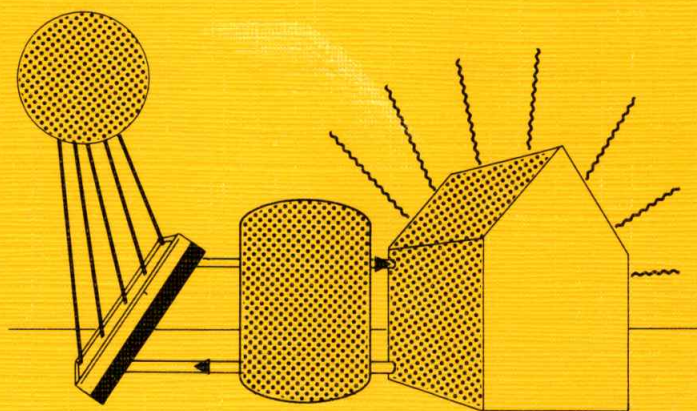
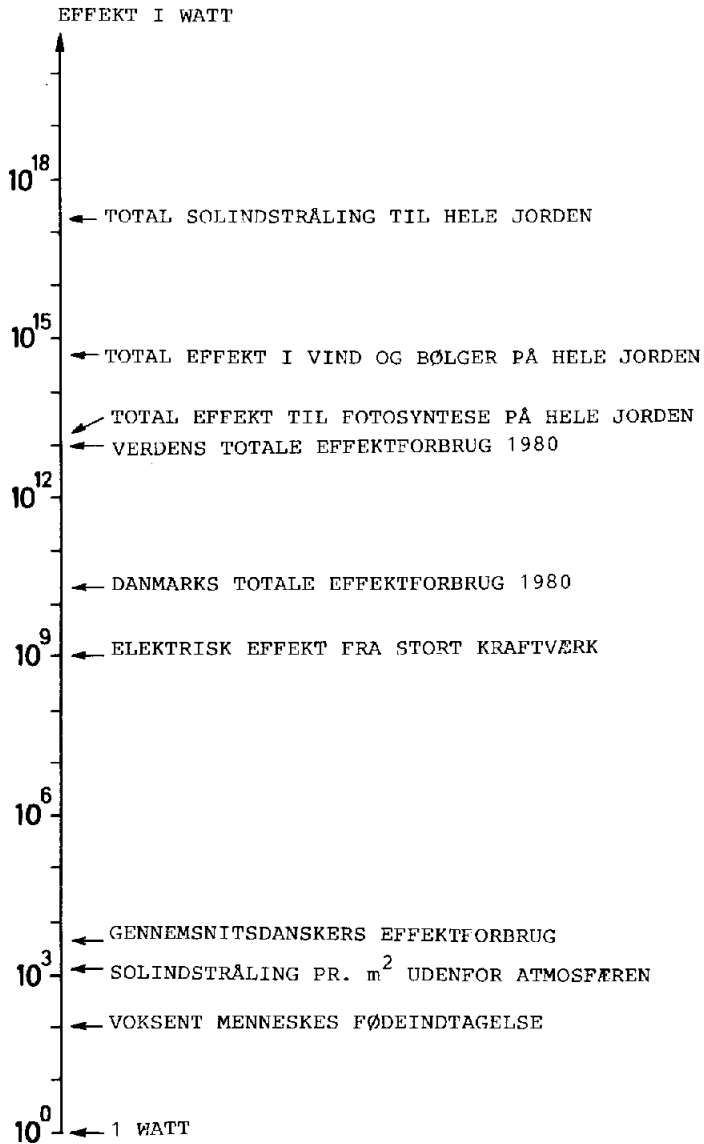


Frank Bason
Henry Nielsen

SOLENERGI og SOLVARMEANLÆG



VIGTIGE EFFEKT VÆRDIER



SOLENERGI og SOLVARMEANLÆG

**Frank Bason
Henry Nielsen**

SOLENERGI OG SOLVARMEANLÆG

© Forfatterne samt F & K Forlaget.

Renskrivning af manuskript: Rie Vangkilde.

Forsidetegning: Verner Blak Nielsen.

Trykt hos Budolfi Tryk i Aalborg, 1981.

ISBN 87-87229-08-0

Bøgerne kan rekvireres i pakker á 10 stk eller 25 stk
ved skriftlig henvendelse til:

F & K Forlaget

LMFK-sekretariatet

Slotsgade 2³

2200 København N.

Indholdsfortegnelse

	side
FORORD	5
1. SOLVARME I PERSPEKTIV	7
1.1. Dansk Energipolitik	7
1.2. Solvarmeanlæg i Danmark	11
1.3. Solenergi i USA	14
2. SOLENS STRÅLING	17
2.1. Solspektret - udenfor atmosfæren	17
2.2. Atmosfærens indflydelse på solspektret ...	20
2.3. Solstrålingsdata	22
3. SOLFANGEREN	29
3.1. Generelt om solfangeren	29
3.2. Den absorberede effekt (q_{abs})	31
3.3. Det termiske effekttab (q_{tab})	33
3.4. De fundamentale solfangerligninger	35
4. LAGERET	41
4.1. Generelt om varmelagring	41
4.2. Vand som lagringsmedium	44
4.3. Andre lagringsmuligheder	47
5. HELE SOLVARMEANLÆGGET	50
5.1. Indledning	50
5.2. Model for hele solvarmeanlægget	51
5.3. Konklusion på grundlag af EDB-simulering .	53
5.4. F-Chart metoden	56
5.5. Driftserfaringer	57

6. ØKONOMI	63
6.1. Generelle bemærkninger	63
6.2. Pengeøkonomi	64
APPENDIX A	
VARMETRANSPORT	71
A.1. Varmestråling	71
A.2. Varmeledning	77
A.3. Varmekonvektion	79
STORE ØVELSER	80
I. Energibesparelser i énfamiliehus	81
II. Måling af totalt solindfald	86
III. Måling af direkte solindfald	88
IV. Solfangerens karakteristikkurve	91
V. Lagertankøvelse	93
LITTERATURLISTE	95

Forord

"Solenergi og Solvarmeanlæg" er først og fremmest skrevet til valgfrit emne på gymnasiets matematisk- fysiske gren, men bogen vil formentlig også være anvendelig i andre sammenhænge.

Formålet med bogen er at give et overblik over de forskellige aspekter i forbindelse med den praktiske udnyttelse af solenergi til opvarmningsformål i Danmark. Vi mener, det er vigtigt ikke alene at forstå fysikken i et solvarmeanlægs funktion, men også at se og diskutere problemerne i den sammenhæng, hvori de forekommer i praksis. Der er derfor langt fra tale om nogen systematisk fysisk afhandling, og vi har prøvet at skrive de mere fysisk-matematiske afsnit af bogen så enkelt som muligt. Hovedvægten er i disse afsnit lagt på de grundlæggende fysiske principper, og vi har i så høj grad, vi har ment det forsvarligt, undladt alle komplicerende detaljer. Bogen er ikke en vejledning i bygning af solvarmeanlæg. Ønsker man selv at bygge et sådant anlæg, kan vi henvise til én af de gode bøger, der foreligger på dansk om netop dette emne, jævnfør litteraturlisten bag i denne bog.

Bogen er delt i to hovedafsnit. Første del består af kapitlerne 1 til 6, der indeholder en introduktion til fysikken bag udnyttelsen af solenergi til opvarmning og til de problemer, der knytter sig hertil. Anden del består af 6 store øvelser af såvel teoretisk som eksperimentel karakter. Vi har her lagt op til, at eleverne selv kan gå i dybden med et afgrænset emne i tilknytning til bogens hovedtema.

Det er nok ikke muligt at nå gennem hele bogen i løbet af et 10 eller 20 timers undervisningsforløb. Derfor vil vi her give nogle forslag til, hvorledes man efter vort skøn kan læse udvalgte dele af bogen. Men vi iler med at tilføje, at det naturligvis kun må opfattes som forslag; andre vil givetvis kunne finde ud af at bruge den på alternative måder, der er mindst lige så gode.

Bemærk at nedenstående forslagsliste er organiseret således, at omfang og sværhedsgrad er stigende ned gennem rækken. De to første forslag vil således udmærket kunne realiseres i 1.g, medens de to sidste givetvis vil egne sig bedre til 2. eller 3.g.

Forslag	Kapitler	Øvelser
1	1, 2, 6	I, II
2	1 - 3, 6	I - III
3	1 - 5	I - V
4	1 - 6 + Appendix A	Et udvalg

Vi har under udarbejdelsen af denne bog fået hjælp og vejledning af mange mennesker, men vi vil specielt rette en tak til følgende personer for deres mange konstruktive forslag til forbedringer: Finn Elvekjær, Torkild Vest Hansen, Steen Hoffmann, Kaj T. Hansen, Carl P. Knudsen, Henrik Lawawtz og Leo Højsholt-Poulsen. Vi ønsker også at takke de elever på Silkeborg Amtsgymnasium og Hasseris Gymnasium, der har været med til at afprøve foreløbige versioner af bogen.

Marts 1981

Frank Bason

Silkeborg Amtsgymnasium

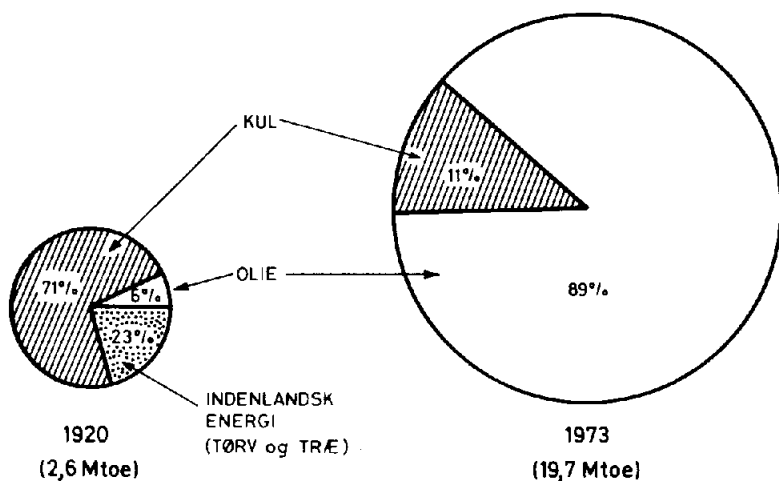
Henry Nielsen

Det fysiske Institut
Aarhus Universitet

1. Solvarme i perspektiv

1. Dansk energipolitik

Danmarks energiforbrug er i lighed med alle andre industrilandes vokset meget kraftigt i dette århundrede. I takt med denne vækst er en stadig større andel af forbruget blevet dækket af importeret olie, og Danmarks selvforsyningsgrad - d.v.s. den del af energiforbruget, der dækkes af indenlandske energikilder - er faldet drastisk (se figur 1.1).



Figur 1.1 Danmarks energiforbrug i 1920 og 1973 samt dets procentvise fordeling på energikilder. Enheden er Millioner tons olie ækvivalent (Mtoe). Der er benyttet følgende omregningsfaktorer: 1 tons olie = 1,5 tons kul = 5,3 tons tørv.

Det var de rigelige og billige olietilførsler fra nye store olieklender i Mellemøsten, der i årene efter 2. verdenskrig muliggjorde det moderne oliebaserede samfund. Der skabtes herved en velstandsudvikling uden sidestykke i historien, men samtidigt blev grunden også lagt til en næsten total afhængighed af nogle få olieeksporterende lande og nogle få multinationale olieselskaber. Denne afhængighed kom klart til udtryk under oliekrisen i 1973/74. I løbet af få måneder blev prisen på råolie således firedoblet, og de olieeksporterende arabiske lande truede oven i købet med at nedskære olieproduktionen drastisk for at opnå bestemte politiske mål. De pludselige prisforhøjelser blev en stærkt medvirkende årsag til den alvorlige økonomiske krise, der lige siden har plaget verdensøkonomien. Derimod blev olieboycotten ikke rigtigt til noget i denne omgang, men alene truslen herom var dog nok til at fremkalde en række panikagtige reaktioner i de olieimporterende lande. Alt i alt må det konstateres, at oliekrisen i 1973 var en glimrende anskuelsesundervisning i de moderne I-landes uhyggelige sårbarhed overfor svigt i olieforsyningerne.

Også i Danmark skabte oliekrisen en erkendelse af, at den tidligere førte energipolitik - eller rettere mangel på samme - var forfæjlet. I 1976 fremlagde den daværende handelsminister derfor en detaljeret energiplan (HM-76), der skulle styre udviklingen frem til 1995. Planen havde som sit overordnede mål at reducere Danmarks olieafhængighed så meget som overhovedet muligt i løbet af denne periode. Og dette mål skulle dels søges opnået ved hjælp af energibesparelser (først og fremmest isolering af den ældre boligmasse og udnyttelse af spildvarme fra kraftværker) og dels ved at sprede energiforsyningen på mange forskellige energikilder, nemlig kul, olie, naturgas, atomkraft og vedvarende energi(*). HM-76 regnede med, at udviklingen frem til 1995 ville medføre en vækst i energibehovet fra 19,2 Mtoe i 1975 til 33,8 Mtoe i 1995, men at dette

(*) Vedvarende energi omfatter: Sol, vind, biogas, træ, overskudshalm, jordvarme, geotermisk energi, o.s.v.

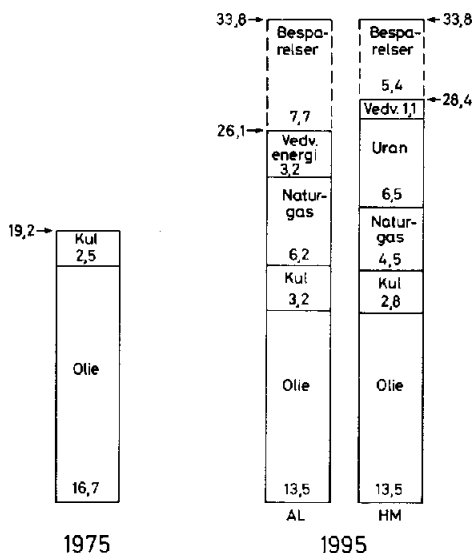
teoretiske energibehov ville kunne nedbringes til 28,3 Mtoe ved hjælp af energibesparelser. Det virkelige energibehov på 28,3 Mtoe om året forestillede man sig så dækket med de før nævnte energikilder, således som det er vist på figur 1.2. Olieandelen i Danmarks energiforsyning skulle ifølge denne plan således kunne reduceres fra 89% i 1973 til 48% i 1995.

En skitse til en alternativ energiplan (AL-76) så også dagens lys i 1976, og nøgletal fra denne plan er ligeledes vist på figur 1.2. For at lette sammenligninger mellem de to energiplaner valgte AL-planens forfattere at regne med samme teoretiske energibehov og samme oliebehov som HM-planen for året 1995. Som det fremgår af figur 1.2, er AL-planen udarbejdet af en gruppe mennesker, der er utrygge ved atomkraft, og som ønsker en stærkere satsning på energibesparelser og på vedvarende energi, end HM-planen lægger op til. Således antager AL-planen, at vedvarende energikilder kan dække 12% af DK's virkelige energibehov i 1995, medens HM-planen kun regner med 4%. Det lyder måske ikke af så meget, men for at sætte tallene i relief kan vi antage, at bare 1% af DK's energibehov i 1995 skal dækkes af solvarmeanlæg. Dette vil nemlig kræve, at der skal installeres mere end en halv million anlæg med et solfangerareal på hver 10 m², jævnfør oplysningerne i kapitel 5.

Om udviklingen siden 1976 kan kort oplyses følgende: Regeringen har foreløbig udskudt en beslutning om atomkraft, indtil det er afklaret, om man kan foretage en betryggende opbevaring af atomaffald i den danske undergrund, og indtil en nærmere vurdering af sikkerheden ved atomkraftværker har fundet sted. Derimod er både kul- og naturgasprojekterne begge ved at blive realiserede, og alt tyder på, at man her sagtens kan nå de opstillede mål for 1995. For energibesparelsernes vedkommende har det hidtil knebet lidt med at holde det planlagte tempo. Folketinget har derfor i 1980 vedtaget forbedrede tilskudsordninger, som antages at kunne puste nyt liv i folks interesse for at gennemføre energibesparende foranstaltninger. Med hensyn til de vedvarende energikilders mulighed for at leve op til forudsætningerne

i HM og AL-planerne er det foreløbigt vanskeligt at udtale sig med sikkerhed. Dette skyldes bl.a., at mange af de vedvarende energikilder endnu befinder sig i en udviklingsfase, således at pris og ydeevne indtil videre er noget usikre. Angående detaljer henviser vi til Varmeplanudvalgets 3. delbetænkning fra april 1980.

I løbet af foråret 1981 forventes en ny samlet energiplan fra energiministeriet, hvori der tages højde for udviklingen fra 1976 frem til i dag. Det må bl.a. forventes at komme til at spille en stor rolle, at man i de forløbne fire år har gjort nye betydelige olie - og gasfund i den danske del af Nordsøen. Der synes også at være en voksende erkendelse af, at energibehovet i 1995 ikke behøver at blive så stort, som man troede i 1976. Ved en kraftig indsats burde det derfor være muligt at forøge Danmarks selvforsyning med energi til omkring 50% i 1995.



Figur 1.2 Danmarks faktiske energiforbrug i 1975 og det forventede energiforbrug i 1995 fordelt på energikilder. Oplysningerne for 1995 er baseret på de to energiplaner HM-76 og AL-76. Alle tal er i enheden Mtoe.

2. Solvarmeanlæg i Danmark

Vi skal i denne bog se på, hvorledes man kan udnytte den vedvarende energi i solens stråling^(*) til fremstilling af varmt brugsvand og til rumopvarmning. Der er adskillige andre muligheder for udnyttelse af solenergi (jfr. afsnit 1.3), men der er dog næppe tvivl om, at solvarmeanlæg er den mest udviklede og den mest nærliggende anvendelsesform under danske forhold. Det hænger sammen med følgende kendsgerninger:

- 1) I et typisk dansk parcelhus er det årlige energiforbrug til opvarmning og til varmt brugsvand 150-200 kWh/m², medens det årlige solindfald på en sydvendt tagflade vil være omkring 1200 kWh/m².
- 2) Der behøves ingen vanskelig ny teknologi for at realisere denne form for anvendelse af solenergi, men der er naturligvis behov for en stadig forbedring og billiggørelse af anlæggene.
- 3) Ikke mindre end 45% af det danske energiforbrug går til opvarmningsformål, og heraf bliver over halvdelen dækket af olie. Men olie er en meget fin energikilde, der kan anvendes til en lang række formål, nemlig til elfremstilling, som drivmiddel i biler, fly, tog og skibe, som råstof i den kemiske industri osv. Der er derfor al mulig grund til først og fremmest at benytte den dyre olie til disse formål, hvor den kun vanskeligt lader sig erstatte. Simpel opvarmning kan derimod klares på mange måder, f.eks. ved at udnytte spildvarme fra kraftværker og industrivirksomheder, ved at udnytte varme i jordens øverste lag (jordvarmeanlæg) samt ved hjælp af vind- og solvarmeanlæg.

Når solvarmeanlæg alligevel ikke har fået en større udbredelse end tilfældet er, skyldes det væsentligst, at anlæggene endnu er ret dyre i forhold til den oliebesparelse, der kan

(*) En anden form for vedvarende energi (vindenergi) er behandlet i en tidligere bog i Fysik og Energi-serien. F.Elvekjær og H.Nielsen: "Vindenergi og Vindmøller", F&K-forlaget 1980.

opnås (se kapitel 6). Dette gælder i særlig grad for store anlæg, da det er en karakteristisk egenskab ved solvarme, at jo større andel af forbruget, der ønskes dækket, jo mindre bliver anlæggets ydeevne per arealenhed. Denne fundamentale kendsgerning (som dokumenteres i kapitel 5) gør, at det i hvert fald for øjeblikket må anses for urealistisk at dække et helt års varmeforbrug under danske klimaforhold med solvarme.

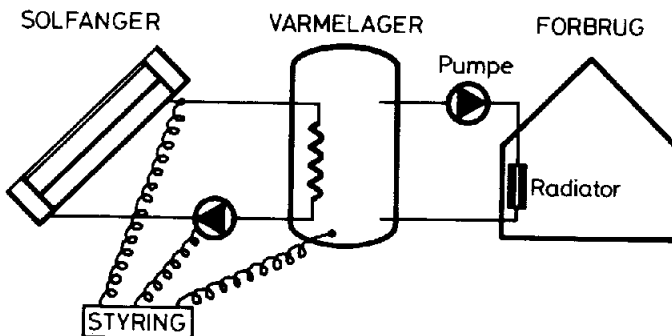
Rent privatøkonomisk er solvarmeanlæg måske ikke så attraktive endnu, men de stærkt stigende energipriser og den igangværende tekniske udvikling kan dog forholdsvis hurtigt få det økonomiske pendul til at svinge over til fordel for solvarmeanlæg og andre energibesparende foranstaltninger. Allerede i dag er således de fleste former for isolering en særdeles fornuftig investering og nogle vedvarende energianlæg en rimelig god investering. Det skal desuden anføres, at man ved en samlet bedømmelse af solvarmeanlægs muligheder i den fremtidige danske energiforsyning også bør lægge betydelig vægt på samfundsøkonomiske fordele ved udnyttelse af solvarme. Nogle af disse fordele ved solvarmeanlæg (og i øvrigt andre vedvarende energianlæg) er følgende:

- de er uafhængige af forsyninger udefra
- de er valutabesparende
- de er beskæftigelsesfremmende
- de er miljøvenlige.

Vi vil slutte dette afsnit med at understrege, at denne bog handler om aktive solvarmeanlæg, hvis opbygning er skitseret i figur 1.3. Anlægget fungerer ved, at pumpen transporterer en væske op til solfangeren. Her opvarmes væsken af solens stråler og føres videre til varmelageret, hvor den ved at løbe gennem en varmeveksler afleverer sin varme til mediet i varmelageret. Den således afkølede solfangervæske pumpes derpå igen op til solfangeren, og processen gentages. En styringsenhed, der konstant måler temperaturen både i solfangeren og i varmelageret, sikrer, at pumpen kun kører, når der faktisk er energi at hente i solfangeren.

