fotokopi

# DIMENSIONERING AF ET SOLVARMESYSTEM TIL ET TYPEHUS

AF

HENRIK LAWAETZ

&

LEIF SØNDERSKOV JØRGENSEN

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

AUGUST 1977

MEDDELELSE NR. 63

SÆRTRYK AF TIDSSKRIFTET VARME, OKT. 1977

## Indledning.

I forbindelse med Handelsministeriets udviklings- og demonstrationsprojekt vedrørende solvarme [1] skal der opføres et antal solvarmeanlæg. Et af disse placeres på et nyt parcelhus. Som en typisk repræsentant for nye eenfamiliehuse i 1977 er valgt et Nyboe-hus, model 125, der vil blive opført i Greve i slutningen af 1977.

For at få et grundlag til dimensionering af solvarmeanlægget er der foretaget en række edb-beregninger af et givet systems forventede ydeevne.

Specielt har størrelsen af akkumuleringstanken interesse, idet en stor tank er vanskelig rent praktisk at placere indendørs i et hus, uden at det bliver uforholdsmæssigt dyrt. Der er derfor anvist en metode til økonomisk optimering af tankstørrelsen.

## Beregningsforudsætninger.

Da huset endnu ikke er endeligt udformet, er det årlige varmebehov ikke beregnet endnu, men huset skal opfylde isoleringskravene i BR 77 [2], og ud fra disse er tidligere beregnet et tilsvarende hus' varmebehov [3]. Dette er gjort med edb-programmet BA4 [4] og på grundlag af Referenceårets klimadata [5]. Selvom det beregnede hus ikke har helt samme mål som Nyboe-huset, skønnes det rimeligt at antage ens rumopvarmningsbehov og med et varmtvandsforbrug på 240 l/døgn, opvarmet fra 10 til $50^{\circ}$ C fås pr. år inklusiv varmetab fra varmtvandsbeholder:

| | |
|---|---|
| rumopvarmning | 14000 kWh |
| varmt brugsvand | 4300 kWh |
| årligt varmebehov | 18300 kWh |

Det er dette varmebehov et solvarmesystem skal hjælpe med til at dække.

Systemudformningen.

Det valgte solvarmesystem er skitseret på fig. 1. Udformningen er fastlagt således, at systemet forventes at give størst mulig nyttiggjort solenergi. Dette er dog endnu ikke verificeret ved beregninger af andre systemer.

Solfangeren, der beregnes som anført i [6], overfører solenergien til en akkumuleringstank via en varmeveksler. Solfangerkredsløbet, der tænkes at benytte vand som varmetransporterende medium, startes så snart det er muligt at overføre energi til tanken. Varmevekslerstørrelsen er her fastsat til 50 W/$^{o}$C pr. $m^2$ solfang, hvilket giver en effektivitet på 0,51.

Det kolde brugsvand opvarmes i tanken ved gennemløb af en varmeveksler med en effektivitet valgt til 0,62. Da man i perioder således ikke vil kunne opnå brugstemperaturen på 50$^{o}$ C, er det nødvendigt at give den sidste opvarmning i en traditionel olieopvarmet varmtvandsbeholder. I andre perioder er tanktemperaturen høj nok til at kunne klare varmtvandsforbruget, og på fig. 1 er skitseret en mulig løsning til 100% dækning af forbruget så snart tanktemperaturen er over 50$^{o}$ C. En termostatstyret pumpe sørger ved hjælp af et omløb for, at temperaturen kan holdes på 50$^{o}$ C, og man opnår derved, at oliefyret ikke behøver være i drift blot for at dække varmtvandsbeholderens varmetab.

