab fra kanaler	29
4.9	Opsætning af varmeblæser efter varmeveksler	30
4.10	Ydelser	31
5.	Konklusion	33
6.	Referenceliste	35

1. Indledning

Denne rapport beskriver SolEnergiCentrets arbejde i forbindelse med EFP-projektet "Sol-assisterede ventilationstårne på Frederiksberg", journal nr. 1213/00-0029, der er finansieret af Energistyrelsens EnergiForskningsProgram EFP 2000.

Denne rapport beskriver resultater fra målinger foretaget af SolEnergiCentret i perioden 6/4-2001 til 28/11-2001. Målingerne har haft til formål at dokumentere virkemåde og effektivitet af soltårne opsat i bebyggelsen Lineagården på Frederiksberg. Følgende fra SolEnergiCentret har medvirket i projektet:

Trine Dalsgaard Jacobsen, civ. ing.
Søren Østergaard Jensen, civ. ing.
Ole Larsen, laboratorietekniker
William Otto, laboratorietekniker
Lars Bo Molnit, ing. studerende

1.1 Baggrund

Det betragtede ventilationskoncept er udviklet gennem et samarbejde mellem firmaerne Cenergia ApS, SolarVent, EBO Consult og det tyske specialistfirma EBÖK. Ventilationskonceptets formål er at kombinere et solassisteret ventilationssystem med varmegenvinding, så det samlede anlæg har et kraftigt reduceret energiforbrug, samtidig med at der sikres et forbedret indeklima.

Ventilationstårnskonceptet er udviklet med specielt henblik på renovering af ældre ejendomme, hvor det kan være svært i praksis at indpasse gode ventilationssystemer, f.eks. fordi det kan være svært at finde plads til de nødvendige ventilationskanaler. Ideen er at placere et ventilationstårn uden på bygningen på en arkitektonisk attraktiv måde og indbygge frisklufts- og afkastkanaler i denne tårnløsning, samtidig med at overfladen kan benyttes til udnyttelse af solenergi.

I opvarmningssæsonen skal solvægge på overfladen af ventilationstårnene forvarme friskluften, inden den suges igennem en varmeveksler. Om sommeren vil solvæggene kunne skabe termisk opdrift og dermed drivkraft til naturlig ventilation af lejlighederne.

Ventilationskonceptets fordele:

- varmegenvinding vinter
- naturlig ventilation sommer
- energibesparende, lavt elforbrug, varmegenvinding
- udnyttelse af solenergi
- bedre indeklima
- mindre konstruktion
- ingen tab af udnytteligt boligareal
- muligheder for brug af forskellige typer dæklag, f.eks. solceller

Ventilationstårnene er i samarbejde med Frederiksberg Boligfond opsat i de to bebyggelser Lineagården og Trekanten på Frederiksberg. I bebyggelsen Trekanten med i alt

90 lejligheder er der opsat to tårne i forbindelse med et EU-Thermie solcelle projekt ”Innopex” (Innopex, 1998). I bebyggelsen Lineagården med 167 lejligheder er der opført yderligere 30 ventilationstårne i forbindelse med et EU-Thermie projekt ”SunVent” (SunVent, 1998).

1.2 Projektets formål

Det overordnede formål med EFP-projektet er at gennemføre et detaljeret måleprogram til fastlæggelse af de termiske egenskaber og ydelser for ventilationssystemet og solenergiløsningerne, samt til dokumentation for effekten på indeklimaet i lejlighederne. Målet er at udvikle det betragtede ventilationstårnkoncept, så det kan indgå som en energirigtig løsning ved boligrenovering af ældre etageejendomme. Det samlede måleprogram omfatter tre undersøgelser:

- indeklima i lejligheder før og efter renovering
- ventilationsanlæggets virkemåde
- solvæggens effektivitet

Denne rapport SolEnergiCentrets del af projektet, som omhandler målinger af den termiske ydeevne af solvæggene, samt af samspillet mellem solenergiudnyttelsen og det øvrige ventilationsanlæg.

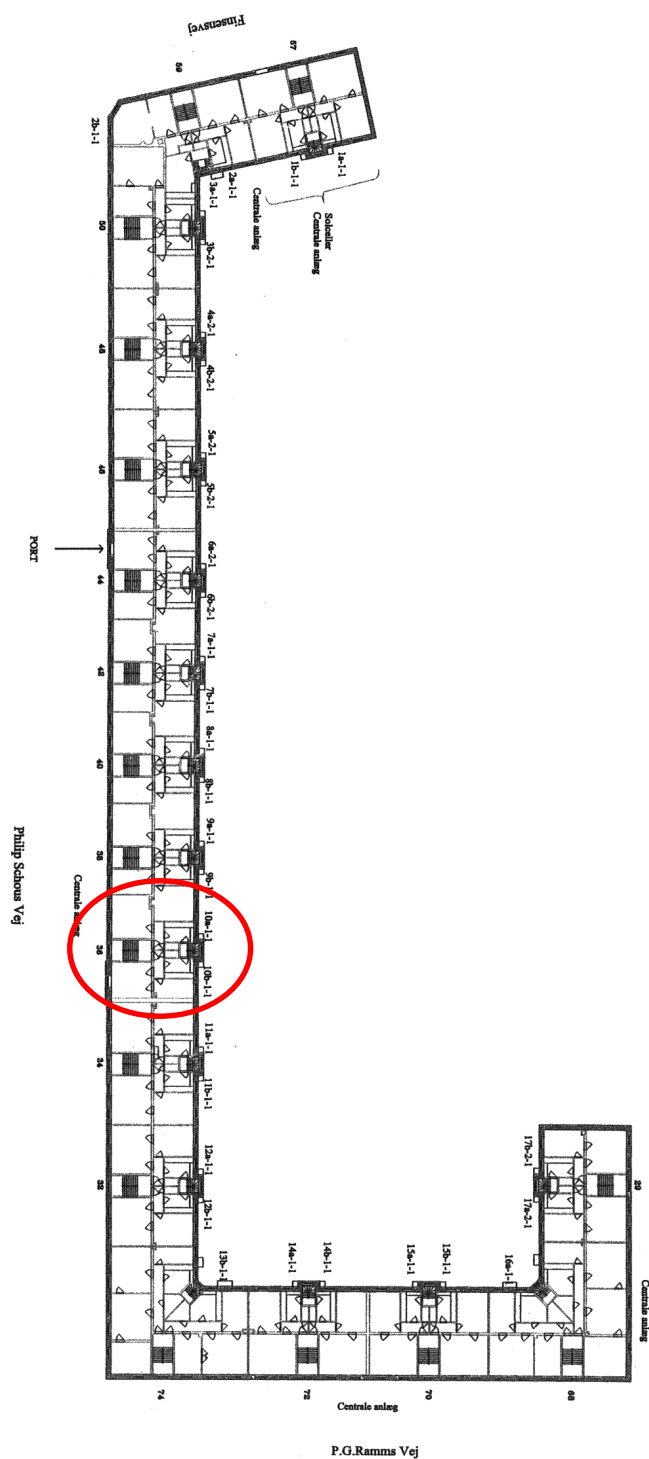
1.3 Beskrivelse af bebyggelsen

Lineagården er et lejlighedskompleks beliggende på Frederiksberg med adresser på hhv. Finsensvej, Philip Schous vej, P. G. Ramms Allé og Julius Valentiners vej. Bebyggelsen har 5 etager og består af i alt 167 lejligheder, figur 1.1.



Figur 1.1 Lineagården – facade mod Philip Schous vej

På figur 1.2 nedenfor ses en situationsplan over Lineagården. Der gennemføres målinger på soltårne og ventilationsanlæg i forbindelse med Philip Schous vej 36, der er indtegnet på kortet.



Figur 1.2 Situationsplan for Lineagården

Situationsplanen viser kun den del af bebyggelsen, der hører under Frederiksberg Boligfond. Reelt er der bebyggelse hele vejen rundt om gården med bygninger i samme stil og højde.

Der er tale om en ældre bebyggelse fra 1920-erne bl.a. uden bade faciliteter i lejlighederne. I 1999 blev de gamle vinduer 1-lags vinduer udskiftet med nye termoruder, der erfaringsmæssigt er væsentligt tættere end de gamle. Derved opstår der risiko for en forøget luftfugtighed i lejlighederne, og der er derfor behov for ventilation. Ligeledes giver lejlighedernes køkkener, der har gasblus men ikke emhætte, et stort behov for ventilation af lejlighederne. Det er derfor valgt at opsætte et ventilationsanlæg i ejendommen, med kontrolleret indblæsning og udsugning i vinterperioden og ren udsugning i sommerperioden. Bebyggelsen og de gennemførte renoveringer er beskrevet yderligere i del I af denne rapportserie.



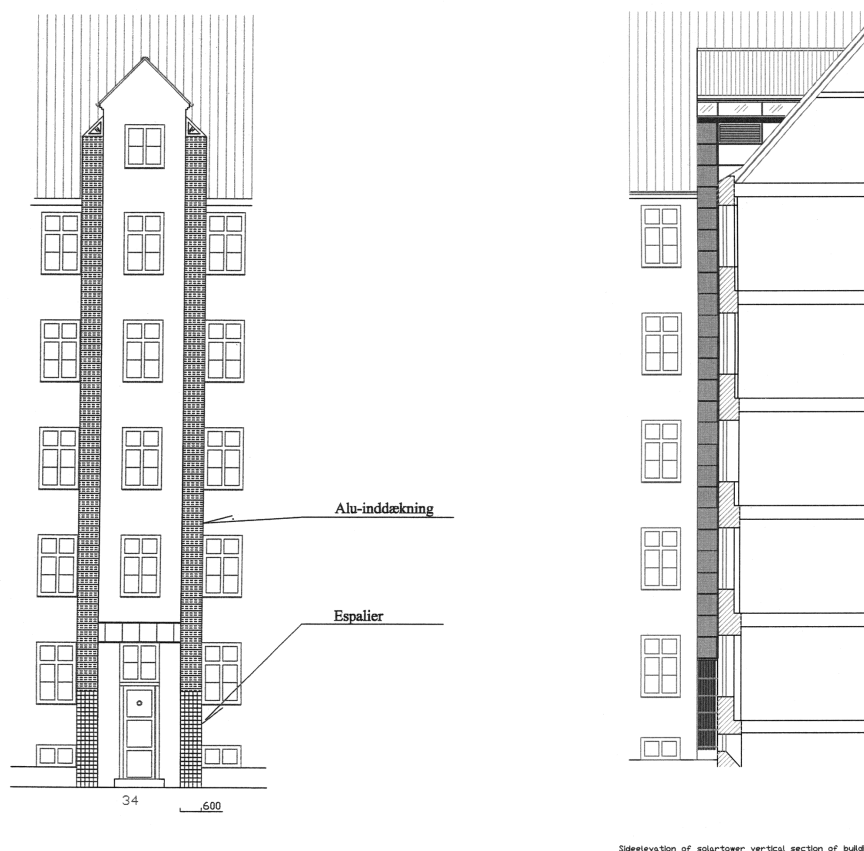
Figur 1.3 Lineagården set fra gården

2. Ventilationsprincip

Ventilationsanlægget udgøres af et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding og kombineret indblæsning og udsugning fra lejlighederne. Anlæggene er bygget op med en central varmeveksler for hver opgang, der således dækker i alt 10 lejligheder. Soltårnene bidrager med et varmetilskud til friskluften, inden den passerer varmeveksleren. Samtidig virker soltårnene som føringsveje for ventilationskanalerne til og fra lejlighederne. I sommerperioden tilføres ikke friskluft til lejlighederne via ventilationssystemet, idet det forudsættes, at beboerne selv tilfører friskluft ved åbning af vinduer. Der er dog stadig udsugning fra lejlighederne. Den opvarmede luft fra soltårnene udluftes ved hjælp af termostatsyrede ventilationsriste i toppen af tårnene.

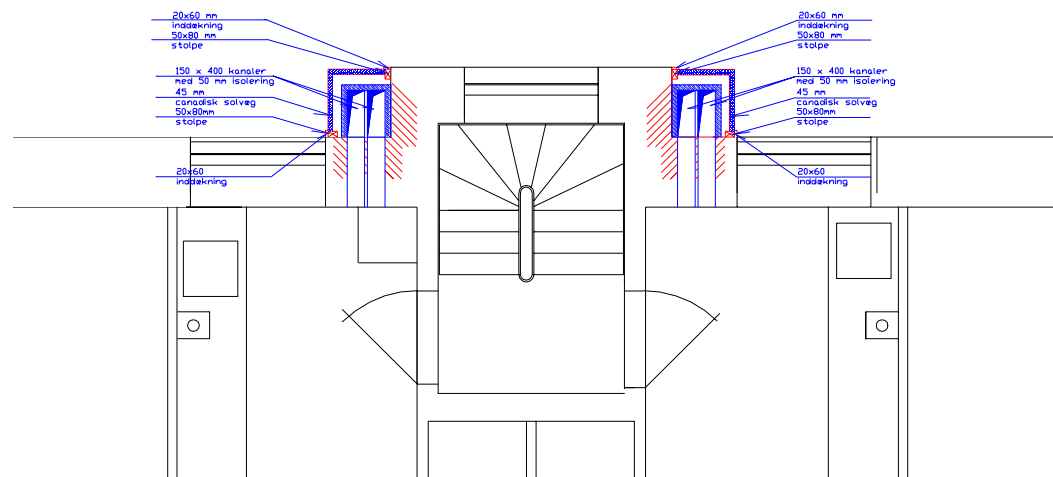
2.1 Soltårne

Soltårnene fungerer dels som solvægge, dels som føringsveje for ventilationsluft til og fra lejlighederne. Tårnene er opbygget som smalle kasser, der følger siderne af de eksisterende trappeopgange (bagtrapper). For hver opgang er der derfor 2 soltårne, en på hver side af opgangen. Derved er det forsøgt at tage mest muligt hensyn til den eksisterende arkitektur. Tegninger af soltårnene er vist i figur 2.1.



