

Solar Energy Research Center

University College of Falun/Borlänge

ISSN 0284-1568

Lars Broman
Assoc. Prof., Director

Kent Börjesson
Engineer

Svante Nordlander
MSc Engineering Mechanics

Mats Rönnelid
BSc

Rolf Björkman
BA, Librarian

Inger Nilsson
Secretary

Associates

Arne Broman, Göteborg
Professor

Eric Bäve, Stockholm
MSc Civil Engineering

Lars Dahlgren, Norrköping
PhD Meteorology

Sven Eketorp, Stockholm
Professor

Jonas Hallenberg, Borlänge
MSc Engineering Mechanics

Per Isakson, Stockholm
Licentiate in Engineering

Björn Karlsson, Älvkarleby
Assoc. Prof.

Aadu Ott, Gislaved
Assoc. Prof.

Solstrutar för koncentration
av solljus mot solceller

Solar cornets for concentration
of sunlight onto solar cells.

Lars Broman, Svante Nordlander
and Mats Rönnelid

SERC

University College
of Falun/Borlänge
P. O. Box 10044
S-781 10 Borlänge
SWEDEN
Phone +46-243 840 20

CENTRUM FÖR
SOLENERGIFORSKNING
Högskolan i
Falun/Borlänge
Box 10044
781 10 Borlänge
tel 0243-840 20

SERC-UCFB-010
December 1987

Innehåll

Sammanfattning	3
Abstract	4
1. Inledning	5
2. Bakgrund	6
2.1 Koncentratorer för solceller	6
2.2 Ickeavbildande koncentratorer	6
3. Metod och försök	8
4. Resultat	10
4.1 Runda strutar	10
4.2 Rund strut med lins	10
4.3 Strut med kvadratisk topp och cirkulär botten	11
4.4 Kvadratisk strut	11
5. Diskussion	15
5.1 Ekonomi	15
5.2 Användningsområden	18
6. Slutsatser och förslag	20
6.1 Slutsatser	20
6.2 Förslag till fortsatt verksamhet	20
Referenser	21

Bilaga 1: Nordlander, S., Broman, L.: "Computer Analysis of the Circular Solar Cornet Concentrator", bidrag till Int. Conference North Sun (Copenhagen 1986).

Bilaga 2: Broman, L., Rönnelid, M., Nordlander, S.: "Analysis of a Possibly Perfect Nonimaging Concentrator", bidrag till Int. Conference North Sun (Copenhagen 1987).

Bilaga 3: Broman, L., Broman, A., Nordlander, S., Rönnelid, M.: "Analysis of four different Solar Cornet Concentrators", bidrag till Int. Conference Applied Optics in Solar Energy (Prag, 1987).

Bilaga 4: Broman, L., Rönnelid, M., Sallah, S. O. A.: "On the Role of Solar Electricity in Rural Development", bidrag till ISES Solar World Congress (Hamburg 1987).

Solstrutar för koncentration
av solljus mot solceller

Solar cornets for concentration
of sunlight onto solar cells.

Lars Broman, Svante Nordlander
and Mats Rönnelid

SERC-UCFB-010
December 1987

Detta arbete har finansierats av Styrelsen för teknisk
utveckling, projektnummer 85-5143.

Abstract

Photovoltaic cells still cost several thousand Swedish crowns per sqm, while the cost of reflecting materials is between one ore two magnitude lower. Concentrating sunlight onto solar cells may therefore decrease investment costs for solar panels with consequently decreased energy cost.

In the present report, several different geometries for solar cell concentrators with moderate (2-5 times) concentration are described. These concentrators can all be made of flat sheet reflecting materials. Different characteristics as the intensity distribution, amount of reflecting material needed, and acceptance angles have been investigated.

Results show that the square cornet type concentrator with a geometric concentration of 3-4 times is well suited for use with photovoltaic cells. Acceptance angle up to och over 10 degrees can be chosen depending on requirements.

Economic estimates indicate that sun-following photovoltaic panels are cost effective compared with stationary panels both concerning one-panel structures and large field of panels. Following panels with cornets seem to be even more cost effective for single panels, while concentrating is no improvement in large fields where land costs have to be taken into account.

Possible uses for single photovoltaic panels include small-scale industry in developing countries as well as recreational uses (electric systems for caravans, boats, cottages, etc.) in Sweden. It is suggested that a couple of 12 V cornet concentrator photovoltaic panels are built and tested.

This work was supported by Swedish National Board for Technical Development (STU), project number 85-5143.