Fremløbstemperaturen til radiatorerne styres f.eks. i praksis af en udeføler, og med en konstant vandgennemstrømning kan den nødvendige fremløbstemperatur $t_f$ beregnes på grundlag af det aktuelle varmebehov Q efter den anførte formel i [7]:

$$t_f = t_i + \frac{Q}{m}\left(\frac{1}{\exp\left(\frac{Q}{m}\cdot\left(\frac{b}{Q}\right)^{3/4}\right)-1}+1\right) \qquad (1)$$

hvor $b = \dfrac{Q_o}{\left(\dfrac{t_{fo}-t_{ro}}{\ln\left(\dfrac{t_{fo}-t_i}{t_{ro}-t_i}\right)}\right)^{4/3}}$

$$m = \frac{Q_o}{t_{fo}-t_{ro}}$$



$t_i$ er ønsket indetemperatur

$t_r$ er returløbstemperatur

og indeks o angiver dimensioneringstilstanden.

Returvandet fra radiatorerne styres således, at det kun med en lavere temperatur end tankens løber igennem denne. Da tanken således indeholder kedelvand vil man finde, at solvarmesystemet i perioder kan dække rumopvarmningsbehovet helt, i andre perioder kun delvist, og endelig i perioder vil opvarmningen udelukkende ske ved hjælp af oliefyret.

Beregningsresultater.

Systemet er simuleret med Referenceårets solindfald, og husets placering og taghældning gav følgende solfangerplacering:

azimuth = 30 grader

hældning = 27 grader fra vandret

Solindfaldet beregnes som anført i [8], og for solfangerarealer på mellem 30 og 50 $m^2$ med 1 dæklag af glas findes de på fig. 2 skitserede dækningsgrader som funktion af 3 dimensioneringstilstande for radiatoranlægget, nemlig

90/70, 60/40 og 35/30

hvor den sidste antages at gælde for et gulvvarmeanlæg. For alle solfangerstørrelser gælder det, at tankvolumet er sat til 100 l/$m^2$ solfang. Sættes det i stedet for til 50 l/$m^2$ solfang, finder man, at dækningsgraden generelt falder 1 - 2%.

På fig. 3 er for anlægget med solfangerarealet 50 $m^2$, tankvolumenet 5 $m^3$ og dimensioneringstilstanden 60/40 optegnet dækningsgraden hver måned igennem året, dels totalt og dels for rumopvarmning og varmt brugsvand. Det ses, at anlægget i hele sommerhalvåret praktisk talt dækker varmebehovet.

For det samme anlæg vil hver af følgende ændringer i konstruktionen give dækningsgraderne:

| | |
|---|---|
| 2 dæklag af glas | 47% |
| hældning = 38 grader | 45% |
| azimuth = 0 grader | 42% |

Økonomisk optimeringsprincip.

Når et solvarmeanlæg bestående af en række komponenter skal økonomisk optimeres, gælder det om at vælge komponentstørrelser således, at den største udnyttelse af solenergien opnås i forhold til investeringen. Et anlæg vil således være optimalt dimensioneret, når det for alle komponenterne gælder, at en ekstra lille investering giver samme merudnyttelse af solenergien.

En økonomisk optimering af en komponents størrelse k kan kun foretages, når man kender k's indflydelse på hele anlæggets pris P og samtidig har viden om anlæggets forventede ydelse Y. Er begge disse kendte størrelser, kan komponentens "nøgletal", elasticiteten, E udregnes af formlen:

$$E(k) = \frac{\frac{1}{Y}\frac{\partial Y}{\partial k}}{\frac{1}{P}\frac{\partial P}{\partial k}} \qquad (2)$$

E angiver således, hvor mange procent anlæggets ydelse stiger, hvis man ofrer yderligere en procent af de totale anlægsomkostninger alene på komponentstørrelsen k.

Efter dette princip kan man optimere hver enkelt komponent, idet elasticiteten udregnes, og de komponenter med størst elasticitet forøges, mens de med mindst gøres mindre. Dette gøres indtil alle elasticiteterne bliver ens, hvilket svarer til de optimale dimensioner.

Endelig finder man, at hvis elasticiteterne er større end 1, kan det betale sig at øge den samlede investering og dermed gøre anlægget større, og omvendt, hvis de er mindre end 1.