Figur 2.1 Tegning af soltårne set forfra og fra siden

Selve solvæggen er opbygget som den canadiske "Solarwall", der består af gennemhullede plader af aluminium. Udeluften suges gennem ind de mange små huller i pladerne, hvorved der sikres en god varmeovergang mellem plade og luft. Der tages således luft ind over hele solvæggens flade. Friskluften føres op til en varmeveksler på loftet gennem den spalte, der dannes af hulrummet mellem solvægspladen og de bagvedliggende kanaler til hhv. friskluft til lejligheder og afkastluft. Opbygningen af soltårnene er vist i en snittegning i figur 2.2.



Figur 2.2 Snittegning i solvæg

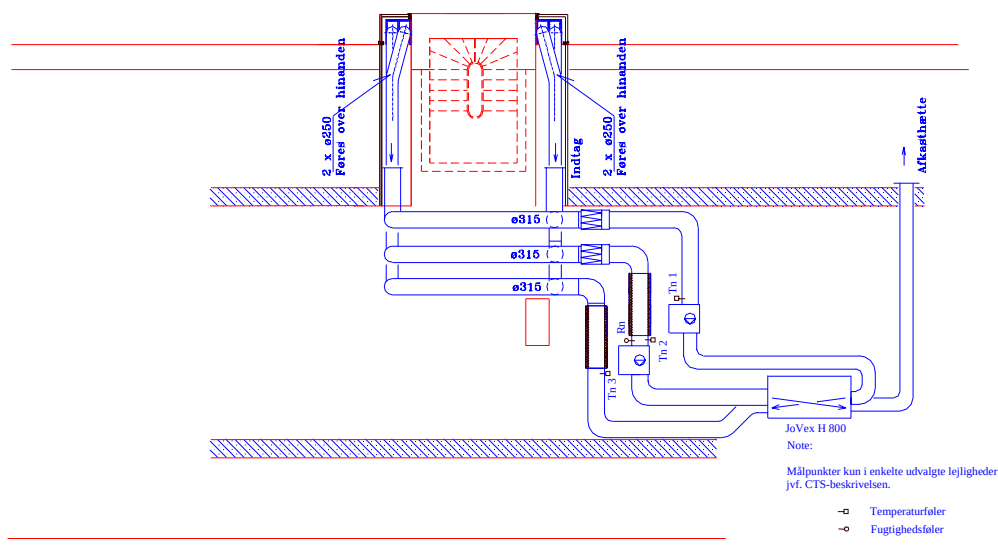
Soltårnene ender øverst i et lille kammer med vinduer, som vist på figur 2.3 I sommerperioden ventileres soltårnene ved hjælp af en termostatstyret ventilationsrist placeret i den øverste del af tårnene. Denne er ligeledes vist i figur 2.3. Mulighederne for at benytte soltårnene til generering af drivtryk til naturlig ventilation af lejlighederne udnyttes ikke.



Figur 2.3 Den øverste del af soltårnet. På siden ses en ventilationsrist til udluftning af solvæggen i sommersituationer

2.2 Varmevekslere

I loftsrummet over hver opgang samles luften fra hver af de to soltårne i en fælles friskluftskanal. En central modstrømsvarmeveksler for hver opgang genvinder varmen fra afkastluften og opvarmer friskluften yderligere. Efter passage af varmeveksleren opdeles friskluften igen i to strenge til lejlighederne på hver side af trappeopgangen. På samme måde samles afkastluften fra 2 strenge til et fælles afkast. På figur 2.4 ses en princip-tegning af installationen på loftet af bygningen.



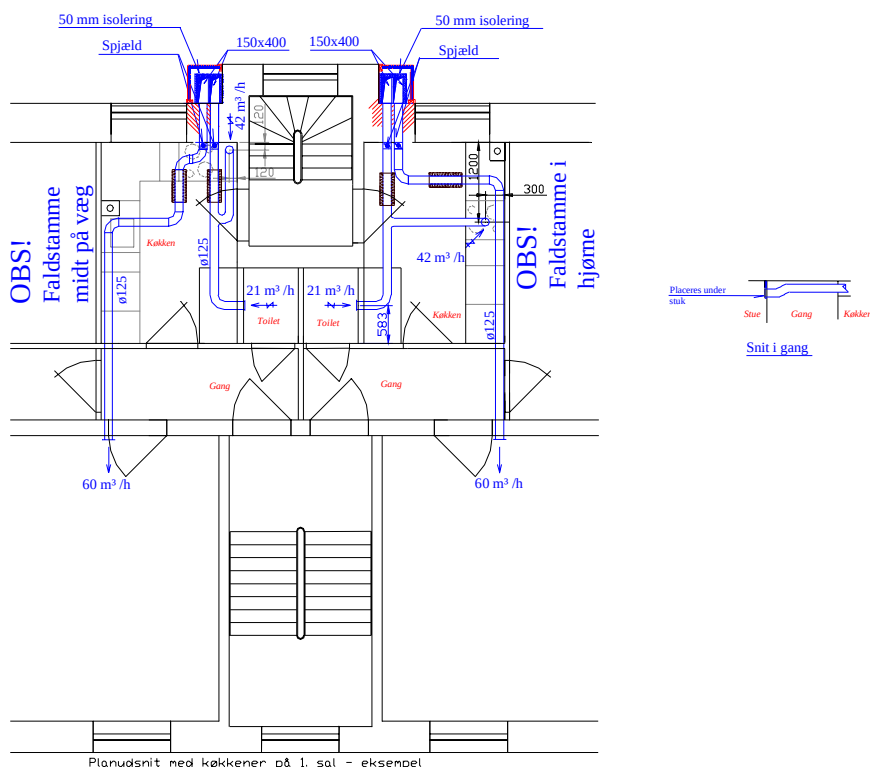
2.3 Ventilation i lejligheder

I lejlighederne bliver friskluften indblæst i stuen, mens udsugning sker fra køkkenet og toiletet. I sommerperioden er der udelukkende udsugning fra lejlighederne, mens friskluften forventes at blive tilført via vinduerne.

Beboerne har mulighed for at indstille ventilationsniveauet i 3 trin, samt at vælge mellem 2 ventilationsstrategier - "sommer" eller "normal". I "normal" drift er der både indblæsning og udsugning fra lejligheden, mens der i "sommer"-drift kun er udsugning.

I normal drift med en indstilling på trin 2 suges ca. $42 \text{ m}^3/\text{h}$ fra køkkenet og $21 \text{ m}^3/\text{h}$ fra toilettet, mens der indblæses ca. $60 \text{ m}^3/\text{h}$ til stuen. Det er dermed meningen, at der skal være et konstant undertryk i lejligheden.

I forbindelse med opsætning af ventilationsanlægget i lejlighederne, blev der opsat nedhængte lofter i køkkenet. I den forbindelse blev køkkenets radiator, der var placeret over en dør, taget ned. Dermed er der ikke noget varmeanlæg i køkken, gang eller toilet. Det kan have betydning for indeklimaet i lejlighederne, idet ydervæggene er uisolerede, og det kan måske være svært at opretholde en acceptabel indetemperatur i disse rum. Ventilationsanlægget har udsugning i køkken og bad, altså i rummene uden radiator. Dette kan have betydning for muligheden for varmegenvinding i veksleren.

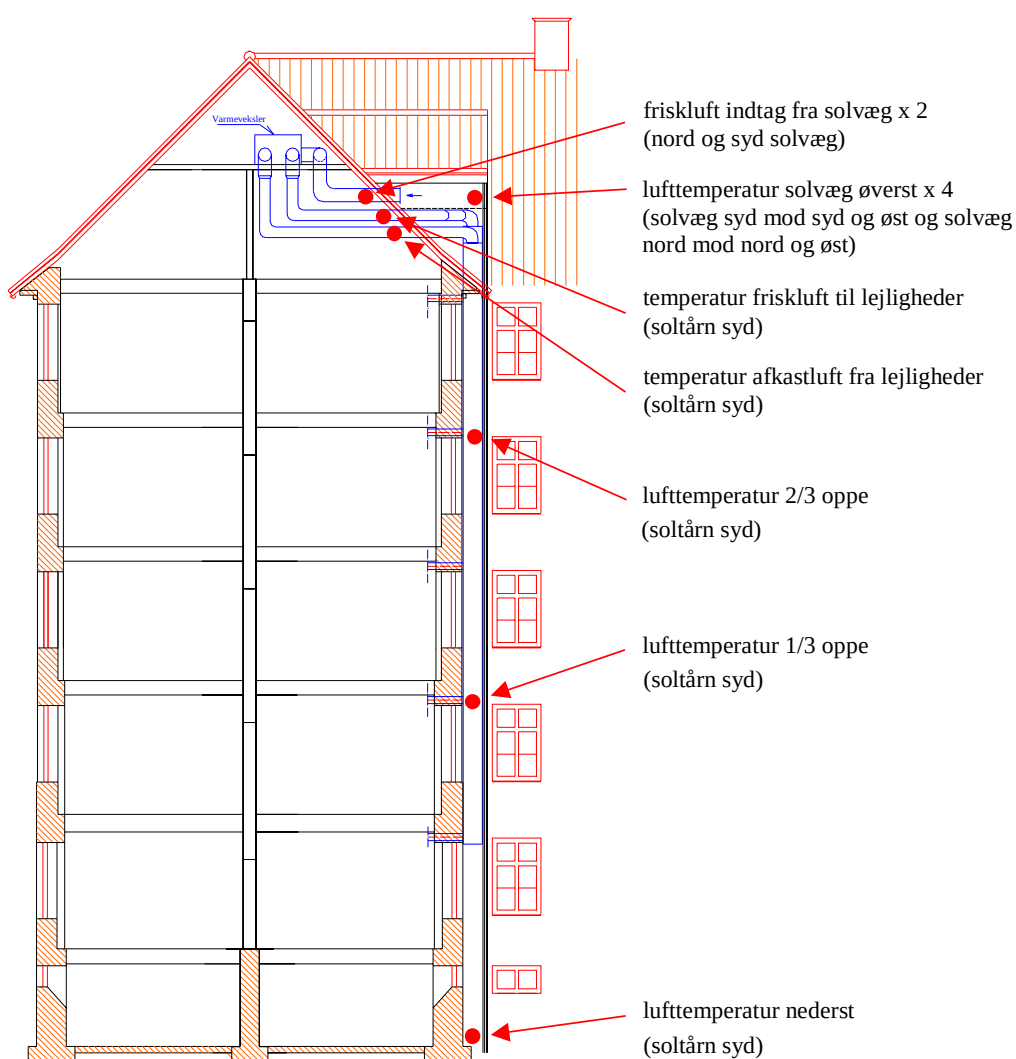


Figur 2.5 Snittegning fra lejlighed. Det meste af installationen ligger i et nedhængt loft over køkkenet.

3. Måleprogram

3.1 Målepunkter i solvæg

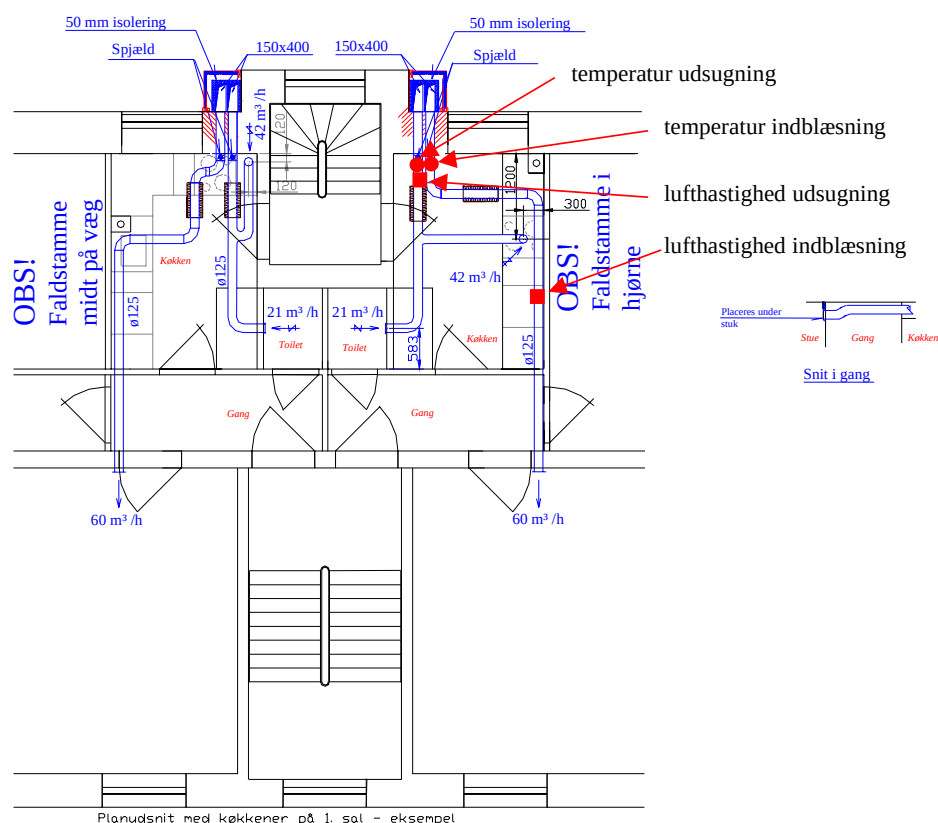
Intentionen med målingerne på solvæggen er at fastlægge solvæggenes effektivitet, samt hvor stort et varmetilskud, der gives til lejlighederne. Samtidig undersøges opvarmningsprofilen op gennem solvæggen, samt forskellen på hhv. den nordlige og sydlige solvæg. Disse forhold undersøges ved hjælp af temperaturmålinger i forskellige niveauer i den sydlige solvæg, samt øverst i hver side af hver solvæg. Desuden måles lufthastigheden i kanalerne fra hver solvæg, hvorved luftmængder og dermed varmetilskuddet kan beregnes.



