

DIMENSIONERING AF SOLVARMEANLÆG

AF

LEIF SØNDERSKOV JØRGENSEN

OG

HENRIK LAWÆTZ

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



MEDDELELSE NR. 71.

NOVEMBER 1977

Indhold

	Side
1. <u>Forord</u>	1
2. <u>Resumé</u>	1
3. <u>Generelle beregningsforudsætninger</u>	1
3.1 Solfangeren	1
3.2 Akkumuleringstank og varmtvandsbeholder	3
3.3 Varmebehov	3
4. <u>Solvarmeanlæg til varmt brugsvand</u>	5
4.1 Anlæggets drift	5
4.2 Opstilling af ligninger	5
4.3 Ændring af parametre	10
4.4 Udbytte pr. m ² solfanger	15
4.5 Alternative systemer	19
5. <u>Solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand</u>	29
5.1 Anlæggets drift	29
5.2 Opstilling af ligninger	31
5.3 Ændring af parametre	32
5.4 Udbytte pr. m ² solfanger	33
5.5 Alternative systemer	42
6. <u>Eksempler</u>	47
7. <u>Afsluttende bemærkninger</u>	50
8. <u>Konklusion</u>	50
9. <u>Symbolliste</u>	51
10. <u>Referencer</u>	53

1. Forord

Denne rapport vil helt eller delvis komme til at indgå i en rapport med titlen: "Vejledning i projektering og udførelse af solvarmeanlæg", som forventes udgivet i begyndelsen af 1978.

Denne er en del af et større projekt med titlen: "Opbygning af en videnbank", der er finansieret af Teknologirådet, og denne meddelelse er således også udført med støtte herfra.

2. Resumé

Med Referenceårets vejrdata [1] beregnes to solvarmeanlæg: Et, der kun benyttes til opvarmning af varmt brugsvand, og et, der desuden benyttes til rumopvarmning. Med forbrug, solfangerareal og akkumuleringsvolumen som variable opstilles ligninger til bestemmelse af den årlige dækningsgrad. Betydningen af andre parametre undersøges hver for sig i forhold til et referencesystem. Nogle alternative systemer beregnes, og endelig gives eksempler på dimensionering ved anvendelse af de fundne resultater.

3. Generelle beregningsforudsætninger

3.1 Solfangeren

Med et ved laboratoriet udviklet edb-program simuleres solvarmeanlægget hver halve time med Referenceårets vejrdata. Inden for denne tidsperiode regnes med stationære forhold, dvs. at fx. den beregnede øjeblikkelige ydelse af solfangeren antages at gælde for hele tidsperioden.

Solfangeren består af en kølekanalplade med en almindelig sortmalet overflade. Som dæklag benyttes et eller to lag glas, og bagsiden isoleres med 20 cm mineraluld. Det varmebærende medium er vand, og gennemstrømningshastigheden sættes i alle beregninger til 1,0 liter pr. minut pr. m² solfanger.

Solindfaldet beregnes som anført i [2], hvorefter udbyttet beregnes af formlerne i [3]. Solfangerkredsløbet startes, så snart det er muligt at overføre energi til akkumuleringstanken,

og da varmeoverførslen sker via en varmeveksler, beregnes den akkumulerede energi som beskrevet i [4] .

Absorbatorpladens geometriske udformning er ret gunstig med hensyn til opsamling af solenergi. Dette fremgår af udbytteligheden, der som anført i [5] kan skrives:

$$Q_u = A \cdot F_R \cdot (Q_{\text{abs}} - U_L(T_{\text{ind}} - T_a)) \quad (1)$$

hvor Q_u	er nyttiggjort energi	W
A	er absorbatorareal	m^2
F_R	er total effektivitetsfaktor	ubenævnt
Q_{abs}	er absorberet energi	W/m^2
U_L	er solfangerens varmetabskoefficient	$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
T_{ind}	er indløbstemperatur	$^\circ\text{C}$
T_a	er omgivende temperatur	$^\circ\text{C}$

Man finder nemlig, at for en solfanger med en hældning på 45 grader fra vandret og med den omtalte vandgennemstrømning, at de totale effektivitetsfaktorer F_R er henholdsvis:

$$1 \text{ lag glas: } F_R = 0,93$$

$$2 \text{ lag glas: } F_R = 0,96$$

Dette gælder dog kun med følgende forudsætninger:

$$\text{Indløbstemperatur } T_{\text{ind}} = 50^\circ \text{ C}$$

$$\text{Udelufttemperatur } T_a = 10^\circ \text{ C}$$

$$\text{Vindhastighed} = 5 \text{ m/s}$$

og når der benyttes de i [6] angivne ligninger til beregning af F_R og varmetabskoefficienterne U_L . Ved andre temperaturniveauer vil man finde andre værdier for F_R , men variationerne fra de her angivne vil være relativt små og ligge inden for $\pm 2\%$, så F_R kan med tilnærmelse siges at være konstant.

Ved beregningerne af varmeoverførsel fra solfangeren ses der bort fra varmetab i rørføringer samt fra varmekapacitet i solfangeren.

3.2 Akkumuleringstank og varmtvandsbeholder

De to tanke regnes at være cirkulærcylindriske med længde lig med to gange diameter. Der regnes med fuld opblanding, således at der kan ses bort fra en evt. temperaturforskel mellem top og bund.

Varmtvandsbeholderens volumen er sat til 200 liter i alle beregninger.

3.3 Varmebehov

Til solvarmeanlæg, der skal dække en del af rumopvarmningsbehovet, benyttes varmebehov for 3 huse med forskellige isoleeringsgrader. Husenes varmebehov er beregnet for hver halve time med edb-programmet BA4 [7] på grundlag af Referenceårets vejrdato. De nærmere forudsætninger og beregningsresultater er beskrevet i [8], så her skal blot anføres hoveddata:

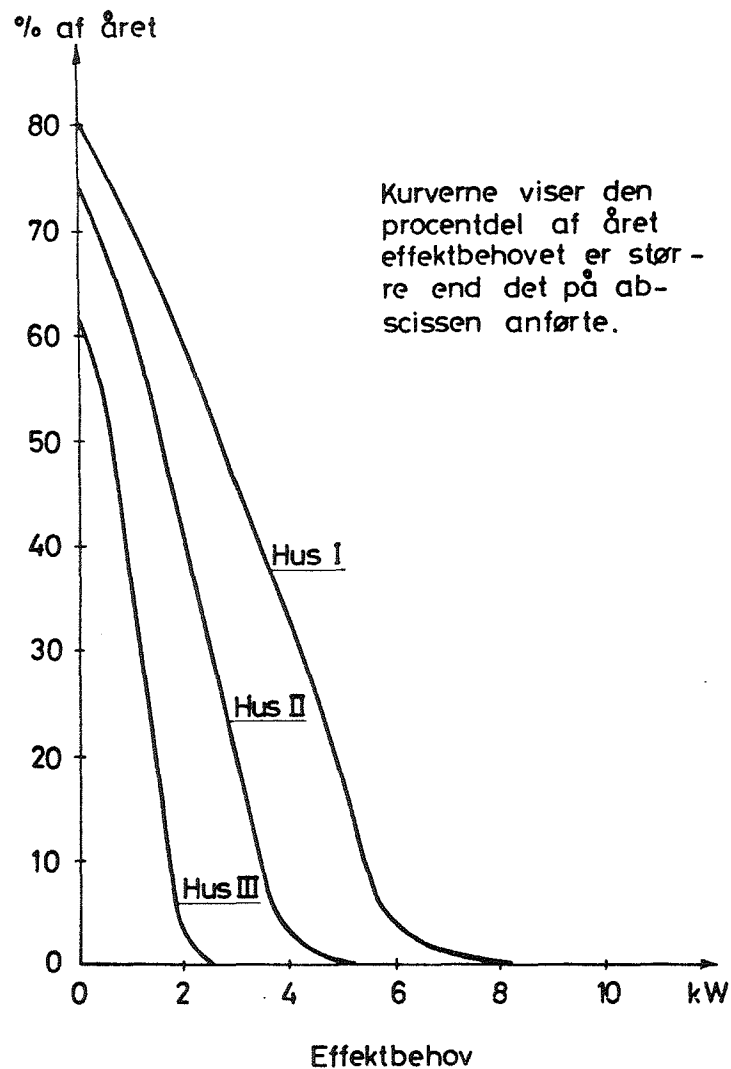
Hustype	Dimensionerende Varmetab W	Årligt varmebehov til rumopvarmning kWh
Hus I	9500	23700
Hus II	6100	14000
Hus III	3700	6200

Tabel 1.

De anførte varmebehov er netto varmebehov og derfor uafhængige af varmesystemets nyttevirkning. Hus I svarer således til et almindeligt hus fra begyndelsen af 1970'erne, mens hus II regnes udført efter BR 77, og hus III er isoleret svarende til et lavenergihus. På figur 1 er optegnet fordelingskurverne for de 3 huses effektbehov.

Rumopvarmningen regnes i alle tilfælde at ske i et radiatoranlæg med vand som varmbærende medium. Beregninger af nødven-

Fordelingskurver for de
3 huses effektbehov



Figur 1.

dige temperaturer og vandmængder, når dimensioneringstilstanden kendes, sker ud fra de i [9] angivne formler.

Varmtvandsforbruget regnes at være ens hver dag. Der benyttes det på figur 2 viste tappeprogram, hvor ordinaten angiver, hvor mange enheder der tappes. Ved halvtimberegninger indeholder figuren 84 enheder, dvs. der fx. 7.30 - 8.00 tappes 5/84 af det totale døgnforbrug. Tappingen regnes at ske øjeblikkeligt ved tidsperiodens start.

4. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand

4.1 Anlæggets drift

Det valgte anlæg er skitseret på figur 3. Det kolde brugsvand opvarmes i akkumuleringstanken. Da man i perioder således ikke kan opnå den ønskede brugsvandstemperatur, er det nødvendigt med supplerende opvarmning fx. i en traditionel olieopvarmet varmtvandsbeholder. I sommerperioden er temperaturen i beholderen ofte højere end brugsvandstemperaturen, og der blandes derfor op med koldt vand mellem beholderen og tapstederne.

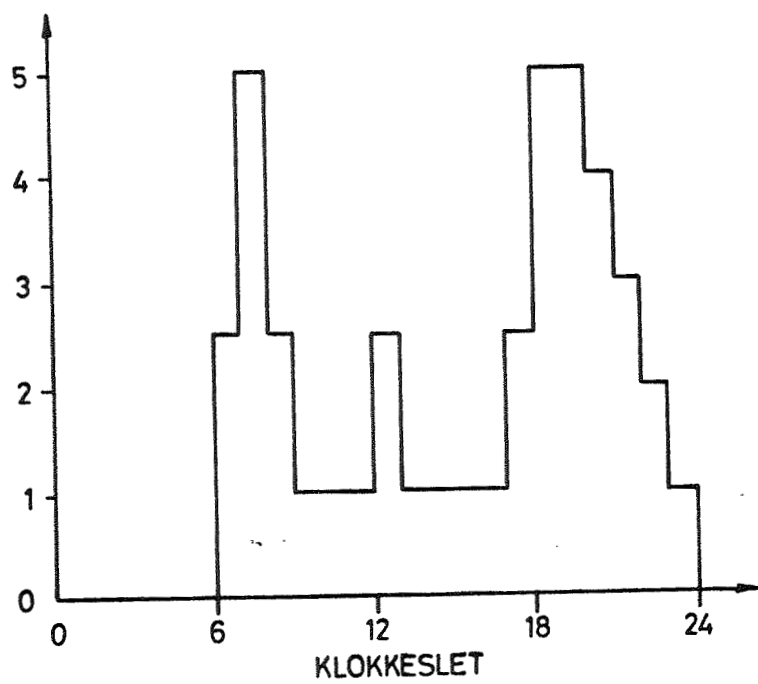
4.2 Opstilling af ligninger

Foruden de i afsnit 3 nævnte fastholdes følgende parametre:

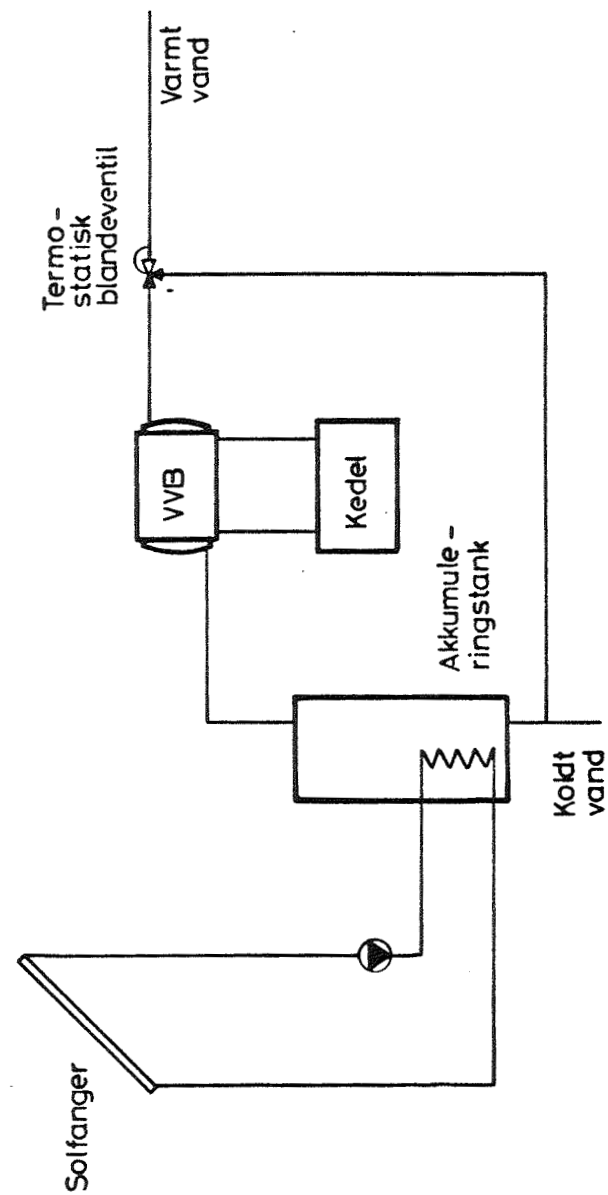
Komponent	Parameter	Fastholdt værdi
Solfanger	hældning azimut	45 grader 0 grader
Varmeveksler	$k \cdot A_H$	50 W/°C pr. m ² solfanger
Akkumulerings- ringstank og Varmtvands- beholder	isoleringstykkelse omgivende temperatur max. tilladelig temp.	0,10 m 20° C 95° C
Brugsvand	indløbstemperatur brugstemperatur	10° C 50° C

Tabel 2

Tappeprogram for varmtvands-
forbruget (relativ fordeling)



Figur 2



Figur 3 Anlæg til varmt brugsvand
System A

Varmevekslerens effektivitet kan beregnes af ligningen

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{k \cdot A_H}{m \cdot C_p}} \quad (2)$$

hvor k er varmevekslerens transmissionskoefficient $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_H er " hedeflade m^2

m er masseflow kg/s

C_p er vands varmekapacitet $J/kg \cdot ^\circ C$

Indsættes de angivne værdier, fås en varmevekslereffektivitet på 51%.