Eksempel på optimering.

Den anførte metode kan anvendes så detaljeret, som man har behov for. Specielt er den væsentlig for de dyre komponenter som f.eks. solfanger og akkumuleringstank, men kan i øvrigt



anvendes på alle komponenter, der betyder noget for den nyttiggjorte solenergimængde, det være sig isoleringstykkelser, størrelser af varmevekslere, radiatorers hedeflader osv.. Metoden stiller dog krav om kendskab til sammenhænge mellem ydelse og komponentstørrelser. Disse er ofte besværlige at beregne, og for det her benyttede system skal metoden derfor kun illustreres i et enkelt eksempel til optimering af tankstørrelsen, når solfangerarealet er givet.

For det beregnede solvarmesystem med en 1 lags solfanger og en radiatordimensionering på 60/40 kan ydelsen Y på baggrund af de her og tidligere [9] fundne resultater med rimelig tilnærmelse udtrykkes af ligningen:

$$Y = (57 - 550 \cdot A^{-1} - 1{,}9 \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot V^{-\frac{1}{2}}) \cdot 183 \text{ kWh/år} \qquad (3)$$

hvor A er solfangerarealet i $m^2$, V tankvolumenet i $m^3$ og med begrænsningerne:

$$30 \leq A \leq 50$$
$$0{,}025 \leq V/A \leq 0{,}2$$

Er solfangerens størrelse givet, kan man finde det optimale tankvolumen ved at sætte tankelasticiteten E(V) lig solfangerelasticiteten E(A), Kaldes $\frac{\partial P}{\partial A}$ og $\frac{\partial P}{\partial V}$ henholdsvis marginalprisen for solfanger og tank, og betegnes de med $m_A$ og $m_V$, fås af ligning (2)

$$\frac{\frac{1}{Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial A}}{\frac{1}{P} \cdot m_A} = \frac{\frac{1}{Y}\frac{\partial Y}{\partial V}}{\frac{1}{P} \cdot m_V} \qquad (4)$$

I dette udtryk forsvinder anlægsprisen P og ydelsen Y, og tages de partielt afledede af ligning (3) findes endelig:

$$m_V = m_A \cdot \frac{0{,}95A^{\frac{1}{2}} \cdot V^{-1\frac{1}{2}}}{550A^{-2} - 0{,}5 \cdot A^{-\frac{1}{2}} \cdot V^{-\frac{1}{2}}} \quad \text{kr/m}^3 \qquad (5)$$

Antages $m_A$ at være 1000 kr./$m^2$, kan $m_V$ beregnes som funktion af solfangerareal og tankvolumen. Dette er gjort på fig. 4 for solfangerarealer på 30, 40 og 50 $m^2$.

Kendes den marginale tankpris $m_V$, kan tankstørrelsen V let findes. Med $m_V$ lig f.eks. 3000 kr/$m^3$ findes af figuren for de 3 solfangerstørrelser de optimale tankvolumener som

| solfanger, $m^2$ | tank, $m^3$ |
|---|---|
| 30 | 2,4 |
| 40 | 3,8 |
| 50 | 5,7 |

Fig. 4 kan selvfølgelig også benyttes til at finde det optimale solfangerareal, når tankstørrelsen og $m_V$ er givne.

Optimering af konstruktionsændringer.

Det gennemgåede optimeringsprincip kan kun benyttes, når der er tale om mindre eller marginale ændringer. I tilfælde, hvor der er tale om enten-eller udførelser som f.eks. 1 eller 2 lag glas, må man derfor benytte gennemsnitsbetragtninger. Dette skal illustreres over for de tidligere beregnede alternative konstruktionsændringer:

Solvarmeanlægget med 50 $m^2$ solfanger og 5 $m^3$ tank har en årlig ydelse beregnet af ligning (3) på 7300 kWh. Dette giver for en total anlægspris på f.eks. 100.000 kr. en gennemsnitlig ydelse på 73 kWh/1000 kr. En konstruktionsændring ville gøre anlægget mere rentabelt, såfremt den vil medføre en større gennemsnitlig ydelse. Såfremt de følgende konstruktionsændringer kan gennemføres for mindre end de her udregnede beløb, vil de være økonomisk fordelagtige:

| | |
|---|---|
| 2 lag glas | 17.500 kr. |
| hældning 38 grader | 12.500 kr. |
| azimuth 0 grader | 5.000 kr. |
| gulvvarme | 12.500 kr. |



Afslutning.

