

**Prisbillig kombineret rum- og
brugsvandssolvarmeanlæg for fritidshuse**

Fase 1

**Palle Ladekarl
Aidt Miljø Solvarme
og
Søren Ø. Jensen
SolEnergiCenter Danmark**

Oktober 1999

Prisbillig kombineret rum- og brugsvandssolvarmeanlæg for fritidshuse

Fase 1

Anlægsopbygning

**Palle Ladekarl
Aidt Miljø Solvarme**

Forord

Dette projekt er 1.ste fase af et projekt som i sin oprindelige udformning indeholder 2 faser. Energistyrelsen har i første omgang givet støtte til 1.ste fase, for at afklare om det overhovedet er muligt gennem konceptet at overføre tilstrækkelig med varme fra luftsolfangeren til brugsvandet i varmtvandsbeholderen.

Projektet er lavet i samarbejde mellem Aidt Miljø Solvarme ved Palle Ladekarl og SolEnergiCenter Danmark ved Søren Ø. Jensen.

Rapporten er udformet i 2 dele. 1 ste. del som er udfærdiget af Aidt Miljø Solvarme omhandler ide og udformning, mens 2.den del som omhandler afprøvning og målinger er udfærdiget af SolEnergiCenter Danmark.

Projektet er støttet af Energistyrelsen.

Journal nr. 51181/98 - 0025

Projektledelse er varetaget af Aidt Miljø Solvarme.

Indholdsfortegnelse

Anlægsopbygning

	side
1.0 Indledning	5
2.0 Resume	7
3.0 Idegrundlag	8
4.0 Udformning af forsøgsbeholder	10
4.1 Konvektorfinner	11

1.0 Indledning

Det er det samlede projektets formål, gennem undersøgelser, beregninger, opbygning af forsøgsanlæg, og målinger at udvikle et enkelt og prisbillig solvarmeanlægskoncept som opfylder de specielle krav der stilles til fritidshuse.

I projektets 1.ste fase, som denne rapport omhandler, har det alene været formålet at undersøge om det er muligt at opnå en tilstrækkelig varmeoverføring fra den opvarmede luft til brugsvandet i beholderen.

Fritidshuse benytter for størstedelens vedkommende el til rum- og brugsvandsopvarmning og er dermed med til at øge CO₂ udledningen. Samtidig er det et problem, at bygningerne står ubenyttede hen en stor del af året. Dette giver anledning til øget risiko for fugt og råd i bygningsmassen. Det har derfor været meningen, at anlægskoncept skal være i stand til at:

- 1). Yde et væsentligt tilskud til brugsvandsopvarmningen i sommermånederne, hvor fritidshuset primært benyttes.
- 2). Være i stand til at nedsætte fugtproblemerne i den resterende tid af året.

Det vil yderligere være ønskeligt at anlægget kan fungere uden el fra nettet, idet man i fritidshuse ofte ønsker at afbryde strømmen helt i vinterhalvåret. Derudover er det vigtigt at anlægget er så prisbillig og driftsikkert, at det er interessant for en stor del af de potentielle anlægsejere.

Projektets målgruppe er primært danske fabrikanter som producere solvarmeanlæg. Sekundært er målgruppen ejere af fritidshuse i såvel Danmark som i udlandet. Det skitserede anlæg vil desuden kunne benyttes i hytter (Sverige og Norge), samt i kolonihavehuse. Anlægget kan yderligere tænkes anvendt i husholdninger med et mindre forbrug.

Fritidshuse er kendetegnede ved hovedsagelig at blive benyttet i sommermånederne, hvor forbruget hovedsagelig er et varmtvandsforbrug. I den øvrige del af året ligger huset den største del af tiden ubenyttet hen. Den manglende opvarmning og udluftning kan give anledning til fugtskader på huset.

De solvarmeanlæg, der produceres i Danmark, er først og fremmest designede til parcelhuse. Stort set alle anlæg er væskebårne anlæg, hovedsagelig for brugsvandsopvarmning. Der produceres enkelte anlæg specielt beregnede for sommerhuse/fritidshuse. Disse anlæg er enten udformet som små luftsolfangere, som er istand til at fjerne en del af fugtigheden i huset, når det står ubenyttet hen. Der findes også små simple anlæg med indbygget tank til at placere uden for huset beregnet for opvarmning af vand. Aidt Miljø tilbyder et 3 m² hybridanlæg, som er istand til både at levere varmt vand og varm luft i vinterhalvåret. Problemet med de to første anlægssystemer er, at det første kun kan levere varmt vand (i små mængder), mens det andet kun er istand til at blæse forvarmet luft ind. Det sidstnævnte anlæg fra Aidt Miljø løser begge behov, men prisen er for høj til, at det kan få en større udbredelse.

Det er formålet med det samlede projekt (fase 1 + fase 2) at videreudvikle og afprøve et mindre (1,5 - 3 m²) luftsolvarmeanlæg med en solcelledrevet ventilator koblet til en brugsvandstank på 50 - 70 liter placeret inde i huset. I konceptet varmeveksles luft og vand direkte gennem beholdervæggen. Anlægget vil både kunne producere varmt vand og levere forvarmet luft.

2.0 Resume

Der er i projektet opbygget en prototype af en solvarmebeholder hvor varm luft varmeveksles direkte til brugsvandet gennem beholderoverfladen. Mellem beholderens svøb og luftkappen er der monteret konvektorfinner for at forøge overfladen.

Der har forud for målingerne været foretaget beregninger som sandsynliggjorde at det med konvektorfinner monteret skulle være muligt at overføre 27 – 50 W/K. – bilag A i målerapport.

Der er foretaget en række målinger ved forskellige temperaturer, tilførte effekter og volumenstrømme. Varmeoverføringsevnen er afhængig af volumenstrømmen. Ved en volumenstrøm på $100 \text{ m}^3/\text{h}$, som vil være en typisk luftvolumenstrøm i praksis, er varmeoverføringsevnen målt til lige knap 50 W/K.

Delforsøg på beholderen har vist at det er afgørende for varmeoverføringsevnen, at der er en god termisk kontakt mellem beholdervæg og konvektorfinner. Kontakten mellem finner og beholder er på tilfredsstillende måde opnået vha. en varmeledende pasta.

3.0 Idegrundlag

Konceptet skal ses som en videreudvikling af et eksisterende lille luftsolfangersystem primært beregnet for fritidshuse. Det lille luftsolfarmesystem fra Aidt Miljø Solvarme består af en luftsolfanger på ca. 1,3 m², et solcellepanel på 12 watt og en solcelledrevet ventilator med regulator. Luftsolfangeren har været med i et testprogram under "IEA TASK 19 Solar Air Systems" 1998, udført af Arsenal Research. Ud af de 7 målte luftsolfangere blev luftsolfangeren fra Aidt Miljø Solvarme nr.2 i ydelsesmålingerne, kun overgået af en langt dyrere solfanger fra Grammer.



Fig. 3.1 Luftsolfanger og solcellepanel fra Aidt Miljø placeret på sommerhus.

Anlægget har været markedsført siden 1985 og er først og fremmest blevet anvendt til at fjerne fugt i sommerhuse i perioder, hvor de ikke benyttes. I sommermånederne er der stort set ikke behov for varm luftindblæsning, men derimod et behov for varmt brugsvand til bad og opvask. Der har derfor været et ønske om, at luftsolfangerne også skulle være i stand til at lave varmt vand.

En anvendelig metode til at overføre varmen fra luften til en brugsvandstank er vha. en luft til vand veksler. Et sådant system vil normalt tillige kræve en pumpe og en styring, og det samlede anlæg vil derfor blive forholdsvis dyrt.

For at nedsætte prisen og stadig kunne bibeholde fordelene ved det nævnte luftsolfarmesystem er det konceptets ide at lade varmevekslingen fra

luftsolfangeren foregå direkte gennem beholderoverfladen ved at lede den varme luft omkring beholderen. For at gøre varmeoverføringen tilstrækkelig stor er der monteret konvektorfinner med kontakt til beholdervæggen.

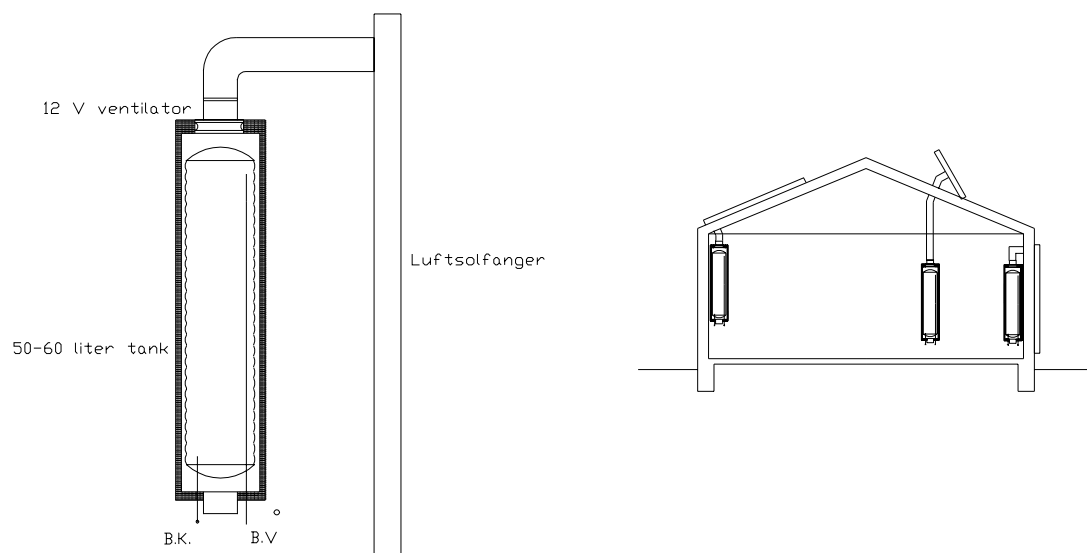


Fig. 3.2 Oprindelige ideoplæg og placeringsmuligheder for solfanger og beholder.

4.0 Udformning af forsøgsbeholder

Selve beholderen som er benyttet i forsøgsopstillingen er en ombygget hydroforbeholder fra Fønix. Beholderen er på 85 liter og er ca. 1100 mm høj og med en diameter på 320 mm. Beholderen er således forholdsvis høj i forhold til diameteren, hvilket giver mulighed for en god lagdeling, samtidig med at beholderens overflade ligeledes er forholdsvis stor set i forhold til beholdervolumen.

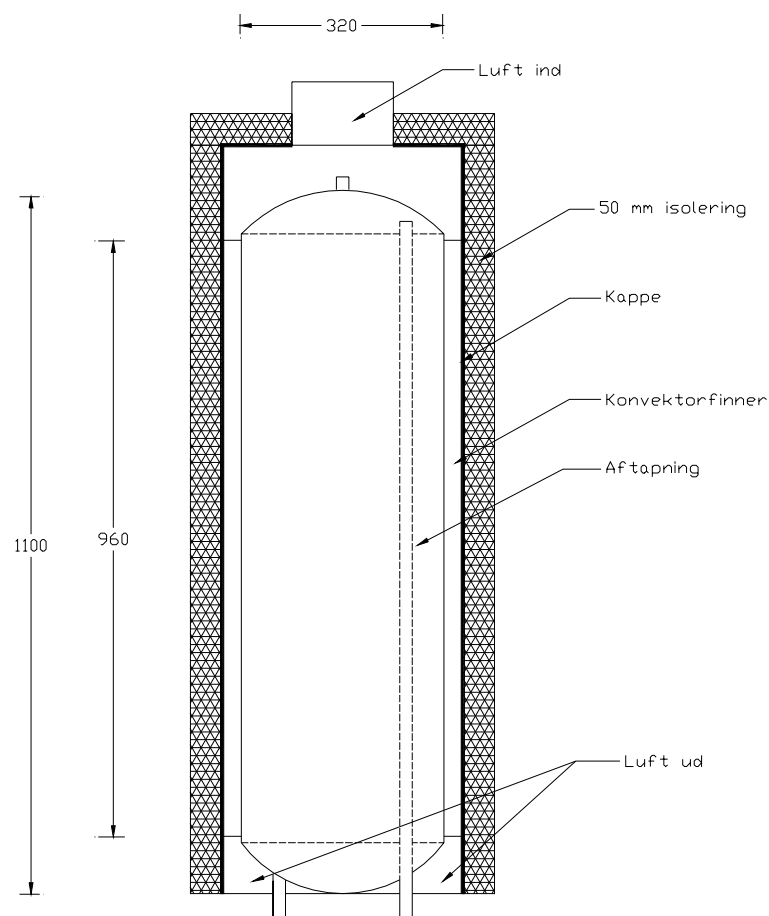


Fig. 4.1. Snit i beholderen

4.1 Konvektorfinner

For at opnå en tilstrækkelig stor varmeoverførende overflade skulle beholderen udstyres med konvektorfinner. Forskellige udformninger blev undersøgt.

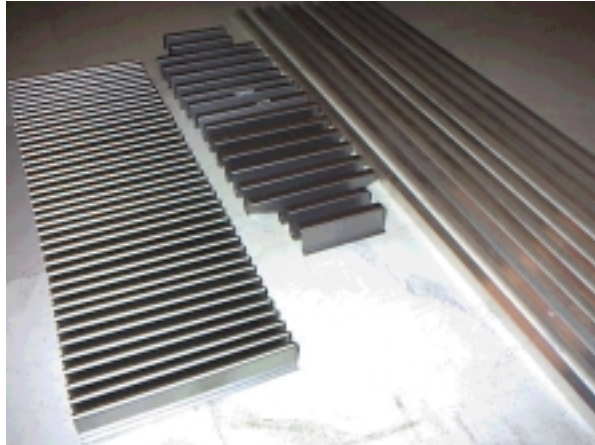


Fig. 4.2. Forskellige udformninger af konvektorfinner blev undersøgt. Radiatorkonvektoren til venstre i billedet blev valgt til prototypen.

Den anvendte konvektor er en standard konvektor fra en radiatorfabrikant. Konvektoren er en bukket stålplade. Finnerne er 30 mm. høje, og med en indbyrdes afstand på ca. 8 mm.

Inden beholderen blev sendt til afprøvning på DTI, blev der foretaget en simpel afprøvning af beholderen uden varmeledende pasta mellem finner og beholdervæg. Den samme afprøvning blev derefter foretaget med varmeledende pasta påsmurt mellem finner og beholdervæg. De to afprøvninger viste at varmeoverføringen i andet forsøg med pasta var næsten dobbelt så stor. Den anvendte pasta er fra Danfoss A/S.



Fig. 4.3. Foto af nederste del af beholder. Kappen er løftet op, så man kan se konvektorfinnerne mellem beholder og kappe.

**Prisbillig kombineret rum- og
brugsvandssolvarmeanlæg
for fritidshuse
Fase 1**

Målerapport

Søren Østergaard Jensen
SolEnergiCenter Danmark
Teknologisk Institut Energi

Forord

Nærværende delrapport afslutter SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut Energi's del af projektet "Prisbillig kombineret rum- og brugsvandssolvarmeanlæg for fritidshuse (fase 1)", journal nr. 51181/98-0025 finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi.

Følgende personer fra SolEnergiCenter Danmark har deltaget i projektet:

Søren Østergaard Jensen, civ.ing.

Trine Dalsgaard Jacobsen, civ.ing.

William Otto, laboratorieassistent

Ole Larsen, laboratorieassistent

Tine Ellegaard Byskov, civ.ing. studerende

Indholdsfortegnelse

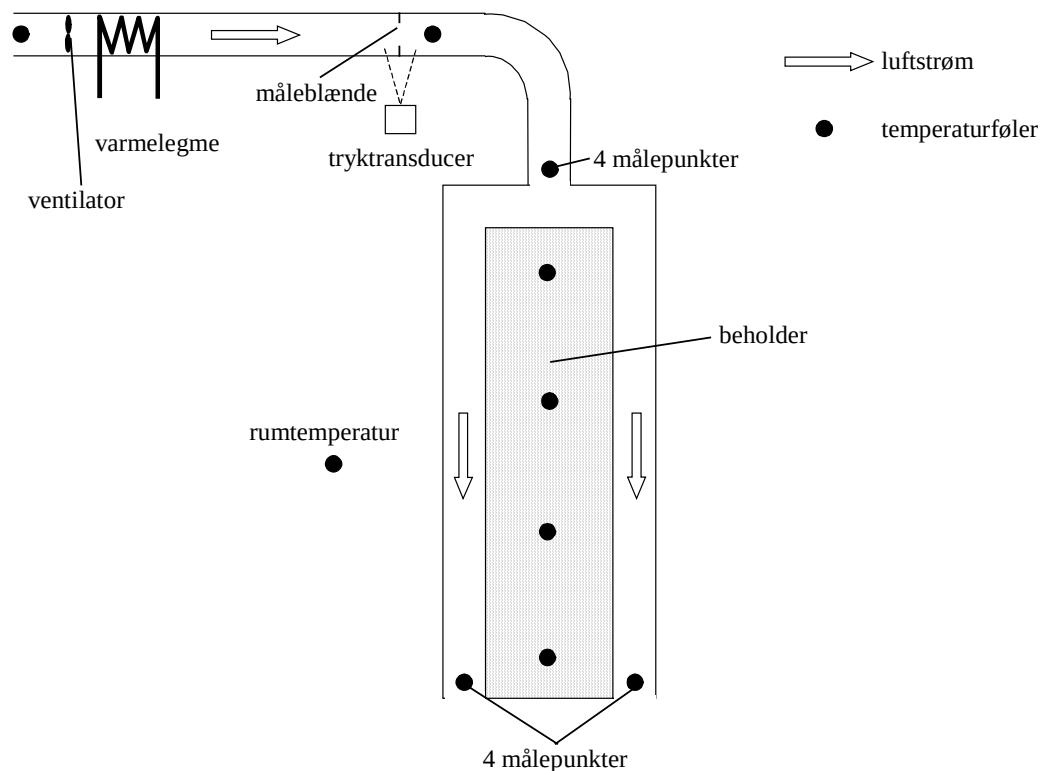
1.	Introduktion	3
2.	Målesystem	4
2.1	Måling af volumenstrøm af luft	5
2.2	Måling af lufttemperaturer	6
2.3	Måling af vandtemperaturer i beholderen	7
2.4	Opsamling af data	7
2.5.	Behandling af data	8
3.	Målinger	9
4.	Konklusion	15
5.	Referencer	16
	Bilag A	17
	Bilag B	21

1. Indledning

I nærværende del af rapporten undersøges det, om den udviklede beholder lever op til de forventede varmeoverføringsevner beskrevet i bilag B. Dette gøres ved at opbygge en måleopstilling, hvori beholderen kan installeres, således at varmeoverføringsevnen for beholderen kan bestemmes under forskellig forhold på baggrund af målinger.