De øvrige parametre varieres mellem nedenstående grænser, der derved bliver ligningernes gyldighedsområde:

$$2,5 \leq A \leq 20 \text{ m}^2$$

$$20 \leq V/A \leq 160 \text{ liter pr. m}^2 \text{ solfanger}$$

$$10 < F < 50 \text{ kWh/døgn}$$

$$0,5 \leq F/A \leq 5 \text{ kWh/døgn pr. m}^2 \text{ solfanger}$$

hvor A er absorberareal m^2

V er tankvolumen $liter$

F er konstant dagligt forbrug $kWh/døgn$

Beregninger med A og F uden for de nævnte grænser viser, at hvis den øvre grænse for F udelades, angiver ulighederne ligningernes gyldighedsområde.

Til F medregnes varmetabet fra varmtvandsbeholderen, der er ca. $0,95 \text{ kWh/døgn}$. Er forbruget L liter/døgn opvarmet $10 - 50^\circ C$, kan F beregnes af ligningen

$$F = 0,95 + 0,0463 \cdot L \quad (3)$$

Denne kurve er vist på figur 4.

Det viste sig hensigtsmæssigt at betragte de to tilfælde med henholdsvis et og to dæklag af glas hver for sig, og ud fra den antagelse, at konstante værdier af forholdene F/A og V/A giver samme dækningsgrad, søges denne udtrykt ved en ligning af formen:

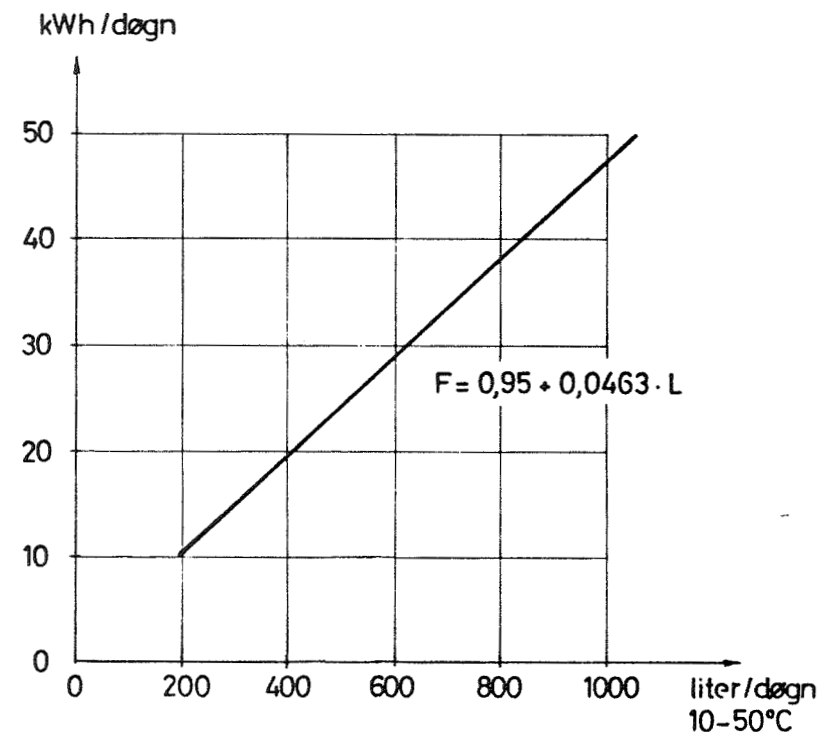
$$D = C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^{C_3} + C_4 \left(\frac{V}{A}\right)^{C_5} \quad (4)$$

hvor D er dækningsgraden i % og $C_1 - C_5$ er konstanter.

Beregning af F

L = forbrug i liter/døgn

F = forbrug i kWh/døgn



Figur 4.

Ved en regressionsanalyse findes konstanterne C_1 - C_5 , hvorefter ligningerne kan skrives:

$$1 \text{ dæklag: } D = 309 - 241 \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^{0,09} - 750 \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^{-1,6} \quad (5)$$

$$2 \text{ dæklag: } D = 175 - 99,3 \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^{0,23} - 740 \left(\frac{V}{A}\right)^{-1,7} \quad (6)$$

Figur 5 viser forskellen mellem edb-beregnete og tilnærmede dækningsgrad som funktion af sidstnævnte. Afvigelserne ses i alle tilfælde at være meget små.

På figur 6 er optegnet dækningsgraden som funktion af F/A for $V/A = 80 \text{ liter/m}^2$.

4.3 Ændring af parametre

Af de i forrige afsnit beregnede systemer udvælges et referencesystem med ét dæklag, hvor de variable parametre i ligning (5) har følgende værdier:

$$A = 10 \text{ m}^2$$

$$V = 800 \text{ liter}$$

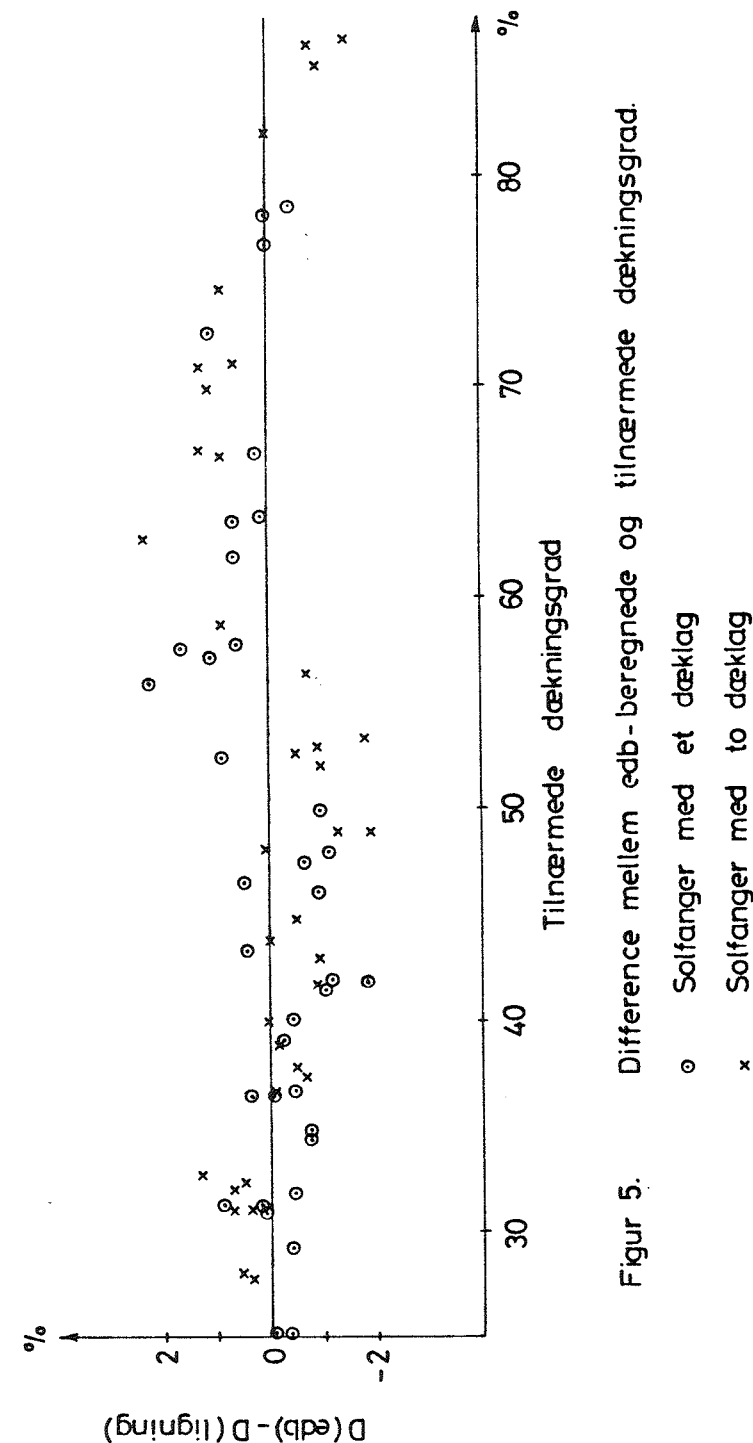
$$F = 12 \text{ kWh/døgn (incl. tab fra VVB)}$$

På figur 7 og 8 er dette systems dækningsgrad henholdsvis tanktemperatur optegnet på grundlag af døgnmiddelværdier. Kurverne viser, at der kan forekomme store udsving selv inden for korte perioder. Der ses dog alligevel en tydelig variation over året med de største værdier i sommerhalvåret.

En del af de i afsnit 4.2 fastholdte parametre ændres nu hver for sig i forhold til referencesystemet. Resultatet af disse beregninger er vist på figur 9 - 14.

Figur 9: Solfangerhældning

Optimal hældning er ca. 60° fra vandret, men for værdier inden for intervallet 40° - 75° falder dækningsgraden kun 2% i forhold til maximum.

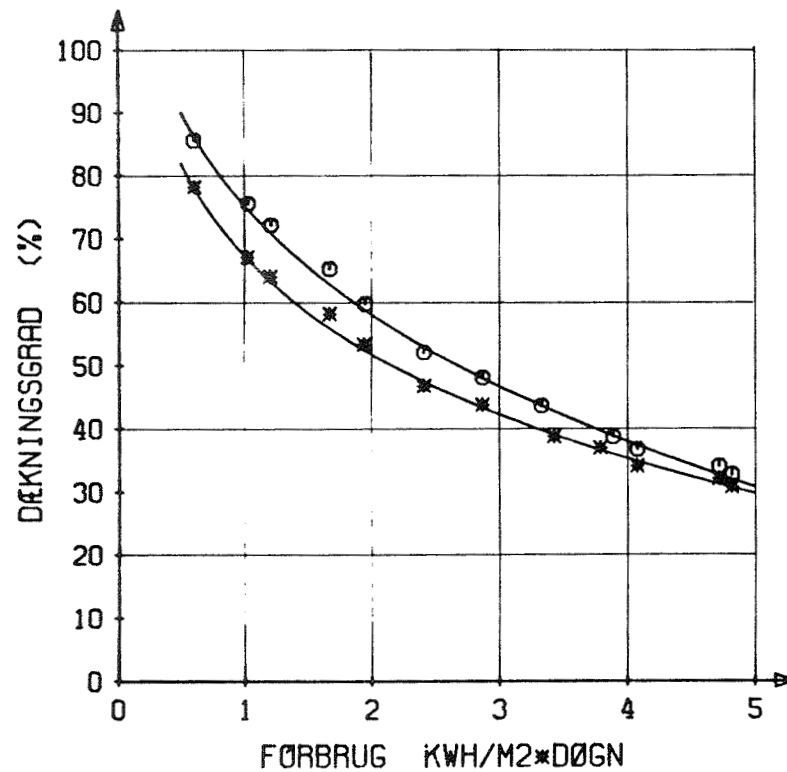


Figur 5. Difference mellem edb-beregnete og tilnærmede dækningsgrad.

○ Solfanger med et dæklag
x Solfanger med to dæklag

TILNÆRMEDE KURVER

DE MARKEREDE PUNKTER ER EDB-BEREGNEDE -
KURVERNE ER FUNDET VED REGRESSIONSANALYSE
SØLFANGERHÆLDNING: 45 GRADER
TANKVOLUMEN: 80 LITER PR. M2 SØLFANGER