Det skal understreges, at det her skitserede anlæg ikke er projekteret endnu, hvorfor de anførte priser er tilfældigt valgte og således ikke direkte kan indgå i en optimering men kun belyse de gennemgåede principper.

Efterskrift.

Blandt andet på grundlag af de foranstående beregninger blev det besluttet at projektere et solvarmeanlæg med følgende størrelse:

| | |
|---|---|
| Solfanger | 50 $m^2$ |
| Akkumuleringstank | 5 $m^3$ |
| Dimensionering af varmeanlæg | 60/40 |

Desuden skal solfangeren have en hældning på 38 grader fra vandret og 2 dæklag af glas.

Tankplaceringen har været diskuteret, og bortset fra nedgravning i jorden, der ikke er ønskelig p.gr.a. vanskelige kontrolmuligheder af korrosion og varmetab og derfor ikke blev vurderet, fandtes den billigste løsning at være en placering i det uudnyttede loftsrum. Denne placering kræver dog, at den langsgående skillevæg udføres i forstærket udgave og placeres på fundament. Ligeledes er det nødvendigt at forstærke spærfoden, så den kan overføre vægten af tanken med indhold til de bærende vægelementer.

Alle de vedtagne konstruktionsændringer betyder en fordyrelse af solvarmeanlægget. Af disse "betales" det ekstra lag glas og den større taghældning af det forventede merudbytte af anlægget. Meromkostningerne for disse ændringer er skønnet til:

| | |
|---|---|
| 2 lag glas | ca. 5000 kr. |
| 38 graders taghældning | ca. 5000 kr. |

Med disse 2 ændringer i forhold til tidligere er den forventede ydelse beregnet v.hj.a. edb-programmet, og der findes på årsbasis:

dækningsgraden = 51%

fordelt således:

| | |
|---|---|
| rumopvarmning | 45% |
| varmt brugsvand | 71% |

Man finder altså, at investeringen på ca. 10.000 kr. kan give et "afkast" svarende til energibesparelsen mellem den tidligere fundne dækningsgrad på 40% (fig. 3) og nu 51%, hvilket svarer til ca. 2000 kWh/år.

Den større tåghældning giver udover øget solfangerydelse yderligere 2 fordele, nemlig bedre plads til tanken og mulighed for ejerne til evt. senere at udnytte det resterende loftsrum.

Ændringer af varmeanlægget fra en traditionel dimensioneringstilstand på 90/70 til 60/40 er, når man ikke medregner nogen udgifter forbundet med et lidt større pladskrav, en bedre investering, idet meromkostningerne for de større radiatorer er udregnet til ca. 2100 kr., mens merudbyttet af fig. 2 kan skønnes til ca. 1200 kWh/år.

Udførelse af et gulvvarmeanlæg, der yderligere forøger solvarmeanlæggets ydelse, kunne ikke accepteres p.gr.a. manglende erfaring inden for dette felt.