2. Målesystem

Formålet med projektet var at bestemme varmeoverføringsevnen mellem en varm luftstrøm og en brugsvandsbeholder. Til dette formål blev beholderen installeret i en måleopstilling, der principielt er opbygget som vist i figur 2.1. Et billede af måleopstillingen er vist i figur 2.2.

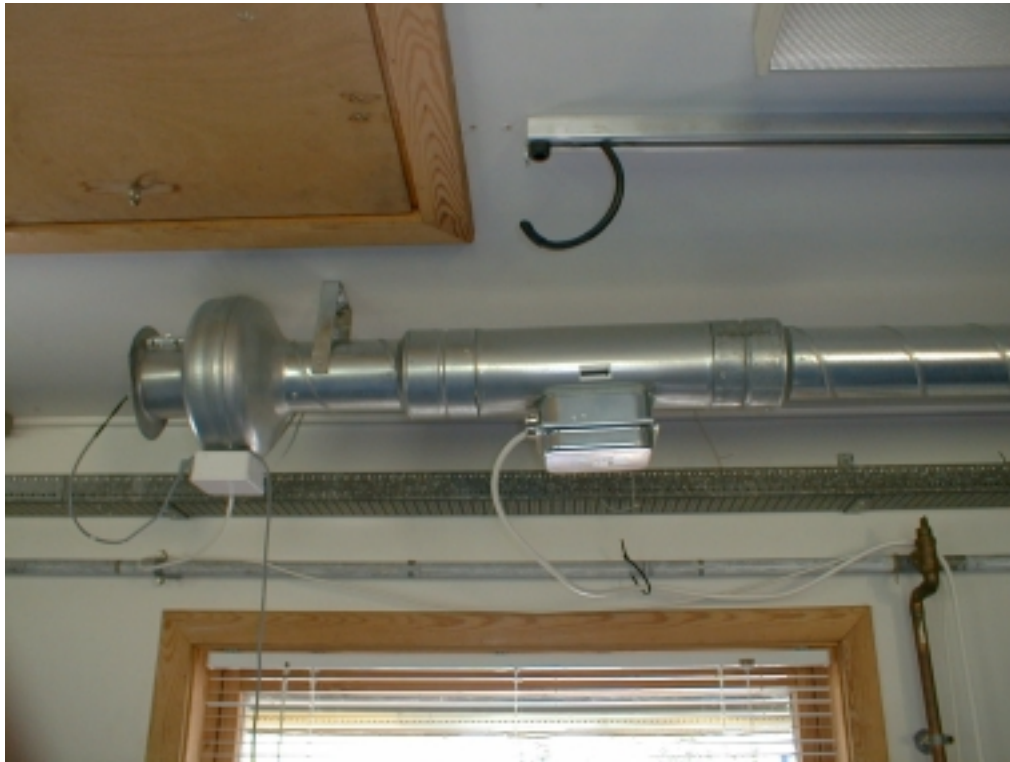


Figur 2.1. Principskitse af målesystemet.



Figur 2.2. Billede af forsøgsopstillingen.

Målesystemet bestod af en ventilator, der pressede luft gennem en el-varmeblade og videre ned omkring beholderen. Ventilator og el-varmelegeme var begge med variabel styring for kunne opnå de ønskede volumenstrømme og den ønskede opvarmning af luftstrømmen. Ventilator og el-varmeblade er vist i figur 2.3.



Figur 2.3. Ventilator og el-varmeblade i måleopstillingen.

I måleopstillingen blev forskellige temperaturer og trykfald målt for at kunne karakteriserer systemets termiske virkemåde.

2.1. Måling af volumenstrøm af luft

Ved hjælp af et kalibreret trykfald i systemet (en måleblænde) blev volumenstrømmen af luft bestemt. Trykfaldet målt med kalibrerede tryktransducere. Måleblænde og tryktransducere er vist i figur 2.4. Der blev anvendt to tryktransducere med forskelligt måleområde for at opnå høj nøjagtighed på målingen af volumenstrømmen af luft. De to tryktransducere var en tryktransducer fra Auto Tran Inc, model 700 med et måleområde fra 0 til 25 Pa - i måleopstillingen 0 til 130 m³/h og en tryktransducer fra Huba control, type 694 med et måleområde fra 0 til 100 Pa - i måleopstillingen 0 til 265 m³/h. Måleblænden var en Lindab FMU 100 80. Der var placeret en temperatursensor lige bag måleblænden, da det er nødvendigt at korrigere den målte volumenstrøm, fordi måleblænden er kalibreret ved 20°C, mens den typiske arbejdsituation i måleopstillingen var mellem 40 og 70°C.



Figur 2.4. Målesystemets måleblænde og tryktransducere.

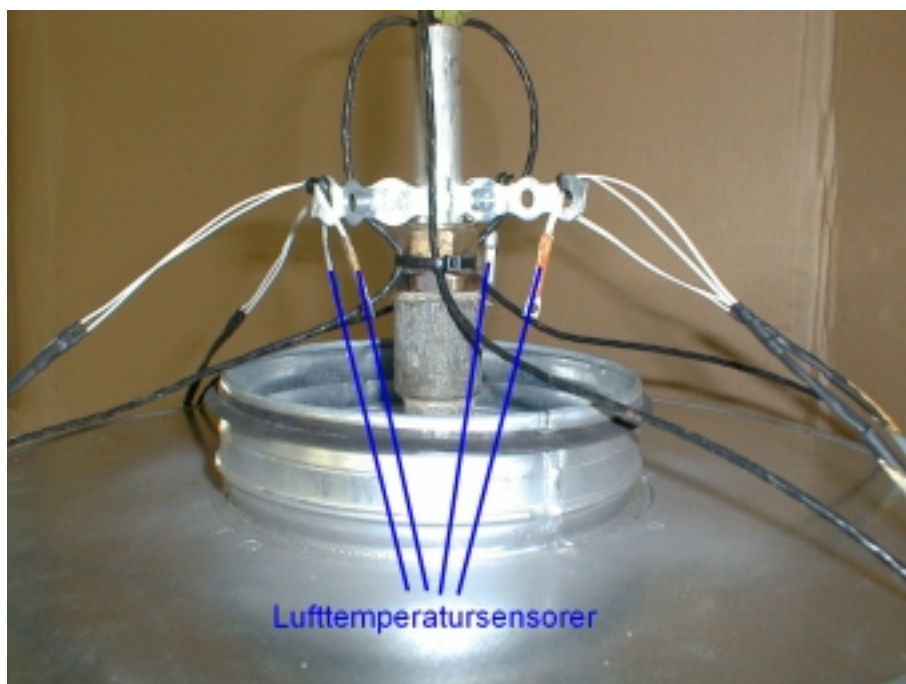
2.2. Måling af lufttemperaturer

Temperatursensorerne i luftstrømmen var kalibrerede PT100 klasse B følere.

Temperatursensoren i indløbet til ventilatoren gav sammen med temperatursensorerne i luftstrømmen lige før beholderen mulighed for at bestemme den tilførte effekt (i forhold til rumtemperaturen) med luftstrømmen til beholderen. Der var placeret fire temperatursensorer før beholderen for at give en mere præcis temperaturmåling. De fire målepunkter er vist i figur 2.5 og var placeret i henhold til specifikationerne i (Tekniska Meddelanden, 1988).

Som det ses af figur 2.5, var ledningerne til temperatursensorerne (også ledningerne fra temperatursensorerne inde i beholderen – se senere) ført ud til hvert sit verdenshjørne for at sikre en så jævn luftstrøm ned langs beholderen som mulig. Et samlet bundt af ledninger ville lukke for meget af for luftstrømmen i et område.

Temperaturen af luften ud af beholderen blev ligeledes målt i fire punkter i bunden af kappen rundt om beholderen for at opnå et godt udtryk for middeltemperaturen af luften ud fra beholderen. De fire temperatursensorer var placeret i hvert sit verdenshjørne. Før temperatursensorerne blev placeret, blev lufthastigheden ud fra beholderen undersøgt ved hjælp af en lufthastighedsmåler. Lufthastighederne svingede stort set indenfor det samme interval, men var meget fluktuerende. Det vurderedes på baggrund af lufthastighedsmålingerne, at volumenstrømmen af luft var rimelig jævnt fordelt rundt om beholderen.



Figur 2.5. Placeringen af lufttemperatursensorerne i indløbet til beholderen.

2.3. Måling af vandtemperaturer i beholderen

De anvendte temperaturfølere i beholderen var kalibrerede PT100 klasse B følere.

Temperatursensorerne var placeret i et lukket stålrør, som var nedsænket i beholderen med en vandtæt overgang mellem stålrør og beholder – toppen af stålrøret er vist i figur 2.5. Stålrøret blev herefter fyldt med vand for at sikre en god varmeovergang mellem vandet i beholderen og temperatursensorerne.

Der var placeret fire temperatursensorer i stålrør som vist på figur 2.1. Den øverste sensor var placeret 10 cm under beholdertoppen, mens den nederste sensor var placeret 10 cm over beholderbunden. De to andre sensorer var placeret i tredjedelspunkterne mellem top- og bundsensoren.

Top- og bundsensoren repræsenterede på denne måde hver 17,7 liter af beholderens 83 liter vand, mens de to midtersensorer hver repræsenterede 23,8 liter. Vandvolumenet på 83 liter blev bestemt ved vejning af beholderen med og uden vand. Samtidigt blev det bestemt, at der var 52 kg stål i beholderen fordelt med 13 kg stål ud for hver temperatursensor.

Beholderen blev til sidst isoleret med 50 mm mineraluld rundt om kappen og oven på kappen.

2.4. Opsamling af data

Alle sensorer var koblet til en datalogger med moduler fra Analog Devices. Målepunkterne blev scannet hvert 10. sekund og midlet i 5 minutsværdier på en PC's harddisk.

Datalogger blev styret af PC'en via software't Labteck Control. På PC'ens skærm blev løbende vist øjebliksværdier og kurver for udvalgte målepunkter for at muliggøre indregulering af systemet.

2.4. Behandling af data

Ved hjælp af dataloggersystemet/PC'en blev de målte værdier omsat til forståelige fysiske størrelser som temperaturer og volumenstrøm af luft.

Varmeoverføringsevnen for systemet er senere fundet på baggrund af de målte temperaturer og volumenstrømmen af luft.

3. Målinger

For at undersøge varmeoverføringsevnen mellem luft og beholder, samt afhængigheden af forskellige parametre som effekten i luftstrømmen, volumenstrømmen af luft og indløbstemperaturen af luften til beholderen, blev en serie forsøg designet.

Det er hensigten, at beholderen skal indgå i et luftsolfarmeanlæg med en 2-3 m² luftsolfanger, der typisk vil have en effektivitet på omkring 40-50% ved en volumenstrøm på 100 m³/h. Det vil sige, at den maksimale effekt til beholderen med en solindstråling på 1000 W/m² vil være mellem 1000 og 1250 W.

Tabel 3.1 viser de planlagte parametre for forsøgene. Forsøgsparametrene blev fastlagt på baggrund af den maksimale indløbstemperatur, der kunne tilvejebringes uden at brandsikrings-termostaten i opstillingens varmelegeme slog fra.

Forsøg	Intention med forsøg	volumen- strøm af luft m ³ /h	effekt W	indløbs- temperatur °C
Reference	reference	100	750	50
2	afhængighed af effekt ved fastholdt volumenstrøm	100	500	-
3	”	100	1250	-
4	afhængighed af volumenstrøm ved fastholdt effekt	50	750	-
5	”	150	750	-
6	afhængighed af volumenstrøm ved fastholdt indløbstemperatur	50	-	50
7	”	150	-	50

Tabel 3.1. Planlagte forsøg med beholderen.

Grafer med måleresultater for de enkelte forsøg kan findes i bilag B, mens tabel 3.2 opsummerer måleresultaterne i form af middelværdier.

Graferne i bilag B viser, at det ikke var muligt at fastholde en helt jævn effektilførsel til lageret eller helt jævn volumenstrøm af luft. Svingningerne er dog ikke så store, at det væsentlig influerer på varmeoverføringsevnen. Effektilførslen i graferne er defineret som den opvarmning, der sker af luften fra rumtemperaturen til temperaturen af luften til beholderen – dvs. den afsatte effekt fra varmelegemet minus varmetabet i kanalerne indtil beholderen.

De fire indløbstemperaturer til beholderen er meget ens, så ens at kun middelværdien er vist i graferne.

Graferne viser derimod, at udløbstemperaturen af luft fra beholderen varierer en del mellem de fire temperatursensorer. To sensorer er lig middelværdien af de fire sensorer, mens en sensor konsekvent er højere end middeltemperaturen, mens en anden konsekvent er under mid-

deltemperaturen. Disse to temperaturer er benyttet til at angive usikkerheden på varmeoverfø-
ringsevnen.

Varmeoverføringsevnen for beholderen er beregnet på følgende måde (Otto og Clausen, 1996):

$$UA = Q \cdot \ln(\Delta T_{ud} / \Delta T_{ind}) / (\Delta T_{ud} - \Delta T_{ind})$$

hvor: Q er effekten tilført beholderen = $V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{luft_{ind}} - T_{luft_{ud}}) - \text{varmetab fra beholde-}$
ren,

V er volumenstrømmen af luft,

ρ er densiteten af luften,

C_p er varmekapaciteten af luften,

$T_{luft_{ind}}$ er temperaturen af luften til beholderen,

$T_{luft_{ud}}$ er temperaturen af luften ud fra beholderen,

Varmetabet fra beholderen: $UA_{tab} \cdot ((T_{luft_{ind}} + T_{luft_{ud}})/2 - T_{rum})$,

UA_{tab} findes på baggrund af målingerne – se senere,

T_{rum} er temperaturen i rummet, hvor beholderen er placeret,

ΔT_{ind} er $(T_{luft_{ind}} - T_{beholder_{top}})$,

ΔT_{ud} er $(T_{luft_{ud}} - T_{beholder_{bund}})$,

$T_{beholder_{top}}$ er temperaturen af den øverste sensor i beholderen,

$T_{beholder_{bund}}$ er temperaturen af den nederste sensor i beholderen.

UA_{tab} findes ud fra målingerne ved at summere Q over en periode og herfra trække energistig-
ningen i lageret i samme periode fundet på baggrund af de fire lagertemperaturer og varmekapa-
citeten af de fire lag. Varmekapaciteten for beholderen (vand + stål) er beregnet til 0,1032
kWh/K fordelt med 0,0222 kWh/K på henholdsvis top- og bundlaget og 0,0294 kWh/K på
hver af de to midterlag. Forskellen i energimængder ved denne subtraktion er herefter divide-
ret med periodelængden og den midlede temperaturforskelle mellem middelværdien af tempe-
raturen af luften, der strømmer omkring beholderen og rumtemperaturen.

UA_{tab} er på baggrund af målingerne fundet til at ligge mellem 1,44 og 1,83 W/K. Den bereg-
nede varmetabskoefficient (UA_{tab}) er fundet til 1,4 W/K.

Graferne viser, at selv om varmeoverføringsevnen svinger over måleperioderne, er den relativt
stabil – dvs. den hverken stiger eller falder markant over måleperioderne. Ud fra målingerne
kan det derfor fastslås, at varmeoverføringsevnen er en konstant kun afhængig af forsøgspa-
rametrene og ikke en funktion af udviklingen af forskellige parametre hen gennem forsøget –
f.eks. temperaturniveauet i beholderen.