1. Inledning

Solcellsgenererad elektricitet är redan idag ett ekonomiskt fördelaktigt alternativ i vissa tillämpningar. Då strömbehovet är litet och nätanslutning dyrt lönar det sig ofta att investera i solceller. Exempelvis får en del avlägsna sommarstugor sin strömförsörjning genom batterier uppladdade med solpaneler i synnerhet i Norge). Solpaneler för fritidsbåtar och fyrar är idag kommersiellt tillgängliga. Andra användningsområden är lyktstolpar, ficklampor, miniräknare och strömförsörjning till trafikräknare. På vissa håll i västvärlden finns även större anläggningar. En av de mest kända är 300 kW anläggningen på ön Pelleworm i Västtyskland.

I utvecklingsländer är de ekonomiska förutsättningarna för elproduktion annorlunda än i länder med utbyggd infrastruktur. I områden som saknar elektriska nät är alternativet ofta dieselgeneratorer, vilket medför ökade kostnader då bränslepriserna kan vara höga och grundinvesteringarna är av samma storleksordning som för solceller (Photovoltaics..., 1986). Bristen på diesel och den relativt höga komplexiteten hos ett diesellaggregat gör även att elproduktionen från solpaneler är mer tillförlitlig (Cunningham, 1985).

Målet med detta arbete har varit att skaffa tillräcklig kunskap om koniska reflektorer med låg koncentrationsgrad (2-5 ggr) för bedömning av deras potential för koncentrering av solljus mot solceller. Detta kan vara ett sätt att minska priset för solcellsgenererad elektricitet då reflektorer oftast är betydligt billigare per kvadratmeter än solceller.

Innan projektet påbörjades har ett par arbeten om koniska reflektorer utförts (L Broman, 1983; A Broman, 1985). Under arbetets gång har delresultat redovisats vid ett flertal internationella konferenser (Nordlander, 1986; L Broman, 1986, 1987 a,b).

2. Bakgrund

2.1 Koncentratorer för solceller

Iden med att koncentrera solljus mot solceller för att reducera kostnaderna är inte ny, och ett flertal försöksanläggningar är idag i drift (Arvizu, 1987). De flesta försöken bygger på hög koncentrationsfaktor, ca 100 - 1000 gånger. Det är vanligt att man använder GaAs-cellер som klarar högre temperaturer och har högre effektivitet än traditionella kisel-cellер.

Medan högkoncentrerande system ofta kräver aktiv kylning för att cellerna inte ska överhettas, samt noggrann följning av solen (inom någon grad), kan anläggningar som bygger på låg koncentration göras enklare och mindre sårbara. Det är dock inte mycket forskning som sker på lågkoncentrerande system. Detta hänger troligtvis ihop med prisutvecklingen för solceller. Då kiselcellerna sjunkit från 30 \$ till drygt 6 \$ per toppwatt (avgiven effekt vid en instrålning på 1000 W/m²) mellan 1976 och 1986 (Day III, 1987), är det långsiktigt mycket säkrare att forska i system där solcellspriset utgör en så liten del av systemkostnaden som möjligt.

Aktuella exempel på lågkoncentrerande system finns dock. Detta gäller både 2-6 gångers koncentration mot solceller (Edmonds, 1987; Fraidenraich, 1987; Minano, 1987) och låg koncentration mot färdiga solpaneler (Stacey, 1983). Dessa undersökningar behandlar såväl stationära som solföljande moduler.

2.2 Ickeavbildande koncentratorer

Med ickeavbildande koncentratorer menas optiska system som koncentrerar ett strålnippe utan att forma en optisk avbild, vilket näremot linser och paraboler gör. Kännetecknande för en ickeavbildande koncentrator är att den har en viss acceptansvinkel d , som gör att alla strålar som träffar öppningen med mindre vinkel än d mot normalen når utgångsaperturen (eventuellt efter reflektioner och refraktioner).

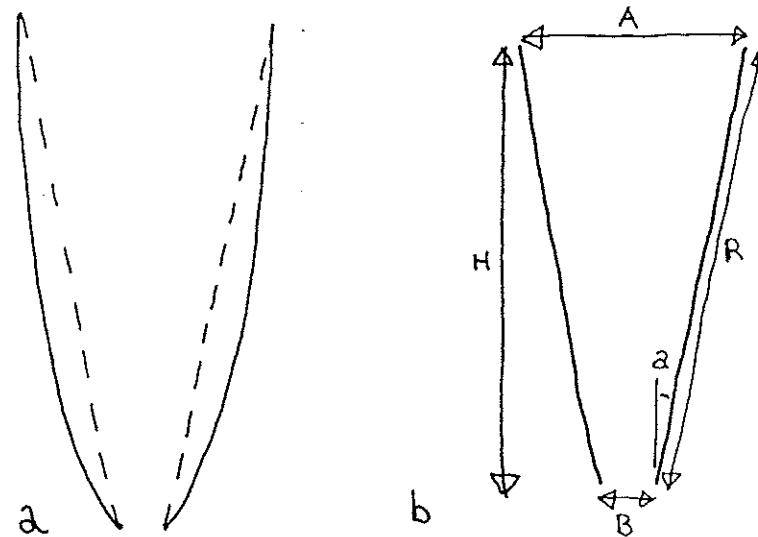
Den geometriska koncentrationen, C , är förhållandet mellan öppnings- och utgångsapertur. Den optiska koncentrationen är den reella koncentrationen efter reflektions- och refraktionsförluster och är alltid mindre än (eller i ideala fall lika med) C . För ett tvådimensionellt system (t ex ett utsträckt tråg) existerar en teoretisk gräns för maximalt möjliga acceptansvinkeln (Welford, 1978):