Tilbage er spørgsmålet, om solfanger og tank er rigtigt dimensioneret i forhold til hinanden. Dette forsøges belyst på følgende måde:

På grundlag af nogle få beregninger med det nu vedtagne anlæg kan ydelsen med nogen tilnærmelse udtrykkes af ligning (3), blot med nogle andre konstanter:

$$Y = (78-1050\cdot A^{-1}-1{,}9\cdot A^{\frac{1}{2}}\cdot V^{-\frac{1}{2}})\cdot 183 \text{ kWh/år} \qquad (6)$$

med begrænsningerne:

$$40 \leq A \leq 60$$

$$0{,}05 \leq V/A \leq 0{,}2$$



På samme måde som tidligere anført kan man optegne de økonomisk optimale sammenhænge mellem solfanger- og tankstørrelse som funktion af marginalpriserne. Dette er gjort på fig. 5, idet den marginale tankpris er optegnet som funktion af tankstørrelse og marginale solfangerpriser på henholdsvis 500, 1000 og 1500 kr/$m^2$, alle kurver gældende for 50 $m^2$ solfangerareal.

Placeringen af tanken i loftsrummet kræver som anført en stærkere spær- og vægkonstruktion. Disse ændringer er beregnet til at koste ca. 600 kr. pr. m tank, og da en cirkulærcylindrisk tank med en diameter på ca. 1,15 m har et rumindhold på 1 $m^3$ pr. m, fås at marginalomkostning til konstruktionsændringer er ca. 600 kr/$m^3$. På grundlag af oplysninger fra beholderfabrikanter er det skønnet, at tanken har en marginal købspris på ca. 1400 kr/$m^3$ incl. isolering, hvorefter den totale marginalpris bliver ca. 2000 kr.

Skønnes den marginale solfangerpris at være ca. 1000 kr/$m^2$, aflæses på fig. 5, at en økonomisk optimal tankstørrelse er 4,5 $m^3$. Nu er de her anførte priser behæftet med nogen usikkerhed, men den valgte tankstørrelse på 5 $m^3$ synes at være ret nær det økonomisk optimale.

En 5 $m^3$ vandtank opvarmet fra 50 til 90° C indeholder ca. 230 kWh, hvilket svarer til ca. 20 dages varmtvandsforbrug eller ca. 4 dages middel-rumopvarmningsbehov i fyringssæsonen. Til sammenligning hører også, at solindfaldet på solfangeren f.eks. i april er ca. 4,75 kWh/$m^2$ dag, og med en middeltemperatur i tanken på 70° C og en deraf følgende solfangereffektivitet på ca. 15% vil det tage 6-7 dage for de 50 $m^2$ at varme tanken op fra 50 til 90° C.

## Konklusion.

De gennemførte analyser viser, at det i et hus opført efter BR 77 synes muligt at dække ca. 50% af det årlige varmebehov med et solvarmesystem.

Dette betyder, at man i hele sommerhalvåret fra slutningen

af april til begyndelsen af oktober kan dække varmeforbruget alene ved hjælp af solenergien uden at have f.eks. et oliefyr kørende som suppleringsvarmekilde. Samtidig viser analysen, at det uden de helt store konstruktionsændringer og dermed for relativt små omkostninger er muligt at anbringe en stor akkumuleringstank i et ellers ubenyttet tagrum. Dette sidste dog under forudsætning af, at konstruktionsændringerne er planlagt allerede inden opførelsen af huset.



Referenceliste.


[1] Program for udbygning af dansk energiforskning og -udvikling. - første fase. Handelsministeriet, november 1976.

[2] Bygningsreglement 1977.

[3] Lawaetz, H. & Jørgensen, L.S.: Videnbank - 3 huses opvarmningsbehov. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Intern rapport april 1977.

[4] Lund, H.: Program BA4. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 46, 1976.

[5] Referenceåret - Vejrdata for VVS-tekniske beregninger. SBI rapport nr. 89, 1974.

[6] Krægpøth, K.: Eksplicit udbyttefunktion for solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 52, januar 1977.

[7] Raiss, W. & Töpritz, E.: Der Einfluss der Temperaturspreizung auf die Wärmeleistung von Radiatoren. Heiz. -Lüft. -Haustechn. 15, nr. 1 januar 1964.

[8] Lawaetz, H.: Beregning af solindfald. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 42, december 1975.

[9] Lawaetz, H.: Et solvarmesystem med varierende størrelse af akkumuleringstank. Varme - juni 1976.