Foruden aktive solvarmeanlæg findes der også passive solvarmeanlæg. Det er lidt svært at give en præcis defini-

tion af, hvad der menes hermed; men hovedideen er, at man tilstræber at give boligen en sådan orientering og arkitektonisk udformning, at disse foranstaltninger i sig selv kan formindske energibehovet væsentligt. Ved passive solvarmeanlæg indgår der altså ikke mere eller mindre kompliceret teknik, som er nødvendig ved de aktive anlæg (solfanger, pumpe, ventiler, termostater etc.). Det er muligt, at denne form for solvarmeanlæg - der i reglen vil være forholdsvis billig - vil vise sig at være den bedste på længere sigt. Endnu savnes dog konkrete undersøgelsesresultater, i særdeleshed under danske klimaforhold. Angående passive solvarmeanlæg nøjes vi derfor med at henvise til et par artikler i Vedvarende Energi no. 18 og 24 samt til en rapport om Nulenergihuset på Danmarks Tekniske Højskole. Nulenergihuset, der var planlagt allerede før oliekrisen i 1973, er ganske vist også udstyret med en meget stor solfanger, hvis energiproduktion i øvrigt er ret besked. Men huset er først og fremmest interessant, fordi det i betydelig grad bygger på passive solvarmeprincipper: Ingen vinduer mod nord, skodder for vinduerne om natten, varmegenvinding, kraftig isolering osv. Angående amerikanske forhold, se (Anderson and Michal, 1978).



Figur 1.3 Skitse af de vigtigste komponenter i et aktivt solvarmeanlæg. Varmetransporten kan ske med luft eller med væske. Forbruget kan finde sted ved en varmtvandshane eller ved en radiator.

3. Solenergi i USA

Hensigten med dette yderst summariske afsnit er at henlede opmærksomheden på den meget spændende udvikling, der har fundet sted i USA indenfor solenergiområdet i løbet af 70'erne. Når vi specielt har valgt USA ud, er det fordi dette land så ubetinget er foregangsland vedrørende den praktiske udnyttelse af solenergi til alle mulige formål. Udviklingen har dog først for alvor taget fart fra 1973. Det år var der fra statens side kun stillet et symbolsk beløb på ca. 1 million \$ til rådighed for forskning og udvikling af alle former for solenergi; men i 1980 var beløbet steget til næsten 1000 millioner \$! Den voksende tillid til at solenergien vil kunne spille en betydelig rolle i USA's energiforsyning allerede i dette århundrede, kommer også til udtryk i en tale, daværende præsident Carter holdt i april 1980. Heri opstillede han som mål, at solenergi i videste forstand skal bidrage med ikke mindre end 20% af landets energiforsyning i år 2000 (de 8% heraf er vandkraft, der jo i sidste instans også er forårsaget af solens stråling).

Amerikanerne deler alle solenergiprojekter op i seks hovedområder, som vi her vil kommentere ganske kort:

1. Solvarmeanlæg. Det er værd at bemærke, at solvarmeanlæg ikke er noget nyt i USA. Således blev der alene i den solrige sydstat Florida solgt ikke mindre end 60.000 små solvarmeanlæg til fremstilling af varmt brugsvand i årene 1935-1941. Disse anlæg forsvandt dog efterhånden i takt med den billige olies fremtrængen efter 2. verdenskrig. Men situationen er nu igen vendt om, og overalt i USA er der et voldsomt ekspanderende marked for solvarmeanlæg.
2. Vindmøller. Også her er der en gammel tradition i USA, eftersom der fandtes vindmøller på tusindvis af amerikanske farme i begyndelsen af dette århundrede.
3. Biomasse. Indenfor dette område forskes der i dyrkning af særligt hurtigtvoksende planter, der enten kan bruges direkte som fast brændsel eller anvendes som råmateriale ved fremstilling af forskellige flydende brændsler, som alkohol eller methanol.

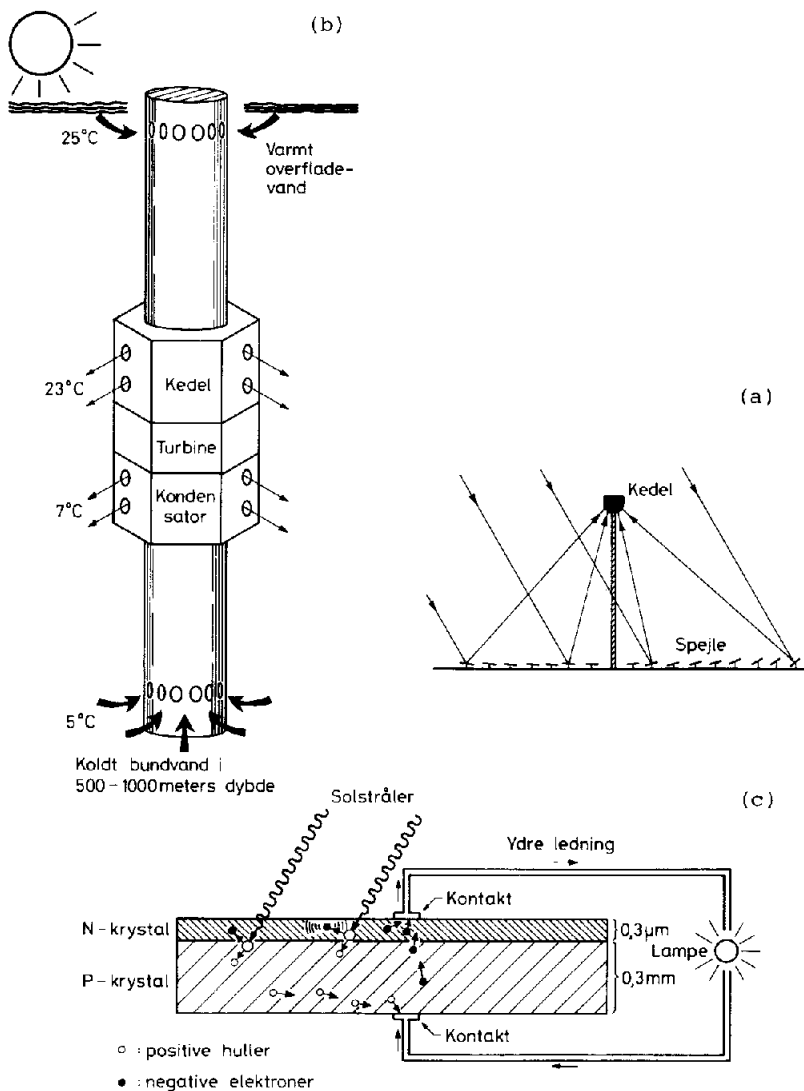
4. STEC ("Solar Thermal Electric Converters"), kan også kaldes Tårnkraftværker. Ideen er at anbringe et uhyre stort antal individuelt styrbare spejle i et ørkenområde og at orientere disse spejle således, at solstrålerne reflekteres op mod en kedel på toppen af et højt tårn (se figur 1.4a). I kedlen er der vand, som bringes op på en temperatur på flere hundrede grader Celsius, hvorved der dannes damp under højt tryk. Dampen kan så ledes gennem en turbine af helt samme type som i et moderne el-værk.

Det første STEC-demonstrationsanlæg på 10 MW elektrisk effekt skal påbegyndes ved Barstow, Californien i 1981.

5. OTEC ("Ocean Thermal Electric Converters") er et andet gigantisk projekt, der går ud på at udnytte temperatur-differencen mellem varmt overfladevand og koldt bundvand i de tropiske have (se figur 1.4b). Temperaturforskellen er dog så lille (ca. 20°C), at omdannelsen fra varme til mekanisk energi i turbinen kun kan finde sted med meget ringe virkningsgrad; i praksis regner man med at kunne opnå ca. 2%. Men da "brændslet" jo er gratis, er der måske alligevel muligheder i denne idé.

Det første OTEC-demonstrationsanlæg (1 MW elektrisk) er nu ved at blive installeret i havet ud for Hawaii.

6. Solceller. Solenergi kan også omdannes direkte til elektricitet ved hjælp af solceller (figur 1.4c). Af pladshensyn kan vi ikke komme ind på at diskutere en solcelles virkemåde. Vi henviser interesserede til (Chalmers, 1976) og nøjes her med at fastslå, at (a) solceller omdanner typisk 10-15% af det indfaldende sollys til elektricitet (b) solceller kan forbindes i parallel og i serie indtil ønsket spænding og strømstyrke er opnået (c) solceller indeholder ingen bevægelige, mekaniske dele og (c) solceller er endnu meget dyre (ca. 10 \$ pr. W ved maksimalt solindfald), men prisen er stadigt og hurtigt faldende. Målet er at reducere prisen til mindre end 1 \$ pr. W ved slutningen af 80'erne, da dette skønnes at ville åbne op for et uhyre marked for solceller til alle formål. Angående en uddybende behandling af dette afsnit, se for eksempel reference (E) samt (Energy, 1979)



Figur 1.4 a) skitse af STEC, b) skitse af OTEC
c) Princippet i en solcelle.

2. Solens stråling

1. Solspektret udenfor atmosfæren

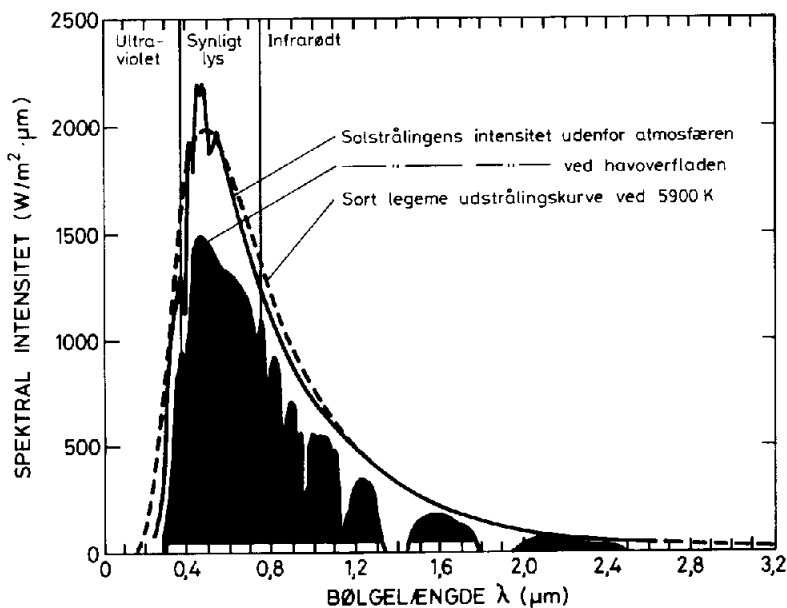
Langt størstedelen af den enorme effekt, der produceres ved kerneprocesser i solens indre, forlader solens overflade som elektromagnetisk stråling. Den samlede elektromagnetiske strålingseffekt, der passerer gennem en flade på 1 m^2 vinkelret på strålingens retning, kaldes solstrålingens intensitet på det pågældende sted i rummet. Den betegnes med bogstavet I , og måleenheden er altså W/m^2 . Tænkes fladen specielt anbragt ude i jordens middelf afstand fra solen (ca. 150 millioner kilometer), men stadig udenfor jordens atmosfære, har I en ganske bestemt værdi. Denne værdi er

$$I_{\text{sk}} = 1353 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

der betegnes solarkonstanten. Den er målt præcist ved hjælp af nøjagtige pyranometre^(*) om bord i satellitter. På grund af ændringer i jord-sol afstanden ændres solstrålingens intensitet udenfor atmosfæren med ca. $\pm 3\%$ i årets løb. Værdien er højest (ca. 1395 W/m^2) omkring 1. januar, og den når et minimum (ca. 1310 W/m^2) et halvt år senere. Intensiteten er altså størst i den nordlige halvkugles vintermåneder, hvilket faktisk virker en smule tempererende på klimaet på denne halvkugle.

(*) Til måling af solindfald benyttes en række forskellige instrumenter, hvoraf de mest almindelige er pyranometre og pyrheliometre. I dette afsnit berettes hvad disse instrumenter kan måle, men ikke hvorledes de fungerer. De, der er interesserede heri, henvises til øvelserne II og III bag i bogen.

Solens stråling er sammensat af en hel stribe af bølgelængder, der stort set alle falder i intervallet $[0,2 \mu\text{m}; 10 \mu\text{m}]$. Denne bølgelængdefordeling kaldes for solens spektrum. Svarende til den totale strålingsintensitet I på et givet sted i rummet indføres derfor også den spektrale intensitet $I(\lambda)$, der er defineret som intensiteten pr. bølgelængdeenhed omkring bølgelængden λ . Intensiteten i det meget smalle bølgelængdeinterval $\Delta\lambda$ omkring λ er altså givet ved $I(\lambda) \cdot \Delta\lambda$. Da man som bekendt kan skille de enkelte bølgelængder i solspektret ud fra hinanden ved hjælp af et prisme eller et bøjningsgitter, er man følgelig i stand til at måle solstrålingens spektrale intensitet $I(\lambda)$. Resultatet fremgår af figur 2.1.



Figur 2.1 Den spektrale intensitet af solindstrålingen udenfor jordens atmosfære ses sammen med en tilsvarende kurve for solstrålingen ved havoverfladen (efter lodret passage gennem en klar og ren atmosfære). Endelig vises den spektrale intensitet for stråling fra et absolut sort legeme ved 5900 K.

Ved at foretage en opdeling af hele solspektret i meget smalle delintervaller $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots$ og ved at bruge definitionen på $I(\lambda)$ kan man let indse, at arealet under den fuldt optrukne kurve netop er lige med solarkonstanten, altså 1353 W/m^2 .

På tilsvarende måde kan man også finde den samlede intensitet af solstrålingen med $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$ (det ultraviolette område), med $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ (det synlige område) og med $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ (det infrarøde område). Resultaterne er angivet i nedenstående tabel.

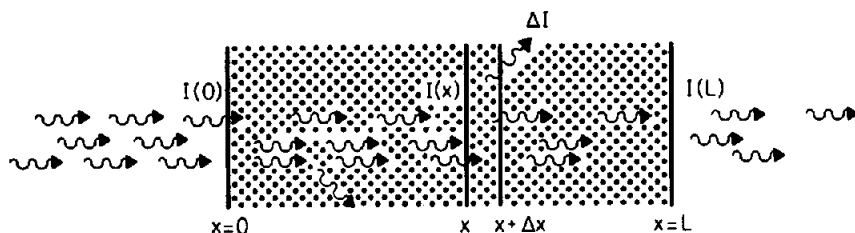
Ultraviolet $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$	Synlig $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	Infrarød $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$	Ialt
7%	47,3%	45,7%	100%
95 W/m^2	640 W/m^2	618 W/m^2	1353 W/m^2

Tabel 2.1 Solspektrets fordeling - udenfor jordens atmosfære - i hovedspektralområderne: ultraviolet, synlig og infrarød.

Bemærk, at der på figur 2.1 også er vist en stiplede kurve, der er betegnet som sort legeme udstrålingskurve ved 5900K. Den følger den faktiske spektrale intensitetskurve meget smukt for næsten alle bølgelængder, og følgelig er solens overflade med god tilnærmelse et sort legeme med temperaturen 5900 K. Kort fortalt er et sort legeme et ideelt legeme, hvis udstråling alene afhænger af overfladens absolutte temperatur. Her behøver vi dog ikke at gå i yderligere detaljer med begrebet sort legeme, da det ikke er absolut nødvendigt i de følgende kapitler. Ønsker man at vide mere om dette emne, kan vi anbefale, at man studerer Appendix A.

2. Atmosfærens indflydelse på solspektret

Under passagen ned gennem jordens atmosfære vil solstrålingen blive modificeret på grund af forskellige sprednings- og absorptionsprocesser. En spredningsproces finder sted, når én af solstrålingens fotoner(*) støder sammen med et luftmolekyle eller en støvpartikel og efter stødet fortsætter i en anden retning end den oprindelige. En absorptionsproces finder derimod sted, når en foton bruger sin energi til at anslå (excitere) et af luftens molekyler til et højere energiniveau. I begge tilfælde bliver intensiteten af den oprindelige solstråling altså reduceret.



Figur 2.2 Solstråling (lys) passerer gennem et medium og mister en konstant brøkdel af sin styrke ved passage gennem en lille tykkelse Δx .

Man benytter ofte en simpel matematisk model til at beskrive den intensitetsformindskelse, der finder sted, når elektromagnetisk stråling (lys) passerer gennem et stoflag (jfr. figur 2.2). Vi betragter et indtrængende parallelt strålebundt med intensiteten I_0 . Når strålingen passerer gennem en lille tykkelse Δx , forsvinder som nævnt en del af strålingen (ΔI) som følge af sprednings- og absorptionsprocesser. ΔI antages i modellen at være proportional med både

(*) Den elektromagnetiske stråling fra solen er sammensat af en uhyre sværm af mindste enheder, der betegnes som lyskvanter eller fotoner.

den øjeblikkelige intensitet I og med tykkelsen Δx ; altså

$$\Delta I = -K \cdot \Delta x \cdot I \quad (2.2)$$

hvor K kaldes den totale sprednings- og absorptionskoefficient. Såfremt K kan betragtes som en konstant, er det simpelt at opskrive løsningen til denne ligning(*). Intensiteten $I(x)$ efter at stykket x er gennemløbet er givet ved

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-K \cdot x} \quad (2.3)$$

der jo tilsyneladende gør det meget let at beregne intensiteten ved jordoverfladen. Vi skal bare kende K og atmosfærens samlede tykkelse (se opgave 2.3).

Desværre er situationen ikke så enkel som fremstillet ovenfor, for i praksis vil K afhænge af en lang række parametre. For det første af lysets bølgelængde λ , da såvel sprednings- som absorptionsprocesserne viser sig at variere meget stærkt med bølgelængden. Desuden afhænger K af atmosfærens sammensætning, først og fremmest af koncentrationen af vanddamp og støvpartikler; og som bekendt varierer disse koncentrationer meget fra den ene geografiske lokalitet til den anden, men undertiden også fra time til time på den samme geografiske lokalitet. I praksis vil det derfor være umuligt at lave en eksakt forudberegning af solstrålingens intensitet og spektralfordeling ved jordoverfladen på et givet sted og til et givet tidspunkt.

Den mindst mulige indflydelse, som atmosfæren kan have på solspektret, finder man naturligvis på et sted, hvor luften er helt klar og ren (ørkenklima), og hvor solen står i

(*) Har man kendskab til differentialregning, ser man umiddelbart, at for $\Delta x \rightarrow 0$ er (2.2) ækvivalent med differentiaalligningen

$$\frac{dI}{dx} = -K \cdot I \quad (2.4)$$

Ved indsættelse kan det nu let kontrolleres, at $I(x)$ givet ved (2.3) er en løsning til (2.4).

zenit. I denne situation er solstrålernes vejlængde gennem atmosfæren jo den kortest mulige, og solstrålerne er altså mindst muligt udsat for sprednings- og absorptionsprocesser. Målinger af solstrålingens spektrale intensitet ved havoverfladen og under disse ideelle forhold er vist som den nederste kurve på figur 2.1. Det fremgår heraf, at solspektret er stærkest påvirket af atmosfæren i det infrarøde område, idet der her optræder kraftig absorption omkring visse bølgelængder. Årsagen hertil er tilstedeværelsen af vandmolekyler (H_2O) og kuldioxydmolekyler (CO_2) i atmosfæren.

3. Solstrålingsdata

Det skulle nu være klart, at en forudsigelse af et solvarmeanlægs produktion af nyttig energi i praksis må baseres på målte solstrålingsdata. Vi vil derfor præsentere et udvalg af solstrålingsdata, specielt data, der er baseret på danske målinger. Men først defineres et par begreber, der benyttes i det følgende:

Den direkte solstråling er den del af solindfaldet, der når jordens overflade uden nogen væsentlig afbøjning i atmosfæren. Den øjeblikkelige værdi måles med et pyrliometer (jfr. øvelse III).

Den diffuse solstråling er den resterende del af solindfaldet. Dens retning er blevet ændret ved spredning på partikler (herunder molekyler) i atmosfæren.

Globalstrålingen er summen af den direkte og diffuse solstråling. Globalstrålingens øjeblikkelige værdi måles v.h.a. et pyranometer (jfr. øvelse II).

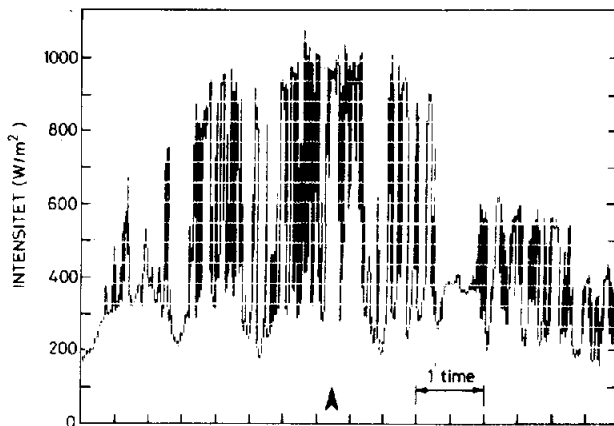
På figur 2.3 vises, hvordan globalstrålingen typisk kan variere i Danmark i løbet af to sommerdage - den ene skyet og den anden næsten skyfri. Målingerne fandt sted i Silkeborg i sommeren 1980 og blev foretaget med et pyranometer, der var koblet til en x-t skriver, som udskrev den målte effekt med kort tids mellemrum. Det er klart, at man med denne figur til rådighed kan finde den samlede globalstråling in-

denfor et vilkårligt valgt tidsrum af de pågældende dage; nemlig som det areal, der afgrænses af globalstrålingskurven og de lodrette linier gennem intervalendepunkterne. Ved de konkrete målinger, der er vist på figur 2.3, blev den samlede globalstråling i begge 8-timers måleperioder målt direkte ved hjælp af elektronisk udstyr (en såkaldt integrator). Resultatet for den skyede og den skyfrie dag viste sig at være henholdsvis $3,67 \text{ kWh/m}^2$ og $6,16 \text{ kWh/m}^2$.

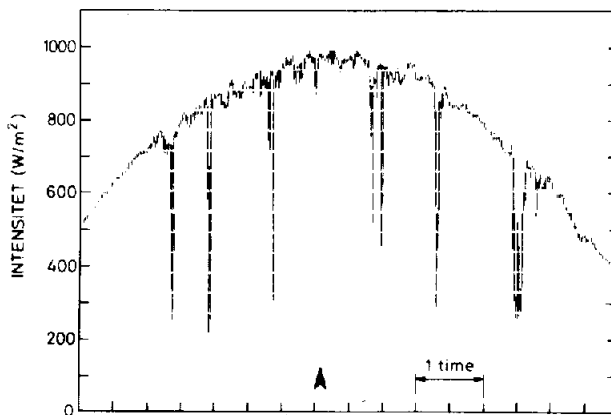
Kendskab til den øjeblikkelige globalstråling er helt afgørende, såfremt man ønsker at følge en sædvanlig plan solfangers ydelse fra time til time gennem en solskinsdag (det skal vi se et eksempel på i kapitel 3). Hvis man derimod er mere interesseret i et solvarmeanlægs ydelse over en lang periode - f.eks. en måned eller et år - da har man i stedet brug for målinger af den samlede globalstråling måned for måned. Sådanne data er rutinemæssigt blevet indsamlet af Meteorologisk Institut i København gennem snart mange år. I tabel 2.2 viser vi et resumé af 10 års måledata franetopdenne lokalitet. Bemærk, at det er solindstrålingen på en vandret flade, der er blevet målt. Bemærk også, at den diffuse komponent udgør næsten 50% af globalstrålingen på årsbasis. Denne kendsgerning forklarer, at der her i Danmark kun har været arbejdet meget lidt med koncentrerende solfangere, som kræver parallelle indgangsstråler for at fungere.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	TOTAL
Global-stråling	13	29	72	116	153	179	162	139	83	42	19	11	1018
Diffus Stråling	8	17	36	52	70	76	76	57	40	22	11	7	471
Middel Udetemp.	0,1	-0,1	1,9	6,6	11,7	15,5	17,8	17,2	13,6	9,1	5,3	2,4	(8,4)

Tabel 2.2 Viser globalstråling og diffus stråling på vandret (København 1956-66). Enheden er $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{måned}$, og alle data er normeret til 30-dages måneder. Middeludetemperaturerne er for København 1931-60. Bemærk, at total-søjleens værdi for middeludetemperaturen angiver årsgennemsnittet.