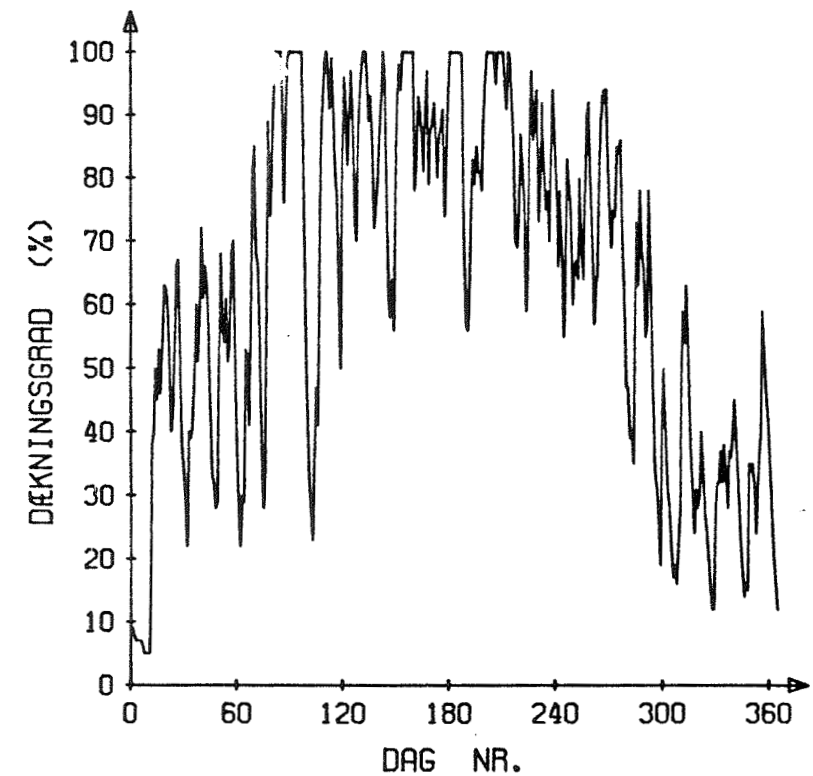
* - 1 DÆKLAG AF GLAS

○ - 2 DÆKLAG AF GLAS

FIGUR 6 ANLÆG TIL VARMT BRUGSVAND
SYSTEM A

REFERENCESYSTEMET - DÆKNINGSGRAD

SØLFANGER: 10 M2, 1 DÆKLAG
HÆLDNING = 45 GRADER
TANKVOLUMEN: 800 LITER
FØRBRUG: 12 KWH/DØGN

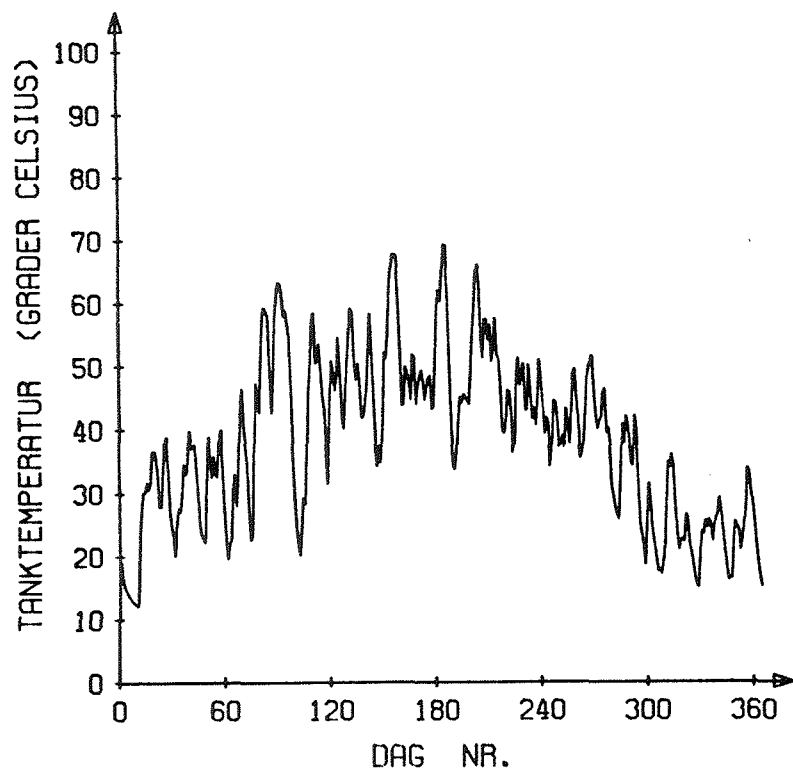


DØGNMIDDELVÆRDIER AF DÆKNINGSGRADEN
ÅRSGENNEMSNIT = 64 %

FIGUR 7 ANLÆG TIL VARMT BRUGSVAND.
SYSTEM A

REFERENCESYSTEMET - TANKTEMPERATUR

SØLFANGER: 10 M², 1 DÆKLAG
 HÆLDNING = 45 GRADER
 TANKVOLUMEN: 800 LITER
 FORBRUG: 12 KWH/DØGN



DØGNMIDDELVÆRDIER AF TANKTEMPERATUREN

FIGUR 8 ANLÆG TIL VARMT BRUGSVAND.
 SYSTEM A.

Figur 10. Solfangerazimut

Kurven afhænger af solfangerhældningen - er solfangeren vandret, er azimut således uden betydning. For referencesystemet med værdier af azimut inden for intervallet $\pm 30^\circ$ falder dækningsgraden kun 2%.

Figur 11. Tankisolering

Ved 20°C som omgivende temperatur er stigningen i dækningsgraden, når isoleringstykkelsen øges fra 0,10 til 0,20 m, kun 3%.

Figur 12. Omgivende temperatur

Kurven viser sig at være en ret linie med 2% stigning i dækningsgraden for hver 5°C højere temperatur.

Figur 13. Varmeveksler

For faldende værdier af effektiviteten sker der et brat fald i dækningsgraden. Dette skyldes, at for at overføre den absorberede solenergi kræves en stor temperaturforskel. Derved kommer solfangerens driftstemperatur til at ligge på så højt et niveau, at udbyttet på grund af det større tab forringes væsentligt.

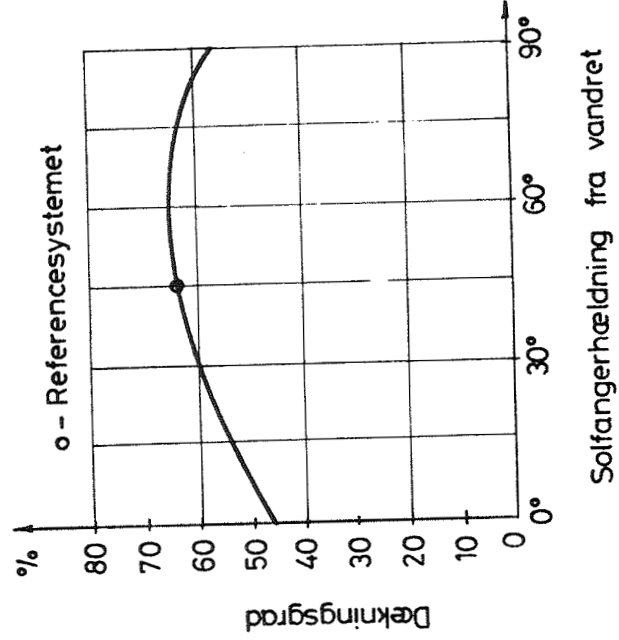
Figur 14. Brugsvandstemperatur

Det varme brugsvand bør altid tappes med lavest mulig temperatur. Kan man fx. nøjes med 40°C i stedet for 50°C , kan stigningen i dækningsgrad aflæses til ca. 8%.

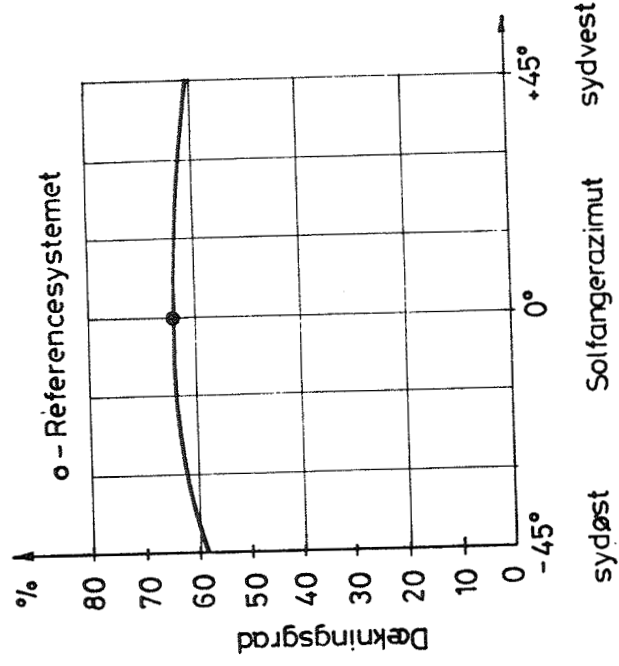
4.4 Udbytte pr. m² solfanger

Størrelsen af solfangeren er ofte bestemt af pladsforhold, økonomi eller ønske om en bestemt dækningsgrad. Man bør dog være opmærksom på, at for fastholdt forbrug falder udbyttet pr. m² solfanger, når dennes areal øges. Dette belyses med et eksempel.

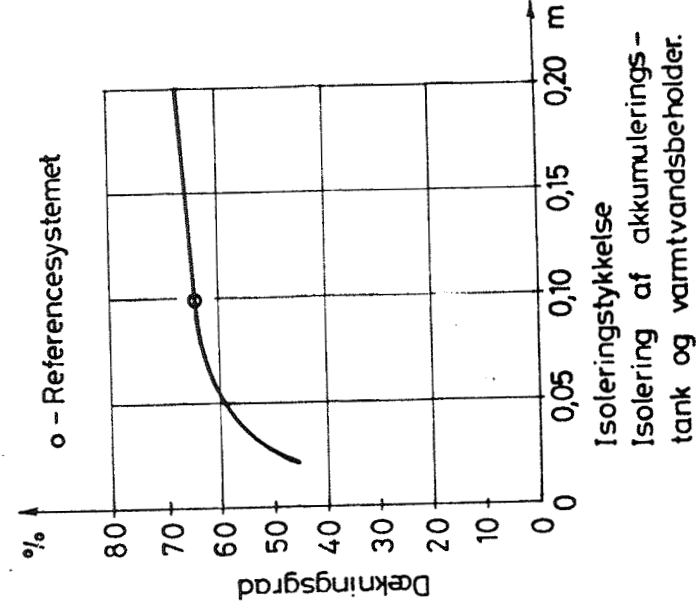
Er forbruget 300 liter/døgn opvarmet $10 - 50^\circ\text{C}$, findes F af ligning (3) til 14,8 kWh/døgn, hvilket svarer til 5400 kWh/år. Beregnes dækningsgraden af ligning (5) for $V/A = 80\text{ l/m}^2$, kan udbyttet pr. m² for varierende solfangerareal bestemmes. Resultatet



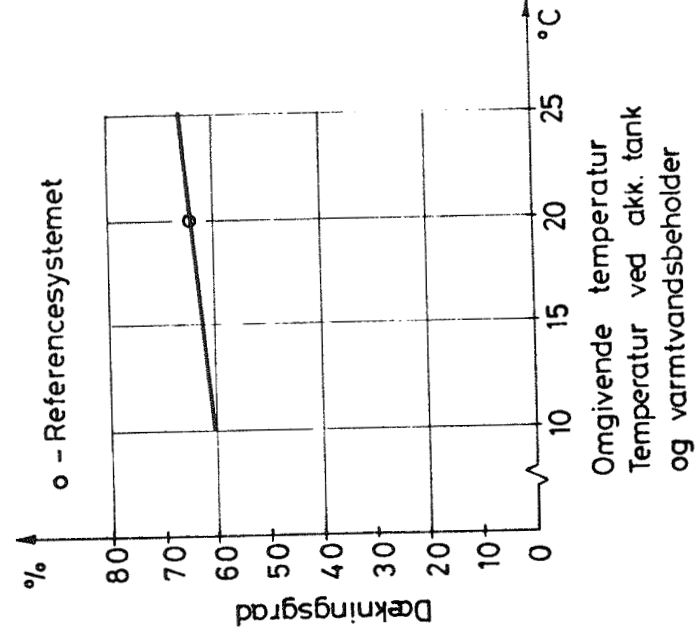
Figur 9



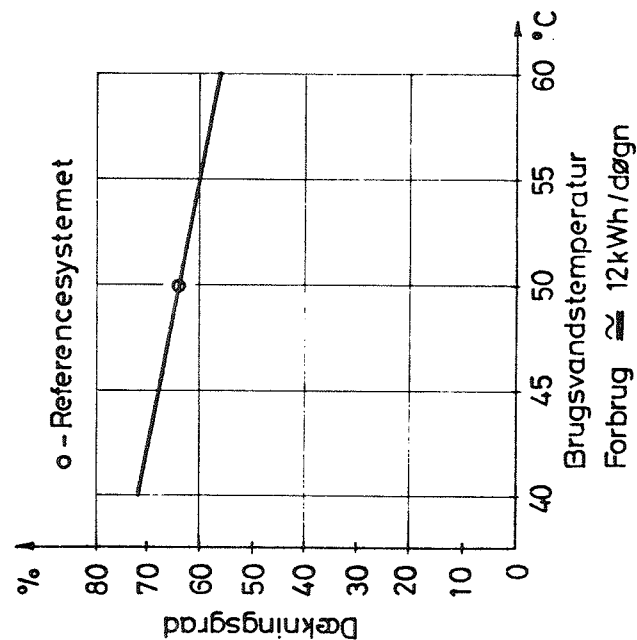
Figur 10



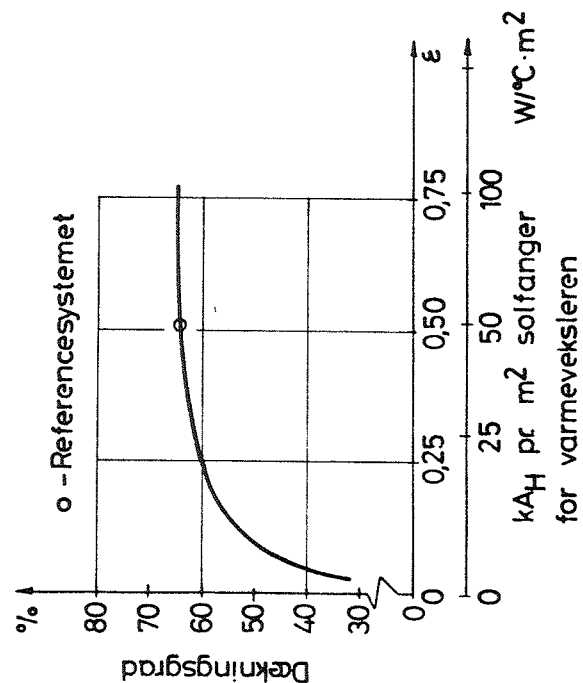
Figur 11.



Figur 12.



Figur 14.



Figur 13.

tatet er vist på figur 15, hvor udbyttet i $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{år}$ er angivet som funktion af A og F/A.

Af kurven kan aflæses værdierne for $A = 5, 10, 15$ og 20 m^2 :

A m^2	Udbytte $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{år}$	Totalt udbytte kWh/år
5	460	2300
10	315	3150
15	245	3675
20	200	4000

Tabel 3. Solfangerudbytte.

De første 5 m^2 giver altså $460 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$, mens de sidste 5, når arealet øges fra 15 til 20 m^2 , kun giver $65 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$.

4.5 Alternative systemer

System A forsynes med en varmeveksler til opvarmning af brugsvandet. En principskitse for dette anlæg B, er vist på figur 16.