$$C(\max) = 1/\sin(d) \quad (1)$$

För ett tredimensionellt fall gäller det kvadrerade resultatet:

$$C(\max) = 1/\sin^2(d) \quad (2)$$

Fördelen med att en koncentrator har en viss acceptansvinkel är att följeningen av solen underlättas. Eftersom solen förflyttar sig 15 grader/timme kan en koncentrator med 7.5 graders acceptansvinkel vara stationär med maximal effektivitet i 60 minuter utan att behöva ändras.



Figur 2.1. Två typer av ickeavbildande koncentratorer.
a) CPC-tråg, b) tråg med flata sidor.

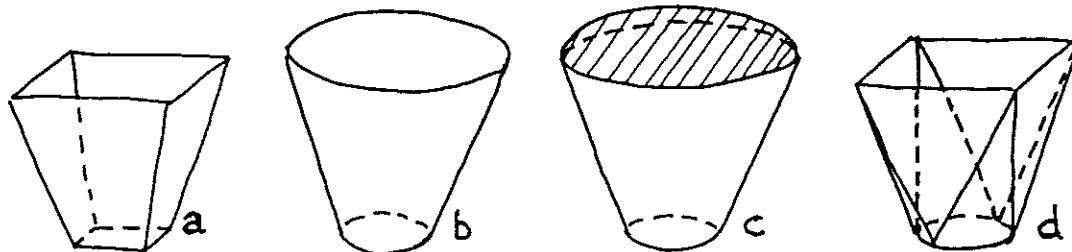
Den mest kända typen av ickeavbildande koncentrator är CPC (Compound Parabolic Concentrator), som i det tvådimensionella fallet är ideal (når upp till den teoretiska gränsen; se figur 2.1 a). Den beskrivs utförligt i (Welford, 1978).

CPC-koncentratorn har dock flera nackdelar. Förhållandet mellan höjd och apertur stiger kraftigt då koncentrationen ökar, vilket medför stor materialåtgång. En stor del av det det transmitterade ljuset träffar samma del av utgångsaperturen då den infallande strålningen är nära acceptansvinkeln. Detta gör att CPC i sitt enkla utförande är olämplig då förekomsten av dessa "hot spots" ger en ojämnn temperatur- och strömtäthetsfördelning över solcellen.

3. Metod och försök

För tvådimensionella koncentratorers optiska egenskaper, typ tråg, finns oftast slutna matematiska formler. Tredimensionella ickeavbildande koncentratorer, typ runda eller kvadratiska strutar, saknar däremot exakt matematisk beskrivning. För att studera egenskaperna hos dessa koncentratorer måste man använda ray tracing, dvs följa ett stort antal enskilda strålar genom det optiska systemet för att få en statistiskt signifikant bild av koncentratorns egenskaper.

Den matematiska beskrivningen av tvådimensionella tråg med plana reflekterande sidor ges i (L Broman, 1983). De koncentratorer vi undersökt bygger på dessa formler och kan alla tillverkas av plana reflekterande material som viks eller böjs. De fyra modellerna visas i figur 3.1. Av dessa har a-c undersöks noggrannare med ray tracing.



Figur 3.1. Fyra ickeavbildande koncentratorer som undersöks. a) Fyrkantiga strutar, b) runda strutar, c) runda strutar med lins samt d) strut med fyrkantig topp och rund botten.

För att förenkla beräkningarna har vi antagit att ytorna är idealt släta, samt att reflektansen hos en yta är oberoende av infallsvinkeln. I beräkningarna approximeras vidare solen som en punktformig strålningskälla, något som är acceptabelt då dess verkliga utsträckning understiger en grad.

Genom att ange $(A/B)^2$ (den geometriska koncentrationen) och R/B i fig 2.1 b samt r (reflektansen) är koncentratorerna i fig 3.1 a-b entydigt bestämda. För fig 3.1 c måste även linsens parametrar (t ex linsytornas krökningsradie och glasets brytningsindex) vara kända.