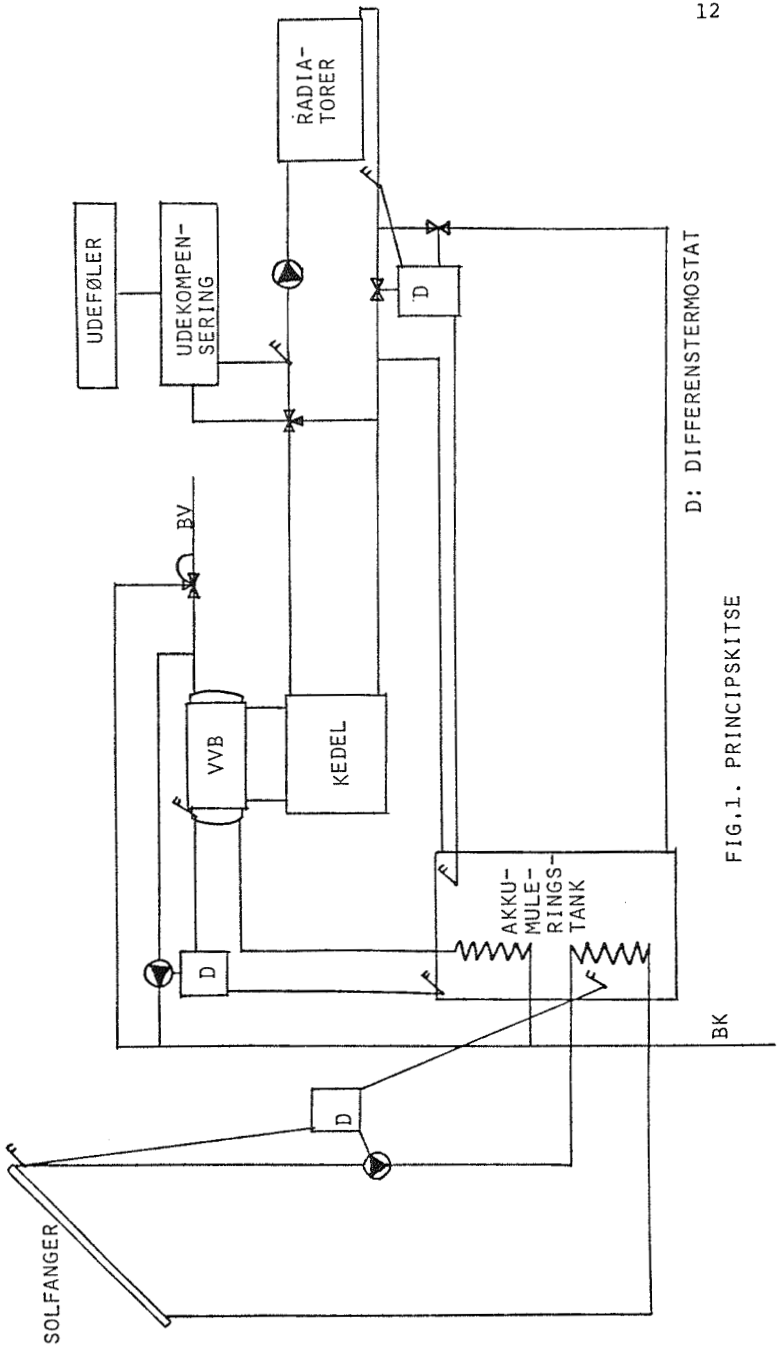
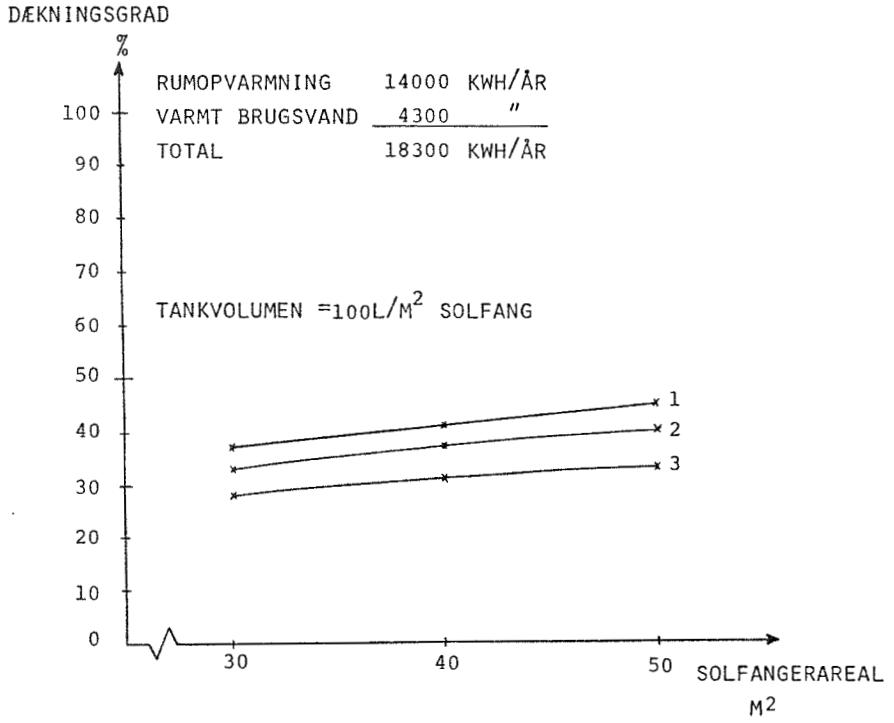