Figur 3.1 Placering af målepunkter i solvæg og nederste del af loft

3.2 Målepunkter i lejlighed

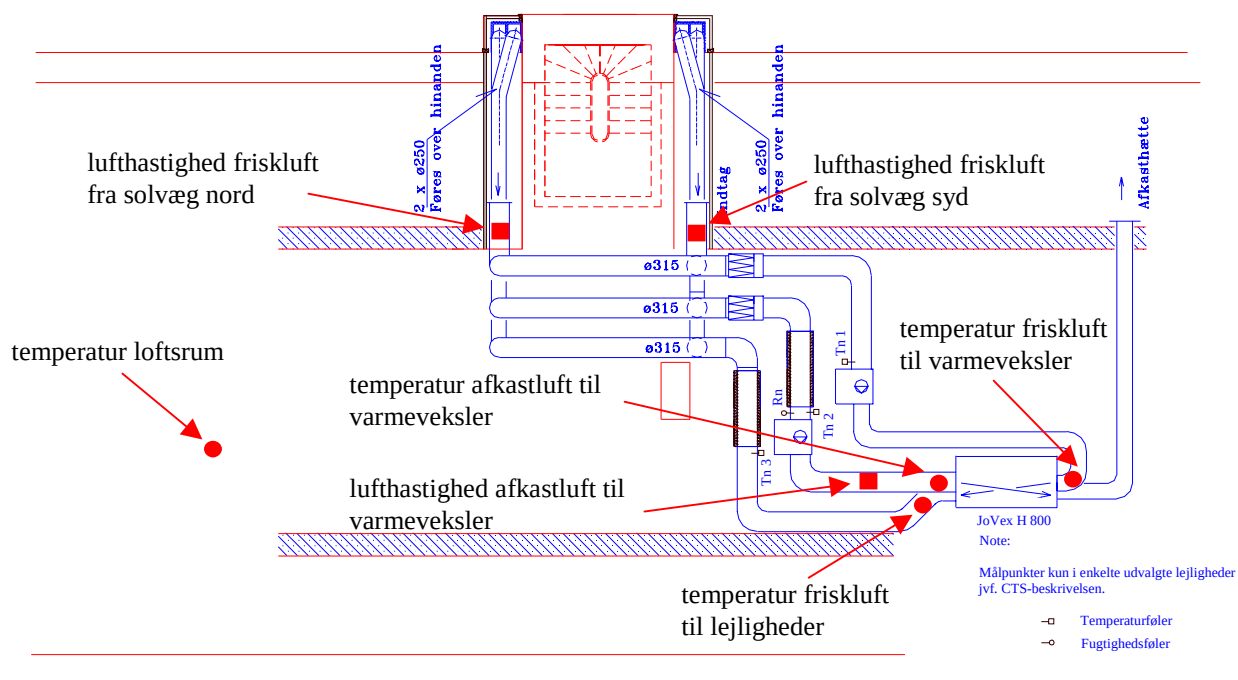
Hvert ventilationsanlæg dækker én opgang, dvs. i alt 10 lejligheder, fordelt på 5 etager. For at begrænse måleprogrammet blev det valgt kun at måle i én lejlighed. Som repræsentativ lejlighed er valgt stuelejligheden beliggende på den sydlige side af trappeopgangen, dvs. Philip Schous vej 36 st. th. Stuelejligheden er valgt for at kunne måle den samlede opvarmning/afkøling af hhv. friskluft og afkastluft gennem ventilationstårnet mellem loft og lejlighed. I lejligheden måles temperaturen af hhv. friskluft og afkastluft, samt lufthastigheder i friskluftkanal og afkastkanal.



Figur 3.2 Placering af målepunkter i lejlighed

3.3 Målepunkter på loft

På loftet måles temperaturer omkring varmeveksleren, lufthastigheder i hver af friskluftkanalerne fra solvæggene, samt lufthastigheden i den fælles afkastkanal. Desuden måles rumtemperaturen i loftsrummet. Af disse målinger kan bl.a. varmevekslereffektiviteten bestemmes.



Figur 3.3 Placering af målepunkter på loft

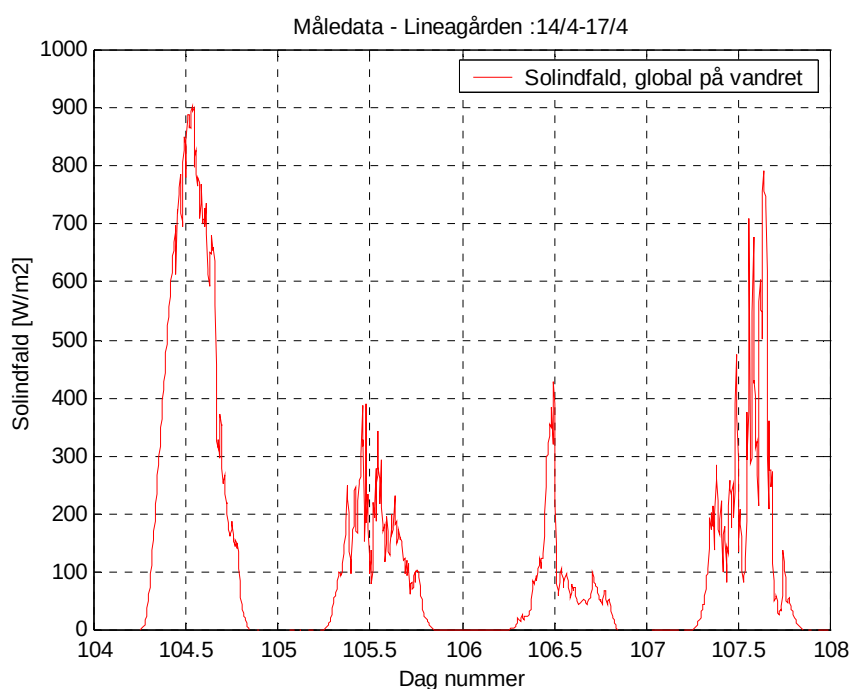
4. Måleresultater

Der er gennemført målinger i perioden fra 7/4-2001 til 28/11-2001. I det følgende gennemgås først nogle typiske måledata fra hhv. en kølig periode og en varm periode. Derefter analyseres de målte data med hensyn til følgende forhold:

- solfangereffektivitet
- varmevekslereffektivitet
- systemvirkningsgrad
- varmetab fra soltårne
- ydelse

4.1 Målinger fra kølig periode

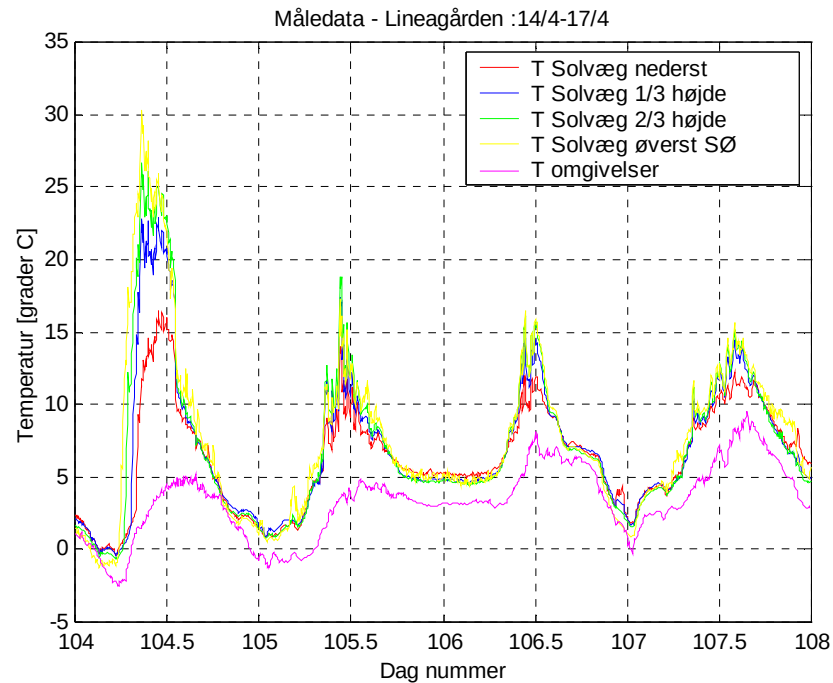
I det følgende gennemgås kort nogle typiske målinger fra en kølig periode i foråret, hvor der ikke er så meget sol og hvor udetemperaturen ligger mellem -2° og ca. 10°C . Det målte solindfald er vist i figur 4.1 mens udetemperaturen er vist i figur 4.2.



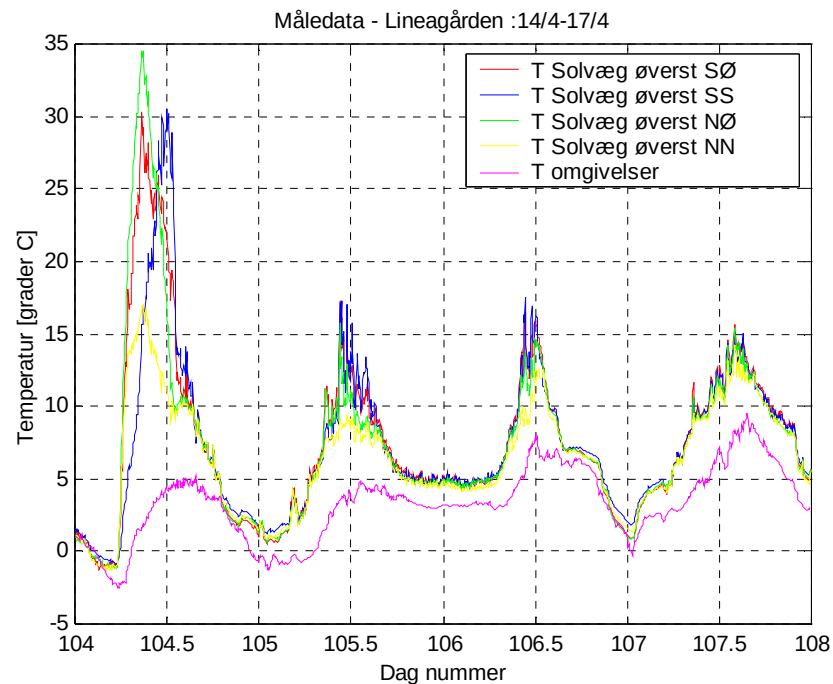
Figur 4.1 Målt solindfald i perioden 15/4-18/4-2001

På trods af den beskedne mængde sol i perioden sker der en opvarmning af luften i soltårnene, som vist på figur 4.2. Der er en tendens til, at luften i den nederste del af soltårnet er koldest, mens luften i toppen af soltårnet er varmest, men pga. forholdsvis lidt sol i perioden er dette ikke særlig tydeligt.

Temperaturen i hulrummet i solvæggen ligger over udetemperaturen - også i eftermiddags- og nattetimerne, hvor der ikke er sol på soltårnene. En årsag til dette kan være varmetab fra de kanaler med hhv. indblæsnings- og afkastluft, der løber bag solvæggens hulrum. Soltårnene er dog placeret inde i en forholdsvis lukket gård, med gode læforhold, mens udetemperaturen muligvis måles et lidt mere vindudsat sted.



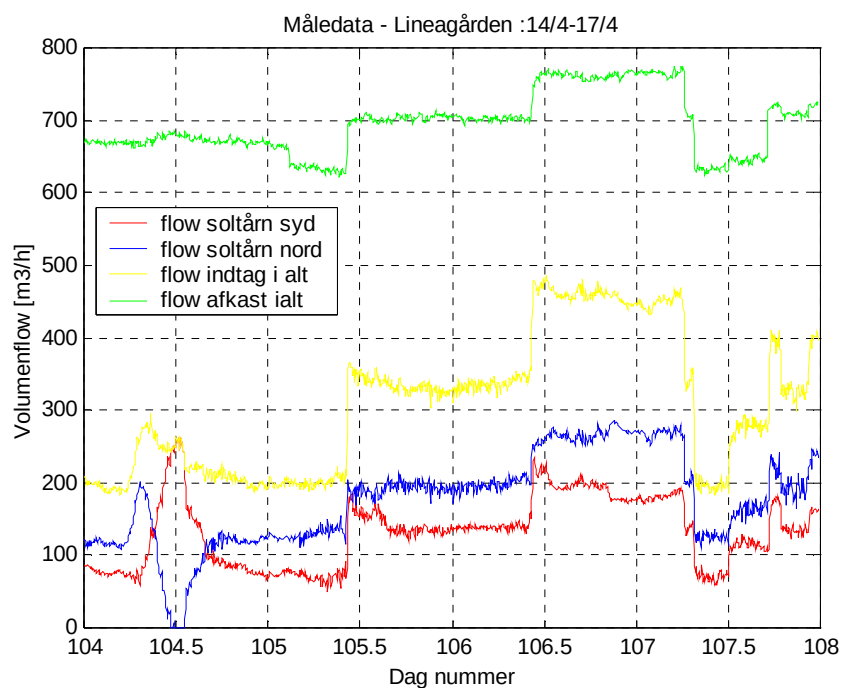
Figur 4.2 Målte temperaturer i soltårn i perioden 15/4-18/4-2001



Figur 4.3 Målte temperaturer øverst i soltårn i perioden 15/4-18/4-2001

De målte volumenstrømme i kanalerne på loftet er vist på figur 4.4. Der suges mellem ca. 630 m³/h-760 m³/h fra de 10 lejligheder i alt. Et flow på 630 m³/h svarer til, at alle beboere i opgangen har indstillet anlægget på trin 2. Flowet varierer hovedsageligt i 3 trin - hhv. 630, 700 og 760 m³/h. Dette tyder på en overordnet styring af anlægget, hvilket dog ikke stemmer overens med den beskrevne styringsstrategi for anlægget, hvor det alene er den enkelte beboer, der kan ændre flowet i anlægget. Dog kan mindre spring i flowet anes, hvilket kan være ændringer af indstillingen hos den enkelte beboer.