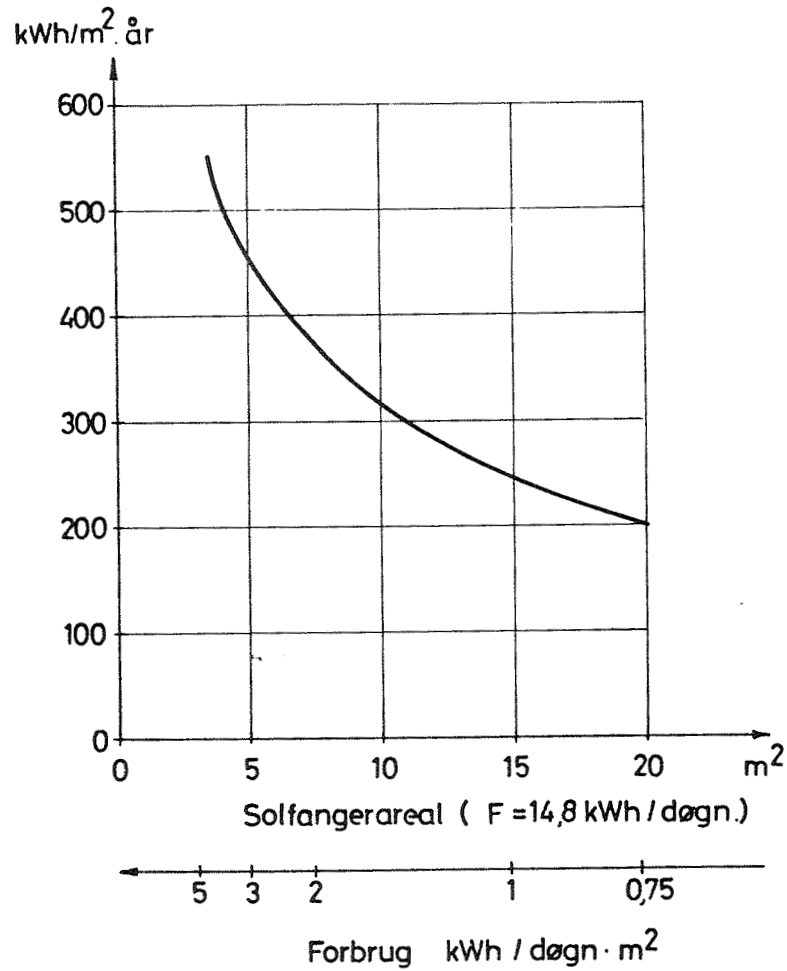
System B giver mindre dækningsgrad end system A - til gengæld behøver akkumuleringsstanken ikke længere være en trykbeholder. Figur 17 viser dækningsgraden som funktion af solfangerarealet og varmevekslerens effektivitet, der er beregnet ud fra ligning (2). Tappehastigheden er sat til 0,25 liter pr. sekund svarende til ét tapsted. Kurverne skal derfor tages med forbehold, da tappehastigheden kan variere meget. Desuden vil den vandmængde, der står i varmeveksleren, ofte kunne tappes ved en temperatur lig med tanktemperaturen.

I system B kan varmetabet fra varmtvandsbeholderen ikke dækkes. Dette kan fx. opnås med den i system C på figur 18 skitse-rede cirkulation af brugsvandet, der startes når akkumulerings-

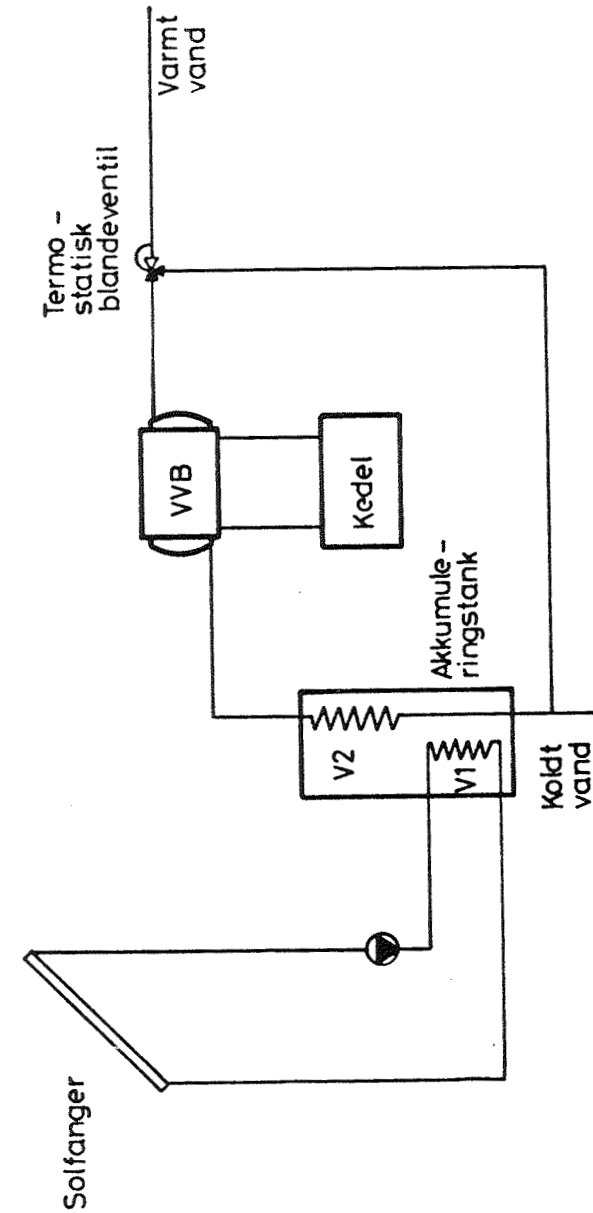
Udbytte pr. m² solfanger.

Solfanger : 1 dæklag, 45°

Tankvolumen : 80 liter / m²



Figur 15 Anlæg til varmt brugsvand.
System A.

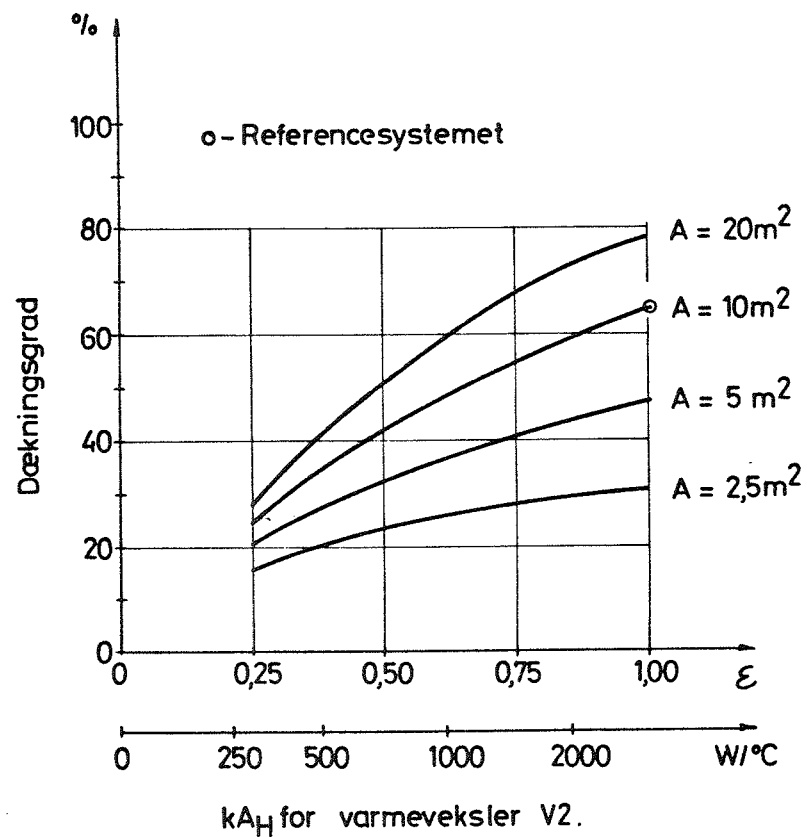


Figur 16 Anlæg til varmt brugsvand
System B

V: Varmereksler

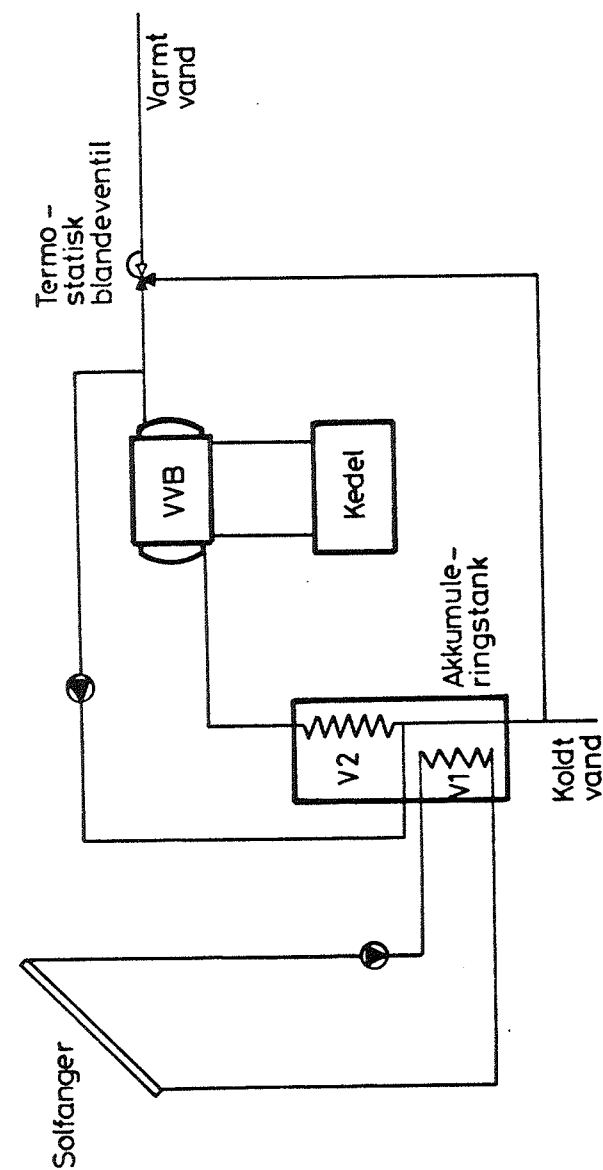
System B

Solfanger : 1 dæklag
 Hældning = 45°
 Tankvolumen: 0,8 m³
 Forbrug : 12 kWh/døgn



Effektiviteten er beregnet for en
 strømningshastighed på 0,25 l/s

Figur 17 Anlæg til varmt brugsvand



Figur 18 Anlæg til varmt brugsvand V : Varmeveksler

System C

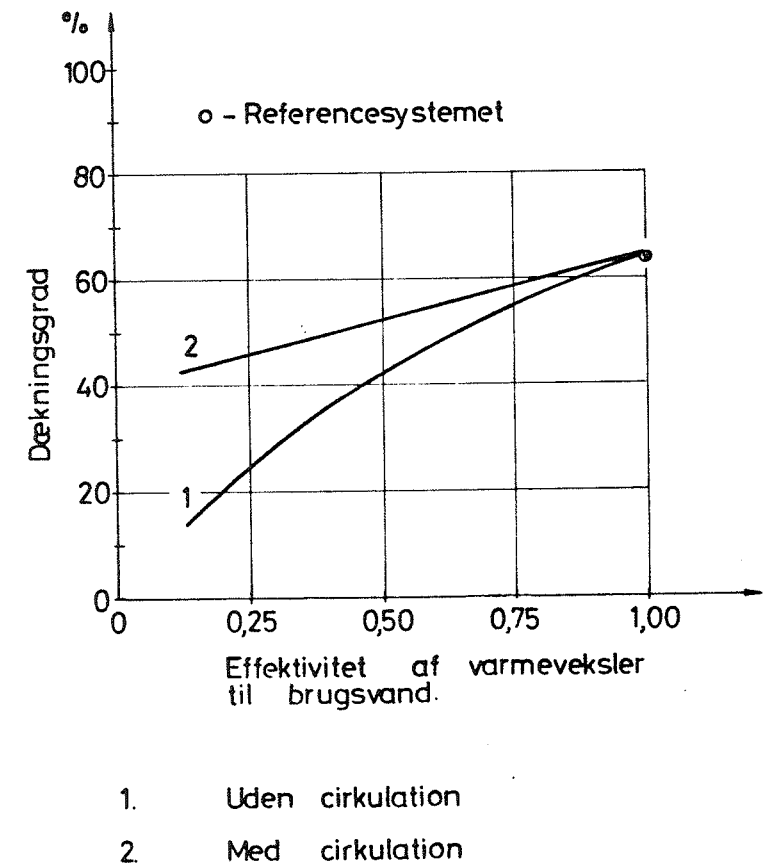
tankens temperatur er højere end varmtvandsbeholderen. Uanset varmevekslerens effektivitet antages begge tanke da at opnå samme temperatur. På figur 19 er for fastholdt solfangerareal, tankvolumen og forbrug optegnet dækningsgraden for systemet med og uden cirkulation som funktion af varmevekslerens effektivitet.

På figur 20 er skitseret et enklere anlæg, system D, hvor solfangeren er forbundet med varmtvandsbeholderens kappe. Denne må dog nok udføres, så man ikke bruger kedelvand i solfangerkredsløbet.

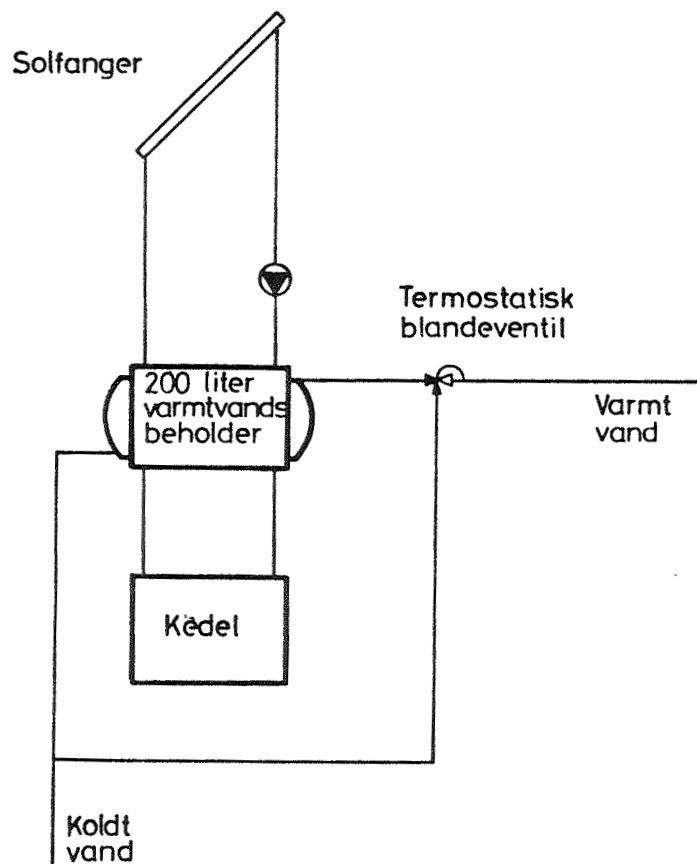
I dette system spares akkumuleringsstanken - til gengæld er systemet kun i drift ved temperaturer over brugsvandstemperaturen, hvilket reducerer udbyttet. Figur 21 viser dækningsgraden for system A og D med et og to dæklag. På grund af det høje temperaturniveau fås der i system D betydelig større dækningsgrader ved at benytte to dæklag. Dette fremgår desuden af figur 22, hvor dækningsgraden for de enkelte måneder er optegnet.