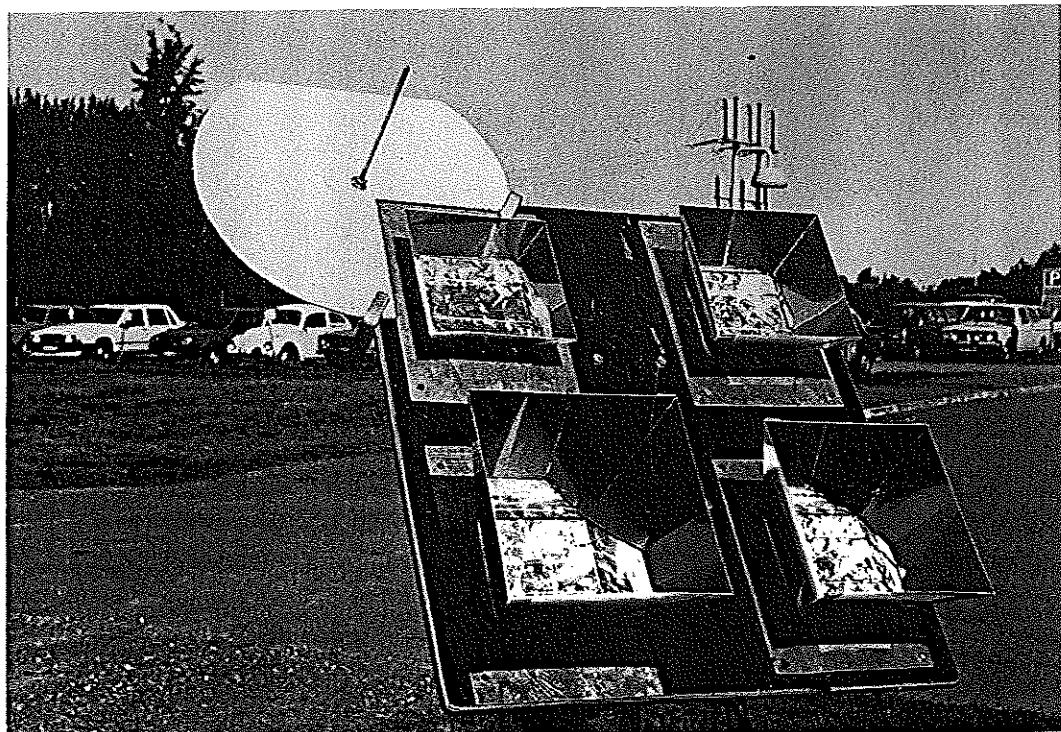
Under datorsimuleringarna av de optiska systemen har vi "täckt" öppningsaperturen med mellan 2500 och 360 000 parallella strålar som var och en transmitterats genom koncentratorn. Varje simulering har sålunda endast gällt en geometrisk kombination och en infallsvinkel.

Det huvudsakliga resultatet är kurvor över strutarnas optiska verkningsgrad för olika infallsvinkelar hos strålningen (se t ex figur 4.1, 4.3 och 4.4). Kurvorna har jämförts med mätningar på modeller i den integrerande sfären i Älvkarlebylaboratoriet (Vattenfall).

För en viss infallsvinkel beräknas transmittansen som förhållandet mellan antal strålar som når utgångsaperturen (med hänsyn taget till reflektionsförluster) och antal infallande strålar mot ingångsaperturen. Då dessa kurvor används för att beräkna den solenergi som når botten får resultaten multipliceras med cosinus för infallsvinkeln, då kurvorna endast ger den optiska effektiviteten.

För vissa geometrier har strålningsfördelningen på botten och strålningsbilder vid öppningsaperturen undersökts.

Mätningar har gjorts på fyrkantiga strutar i kombination med 10 X 10 cm polykristallina kiselceller (Solarex), varvid maxeffekten vid belastning uppmätttes för olika koncentrationsfaktorer (2 till 5 ggr). För detta ändamål har en speciell testpanel byggts (Fureus, 1985) (fig 3.2). Den enda modifieringen som gjordes på cellerna var att två kopparledningar med ca 2 mm² genomskärningsarea löddes på för att möta den ökade strömtätheten vid koncentration.