Graferne viser desuden, at det er muligt at opnå brugbare beholdertemperaturer i løbet af en
solskinsdag - f.eks. forsøg nr. 3 og referenceforsøget – eller forsøg nr. 8 (se senere), hvor en
temperatur på 60°C i toppen af beholderen blev nået på under 4 timer.

Tabel 3.2 viser som nævnt midlede værdier fra forsøgene. Resultaterne fra forsøgene er grup-
peret i tre grupper, afhængig af hvilke parametre, der er varieret i forsøgene: I første gruppe er
volumenstrømmen fastholdt, mens effekten varieres. I anden gruppe er effekten fastholdt,
mens volumenstrømmen varieres. I tredje gruppe er indløbstemperaturen af luften til beholde-
ren fastholdt, mens volumenstrømmen varieres.

I første gruppe varieres både effekt og indløbstemperatur. Her er varmeoverføringsevnen konstant. I anden gruppe varieres volumenstrøm og indløbstemperatur. Her er varmeoverføringssevnen ikke konstant. I tredje gruppe varieres volumenstrøm og effekt. Her er varmeoverføringsevnen heller ikke konstant, men lig værdierne fra anden gruppe. På baggrund af dette kan det konkluderes, at varmeoverføringsevnen udelukkende er afhængig af volumenstrømmen af luft omkring beholderen og ikke af effektilførsel eller temperaturniveau. Dette vil gøre det let at simulere solvarmeanlæg med denne type beholder, idet det er relativt let af fastlægge varmeoverføringsevnen.

Forsøg	volumen- strøm af luft m ³ /h	effekt W	indløbs- temperatur °C	UA (varmeoverføringsevne) W/K (%)		
				min.	middel	max.
2	102,2	513	39,3	43,2(-10,7)	48,4	55,4(14,5)
reference	101,5	739	48,8	41,9(-11,4)	47,3	54,6(15,4)
3	102,2	1238	67,5	41,9(-11,8)	47,5	54,6(14,9)
4	80,1	742	57,2	39,0(-12,6)	44,6	51,9(16,4)
reference	101,5	739	48,8	41,9(-11,4)	47,3	54,6(15,4)
5	151,2	756	40,8	47,6(-9,5)	52,6	59,6(10,6)
6	51,9	419	49,2	29,9(-12,4)	34,2	39,7(16,1)
reference	101,5	739	48,8	41,9(-11,4)	47,3	54,6(15,4)
7	152,1	1262	49,4	48,2(-8,7)	52,8	59,4(12,5)

Tabel 3.2. Midlede forsøgsresultater. For min./max. UA-værdier er tallene i parentes forskellen i % i forhold til reference-forsøget.

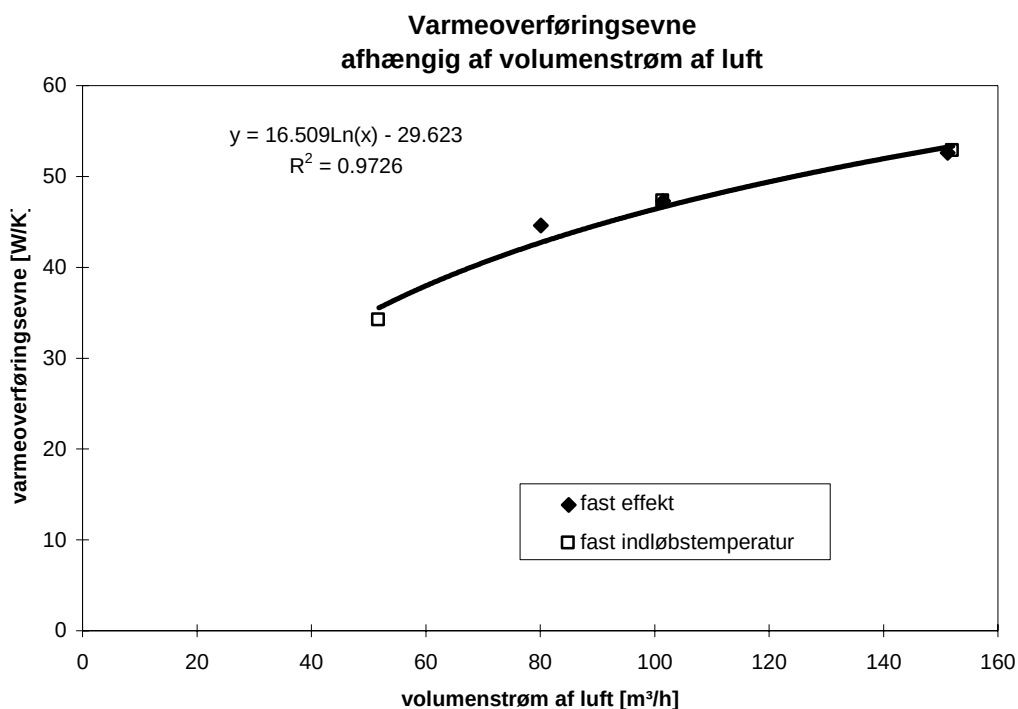
Som det ses af min./max.-værdierne for varmeoverføringsevnen (funder ved hjælp af min./max.-temperaturerne for luften ud af beholderen) er usikkerheden på denne relativ lille, når man tager i betragtning, hvor svært det kan være at opnå præcise målinger i et luftsystem.

Figur 3.1 viser varmeoverføringsevnen afhængighed af volumenstrømmen af luft.

Som det ses af figuren, falder varmeoverføringsevnen med faldende volumenstrøm af luft, hvilket også var forventet, idet det er den udvendige varmeoverføringskoefficient mellem luft og beholder/konvektorfiner, der er bestemmende for den samlede varmeoverføringsevne. Den udvendige varmeoverføringskoefficient er stærkt afhængig af lufthastigheden langs beholder væg og finer. Varmeoverføringsevnen vil dog helt ned til 25 m³/h være indenfor det beregnede interval i bilag B – 27,5-50 W/K. Varmeoverføringsevnen må derfor siges at være bedre end forventet.

Varmeoverføringsevnen for traditionelle varmevekslerspiraler neddykket i solvarmebeholdere er afhængig af temperaturniveau og overført effekt. Det skyldes, at varmeovergangen fra varmevekslerspiralen til vandet her er den afgørende faktor for varmeoverføringsevnen. Da det i den undersøgte beholder er varmeoverføringskoefficienten mellem luften og beholderen/finerne, der er afgørende, influerer den indvendige varmeoverføringskoefficient stort set ikke på

den samlede varmeoverføringsevne. Derfor er den samlede varmeoverføringsevne ikke afhængig af temperaturniveau og overført effekt.



Figur 3.1. Varmeoverføringsevns afhængighed af volumenstrømmen. Linien viser kurven for et regressionsudtryk (også vist i grafen) på baggrund af alle 5 punkter.

Der er termopasta mellem konvektorer og beholder for at øge varmeoverføringen. Der er ikke termopasta mellem konvektorer og kappe. Kappen bidrager derfor næsten ikke til varmeoverføringen. Varmeoverføringen kunne derfor øges ved at have termopasta mellem konvektorer og kappe. I stedet kunne konvektorerne og kappen (indvendigt) males mat sort – de er metalblanke i dag. Dette ville øge strålingsudvekslingen mellem kappe og konvektorer. Det vurderes, at den samlede varmeoverføringsevne på denne måde kan forøges med omkring 10%.

Det har i nærværende projekt ikke været muligt at undersøge varmeoverføringsevne og beholder under dynamiske forhold - dvs. med vekslende volumenstrøm af luft og effektilførsel. Dette har ikke været muligt dels på grund af projektets beskedne budget – kun projektets indledende fase, er bevilget, dels fordi måleopstillingen er vanskelig at indregulere på grund af inertien i systemet. Det er derfor vanskeligt at simulere et dagsprofil for volumenstrøm og effektilførsel.

Det har heller ikke været muligt at gennemføre målinger, hvor der blev tappet fra beholderen under opvarmningsforløbet, idet der ikke er preplade på koldtvandsindløbet, da det er en ombygget hydrofor-tank. Der sker derfor næsten fuldstændig opblanding under tapning.

Varmeoverføringsevnen forventes at være rimelig konstant over dagen, men sidst på en solskinsdag vil effekten fra solfangeren mindskes, og indløbstemperaturen af luften til beholderen vil derfor også mindskes. Det vil betyde en transport af varme fra toppen af beholderen til bunden og måske et utilsigtet varmetab. For trods alt at give et indtryk af, hvordan beholderen vil opføre sig, når solindfaldet reduceres sidst på eftermiddagen, er der gennemført et forsøg,

hvor beholderen først blev varmet op ved hjælp af en høj effekt, hvorefter effekten blev reduceret af flere omgange for til sidst at blive 0.

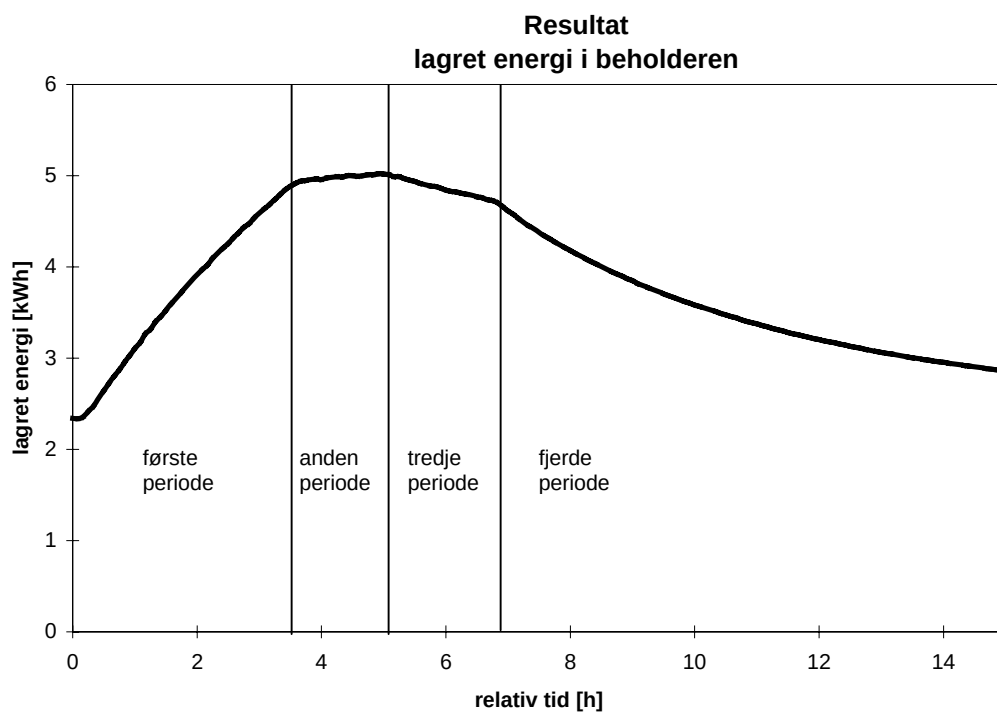
Resultatet af dette forsøg er vist sidst i bilag B som forsøg nummer 8. Første blev beholderen tilført en effekt på 1250 W i ca. tre timer med en indløbstemperatur på mellem 67 og 70°C. Da temperaturen i toppen af beholderen nåede 60°C, blev effekten og lufttemperaturen sænket til henholdsvis ca. 750 W og ca. 50°C – dvs. den sidste var da mellem temperaturen i toppen (60°C) og bunden (ca. 35°C) af beholderen.. Denne situation blev fastholdt i lidt under 2 timer, hvorefter effekten blev sænket til ca. 500 W, hvilket resulterede i en indløbstemperatur af luft til beholderen på ca. 40°C, hvilket ca. var lig temperaturen i bunden af beholderen. Denne situation blev ligeledes opretholdt i ca. 2 timer, hvorefter varmelegemet helt blev slået fra.

Som det ses af varmeoverføringsevnen i figur B.32, er denne (indtil effekten første gang bliver sænket) lig værdien fundet for følgende forsøg ligeledes med en volumenstrøm på 100 m³/h: Reference, 2 og 3. Herefter kan varmeoverføringsevnen ikke beregnes (vist som 0 i grafen) før varmelegemet slås helt fra. Varmeoverføringsevnen kan ikke beregnes, fordi de målte værdier for $\Delta T_{ud} / \Delta T_{ind}$ i udtrykket på side 10 bliver negative, så det ikke er muligt at tage den naturlige logaritme af disse værdier. Efter at varmelegemet var slået fra, bliver situationen igen således, at varmeoverføringsevnen kan beregnes. Som det ses, er varmeoverføringsevnen her lig varmeoverføringsevnen i starten af forsøget, selv om der nu overføres varme fra beholderen til luften i stedet for fra luften til beholderen. Dette viser igen, at det er muligt at anvende én varmeoverføringsevne udelukkende afhængig af volumenstrømmen af luft. Dette modsiges dog lidt af den faldende tendens for kurven i figur B.32 efter den 8. time. Denne svagt faldende tendens indikerer, at varmeoverføringsevnen er svagt afhængig af temperaturniveauet i systemet. Dog sandsynligvis ikke mere, end at det ikke er nødvendigt at tage højde for dette.

Figur B.30 viser temperaturerne i beholderen. Som det ses, overføres der varme fra toppen af beholderen til bunden ved lav/ingen effekttilførsel, indtil hele beholderen har opnået samme temperatur. Figur 3.2 viser det relative energiindehold (i forhold til startsituationen) i beholderen under forsøget. Som det ses, fortsætter energiindeholdet med at stige svagt, så længe indløbstemperaturen af luft er noget over temperaturen i bunden af beholderen (periode 2), selv om stratifikationen i beholderen ødelægges – se figur B.30. I periode 3, hvor indløbstemperaturen af luft er lig bundtemperaturen, reduceres energiindeholdet i beholderen, men kun med ca. 11% over 2 timer.

Ovenstående er en tænkt situation. Det er intentionen, at solvarmeanlægget skal drives af en solcelledrevet ventilator. Det betyder, at volumenstrømmen af luft mindskes ved mindskes solindfald, hvilket vil mindske temperaturfaldet i tilluften sidst på dagen. Ved lavere volumenstrøm mindskes varmeoverføringsevnen desuden, hvilket betyder mindre overført energi mellem top og bund i beholderen, dvs. mindre overført og mindre tabt energi end vist i figur 8.

Det er dog vigtig at undersøge og optimere ovenstående i forbindelse med anden fase af projektet, der vil dreje sig om udformningen af hele anlægget inklusiv solfanger, ventilator og styring. Ligeledes skal det undersøges, hvordan tanken bedste muligt udformes for at mindske varmetabet fra beholderen om natten, hvor den ikke omgives af en opvarmet luftstrøm, men hvor en kølig luftstrøm tilgængelig stærkt kan forøge beholderens varmetab.



Figur 3.2. Det relative (i forhold til startsituationen) energiindehold i beholderen i forsøg 8.

4. Konklusion

Det var intentionen at udvikle en beholder, hvor det er muligt at overføre varme fra en luftstrøm direkte gennem beholdervæggen. For at opnå en tilstrækkelig høj varmeoverføring er der monteret konvektorer mellem beholdervæggen og den kappe, der omgiver beholderen.

Det var på forhånd beregnet, at det er nødvendigt med en varmeoverføringsevne på omkring 50 W/K mellem luftstrøm og beholder, for at få glæde af en sådan beholder i et luftsolvarmeanlæg.

Målinger på beholderen viser, at varmeoverføringsevnen ligger lige under 50 W/K for en volumenstrøm på 100 m³/h. Varmeoverføringsevnen kan desuden øges lidt ved at male konvektorer og den indvendige side af kappen mat sort. Varmeoverføringsevnen mindskes ved lavere volumenstrøm og øges ved højere volumenstrøm. Derimod er varmeoverføringsevnen ikke eller kun svagt afhængig af temperaturniveau og effektniveau.

Da det hermed er vist, at det er muligt at opnå en tilstrækkelig høj varmeoverføringsevne, må det næste logiske skridt være at udvikle et luftsolvarmeanlæg, hvor denne type beholder kan indgå. Det vil her være nødvendigt med målinger på et komplet anlæg samt optimering af anlægsudformningen ved hjælp af simuleringer.

5. Referencer

Otto, W. og Clausen, I., 1996. Prøvning af beholdere på Prøvestationen for Solenergi. Teknologisk Institut.

Tekniska Meddelanden 325, 1988. Funktionsbestämning för värmeväxlare luft/luft. Institut för uppvärmnings och ventilationsteknik, KTH Stockholm (vol 19).