System C

Solfanger : 10m², 1 dæklag
Hældning = 45°
Tankvolumen : 0,8m³
Forbrug : 12kWh/døgn



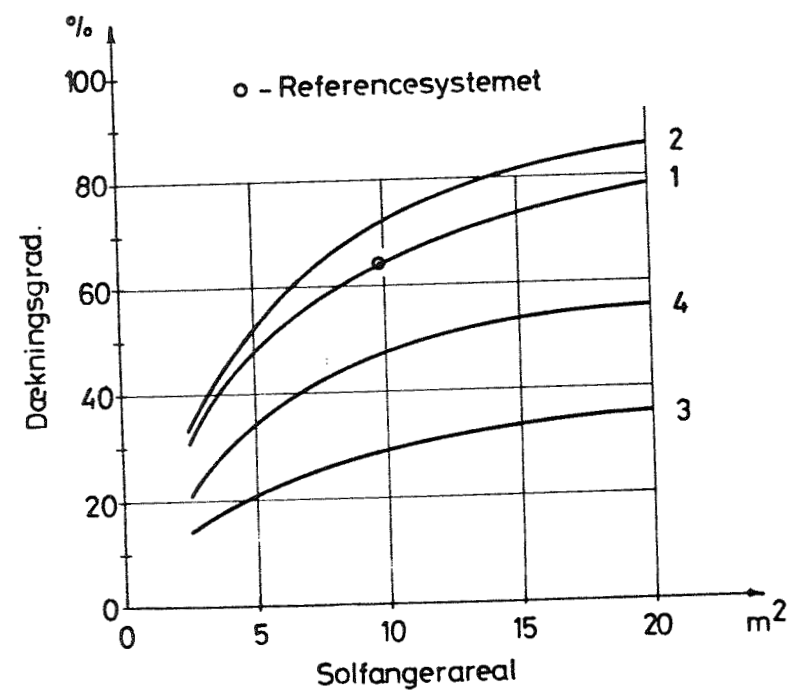
Figur 19 Anlæg til varmt brugsvand.



Figur 20 Anlæg til varmt brugsvand
System D

System A og D

Solfangerhældning = 45°
Forbrug = 12 kWh / døgn.

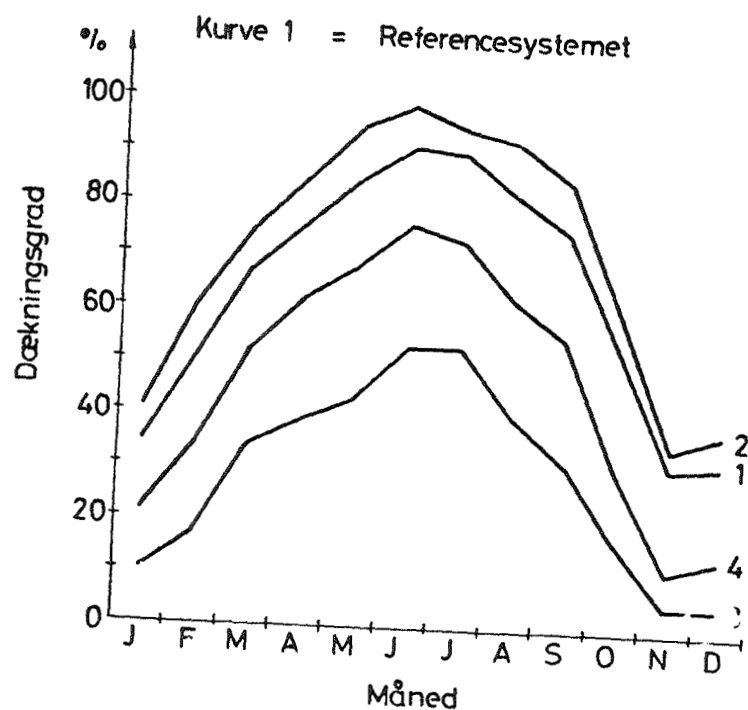


1. System A, 1 dæklag
2. 2 dæklag
3. System D, 1 dæklag
4. 2 dæklag

Figur 21 Anlæg til varmt brugsvand

Månedsdækningsgrad

Solfanger : 10m^2 ,
Hældning = 45°
Forbrug : 12kWh/døgn



1. System A, 1 dæklag	Årlig dækningsgrad = 64%
2. " " 2 "	" " = 72%
3. System D, 1 dæklag	Årlig dækningsgrad = 29%
4. " " 2 "	" " = 47%

Figur 22 Anlæg til varmt brugsvand.

5. Solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand

Rumopvarmningen sker i et radiatoranlæg, der er forbundet med akkumuleringsstanken. Reguleringen af fremløbet til varme-fladerne kan principielt ske på 2 måder, nemlig v.h.a. tempera-turregulering (T), hvor mængden holdes konstant, og temperaturen varierer, eller v.h.a. en mængderegulering (M), hvor temperatu-ren holdes konstant, og mængden varierer.

På fig. 23 er vist princippet for styringen af vandstrømmen mellem kedel, varmeafgiver og akkumuleringsstank. Der ses at være 3 forskellige driftsformer, idet man ved at sammenligne retur-løbstemperaturen t_{retur} med akkumuleringsstankens t_{akk} og frem-løbstemperaturen t_{frem} kan styre vandstrømmen, således at mest muligt af rumopvarmningsbehovet kan dækkes af solvarme, og det uden at der tilføres akkumuleringsstanken varme fra kedlen. Be-tegner QS den del af det øjeblikkelige varmebehov QB, der dæk-kes af solvarme, fås der for de 3 driftsformer:

$$t_{\text{retur}} \geq t_{\text{akk}} \quad \text{QS} = 0$$

$$t_{\text{retur}} < t_{\text{akk}} < t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = \text{QB} \cdot \frac{t_{\text{akk}} - t_{\text{retur}}}{t_{\text{frem}} - t_{\text{retur}}}$$

$$t_{\text{akk}} \geq t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = \text{QB}$$

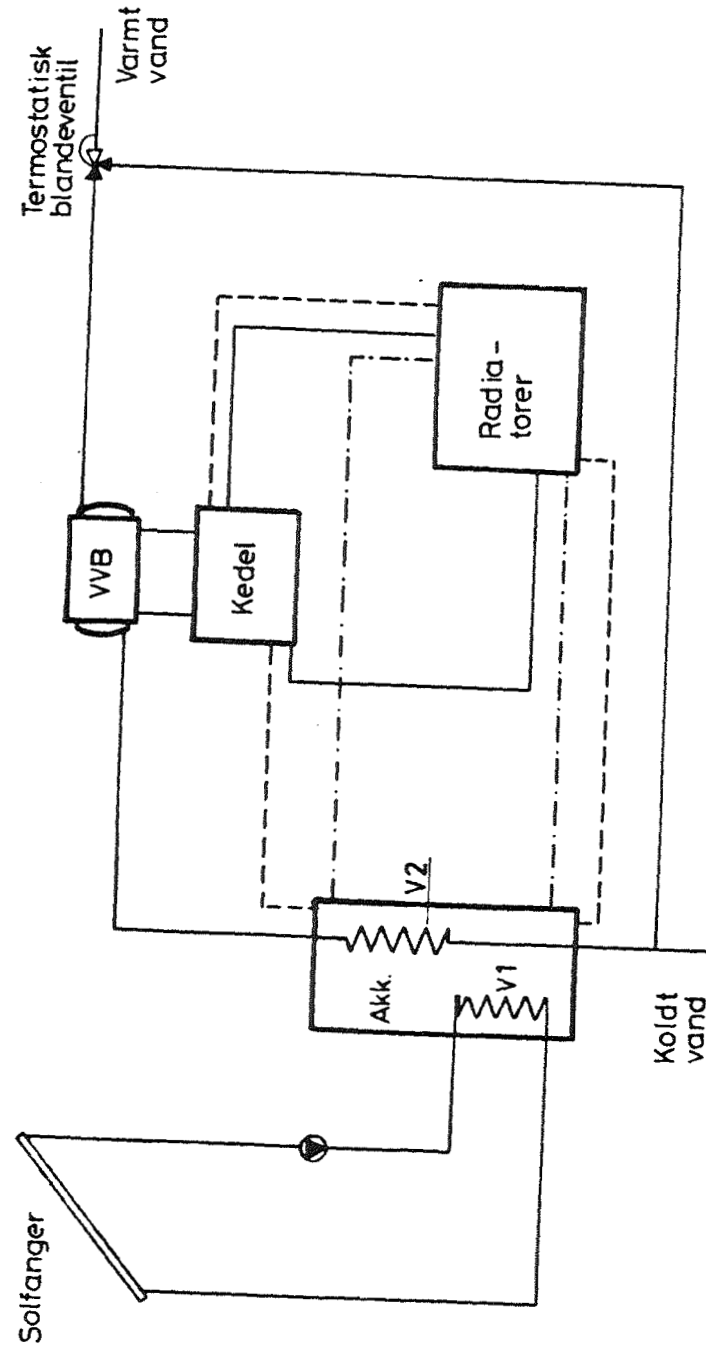
Afhængig af fremløbstemperaturens regulering kan systemet således kaldes T-3 eller M-3.

5.1 Anlæggets drift

Ud fra den antagelse, at det drejer sig om at holde det la-vest mulige temperaturnive- i varmeafgiversystemet vælges der-for et temperaturreguleret system.

Radiatorerne gennemstrømmes således altid af den dimensione-rende vandmængde, mens fremløbstemperaturen regnes at blive re-guleret, i praksis fx. ved hjælp af en udeføler, således at den altid er lavest mulig.

Det kolde brugsvand forvarmes i varmeveksler V2. Som i system A kan der blandes op med koldt vand efter varmtvandsbeholderen. For at kedlen ikke skal køre alene for at dække varmetabet fra varmtvandsbeholderen, tænkes dennes kappe at være forbundet med akkumuleringsstanken, hvilket dog ikke er vist på figur 23.



Figur 23 Anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand
System T-3 og M-3

5.2 Opstilling af ligninger

Ved de følgende beregninger fastholdes, ligesom ved varmtvandsystemet, en række parametre:

Komponent	Parameter	Fastholdt værdi
Solfanger	hældning	45 grader
	azimut	0 grader
	vandgennemstrømning	1 l/min m ²
Varmevekslere	kA_H - solfangertank	50 W/°C pr. m ² solfanger
	$k \cdot A_H$ - varmt brugsvand	1000 W/°C
Akkumulerings- ringstank Varmtvands- beholder	isoleringstykkelse	0,10 m
	omgivende temperatur	20° C
	max. tilladelig temp.	95° C
Brugsvand	mængde	240 l/døgn
	indløbstemp. atur	10° C
	brugstemperatur	50° C
	tappehastighed	0,25 l/sek
Radiatorer	dimensioneringstilstand	60/40° C

Tabel 4

Med de angivne værdier fås en effektivitet beregnet af ligning (2) på 51% af varmeveksleren mellem solfanger og tank, mens brugsvandsvarmeveksleren i akkumuleringsstanken får en på 62%.

Det angivne varmtvandsforbrug svarer til ca. 4400 kWh/år inkl. varmetab fra varmtvandsbeholderen. Hermed fås de 3 huses årlige nettovarmebehov:

Behov:	Hus I		Hus II		Hus III	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Rumopvarmning QP	23700	84	14000	76	6200	58
Varmt brugsvand	4400	16	4400	24	4400	42
Totalt	28100	100	18400	100	10600	100

Tabel 5.

De øvrige parametre varierer mellem nedenstående grænser, der derved bliver ligningernes gyldighedsområde:

$$10 \leq A \leq 80 \text{ m}^2$$

$$20 \leq V/A \leq 160 \text{ liter pr. m}^2 \text{ solfanger}$$

Desuden skal QT, der er defineret ved ligning (7)

$$QT = QP + 4400$$

opfylde betingelsen

$$10000 < QT < 30000 \text{ kWh}$$

Som ved varmtvandsanlægget deles op i to tilfælde med henholdsvis et og to dæklag, og på grundlag af en række beregninger er de årlige dækningsgrader ved regressionsanalyse fundet til:

1 dæklag:

$$D = (23,1 \cdot A^{10^{-5} \cdot QT - 23,9}) \cdot \left(\frac{2,8}{10^{-4} \cdot QT} \right)^{1,87} - 1,4 \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^{-0,84} \cdot A^{0,30} \cdot (10^{-4} \cdot QT)^{2,2} \cdot \left(\frac{QT}{QP} \right)^{6,0} - 4,0 \quad (8)$$

2 dæklag:

$$D = (27,9 \cdot A^{10^{-5} \cdot QT - 28,4}) \cdot \left(\frac{2,8}{10^{-4} \cdot QT} \right)^{1,81} - 0,25 \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^{-0,63} \cdot A^{0,33} \cdot (10^{-4} \cdot QT)^{2,9} \cdot \left(\frac{QT}{QP} \right)^{7,9} - 5,8 \quad (9)$$

hvor QP er rumopvarmningsbehovet kWh
og QT = QP + 4400 kWh

Ligningerne ser komplicerede ud, men i de fleste tilfælde vil QT og QP været givet, så dækningsgraden er en funktion af kun A og V.

Afvigelserne mellem dækningsgraden beregnet af ligning (8) eller (9) og den edb-beregnete er kun i 16 ud af ialt 96 tilfælde større end $\pm 1\%$ og aldrig større end $\pm 2\%$.

På figur 24 og 25 er for $V/A = 80 \text{ l/m}^2$ optegnet dækningsgraden som funktion af solfan arealet.

5.3 Ændring af parametre

Af de i afsnit 5.2 beregnede systemer vælges et reference-system:

$$\begin{aligned} \text{solfangerareal} &= 40 \text{ m}^2, \text{ ét dæklag} \\ \text{tankvolumen} &= 3,2 \text{ m}^3 \\ \text{varmebehov Hus II} &= 18400 \text{ kWh/år} \end{aligned}$$

Dette system har en årlig dækningsgrad på 42%.

En del af de parametre, der var konstante ved opstilling af ligningerne, varierer nu hver for sig i forhold til reference-systemet. Resultatet er vist på figur 26 - 34.