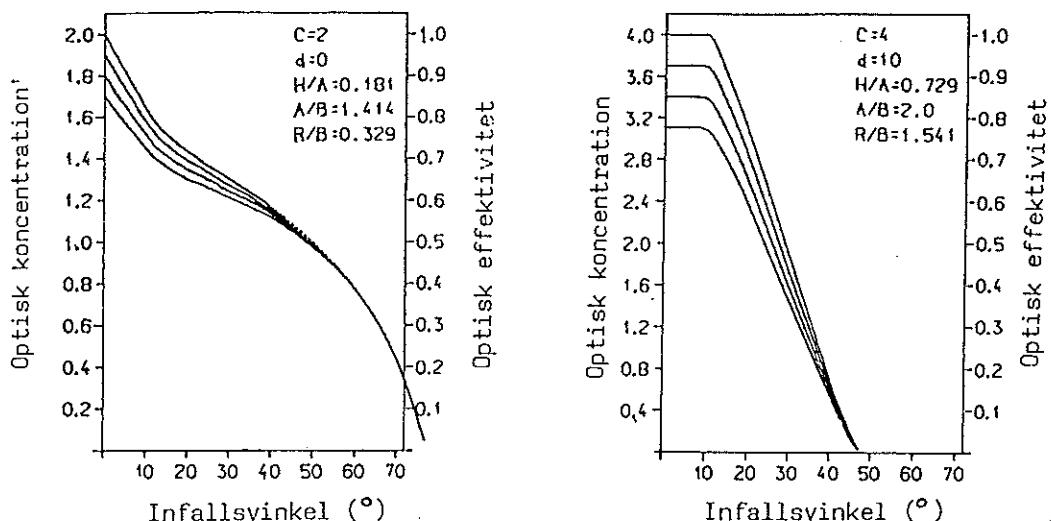


Figur 3.2. testpanel för utprovning av koncentratorer för kvadratiska solceller.

4. Resultat

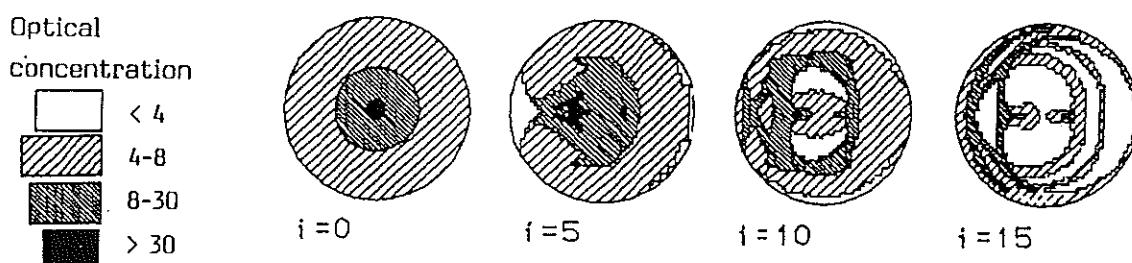
4.1 Runda strutar

Resultat av ray-tracingberäkningar på de runda strutarna följer mycket nära det kvadrerade resultatet från den tvådimensionella teorin. Exempel på två transmittanskurvor för olika acceptansvinklar ges i figur 4.1. Ett stort antal liknande kurvor presenteras i (Nordlander, 1986).



Figur 4.1. Transmittanskurvor för två olika runda strutar; a) $C=2$, $d=0$ grader, b) $C=4$, $d=10$ grader. De fyra kurvorna är för reflektanserna 1.0, 0.9, 0.8 och 0.7, respektive.

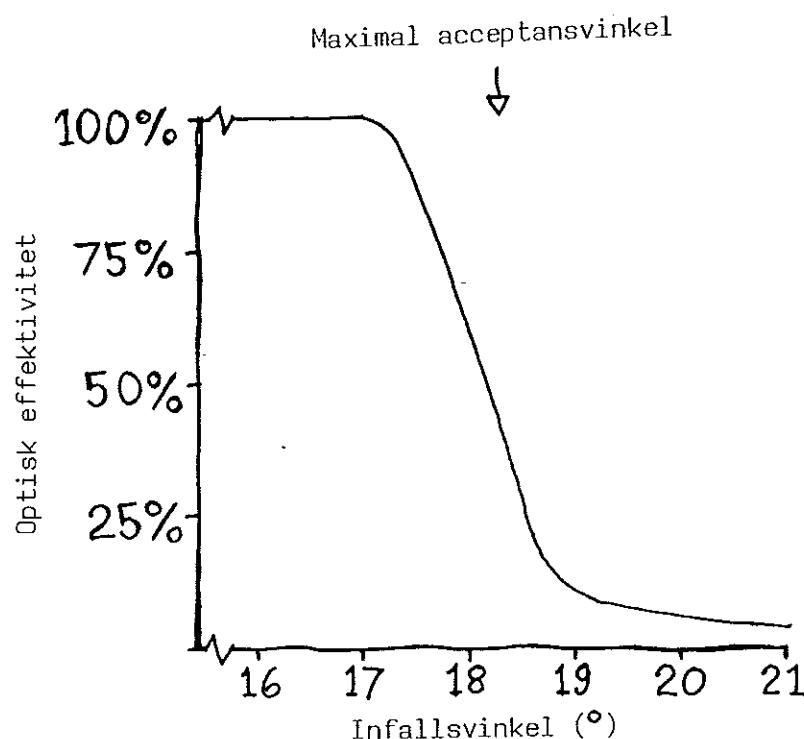
Det visar sig dock att intensitetsfördelningen på botten är ojämnn, vilket gör dem mindre lämpade som koncentratorer för solceller (figur 4.2). Tidiga (opublicerade) försök vi gjort visar också att solcellerna tenderar att bränna i mitten om de kombineras med cirkulära koner.