FIG.1. PRINCIPSKITSE

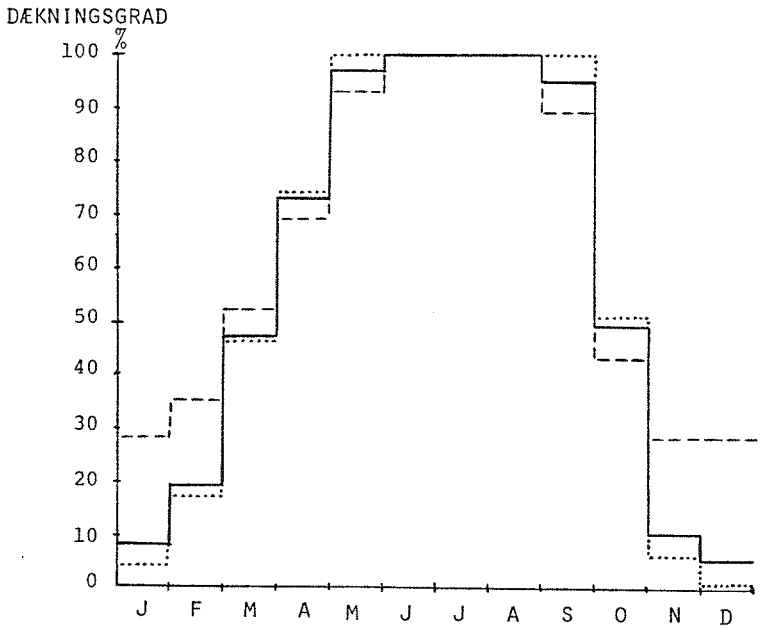





1. DIMENSIONERINGSTILSTAND 35/30
2. " 60/40
3. " 90/70

FIG. 2. DÆKNINGSGRAD SOM FUNKTION AF SOLFANGERAREAL OG DIMENSIONERINGSTILSTAND.

SOLFANGERAREAL : 50 $M^2$
TANKVOLUMEN : 5 $M^3$
DIMENSIONERINGSTILSTAND: 60/40




1. ---- DÆKNINGSGRAD AF VARMT BRUGSVAND
2. .... " " RUMOPVARMNING
3. —— " TOTALT

ÅRLIG DÆKNINGSGRAD = 40%.