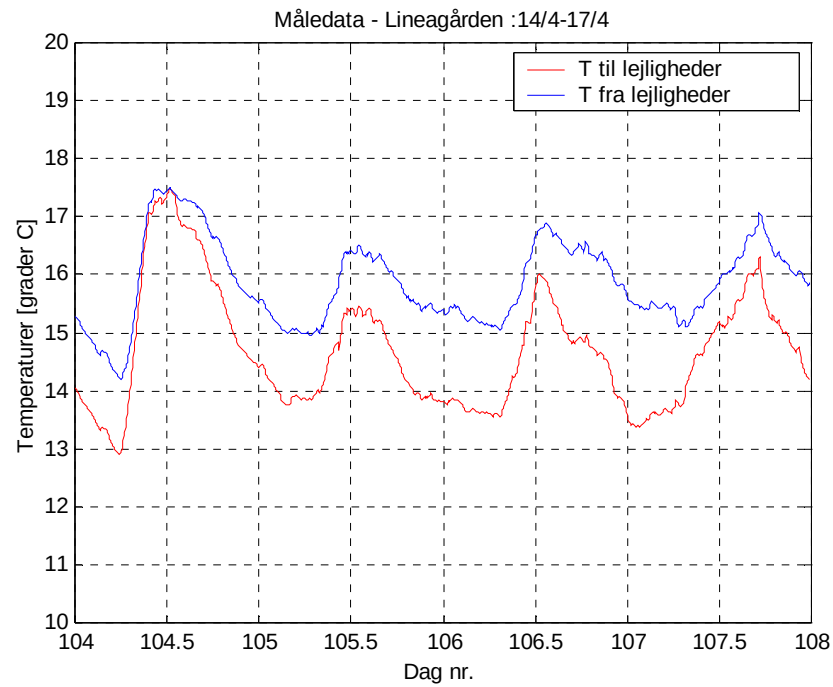
Indblæsningsmængden ligger betydeligt lavere end udsugningsmængden, hvilket tyder på, at en del af beboerne har slukket helt for indblæsningen. Dette stemmer overens med det forhold, at beboerne i foråret blev opfordret til at slukke for indblæsningen. Indblæsningsluften varierer også hovedsageligt i 3 trin, hvilket igen tyder på en overordnet styring af anlægget. Det kan desuden ses, at der suges mere luft fra det nordlige soltårn end fra det sydlige.



Figur 4.4 Målte volumenstrømme i anlægget perioden 15/4-18/4-2001

Temperaturer i kanalerne til og fra lejlighederne er vist på figur 4.5. Temperaturen er målt i kanalerne på loftet tæt på udgangen til kanalerne i soltårnet. I kanalen med afkastluft fra lejlighederne er temperaturen ca. 15-17°C. Dette er lavt i forhold til, at det må forventes, at opholdstemperaturen i lejlighederne er højere, og det betyder også, at der ikke er meget energi at hente i varmeveksleren. Temperaturen af friskluften til lejlighederne ligger på ca. 13,5-16°C. Dette må forventes at være uacceptabelt i forbindelse med den direkte indblæsning i lejlighederne.

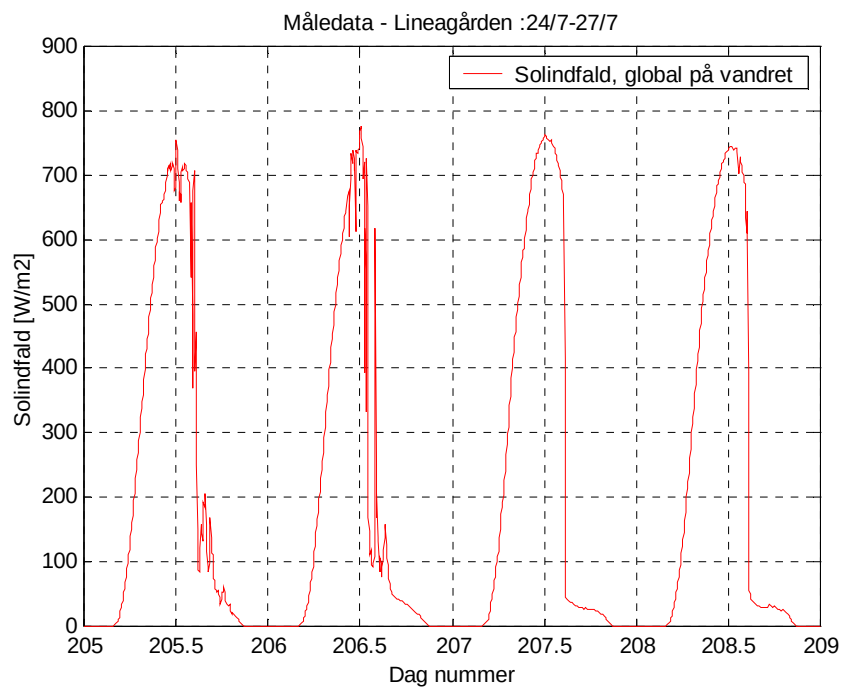
De lave temperaturer tyder på, at der mistes en del varme i kanalerne, når luften bevæger sig hhv. til og fra lejlighederne. Varmetab fra kanalerne gennemgås i kapitel 4.8.



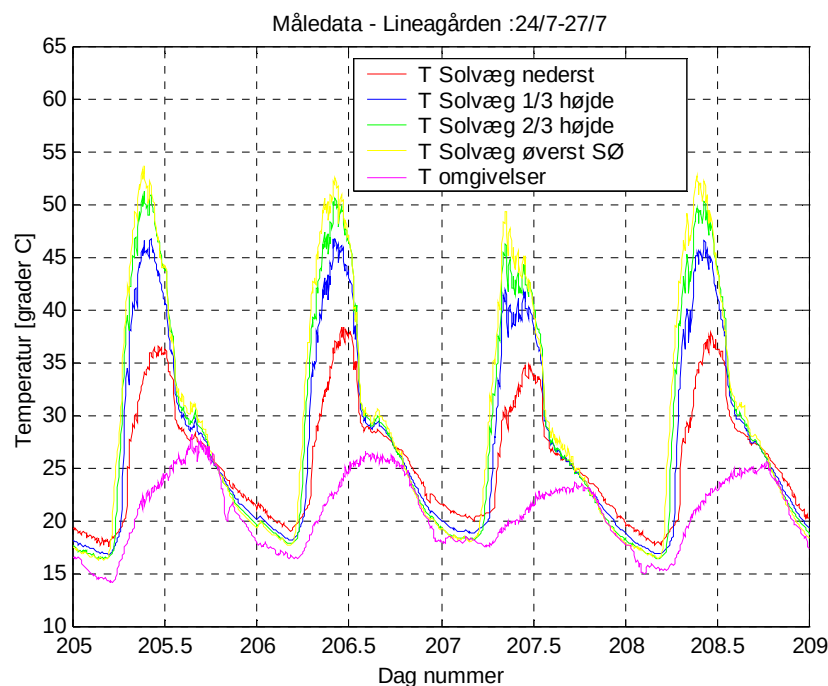
Figur 4.5 Målte temperaturer til og fra lejligheder (målt på loftet)

4.2 Målinger fra varm sommerperiode

I dette kapitel gennemgås tilsvarende målinger for en varm periode om sommeren.



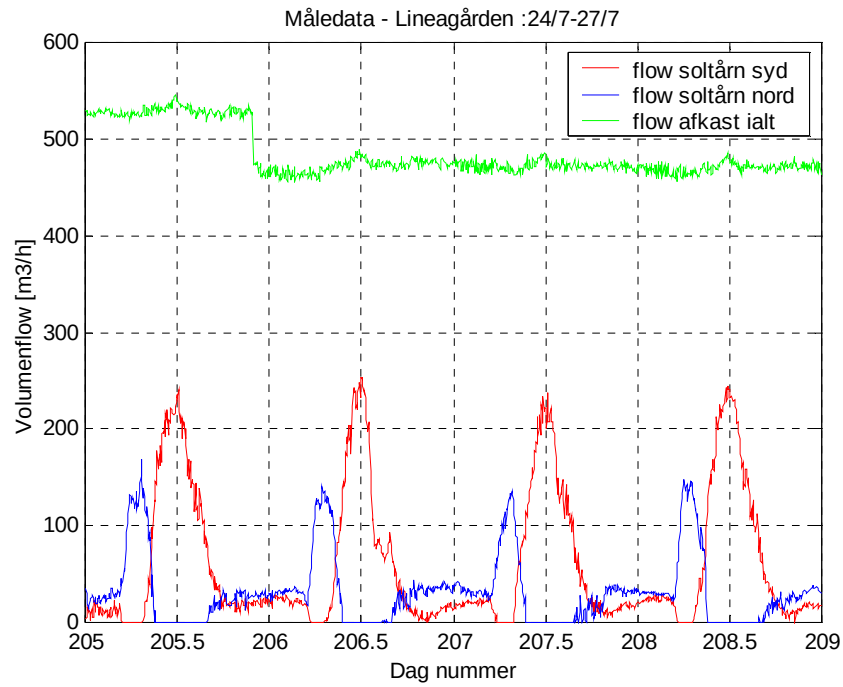
Figur 4.6 Målt solindfald i perioden 24/7-27/7 2001



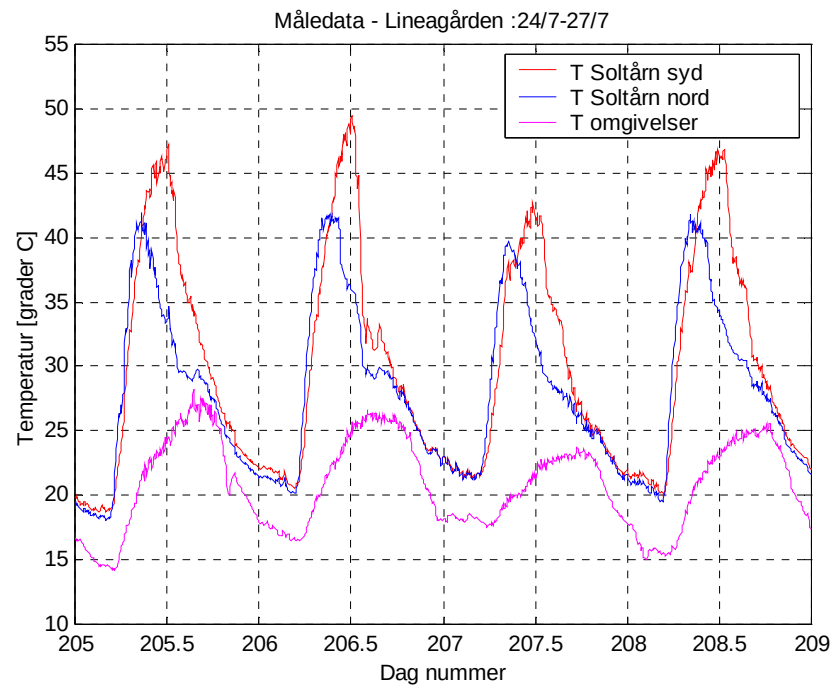
Figur 4.7 Temperaturer i sydvendt soltårn i perioden 24/7-27/7 2001

I sommerperioden er det hensigten, at anlægget fungerer som et rent udsugningsanlæg. Dette forudsætter dog, at alle beboere i opgangen har slukket for indblæsningen. Målingerne viser, at udsugningsmængden også er lavere end i forårsperioden (ca. 470-530 m³/h).

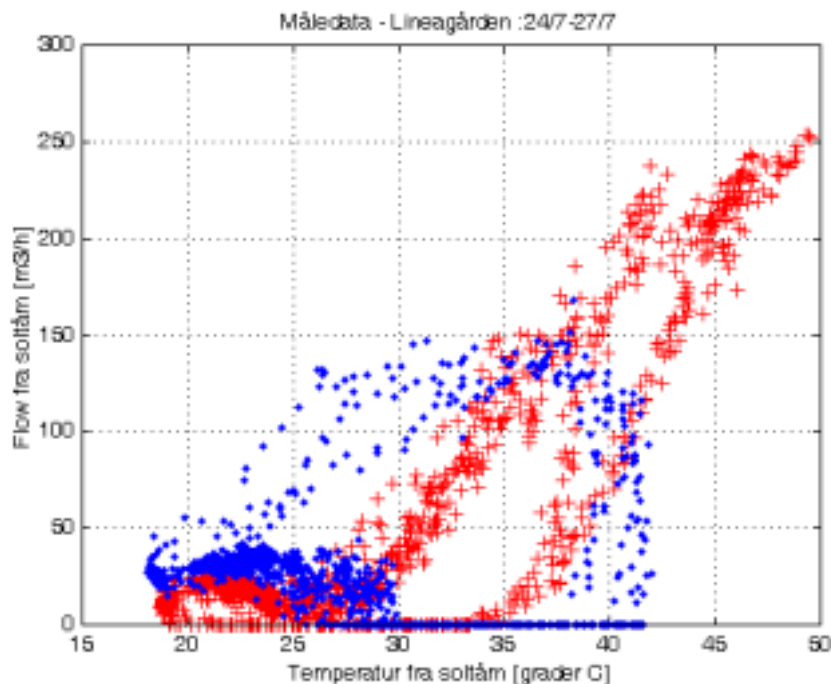
Der er dog også luftbevægelser i kanalerne fra de to soltårne, selv om indblæsningsventilatoren sandsynligvis ikke er aktiv. De målte luftbevægelser er optegnet i figur 4.8 og viser et typisk forløb for perioder med meget sol. Tidligt om morgenen er der meget flow i kanalen fra det nordlige soltårn, mens der senere på dagen er flow i kanalen fra det sydlige soltårn. Luftbevægelserne ser ud til at hænge sammen med opvarmningen i soltårnene. Temperaturen i kanalerne fra soltårnene er vist i figur 4.9. De målte flow i kanalerne kan opnås på grund af den termiske opdrift, der opstår i soltårnene, når luften opvarmes. Sammenhængen mellem opvarmning og flow i soltårnene er vist i figur 4.10.