Bilag A

Tillæg til projektansøgning med beregning af forventede varmeoverføringsevner

SDJ/ehp.6. juni 1998

Ejvin Beuse
OVE
Dannebrogsgade 8 a
8000 Århus C

Fax: 86 76 05 44
3 sider

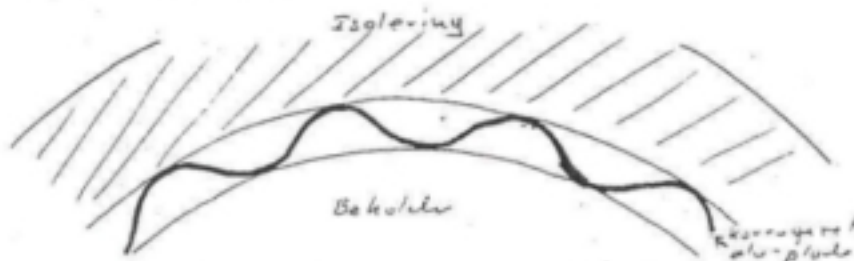
Vedr. indstilling til UVE-ansøgningen "Prisbilligt kombineret rum- og brugsvandsanlæg for fritidshuse", journal nr. 51181/98-0025

Det svage punkt i det ansøgte projekt er, som det rigtigt er angivet i indstillingen, den varmeoverførende kapacitet i systemet mellem solopvarmet luft og lager.

I det følgende er vist resultaterne fra beregninger af den teoretiske varmeoverføringskoefficient for en beholder på 60 liter med en diameter på 0,24 m og en højde på 1,32 m. Varmeoverføringskoefficienten er beregnet for planparallelle flader ved hjælp af formlerne i "Formler for varmetransmission", H. Saustrop Kristensen, Polyteknisk Forlag.

Den konvektive varmeoverføringskoefficient er - i det interessante interval for lufthastigheden langs beholderoverfladen på mellem 2 og 7 m/s - fundet til 15-25 W/K.

Den konvektive varmeoverføringskoefficient er fundet for en glat beholderoverflade uden finner. Finner kan relativt let skabes ved at placere en korrugeret (sinus- eller trapezkorrugeret) aluminiumsplate mellem beholder og isolering som vist i den følgende figur. Den korrugerede plade tjener et dobbelt formål: Dels at skabe finner i luftstrømmen, dels billigt at fastholde den rigtige afstand mellem beholder og isolering hele vejen rundt om beholderen. Den korrugerede plade virker ligesom konvektorerne på radiatorer, og forøger derved det varmeoverførende areal med mere end 100 %. Det vurderes, at den konvektive varmeoverføringskoefficient på denne måde kan forøges med mindst 50 %.



Figur 1. Fortegnet principskitse af, hvordan en korrugeret alu-plade både kan fungere som afstandsholder og finner.

Dansk Teknologisk Institut

Taastrup

Gregerønsvej
Postboks 141
DK-2630 Taastrup
Telefon 43 50 43 50
Telefax 43 50 72 50
Giro 4 65 65 63

Teknologiparken
DK-8000 Århus C

Telefon 89 43 89 43
Telefax 89 43 89 89
Giro 4 65 65 63



Luften vil altid (ved solindfald) have en højere temperatur end lageret. Isolering og finner vil hurtigt opnå en temperatur tæt på luftens temperatur, hvilket vil lede til en indirekte varmeoverføring mellem luft og beholder via strålingsudveksling. Afhængig af temperaturforskellen mellem beholder og isolering/finner vil varmeoverføringskoefficienten via strålingsudveksling være mellem 5 og 10 W/K (ved en temperaturforskell på henholdsvis 10 og 30 K).

Varmeoverføringskoefficienten mellem lager og luft vil altså teoretisk være:

Konvektion:	15-25 W/K
Finner:	7,5-15 W/K
Stråling:	5-10 W/K
I alt	27,5-50 W/K

Spørgsmålet er så, om det er en tilstrækkelig høj varmeoverføringskoefficient. Her sammenlignes med en meget benyttet traditionel solvarmebeholder: Nilan SV 300 Combi (D3072). Varmeoverføringskoefficienten for solvarmeveksleren i denne beholder er $122,9 + 0,79 \cdot T$ W/K, eller 139 og 162 W/K ved henholdsvis en lagertemperatur på 20 og 50°C. Solvolumenet (total volumen minus suppleringsvolumen) er i denne beholder 174 l. Varmeoverføringskoefficienten er således henholdsvis 0,8 og 0,93 W/K pr. liter. Overført til en beholder på 60 liter giver det 48 og 56 W/K.

Set fra en anden synsvinkel: Nilan-beholderen anvendes ofte til solfangerarealer på 6 m². Varmeoverføringskoefficienten er her henholdsvis 23 og 27 W/K pr. m² solfangerareal. Dvs. for et anlæg med 2 m² solfanger (som i ansøgningen) bør varmeoverføringskoefficienten ud fra denne synsvinkel være som beregnet ud fra beholdervolumenet - mellem 46 og 54 W/K.

Det er således muligt at opnå en tilstrækkelig høj varmeoverføringsevne for det beskrevne koncept, især hvis man tager i betragtning, at temperaturforskellen i luftsolvarmeanlæg traditionelt er højere end i væskesolvarmeanlæg - som følge af luftens lavere varmekapacitet.

Et mere vigtigt spørgsmål er dog, om det er muligt at opnå anvendelige temperaturer i beholderen, da der er tale om et åbent system - dvs. ingen recirkulation af luft tilbage til solfangeren. UVE-projektet "Solvarmeanlæg med luft som transportmedium", journal nr. 51181/94-0001 viser, at det er muligt. I nærværende anlæg kan der desuden opnås højere temperaturer ved at sænke volumenstrømmen af luft i systemet. Det vil mindske varmeoverføringskoefficienten, men temperaturforskellen vil i første omgang øges mere end varmeoverføringskoefficienten bliver reduceret, hvilket vil lede til en øget samlet overført effekt. I projektet vil det dog også blive undersøgt, hvordan recirkulation mellem lager og solfanger indvirker på ydelsen.

Et andet kritikpunkt overfor ansøgningen kunne være, at potentialet for konceptet er begrænset. Dette er dog ikke rigtigt. Der er en stigende interesse for luftsolvarmeanlæg i Danmark. En interesse, der ikke vil blive mindre, når produkterne fra IEA Task 19 "Solar air heating" bliver tilgængelige i løbet af 1998-99 - et katalog, en case study bog, en designhåndbog og et beregningsværktøj. Luftsolvarmesystemer er ofte primært rumopvarmningssystemer, der kun er i drift i rumopvarmningssæsonen. Ydelsen for disse anlæg øges betydeligt, når anlæggene også benyttes til brugsvandsopvarmning i de tre sommer måneder. I den forbindelse er konceptet i



ansøgningen af stor interesse. Især i forbindelse med luftsolvarmeanlæg til forvarmning af ventilationsluft, der spås den største fremtid. Her kan konceptet i ansøgningen ikke blot anvendes til forvarmning af brugsvand som med en traditionel luft-til-vandvarmeveksler, men også fungere som lager/buffer ved forvarmning af ventilationsluften. Forvarmningen af ventilationsluften sker samtidigt med det direkte solindfald gennem bygningens vinduer. Konceptet i ansøgningen kan her fungere som et billigt og simpelt lager/buffer, således at lageret opvarmes i dagtimerne, hvor det direkte solindfald gennem vinduerne ofte alene kan klare opvarmningsbehøver. Varmen afgives igen senere på dagen, hvor det direkte solindfald gennem vinduerne ofte vil være utilstrækkeligt til at dække rumopvarmningsbehøvet. Dette vil forøge solvarmeanlæggenes ydelse yderligere.

Projektets ansøgere er fuldstændig klar over, at konceptet står og falder med, om det er muligt at opnå en tilstrækkelig høj varmeoverføringskoefficient mellem luft og beholder. Derfor er ansøgningen da også opdelt i to faser, hvor varmeoverføringskoefficienten fastlægges i den første fase. Den anden fase gennemføres kun, hvis en tilfredsstillende varmeoverføringskoefficient kan dokumenteres.

Konceptet har så spændende og interessante perspektiver, at det fortjener at blive undersøgt nærmere.

Der anmodes derfor om, at ansøgningen tages op til fornyet overvejelser på baggrund af de ovenfor anførte argumenter.

Enten kan hele projektet bevilges med nedsættelse af en følgegruppe, der gives ret til at stoppe projektet efter første fase, hvis ikke det ønskede resultat opnås. Eller også bevilges kun første fase med en anmærkning om, at anden fase kan bevilges efter indsendelse af en fornyet ansøgning, når fase 1 er gennemført tilfredsstillende.

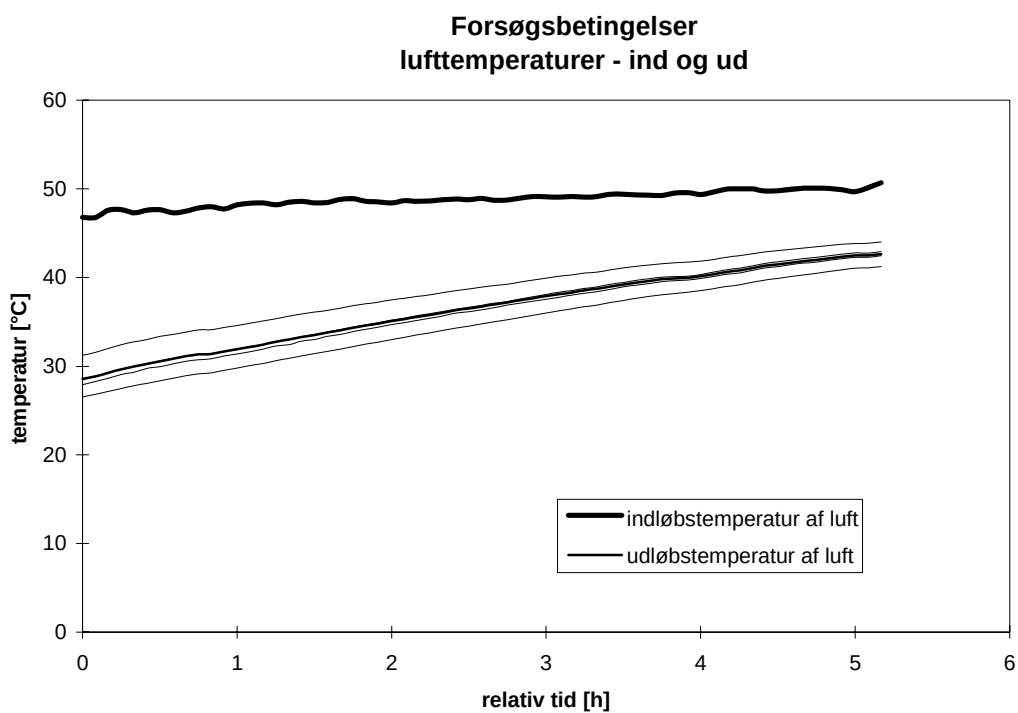
Med venlig hilsen

Søren Østergaard Jensen

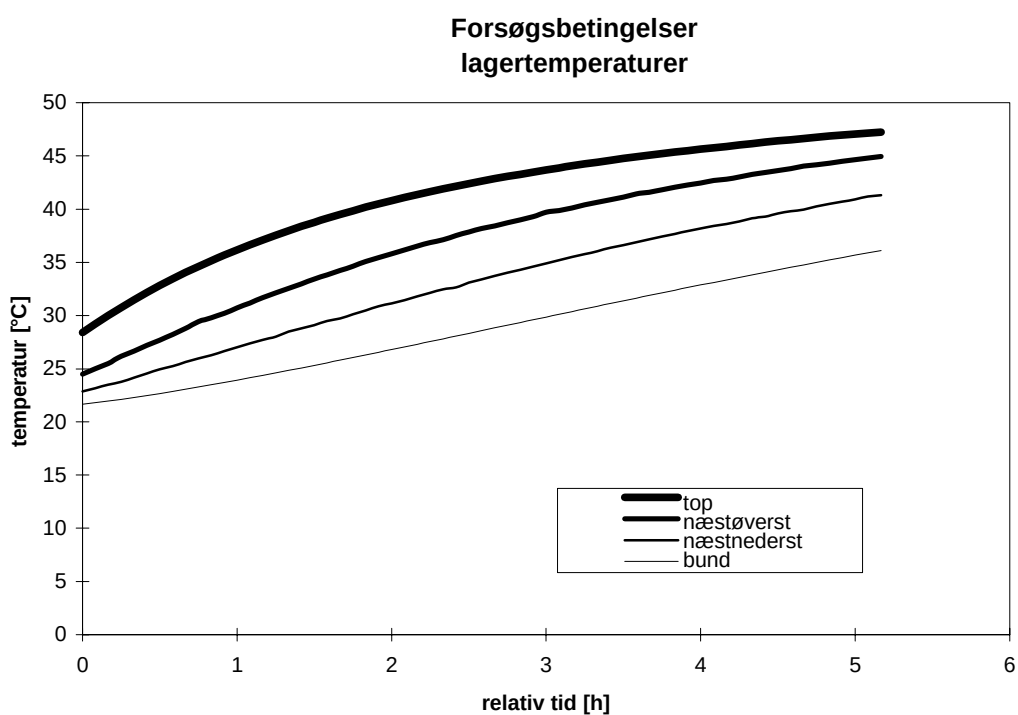
Bilag B

Måleresultater

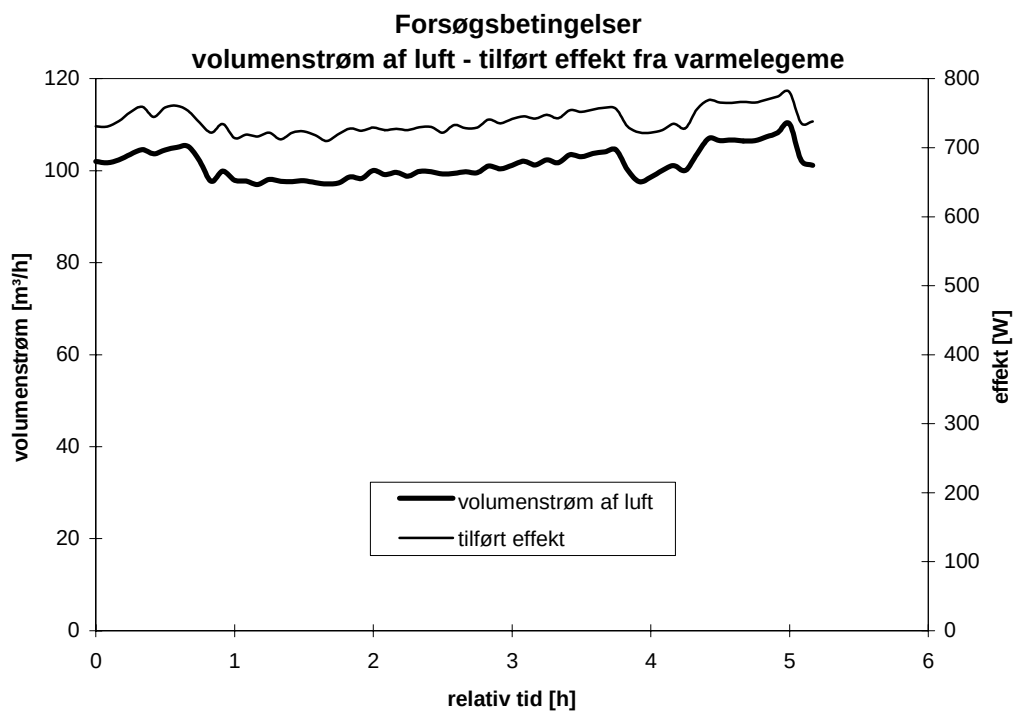
Reference forsøg: 100 m²/h, 750 W, 49°C



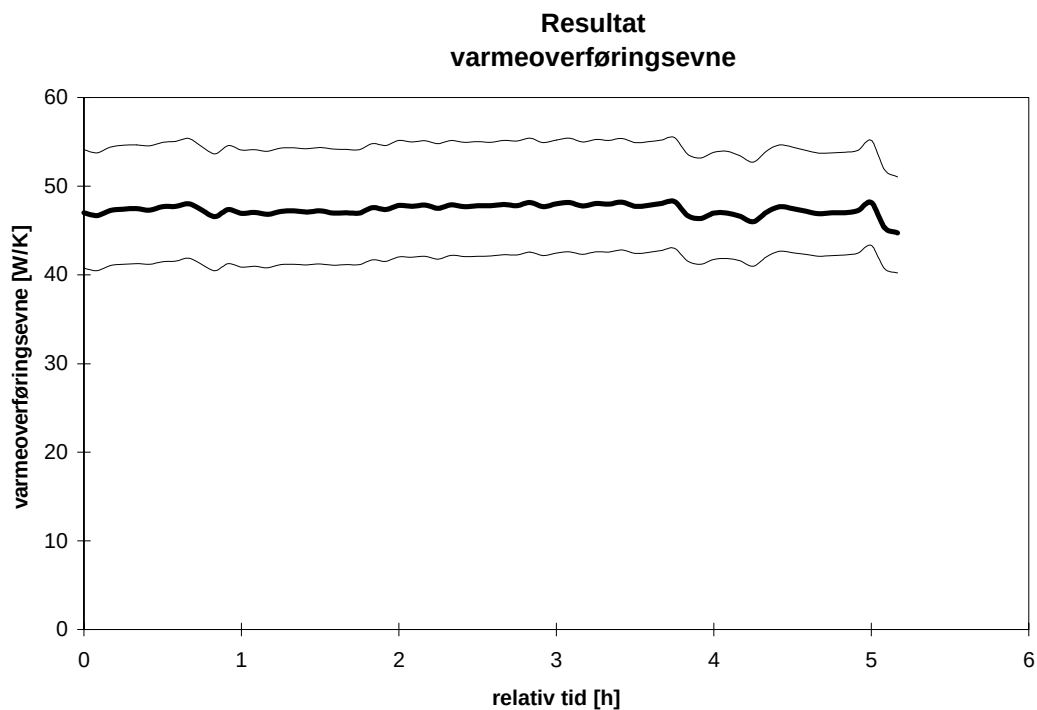
Figur B.1. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.2. Beholdertemperaturer.