FIG. 3. MÅNEDLIG DÆKNINGSGRAD.



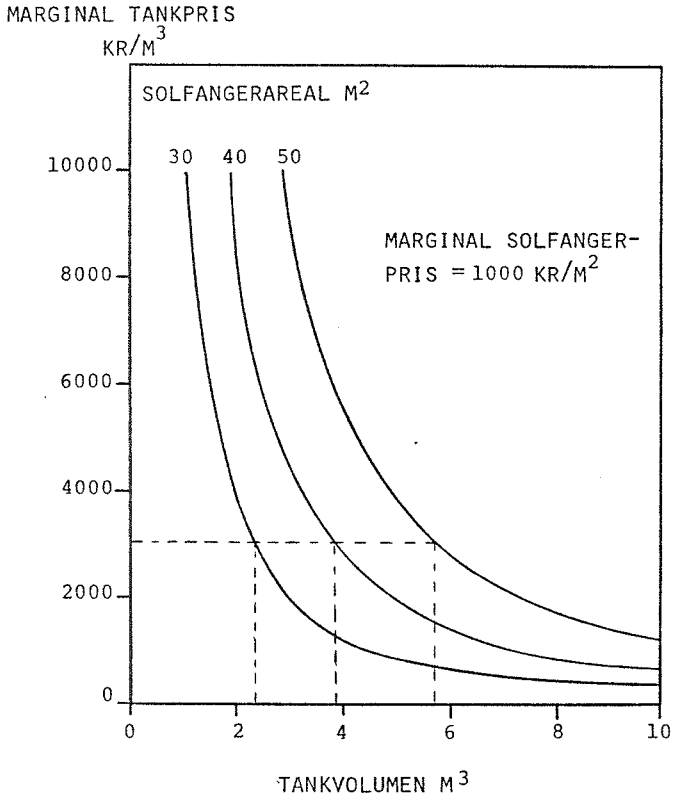



FIG. 4: MARGINAL TANKPRIS SOM FUNKTION AF TANKVOLUMEN OG SOLFANGERAREAL.

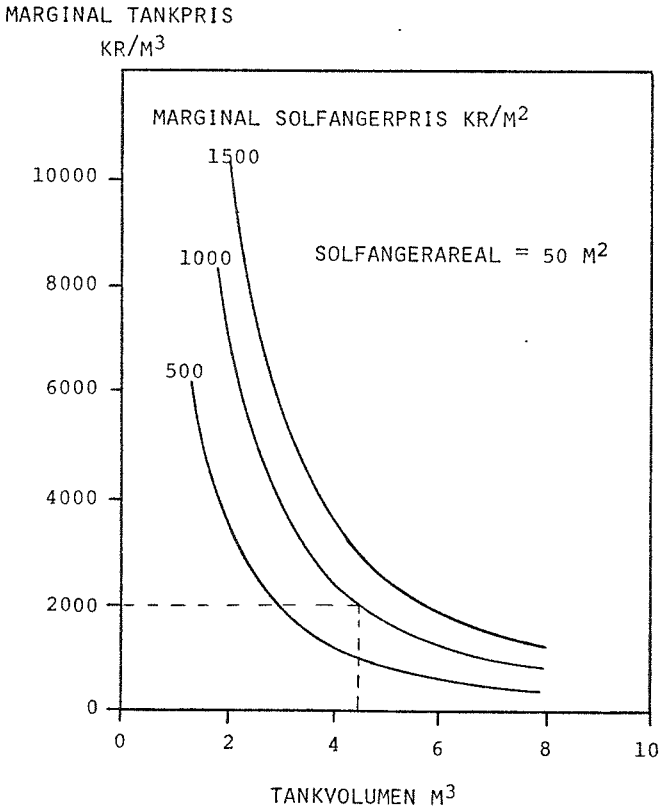



FIG. 5: MARGINAL TANKPRIS SOM FUNKTION AF TANKVOLUMEN OG MARGINAL SOLFANGERPRIS.