Figur 4.2. Intensitetsfördelning på botten av en rund strut med $C=6$, $d=5$ grader för infallsvinklarna $i=0$, 5, 10 och 15 grader. Data från datorsimulering.

4.2 Rund strut med lins

Genom att kombinera cirkulära koner med linser kan man få en koncentrator som kommer mycket nära den teoretiska gränsen för maximal acceptansvinkel (L Broman, 1986). Figur 4.3 visar en raytracingstudie av ett system med tjock lins.



Figur 4.3. Transmittanskurva för cirkulär strut med tjock lins. Figuren visar den optiska transmittansen vid antagandet av ideal reflektans. Data från datorsimulering.

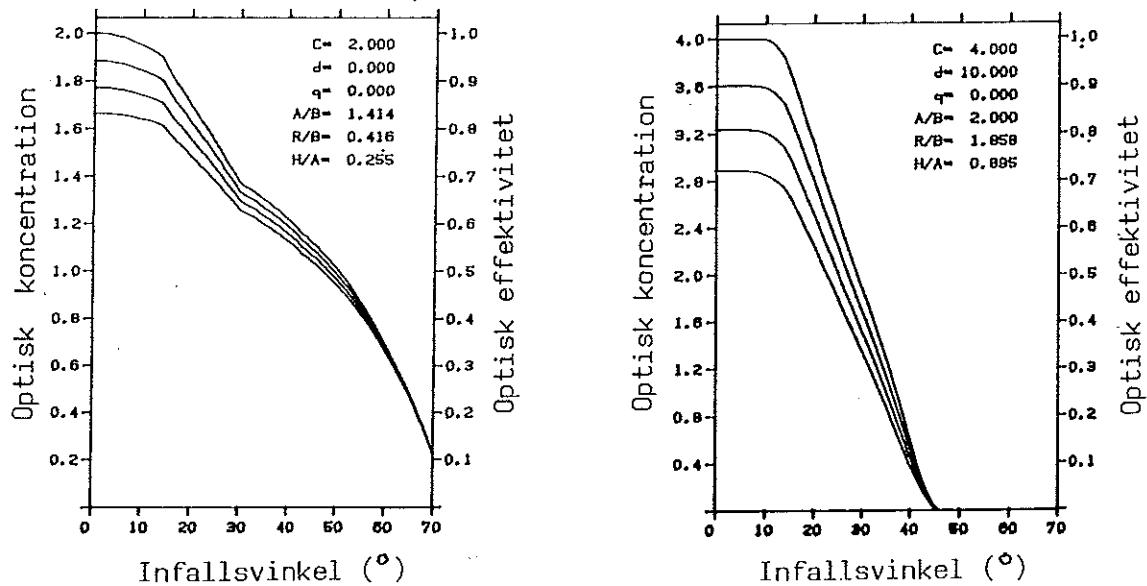
I likhet med den cirkulära struten uppvisar dock kombinationen lins-strut "hot spots", vilket gör den olämplig för solceller. Det faktum att den har en skarp transmittansminskning inom ett litet vinkelområde gör den dock intressant ur andra synpunkter.

4.3 Strut med kvadratisk topp och cirkulär botten

Denna strut beskrivs detaljerat i (A Broman, 1985). Någon närmare undersökning av intensitetsfördelning på botten och övriga transmittansegenskaper genom ray tracing har dock inte gjorts. En fördel med denna strut är att paneler med runda solceller kan täckas helt med koncentratorer som har fyrkantig öppning.