Figur 4.8 Volumenstrøm i soltårne i perioden 24/7-27/7 2001



Figur 4.9 Temperatur af luft fra soltårne i perioden 24/7-27/7 2001



Figur 4.10 Sammenhæng mellem temperatur og flow i soltårne i perioden 24/7-27/7 2001

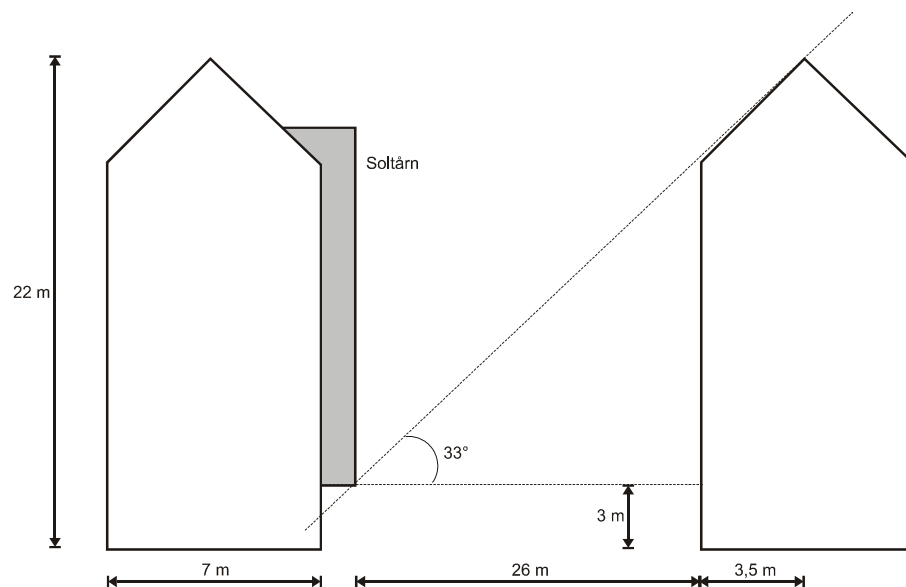
Figur 4.10 viser sammenhængen mellem temperatur og luftbevægelser i de to kanaler fra soltårnene. Stigende temperaturer giver stigende flow, hvilket især er tydeligt for kanalen fra det sydlige soltårn. Der er desuden en hystereseeffekt forårsaget af tidspunktet på dagen. Af dette ses, at soltårnene, hvis de indrettes til det, vil kunne anvendes til at drive udsugning fra lejligheder ved hjælp af naturlig ventilation.

4.3 Skygger på soltårnene

Ved beregning af soltårnenes effektivitet som luftsolfangere, er det nødvendigt at tage højde for 2 forhold - dels er soltårnene placeret ind mod en lukket gård, hvor der i nogle perioder vil falde skygge på dele af absorberfladen og dels har hver af soltårnene absorberflader med to forskellige orienteringer.

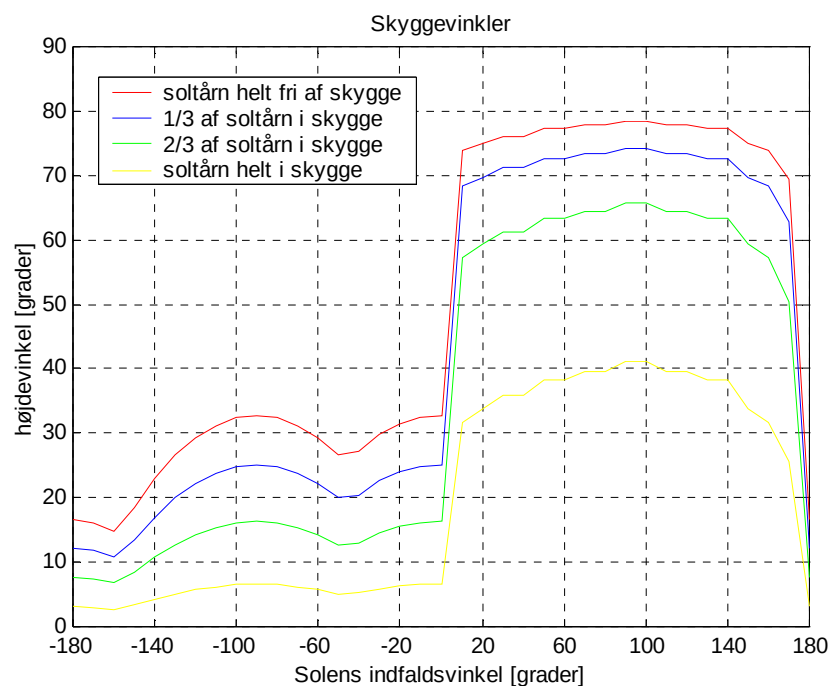
Soltårnene er placeret, så det nordlige tårn har absorberflader mod hhv. nord og øst, mens det sydlige tårn har absorberflader mod øst og syd. Om morgenen vil solen dermed stå op bag de overfor liggende bygninger, mens den om eftermiddagen vil bevæge sig

Som vist på figur 4.11 kan det beregnes, hvor højt på himlen solen skal være, for at hele soltårnet er fri for skygge fra bygningen overfor. Denne vinkel er beregnet til ca. 33° . På samme måde kan den vinkel, der afgør om soltårnet ligger i skygge fra bygningen mod syd, beregnes til ca. 37° . Den angivne solvinkel svarer til 90° minus solens zenith angle, der kan beregnes ud fra kendskab til bygningens position på Jorden, samt tidspunktet og dagen for målingen.



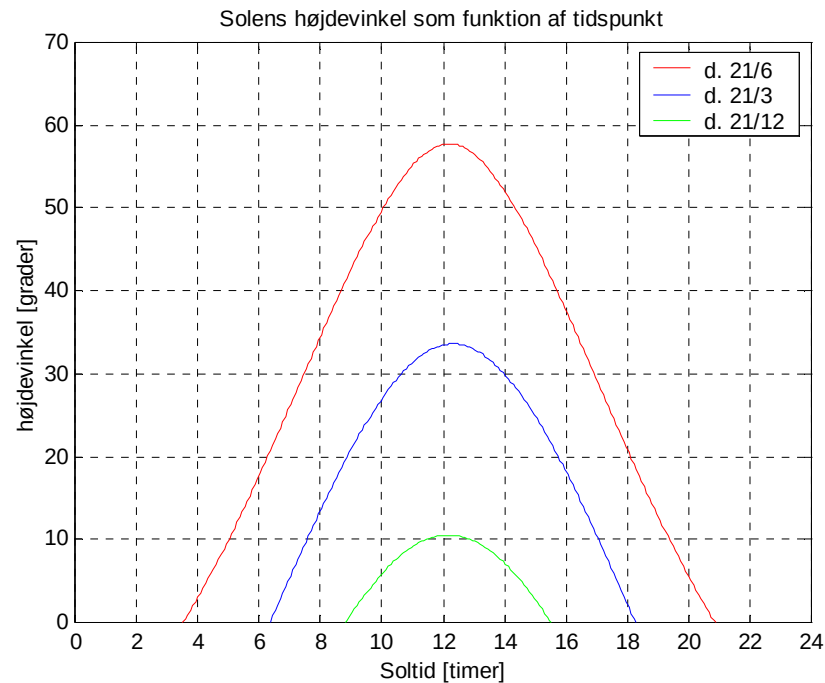
Figur 4.11 Beregning af solvinkel, hvor der netop ikke falder skygge fra bygningen på den anden side af gården.

Samtidig skal solens indfaldsvinkel i forhold til syd betragtes. Når indfaldsvinklen er 0° er solen stik syd, og rammer derfor kun den sydvendte del af soltårnet, mens de øst- og nordvendte flader ligger i skygge. Når indfaldsvinklen er -90° er solen i stik øst og rammer kun de østvendte flader. Indfaldsvinklen skal være mindre end -90° for at ramme den nordlige absorberplade. Ved indfaldsvinkler over 0° står solen i en vestlig retning, hvor soltårnene vil ligge i skygge fra den bygning, som de er placeret på. Når solen står bag ved bygningen, ligger det opsatte pyranometer også i skygge. Ved at beregne vinklerne til bygninger i en cirkel omkring soltårnet, og i forskellige højder på soltårnet, samt at tage højde for solens indfaldsvinkel, kan figur 4.12 optegnes.

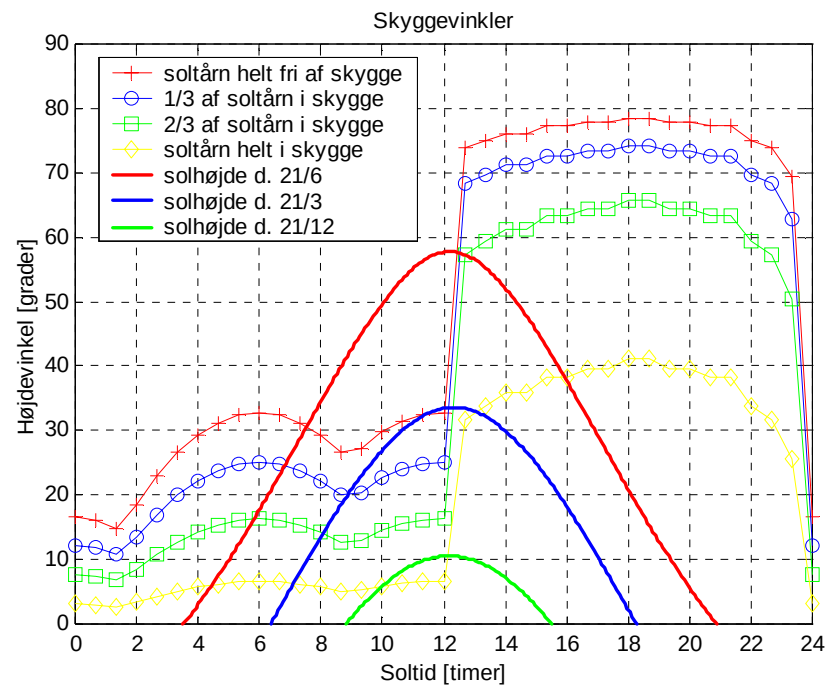


Figur 4.12 Solvinkler hvor soltårnet ligger helt eller delvist i skygge

Figur 4.13 viser solens højdevinkel som funktion tidspunkt på dagen, og for hhv. vintersolhverv, jævndøgn og sommersolhverv. Ved at lægge de to grafer Figur 4.12 og figur 4.13 sammen fås figur 4.14.



Figur 4.13 Solens højdevinkel som funktion af tidspunkt på dagen og året



Figur 4.14 Diagram til aflæsning af skyggeforhold for soltårn

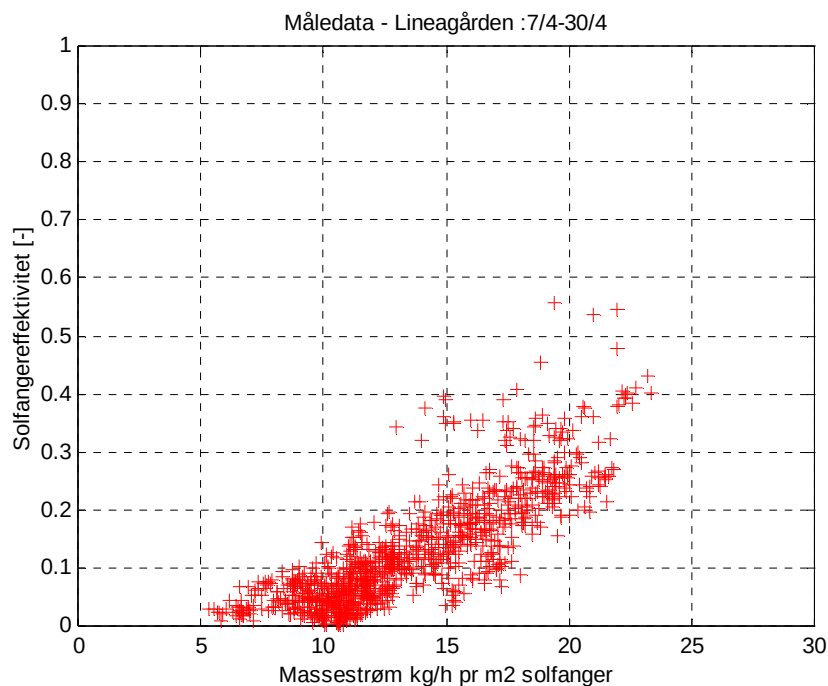
Af figur 4.14 kan bl.a. aflæses, at der på årets korteste dag (d. 21/12) kun vil være direkte sol på soltårnene i tidsrummet 10-12 og da kun på mindre end den øverste 1/3 af soltårnet. Om foråret og om efteråret (omkring jævndøgn) vil der være direkte sol på soltårnene hele formiddagen, men kun på dele af det. Solen når ikke så højt på himlen, at hele soltårnet bliver fri for skygger. Ved midsummer (d. 21/6) er der direkte sol på hele soltårnet i perioden ca. 8-12. Soltårnene vil hele året ligge i skygge hele eftermiddagen.