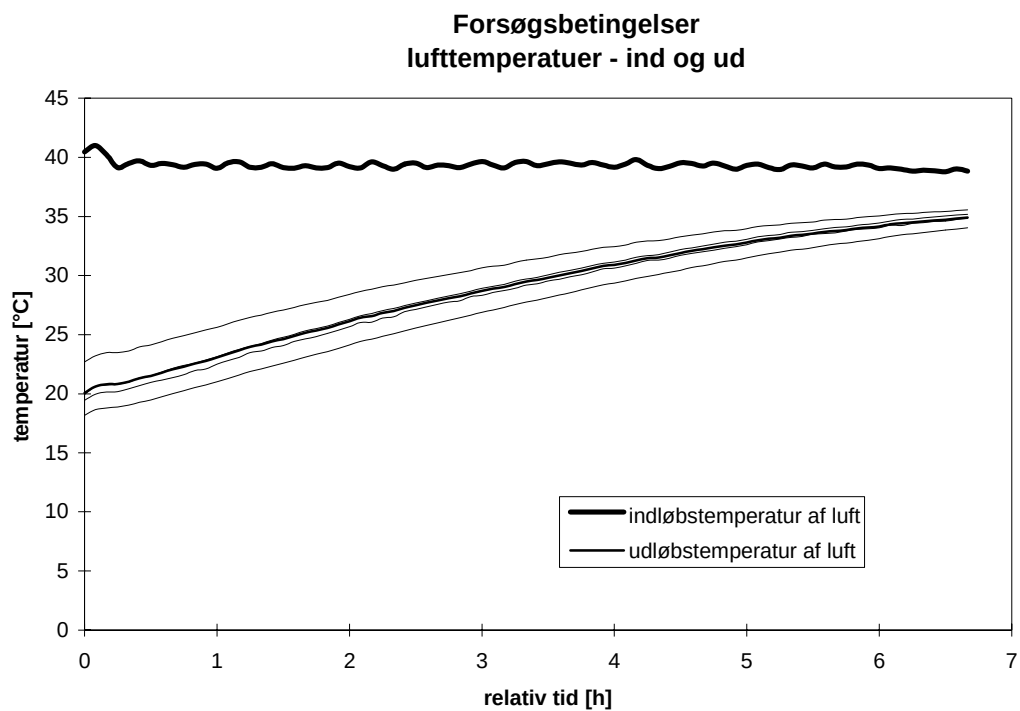


Figur B.3. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

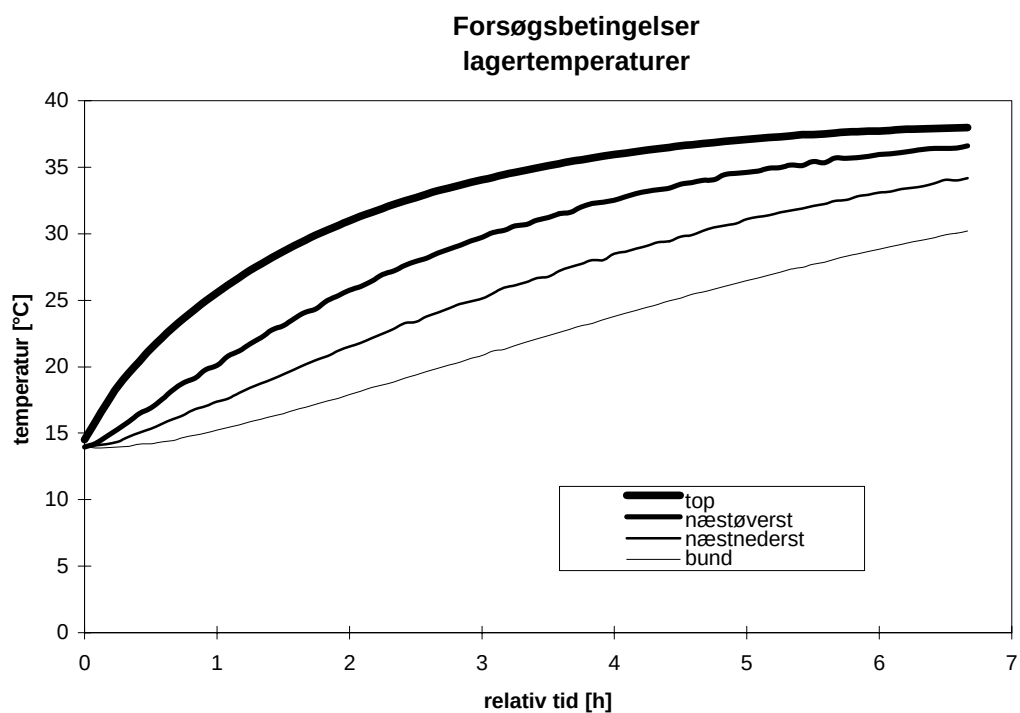


Figur B.4. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

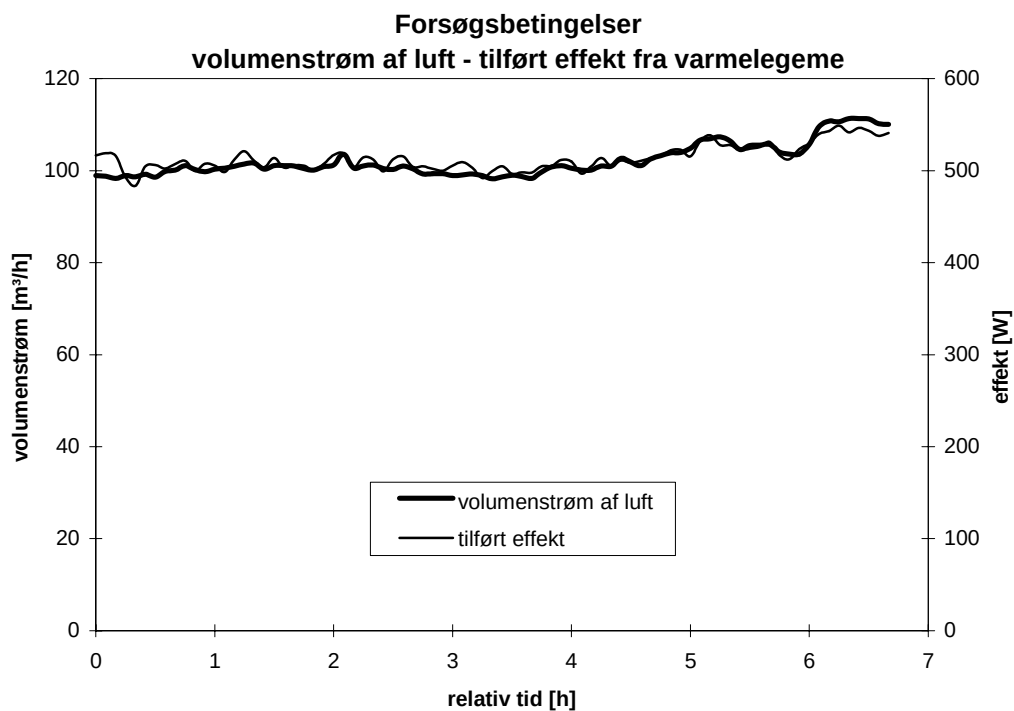
Forsøg nr. 2. 100 m³/h, 500 W



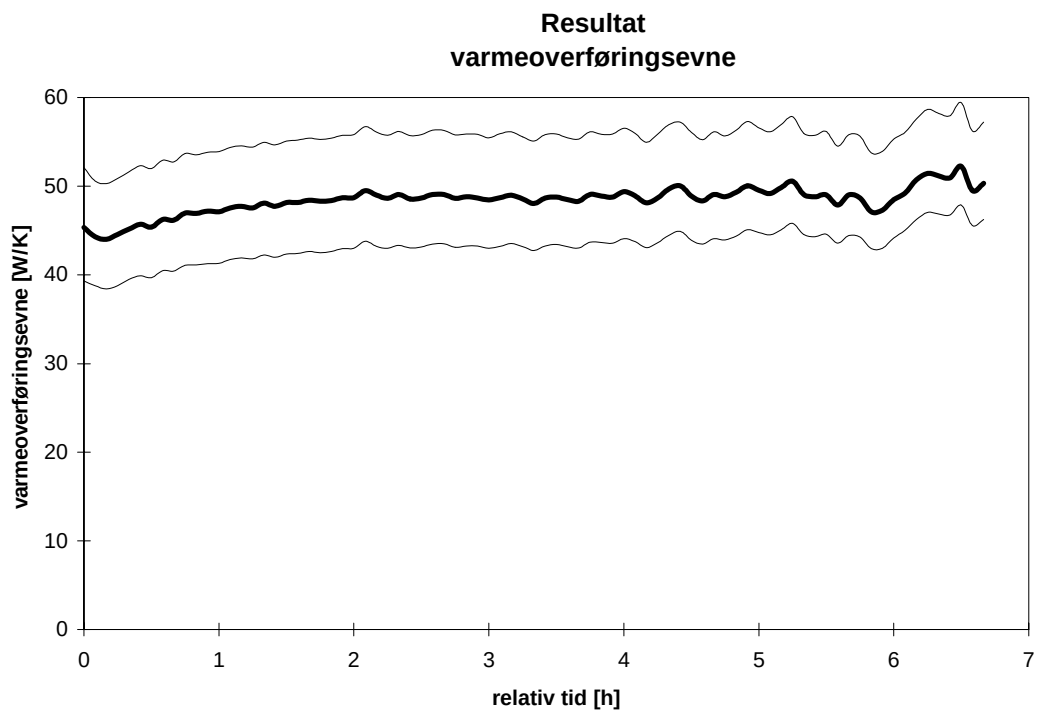
Figur B.5. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.6. Beholdertemperaturer.