Figur 2.3a En delvis overskyet dag i juli 1980 i Silkeborg gav ovenstående indstrålingsvariation på en sydvendt flade, der hælder 45° fra vandret. Pilen angiver solens kulminationstidspunkt. Målingerne blev foretaget med et pyranometer. Samlet indstråling i hele 8-timers perioden: $3,67 \text{ kWh/m}^2$.



Figur 2.3b En klar dag i juli 1980 i Silkeborg. Samme sydvendte flade som ovenfor. Samlet indstråling i hele 8-timers perioden: $6,16 \text{ kWh/m}^2$.

I almindelighed foreligger der ikke tilsvarende detaljerede data for andre orienterede flader end vandret^(*). Men på den anden side vil en solfanger jo næsten altid hælde et vist antal grader i forhold til det vandrette plan. Der er således behov for beregningsmetoder, der muliggør pålidelige skøn over globalstrålingen på forskellige sydvendte flader. En beregningsmetode af denne art er den såkaldte K_T -metode, som interesserede kan finde beskrevet i referencerne (Solvarme, 1979) og (Bason, 1978). I tabel 2.3 viser vi nogle resultater, der er fremkommet ved at anvende K_T -metoden på de københavnske måledata i tabel 2.2. Bemærk specielt den sæsonmæssige variation!

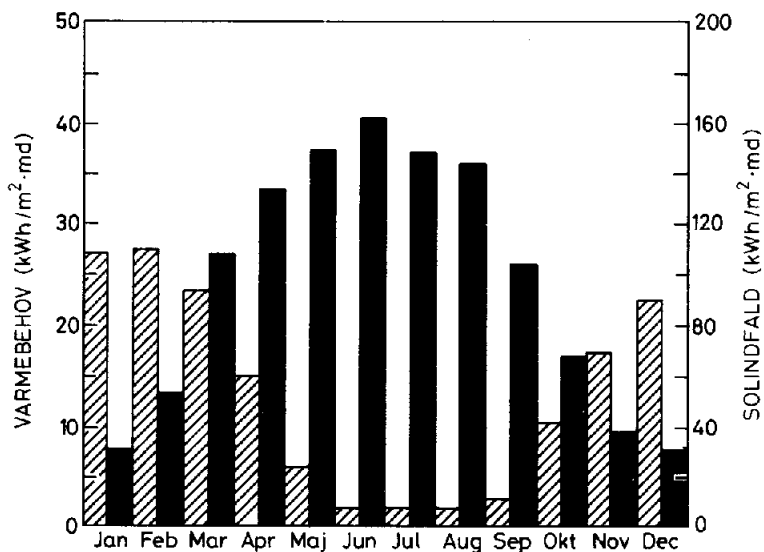
Lad os til eksempel tænke på et typisk parcelhus med sydvendt tagflade, der hælder 45° med det vandrette plan. Til umiddelbar vurdering af den rolle, et solvarmeanlæg kan spille i husets varmforsyning, er det af stor interesse at sammenligne det månedlige solindfald pr.m^2 tagareal med det månedlige varmebehov pr.m^2 boligareal. En sådan sammenligning er foretaget i figur 2.4 for et velisoleret, men ikke højisoleret dansk parcelhus. Der synes herudfra grund til at forvente, at et solvarmeanlæg af en rimelig størrelse vil kunne dække husets opvarmningsbehov i sommermånederne og evt. også i forårs- og efterårsmånederne. Skal behovet også dækkes i vintermånederne, bliver det nødvendigt at lagre solvarme fra sommer til vinter.

Til sidst præsenterer vi en enkelt figur, der siger noget om breddegradens indflydelse på solindfaldet. I figur 2.5 vises den målte månedlige globalstråling på vandret for fire forskellige lokaliteter på jorden. Det fremgår heraf, at den årlige globalstråling ikke varierer med meget mere end en faktor 2. Men det fremgår også, at den særdeles kraftige sæsonmæssige variation, der er karakteristisk for høje breddegrader, kun findes i en meget ringe udstrækning for lave breddegrader. På grund af store tekniske og økonomiske vanskeligheder ved at lagre solenergi fra sommer til vinter, er det derfor langt simplere at udnytte solenergien i lande nær ækvator end på vore breddegrader.

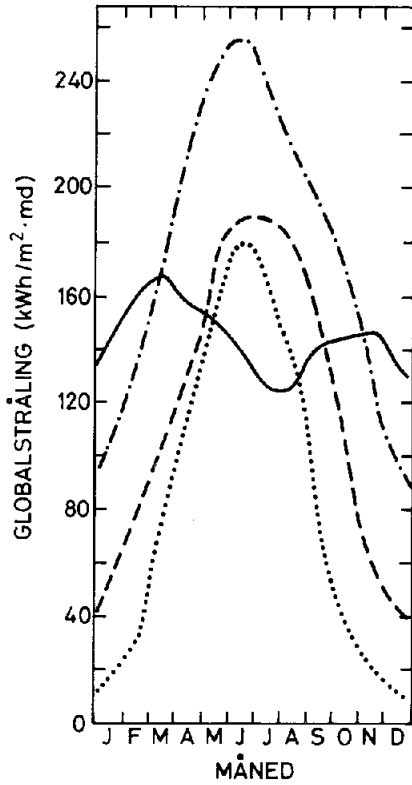
(*) Se dog (Lawaetz, 1980) for helt nye måledata.

Hældning fra vandret	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	Årligt kWh/m
15°	27	49	86	126	154	181	151	131	106	56	24	19	1110
30°	36	61	97	132	153	176	148	134	115	66	30	26	1174
45°	44	70	104	131	146	164	139	129	118	72	34	31	1182
60°	49	74	105	124	132	146	124	120	116	75	36	34	1135
75°	51	74	100	111	113	122	105	105	107	73	37	36	1034
90°	49	71	90	93	90	95	83	85	93	67	35	35	886

Tabel 2.3 Ved hjælp af K_T -metoden har man fundet den månedsvise globalstråling på udvalgte sydvendte flader i Danmark. Tabellens enheder er kWh/m²·måned (30 dage). Tabelværdierne kan ventes at ligge indenfor 20-30% af faktiske værdier i vintermånederne, og indenfor 10-15% af faktiske værdier i sommerhalvåret.



Figur 2.4 De sorte søjler viser beregnede værdier af globalstrålingen på en 45° sydvendt flade i Danmark. Til sammenligning viser de skraverede søjler varmebehovet i kWh pr kvadratmeter boligareal og pr måned for et typisk dansk parcelhus fra midten af 70'erne



Figur 2 Den målte globalstråling på 4 forskellige steder på jorden. Vandret flade.

—: Yangambi (Congo) (1°N)
 -·-·: Phoenix (USA) (33°N)
 ----: Madison (USA) (43°N)
 ·····: København (DK) (56°N)

Opgaver til kapitel 2

1. Solens middelfastand fra jorden er tåt på $1,5 \times 10^8$ km.
 - a) Brug solarkonstanten til at skønne solens totale effekt-produktion.
 - b) Hvis $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ beskriver energifrigørelsen i en fusions-proces med et masseunderskud på Δm ($c = 3,0 \times 10^8$ m/s), hvilket massetab pr sekund skal da til for at opretholde denne effektproduktion?
 - c) Er der risiko for, at solens masse bliver "brugt op" i nær fremtid?
2.
 - a) Lav en grov vurdering af arealet under den spektrale intensitetskurve udenfor atmosfæren (figur 2.1). Hvad skal resultatet blive, hvis arealet måles meget omhyggeligt?
 - b) Lav en tilsvarende vurdering af arealet under den spektrale intensitetskurve ved havoverfladen.
3. Betragter vi et strålebundt med en bestemt bølgelængde, kan den intensitetsformindskelse, der finder sted, når det passerer ned gennem atmosfæren, med god tilnærmelse beskrives ved ligning (2.3). Parametereen K antages til et bestemt tidspunkt at være $K = 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.
 - a) Hvor langt kan strålebundtet passere inden intensiteten halveres?
 - b) Hvor mange halveringsafstande skal passeres, inden intensiteten er nede på $1^\circ/100$ af den oprindelige værdi?
4. Vurder ved hjælp af figur 2.2a) og 2.2b) den samlede energimængde (udtrykt i kWh), der modtages på en 1 m^2 flade i løbet af 4 timer omkring solens kulminationstidspunkt (2 timer før og 2 timer efter). Hvis 50% af denne energimængde kan omdannes til nyttig varmeenergi, hvilken temperaturstigning kan der herved tildeles 50 kg rent vand? [Vands specifikke varmekapacitet = $4,2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$]

3. Solfangeren

1. Generelt om solfangeren

I dette kapitel får vi brug for en række symboler til at re-præsentere diverse fysiske størrelser, og det kan være bekvemt at have dem alle samlet på et sted. Dette er gjort i nedenstående tabel.

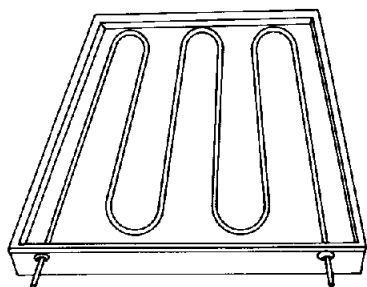
Symbol	Betydning	Enhed
I	Solstrålingens intensitet	W/m^2
A_s	Solfangerens absorberareal	m^2
U_s	Solfangerens varmetabskoefficient	$W/m^2 \cdot K$
c_s	Solfangervæskens spec. varmekapacitet	$J/kg \cdot K$
q_{abs}	Absorberet effekt pr. m^2 solfanger	W/m^2
q_{udn}	Udnyttet effekt pr. m^2 solfanger	W/m^2
q_{tab}	Effekttab pr. m^2 solfanger	W/m^2
T_{pm}	Absorberpladens middeltemperatur	K
T_{ind}	Solfangervæskens indløbstemperatur	K
T_{ud}	Solfangervæskens udløbstemperatur	K
T_{luft}	Den omgivende lufttemperatur	K
G	Væskegennemstrømning pr. m^2 solfanger	$kg/m^2 \cdot s$
α	Absorberens absorptivitet overfor sollys	
τ	Dækglassets transmissionsevne overfor sollys	
$(\tau\alpha)_{eff}$	Det effektive $\tau\alpha$ -produkt	
η	Solfangerens nyttevirkning	

Tabel 3.1 Nogle symboler og deres betydning

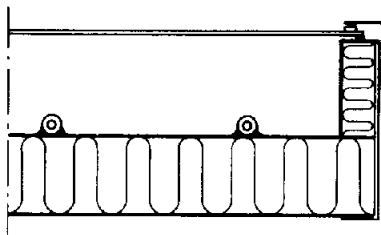
SOLFANGEREN

En solfanger er et apparat, der har til formål at opsamle indkommende solstråling og omsætte den til nyttig varme. En solfanger kan have en mere eller mindre raffineret teknisk udformning, men grundprincippet er uhyre enkelt. I sin simpleste udgave består den nemlig, som vist i figur 3.1, af en sortmalet metalabsorberplade, hvorpå der er svejset en rørs spiral. På bagsiden er anbragt et passende lag af et isolerende materiale (f.ex. 10 cm mineraluld). Endelig er det hele indbygget i en vandtæt ramme eller kasse, der tjener til at beskytte indholdet mod vejrligets påvirkninger. I reglen findes der også et eller to lag glas foran absorberpladen, men dette er dog ikke nødvendigvis tilfældet.

Solfangerens virkemåde er ganske indlysende. Når absorberpladen træffes af solens stråling, vil en større eller mindre del heraf blive absorberet, og pladen vil altså blive opvarmet; cirkulerer vi samtidigt en kold væske gennem rørspiralen, strømmer der varme fra plade til væske og den således opvarmede væske kan naturligvis i princippet udnyttes. I almindelighed ledes varmen hen til en lagertank, men dette



(a) Forfra



(b) Fra siden (snit)

Figur 3.1 Solfanger med rørs spiral som er punktsvejset til absorberpladen.

er emnet for næste kapitel. Her koncentrerer vi os om selve solfangeren, og set ud fra denne synsvinkel har vi nyttiggjort al den varme, det lykkes at overføre til den gennemstrømmende væske.

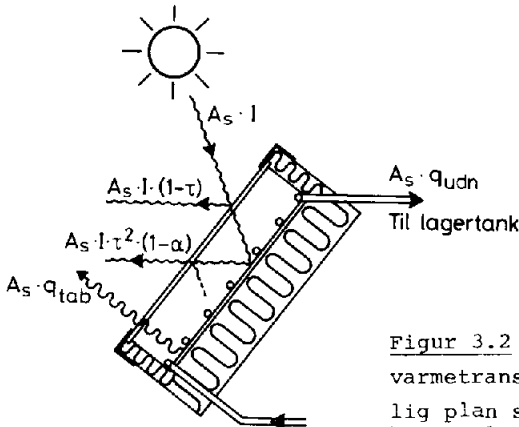
Ved at anvende den fundamentale fysiske lov om energibevarelse, vil vi nu forsøge at besvare følgende to spørgsmål: 1) Hvor stor en del af den indstrålede solenergi kan vi omsætte til nyttig varme? 2) Hvor høj en temperatur er vi i stand til at opnå på absorberpladen i en solfanger?

Idet vi forudsætter, at solfangeren allerede er kommet i en stationær driftstilstand, kan vi opskrive loven om energiens bevarelse på følgende simple måde:

$$A_s \cdot q_{udn} = A_s \cdot q_{abs} - A_s \cdot q_{tab} \quad (3.1)$$

der jo udtrykker, at den udnyttede effekt er lig med differencen mellem effekt, der absorberes på absorberpladen, og den effekt, der går tabt til omgivelserne fra absorberpladen. Som ligningen fremtræder her, er den ikke særlig anvendelig. Vi må først udtrykke q_{abs} og q_{tab} ved solindstrålingen I og ved parametre, der karakteriserer den given solfanger, før vi kan benytte ligning (3.1) til at forudsige q_{udn} .

2. Den absorberede effekt (q_{abs})



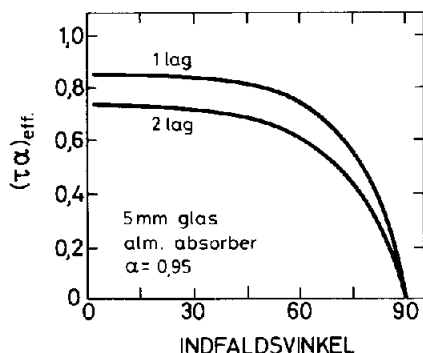
Figur 3.2 Forenklet skitse af varmetransporten i en almindelig plan solfanger med absorberarealet A_s .

Betragt nu figur 3.2, der viser et snit igennem en solfanger med ét lag glas. Af det indstrålede (kortbølgede) sollys med intensiteten I , vil der være en vis brøkdel τ (ca. 0,9), der transmitteres gennem glaspladen; den resterende brøkdel $(1-\tau)$ bliver reflekteret og er dermed gået definitivt tabt. Absorberpladen træffes altså af en indstrålet effekt på $I \cdot \tau$ per m^2 , hvoraf den dog kun er i stand til at absorbere brøkdelen α (α ligger i reglen mellem 0,8 og 1). Den præcise værdi af α afhænger naturligvis af absorbermaterialet og i særdeleshed af absorberoverfladens egenskaber.

Umiddelbart vil vi altså forvente, at den absorberede effekt pr. m^2 bliver $I \cdot \tau \cdot \alpha$. I virkeligheden er den en lille smule større på grund af muligheden for gentagne reflektioner mellem absorberpladen og dækglasset. Man udtrykker derfor den totale absorberede effekt per m^2 som

$$q_{\text{abs}} = I \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} \quad (3.2)$$

hvor $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ er det effektive transmissions-absorptionsprodukt. For en almindelig sortmalet absorberplade med $\alpha = 0,95$ varierer $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ med solstrålingens indfaldsvinkel, som vist på figur 3.3.



Figur 3.3 Variationen af $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ med indfaldsvinklen for henholdsvis 1 og 2 lag dækglass

Vi bemærker, at $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ falder meget voldsomt for indfaldsvinkler større end ca. 60° , hvilket dog sjældent spiller no-

gen væsentlig rolle. Dette hænger sammen med at en solfanger, der er nogenlunde rigtig orienteret i forhold til solen, altid vil have sin helt dominerende energiproduktion i dagens midterste timer, hvor indfaldsvinklen er størst. I praksis kan vi altså angive den absorberede effekt ved formel (3.2) og desuden betragte $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ som en for solfangeren karakteristisk konstant.

3. Det termiske effekttab (q_{tab})

Det er umuligt at overføre al den absorberede effekt til absorbervasken. Den varme absorberplade vil uundgåeligt afgive en del af sin energi - først og fremmest gennem solfangerens forside - til den omgivende koldere luft. Dette varmetab kan finde sted ved forskellige fysiske processer, der betegnes som varmestraling, varmekonvektion og varmeledning. De særligt interesserede kan finde disse processer nøjere beskrevet i appendix A, men det er ikke nødvendigt at studere dette appendix, for at kunne forstå det følgende. Man behøver kun at vide, at for almindelige plane solfangere er alle ovennævnte energitabsprocesser med god tilnærmelse proportionale med $(T_{\text{pm}} - T_{\text{luft}})$.

Det samlede effekttab per m^2 solfanger kan altså skrives:

$$q_{\text{tab}} = U_s \cdot (T_{\text{pm}} - T_{\text{luft}}) \quad (3.3)$$

hvor U_s kaldes solfangerens varmetabskoefficient.

Dækglas. Varmetabskoefficienten afhænger stærkt af solfangerens art^(*); en almindelig sortmalet absorberplade i fri luft vil således have en værdi af U_s på omkring $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Forsyner vi derimod solfangeren med 1 lag dækglas, forhins-

(*) Den afhænger også noget af vindhastigheden, jfr. Appendix A. De værdier, vi angiver i det følgende, svarer til en vindhastighed på 5 m/sek , der er en typisk vindhastighed i Danmark.

dres den kolde luft i at komme i kontakt med den varme absorberplade. Desuden vil dækglasset give anledning til den såkaldte drivhuseffekt: det tillader sollyset at passere nogenlunde uhindret ind på absorberpladen, men det forhindrer den langbølgede varmeståling fra absorberpladen i at undslippe. U_s falder derfor drastisk, nemlig til cirka $7,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, og yderligere et lag glas foran absorberen nedsætter U_s til $\sim 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. I princippet kan man naturligvis bruge endnu flere lag dæglas, men i praksis er det ikke anbefalelsesværdigt. Dels vil dette nødvendigvis fordyre solfangeren, og dels vil reflektionstabet herved forøges (se figur 3.2), således at nettogevinsten bliver nul eller negativ.

Selektiv overflade. Man kan også nedsætte solfangerens termiske tab ved at anvende en absorberplade, der er udstyret med en såkaldt selektiv overflade. Den er noget dyrere end en almindelig sortmalet absorberplade, og den absorberer også knapt så meget af det indkommende sollys. Til gengæld vil den heller ikke tabe så meget varme til omgivelserne ved varmeståling. Interesserede kan finde yderligere oplysninger herom i Appendix A. Her nøjes vi med at angive en tabel over værdier for $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ og U_s for forskellige solfangere.

Nr.	Solfangertype		$(\tau\alpha)_{\text{eff}}$	$U_s \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$
	Antal glaslag sel. overflade			
1	0	nej	0,95	31
2	1	nej	0,82	7,5
3	2	nej	0,71	5
4	0	ja	0,90	25
5	1	ja	0,78	4,5
6	2	ja	0,67	3,5

Tabel 3.2 Typiske værdier for $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ og U_s .

4. De fundamentale solfangerligninger

Solfangerligning A: Dette er netop den energiligning, vi når frem til ved at indsætte (3.2) og (3.3) i (3.1):

$$q_{\text{udn}} = I \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} - U_s \cdot (T_{\text{pm}} - T_{\text{luft}}) \quad (3.4)$$

For en given solfanger er parametrene $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ og U_s konstanter, som vi kender. Desuden lader I og T_{luft} sig let bestemmes til ethvert tidspunkt, hvis man har et pyranometer og et termometer til sin rådighed. Et problem er middelpladetemperaturen T_{pm} , som kan være vanskelig at måle. Men hvis T_{pm} faktisk bliver målt, kan solfangerligning A benyttes til at forudsige, hvor stor en termisk effekt solfangeren kan nyttiggøre under de givne forhold.

Vi vil nu indføre solfangerens nyttevirkning η som forholdet mellem den udnyttede effekt og solindstrålningens effekt, altså

$$\eta = \frac{q_{\text{udn}}}{I} \quad (3.5)$$

Ved at dividere igennem med I på begge sider af ligning (3.4) får vi følgende udtryk for η :

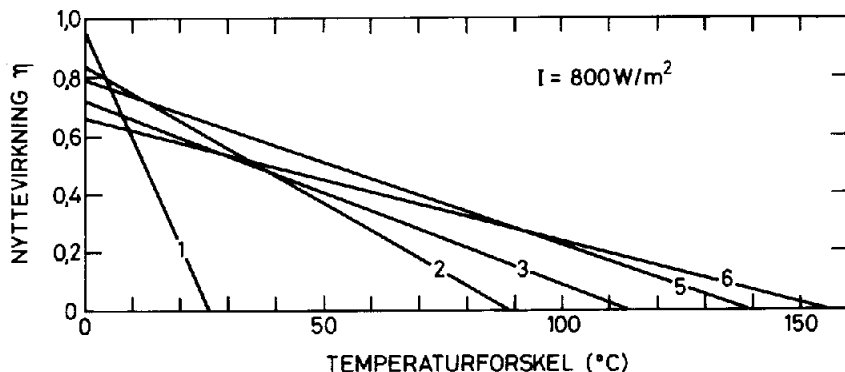
$$\eta = (\tau\alpha)_{\text{eff}} - \frac{U_s}{I} (T_{\text{pm}} - T_{\text{luft}}) \quad (3.6)$$

Hvis man holder I konstant og afbilder η som funktion af temperaturforskellen $(T_{\text{pm}} - T_{\text{luft}})$, bliver resultatet altså en ret linie med hældningskoefficienten $-\frac{U_s}{I}$, og skæringspunktet med den lodrette akse er $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$.