Af grafen kan det desuden aflæses, at den nordvendte side af soltårnet aldrig vil opleve direkte sol på hele fladen. Denne flade vil kun få direkte sol, når solens indfaldsvinkel er mindre end -90° eller større end $+90^\circ$, hvilket svarer til før kl. 6 eller efter kl. 18. Ved midsummer modtager den nordvendte flade kun direkte sol på mindre end 1/3 af fladen i perioden kl. 5-6 om morgenen. Alle øvrige tidspunkter modtager denne flade kun diffus stråling.

Der er målt på soltårnene i perioden 7/4-28/11-2001, dvs. der er ingen målinger fra en vinterperiode. Af grafen kan ligeledes vurderes, at der udenfor måleperioden kun har været delvis sol på soltårnene, og kun i en kort periode om formiddagen. Der er ikke direkte sol på hele fladen i vinterperioden.

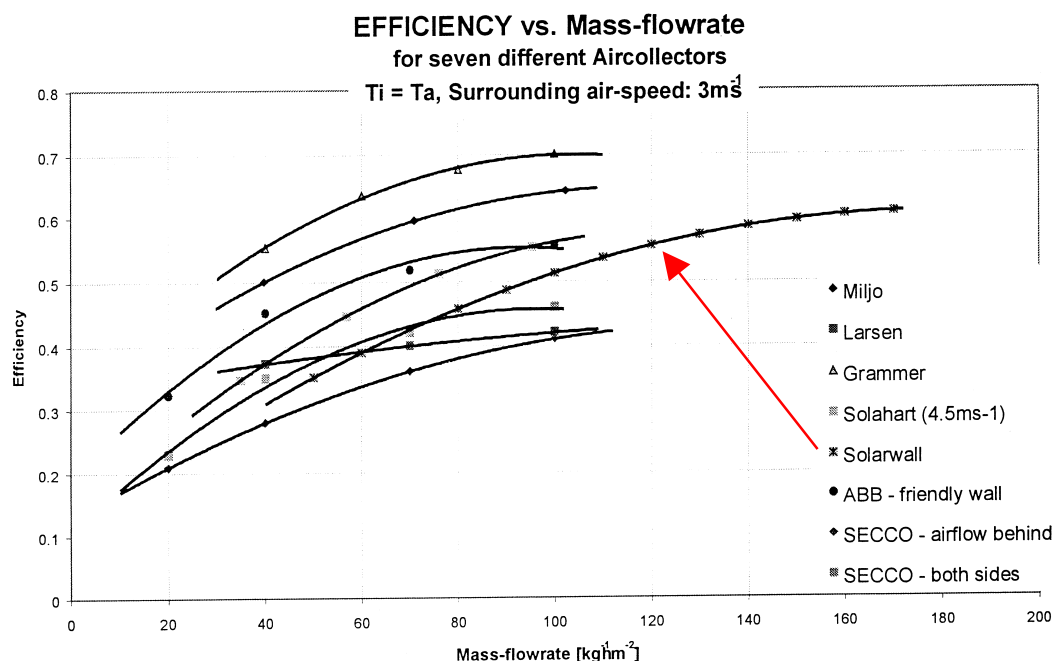
4.4 Solfangereffektivitet

Ved beregning af solfangereffektiviteten er der udvalgt data, hvor solvinklen er over 33° og hvor indfaldsvinklen er mindre end 0° . Med disse udvælgelseskriterier er det ikke muligt at beregne effektiviteten for det nord/østlige soltårn. Da de to soltårne er ens i opbygning, er det derfor valgt kun at betragte det syd/øst-vendte soltårn ved beregning af solfangereffektiviteten. Solfangereffektivitet som funktion af flowet gennem tårnet er vist i figur 4.15.



Figur 4.15 Solfangereffektivitet som funktion af luftstrømmen gennem soltårnet

Soltårnene kan som luftsolfangere bedst sammenlignes med den canadiske "Solarwall", der er uden dæklag, og som anvender samme varmeoverføringsprincip med en absorber bestående af hulplade. Denne type luftsolfanger er velegnet til høje volumenstrømme. Effektiviteten for en "Solarwall" kan ses i figur 4.16.



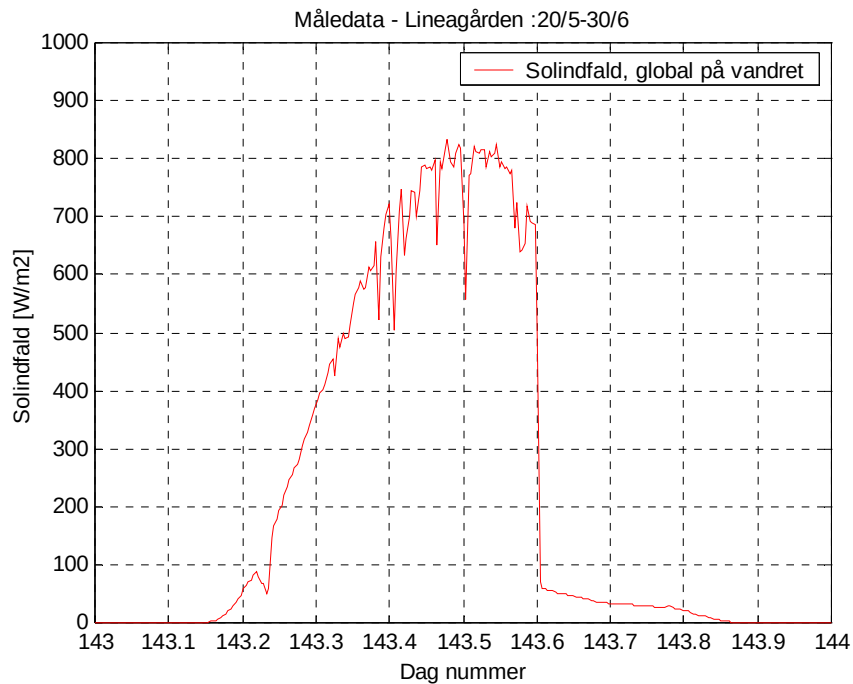
Figur 4.16 Solfangereffektiviteter for forskellige typer luftsolfangere (Fechner, 1999)

Ved sammenligning af figur 4.15 og figur 4.16 ses, at flowet gennem soltårnene er væsentligt lavere end beregnet for en "Solarwall". Derved bliver effektiviteten også lavere.

Hvis alle lejligheder havde indblæsning svarende til trin 2 (normal) svarende til i alt ca. $600 \text{ m}^3/\text{h}$ friskluft, vil flowet gennem det sydvendte soltårn være ca. 23 kg/h/m^2 solfanger. Det giver en solfangereffektivitet på ca. 40%, hvilket er meget godt i forhold til de forskellige typer solfangeren i figur 4.16. Den forholdsvis høje effektivitet kan bl.a. skyldes, at soltårnene ligger meget beskyttet for vind. Generelt kan det ses af figur 4.16, at luftsolfangere vil have en højere effektivitet, hvis de dimensioneres efter et højere flow.

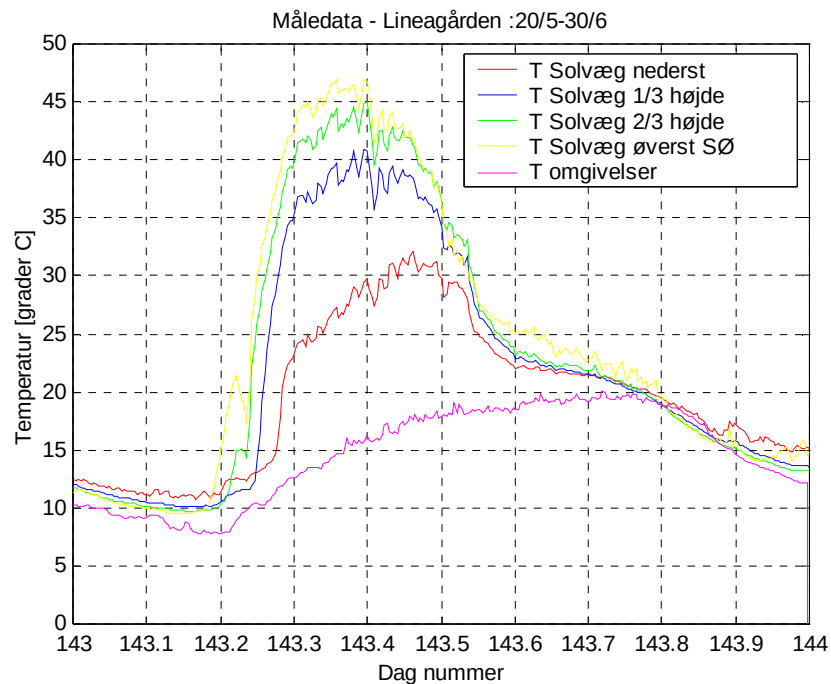
4.5 Temperaturer i soltårn

I det følgende vises temperaturer i soltårnene d. 23/5-2001 (dag nr. 143). Det er en dag med forholdsvis meget sol, som vist på figur 4.17.



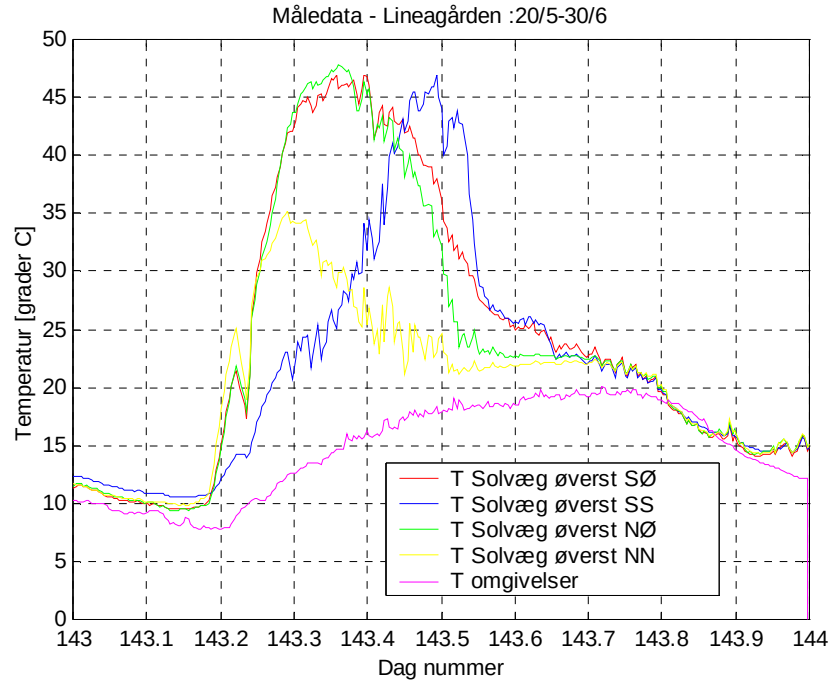
Figur 4.17 Målt solindfald d. 23/5-2001

Figur 4.18 viser opvarmningen af luften op gennem soltårnet, mens figur 4.19 viser temperaturerne øverst i soltårnene, for hver af orientering af fladerne. Temperaturen stiger meget over den nederste del af soltårnet, mens temperaturstigningen i den øverste del af soltårnet er væsentlig mindre. Soltårnenes flader kommer i skygge lidt før det anvendte pyranometer, hvorved temperaturerne begynder at falde kort efter kl. 12.



Figur 4.18 Temperaturer op gennem soltårn

Figur 4.19 viser, hvordan solen rammer de forskellige flader på forskellige tidspunkter på dagen. Desuden kan det ses, at der samlet sker en opvarmning af luft over en større periode over dagen i det sydvendte soltårn med flader mod øst og syd, i forhold til det nordvendte soltårn, der har flader mod nord og øst.