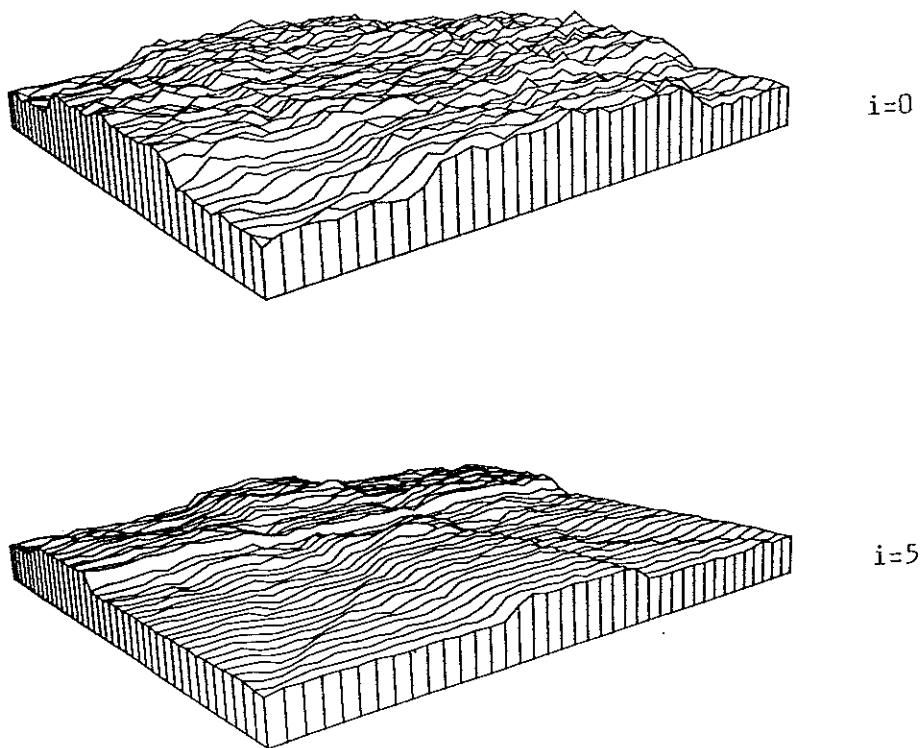
4.4 Kvadratisk strut

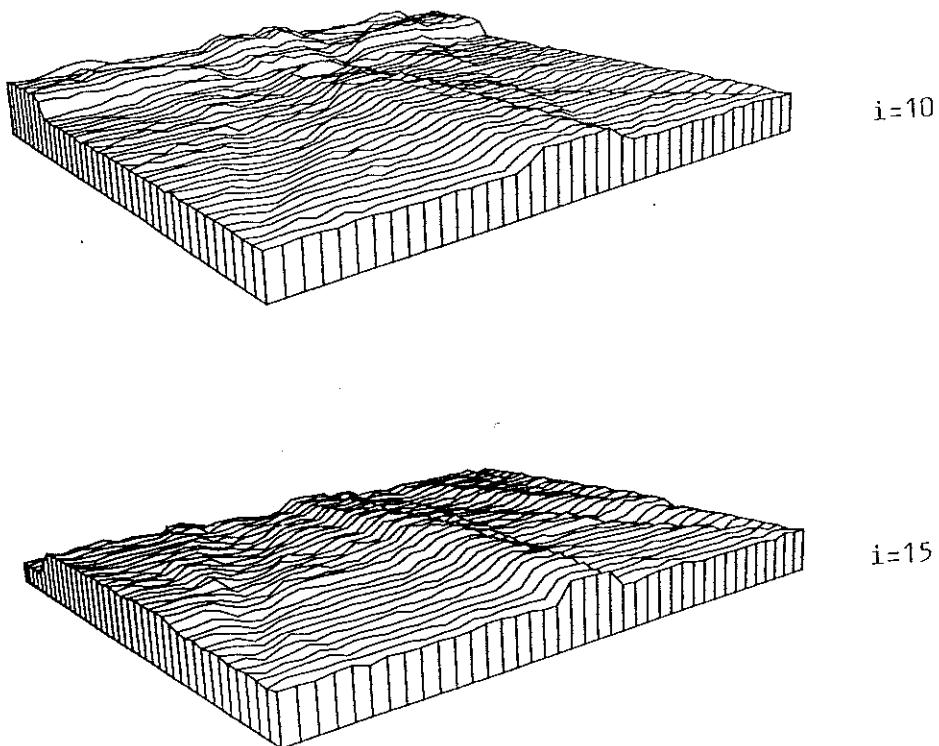
Ett stort antal fall av kvadratiska strutar är genomräknade. Det visar sig att acceptansvinkeln är något lägre än i fallet med cirkulära koner, vilket beror på att en del strålar som träffar nära hörnen reflekteras ut efter multipla reflektioner. För att öka acceptansvinkeln krävs därför något högre strutar, vilket medför större behov av reflektormaterial än för cirkulära strutar. Då hänsyn tagits till detta har de kvadratiska strutarna approximativt samma transmissionsegenskaper som de cirkulära, vilket ses om figur 4.4 jämförs med figur 4.1. Transmissionskurvornas utseende ändras endast marginellt om strålningen faller in parallellt med en diagonal hos struten istället för vinkelrätt mot en av sidorna (struten vrider 45 grader).



Figur 4.4. Transmittanskurvör för två olika kvadratiska strutar. a) $C=3$, $d=0$ grader, b) $C=4$, $d=10$ grader. De fyra kurvorna är för reflektanserna 1.0, 0.9, 0.8 och 0.7, respektive. Data från datorsimulering.