Lad os prøve at tegne nyttevirkningskurver for de solfangere, vi har angivet typiske parametre for i tabel 3.2. Dette gør vi i figur 3.4 med en antaget solindstråling på 800 W/m^2 , der sagtens kan opnås på en solrig dag i Danmark.

Af denne figur drages følgende konklusioner:

1) Nyttevirksomheden η for en solfanger kan godt komme meget tæt på 1, nemlig når pladetemperaturen T_{pm} næsten er lig



Figur 3.4 Nyttevirkning som funktion af $T_{pm} - T_{luft}$ for solfangerne nr. 1, 2, 3, 5 og 6 i tabel 3.2.

med T_{luft} . I praksis kan denne situation realiseres ved at køre solfangeren med en meget stor gennemstrømning af væske med indgangstemperaturen $T_{ind} \approx T_{luft}$; herved vil nemlig pladens og dermed også væskens temperatur kun stige ganske lidt; varmetabet fra solfangeren bliver altså ringe og nyttevirksomheden følgelig meget stor. Alligevel er denne måde at køre solfangeren på ikke hensigtsmæssig, for hvordan skulle vi egentlig udnytte en gennemstrømmet væske, der kun er opvarmet ganske lidt?

2) Lader vi derimod væskegennemstrømningen gå mod 0, vil η naturligvis også gå mod 0, og pladens temperatur T_{pm} vil nå op på sin maksimale værdi, den såkaldte stagnationstemperatur.

3) Ingen af disse grænsetilfælde svarer til realistiske driftsforhold. Mere realistisk vil det være at tilstræbe en nyttevirksomhed på f.eks. 50%. Af figuren ser vi, at der til en nyttevirksomhed på 50% svarer ret så forskellige pladetemperaturer for de 5 forskellige solfangere.

Solfangerligning B: Ligning (3.4) giver en korrekt beskrivelse af solfangerens energibalance, men ud fra en praktisk synsvinkel er den ikke særlig bekvem at arbejde med, fordi T_{pm} indgår. Men T_{pm} afhænger naturligvis af væskens indgangstemperatur T_{ind} , af væskens specifikke varmekapacitet c_s og

af størrelsen af væskegennemstrømningen G . Det bør derfor være muligt at omforme ovenstående solfangerligning, således at T_{pm} bliver erstattet med T_{ind} , c_s og G , der i modsætning til T_{pm} er lette at måle.

Dette program lader sig faktisk gennemføre, men det er teknisk set lidt vanskeligt og skal derfor udelades her; interesserede henvises til Litteraturlistens reference (J). Resultatet bliver:

Solfangerligning B:

$$q_{udn} = F_R \cdot [I \cdot (\tau\alpha)_{eff} - U_s \cdot (T_{ind} - T_{luft})] \quad (3.7)$$

hvor

$$F_R = \frac{G \cdot c_s}{U_s} \cdot 1 - \exp\left(-\frac{U_s \cdot F'}{c_s \cdot G}\right) \quad (3.7b)$$

$$F' \approx 0,90^{(*)}$$

Hermed har vi opnået det ønskede, nemlig en solfangerligning, hvori der kun indgår størrelser, som let lader sig måle eller beregne. Den "nye" parameter F_R vil altid ligge i intervallet fra 0 til 1, og den er konstant, når gennemstrømningen holdes konstant. Praktiske erfaringer har i øvrigt vist, at gennemstrømningshastigheden G bør ligge omkring

$$G = 0,014 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

hvilket er lidt under 1 liter per m^2 solfanger per minut (en bekvem huskeregel!).

(*) Den helt præcise værdi afhænger af detaljer i solfangerens konstruktion, som vi ikke skal interessere os for her.

Eksempel 3.1

Dette eksempel har dels til formål at gøre læseren fortrolig med solfangerligning B og dels, at vise hvorledes en solfangers energiproduktion typisk kan variere i løbet af en solskinsdag.

Vi vil betragte en solfanger, der er karakteriseret ved følgende data

Solfangerens orientering	Sydvendt
Solfangerens hældning	45°
Solfangerens areal	$A_s = 10\text{m}^2$
Antal dækglas	1 lag glas
Absorber overflade	Ikke selektiv
Solfangervæskens spec.varmekapacitet	$c_s = 3350\text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Gennemstrømningshastighed	$G = 0,014\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$
Indløbstemperatur (holdes konstant!)	$T_{\text{ind}} = 40^{\circ}\text{C}$

Ved hjælp af disse oplysninger samt tabel 3.2 og ligning 3.7b findes følgende værdier for de vigtige solfangerparametre:

$(\eta)_{\text{eff}} = 0,82$	$U_s = 7,50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	$F_R = 0,84$
------------------------------	--	--------------

På en bestemt forårsdag måles luftens temperatur og solstrålingens intensitet på solfangeren time for time, og de målte størrelsers timemiddelværdier er angivet i tabel 3.3. Ved at anvende solfangerligning B kan man nu beregne de tilsvarende timemiddelværdier for den udnyttede effekt per m^2 $(q_{\text{udn}})^{(*)}$ og solfangerens nyttevirkning (η). Resultaterne ses i søjle 4 og 5. Endelig anføres i søjle 6 den samlede

(*) Hvis beregningen giver, at q_{udn} er negativ - svarende til at varmetabsleddet er større end den absorberede energi i ligning 3.7a - skal man sætte $q_{\text{udn}} = 0$. Grunden er, at pumpen er slået fra i denne situation og anlagt altså ude af drift.

nyttige energi, der produceres indenfor tidsrummet $\Delta t = 1$ time (altså fra kl.6-7, fra kl.7-8, osv). Bemærk, at det kun er i denne sidste beregning, vi får brug for solfangerens areal A_s .

Tidsrum	Målte Værdier		Beregnete Værdier		
	T_{luft} ($^{\circ}\text{C}$)	I (W/m^2)	q_{udn} (W/m^2)	$\eta = \frac{q_{\text{udn}}}{I}$	$A_s \cdot q_{\text{udn}} \cdot \Delta t$ (Wh)
6-7	- 1	0	0	-	0
7-8	0	0	0	-	0
8-9	1	230	0	-	0
9-10	3	383	31	0,08	310
10-11	6	603	201	0,33	2010
11-12	10	850	396	0,47	3960
12-13	10	870	410	0,47	4100
13-14	8	767	326	0,43	3260
14-15	8	608	217	0,36	2170
15-16	6	394	57	0,15	570
16-17	4	0	0	-	0
17-18	1	0	0	-	0

Tabel 3.3 Eksempel på beregning af en given solfangers ydelse gennem en forårsdag.

Opgaver til kapitel 3

1.

- a) Angiv absorberpladens middeltemperatur T_{pm} for hver af solfangertyperne i tabel 3.2, når solfangerens nyttevirking er 50%, og når solstrålingens intensitet er $I = 800 \text{ W/m}^2$. Luftens temperatur sættes til 10°C .
- b) Gentag beregningerne for $I = 500 \text{ W/m}^2$.
- c) Hvilken af de angivne solfangertyper vil du foreslå anvendt til opvarmning af vandet i et svømmebassin?

2. Find solfangerparameteren F_R for hver af de 6 typer solfangere i tabel 3.2, når det antages, at solfangervæsken er en antifrostvæske med specifik varmekapacitet $c_s = 3350 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Det forudsættes, at væskegennemstrømningen er den normale, altså $G = 0,014 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$.

3.

- a) Eftersis resultaterne i tabel 3.3 - gerne ved hjælp af en computer eller en programmerbar lommeregner.
- b) Gentag beregningerne, når T_{ind} i stedet holdes konstant lig med 60°C .
- c) Gentag dernæst beregningerne for en solfanger med to lag glas, men alle øvrige parametre uændrede i forhold til eksempel 3.1.

4. Lageret

1. Generelt om varmelagring

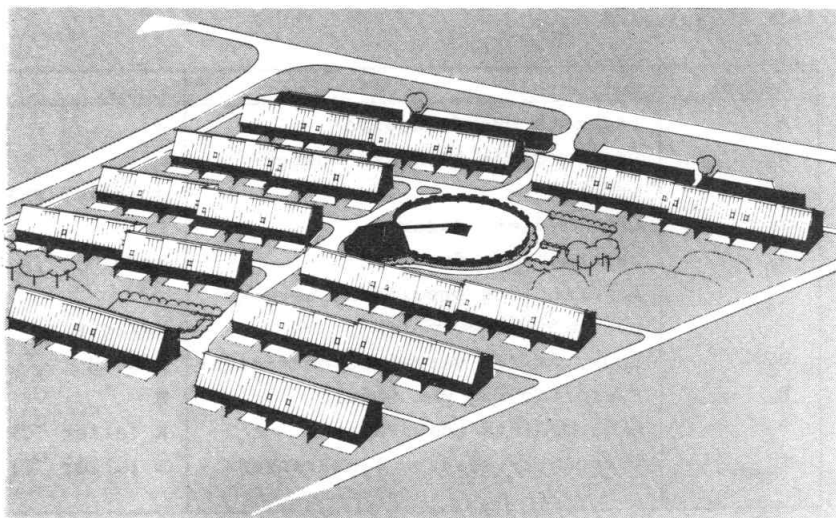
I tabel 4.1 har vi sammenstillet de fysiske symboler, som optræder i dette kapitel, og som ikke allerede har været omtalt i kapitel 3.

Symbol	Betydning	Enhed
A_l	Lagerets overfladeareal	m^2
E_l	Lagermediets termiske energindhold	J (eller Wh)
m_l	Lagermediets masse	kg
ρ_l	Lagermediets densitet	kg/m^3
c_l	Lagermediets specifikke varmekapacitet (varmefylde)	$kJ/kg \cdot K$
U_l	Lagertankens varmetabskoefficient	$W/m^2 \cdot K$
P	Energiforbrug per sekund	W
T_l	Lagermediets temperatur	K (eller $^{\circ}C$)
T_{omg}	Temperatur udenfor lagertanken	K (eller $^{\circ}C$)

Tabel 4.1 Nogle symboler og deres betydning

For at kunne opnå et rimeligt udbytte af en solfanger, er det for de fleste formål nødvendigt at supplere med et energilager. Dette hænger sammen med, at både solindstrålingen og det forbrug, som solvarmeanlægget skal være med til at dække, varierer meget kraftigt fra tid til anden. Solindfaldet er således langt større i sommerhalvåret end i vin-

terhalvåret, medens omvendt varmebehovet først og fremmest er koncentreret i vinterhalvåret. I teorien kan det godt lade sig gøre at gemme solvarme - f.eks. i meget store velisolerede vandtanke - fra sommer til vinter, men det er simpelthen for dyrt, hvis det sker i forbindelse med almindelige énfamilies solvarmeanlæg. Der er netop i disse år en række interessante forsøg igang, som skal godtgøre, om det er praktisk og økonomisk forsvarligt for store kollektive solvarmeanlæg, altså solvarmeanlæg, der er fælles for et større antal beboelser. Det mest omtalte projekt af denne art er nok det svenske Linköping-projekt (figur 4.1).



Figur 4.1 55 rækkehuse ved Linköping i Sverige opvarmes næsten fuldstændigt af 2568 m² solfangere på husenes syd-vendte tagflader. Lagertanken rummer omtrent 10.000 m³ vand, der opvarmes fra 20 til 70°C. Anlægget blev taget i brug i vinteren 79/80.

At det i hvert fald teoretisk er en oplagt fordel at gøre varmelageret stort, er let at indse. Betragt en helt fyldt

kugleformet lagertank med radius R. Med betegnelserne fra tabel 4.1 gælder der:

$$\text{Lagerets termiske energi} = \frac{4\pi}{3} \cdot R^3 \cdot \rho_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (4.1)$$

idet vi definerer lagerets termiske energi til at være 0, når lagertemperaturen er lig med omgivelsernes temperatur. Endvidere er

$$\text{Lagerets energitab per tidsenhed} = 4\pi \cdot R^2 \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (4.2)$$

Forholdet

$$\frac{\text{Lagerets energitab per tidsenhed}}{\text{Lagerets termiske energi}} = \frac{3 \cdot U_{\ell}}{\rho_{\ell} \cdot c_{\ell}} \cdot \frac{1}{R} \quad (4.3)$$

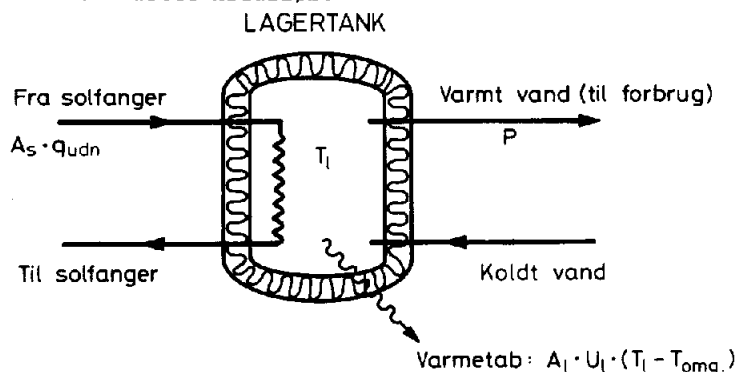
angiver derfor den brøkdel af lagerets energiindhold, der tabes per tidsenhed. Vi bemærker, at denne brøkdel er omvendt proportional med radius R! Det procentvise varmetab kan således halveres ved at forøge tankens radius med en faktor 2. Fordelen ved større tanke træder tydeligere frem ved at se på f.eks. en tank med R = 1 meter og et fællesanlæg med tankradius på 10 meter. Den store lagertank bliver omtrent 10 gange bedre til at "holde på varmen" end den lille tank.

Endnu foreligger der kun få praktiske forsøgsresultater for store sæsonvarmelagre i tilknytning til kollektive solvarmeanlæg. Vi skal derfor i dette kapitel begrænse os til at se på varmlagre til de velkendte mindre solvarmeanlæg, der installeres på individuelle huse. Varmelagerets funktion for denne type anlæg er at fungere som stødpude under de daglige eller måske ugentlige variationer i såvel varmeproduktion som varmekonsum. En rimelig størrelse på et varmelager er ifølge praktiske erfaringer, at det skal kunne rumme en termisk energi af samme størrelsesorden, som den solfangeren kan producere i løbet af et par gode solskinsdage. Herom mere senere.

Varme kan lagres på to væsensforskellige måder. Dels kan det foregå ved at lade et medium med høj specifik varmekapacitet - for eksempel vand eller sten - blive opvarmet fra en lav temperatur til en højere. Det kan også ske ved at anvende et lagermedium, som har sit smeltepunkt ved en passende lav temperatur ($25-50^{\circ}\text{C}$ er udmærket). Herved kan man nemlig lagre termisk energi som smeltevarme, der kan fås frem igen, når mediet størkner. I afsnit 4.2 behandler vi det mest almindelige tilfælde, nemlig varmelagring i vand, og i afsnit 4.3 gøres der kort rede for andre lagringsmuligheder.

2. Vand som lagermedium

Vand er et udmærket lagermedium, fordi det (1) er billigt, (2) har en høj specifik varmekapacitet og (3) også er anvendeligt som transportmiddel i det sekundære kredsløb mellem lager og forbrugssteder (se figur 4.2). Man undgår herved at have en varmeveksler i det sekundære kredsløb, hvilket er en fordel, da den uundgåeligt vil give anledning til ekstra varmetab og i øvrigt også forøger anlægsudgifterne. I det primære kredsløb mellem solfanger og lager er en varmeveksler i praksis altid nødvendig, fordi man (i hvert fald under danske forhold) ofte er nødt til at bruge en frostsikker væske i dette kredsløb.



Figur 4.2 Forenklet skitse af varmetransport til og fra en lagertank. Lagermediet antages overalt at have samme temperatur T_l .

Betragt nu lagertanken, der er vist i figur 4.2. Den er forbundet med en solfanger, hvorfra den modtager termisk energi, men samtidig tappes der termisk energi til forbrug; desuden mister tanken energi ved, at der ledes varme ud gennem tankens isolerede overflade til omgivelserne. Vi skal her kun betragte den simplest tænkelige situation, hvor al vandet i tanken antages at have én fælles temperatur $T_{\ell}^{(*)}$. Ydermere gøres den antagelse, at hele solfangerens nyttige energiproduktion bliver overført til lagertanken. Vi vil så anvende loven om energiens bevarelse på lagertanken over et lille tidsrum Δt , hvor vandets temperatur stiger fra T_{ℓ} til $T_{\ell} + \Delta T_{\ell}$:

Ind i lagertanken strømmer energien: $A_s \cdot q_{udn} \cdot \Delta t$

I tanken optages energien : $m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot \Delta T_{\ell}$

Fra tanken tabes til omgivelserne: $A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{omg}) \cdot \Delta t$

Fra tanken tappes til forbrug : $P \cdot \Delta t$

Energibevarelse giver nu

$$A_s \cdot q_{udn} \cdot \Delta t = m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot \Delta T_{\ell} + A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{omg}) \cdot \Delta t + P \cdot \Delta t$$

eller ved simple omflytninger

$$m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot \frac{\Delta T_{\ell}}{\Delta t} = A_s \cdot q_{udn} - A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{omg}) - P \quad (4.4)$$

Eksempel 4.1

Dette eksempel har til formål at vise, hvorledes lagerligningen (4.4) kan anvendes til at forudsige tanktemperaturen

(*) Med mindre der foregår en ret kraftig omrøring i lagertanken, vil der ske en lagdeling af indholdet, således at vandet øverst i tanken er noget varmere end vandet i bunden af tanken.

LAGERET

T_ℓ , når udbyttet fra solfangeren ($A_s \cdot q_{udn}$) og forbruget (P) begge er givet som funktion af tiden.

Vi betragter en tank fyldt med rent vand, hvis temperatur er den samme overalt. Lageret er karakteriseret ved følgende data:

Lagertankens overfladeareal	$A_\ell = 6 \text{ m}^2$
Lagermediets masse	$m_\ell = 1000 \text{ kg}$
Lagermediets specifikke varme- kapacitet	$c_\ell = 4186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ $= 1,16 \text{ Wh/kg} \cdot \text{K}$
Lagertankens varmetabskoefficient	$U_\ell = 0,50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Temperatur udenfor tanken	$T_{omg} = 20^\circ\text{C}$

Vi antager, at dette lager er forbundet med solfangeren fra eksempel 3.1, og at vi kan overføre hele denne solfangers nyttige energiproduktion til lageret^(*). Vi antager desuden et forbrug P , der varierer som angivet i tabel 4.2. Og opgaven er nu at forudsige lagermediets temperatur fra time til time i den pågældende 12-timers periode.

Løsning: I løbet af tidsrummet $\Delta t = 1$ timer ændres lagertemperaturen T_ℓ fra $T_{\ell,gl}$ til $T_{\ell,ny}$. Ifølge ligning (4.4) er disse temperaturer forbundet således:

$$T_{\ell,ny} = T_{\ell,gl} + \frac{1}{m_\ell \cdot c_\ell} [A_s \cdot q_{udn} \cdot \Delta t - P \cdot \Delta t - A_\ell \cdot U_\ell \cdot (T_{\ell,gl} - T_{omg}) \cdot \Delta t] \quad (4.5)$$

Med de rigtige talværdier indsat

(*) Vi antog i eksempel 3.1, at solfangerens indløbstemperatur var konstant og i øvrigt lig med 40°C . Når vi nu forbinder solfangeren med lagertanken, vil indløbstemperaturen ikke længere være konstant i løbet af dagen. Solfangerens faktiske energiproduktion vil derfor ikke være helt den, vi beregnede i eksempel 3.1. Her ser vi dog bort fra den lille fejl, vi herved begår. En korrekt behandling gives i næste kapitel.

$$T_{\ell,ny} = T_{\ell,gl} + \frac{1}{1000 \cdot 1,16} [A_s \cdot q_{udn} \cdot \Delta t - P \cdot \Delta t - 6 \cdot 0,50 \cdot (T_{\ell,gl} - T_{omg}) \cdot \Delta t] \quad (4.6)$$

Ud fra den opgivne starttemperatur $T_{\ell,gl} = 40^{\circ}\text{C}$ kan vi umiddelbart beregne temperaturen efter 1 times forløb (altså kl. 7). Den således beregnede temperatur kan derpå bruges som $T_{\ell,gl}$ i en ny 1-times periode, og så fremdeles.

Tidsrum	$A_s \cdot q_{udn} \cdot \Delta t$ (Wh)	$P \cdot \Delta t$ (Wh)	$A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell,gl} - T_{omg})$ (Wh)	$T_{\ell,gl}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\ell,ny}$ ($^{\circ}\text{C}$)
6-7	0	750	60	40,0	39,3
7-8	0	750	58	39,3	38,6
8-9	0	750	56	38,6	37,9
9-10	310	750	54	37,9	37,5
10-11	2010	250	52	37,5	39,0
11-12	3960	250	56	39,0	42,1
12-13	4090	250	66	42,1	45,4
13-14	3260	250	76	45,4	47,9
14-15	2170	750	84	47,9	49,0
15-16	570	750	87	49,0	48,8
16-17	0	750	86	48,8	48,1
17-18	0	750	84	48,1	47,4

Tabel 4.2 Eksempel på beregning af temperaturudviklingen i en lagertank gennem en 12-timers periode.

3. Andre lagringsmedier

Sten. Anvendelse af sten som lagringsmedium er navnlig fordelagtigt i forbindelse med luftvarmeanlæg, da varmeoverførslen mellem luft og sten er meget effektiv, såfremt disse har en passende størrelse. Den mest hensigtsmæssige størrelse synes at ligge et sted mellem 1 og 5 cm, idet der herved sikres en tilstrækkelig god passage for luften, og idet stenene herved får en meget stor effektiv overflade. Stens

specifikke varmekapacitet er ca. 900 J/kg·K og densiteten 2700 kg/m³, hvilket fører til, at et stenvarmelager fylder ca. det dobbelte af et vandvarmelager, når det skal kunne rumme samme energimængde (se tabel 4.3).