Figur 4.19 Temperaturer øverst i soltårn for hver orientering af flader

4.6 Varmeveksler

Omkring varmeveksleren er målt temperaturer og flow med det formål at bestemme varmevekslereffektiviteten. Denne er givet ved:

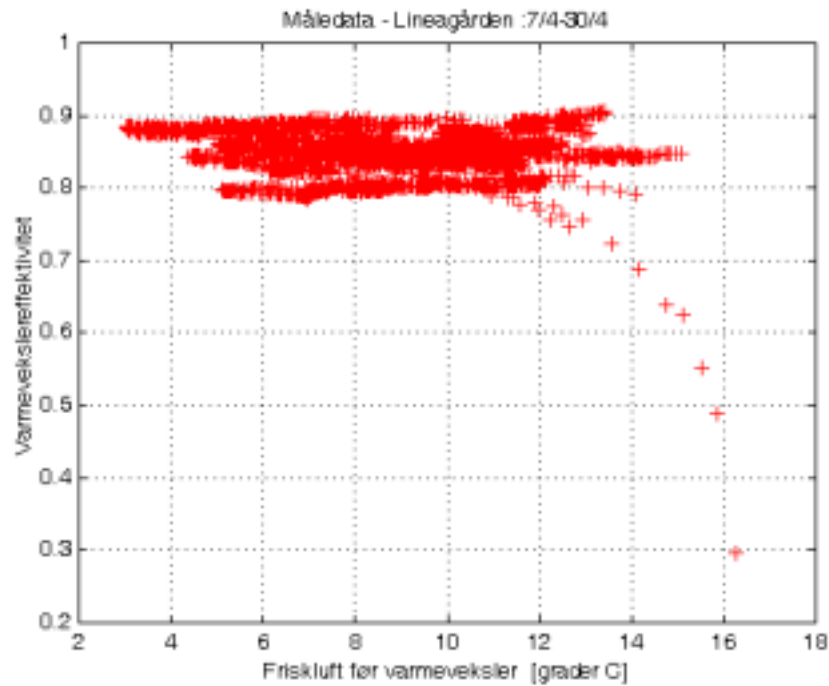
$$\varepsilon = \frac{C_1}{C_{\min}} \cdot \frac{(t_{1i} - t_{1u})}{(t_{1i} - t_{2i})}$$

Temperaturvirkningsgraden beregnes med udgangspunkt i luften på indblæsningssiden, idet formålet med varmeveksleren er at opvarme denne. Da det er indblæsningssiden, der har den laveste kapacitetsstrøm, er temperaturvirkningsgrad og varmevekslereffektivitet i dette tilfælde ens. Kapacitetsstrømsforholdet er givet ved:

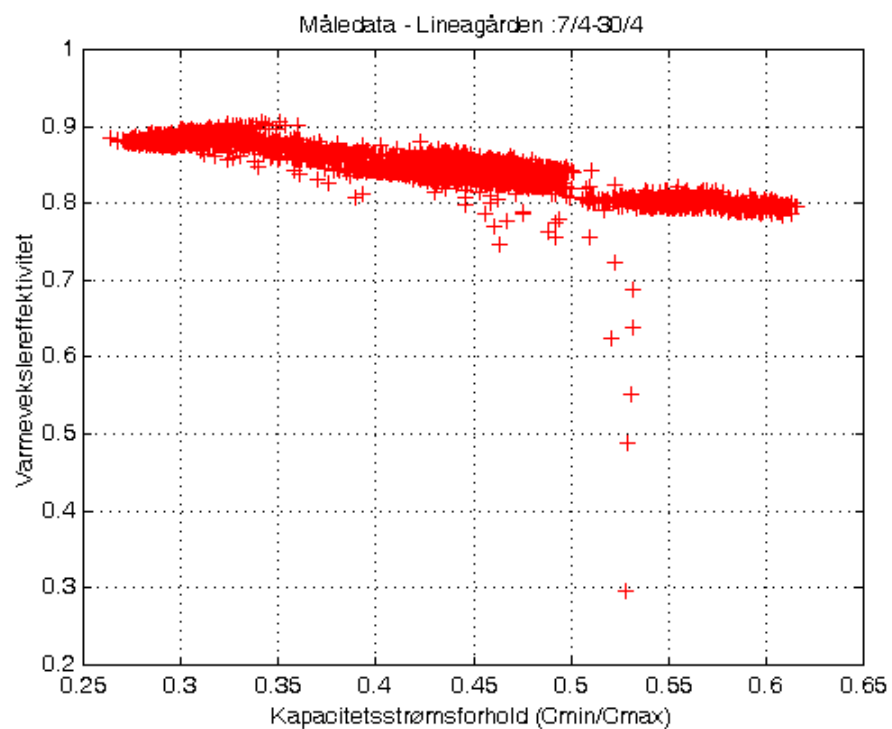
$$\kappa = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

Det giver kun mening at betragte varmevekslereffektiviteten for perioder, hvor der er behov for opvarmning af indblæsningsluften, dvs. ikke i sommerperioden og ikke i perioder, hvor luften allerede er opvarmet tilstrækkeligt i soltårnene. Her er udelukkende medregnet data, hvor friskluften før veksleren er lavere end 17°C. Temperaturvirkningsgraden er i middel ca. 0,85.

Figur 4.20 viser vekslereffektiviteten som funktion af temperaturen af friskluft før veksleren. Målingerne viser ingen sammenhæng mellem disse parametre. Figur 4.21 viser vekslereffektivitet som funktion af kapacitetsstrømsforholdet. Her er effektiviteten faldende for stigende kapacitetsstrømsforhold.



Figur 4.20 Vekslereffektivitet som funktion af temperaturen af friskluft før varmeveksler



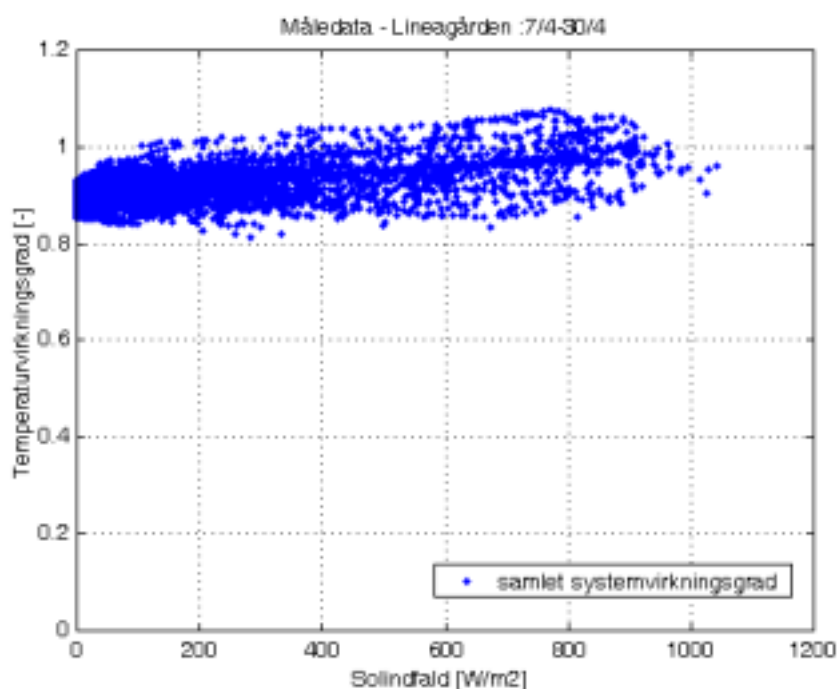
Figur 4.21 Vekslereffektivitet som funktion af kapacitetsstrømsforhold

4.7 Samlet systemvirkningsgrad

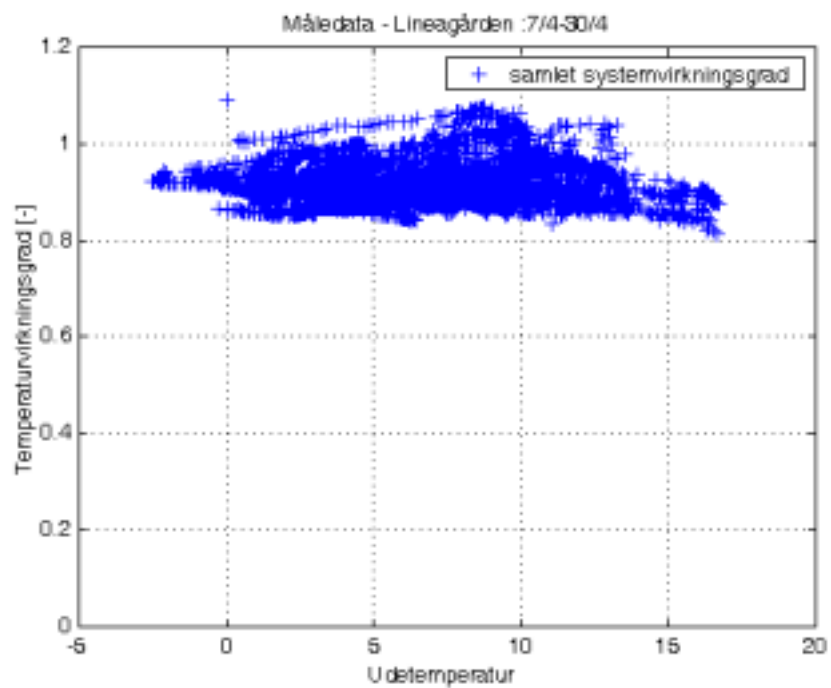
Ved at betragte det samlede system som et hele dvs. soltårn og varmeveksler under et, er det muligt at beregne en samlet systemvirkningsgrad. I stedet for temperaturen af friskluften lige før varmeveksleren anvendes udetemperaturen. Den samlede systemvirkningsgrad er i middel ca. 0,91.

Figur 4.22 og figur 4.23 viser systemvirkningsgraden som funktion af hhv. udetemperatur og solindfald. Der er ikke umiddelbart nogen sammenhæng mellem udetemperatur og systemvirkningsgrad og kun en svag om end ikke signifikant sammenhæng mellem solindfald og virkningsgrad.

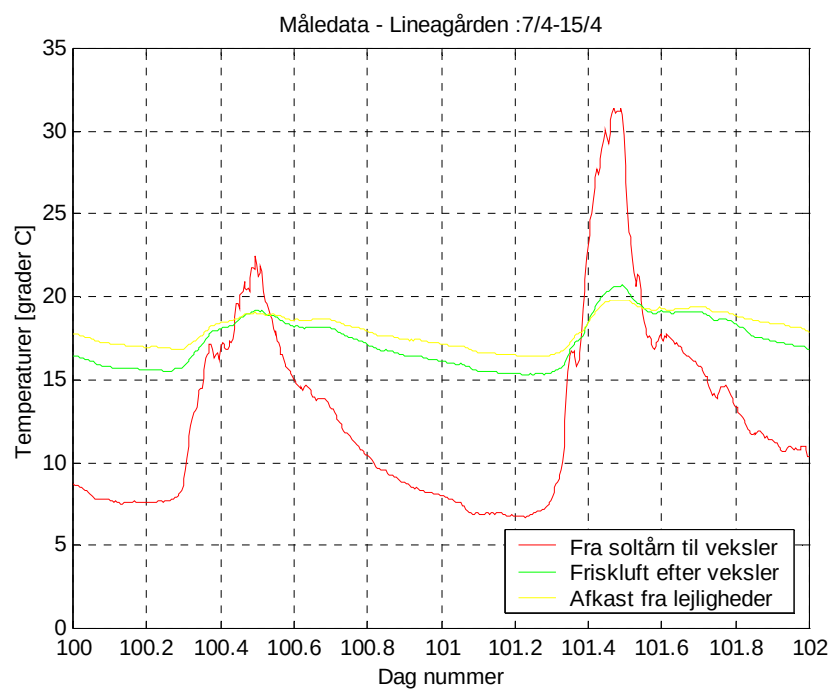
Systemeffektiviteten kan med denne beregningsmetode blive over 1. Det skyldes, at luften i soltårnene kan opvarmes så meget, at temperaturen bliver højere end afkastluften fra lejlighederne. Derved overføres der ikke varme fra afkast til friskluft i varmevekslere men derimod modsat varme fra friskluften til afkastluften. Derved bliver friskluften kølet igen efter opvarmning i soltårnet.



Figur 4.22 Systemvirkningsgrad som funktion af solindfald



Figur 4.23 Systemvirkningsgrad som funktion af udetemperatur



Figur 4.24 Temperaturer omkring varmeveksler

Figur 4.24 viser temperaturerne omkring varmeveksleren i et par dage i april med sol i dagtimerne. Udetemperaturen er ca. 10-11°C i dagtimerne. Om natten er temperaturen fra soltårnene næsten lig udetemperaturen (ned til ca. 7°C). Afkastluften fra lejlighederne er ca. 17°C. Varmeveksleren kan opvarme luften fra 7°C til ca. 16°C. I dagtimerne opvarmes luften i soltårnet til over temperaturen af afkastluften. I varmeveksleren tabes denne varme igen, så indblæsningstemperaturen bliver stort set lig med afkasttemperaturen.

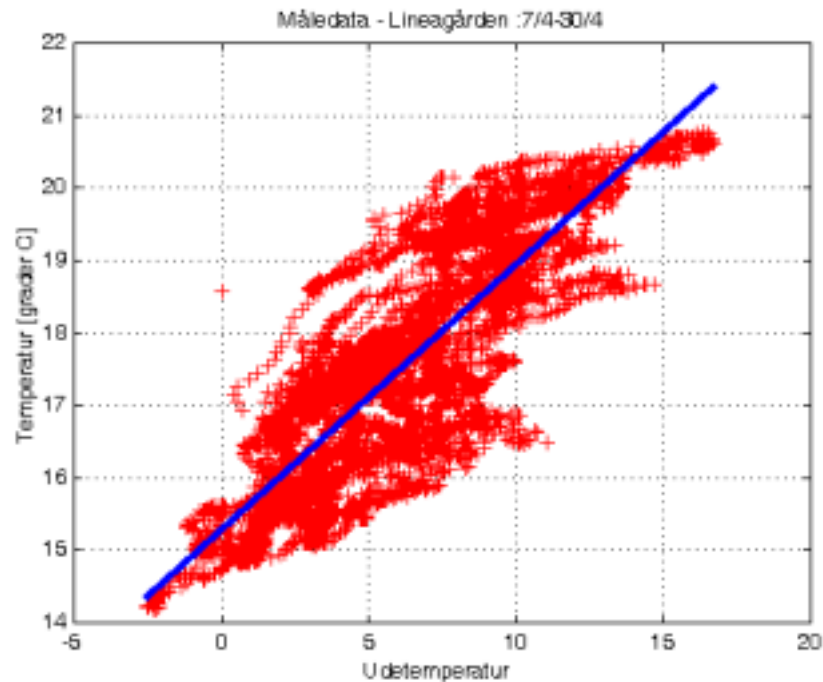
Varmeveksleren kan dermed i perioder modvirke effekten af forvarmning af luften i soltårnet. I nogle perioder kan det være gavnligt at køle luften fra soltårnene, så den ikke bliver for varm, men i andre tilfælde tabes varme, som kunne være udnyttet i lejlighederne. I perioden her kunne solvarmen give et reelt varmetilskud til lejlighederne.