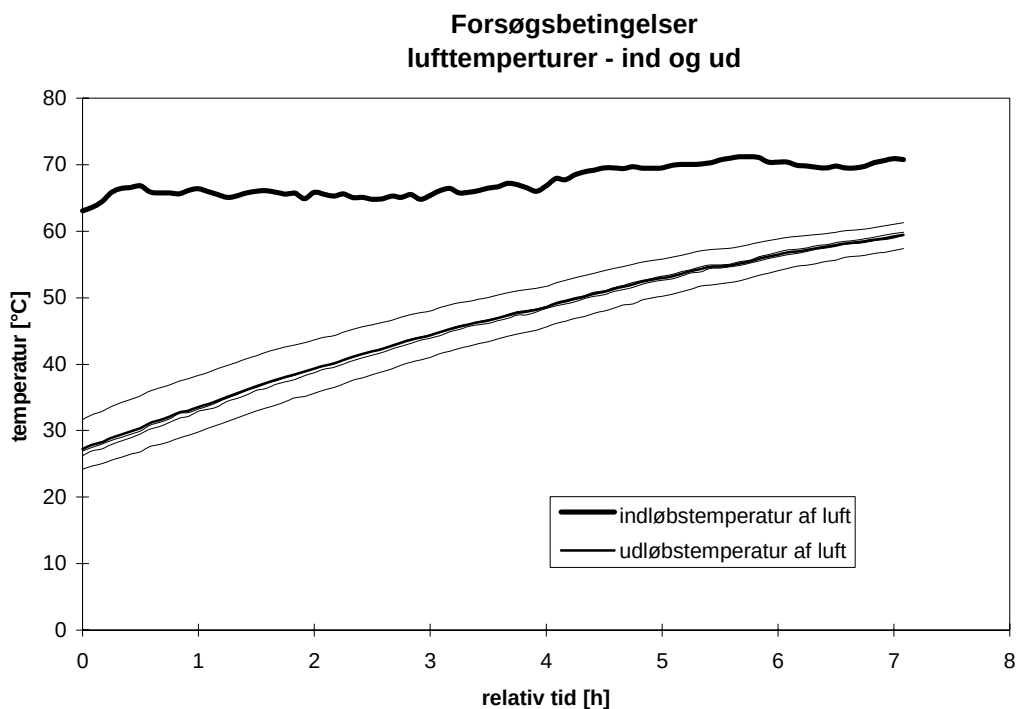


Figur B.7. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

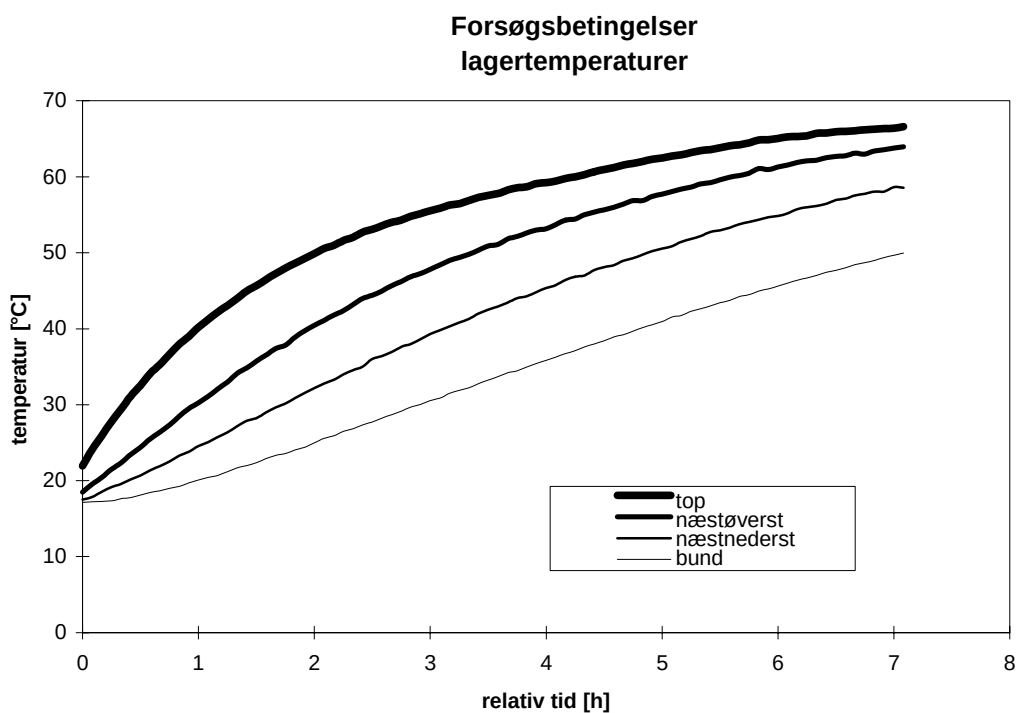


Figur B.8. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

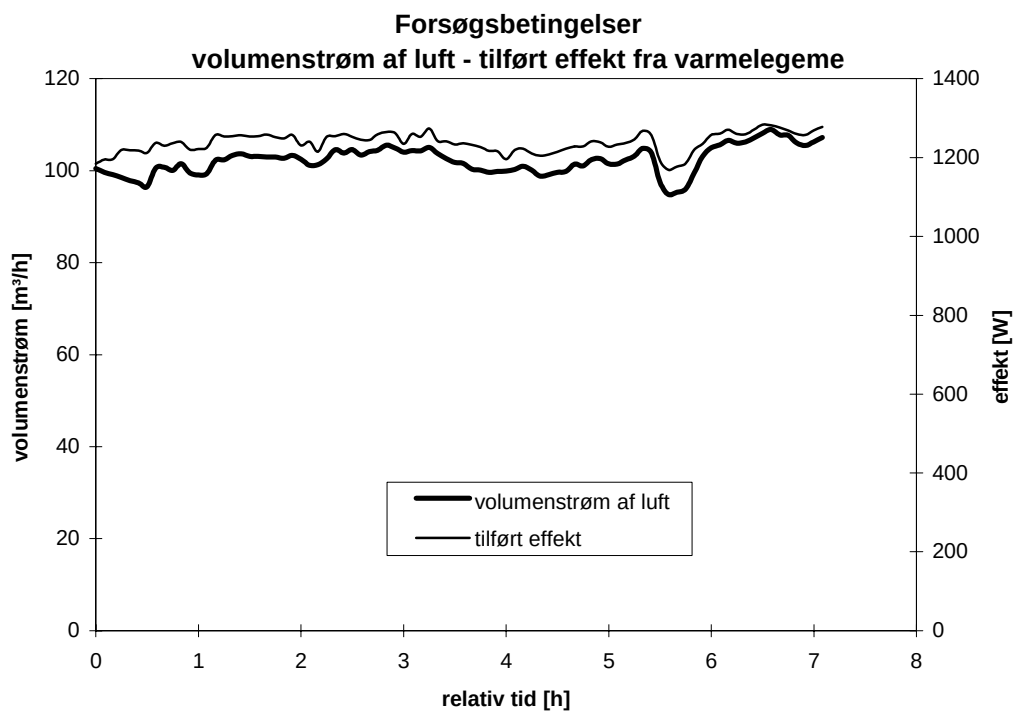
Forsøg nr. 3. 100 m³/h, 1250 W



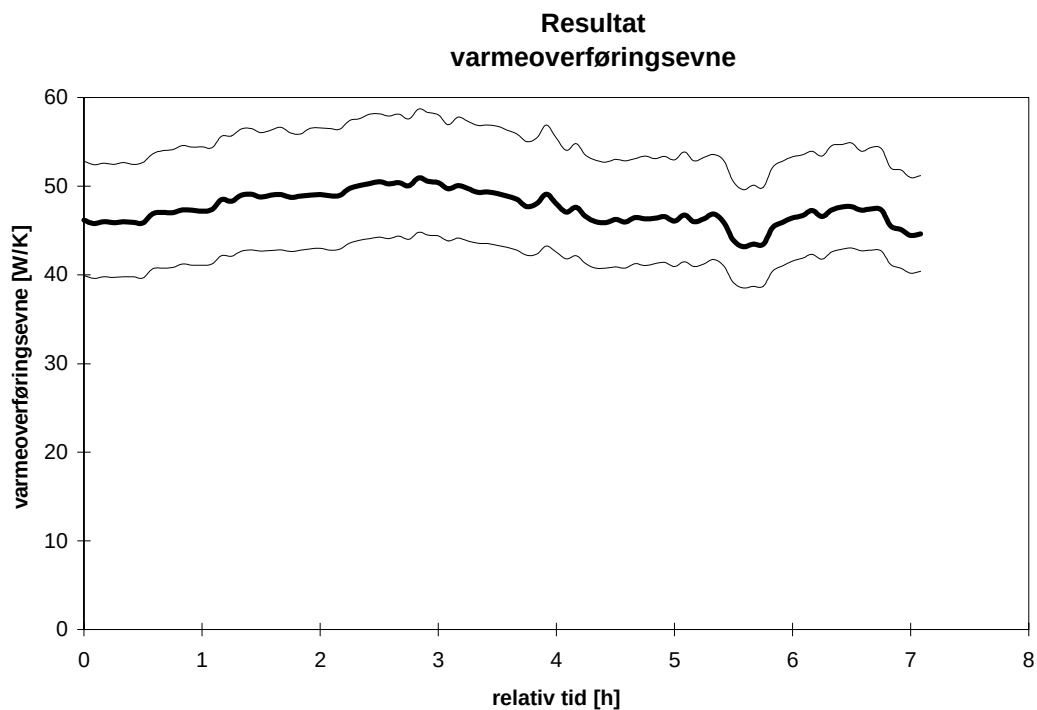
Figur B.9. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.10. Beholdertemperaturer.

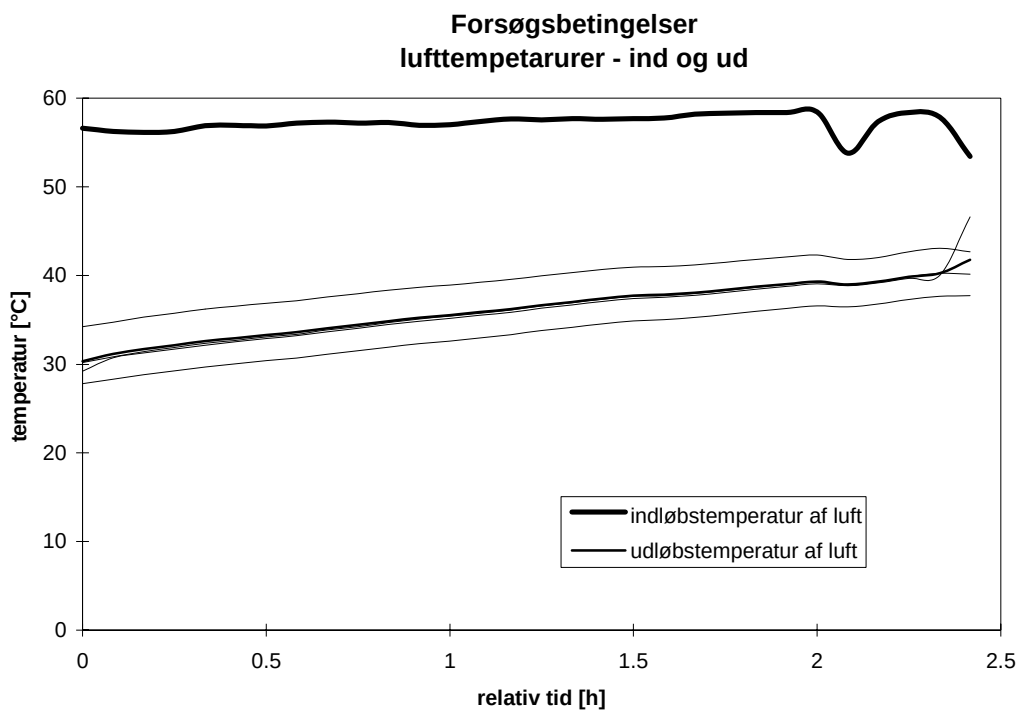


Figur B.11. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

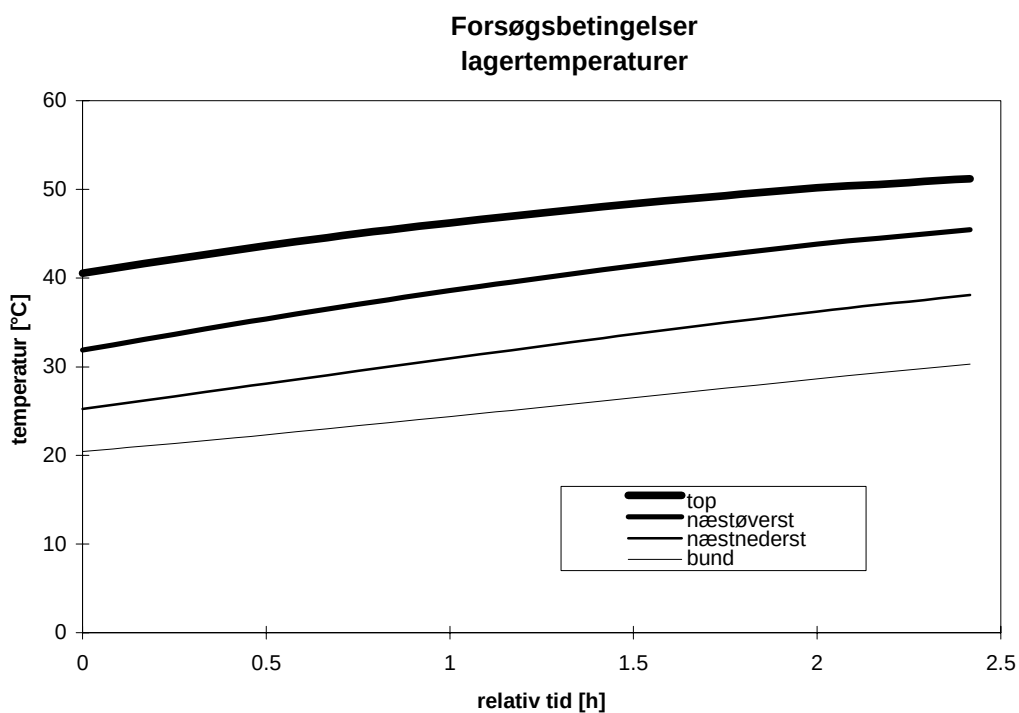


Figur B.12. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

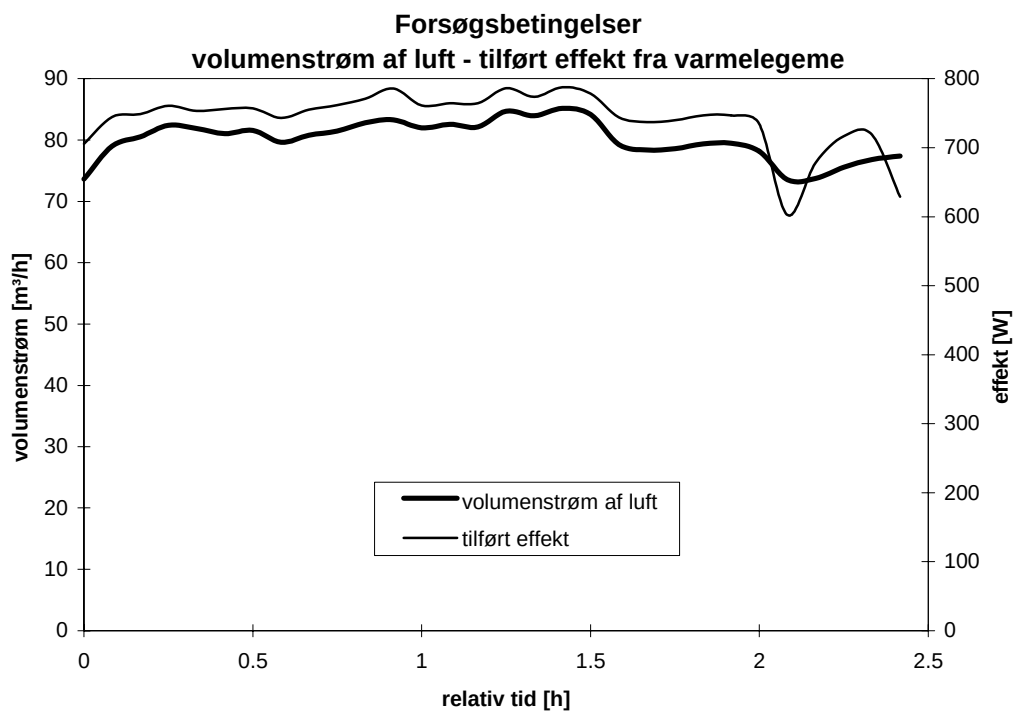
Forsøg nr. 4. 80 m³/h, 750 W



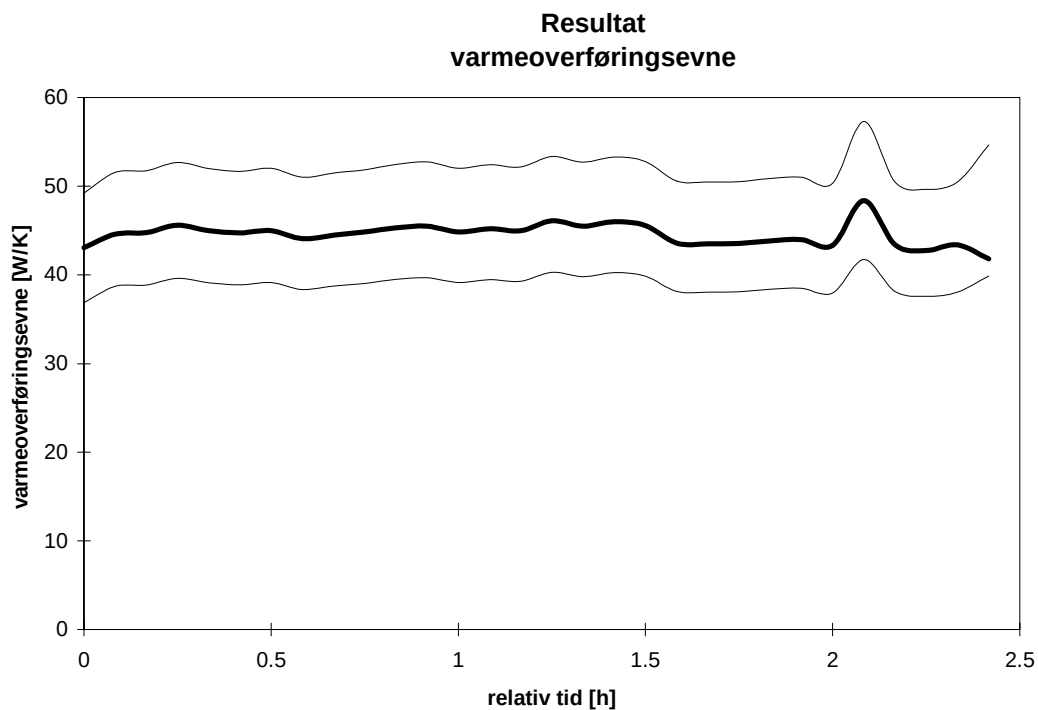
Figur B.13. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.14. Beholdertemperaturer.