Figur 26. Solfangerhældning

Optimal hældning er ca. 70° fra vandret, men for værdier inden for intervallet 50° - 85° falder dækningsgraden kun ca. 3% i forhold til maximum.

Figur 27. Solfangerazimut

Som for varmtvandsanlægget afhænger kurven af solfangerhældningen. Er denne 45° falder dækningsgraden kun 2% for værdier af azimut inden for intervallet $\pm 30^\circ$.

Figur 28. Tankisolering

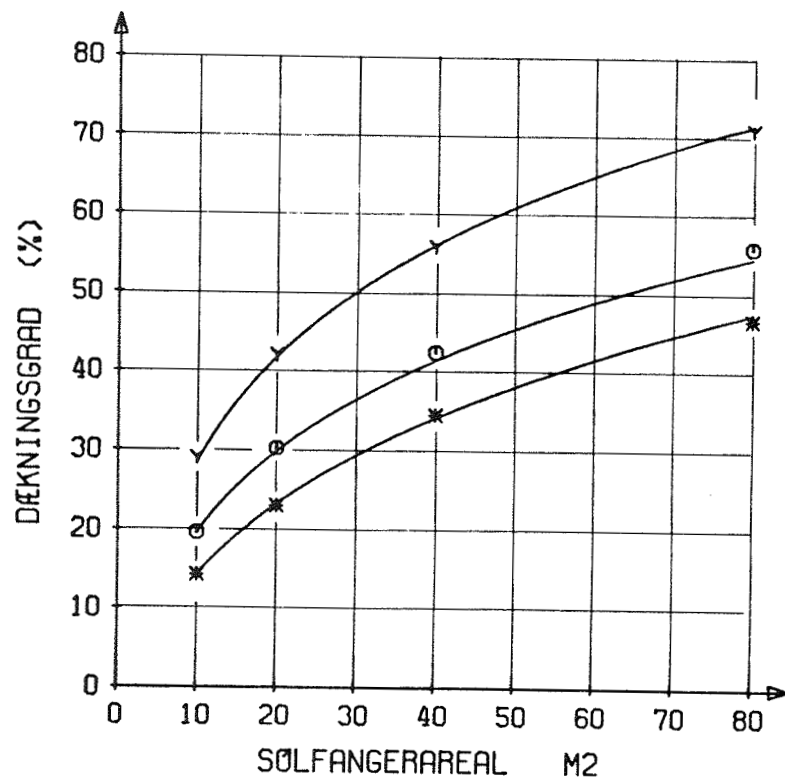
Ved 20° C som omgivende temperatur stiger dækningsgraden kun 1%, når isoleringstykkelsen øges fra 0,10 m til 0,20 m.

Figur 29. Omgivende temperatur

Dækningsgraden stiger kun 1% for hver 10° C højere temperatur.

TILNÆRMEDE KURVER, 1 DÆKLAGE

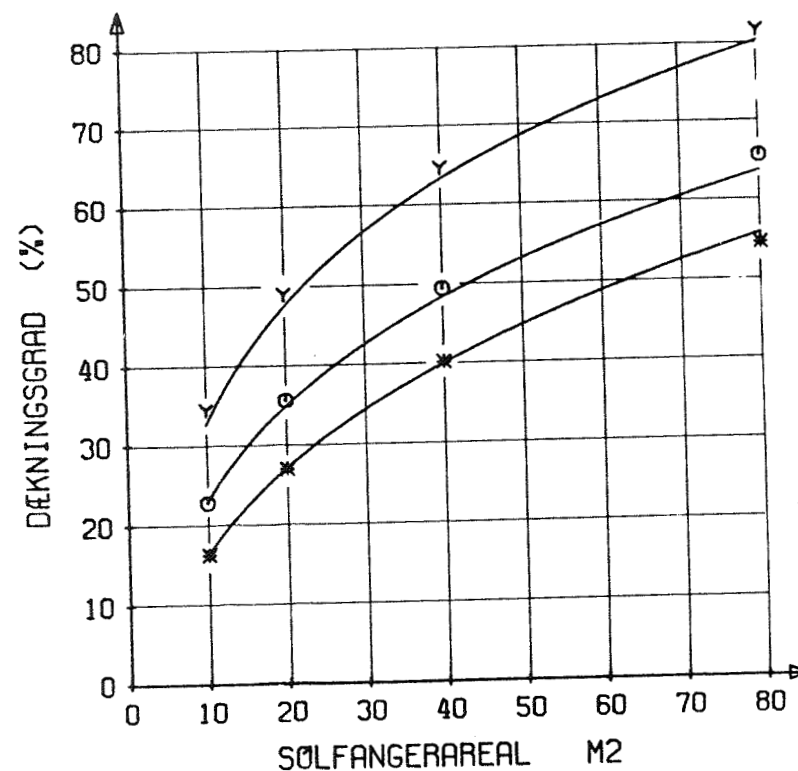
DE MARKEREDE PUNKTER ER EDB-BEREGNEDE -
KURVERNE ER FUNDET VED REGRESSIONSANALYSE
SØLFANGER: 45 GRADER, SYDVENDT
TANKVOLUMEN: 80 LITER PR. M2 SØLFANGER



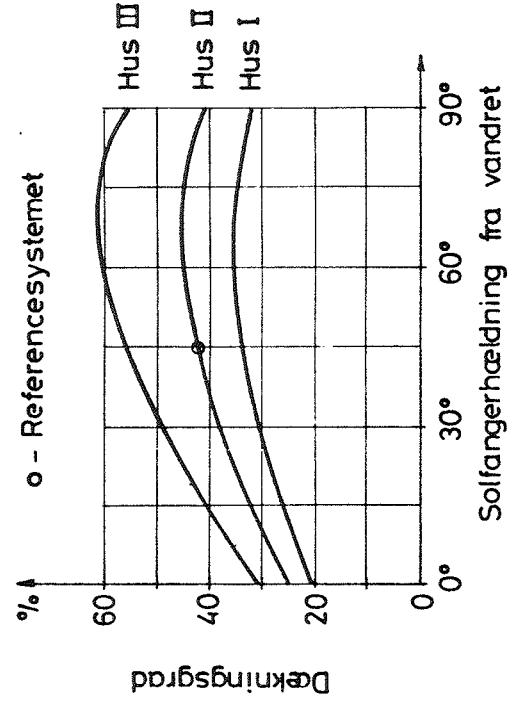
* - HUS I VARMEBEHØV = 28100 KWH/ÅR
 ○ - HUS II VARMEBEHØV = 18400 KWH/ÅR
 Y - HUS III VARMEBEHØV = 10600 KWH/ÅR
 FIGUR 24 ANLÆG TIL RUMOPVARMNING OG
 VARMT BRUGSVAND
 SYSTEM T-3

TILNÆRMEDE KURVER, 2 DÆKLAGE

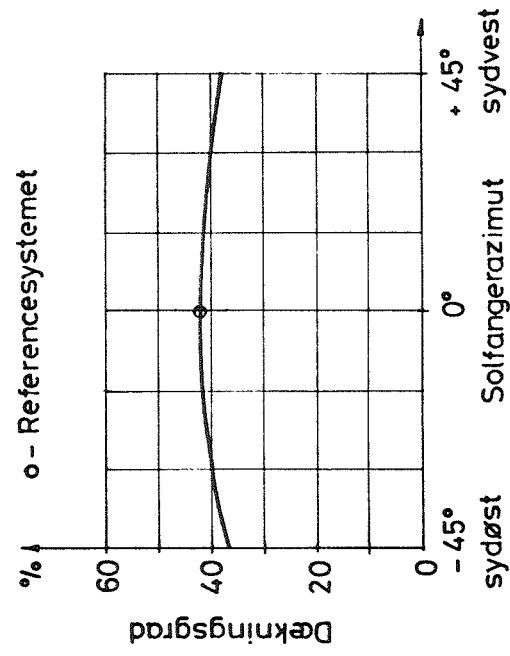
DE MARKEREDE PUNKTER ER EDB-BEREGNEDE -
KURVERNE ER FUNDET VED REGRESSIONSANALYSE
SØLFANGER: 45 GRADER, SYDVENDT
TANKVOLUMEN: 80 LITER PR. M2 SØLFANGER



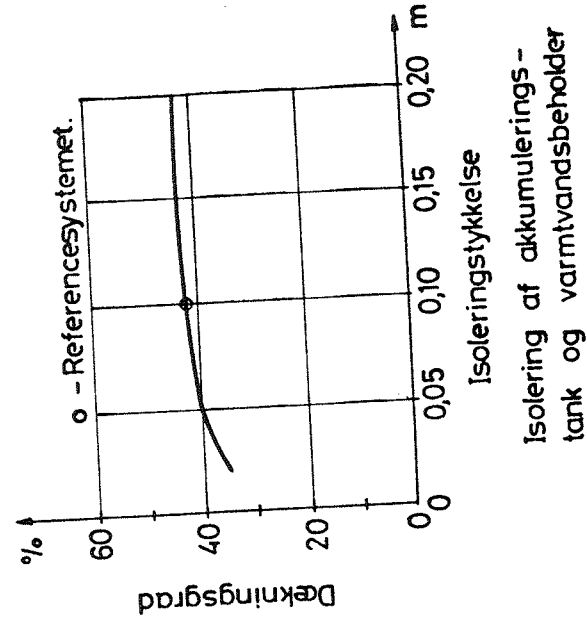
* - HUS I VARMEBEHØV = 28100 KWH/ÅR
 ○ - HUS II VARMEBEHØV = 18400 KWH/ÅR
 Y - HUS III VARMEBEHØV = 10600 KWH/ÅR
 FIGUR 25 ANLÆG TIL RUMOPVARMNING
 OG VARMT BRUGSVAND.
 SYSTEM T-3.



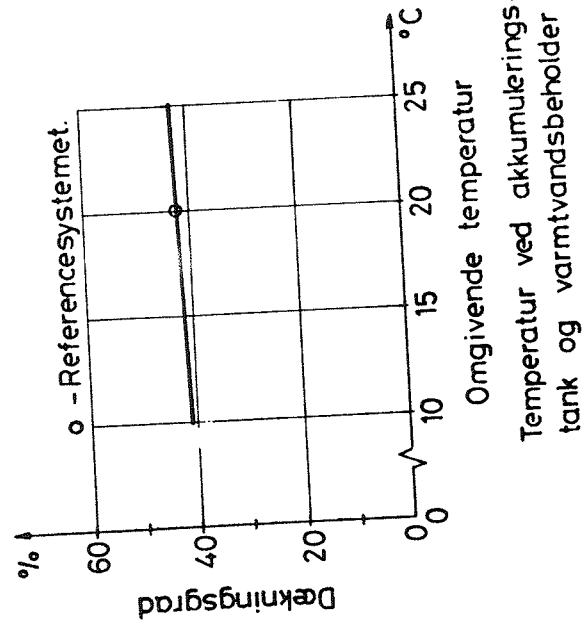
Figur 26



Figur 27



Figur 28



Figur 29

Når dækningsgraden ikke er særlig afhængig af tankisolering og omgivende temperatur skyldes det, at tanktabet i forhold til det totale varmebehov for referencesystemet kun udgør ca. 9%.

Figur 30 og 31. Varmevekslere

For varmeveksler V1 kan gøres samme betragtninger som for varmtvandsanlægget. For varmeveksler V2 gælder at med en høj $k \cdot A_H$ -værdi kan dækkes en større andel af varmtvandsforbruget, mens solvarmens andel af rumopvarmningen bliver mindre. Dækningsgraden af det totale forbrug er derfor næsten uafhængig af varmevekslerens størrelse - en fordobling af $k \cdot A_H$ -værdien i forhold til referencesystemet giver således kun 1% større dækningsgrad.

Figur 32 og 33. Brugsvandstemperatur og forbrug

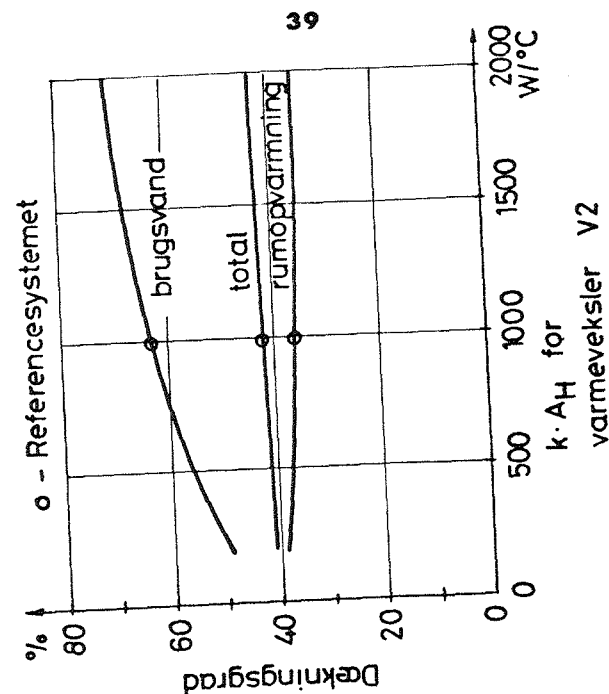
Da brugsvandet kun udgør 16-42% af det totale forbrug, er variationen i dækningsgrad betydelig mindre ved ændring af brugsvandstemperaturen end for varmtvandsanlægget. Størst variation fås ved hus III. Tilsvarende gælder for varmtvandsforbruget, hvor der kun findes en ændring i dækningsgraden for hus III. Dette skyldes, at med 40 m² solfanger dækkes varmebehovet 100% i sommermånederne, hvilket kompenserer for en ændring i det totale årlige varmebehov.