Det kan være gavnligt at have et bypass i varmeveksleren, der aktiveres, når indblæsningsluften er varmere end afkastluften. Dette kan forhindre, at indblæsningsluften ikke bliver kølet i varmeveksleren, så den varme, der er vundet i soltårnene ikke tabes igen.

4.8 Varmetab fra kanaler

Målinger fra kølige perioder tyder på, at luften til og fra lejlighederne mister varme på vej gennem soltårnene. Dels er temperaturerne i hulrummet bag solfangerpladerne højere end udetemperaturen også når der ikke er sol på pladen. Dette kan dog også skyldes, at udetemperaturføleren muligvis er placeret på et koldere sted (f.eks. på grund af vindforhold). En stærkere indikation af et væsentligt varmetab fra kanalerne i soltårnet kan ses af temperaturen af afkastluften fra lejlighederne. I kanalerne samles luften fra alle lejlighederne og indetemperaturen i hver af lejlighederne kendes ikke. Dog må det forventes, at denne ligger i omegnen af 20°C. Når luften når op på loftet er temperaturen dog væsentlig lavere. Der ses en klar sammenhæng mellem temperaturen af afkastluften på loftet og udetemperaturen, selv om der er stor spredning på målingerne. Dette er vist i figur 4.25. Sammenhængen kan tilnærmes med linien:

Afkasttemperatur = $0,37 \cdot \text{Udetemperatur} + 15,3$.

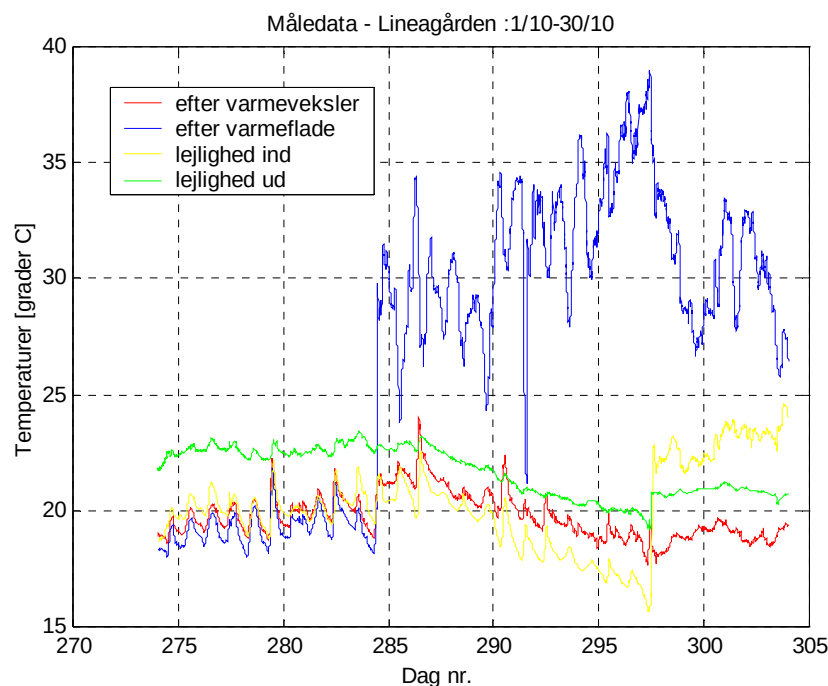


Figur 4.25 Sammenhæng mellem udetemperatur og temperatur af afkastluften

Der kan forekomme varmetab i tårnene til flere sider - dels kan luften i kanalerne afgive varme til luften i luftsolvæggens hulrum, når denne er koldere end luften i kanalerne, dels kan der afgives varme til væggen indtil trappeopgangen, der ikke er opvarmet eller til lejlighederne. Bygningen er ikke isoleret, så der er kuldebroer fra kanalerne og til udeklimaet gennem murstensvæggene. Derudover kan der også være en udveksling af varme mellem hhv. indblæsnings- og afkastkanal.

4.9 Opsætning af varmeflader efter varmeveksler

På grund af de lave indblæsningstemperaturer til lejlighederne, blev det besluttet at opsætte varmeflader i ventilationssystemet. Varmefladerne er placeret efter varmeveksleren, og skal kunne opvarme friskluften til over den ønskede indblæsningstemperatur i lejlighederne. Derved kompenseres for varmetabet i ventilationstårnene. I opgang 36, hvor målingerne er gennemført er varmefladerne taget i brug d. 11/10-2001, hvilket kan ses af målingerne.



Figur 4.26 Temperaturer i system i oktober 2001

Af figuren ses, at temperaturen af friskluften efter varmeveksleren ligger omkring 17-22 grader. Temperaturen af luften, når den er på vej ned i soltårnet (blå kurve) ligger lidt lavere, indtil varmeblæderne tages i brug d. 11/10-01 (dag nr. 284). Herefter opvarmes luften til 25-38°C. Temperaturen er meget svingende og det er uklart, hvordan varme-tilførslen til luften styres.

I figuren er også optegnet temperaturen af luften hhv. ind og ud af den nederste lejlighed (hhv. gul og grøn kurve). Udsugningsluften ligger på et temperaturniveau på ca. 20-22°C. Temperaturen i friskluftskanalen følger udsugningstemperaturen i det meste af perioden. Det skyldes, at beboeren har slukket for frisklufttilførslen, så føleren reelt måler temperaturen i lejligheden. D. 24/10-01 (dag nr. 297) stiger temperaturen af indblæsningsluften brat, svarende til, at beboeren her åbner for friskluftstilførsel. Samtidig stiger temperaturen af afkastluften svarende til, at der generelt bliver varmere i lejligheden. Dette stemmer overens med, at beboerne er blevet opfordret til at åbne for friskluftstilførslen igen efter opsætningen af varmeblæderne.

4.10 Ydelser

De gennemførte målinger kan anvendes til beregning af, hvor meget soltårnene kan yde.

Under måleperioden har der været en del problemer, idet indblæsningsluften fra lejlighederne har været for lav. Dette har medført, at man har været nødsaget til at bede beboerne om at slukke for frisklufttilførslen. Dette medfører igen, at flowet i soltårnene har været meget lavt og at der reelt ikke har været nogen væsentlig ydelse fra soltårnene. Både solydelse og varmegenvinding i veksleren kræver, at der tilføres friskluft til lejlighederne via systemet. Så længe friskluften i lejlighederne tilføres via vinduer eller andre utætheder er der ingen ydelse fra systemet.

Efter opsætning af varmeflader efter varmeveksleren ser det dog ud til, at problemerne med lave indblæsningstemperaturer kan undgås, så anlægget kan bringes til at fungere efter hensigten.

Hvis der antages et samlet frisklufttilførsel på 500 m³/h pr. opgang og en temperatur i lejlighederne på 20°C kan hhv. varmevekslereffektivitet og systemvirkningsgraden anvendes til en beregning af soltårnene mulige ydelse. Til beregningen anvendes referenceåret DRY.

Mulig varmegeninding i anlæg med veksler uden soltårn:	16.200 kWh/år
Samlet varmetilførsel til friskluft med veksler og soltårn:	17.140 kWh/år

Soltårnene kan dermed yde ca 940 kWh/år svarende til ca. 94 kWh per lejlighed eller 30 kWh/m² solfangerareal. Hovedårsagerne til den lave ydelse for soltårnene er:

- lavt flow i solfangerne
- meget skygge fra omkringliggende bygninger
- varmeveksler køler den opvarmede luft

5. Konklusion

Der er foretaget målinger i en opgang i Lineagården i perioden 7/4-2001 til 28/11-2001. De beskrevne målinger har haft til formål at dokumentere virkemåden af luftsolfangere til forvarmning af ventilationsluft i et nyt ventilationskoncept, hvor ventilationskanaler føres udvendigt på bygningen som tårne, beklædt med luftsolfangerpaneler.

Der er en række fordele ved det betragtede ventilationskoncept:

- ventilationskanaler er ført udenpå bygningen, hvorved større indgreb i selve lejlighederne og tab af udnytteligt boligareal har kunnet undgås.
- der er ved design af tårnene taget hensyn til bygningens arkitektoniske fremtoning
- tårnene kan udnytte solenergi til forvarmning af ventilationsluften
- luftsolfangerne er placeret udenpå ventilationskanalerne, så de kan beskytte kanalerne mod udeklimaet samt til dels modvirke varmetab fra kanalerne

Gennem målingerne er der opnået en række erfaringer vedrørende brugen af sådanne soltårne, som er nyttige dels til forbedringer af det nuværende anlæg, dels fordi konceptet vil kunne anvendes i en lang række andre byggerier.

Målingerne viser, at effektiviteten af luftsolfangerne på ventilationstårnene er god, ud fra de givne betingelser. Solfangerdesignet kan sammenlignes med det canadiske solfangerdesign "Solarwall", der er bedst egnet i systemer med høj volumenstrøm. Den dimensionerende volumenstrøm i dette anlæg er i underkanten for en sådan luftsolfanger, og volumenstrømmen i anlægget har i praksis i måleperioden været væsentlig lavere. Dette har givet en forringelse af solfangernes ydelse. Der er dog gode muligheder for en forøgelse af solenergiydelsen fra tårnene, når friskluftmængderne som forventet normaliseres.

Den centrale varmeveksler i anlægget er effektiv. Dette er også nødvendigt, hvis et ventilationsanlæg skal kunne opsættes i en bygning uden væsentlig forøgelse af opvarmningsbehovet. Forvarmning i solfangerne og i varmeveksleren modvirker dog til dels hinanden, idet en del af forvarmningen af friskluft i soltårnene også kunne være opnået ved hjælp af varmeveksleren alene. Desuden er der perioder, hvor veksleren direkte modvirker soltårnene, idet den opvarmede luft fra soltårnene køles i varmeveksleren. Den reelle ydelse fra soltårnene er derfor væsentlig lavere end den tilsvarende solydelse, hvis soltårnene stod alene.

Målingerne i Lineagården har også vist, at der i det konkrete byggeri er tre forhold, der har været anledning til indeklimaproblemer samt mindre solydelse end forventet:

- ventilationskanalerne er utilstrækkeligt isoleret
- soltårnene ligger for meget i skygge
- varmeveksleren modvirker solydelsen

Der er målt højere temperaturer i hulrummet bag solpanelerne i forhold til udetemperaturen også om natten. Dette tyder på et varmetab fra ventilationskanalerne, der er placeret inde bag solpanelerne. Dette varmetab medfører, dels at afkastluften fra lejlighederne taber varme inden varmeveksleren, samt at friskluften taber varme inden indblæsning. Den tabte varme genvindes til dels igen, idet luftsolfangerne virker som friskluftindtag hele døgnet.

Disse forhold har dog medført, at der i kolde perioder ikke kan opnås en tilstrækkelig høj temperatur på indblæsningstemperaturen, hvilket i nogle tilfælde har givet komfortproblemer i lejlighederne. Beboerne er af samme årsag blevet opfordret til at skrue ned eller lukke for indblæsningen fra anlægget. Som følge heraf er suget gennem luftsolfangere meget lavt, hvorved solfangerydelsen er blevet lav. Den lave frisklufttilførsel fra anlægget medfører også, at friskluft til lejlighederne i stedet tages ind gennem utætheder, vinduer mv. Friskluften tilføres dermed ukontrolleret og uopvarmet.

Varmetabet fra kanalerne kan skyldes, at den fysiske afstand mellem trappetårn og køkkenvindue, hvor tårnene er placeret, har varieret opgangene imellem. Dette har medvirket til, at der ikke har været plads til tilstrækkelig isolering af ventilationskanalerne, f.eks. ind mod trappetårnene.

I Lineagården er en del af soltårnene (de nordvendte) placeret, så de stort set altid ligger i skygge, og samtlige tårne inklusiv de sydvendte ligger i skygge i dele af dagen/året. Dette give en lav ydelse. De nordvendte soltårne har stort set ingen solenergimæssig betydning, men er opført som soltårne hovedsagelig af designmæssige årsager. Dog fungerer de stadig som beskyttelse af ventilationskanalerne, hvor de modvirker varmetab fra disse.

Det må dog anbefales, at der inden opsætning af sådanne soltårne gennemføres en vurdering af de aktuelle skyggeforhold på stedet, så det bliver muligt at få mere glæde af de benyttede solenergiløsninger.

Den utilstrækkelige isolering af ventilationskanalerne samt placeringen af soltårnene i delvis skygge kan ikke ændres i det nuværende byggeri. Det er valgt at kompensere for varmetabene i kanalerne ved opsætning af varmeflader i anlægget efter varmeveksleren efter måleperiodens udløb. Med dette forventes det, at friskluftmængden kan normaliseres. Dette forventes at kunne give et bedre indeklima, idet friskluft så ikke tilføres ukontrolleret og uopvarmet, og samtidig må det også forventes, at der kan opnås en væsentlig højere solenergiydelse.

Samlet vurderes det, at der er mange gode muligheder i konceptet og at der med hensyntagen til erfaringerne opnået i dette projekt vil kunne opbygges velfungerende soltårne i forbindelse med andre renoveringsopgaver.

6. Referenceliste

Fechner, H., 1999.
Investigations on Series Produced Solar Air Collectors, Final Report.
IEA task 19 Solar Air Systems.
Arsenal Research, Department of Renewable Energy, october 1999.

Innopex, 1998
SE/167/98/DK/NL/IT
Innovative Architectural Integration of Photovoltaic Energy in Existing Buildings in DK,
NL, IT.

SunVent, 1998
RB/166/98
Low energy Housing Retrofit Projekt Using Solar Ventilation Towers.