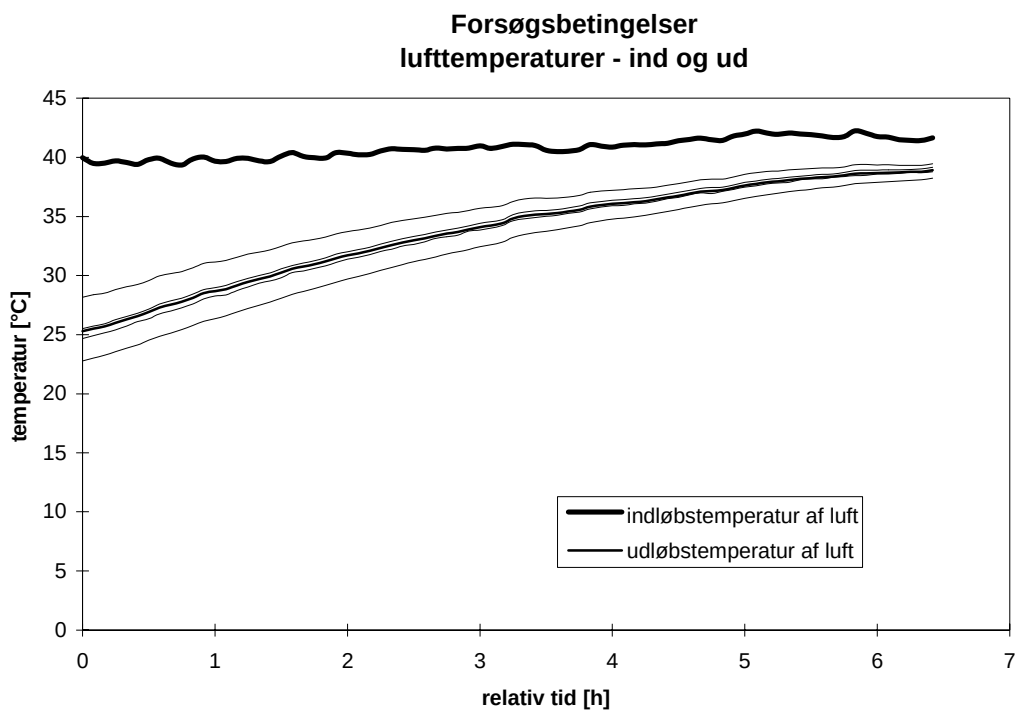


Figur B.15. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

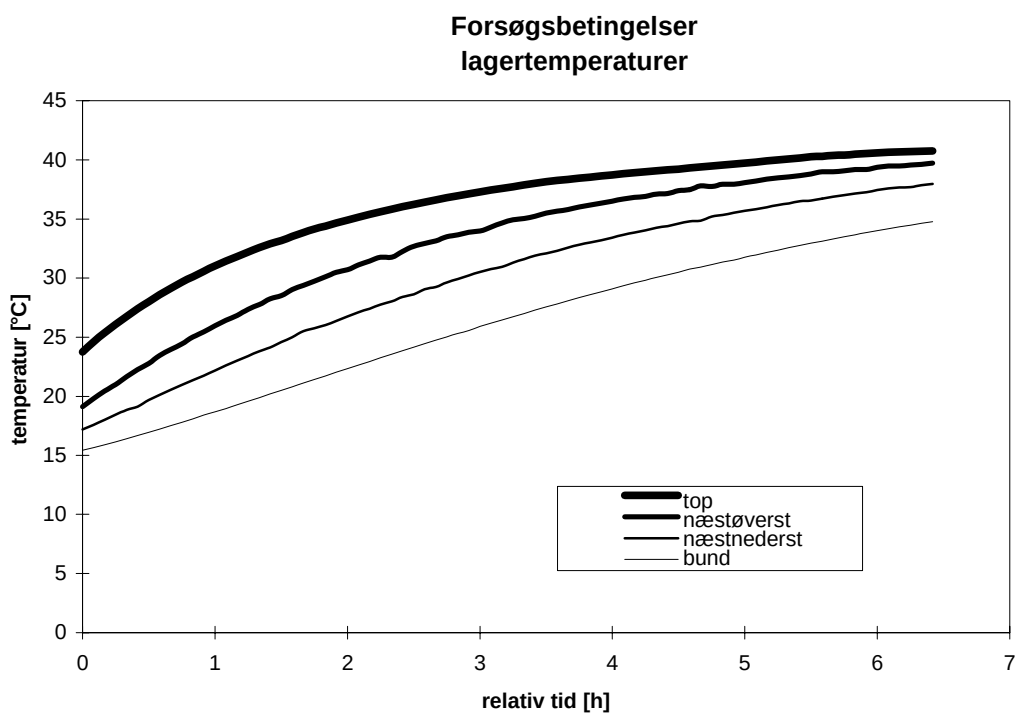


Figur B.16. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

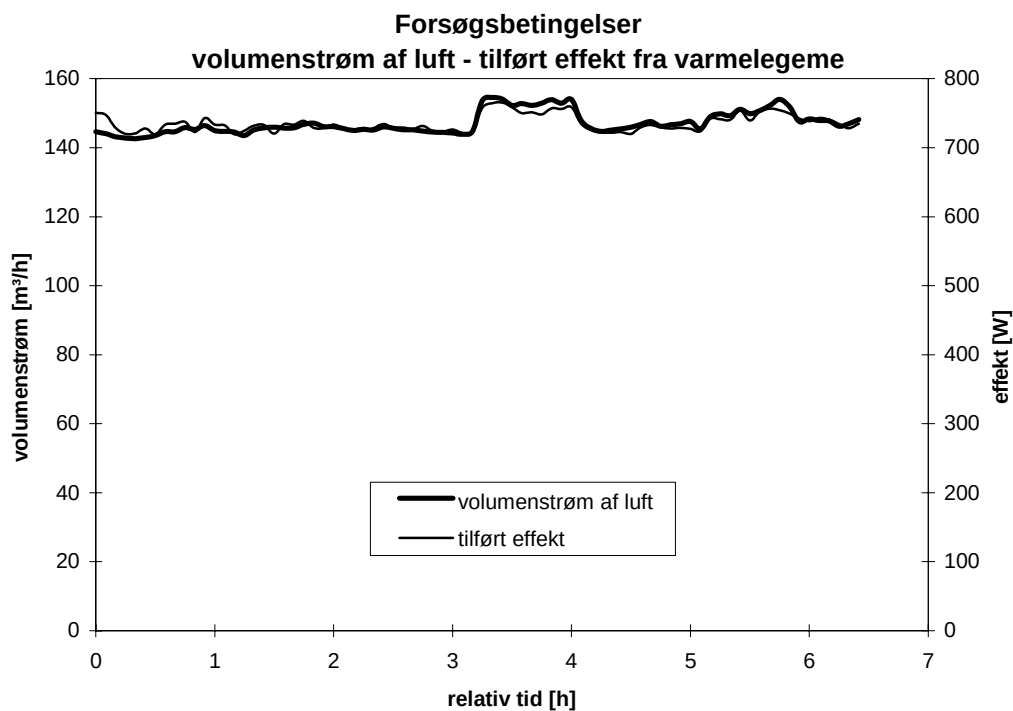
Forsøg nr. 5. 150 m³/h, 750 W



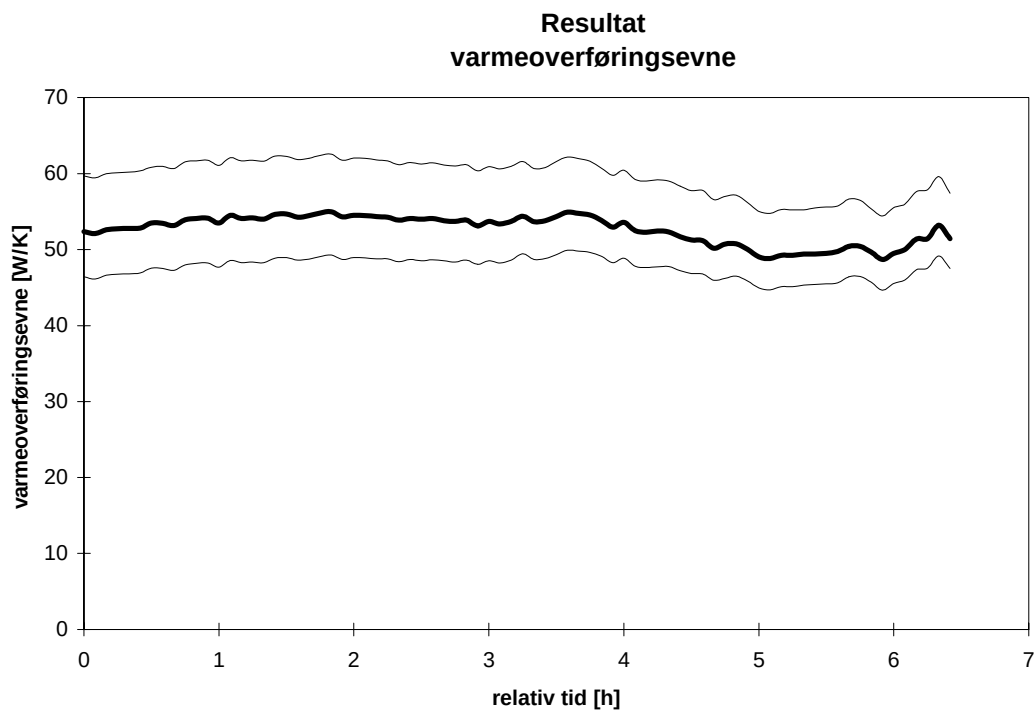
Figur B.17. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.18. Beholdertemperaturer.

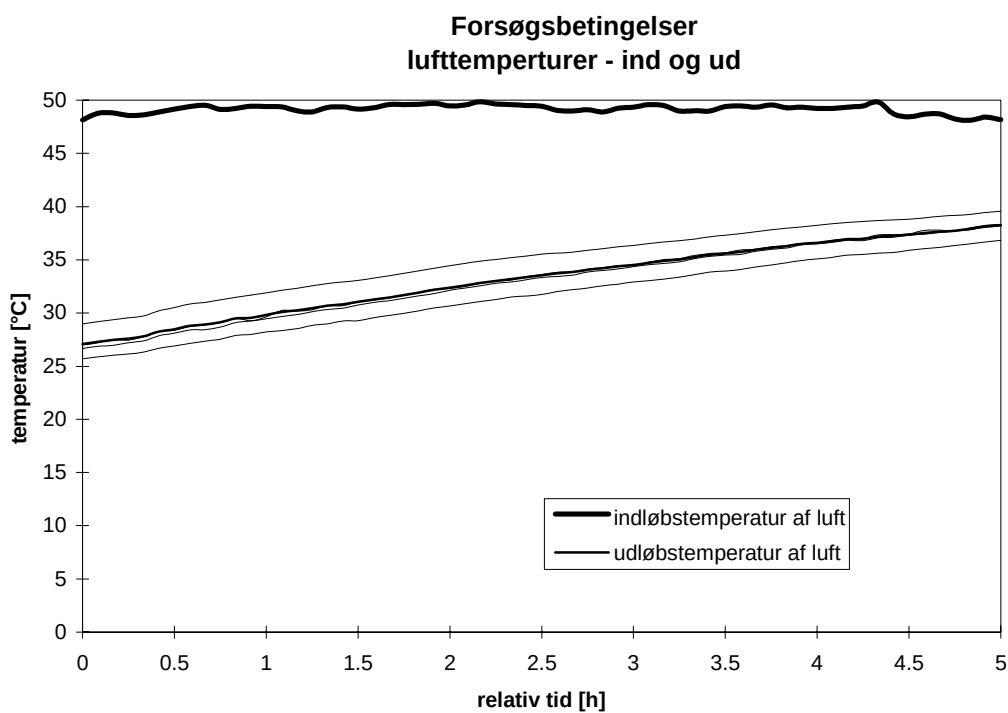


Figur B.19. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

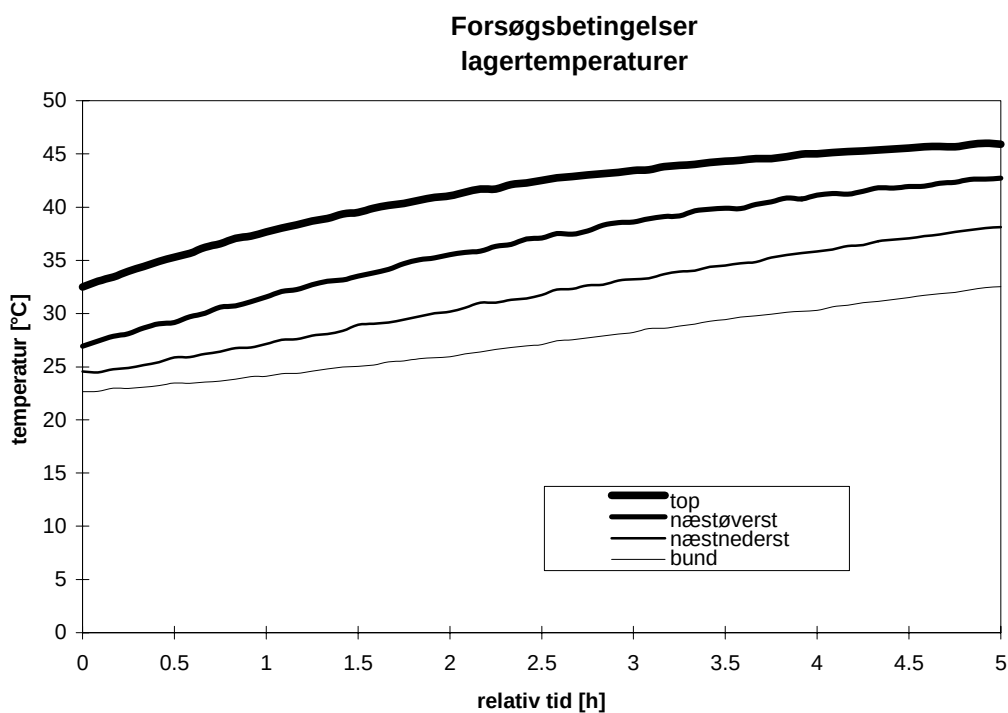


Figur B.20. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

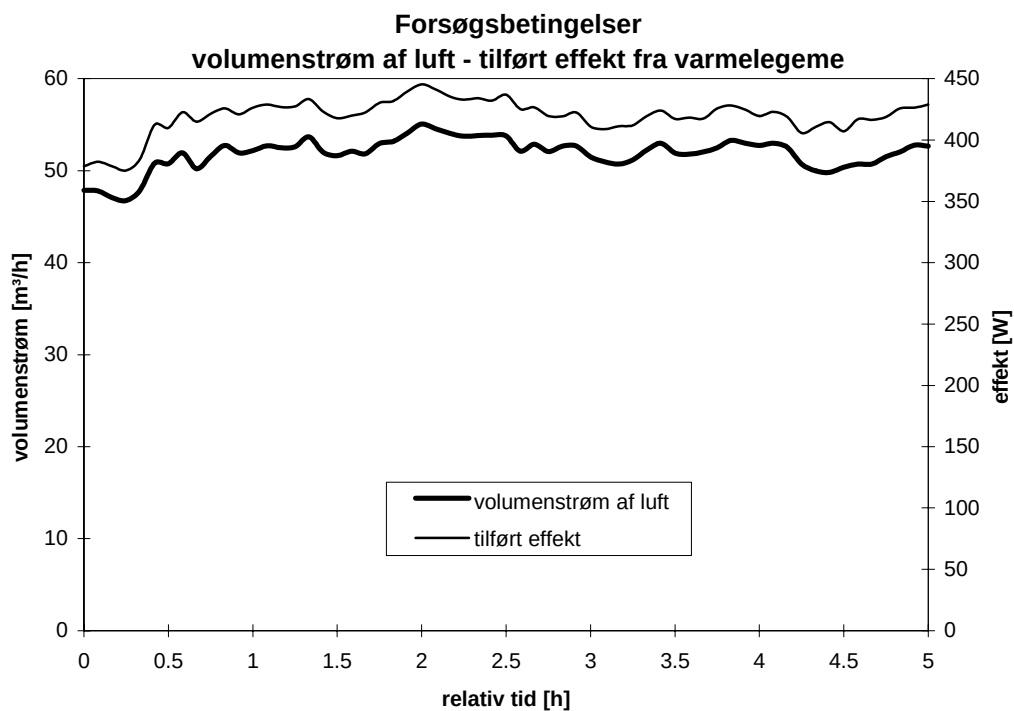
Forsøg nr. 6. 50 m³/h, 49°C



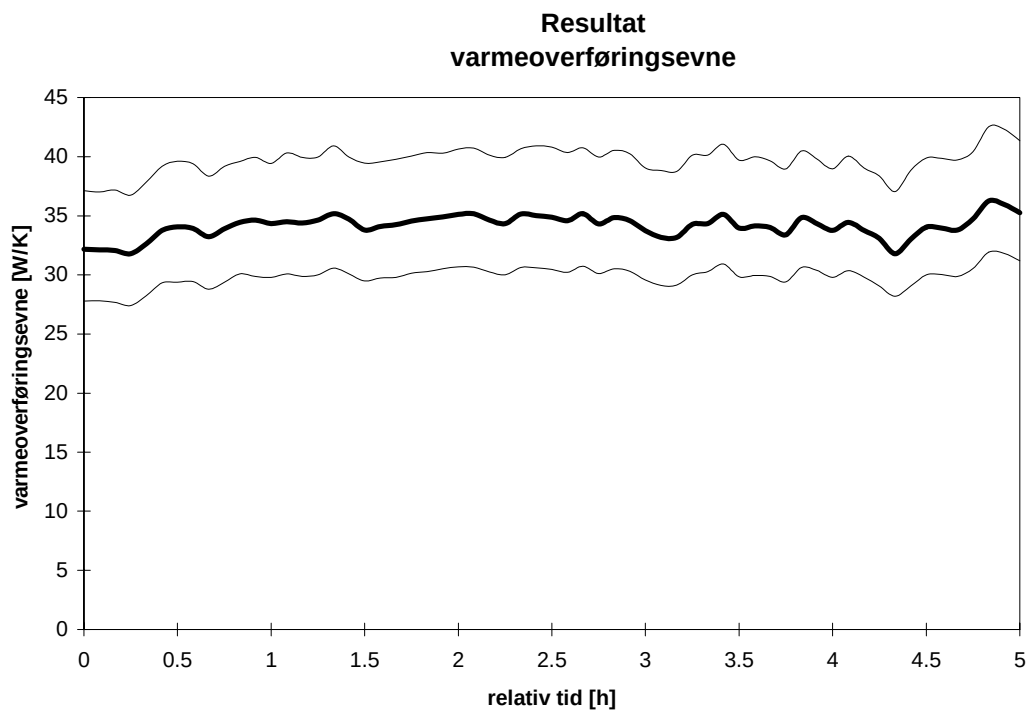
Figur B.21. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.22. Beholdertemperaturer.