Salthydrater. Interessante muligheder for varmelagring frembydes af visse materialer, der undergår en faseændring fra fast til flydende tilstandsform ved en temperatur, der ligger lidt over den ønskede forbrugstemperatur. Fordelene ved denne form for oplagring er, at temperaturniveauet stort set ikke skal hæves for at lagre varmen, og energindholdet per volumenenhed er større end for vands vedkommende; dette medfører, at solfangerens ydeevne øges, og at problemerne med varmeisolering og pladsbehov mindskes.

Adskillige kriterier må dog være opfyldt for at denne lagringsmulighed bliver attraktiv: Faseændringen må således være ledsaget af en høj frigjort smeltevarme, faseændringerne må kunne foregå mange gange, uden at materialet forringes nævneværdigt. Stoffet må heller ikke være stærkt ætsende eller på anden måde ubehageligt at have med at gøre; endelig må dets pris naturligvis også være rimelig. Alt i alt stilles der således ganske mange krav til et stof af denne type, krav, som det hidtil har været ret vanskelige at opfylde i tilstrækkeligt omfang.

Størst forventning er der nok knyttet til de såkaldte salthydrater, hvoraf det mest kendte er Glaubersalt (Na₂SO₄). Glaubersalt smelter ved 32°C og har en smeltevarme på ikke mindre end 243 kJ/kg. Dette materiale arbejdes der en del med på Danmarks Tekniske Højskole, hvorfra der er udgivet adskillige rapporter om emnet. En populær beskrivelse kan findes i (Svendsen, 1976)

Lagringsmedium	Temp.område [°C]	Varmeindhold pr. m ³ [kWh]
Vand	40-90	58
Sten	40-90	23
Glaubersalt	32	95

Tabel 4.3 Varmelagringsegenskaber for nogle udvalgte stoffer.

Opgaver til kapitel 4

1. Betragt den kugleformede lagertank, der er omtalt på side 43. Antag, at tanken er fyldt med varmt vand, hvis begyndelsestemperatur er 60°C . Vi forestiller os, at tanken er isoleret med 25 cm mineraluld overalt ($u_{\ell} = 0,20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), og at tanken er helt nedgravet i jord. Omgivelsernes temperatur kan da sættes til 10°C . Beregn for hver af radierne $R = 1, 3$ og 9 meter

- Lagerets termiske energiindhold (kWh).
- Lagerets varmetab (kW)
- Tiden, der går, før vandets temperatur er faldet med 5°C .

Det antages, at der hverken tilføres varme til eller tapes varme fra lagertanken. Vandet mister altså kun energi ved varmeledning ud gennem tankens overflade.

2

- Eftervis resultaterne i tabel 4.1 - gerne ved hjælp af en computer eller en programmerbar lommeregner.
- Gentag beregningerne med lidt ændrede forudsætninger.

Undersøg for eksempel følgende ændringer:

- Antag et dobbelt så stort forbrug som før.
- Antag $T_{\text{omg}} = 10^{\circ}\text{C}$
- Antag $u_{\ell} = 0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Det vil være klogt kun at ændre én parameter ad gangen. Sammenhold resultaterne ved f.eks. at se på tankens sluttemperatur.

5. Hele Solvarmeanlægget

1. Indledning

I de to foregående kapitler har vi ved hjælp af loven om energiens bevarelse opstillet simple matematiske modeller til beskrivelse af henholdsvis solfangerens og lagerets funktion. Med disse ligninger til rådighed samt information om solindstrålingen (I) og forbruget (P) til ethvert tidspunkt, er det muligt at forudsige (simulere) hele anlæggets virkemåde over kortere eller længere tidsrum. Fordelen ved at kunne foretage en sådan simulering er åbenbar: det bliver herved muligt på simpel vis at studere den effekt, det vil have på driften, hvis man ændrer på én af solvarmesystemets anlægsparametre (ved anlægsparametre forstås solfangerens areal, antallet af lag dækglas, lagertankens størrelse etc ; jævnfør tabel 3.1 og 4.1).

I resten af dette kapitel behandler vi følgende emner: For at forstå princippet i enhver simulering, opstiller vi i afsnit 2 en matematisk model for hele solvarmeanlæggets funktion; modellen gennemregnes derefter i et konkret eksempel. Dernæst gives der i afsnit 3 en kvalitativ beskrivelse af de resultater, der er opnået ved omfattende simuleringstudier på store EDB-anlæg. I afsnit 4 er der en kort omtale af den såkaldte F-Chart metode, som er en simpel metode til at foretage realistiske forudsigelser af solvarmeanlægs ydeevne over lange perioder, dvs. måneder eller år. Endelig gives der i afsnit 6 nogle få udvalgte eksempler på konkrete solvarmeanlæg, og de opnåede driftsresultater kommenteres.

2. Model for hele solvarmeanlægget

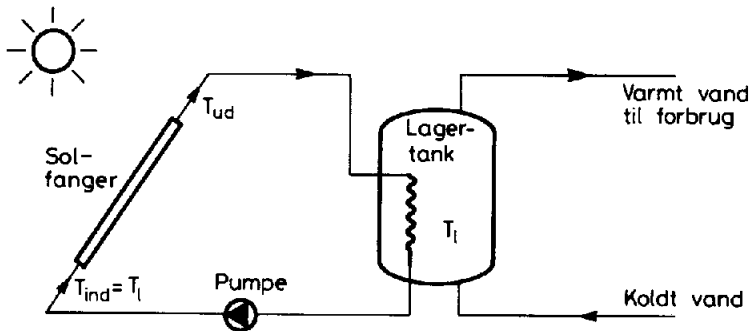
Vi har tidligere opskrevet de energibalanceligninger, der gælder for solvarmeanlæggets to vigtigste komponenter, nemlig solfangeren og lageret, men vi gentager dem alligevel her for fuldstændighedens skyld. Betydningen af de indgående parametre fremgår af tabellerne 3.1 og 4.1.

Solfangerligningen:

$$q_{udn} = F_R \cdot [I \cdot (\tau\alpha)_{eff} - U_s \cdot (T_{ind} - T_{luft})] \quad (5.1)$$

Lagerligningen:

$$m_\ell \cdot c_\ell \cdot \frac{\Delta T_\ell}{\Delta t} = A_s \cdot q_{udn} - A_\ell \cdot U_\ell \cdot (T_\ell - T_{omg}) - P \quad (5.2)$$



Figur 5.1 Skitse af hele solvarmeanlægget.

Lad os nu forbinde solfangeren og lagertanken som vist i figur 5.1, og lad os antage, at solfangervæsken køles helt ned til lagertanken T_ℓ ved at passere gennem varmeveksleren i lagertanken. I denne situation fremkommer der en simpel model for hele anlægget ved at udtrykket for q_{udn} i (5.1) indsættes i (5.2). Resultatet er:

$$m_\ell \cdot c_\ell \cdot \frac{\Delta T_\ell}{\Delta t} = A_s \cdot F_R \cdot [I \cdot (\tau\alpha)_{eff} - U_s \cdot (T_\ell - T_{omg})] - A_\ell \cdot U_\ell \cdot (T_\ell - T_{omg}) - P \quad (5.3)$$

For givne værdier af solfangerparametrene (A_s , U_s , $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$, F_R), lagerparametrene (A_l , U_l , m_l , T_{omg}), forbrugets størrelse (P) og vejrparametrene (I , T_{luft}) kan vi beregne lagertemperaturen T_l til hvert tidspunkt. Vi skal nu se, hvorledes man i praksis løser ligning (5.3).

Eksempel 5.1

Vi betragter solvarmeanlægget bestående af solfangeren fra eksempel 3.1 og lagertanken fra eksempel 4.1. Solstrålingens intensitet I , luftens temperatur T_{luft} og forbruget P antages at variere fuldstændig som i de førnævnte eksempler; for overskuelighedens skyld har vi dog også anført disse størrelsers timemiddelværdier i tabel 5.1 nedenfor. Opgaven er nu at beregne lagertemperaturen T_l (lig med solfangerens indløbstemperatur T_{ind}), samt solfangerens effektivitet η for hver time fra kl.6-18. Lagerets starttemperatur antages at være 40°C .

Løsning: Vi approksimerer $\frac{\Delta T_l}{\Delta t}$ med $\frac{T_{l,\text{ny}} - T_{l,\text{gl}}}{\Delta t}$ og omformer ligning 5.3 til følgende bekvemme form

$$T_{l,\text{ny}} - T_{l,\text{gl}} = \frac{\Delta t}{m_l \cdot c_l} (A_s \cdot q_{\text{udn}} - A_l \cdot q_{\text{tanktab}} - P) \quad (5.4a)$$

hvor

$$q_{\text{udn}} = F_R \cdot [I \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} - U_s \cdot (T_{l,\text{gl}} - T_{\text{luft}})] \quad (5.4b)$$

$$q_{\text{tanktab}} = U_l \cdot (T_{l,\text{gl}} - T_{\text{omg}}) \quad (5.4c)$$

Med $\Delta t = 1$ time tillader (5.4) en bestemmelse af $T_{l,\text{ny}}$ ved slutningen af en time udtrykt ved temperaturen $T_{l,\text{gl}}$ ved timens begyndelse. Resultaterne er anført i tabel 5.1.

Tidsrum	MÅLTE VÆRDIER			BEREGNEDE VÆRDIER			
	T_{luft} (°C)	$A_s \cdot I \cdot \Delta t$ (Wh)	$P \cdot \Delta t$ (Wh)	$A_s \cdot q_{\text{udn}} \cdot \Delta t$ (Wh)	$T_{\ell,gl}$	$T_{\ell,ny}$	$\eta = \frac{q_{\text{udn}}}{I}$
6-7	- 1	0	750	0	40,0	39,3	-
7-8	0	0	750	0	39,3	38,6	-
8-9	1	2300	750	0	38,6	37,9	-
9-10	3	3830	750	437	37,9	37,6	0,11
10-11	6	6030	250	2158	37,6	39,1	0,36
11-12	10	8500	250	4006	39,1	42,4	0,47
12-13	10	8700	250	3944	42,4	45,5	0,45
13-14	8	7670	250	2914	45,5	47,7	0,38
14-15	8	6080	750	1618	47,7	48,5	0,28
15-16	6	3940	750	39	48,5	47,8	0,01
16-17	4	0	750	0	47,8	47,0	-
17-18	1	0	750	0	47,0	46,3	-

Tabel 5.1 Eksempel på beregning af hele solvarmeanlæggets opførsel fra time til time.

3. Konklusioner på grundlag af EDB-simulering

Det skulle nu være klart demonstreret, at vi kan simulere et solvarmeanlægs drift ved hjælp af solfangerligning, lagerligning samt ligninger, der beskriver forbrug og solindfald som funktion af tiden. Regningerne bliver naturligvis temmelig omfattende, hvis vi ønsker, at simuleringen skal strække sig over længere tidsrum - f.eks. 1 år - men i princippet kan vi bære os ad som i eksempel 5.1.

Her i Danmark har man på Laboratoriet for Varmeisolering ved DTH udviklet et stort EDB-program, der er i stand til at foretage det nødvendige beregningsarbejde meget hurtigt. Programmet skal naturligvis have oplysninger om (1) varmebehovet i det hus, der skal forsynes med solvarme, (2) solvarmesystemets anlægsparametre (areal, hældning, etc.) og endelig (3) vejrsituationen time for time gennem et helt år

(f.eks. fra en meteorologisk målestation). På grundlag af disse oplysninger kan EDB-programmet nu følge solvarmeanlæggets drift time for time og skrive alle ønskede oplysninger ud til brugeren. Man kan f.eks. få oplyst, hvor stor en del af husets månedlige eller årlige varmebehov, der kan forventes dækket med et bestemt solvarmeanlæg.

Vi gengiver nedenfor en række konklusioner, som man er nået frem til ved omfattende simuleringssstudier både herhjemme og i udlandet (Solvarme, 1979):

- 1) Solfangerens orientering: Det største årlige udbytte opnås for en sydvendt solfanger, men afvigelser på op til 25° mod øst eller mod vest forringer ikke udbyttet væsentligt.
- 2) Solfangerens hældning: Denne bør ligge et sted mellem 30° og 60° i Danmark, med de lavere hældninger (30° - 45°) for vandopvarmningsanlæg og de større (45° - 60°) for anlæg til rum- og vandopvarmning.
- 3) Dækglas: Der bør anvendes mindst 1 og højst 2 lag glas i solfangeren (mere end 2 lag glas nedsætter transmissionen τ for meget).
- 4) Selektiv overflade: Fra et rent udbytte-synspunkt er det fordelagtigt at anvende en selektiv overflade på absorberen, såfremt man ønsker relativt høje udgangstemperaturer fra solfangeren (jfr. figur 3.4). Selektive overflader er inde i en så hurtig udviklingsproces, at de formodenlig allerede er både teknisk og økonomisk attraktive. Herhjemme kan man således nu købe selvklæbende selektive film til en pris af 200 kr. per m^2 .
- 5) Væskegennemstrømning: Denne bør være ca. $0,014 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, hvilket er lidt under 1 liter per minut per m^2 solfanger.
- 6) Forholdet mellem solfangerareal og lagervolumen: Lager-tanken bør rumme 50-100 kg vand per m^2 solfanger. Selv en meget større (og derfor dyrere og mere pladskrævende) tank vil kun hæve udbyttet meget lidt.
- 7) Årligt udbytte per m^2 solfanger: Det opnåelige udbytte per m^2 solfanger for et solvarmeanlæg, der er opført i overensstemmelse med ovenstående anbefalinger, afhænger stærkt af solfangerens belastning. Solfangerens belastning er defineret som forholdet mellem husets årlige varmemeforbrug og

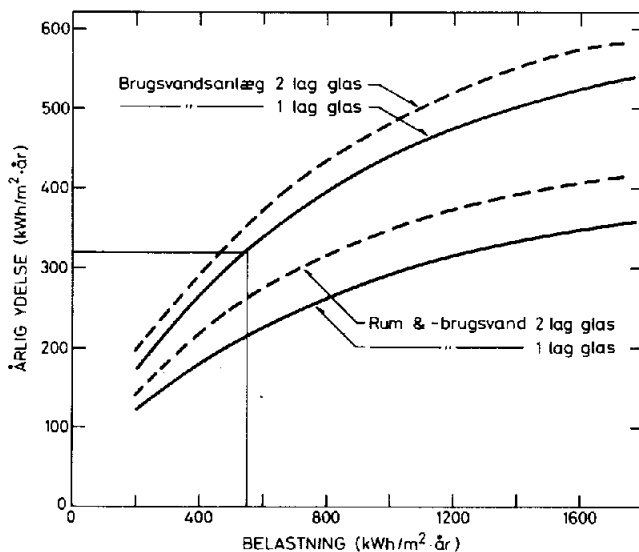
solfangerens areal; for et bestemt varmebehov er belastningen altså lille, når solfangerarealet er stort (og omvendt).

Figur 5.2 viser hvorledes fire forskellige solvarmeanlægs årlige udbytte kan forventes at variere med belastningen. Det ringe udbytte for store (og derfor svagt belastede) anlæg hænger sammen med flere egenskaber ved solvarmeanlæg: Et stort anlæg vil om sommeren være i stand til at dække hele varmebehovet, endda med en overproduktion af energi, der ikke kan udnyttes; i stedet for at blive udnyttet mistes den overskydende energi fra lagertanken som varmetab. Desuden vil den høje tanktemperatur bevirke, at solfangerens indløbstemperatur også bliver høj og solfangerens nyttevirkning dermed lav (jvr. figur 3.4). Endelig bør det også nævnes, at et lavt belastet solvarmeanlæg vil være i drift et betydeligt færre antal timer end et hårdt belastet anlæg. Dette skyldes, at cirkulationspumpen, der driver solfanger-væsken rundt i systemet, i reglen først sættes igang, når temperaturen øverst i solfangeren er noget højere end i bunden af lagertanken. En høj temperatur i lagertanken giver derfor et relativt ringe antal driftstimer og en tilsvarende lav energiproduktion.

Eksempel 5.2

Et hus har et årligt varmtvandsbehov på 4400 kWh/år. Hvor stor en del af dette behov kan dækkes af et solvarmeanlæg med 8 m² sydvendt solfanger? Solfangerens hældning er 45°, og den er udstyret med 1 lag glas.

Løsning: Solfangerens belastning er $4400/8 = 550 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$. Af figur 5.1 ses, at det forventede udbytte er ca. $320 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$. Hele anlægget kan derfor forventes at yde $8 \cdot 320 = 2560 \text{ kWh/år}$. Dækningsgraden (dvs den procentdel af behovet, der dækkes af solvarme) bliver altså $\frac{2560}{4400} \cdot 100 = 58\%$ på årsbasis.



Figur 5.2 Det forventede årlige udbytte per m^2 solfanger vises som funktion af solfangerens belastning for fire forskellige typer solvarmeanlæg. Solvarmeanlægget antages installeret i et hus med et årligt varmtvandsbehov på 4-5000 kWh og et rumopvarmningsbehov mellem 6000 og 24000 kWh om året (disse intervaller omfatter så godt som alle almindelige parcelhuse). Solfangeren antages sydvendt og med hældning omkring 45° . Lagerets størrelse er $80 \text{ liter}/m^2$ solfanger, og væskegennemstrømningen er 1 liter per minut per m^2 solfanger. Øvrige solfangerparametre som angivet i tabel 3.2.

Kurverne er baseret på EDB beregninger ved Dth (Solvarme, 1979; side 294).

4. F-Chart metoden

Den i forrige paragraf omtalte EDB-simulering rummer principielt den bedste mulighed for at følge et solvarmeanlægs præstationer time for time året igennem. Men på den anden side er de nødvendige EDB-programmer tidskrævende at lave,

ret kostbare at køre og kun tilgængelige for få mennesker på større institutioner og laboratorier. Desuden medfører usikkerhed om anlægsparmetre, og vejrets meget betydelige variationer fra år til år, at selv forudsigelser af anlæggets årlige ydelse per m^2 bliver behæftet med betydelig usikkerhed.

I de senere år er der fremkommet nye og betydeligt enklere metoder til at forudsige solvarmeanlægs ydelser over længere tidsrum, for eksempel måned for måned. Erfaringer både i USA og Danmark tyder på, at den såkaldte "F-chart metode" er den bedste approksimationsmetode til vurdering af solvarmeanlægs langtidspræstationer. Metoden blev udviklet på grundlag af flere hundrede EDB-simuleringseksperimenter, og den er ikke mere kompliceret, end at de nødvendige beregninger kan udføres på en almindelig lommeregner. Den er således tilgængelig for alle dem, der planlægger, bygger eller bare ønsker at vurdere solvarmeanlæg. Det bør endda pointeres, at metoden rummer mange muligheder for at ændre både vejr- og anlægsparmetre.

Interesserede kan finde en kort gennemgang af F-Chart Metoden i (Bason, 1978). Med denne artikel som grundlag er man i stand til at klare en lang række praktiske solvarmeberegninger. Yderligere information om F-Chart metoden kan findes i Litteraturlistens reference (K) samt (Solvarme, 1979) og (Bason og Vest-Hansen, 1980).

5. Driftserfaringer

På vore breddegrader er interessen for solvarme først for alvor dukket op under og efter oliekrisen i 1973-74. Ganske vist har nogle få pionerer igennem en menneskealder ydet en storartet indsats for at fremme den praktiske udnyttelse af solenergi til dette formål; men de har været få, og den økonomiske støtte, de har modtaget, har været yderst beskednen. Helt anderledes ser situationen ud i dag. I langt de fleste lande udfoldes der nu ganske betydelige anstrengelser - både offentligt og privat - for at udvikle og afprøve sol-

varmeanlæg af enhver slags. Herhjemme sorterer den offentlige indsats under Energiministeriet, der har stillet et beløb på 17 millioner kroner til rådighed for et 4-årigt forsknings- og udviklingsprogram. Programmet påbegyndtes i 1977 og havde bl.a. til formål at installere og afprøve en række solvarmedemonstrationsanlæg^(*), nogle på eksisterende huse og andre på nybygninger. De foreløbige erfaringer herfra har ikke været alt for gunstige. I (Statusrapport, 1980) konkluderes således, at de hidtil opnåede ydelser fra 8 demonstrationsanlæg har været betydeligt mindre end forventet (kun 100-200 kWh/m²·år). Årsagen hertil angives at være, at så godt som alle anlæggene har været plaget af forskellige tekniske problemer, herunder deciderede installationsfejl. Rapportens forfattere føler sig dog overbeviste om, at når alle de indhøstede erfaringer bliver taget i betragtning ved projektering af nye anlæg, vil udbyttet herfra blive på over 300 kWh/m²·år for rimeligt hårdt belastede anlæg.

At man faktisk kan opnå et solvarmeudbytte, der er lige så stort, som de teoretiske beregninger angiver, mener vi at kunne dokumentere ved følgende konkrete eksempler:

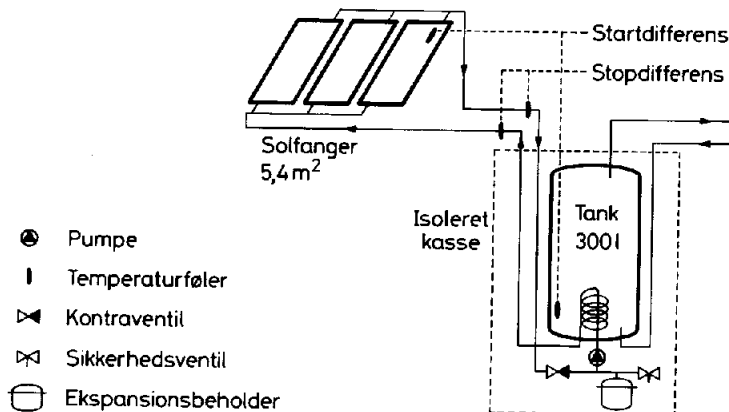
1. Brugsvandsanlæg ved DtH og Teknologisk Institut

Med baggrund i de indhøstede erfaringer blev der i sommeren 1980 under Energiministeriets Solvarmeprogram opført to forbedrede solvarmeanlæg til varmt brugsvand. Anlæggene, der hver består af en 5,4 m² solfanger (1 lag glas og selektiv overflade) med tilhørende 300 liter lagertank, er installeret på henholdsvis Laboratoriet for Varmeisolering (DtH) og Teknologisk Institut.