Figur 34. Radiatoranlægget

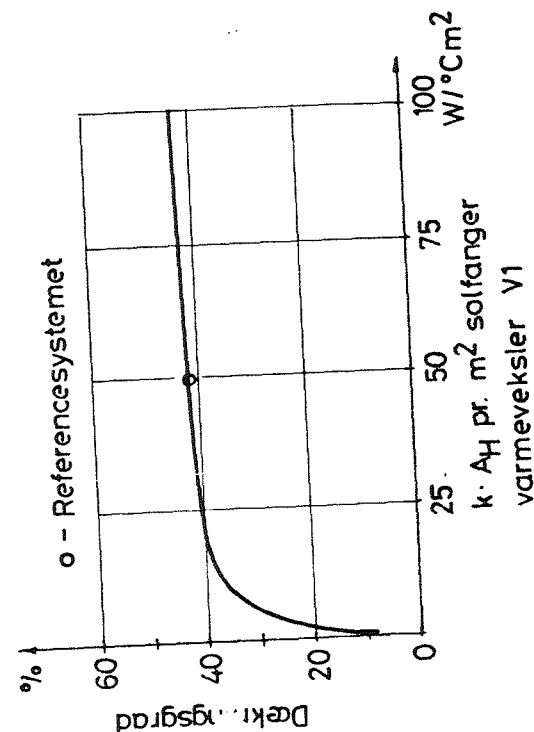
Er der mulighed for det, bør radiatorstørrelsen øges, så man kan nøjes med en lav fremløbstemperatur. Herved stiger dækningsgraden betydeligt. Referencesystemets dækningsgrad stiger således fra 42% til 47%, hvis radiatoranlægget er dimensioneret efter 35/30, der antages at gælde for et gulvvarmeanlæg. Omvendt reduceres dækningsgraden fra 42% til 34%, hvis anlægget er dimensioneret efter 90/70, der ofte anvendes.

5.4 Udbytte pr. m² solfanger

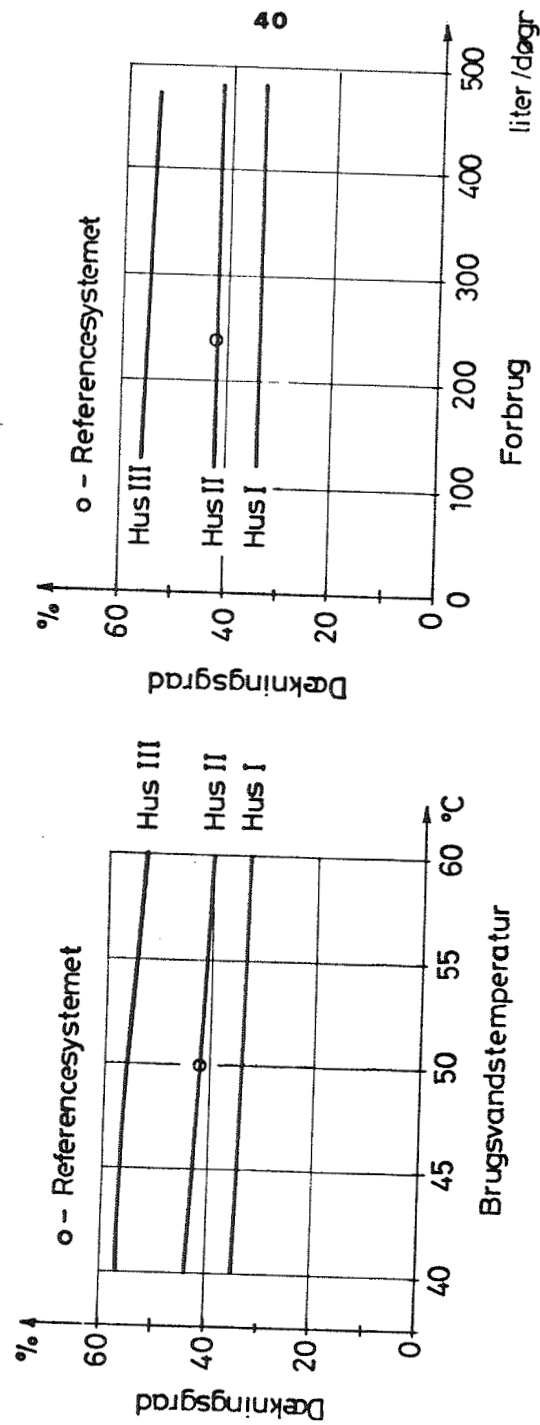
Udbyttet pr. m² solfanger med 1 dæklag kan for system T-3 beregnes af ligning (8). Indsættes de tre huses varmebehov og $V/A = 80 \text{ l/m}^2$ kan dækningsgraden bestemmes af ligningerne:



Figur 31

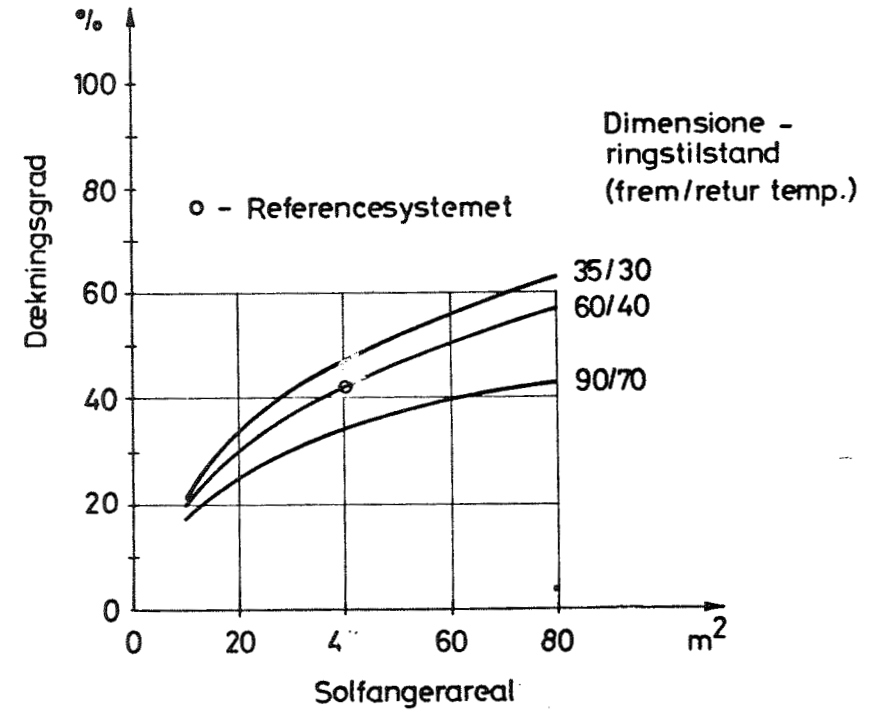


Figur 30



Figur 32

Figur 33



35/30 antages at gælde for et gulvvarmeanlæg

Figur 34 Anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand System T-3.

Solfanger : 1 dæklag
Hældning = 45°
Tankvolumen : 80 liter pr. m² solfanger
Forbrug : 18.400 kWh / år

$$\text{Hus I: } D = 22,9 \cdot A^{0,281} - 0,95 \cdot A^{0,3} - 27,7 \quad (10)$$

$$\text{Hus II: } D = 50,7 \cdot A^{0,184} - 0,70 \cdot A^{0,3} - 56,4 \quad (11)$$

$$\text{Hus III: } D = 142 \cdot A^{0,106} - 1,0 \cdot A^{0,3} - 151 \quad (12)$$

Af ligningerne (10)-(12) kan solvarmeanlæggets ydelse pr. m^2 solfanger udregnes, og disse er optegnet på figur 35. Af kurven for hus II aflæses, at de første 20 m^2 giver ca. $275 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$, mens de sidste 20 m^2 ved et solfangerareal på 80 m^2 kun giver ca. $25 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$.

5.5 Alternative systemer

Udelades i system T-3 muligheden for at føre returen både gennem akkumuleringsstanken og kedlen, fås system T-2, hvor solvarmens andel QS af det øjeblikkelige varmebehov QB bliver:

$$t_{\text{akk}} \geq t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = \text{QB}$$

$$t_{\text{akk}} < t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = 0$$

En principskitse for system T-2 er vist på figur 36.

Føres returen altid gennem både akkumuleringsstank og kedel som eneste mulighed, fås system T-1, der er vist på figur 37. QS bliver her:

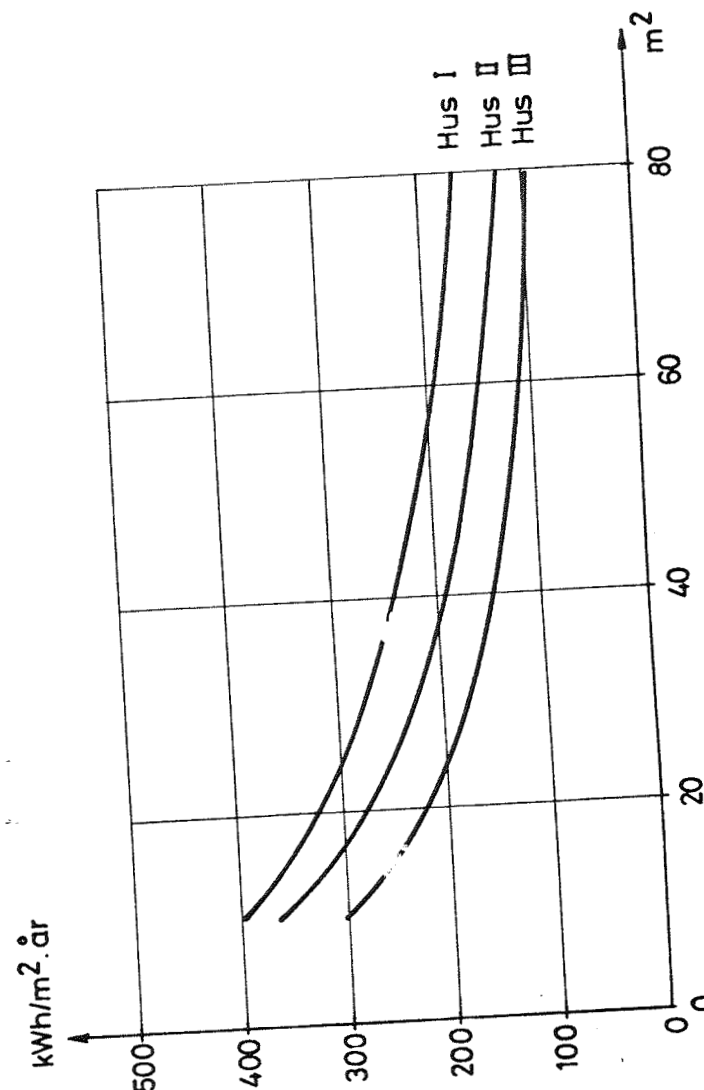
$$t_{\text{akk}} \geq t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = \text{QB}$$

$$t_{\text{akk}} < t_{\text{frem}} \quad \text{QS} = \text{QB} \cdot \frac{t_{\text{akk}} - t_{\text{retur}}}{t_{\text{frem}} - t_{\text{retur}}}$$

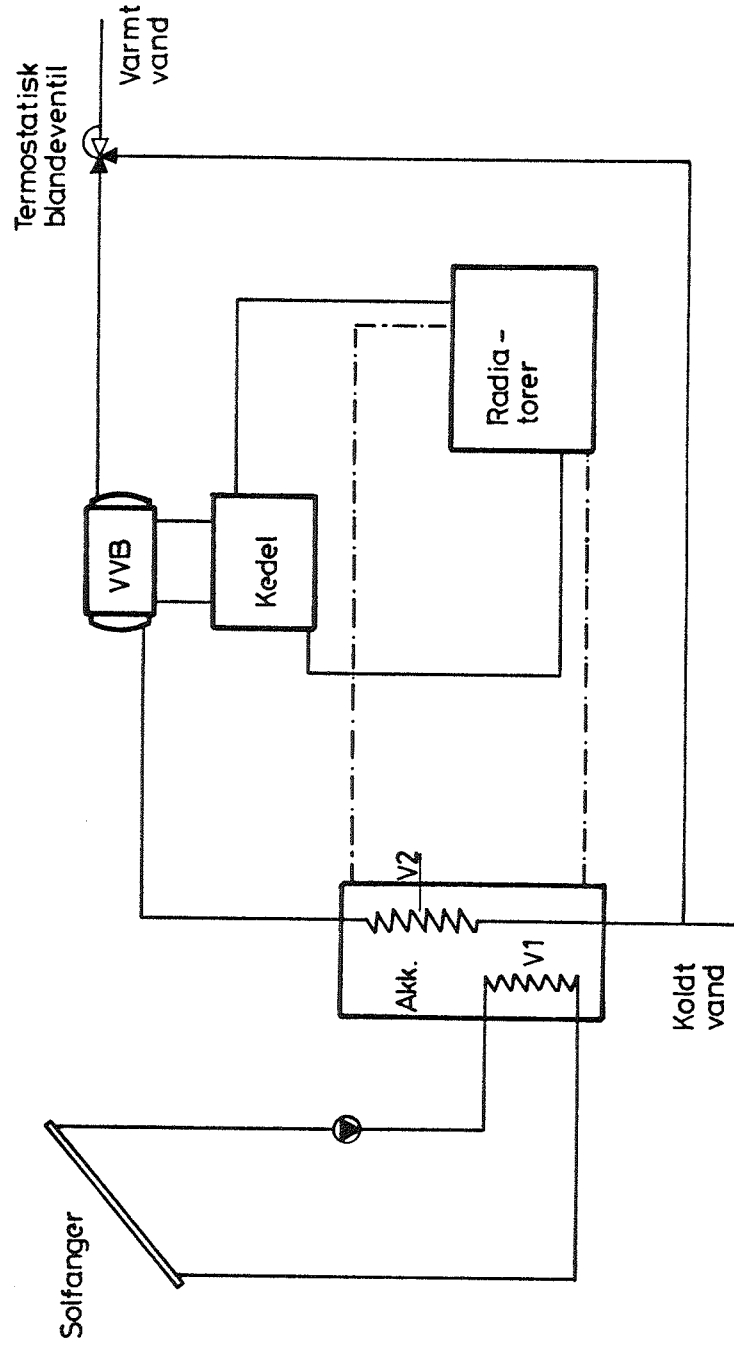
QS kan i dette tilfælde blive negativ, hvilket vil sige at kedlen tilfører akkumuleringsstanken energi. QS og solvarmens andel af varmtvandsforbruget sættes derfor lig med nul, indtil denne varmemængde er udnyttet.

I stedet for temperaturregulering kan rumopvarmningen som beskrevet i afsnit 5 ske ved mængderegulering, hvilket giver tre nye systemer: M-3, M-2 og M-1.