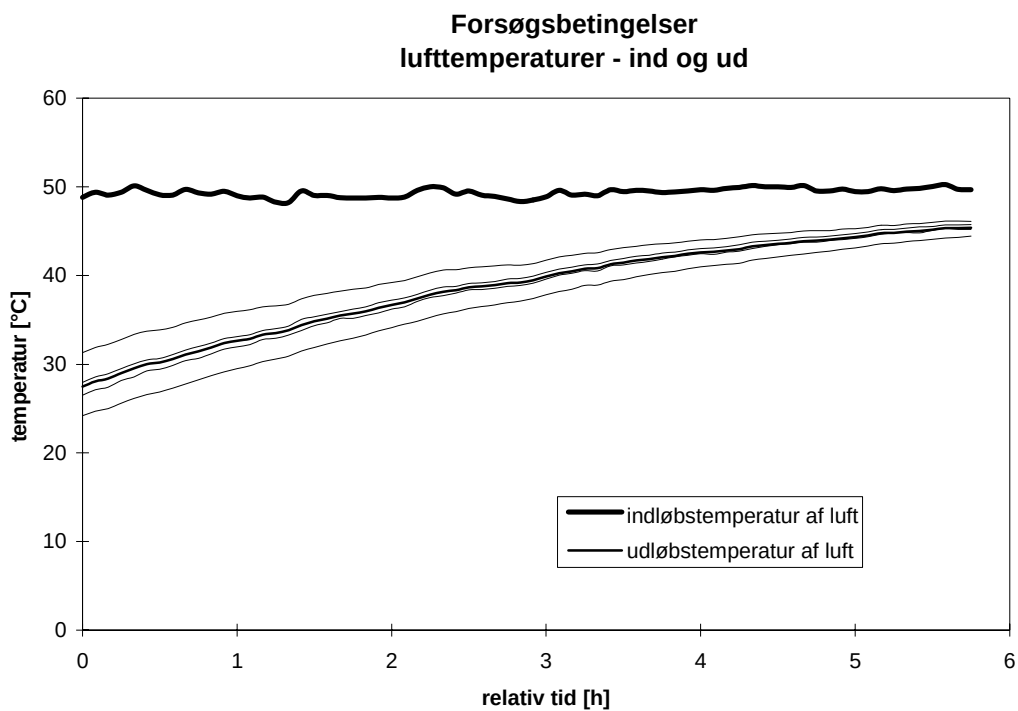


Figur B.23. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

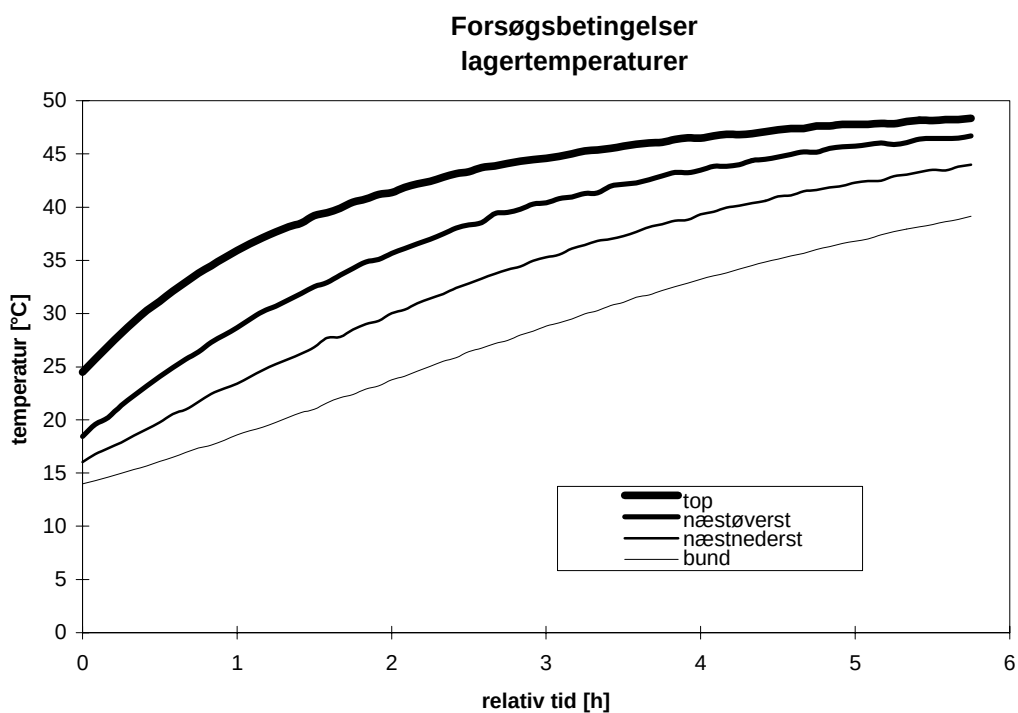


Figur B.24. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

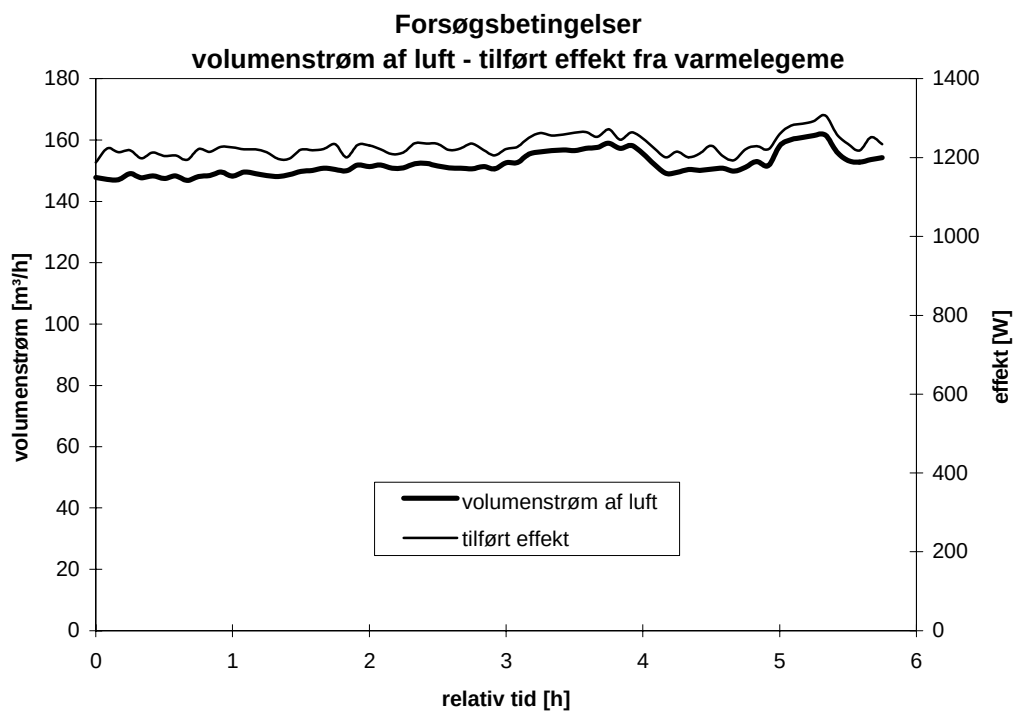
Forsøg nr. 7. 150 m³/h, 49°C



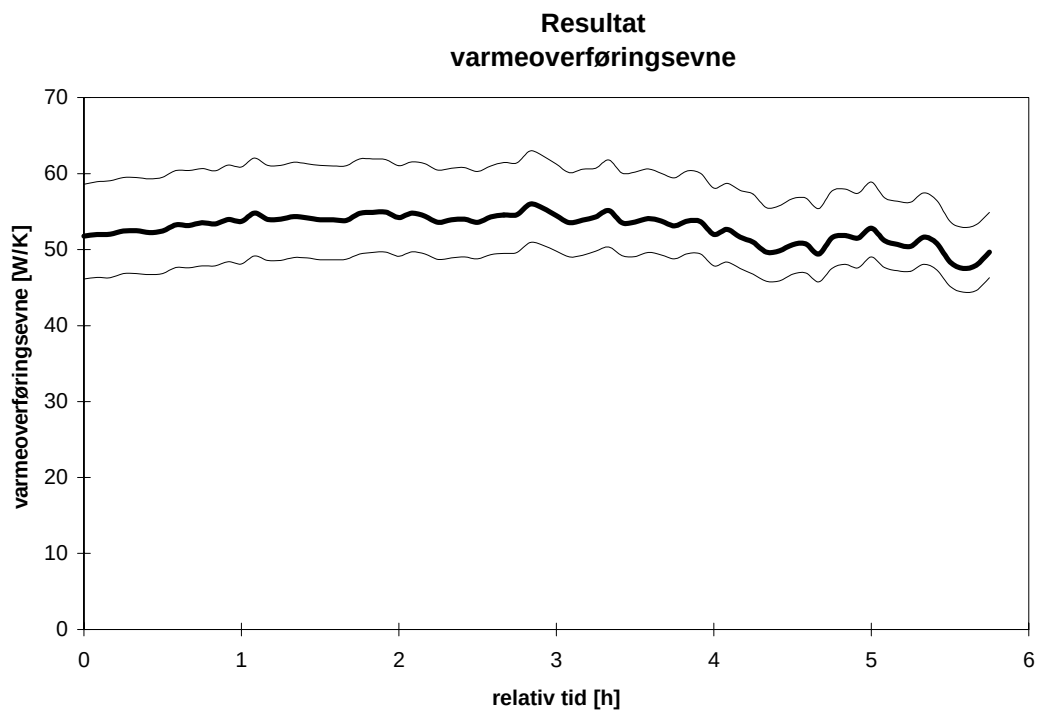
Figur B.25. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.26. Beholdertemperaturer.

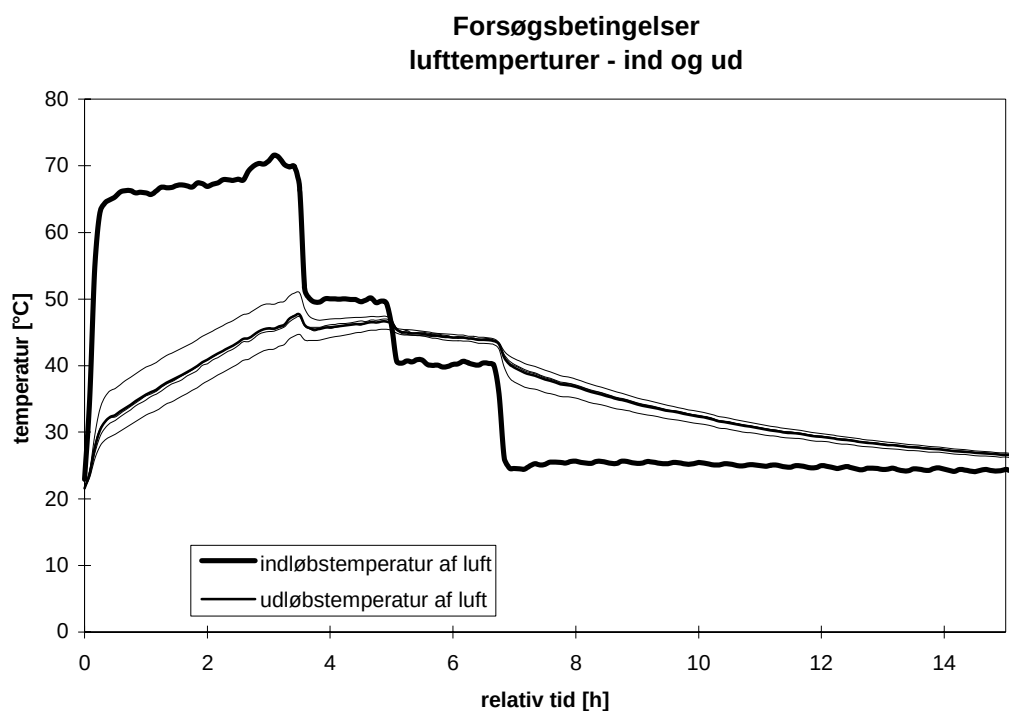


Figur B.27. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.

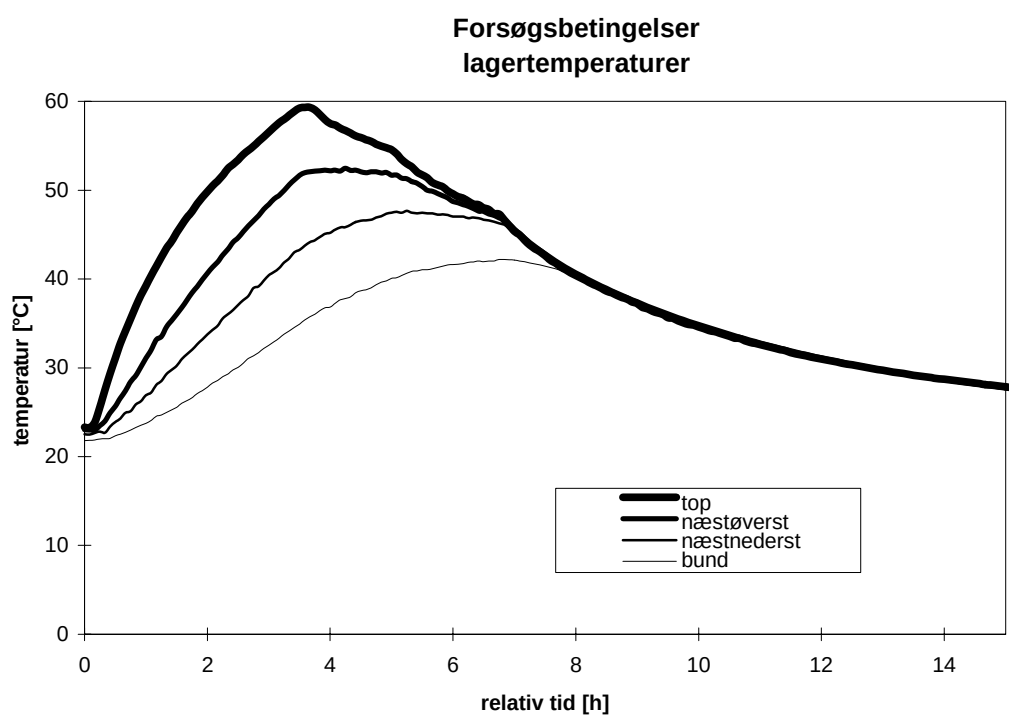


Figur B.28. Varmeoverføringsevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringsevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.

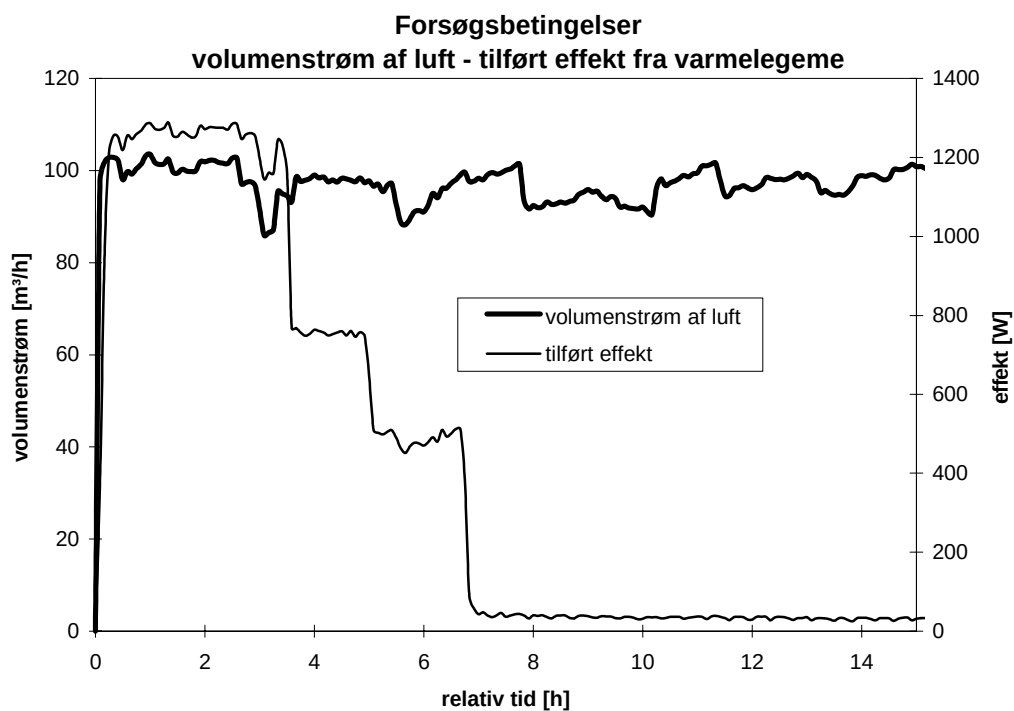
Forsøg nr. 8. 100 m³/h, 60°C→50°C→40°C→rumtemperatur



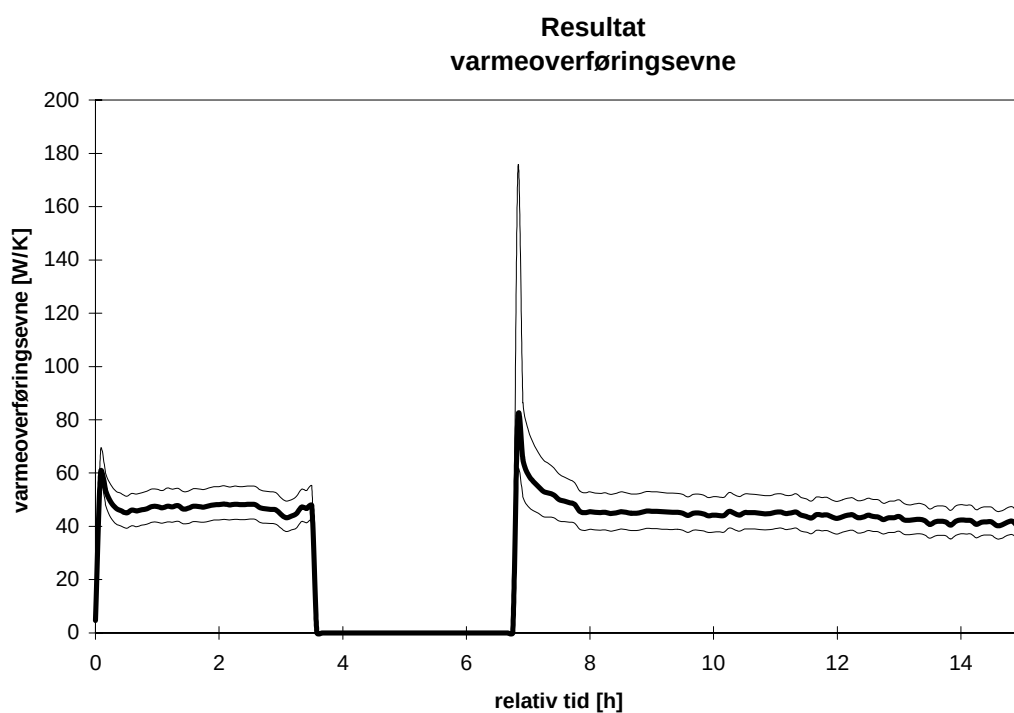
Figur B.29. Luftens indløbstemperatur til beholderen og udløbstemperatur fra beholderen. De tynde streger omkring udløbstemperaturene er de fire målte udløbstemperaturer.



Figur B.30. Beholdertemperaturer.



Figur B.31. Volumenstrømme af luft og effektilførslen fra varmelegemet til beholderen.



Figur B.32. Varmeoverføringssevne. De tynde streger er henholdsvis max.- og min.-værdien for varmeoverføringssevnen beregnet med den laveste og højeste udløbstemperatur af luften fra beholderen.