Fornylig er udkommet en rapport (Ellehauge, 1980), der beskriver solvarmeanlæggenes første fire måneders driftsperiode, og resultaterne er meget opmuntrende. I tabel 5.2 vises både

(*) Kortfattede beskrivelser af de enkelte projekter i Energiministeriets Solvarmeprogram (herunder også driftserfaringer) bringes løbende i SOLVARMENYT, som kan fås ved henvendelse til TEKNOLOGISK INSTITUT, Gregersensvej, 2630 Tåstrup (tlf.02-996611)

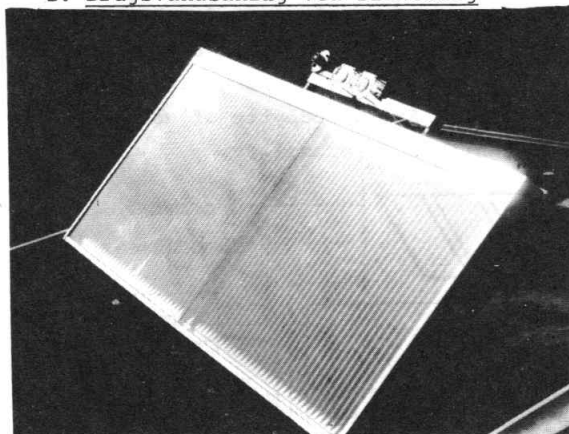
målte og EDB-beregned ydelser for anlægget på Laboratoriet for Varmeisolering. Det fremgår heraf, at der er tale om en særdeles god overensstemmelse, og der er følgelig al mulig grund til at forvente et højt årligt udbytte af samme størrelsesorden, som EDB beregningerne forudsiger.



MÅNED	JULI	AUGUST	SEPTEMBER	OKTOBER
Globalstråling (kWh/m ² ·md)	132	97	115	53
Faktisk udbytte (kWh/m ² ·md)	43	43	42	27
Forventet udbytte(EDB) (kWh/m ² ·md)	43	41	42	24
Forventet Årsudbytte (EDB): 350-400 kWh/m ² ·år				

Tabel 5.2 Fire måneders udbytte af brugsvandsanlæg på Dth.

2. Brugsvandsanlæg ved Silkeborg



I begyndelsen af maj 1980 blev der i et almindeligt parcelhus i Silkeborg installeret et lille solvarmeanlæg til delvis dækning af husets varmtvandsbehov. Solfangerens areal er på $2\frac{1}{4} \text{ m}^2$, den er udstyret med 1 lag glas og absorberfladen er malet

matsort. Solfangerparametrene er: $U_s = 7,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $(\tau\alpha)_{\text{eff}} = 0,78$ og $F_R = 0,845$. Lagertanken rummer 61 liter vand per m^2 solfanger og er særdeles velisoleret.

Anlægget har i det forløbne halve år fungeret meget tilfredsstillende, således som det fremgår af tabel 5.2. Yderligere detaljer kan findes i (Bason, 1981).

MÅNED	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV
Globalstråling ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{md}$)	131	128	92	113	66	49
Faktisk udbytte ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{md}$)	60	56	32	39	14	12
Forventet udbytte (F-Chart) ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{md}$)	48	47	29	38	16	5
Forventet Årsudbytte (F-Chart): 372 kWh/m år						

Tabel 5.2 Et halvt års udbytte af brugsvandsanlæg i Silkeborg

Konklusioner

Som det dels fremgår af de omtalte danske erfaringer og dels af talrige andre fra den internationale faglitteratur, tillader vi os at drage følgende konklusioner:

- 1) Solenergiteknikken er lettilgængelig og har været afprøvet i andre lande i mange år (ref.H). De skuffelser, man har oplevet herhjemme i forbindelse med lave ydelser kan tilskrives: a) forkert dimensionering af solfangerarealet i forhold til varmekonsumet, b) forkert tankstørrelse og varmeveksling, c) dårlig isolering af solfanger, forbindelsesrør og lagertanke, d) uhensigtsmæssig styring.
- 2) Et kompetent udført brugsvandsanlæg, hvor den årlige belastning er på mindst 500 kWh per m² solfanger, og hvor lagertanken kan rumme ca. 75 liter per m² solfanger, vil yde 300-400 kWh/m²·år. Den nøjagtige ydelse afhænger naturligvis af solfangerens orientering og øvrige anlægsparametre samt af de aktuelle vejrforhold.

Opgaver til kapitel 5

1.

- a) Eftervis resultaterne i tabel 5.1 - gerne ved hjælp af en computer eller en programmerbar lommeregner.
- b) Sammenlign de beregnede værdier for solfangerens effektivitet η og tanktemperaturen T_q med det tidligere fundne (knap så realistiske) resultater for de samme størrelser i tabellerne 3.1 og 4.1. Forklar hvorfor værdierne i tabel 5.1 er de bedste.
- c) Gennemfør analoge beregninger med ændrede input parametre. Det er tilrådeligt kun at ændre én parameter ad gangen.

2. Et hus har et årligt energibehov til rumopvarmning og til varmt brugsvand på 12.500 kWh, og dette behov søges delvis dækket med et solvarmeanlæg, hvis årlige ydelse antages at være som vist i figur 5.2. Find solvarmeanlæggets årlige dækningsgrad - dvs anlæggets ydelse divideret med det årlige varmebehov - for følgende anlæg:

- a) Solfanger med 1 lag glas og areal på henholdsvis 15, 30 og 60 m².
- b) Samme som under a), men med 2 lag glas i solfangeren.
- c) Samme som under a), men husets årlige varmebehov antages nu at være 25.000 kWh.

3. Et vilkårligt punkt P på én af kurverne i figur 5.2 svarer til en bestemt belastning af anlægget og en hertil hørende årlig ydelse for et givet solvarmeanlæg.

- a) Gør rede for at det pågældende solvarmeanlægs årlige dækningsgrad kan findes som hældningskoefficienten for en ret line fra begyndelsespunktet til punktet P.
- b) Hvilken grænseværdi vil dækningsgraden have for meget små, henholdsvis meget store anlægsbelastninger?
- c) Hvilken belastning er rimelig for at solvarmeanlægget både kan give en hæderlig dækningsgrad og en god årlig ydelse?

6. Økonomi

1. Generelle bemærkninger

Vi møder i energidebatten ofte stærkt modstridende påstande om rentabiliteten både af solfangere og af andre energianlæg, der bygger på de vedvarende energikilder. En fløj i debatten hævder, at der allerede nu er god økonomi i at opbygge et stort antal solvarmeanlæg, men henviser i øvrigt til at sædvanlige økonomiske overvejelser er utilstrækkelige i denne sammenhæng. En anden fløj påstår derimod, at solvarmeanlæg er uøkonomiske, og at de næppe nogensinde kommer til at spille nogen rolle i landets energiforsyning.

Når man ser på spørgsmålet, om det kan betale sig at udnytte solenergien, kan man anlægge to principielt forskellige synspunkter. Man kan for det første spørge, om det rent pengeøkonomisk kan betale sig at udnytte solenergien - altså om det er rentabelt at bygge solvarmeanlæg. Og man kan spørge, om det energiøkonomisk er fornuftigt at bygge solvarmeanlæg.

Spørgsmålet om solvarmesystemers pengeøkonomi afhænger af størrelser som prisen på olie, kul og uran over hele anlæggets levetid. Det afhænger af anlægsomkostningerne for solvarmeanlæg set i forhold til de tilsvarende omkostninger for traditionelle opvarmningssystemer (oliefyr, gasfyr, fjernvarme, elvarme etc.). Og det afhænger af det til enhver tid gældende renteniveau.

Gør man antagelser om værdierne af disse økonomiske parametre samt om solvarmeanlægs levetid og årlige energiproduktion, kan man forholdsvis let vurdere privatøkonomien i solvarmeanlæg (se afsnit 2); dette er naturligvis, hvad

der først og fremmest interesserer den enkelte borger, som overvejer at anskaffe et solvarmeanlæg. Som allerede nævnt i kapitel 1 byder solvarmeanlæg dog også på en række samfundsøkonomiske fordele. Disse fordele bør man naturligvis forsøge at sætte tal på, således at man også kan opnå en fyldestgørende samfundsøkonomisk analyse af solvarme i energiforsyningen. Den slags analyser er for nylig begyndt at dukke op, men af pladshensyn nøjes vi her med at henvise eventuelle interesserede til en fortrinlig rapport om dette emne (Lawaetz, 1979).

På langt sigt er det desuden et vigtigt spørgsmål, om det energiøkonomisk kan betale sig at udnytte solenergien. Det drejer sig i denne sammenhæng om at vurdere den energi, der anvendes ved bygning af et solvarmeanlæg, set i forhold til den fossile energi, anlægget kan spare i løbet af dets levetid. Forskellige undersøgelser (Lawaetz og Furbo, 1979; Elbek, 1979) er kommet frem til en energimæssig tilbagebetalingstid på 3-8 år, afhængig af anlæggets størrelse og konstruktion. Det bør bemærkes, at dette er en ret lang energimæssig tilbagebetalingstid sammenlignet med de fleste andre energianlæg (Elvekjør og Nielsen, 1980). Anvendelse af mindre energikrævende materialer skulle dog kunne nedbringe solvarmeanlægs tilbagebetalingstid en hel del; men vi må også her afstå fra at gå i detaljer på dette punkt.

2. Pengeøkonomi

For kunne foretage en fyldestgørende privatøkonomisk analyse af solvarmeanlæg kræves der viden om de faktorer, der er opregnet i nedenstående tabel. Vi kommenterer dem én efter én i det følgende

Solvarmeanlæggets årlige ydelse. Såfremt anlægget fungerer, som det skal, kan man finde den forventelige årlige ydelse, som omtalt i kapitel 5. Lad os til eksempel betragte et lidt ældre parcelhus med et årlig varmtvandsforbrug på 4.500 kWh og rumopvarmningsforbrug på 23.500 kWh. Tænker vi os dette hus udstyret med forskellige solvarmeanlæg, skulle vi ifølge

BETYDNING	ENHED
Solvarmeanlæggets årlige ydelse per m ²	kWh/m ² ·år
Installationsomkostninger per m ² solfanger	kr/m ²
Energipris på anskaffelsestidspunkt	kr/kWh
Anlæggets levetid	år
Renteniveauet	
Energiprisens stigningstakt	

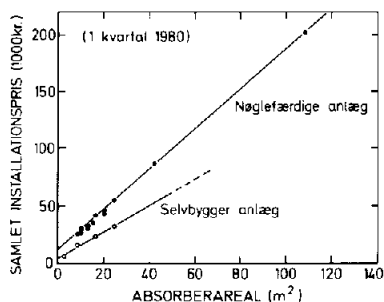
Tabel 6.1 Økonomiske parametre for solvarmeanlæg.

NR.	ANLÆG		BELASTNING ÅRLIG YDELSE		PRIS (kr/m ²)
	TYPE	AREAL (m ²)	(kWh/m ² ·år)	(kWh/m ² ·år)	
I	Brugsvandsanlæg	8	563	325	2770
II	Varme+Brugsvand	20	1400	335	2290
III	" "	40	700	240	2040
IV	" "	60	467	195	1960
Husets årlige forbrug af varmt brugsvand:			4500 kWh/år		
Husets årlige varmeforbrug				23500 kWh/år	

Tabel 6.2 Forskellige solvarmeanlægs forventede årlige bidrag til energiforbruget i typisk parcelhus fra omkring 1970. Solfangerne antages alle at være udstyret med 1 lag glas.

figur 5.2 kunne påregne årlige ydelser fra disse anlæg, som vist i tabel 6.2.

Installationsomkostninger. Det er naturligvis vigtigt, at der foreligger et realistisk billede af de faktiske installationsomkostninger, når man skal tage stilling til rentabiliteten af et solvarmeanlæg. Ved henvendelser til leverandører har vi fået oplyst totale installationsudgifter for 17 anlæg med vidt forskellige solfangerarealer. Figur 6.1 viser disse data med priser gældende for 1.kvartal 1980. Det fremgår heraf, at installationsomkostningerne med god tilnærmelse er en lineær funktion af solfangerarealet.



Figur 6.1 Faktiske installationsomkostninger, alt medregnet, (1.kvartal 1980) vises for 17 solvarmeanlæg leveret af to Midt-Jydske firmaer. Heraf var 4 anlæg "selvbyggeranlæg". Kun materialeomkostninger er medregnet for disse anlæg.

Vi har på figuren indtegnet de to rette linier, der er i bedst overensstemmelse med de aktuelle data for henholdsvis nøglefærdige anlæg og selvbyggeranlæg. Liniernes ligninger (jfr. opgave 6.1):

$$\text{PRIS} = 1800 \frac{\text{kr}}{\text{m}^2} \cdot A_s + 10000 \text{ kr} \quad (6.1)$$

$$\text{PRIS} = 1200 \frac{\text{kr}}{\text{m}^2} \cdot A_s + 4000 \text{ kr}$$

Ved hjælp af formel (6.1) har vi fundet den totale installationspris per m² for hvert af anlæggene i tabel 6.2. For nøglefærdige anlæg er prisen angivet i tabellens sidste kolonne.

Det er nok ikke sandsynligt, at prisen fremover vil falde særlig meget på anlæg til eksisterende bygninger. Ganske vist kommer der til stadighed billigere og mere effektive solfangere på markedet. Men resten af solvarmeanlæggets komponenter (lagertanke, rør, pumper, ventiler, termostater etc.) indgår også i traditionelle opvarmningssystemer og har forlængst gennemløbet de tilsvarende udviklingsforløb. Vi må nok også regne med at arbejdslønnen - som tæller ganske tungt - vil forblive nogenlunde konstant. Derimod skulle der være gode muligheder for, at prisen per m² på solvarmesystemer til nye huse kan formindskes en hel del. Dette gælder naturligvis ikke mindst nye huse, der indgår i en større samlet bebyggelse med kollektiv solvarmecentral.

Energipris på anskaffelsestidspunkt. Dette er naturligvis en kendt størrelse, men den afhænger af hvilken form for varme, solvarmeanlægget skal supplere. Har huset elvarme som supplement, kan energiprisen^(*) sættes til 40-50 Øre/kWh de fleste steder i landet. Er huset derimod udstyret med olie-fyr, vil energiprisen være ca. 30 Øre/kWh (1 liter olie koster omkring 2.10 kr og indeholder 10 kWh energi; med en typisk nyttevirkningsgrad på 70% vil oliefyret levere varme til ca. 30 Øre/kWh).

Anlæggets levetid. Denne er ikke særlig godt kendt, men der regnes med noget i retningen af 15-25 år.

Renteniveauet. Ret uforudsigeligt hvad den vil være på investeringstidspunktet. Man bør nok regne med en effektiv rente på 7-10% p.a., når man tager hensyn til, at renteudgifter må trækkes fra i den skattepligtige indkomst.

Energiprisens stigningstakt: Dette er den vanskeligste af alle parametre, for de sidste 10 års udvikling har belært os om, at det er næsten umuligt at forudsige brændselsprisen bare et par år ud i fremtiden. Der er dog næppe tvivl om, at prisen på energi vil vokse kraftigt også i fremtiden.

På grund af den usikkerhed, der råder med hensyn til værdierne af de ovenfor omtalte parametre, er det åbenbart en uhyre vanskelig - for ikke at sige umulig - opgave at lave en udtømmende privatøkonomisk analyse af solvarmeanlægs rentabilitet. Det er derfor også let at forstå, at forskellige mennesker kan komme til helt forskellige konklusioner blot ved f.eks. at starte med forskellige antagelser om brændselsprisens årlige stigningstakt.

Vi har bestemt ikke til hensigt at bilde læseren ind, at vi har et specielt godt bud på energiprisen i fremtiden. Derimod vil vi nu gøre rede for, at man alligevel kan lave en kvalificeret sammenligning af økonomien i et solvarmeanlæg med økonomien i andre brændselsbesparende foranstaltninger (isolering etc.).

Lad os som udgangspunkt forestille os en gård eller et hus (eventuelt en klynge huse), der er totalt uisolerede, og som

(*) Priserne er alle henført til 1.kvartal 1980.

opvarmes på traditionel måde, d.v.s. ved hjælp af oliefyrr eller elvarme. Den årlige energiregning vil være meget stor, og ejeren ønsker naturligvis at gøre noget for at formindske den. En lang række muligheder foreligger: Han/hun kan f.eks. vælge at isolere gulv, vægge og loft; vinduernes 1 lag glas kan erstattes med 2 eller endog 3 lag glas, og endelig kan der også installeres en solfanger, en vindmølle eller et andet vedvarende energianlæg. Spørgsmålet er nu: I hvilken rækkefølge bør investeringerne foretages, når ejeren naturligvis først vil foretage de foranstaltninger, der har den korteste simple tilbagebetalingstid (ST). Den simple tilbagebetalingstid defineres her som forholdet mellem de totale installationsomkostninger og værdien af det sparede brændsel det første år^(*).

For de mest almindelige isoleringsarbejder ved efterisolering af eksisterende boliger kan opstilles en liste over nødvendige investeringer og heraf følgende besparelser. Listen er opskrevet i tabel 6.3, og oplysningerne heri er baseret på omfattende undersøgelser og vurderinger i boligministeriet. Isoleringens tykkelse - svarende til mm mineraluld - er angivet før og efter arbejdets udførelse. I tabellen er der regnet med at 1 kWh koster 0,30 kr, svarende til at huset tænkes opvarmet med et oliefyrr.

Ved at sammenligne tabellerne 6.3 og 6.4 må vi altså konkludere, at der er adskillige brændselsbesparende foranstaltninger, der er væsentligt mere rentable end anskaffelse af et solvarmeanlæg - selv når dette fungerer upåklageligt. Heraf kan naturligvis ikke udledes, at solvarmeanlæg behøver at være uøkonomiske, for prisen på fossilt brændsel kan forventes at stige kraftigt også i de kommende år. Derimod betyder det, at husets isoleringsstandard i hvert fald bør bringes op på et rimeligt niveau, før det kan forsvares at anskaffe et solvarmeanlæg (Se øvelse I bag i bogen).

(*) Den faktiske tilbagebetalingstid kan kun beregnes, hvis man kender (eller antager værdier for) alle parametrene i tabel 6.1. Men den faktiske tilbagebetalingstid er naturligvis kortere end den simple tilbagebetalingstid, når energiprisen stiger kraftigere end inflationen (Bason, 1978).

	Isolering		Investering	Besparelse	Simpel Tilbage
	Før	Efter	(1980 kr/m ²)	(kWh/m ² /år)	betalingstid
					(år)
<u>Lofter</u>	0	200	73	86	2,9
	50	200	59	27	7,3
	100	200	42	12	11,7
<u>Ydervægge</u>					
Hulmur	0	80	55	81	2,3
Massiv Tegl	0	125	290	70	13,8
<u>Gulve</u>	0	100	55	50	3,7
	50	100	42	12	11,7
<u>Vinduer</u>					
Glasud-	1 lag	2 lag	396	233	5,7
skiftning	1 "	3 "	594	309	6,4
Total ud-					
skiftning	1 "	3 "	1980	309	21,0

Tabel 6.3 Rentabilitet ved isoleringsarbejder ifølge
(Boligministeriet, 1978). Antaget energipris: 0,30 kr/kWh.

Anlæg	Investering	Energiproduktion	Energiproduktionens værdi	Simpel Tilbage
	(1980 kr/m ²)	(kWh/m ² ·år)	(kr/m ² ·år)	betalingstid
				(år)
I	2770	325	98	28
II	2290	335	101	23
III	2040	240	72	28
IV	1960	195	59	33

Tabel 6.4 Nogle solvarmeanlægs simple tilbagebetalings-
tid^(*). Tilbagebetalingstiden vil naturligvis være væsentligt
kortere for selvbyggeranlæg. Den vil også forbedres, hvis man
helt kan slukke for oliefyret i 4-5 sommermåneder.

(*) Til sammenligning kan nævnes, at en mindre vindmølle vil
have en simpel tilbagebetalinstid på ca. 10 år, såfremt
den står på en lokalitet med gode vindforhold (Elvekjør
og Nielsen, 1980).

ØKONOMI

Vi gør atter opmærksom på, at ovenstående betragtninger fortrinsvis angår allerede eksisterende huse. Fremtidige specielt designede huse til passiv solvarmeudnyttelse eller huse i større bebyggelser, der tilkobles solvarmecentraler, kan meget vel vise sig at blive det vigtigste marked for solvarmeanlæg i Danmark.

Appendix A. Varmetransport

I dette appendix gives en kort omtale af de tre fysiske mekanismer, som kan give anledning til varmetransport, nemlig varmestråling, varmeledning og varmekonvektion. Hensigten er dels at give læseren en kvalitativ fysisk forståelse af disse mekanismer og dels at sammenstille formler, figurer og tabeller, som bruges i hovedteksten.

A1. Varmestråling

Der er en fundamental fysisk lov, at alle accelererede ladninger udsender elektromagnetisk stråling. Det er en simpel konsekvens af denne lov, at alle stoffer til stadighed udsender elektromagnetisk stråling - den såkaldte varmestråling. Årsagen er følgende:

I ethvert fast stof sidder de enkelte molekyler nok på bestemte positioner, men ikke desto mindre svinger de omkring deres ligevægtsstillinger. I en væske eller en gas farer molekylerne derimod rundt mellem hinanden, og deres hastigheder skifter ustandselig som følge af indbyrdes kollisioner. I begge tilfælde gælder det, at jo højere temperatur, jo voldsommere er disse bevægelser og jo kraftigere er dermed også ladningernes accelerationer. Altså udsendes der elektromagnetisk stråling, og strålingens intensitet må forventes at vokse med legemets temperatur. Det viser sig endvidere, at strålingens fordeling på forskellige bølgelængder vil ændres, når temperaturen ændres. Ved højere temperatur vil der udsendes forholdsvis flest strålingskvanter (fotoner) med høj frekvens (og dermed lille bølgelængde).

Absolut sort legeme

Spørgsmålet er nu hvor meget energi, der udstråles, og hvordan den præcis er fordelt på de forskellige bølgelængder. Svaret herpå er ikke let at give for virkelige legemer, men i den gren af fysikken, som går under navnet Statistisk Mechanik, kan man udlede en formel for den maksimale effekt - kaldet $I_{\text{sort}}(\lambda)$ - som kan udstråles pr.m² af legemets overflade og pr.bølgelængdeenhed omkring bølgelængden λ .

Plancks strålingslov:

$$I_{\text{sort}}(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

$$c_1 = 3,74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{A.1})$$

$$c_2 = 1,44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

T = legemets absolutte temperatur

Betegnelsen $I_{\text{sort}}(\lambda)$ skyldes, at der er tradition for at kalde et ideelt legeme, der fuldstændigt adlyder Plancks lov for et "absolut sort legeme".

Funktionen $I_{\text{sort}}(\lambda)$ har kun et enkelt maksimum for λ positiv. Dette maksimum forekommer ved bølgelængden λ_{max} , som kan findes ved at danne differentialkvotienten $\frac{dI_{\text{sort}}}{d\lambda}$ og sætte den lig med 0. Resultatet er:

Wiens Forskydningslov

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (\text{A.2})$$

λ_{max} er altså omvendt proportional med legemets absolutte temperatur.