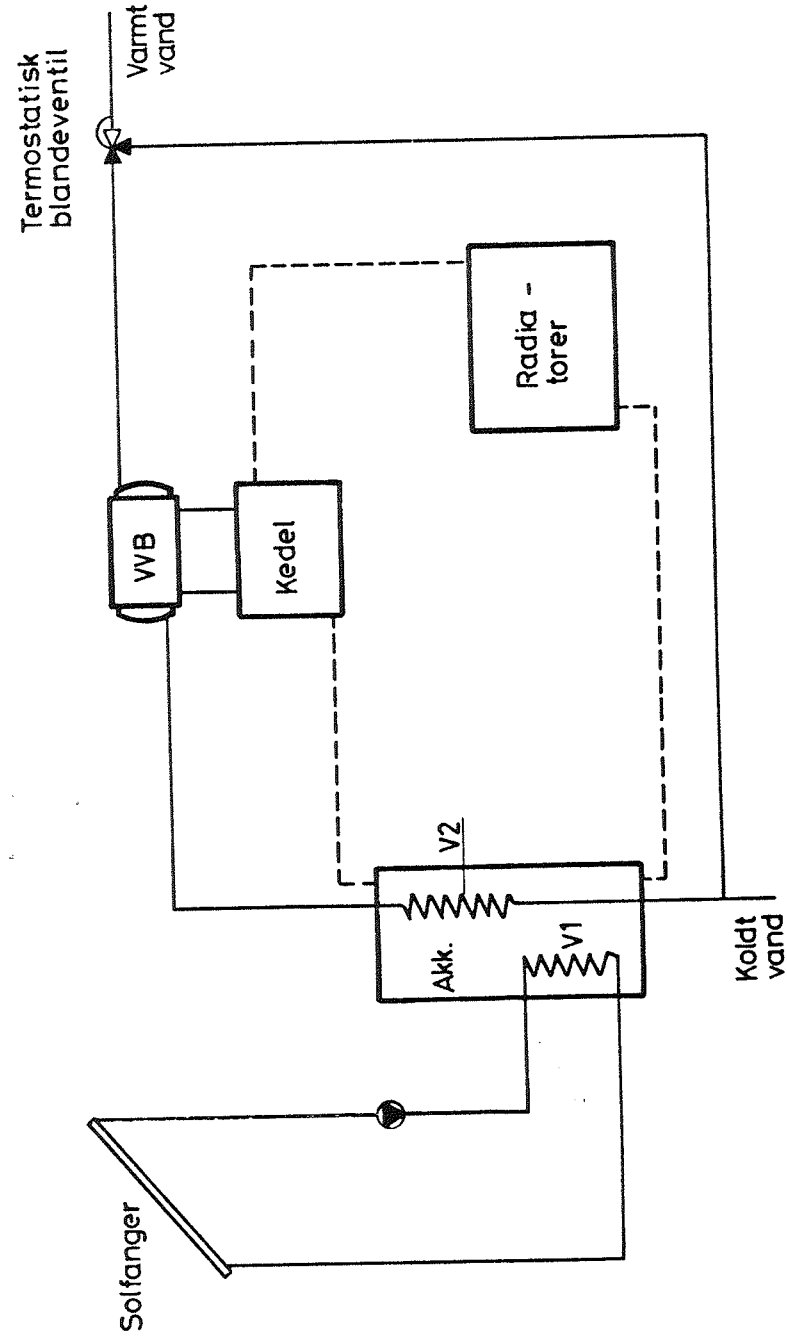
Disse seks systemer er beregnet for de tre huse, dels for varierende solfangerareal og dels for varierende dimensioneringstilstand. De øvrige parametre er som for referencesystemet. Resultatet af disse beregninger er vist i tabel 6 og 7, hvor de enkelte systemers dækningsgrad er angivet.



Figur 35 Anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand System T-3



Figur 36 Anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand.
System T-2 og M-2.



Figur 37 Anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand
System T-1 og M-1

Hus:		I			II			III		
System	A m ²	20	40	80	20	40	80	20	40	80
Temperaturregulering	T-3	23	34	47	30	42	56	42	56	71
	T-2	22	32	43	28	39	51	40	53	67
	T-1	22	34	46	29	41	55	40	55	70
Mængde-regulering	M-3	21	32	44	27	39	52	38	51	64
	M-2	11	17	26	17	24	33	28	36	45
	M-1	21	31	44	27	39	52	38	51	63

Tabel 6. Dim. tilstand 60/40
V/A = 80 liter pr. m² solfanger.

Hus:		I			II			III		
System	Dim. tilstand	35 30	60 40	90 70	35 30	60 40	90 70	35 30	60 40	90 70
Temperaturregulering	T-3	39	34	27	47	42	34	61	56	47
	T-2	38	32	25	46	39	32	61	53	45
	T-1	38	34	23	46	41	29	61	55	42
Mængde-regulering	M-3	39	32	23	47	39	29	61	51	40
	M-2	33	17	11	41	24	16	54	36	29
	M-1	38	31	22	47	39	28	61	51	40

Tabel 7. A = 40 m²
V/A = 80 liter pr. m² solfanger.

I det følgende angiver et systemnummer både systemet med temperaturregulering og systemet med mængde-regulering - system 3 betyder altså både T-3 og M-3.

Af tabel 6 og 7 kan konkluderes følgende:

1. Temperaturregulering er i system 1 og 3 lidt bedre end mængde-regulering og betydelig bedre i system 2. I system M-2 kræves, at tanktemperaturen er større end eller lig med fremløbstemperaturen, for at tanken kan dække rumopvarmningsbehovet. Dækningsgraden falder derfor, når den dimensionerende fremløbstemperatur hæves. Ved dimensioneringstilstand 90/70 er dækningsgraden for rumopvarmning således lig med nul, hvorved dækningsgraden i flere tilfælde næsten halveres i forhold til de øvrige systemer.
2. System 1 og 3 giver næsten samme dækningsgrad. Eneste undtagelse er systemerne med temperaturregulering og dimensioneringstilstand 90/70, hvor dækningsgraden falder med 4-5%.
3. System T-2 er lidt ringere end system T-3 og T-1 især ved høje dækningsgrader.

6. Eksempler

Eksempel 1. Varmtvandsanlæg.

Der skal bygges et solvarmeanlæg, som skal hjælpe til med at dække et forbrug på 450 l/døgn opvarmet 10-45° C. Solfangerens hældning bliver 40° fra vandret, og azimuth -30°. Akkumulerings-tank og varmtvandsbeholder isoleres med 150 mm mineraluld. Anlæggets øvrige data er som forudsat ved opstilling af ligning (5) og (6).

Hvilken dækningsgrad kan forventes med 6 m² solfanger med et dæklag af glas og V/A = 100 l/m² ?

Af ligning (3) findes F = 21,8 kWh/døgn og med A = 6 m² og V/A = 100 l/m² fås af ligning (5) D = 38%. En edb-beregning med de nævnte data gav ligeledes D = 38%.

Derefter vurderes, hvor stor betydning det har, at ikke alle parametre opfylder betingelserne for ligning (5).

Af figur 9-11 og figur 14 kan ΔD findes for hver af de ændrede parametre:

Solfangerhældning:	$\Delta D = -1\%$
Solfangerazimut:	$\Delta D = -2\%$
Isoleringstykkelse:	$\Delta D = +2\%$
Brugsvandstemp.:	$\Delta D = +4\%$

Ændringerne gælder dog kun for referencesystemet med én ændret parameter, men antages den totale dækningsgrad med tilnærmelse at kunne bestemmes ved addition fås:

$$D = 38 - 1 - 2 + 4 = 41\%$$

Til sammenligning kan nævnes, at en edb-beregning med de nævnte værdier gav en dækningsgrad på 42%. Da både ligning (5) og edb-beregningsen gav $D = 38\%$, skyldes forskellen på 1% kun additionen af de fire ΔD , der altså i dette tilfælde ikke er mere indbyrdes afhængige, end at de med tilnærmelse kan adderes.

Eksempel 2. Varmtvandsanlæg.

Med samme anlæg som i eksempel 1 ønskes en dækningsgrad på 50%. Hvor stor skal solfangeren være?

Med de samme ΔD som i eksempel 1 skal ligning (5) give en dækningsgrad på 47%. Løses ligningen med hensyn til A, findes det nødvendige areal:

$$A = 8,8 \text{ m}^2$$

Med $A = 8,8 \text{ m}^2$ gav en edb-beregning $D = 52\%$.

Antages de samme ΔD at gælde for en solfanger med to dæklag, findes det nødvendige areal af ligning (6) til

$$A = 7,3 \text{ m}^2$$

En edb-beregning med $A = 7,3 \text{ m}^2$ gav $D = 52\%$.

Eksempel 3. Rumopvarmning og varmt brugsvand.

For en sydendt solfanger med hældning $= 90^\circ$ fra vandret ønskes bestemt det nødvendige areal for at opnå en dækningsgrad på 50% af et totalt varmebehov på 14200 kWh/år, heraf 6200 kWh til rumopvarmning. V/A sættes til 100 l/m^2 , mens de øvrige data er som forudsat ved opstilling af ligning (8) og (9).

QT beregnes af ligning (7) til 10600 kWh, og med $QP = 6200 \text{ kWh}$ kan ligning (8) og (9) reduceres til:

$$1 \text{ dæklag: } D = 142 \cdot A^{0,106} - 0,8 \cdot A^{0,3} - 151 \quad (13)$$

$$2 \text{ dæklag: } D = 162 \cdot A^{0,106} - 1,1 \cdot A^{0,33} - 170,6 \quad (14)$$

Af figur 26 og 33 aflæses ΔD for de to ændrede parametre:

$$\text{Solfangerhældning: } \Delta D = 0\%$$

$$\text{Varmtvandsforbrug: } \Delta D = -2\%$$

Antages ændringerne at kunne adderes, skal ligning (13) og (14) give $D = 52\%$. Ved iteration findes det nødvendige areal:

$$1 \text{ dæklag: } A = 32 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ dæklag: } A = 23 \text{ m}^2$$

En edb-beregning med de to arealer gav dog kun henholdsvis 45% og 44%. Antagelsen om at de to ΔD kan adderes, er altså ikke korrekt, hvilket skyldes, at ændringerne er indbyrdes afhængige. Det øgede varmtvandsforbrug betyder, at kurven på figur 26, der viser dækningsgraden som funktion af solfangerhældningen, ændres i retning af kurven for varmtvandsanlægget på figur 9, hvor ΔD i stedet for 0% aflæses til -8%.

De fundne arealer gælder for en solfangerhældning på 45° - d.v.s. det øgede forbrug er eneste ændrede parameter. En edb-beregning med dette anlæg gav en dækningsgrad for de to arealer på henholdsvis 50% og 51%.

Eksempel 4. Rumopvarmning og varmt brugsvand.

Udbyttet ønskes bestemt for et anlæg med referencesystemets data, men hvor den totale effektivitetsfaktor F_R for solfangeren er reduceret fra 0,93 til 0,80.

Indsættes $QT = 18400 \text{ kWh}$ og $QP = 14000 \text{ kWh}$ kan ligning (8) reduceres til

$$D = 50,7 \cdot A^{0,184} - 0,70 \cdot A^{0,3} - 56,4 \quad (15)$$

En reduktion af effektivitetsfaktoren betyder, at udbyttet fra solfangeren reduceres. For at kunne benytte ligning (15) til bestemmelse af den årlige dækningsgrad skal arealet derfor korrigeres, idet man af ligning (1) finder, at for samme størrelse af $A \cdot F_R$ fås samme ydelser. Endres referencesystemets solfangerareal på 40 m^2 til

$$A = 40 \cdot \frac{0.80}{0.93} = 34,4 \text{ m}^2$$

kan anlæggets dækningsgrad findes af ligning (15) til 38,8%. Med $A = 40 \text{ m}^2$ bliver $D = 41,4\%$ - en reduktion af F_R på ca. 14% giver altså kun en reduktion af dækningsgraden på 6,3%.

Det årlige udbytte kan nu beregnes til $184.38,8 = 7140 \text{ kWh}$.

En edb-beregning med $A = 34,4 \text{ m}^2$ gav et årligt udbytte på 7300 kWh . Forskellen på 160 kWh skyldes, at ligning (15) er tilnærmet.

7. Afsluttende bemærkninger

Resultaterne forudsætter, at det varmebærende medium er vand. For at frostsikre solfangeren vil man ofte benytte en olie eller en vand-glycolblanding. Herved kan der ske en ændring i solfangerens effektivitet og ændringer i varmeoverføringsvejen i varmeveksleren, hvorfor man må sikre sig, at de nævnte værdier ikke afviger fra de her forudsatte, hvis de angivne formler benyttes.

Varmeveksleren til brugsvand er i alle beregninger en rørspriral anbragt i akkumuleringsstanken. Af hensyn til tilkalkning vil en separat krydsvarmeveksler eller en ekstra varmtvandsbeholder måske være en bedre løsning.

8. Konklusion

På grundlag af en række beregninger er der for udvalgte solvarmesystemer opstillet nogle dækningsgradsligninger. De resultater man får ved at benytte ligningerne fremfor mere detaljerede edb-beregninger, vil sandsynligvis i langt de fleste tilfælde være et tilstrækkeligt grundlag til en dimensionering af anlægget. Man må dog være opmærksom på, at beregningerne er foretaget med en række begrænsende forudsætninger, ligesom de benyttede vejrdata kun kan siges at repræsentere et middellår. Ved praktiske udførelser af solvarmeanlæg vil man derfor fra år til år finde variationer af dækningsgraden.

Endelig viser beregningerne ikke noget om, hvor afhængig et solvarmeanlægs ydelser er af meget usikre parametre såsom omhyggelighed i udførelse, indregulering af styresystemer, vedligeholdelse samt ejernes vaner m.h.t. varmeanfordrug.

9. Symbolliste

Symbol	Betegnelse	Enhed
A	absorbatorpladeareal	m^2
A_H	areal af varmevekslers hedeplade	m^2
$C_1 - C_5$	konstanter	ubenævnt
D	total årlig dækningsgrad	%
D(edb)	edb-beregnet dækningsgrad	%
D(ligning)	dækningsgrad beregnet af tilnærmet ligning	%
F	varmtvandsforbrug	kWh/døgn
F_R	total effektivitetsfaktor. F_R er forholdet mellem den energi man får, og den man ville have fået, hvis absorbatorpladetemperaturen overalt var lig med indløbstemperaturen.	ubenævnt
L	varmtvandsforbrug	liter/døgn
M-N	system med mængderegulering. N angiver antallet af mulige styreformere.	
Q_{abs}	absorberet solenergi	W/m^2
Q_u	nyttiggjort energi	W
Q_B	øjeblikkeligt rumopvarmningsbehov	J
Q_S	solvarmens øjeblikkelige andel af rumopvarmningsbehovet	J
QT	$QT = Q_B + 4400$	kWh
QP	årligt rumopvarmningsbehov	kWh
T-N	system med temperaturregulering. N angiver antallet af mulige styreformere.	