Plancks strålingslov og Wiens forskydningslov er illustreret i figur A1(a), der viser $I_{\text{sort}}(\lambda)/I_{\text{sort}}(\lambda_{\text{max}})$ som funktion af λ for to forskellige T-værdier, nemlig 400 K og 6000 K. Temperaturen 6000 K svarer nogenlunde til solens overfladetemperatur, medens 400 K er en repræsentativ værdi for de temperaturer, vi bl.a. møder i forbindelse med solvarmeanlæg. Man bedes notere sig, at disse to varmestrålingsfordelinger falder næsten fuldstændigt i forskellige bølglængdeområder!

Ved integration af Planck's strålingslov over alle bølglængder fås den totale udstrålede effekt per arealenhed for et absolut sort legeme:

Stefan Boltzmann's lov

$$I_{\text{sort}} = \int_0^{\infty} I_{\text{sort}}(\lambda) d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

T = legemets absolutte temperatur

(A.3)

Stefan Boltzmann's lov viser, at den udstrålede effekt vokser med fjerde potens af den absolutte temperatur. Øges temperaturen med en faktor 2, vil udstrålingen altså vokse med en faktor på ikke mindre end 16!

Spørgsmål. Hvor stor er udstrålingen pr.m² fra solens overflade, når denne kan betragtes som et absolut sort legeme ved 6000 K? Hvor stor er udstrålingen pr.m² fra et absolut sort legeme ved 400 K?

Virkeligt legeme

Et virkeligt legeme med temperatur T udstråler en effekt pr.m², som kan skrives:

$$I(\lambda) = \epsilon(\lambda) \cdot I_{\text{sort}}(\lambda) \quad (\text{A.4})$$

hvor $\epsilon(\lambda)$ - legemets udstrålingsfaktor - naturligvis ligger mellem 0 og 1 for alle bølgelængder. Et absolut sort legeme kan forstås som det grænsetilfælde, hvor $\epsilon(\lambda)=1$ for alle bølgelængder.

Når et virkeligt legeme rammes af stråling med bølgelængden λ , vil brøkdelen $\alpha(\lambda)$ - legemets absorptionsfaktor - blive absorberet (resten vil enten reflekteres eller transmitteres). Der gælder følgende fundamentale lov:

Kirchhof's lov

$$\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda) \quad \text{for } \underline{\text{alle}} \lambda \quad (\text{A.5})$$

Kirchhoffs lov medfører altså, at såfremt et legemes overflade udstråler godt ved en vis bølgelængde, vil det også absorbere godt ved den samme bølgelængde. Derimod er det naturligvis ikke i modstrid med denne lov, at ϵ (og dermed også α) kan være stor i ét bølgelængdeområde, men lille i et andet.

Antag nu, at vi er i stand til at lave en absorber overflade med absorptions- og udstrålingsegenskaber som vist på figur A.2(b). Altså $\alpha = \epsilon$ er en konstant (α_{sol}) i solspektrret ($\lambda < 3\mu\text{m}$) og en anden konstant (ϵ_{inf}) i det infrarøde område ($\lambda > 3\mu\text{m}$). En sådan overflade kaldes en ideel selektiv overflade; ved sammenligning med figur A.2(a) ses, at vi vil få absorberet brøkdelen α_{sol} af den indkommende solstråling, hvorimod den udgående varmestråling vil blive drastisk reduceret i forhold til før, nemlig til brøkdelen ϵ_{inf} af den absolut sorte absorbers varmestråling.

Spørgsmålet er nu, om sådanne overflader eksisterer. Svaret er, at man kan komme ganske langt i denne retning, forudsat man er villig til at betale for det. For almindelige plane solfangere går det ikke an, at de bliver for dyre, men ved ret simple og billige galvaniske processer, er man nu i

stand til at udfælde meget tynde lag nikkel eller chrom på absorberpladen (der i reglen er af stål eller aluminium). Herved kan overfladen gøres delvis selektiv, som det fremgår af figur A.2(c), og vi konkluderer herfra, at der i praksis udmærket kan laves en selektiv overflade med

$$\alpha_{\text{sol}} \approx 0,90 \quad \text{og} \quad \epsilon_{\text{inf}} \approx 0,10 \quad (\text{A.6})$$

Planck's strålingslov viser (se figur A.1), at varmeudstrålingen ved en bestemt temperatur kun er væsentligt forskellig fra nul i et meget begrænset bølgelængdeområde. Virkelige legemers udstrålingsfaktorer varierer ofte så lidt indenfor dette område, at man i praksis kan approksimere $\epsilon(\lambda)$ med en konstant værdi. Man siger i så tilfælde, at legemet har en grå overflade.

For to grå overflader med temperaturer T_1 og T_2 samt udstrålingsfaktorer ϵ_1 og ϵ_2 er det muligt at beregne nettooverførslen af varmestraling mellem overfladerne. Her skal vi blot angive de formler, der gælder i to interessante specialtilfælde:

(i) To parallelle plader:

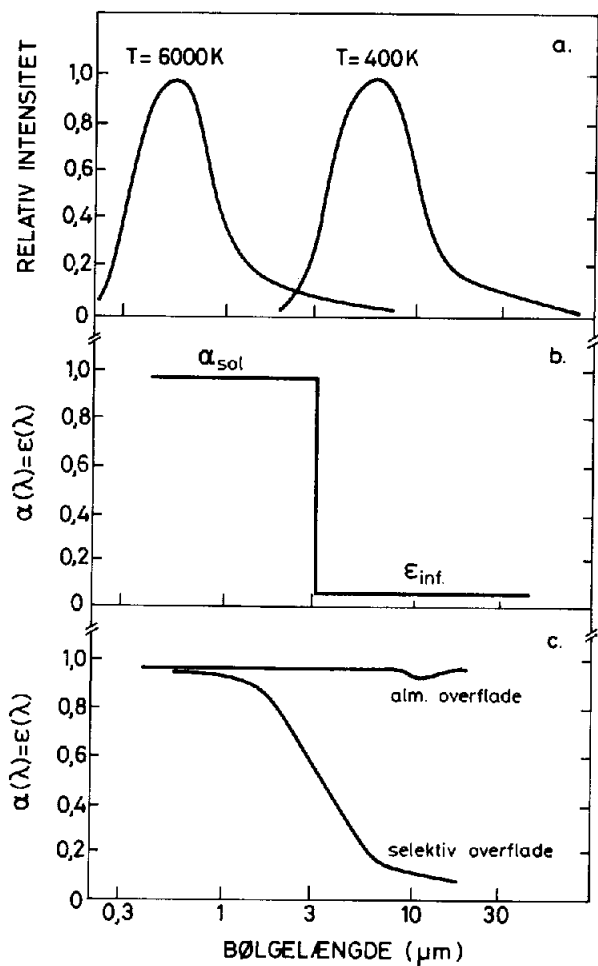
$$q = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (\text{A.7})$$

hvor q er nettooverførslen af stråling pr. m^2 og pr.sekund fra plade 1 til plade 2.

(ii) Plade 1 stråler til hele det omgivne rum:

$$q = \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_{\text{luft}}^4) \quad (\text{A.8})$$

Bemærk, at varmeoverførslen q naturligvis er proportional med differencen mellem temperaturerne i fjerde potens. Hvis temperaturdifferencen er lille, kan vi dog gøre formlerne endnu simplere uden at begå nogen stor fejl. F.eks. kan ligning (A.8) skrives på formen:



Figur A.2 (a) Normeret varmestralingsspektrum fra absolut sorte overflader med temperaturer 400 og 6000 K. Ud ad den lodrette akse er afsat $I_{\text{sort}}(\lambda)/I_{\text{sort}}(\lambda_{\text{max}})$
 (b) Ideel selektiv overflade
 (c) Almindelig absorber og selektiv absorber.

$$q = \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^2 + T_{\text{luft}}^2) (T_1 + T_{\text{luft}}) \cdot (T_1 - T_{\text{luft}}) \quad (\text{A.8})$$

$$= h_{\text{str}} \cdot (T_1 - T_{\text{luft}})$$

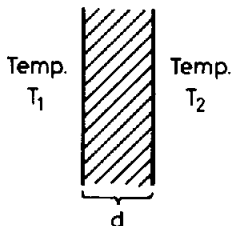
hvor h_{str} tilnærmelsesvis er konstant (vis dette!).

A.2.Varmeledning

I faste stoffer sidder molekylerne ordnet i et gitter, der kan være mere eller mindre regelmæssigt. Molekylerne er bundet til deres faste pladser i gitteret, men de er dog hver især i stand til at foretage svingninger omkring deres ligevægtsstilling. Disse svingningers amplitude afhænger af temperaturen på det pågældende sted i stoffet - en høj temperatur svarer således til store udsving, medens en lav temperatur svarer til små udsving.

Såfremt der i det betragtede faste stof findes temperaturforskelle mellem forskellige områder af stoffet, vil disse temperaturforskelle efterhånden udlignes ved hjælp af den proces, der kaldes varmeledning. Fysisk set består denne proces i, at de molekyler, der har de største gittersvingninger - og derfor størst energi - gradvist overfører noget af deres energi til nabomolekyler, som så igen afleverer energi til andre nabomolekyler osv, osv. Den fysiske lov, der beskriver hvor hurtigt denne varmetransport finder sted, kaldes Fouriers lov, og den kan formuleres således i et specielt, men meget vigtigt tilfælde:

Betragt et lag af et homogent fast stof som vist i figur



Figur A.2

A.2. Laget har tykkelsen d , og der råder de konstante temperaturer T_1 og T_2 på hver sin side af lagets afgrænsningsflader. Fouriers lov siger nu, at varmetransporten gennem laget er proportional med arealet og med temperaturforskellen, men omvendt proportional med tykkelsen. Altså, idet q betegner varmetransport pr.sekund og pr.m²:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_1 - T_2)$$

Her er λ en for stoffet karakteristisk konstant, der betegner varmeledningsevnen. Det er praktisk at skrive Fouriers lov på formen

$$q = k \cdot (T_1 - T_2) \quad (A.9)$$

hvor vi har indført det pågældende stoflags k-værdi ved ligningen $k = \frac{\lambda}{d}$.

Vi ser, at k-værdien netop er den effekt, der transporteres gennem 1 m^2 af stoflaget, når temperaturforskellen er 1 grad. Enheden er altså $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Bemærk, at en lille k-værdi betyder en lille varmetransport gennem stoflaget og dermed en stor isolationsevne. Tabel A.2 giver eksempler på k-værdier, der er relevante til beregning af varmetab fra opvarmede bygninger, fra solfangere og fra solvarmelagre etc.

Stoflag	k-værdi $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Massiv murstensmur	1,35
Hulmur	1,35
Hulmur med indblæst glasuld	0,36
10 cm glasuld	0,35
1 lag glas	6,6
2 lag termorude	3,2
3 lag termorude	2,1

Tabel A.1 Nogle vigtige k-værdier.

Det bør bemærkes, at ligning (A.9) er helt analog til Ohms lov:

$$I = \frac{1}{R} \cdot (V_1 - V_2) \quad (A.10)$$

når

q svarer til den elektriske strøm I

T svarer til den elektriske spænding V

k svarer til den elektriske ledningsevne $\frac{1}{R}$

Det følger heraf, at man kan sammensætte k -værdier i parallel og i serie på samme måde, som vi er fortrolige med for elektriske ledningsevner.

A3. Varmekonvektion

I væsker og luftarter udlignes mindre temperaturforskelle i al overvejende grad ved den proces, der kaldes konvektion. Konvektion er en form for varmetransport, der skyldes, at stoffets molekyler er frit bevægelige; varme stofdele vil jo i almindelighed have en mindre tæthed end kolde stofdele og vil derfor stige til vejrs. Omvendt vil kolde stofdele synke ned, og vi får altså en fysisk bevægelse i mediet, der tenderer mod at blande stofdelene og efterhånden udligne temperaturforskellene. Denne form for konvektion forløber af sig selv og kaldes for naturlig konvektion; desuden forekommer i praksis hyppigt en tvungen konvektion, hvor transporten af væske eller luft forårsages af en ydre kraftpåvirkning, f.eks. forårsaget af en pumpe eller en kompressor.

Varmekonvektion er således en meget kompliceret proces, men det har vist sig, at man ofte kan få en rimelig beskrivelse af denne form for varmetransport ved at antage, at den er proportional med temperaturforskellen, ligesom det jo er tilfældet ved varmeledning. Vi skal her blot nævne ét eksempel, der spiller en rolle i forbindelse med solfangere:

(i) Opvarmet plade i fri luft

Idet pladens og luftens temperatur er henholdsvis T_p og T_{luft} , gælder der approksimativt:

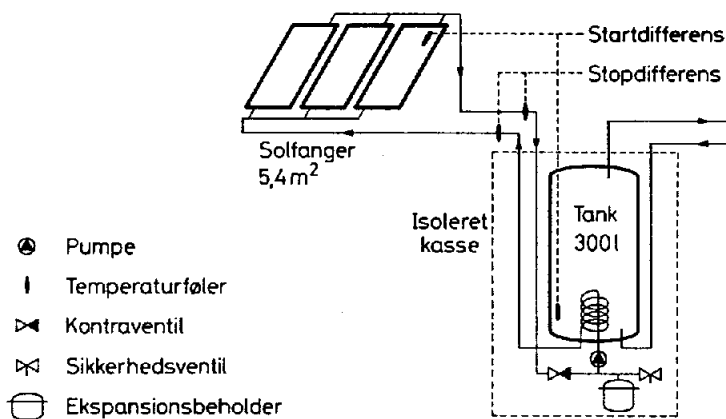
$$q = h_{\text{luft}} \cdot (T_p - T_{\text{luft}})$$

$$h_{\text{luft}} = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$v = \text{Vindhastigheden i m/s}$$

(A.11)

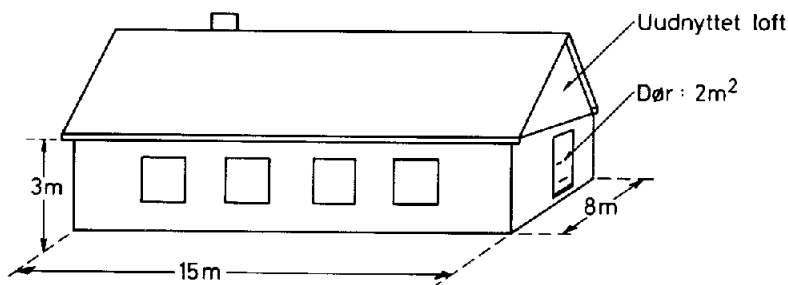
Store øvelser



MÅNED	JULI	AUGUST	SEPTEMBER	OKTOBER
Globalstrå- ling (kWh/m ² ·md)	132	97	115	53
Faktisk ud- bytte (kWh/m ² ·md)	43	43	42	27
Forventet udbytte(EDB) (kWh/m ² ·md)	43	41	42	24
Forventet Årsudbytte (EDB): 350-400 kWh/m ² ·år				

Tabel 5.2 Fire måneders udbytte af brugsvandsanlæg på Dth.

I. Energibesparelser i enfamiliehus



Figur I.1 Skitse af modelhuset, der betragtes i øvelsen.

1. Varmetab i uisoleret hus

<u>Antal beboere:</u> 4 personer	
<u>Varmtvandsforbrug:</u> 200 liter pr.døgn (opvarmet fra 10° - 55°C).	
<u>Isoleringsstandard:</u>	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Vægge: Hulmur} \\ \text{Loft: Helt uisoleret} \\ \text{Gulv: Direkte mod terræn} \\ \text{Vinduer: 1 lag glas} \\ \text{Dør: 4 cm tyk massiv fyr} \end{array} \right.$
<u>Ventilation:</u>	Luftskifte 1 gang pr.time (Luftens varmekapacitet: $0,35 \text{ Wh/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$).
<u>Vinduesareal:</u>	9m^2 mod syd og 9m^2 mod nord

Tabel I.1 Oplysninger om modelhuset

Beregn ved hjælp af ovenstående oplysninger samt bilaget side 85:

- a) Husets transmissionsvarmetab i fyringssæsonen
- b) Husets ventilationstab i fyringssæsonen
- c) Det årlige energiforbrug til varmt vand idet det forudsættes, at der holdes en konstant indetemperatur på 22°C.
- d) Tegn et søjlediagram, der viser de enkelte poster på energiudgiftssiden.

2. Udnyttet gratisvarme og nettovarmeforbrug

Det under 1. fundne energibehov bliver dækket dels ved gratisvarme (fra personer, elektriske installationer og fra direkte solindfald gennem vinduerne) og dels ved et oliefyrsanlæg, der fungerer med en årlig gennemsnitsnyttevirkning på 70%.

Gratisvarme fra el. Husets elforbrug antages at være 3500 kWh/år, hvoraf erfaringsvis ca.halvdelen vil bidrage til rumopvarmningen i fyringssæsonen.

Gratisvarme fra beboere. I gennemsnit kan regnes med en varmeafgivelse på 125 W pr.person i 16 af døgnets timer.

Gratisvarme fra solindfald gennem vinduer: I fyringssæsonen kan man ifølge (Nielsen, 1980) forvente følgende solindfald gennem et vindue:

	<u>sydvendt</u>	<u>øst/vestvendt</u>	<u>nordvendt</u>
1 lag glas	420 kWh/m ²	205 kWh/m ²	95 kWh/m ²
2 lag glas	380 "	185 "	85 "

- e) Beregn den samlede gratisvarme (*) i hele fyringssæsonen.
- f) Hvad bliver husets årlige nettovarmeforbrug, dvs. den varmemængde, der skal tilføres fra oliefyret?

(*) I praksis vil der undertiden være et overskud af gratisvarme, f.eks. på solrige forårs- og efterårsdage, hvilket betyder, at kun en vis brøkdel af den ovenfor beregnede gratisvarme bliver udnyttet. Dette forhold vil vi dog se bort fra her.

g) Hvor stort er det årlige olieforbrug og hvor stor bliver olieregningen, når prisen på 1 liter olie sættes til ~~270~~ kr. **3,75** (1 liter olie indeholder ca. 10 kWh energi, der dog kun udnyttes 70% i oliefyret).

3. Isolering etc.

Ejeren af huset bestemmer sig nu til at ville forbedre isoleringsstandarden for at spare på olieregningen. Han gennemfører i første omgang de i tabellen viste foranstaltninger. De angivne priser er fra (Boligministeriet, 1978), men ført frem til 1980 prisniveau.

	<u>Pris (1980 kr pr.m²)</u>
Ydervægge (hulmursisoleres)	55
Vinduer (forsatsvinduer isættes)	650 (*)
Loft (20 cm mineraluld)	73
Gulv (10 cm mineraluld)	55
8 radiatortermostater påmonteres	196 pr.stk.

Bemærk: Isætning af forsatsvinduer eller termoruder bevirker foruden et nedsat transmissionstab også at ventilationstabet formindskes betydeligt. I det følgende antager vi, at luftskiftet bliver nedsat fra 1 gang til $\frac{1}{2}$ gang i timen. Radiatortermostater har som regel til følge, at man kan klare sig med en lavere gennemsnitstemperatur i huset. Vi regner med 21°C i det følgende.

h) Opstil et nyt energiregnskab for huset (jfr. oplysninger i Bilaget side 85)

Som mål for hvor lønsom en energibesparende foranstaltning er, bruger men ofte begrebet: Sempel Tilbagebetalings-tid (ST), der defineres som

$$ST = \frac{\text{Foretagne investeringer i kr.}}{\text{Første års brandselsbesparelser i kr.}}$$

(*) Den billigste løsning er at anbringe et ekstra lag plastik (3mm Acryl) på den eksisterende ramme; det koster ca. 260 kr/m². Den dyreste løsning (som undertiden kan være nødvendig p.g.a. karmens forfatning) er en totaludskiftning: pris ca. 1600 kr/m².

i) Beregn ST for hver af de 5 angivne energispareforanstaltninger og opstil en prioriteringsliste efter lønsomhed.

4. Solvarmeanlæg

Ejeren ønsker at spare yderligere på olieregningen og på-tænker derfor at anskaffe sig et solvarmeanlæg til delvis dækning af brugsvands- plus rumopvarmningsbehov.

Idet solvarmeanlæggets årlige ydelse antages at være givet ved figur 5.2, skal man opstille et energiregnskab for huset, når solfangerarealet er henholdsvis 10, 25 og 50m². Desuden skal man for hvert af disse tilfælde vurdere solvarmeanlæggets simple tilbagebetalingstid, når det antages, at den totale pris er 2500 pr.m² (heri inkluderet montage-udgifter).

Bilag AGraddøgn

Fyringssæsonen regnes i Danmark at gå fra 24. september til 8. maj (ialt 227 døgn). Antallet af graddøgn (GD), beregnes ved for hvert døgn i denne periode (*) at tage differencen mellem en indetemperatur på 22°C og en udetemperatur, som er det pågældende døgns udetemperatur (bestemt som middelværdi over en længere årrække). Resultat: $GD_1 = 3970$ graddøgn.

Ved beregning af varmetab gennem vægge og vinduer er GD_1 den relevante størrelse. For så vidt angår transmissionstab gennem gulv, er det imidlertid mere relevant at bruge en konstant udetemperatur (jordtemperatur) på 8°C, der giver anledning til et graddøgntal, som er $GD_2 = 3150$ graddøgn.

k-værdier

Definition: k-værdien for en bygningsdel er den effekt, der transporteres gennem 1 kvadratmeter af bygningsdelen, når temperaturforskellen mellem ude og inde er 1 °C (jfr. Appendix A side 78)

Bygningsdel	Isoleringstykkel	k-værdi (W/m ² ·K)
<u>Lofter</u>	0 mm	1,10
	100 mm	0,35
	200 mm	0,18
<u>Gulve</u> (mod terræn)	0 mm	1,30
	100 mm	0,30
<u>Vinduer</u>	1 lag	6,60
	2 lag	3,20
	3 lag	2,10
<u>Ydervægge</u>	hulmur	1,35
	hulmur med isolering	0,36
<u>Dør</u>	3 cm fyrretræ	2,50

(*) Udenfor fyringssæsonen vil gratisvarmen fra beboerne, fra elektriske installationer og fra solindfald gennem vinduer erfaringsmæssigt være tilstrækkeligt til at tilfredsstille varmebehovet.

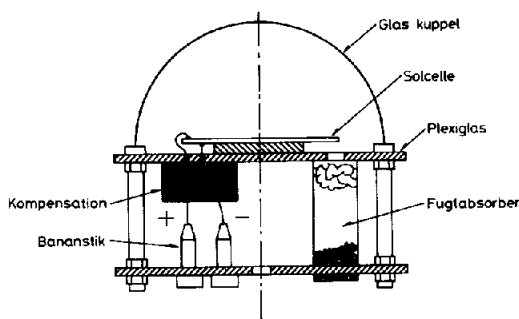
II. Måling af totalt solindfald

Formål: At måle intensiteten af den totale solindstråling - også kaldet globalstrålingen - på en vilkårlig orienteret flade ved hjælp af et pyranometer.

Baggrund: Se kapitel 2.

Måleudstyr (*): Pyranometer, voltmeter og x-t-skriver må anses for nødvendigt udstyr. Supplerende udstyr: integrator og mikrocomputer (**).

Princip:



Figur II.1 Skitse af Silkeborg-pyranometret.

Der findes i dag på markedet pyranometre (f.eks. Eppley og Kipp Zonen), der kan måle intensiteten af det totale solindfald med en nøjagtighed på $\pm 1\%$. Disse udnytter den termoelektriske effekt, og de er meget dyre i anskaffelse. Er man tilfreds med en nøjagtighed på $\pm 5\%$, kan man nøjes med et meget billi-

gere apparat, som f.eks. Silkeborg-pyranometret, der er skitseret i figur II.1. Dette pyranometers hovedbestanddel er en solcelle, og man udnytter, at den frembragte foto-spænding stort set er proportional med lysintensiteten på solcellen (Chalmers, 1976), når solcellen kortsluttes. Instrumentet skal også temperaturkompenseres.

(*) Pyranometer, integrator og mikrocomputer software kan fås ved henvendelse til Frank Bason, Linåbakken 13, 8600 Silkeborg. Dansk vejledning medfølger.

(**) Vedrørende brug af mikrocomputer i undervisningen henvises til en artikel af Frank Bason; artiklen vil blive offentliggjort i LMFK-bladet i løbet af 1981.

MÅLING AF TOTALT SOLINDFALD

Forsøgsforslag	Pyranometer	Voltmeter	x-t-skriver	Integrator	Mikrocomputer
(I) Mål den øjeblikkelige solindstråling. I forbindelse med en øvelsestime kan man f.eks. nå at notere indstrålingsværdier i løbet af 30 minutter og tegne et grafisk billede. Globalstrålingen kan derefter findes ved opmåling af arealet under kurven	x	x			
(II) Registrer solindfaldet over en periode på flere timer ved hjælp af en x-t-skriver (se figur 2.3). Beregn globalstrålingen over hele måleperioden.	x		x		
(III) Registrer den daglige globalstråling over en længere periode. De daglige målinger afbildes i et søjlediagram, og den samlede globalstråling i hele måleperioden findes. Sammenlign evt. med data fra Meteorologisk Institut	x			x	
(IV) Foretag en løbende registrering af solindfald, evt. sammen med andre parametre (f.eks. i forbindelse med en undersøgelse af et solvarmeanlægs ydelse).	x			x	x

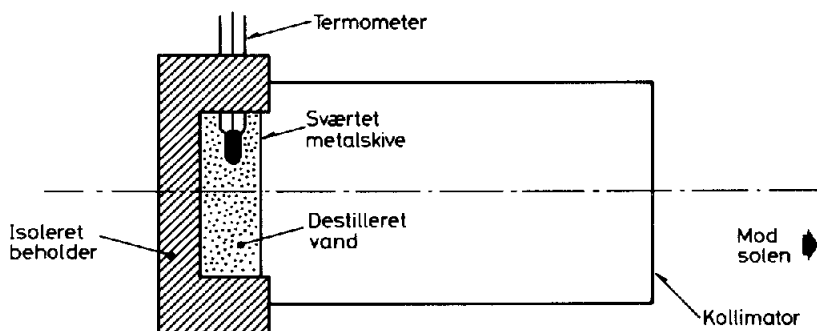
Videregående litteratur: Referencerne (Solvarme, 1979), og specielt (Lawaetz, 1980) giver en udmærket oversigt over måling af solindfald i Danmark.

III. Måling af direkte solindfald

Formål: At måle den direkte solindstråling ved hjælp af et pyrheliometer (*).

Baggrund: Se kapitel 2

Princip: Da pyrheliometret er en slags "minisolfanger med tilhørende lagertank", kan dets termiske egenskaber beskrives i lighed med solfangeren og lagertanken i kapitlerne 3 og 4. Vi nøjes derfor her med at give en meget kort omtale af pyrheliometret. En grundigere beskrivelse af instrumentet samt en mere udførlig udledning af nedenstående formler findes i en artikel i LMPK-bladet (Bason, 1980). Figur III.1 viser en principskitse af instrumentet.



Figur III.1 En afmålt vandmængde i en isoleret beholder opvarmes, når den sortmalede kobberskive absorberer den direkte solstråling (parallelle stråler, der når jordens overflade uden nævneværdig afbøjning). Undersøgelse af systemets temperatur som funktion af tiden muliggør bestemmelse af indstrålingsværdien.

Den simpleste målemetode går ud på at registrere systemets

(*) GOTO 6101 pyrheliometret kan fås ved henvendelse til Frank Bason, Linåbakken 13, 8600 Silkeborg.

DIREKTE SOLINDSTRÅLING

temperaturstigning i løbet af 10-20 minutter med aflæsninger ca. hvert minut. Kollimatoren justeres med mellemrum. Forsøget startes med systemet i termisk ligevægt med omgivelserne. Tages der i første omgang ikke hensyn til varmetab til omgivelserne, kan man opstille energiligningen:

Absorberet energi = Kalorimetrets tilvækst i termisk energi

$$\text{Absorberet energi} = I \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\text{Termisk energistigning} = m_v \cdot c_v \cdot \Delta T + m_s \cdot c_s \cdot \Delta T$$

hvor I er solindstrålingen, A er absorberskivens areal, α er skivens absorptionsfaktor, m_v og m_s er vandets, hhv. skivens masse, og c_v og c_s er deres specifikke varmekapaciteter. Størrelserne Δt og ΔT er hhv. det forløbne tidsrum og den målte temperaturstigning. Ved indsættelse i ligning (1) fås arbejdsformlen:

$$I = (V/\alpha \cdot A) \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}, \text{ hvor } V = m_v \cdot c_v + m_s \cdot c_s \quad (2)$$

Når $T(t)$ afbildes på mm-papir, svarer $\Delta T/\Delta t$ til grafens hældning i $t=0$.

Eksempel:

For GOTO Model 6101 pyrliometret er $(V/\alpha \cdot A) \approx 40390 \text{ J/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Tangenthældningen af $T(t)$ grafen i $t=0$ aflæses til $0,022^\circ\text{C/s}$. Hermed bliver $I = 40390 \cdot 0,022 = 890 \text{ W/m}^2$.

Ved en mere omhyggelig måling tages der også hensyn til varmetabsleddet $K \cdot (T - T_a) \cdot \Delta t$, hvor K er pyrliometrets varmetabskoefficient, og T_a er omgivelsernes temperatur. I et lille tidsrum Δt bliver energibalancen:

$$V \cdot \Delta T = \alpha \cdot I \cdot A \cdot \Delta t - K \cdot (T - T_a) \cdot \Delta t \quad (3)$$

hvor ΔT er kalorimetrets temperaturstigning i dette tidsrum.

Ligningens venstre side svarer til kalorimetrets termiske energitilvækst, højre side svarer til energi fra solindstrålingen minus energitabet i tidsrummet Δt . Ligningen kan omformes til en 1.ordens differentiaalligning ved division med Δt og påfølgende grænseovergang $\Delta t \rightarrow 0$:

$$V \cdot \frac{dT}{dt} = \alpha \cdot I \cdot A - K \cdot (T - T_a).$$

Er pyrheliometrets temperatur T_0 til $t=0$, bliver løsningen:

$$T(t) = T_a + \frac{\alpha \cdot I \cdot A}{K} - \left[\frac{\alpha \cdot I \cdot A}{K} - (T_0 - T_a) \right] \exp(-Kt/V) \quad (4)$$

Af denne ligning (pyrheliometrets temperaturligning) ses let, at tangenthældningen er $(\alpha \cdot I \cdot A)/V$ i $t=0$, i overensstemmelse med den simple ligning (2). Vi bemærker også, at vi skal kende varmetabskoefficienten K , men som vi skal se, kan denne let bestemmes eksperimentelt.

Måleprocedure: Først måles T som funktion af t , når pyrheliometret er rettet mod solen (husk at notere T_0 og T_a). Opvarmningen af måleskive + vand vil tage ca. 20 minutter. Derefter anbringes pyrheliometret i skygge, og $T(t)$ måles nu under hele afkølingsprocessen. I denne sidste del af forsøget er $I=0$ og temperaturligningen (4) bliver følgende

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot \exp(-K \cdot t/V) \quad (5)$$

Afbildes $T(t) - T_a$ mod tiden t på semilogaritmisk papir, kan "halveringstiden" $t_{1/2}$ aflæses, og K bestemmes ud fra ligningen

$$K/V = (\ln 2)/t_{1/2} \quad (6)$$

Herefter afbildes T som funktion af t i første del af forsøget (opvarmningsdelen), og I bestemmes nu ud fra ligning (4).

IV. Solfangerens karakteristikkurve

Formål: I forbindelse med en vurdering af et solvarmeanlæg eller en enkeltstående solfanger er det ofte nyttigt at optage en karakteristikkurve eller ydelseskurve for solfangeren. Bestemmelse af karakteristikkurvens parametre muliggør forudsigelse af solfangerens ydelse under forskellige driftsbetingelser.

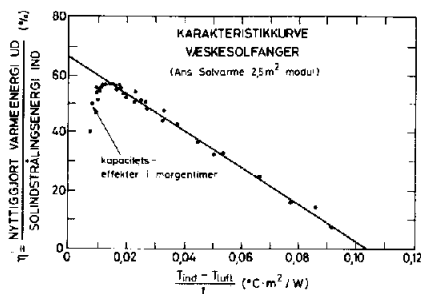
Baggrund: I kapitel 3 nåede vi frem til, at loven om energiens bevarelse kunne udtrykkes ved hjælp af Solfangerligning B side 37:

$$q_{\text{udn}} = F_R \cdot [I \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} - U_S \cdot (T_{\text{ind}} - T_{\text{luft}})]$$

Ved division med I fås for solfangerens nyttevirkning η :

$$\eta = F_R \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} - F_R \cdot U_S \cdot \frac{T_{\text{ind}} - T_{\text{luft}}}{I}$$

Det er bekvemt, at afbilde η som funktion af $\frac{T_{\text{ind}} - T_{\text{luft}}}{I}$, fordi resultatet bør blive en ret linie med hældningskoefficienten $-F_R \cdot U_S$ og skæringspunktet $F_R \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}}$ på den lodrette akse. Dette gælder uanset værdien af solintensiteten I på måletidspunktet. Nyttevirkningsfunktionens grafiske billede kaldes for solfangerens karakteristikkurve; et typisk eksempel på en sådan kurve vises i nedenstående figur.



Figur IV.1 Ovenstående resultater er opnået med et fritstående solfanger modul, vandgennemstrømning $G=0,0167 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$. Fra grafens hældning og skæringspunkt fås $F_R \cdot U_S = 6,49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ og $F_R \cdot (\tau\alpha)_{\text{eff}} = 0,66$.

Udstyr: Solfanger^(*), pyranometer^(**), pumpe og kviksølvtermometre (0,2 grads nøjagtighed) er det minimale udstyr. Der kan evt. udbygges med elektriske temperaturfølere, x-t-skrivere, integrator^(**) og mikrocomputer^(**).

Måleprocedure: Målingerne foretages på en dag med et rimeligt solindfald, og solfangeren bør være orienteret nogenlunde vinkelret på solstrålernes retning. Pumpen indstilles til at give en konstant væskegennemstrømning $G \approx 0,017 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Temperaturerne T_{ind} , T_{ud} , T_{luft} samt solindstrålingen I registreres løbende som funktion af tiden, f.eks. ved hjælp af x-t-skrivere, der er koblet til henholdsvis elektriske temperaturfølere og til pyranometret. Øjebliksværdien af q_{udn} bestemmes så ud fra ligningen

$$q_{\text{udn}} = G \cdot c_s \cdot (T_{\text{ud}} - T_{\text{ind}}) \quad (3)$$

hvor c_s er solfangervæskens specifikke varmekapacitet.

Det er dog ikke øjeblikkelige værdier for q_{udn} , I , T_{ind} og T_{luft} , der bør indsættes i ligning (2), men derimod de tilsvarende størrelsers middelværdier over et passende tidsrum (f.eks. 15 minutter). Dette hænger dels sammen med, at solindfaldet kan variere ret kraftigt på få sekunder, og dels vil der gå 10-15 minutter før solfangerens ydelse har indstillet sig på en ændret indstråling (som følge af at solfangeren har en masse, der ikke kan negligeres). Tidsmiddelværdierne kan naturligvis bestemmes "manuelt" ved at finde arealer under de respektive x-t grafer og derpå dividere med det valgte tidsinterval. En mere raffineret bestemmelse af disse tidsmiddelværdier kan finde sted ved at anvende integrator eller mikrocomputer.

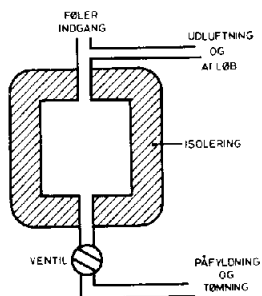
(*) En 1m^2 solfanger, der egner sig godt til formålet, kan købes hos Ans Solvarme, c/o Lars Kristiansen, Mågevej 19, 8643 Ans By.

(**) Pyranometer, integrator og mikrocomputer software kan fås ved henvendelse til Frank Bason, Linåbakken 13, 8600 Silkeborg. Dansk vejledning medfølger.

V. Lagertank øvelse

Formål: Lagertanken er en vigtig del af de fleste solvarmeanlæg. Det er hensigtsmæssigt at blive fortrolig med lagertankens termiske egenskaber ved hjælp af nogle simple forsøg.

Udstyr: En 5 eller 10 liter beholder (f.eks. en "luftpotte", som kan skaffes fra en VVS-installatør) er velegnet til dette eksperiment.



Figur V.1 Beholderen skal have udluftning og afløb øverst og en påfyldnings- og tømningsskud nederst, gerne med ventil. T-forbindelsen øverst muliggør, at et termometer eller elektrisk termoføler kan skydes ind og ud af tanken for at måle temperaturer i forskellige dybder.

Baggrund: I kapitel 4 blev en simpel lagertankligning (4.2) udledt. Betragt ligningens varmetabsled, som vi vil koncentrere os om i dette forsøg:

$$Q_{\ell} = \text{Varmetab} = -U_{\ell} \cdot A_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

U_{ℓ} er lagertankens varmetabskoefficient, A_{ℓ} er beholderens (ydre) areal, T_{omg} er tankomgivelsernes temperatur, og T_{ℓ} er tanktemperaturen, som vi her vil betragte som funktion af tiden t . Δt er et kort tidsinterval, hvori varmetabet foregår. Varmetabet kan også udtrykkes som en ændring i den indre energi af lagertanken (masse m_{ℓ} , spec. varmekapacitet c_1) og vandindholdet (masse m_v , spec. varmekapacitet c_v):

$$Q_{\ell} = (m_{\ell} \cdot c_{\ell} + m_v \cdot c_v) \cdot \Delta T_{\ell} = V \cdot \Delta T_{\ell} \quad (2)$$

hvor ΔT_{ℓ} er lagertankens temperaturændring, og V er lagertanken og indholdets varmekapacitet. Bemærk, at der ses bort fra isoleringens varmekapacitet, samt at det antages, at

lagertank og indhold har en ensartet temperatur. Sættes de to udtryk for Q_1 lig med hinanden, fås differensligningen:

$$V \cdot \Delta T_\ell = -U_\ell \cdot A_\ell \cdot (T_\ell - T_{\text{omg}}) \cdot \Delta t$$

svarende til differentialligningen:

$$dT_\ell/dt = -(U_\ell \cdot A_\ell / V) \cdot (T_\ell - T_{\text{omg}}) \quad (3)$$

Øvelse: Vis, at når T_0 er tankens temperatur til $t=0$, har ligning (3) løsningen:

$$T_\ell - T_{\text{omg}} = (T_0 - T_{\text{omg}}) \cdot \exp(-U_\ell \cdot A_\ell \cdot t / V) \quad (4)$$

Måleprocedure: (1) Vi vil først undersøge, hvorvidt antagelsen om, at lagertanken har en ensartet temperatur overalt, er rimelig.

Fyld tanken med varmt vand (ca. 60°C). Mål efter en halvtimes forløb temperaturen som funktion af føler-dybde ved at skyde temperaturføleren op og ned i følerindgangen. Giv føleren tid til at komme i termisk ligevægt mellem målingerne, men udfør målingerne så hurtigt, at temperaturen i tanken ikke ændrer sig væsentligt under målingerne. Lav en grafisk afbildning af tankens temperaturfordeling. Vurder middeltanktemperaturen.

(2) Placér temperaturføleren, så den måler temperaturen midt i lagertanken (jfr.(1)). Mål så temperaturen som funktion af tiden. Det kan være en fordel her at automatisere processen, evt. ved hjælp af en elektrisk temperaturføler og en x-t-skriver. Afbild $(T_\ell - T_{\text{omg}})$ som funktion af tiden på semilogaritmisk papir. Bestem $(-U_\ell \cdot A_\ell / V)$ og dermed U_ℓ ved hjælp af denne graf.

Litteraturliste

Lettilgængelige bøger om solvarme

- (A) Vejsig Pedersen, P. og Nielsen, Rud: "Solenergi - en Baggrundsorientering", OVEs forlag (1979)
- (B) Sol, O.: "Modul Solvarmeanlæg", OVEs forlag
- (C) Herforth, C. og Nybroe, C.: "Sol - Vind", Informations forlag (1976)
- (D) Krægpøth, K.: "Byg et Solvarmeanlæg", Teknisk forlag (1978)
- (E) Lura, C.E.: "Alternative Energikilder", Politikens forlag (1977)
- (F) Petterson, F. og Wettermark, G.: "Solenergibogen", Teknisk Forlag (1977)
- (G) Esbensen, T.V. og Lawaetz, H.: "Bogen om Solenergi", Clausen bøger (1978)
- (H) Butti, K. and Perlin, J.: "A Golden Thread - 2500 years of Solar Architecture and Technology", Palo Alto (1980)

Mere krævende bøger om solvarme:

- (I) Teknologisk Institut: "Solvarme, vejledning i projektering og udførelse af anlæg", Teknologisk Institut (1979)
- (J) Duffie, J.A. and Beckmann, W.A.: "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley (1974)
- (K) Beckmann, W.A., Klein, S.A., and Duffie, J.A.: "Solar Heating Design by the F-chart Method", John Wiley (1977)
- (L) Duffie, J.A., and Beckmann, W.A.: "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley (1980)

Tidsskrifter om solvarme etc.

"Vedvarende Energi" udgives af OVE

"Solar Energy" udgives af Pergamon Press

Henvist til i teksten:

- AL-76: "Skitse til Alternativ Energiplan for Danmark", udarbejdet af Sussanne Blegå m.fl. (udgivet af QOA og OVE)
Andersen, B.N. og Michal, C.J. (1978): "Passive Solar Design" Annual Review of Energy 3 side 57
- Boligministeriet (1978): "Redegørelse for Bygningers Varmeforbrug", Boligministeriet.
- Bason, F. (1978): "Præstations- og økonomiberegninger for Solvarmeanlæg", Varme 43 side 157
- Bason, F. og Vest Hansen, T. (1980): "Beregningsprogram til Solvarmeanlæg", Energiministeriets Solvarmeprogram 4
- Bason, F. (1981): "Måleresultater: Et Solvarmeanlæg til varmt Brugsvand", VVS, Teknisk Forlag (Forår 1981)
- Bason, F. (1980): "Et kalorimetrisk Instrument til Måling af direkte Solindfald", LMFK-bladet (oktober 1980)
- Chalmers, B (1976): "The Photovoltaic Generation of Electricity", Scientific American, October 1976
- Energy (1979): Samling af artikler om vedvarende energikilder i tidsskriftet Energy, bind 4 no.5
- HM-76: Dansk Energipolitik 1976, Handelsministeriet maj 1976
- Lawaetz, H. og Furbo, S. (1979): "Energiforbrug til Fremstilling af Solvarmeanlæg", Lab. for Varmeisolering Medd. 87
- Lawaetz, H. (1980): "Samfundsøkonomisk Analyse af Individuelle Solvarmeanlæg", Lab. for Varmeisolering Medd.88
- Lawaetz, H. (1980): "Solindfald og Solvarmeanlæg - målt og beregnet", Lab. for Varmeisolering Medd.106
- Nielsen, A. (1980): "Beregning af Energiforbrug i Bygninger" Lab. for Varmeisolering Medd.92
- Svendsen, S. (1976): "Varmelagring i Salhydrater", Solenergidagen 1976 side 48
- Status rapport (1980): Energiministeriets Solvarmeprogram 10.

FORKORTELSER FOR POTENSER AF 10

P(peta)= 10^{15}	m(milli)= 10^{-3}
T(tera)= 10^{12}	μ (mikro)= 10^{-6}
G(giga)= 10^9	n(nano) = 10^{-9}
M(mega)= 10^6	p(piko) = 10^{-12}
k(kilo)= 10^3	f(femto)= 10^{-15}

OMREGNINGSTABEL FOR ENERGIMÆNGDER

	Joule	kWh	TWyr	Mtoe
1 joule	1	$2,78 \times 10^{-7}$	$3,17 \times 10^{-20}$	$2,40 \times 10^{-17}$
1 kWh (kilowatttime)	$3,60 \times 10^6$	1	$1,14 \times 10^{-13}$	$8,60 \times 10^{-11}$
1 TWyr (Terawattår)	$3,15 \times 10^{19}$	$8,75 \times 10^{12}$	1	753
1 Mtoe (Million tons olie)	$4,18 \times 10^{16}$	$1,16 \times 10^{10}$	$1,33 \times 10^{-2}$	1
1 kg stenkul indeholder	$2,9 \times 10^7$	8,2	$9,3 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-10}$
1 m ³ naturgas indeholder	$3,5 \times 10^7$	9,8	$11,1 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-10}$
1 kg råolie indeholder	$4,2 \times 10^7$	11,6	$13,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-9}$
1 tønde råolie* indeholder	$5,7 \times 10^9$	1600	$18,2 \times 10^{-11}$	$1,4 \times 10^{-7}$
1 kg U ²³⁵ indeholder	$8,2 \times 10^{13}$	$2,3 \times 10^7$	$2,6 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-3}$

(*) 1 tønde = 159 liter

Eksempler:

1 kWh = 1 kW i 1 time

= 1000 Watt i 3600 sek.

= $3,6 \times 10^6$ Joule

1 TWyr = 1 TW i 1 år

= 10^{12} W i (365×24×3600) sek.

= $3,15 \times 10^{19}$ Joule