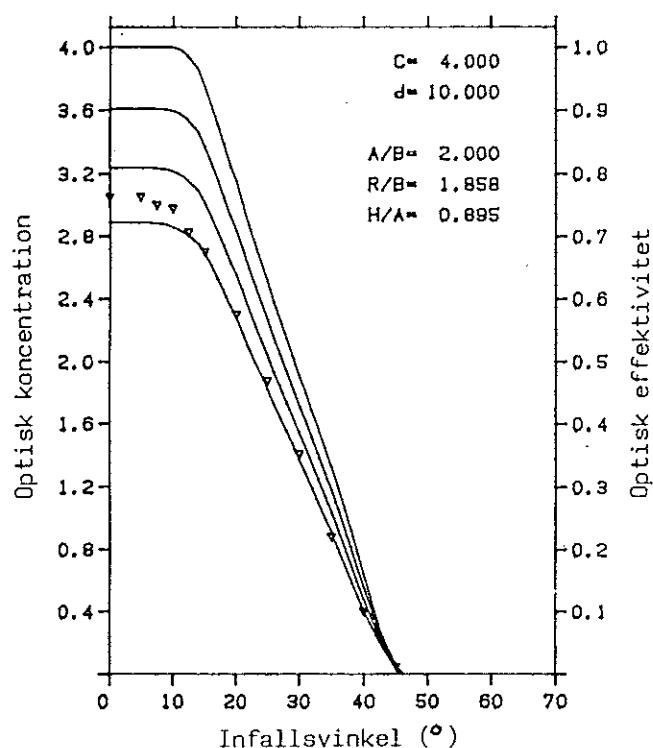
Utmärkande för den kvadratiska struten är den jämna intensitetsfördelningen på botten, vilket ses i figur 4.5. Även då infallsvinkeln ändras saknas "hot spots".





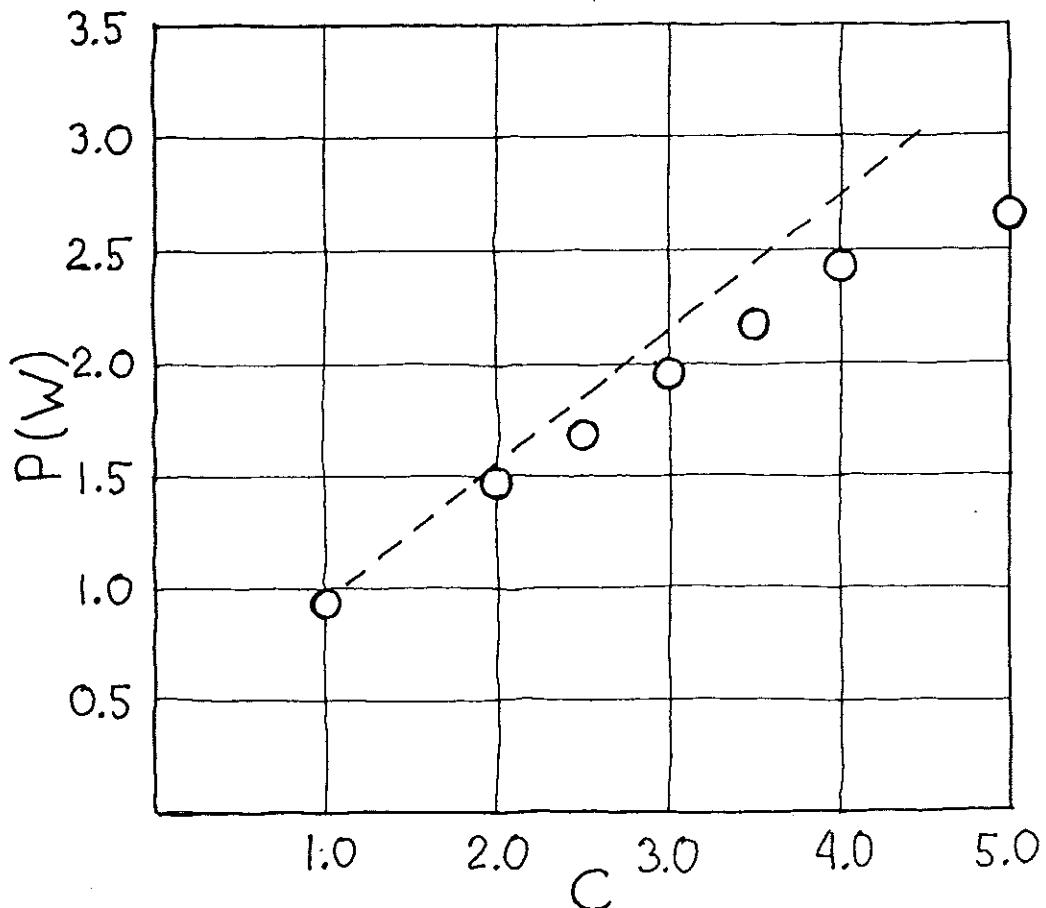
Figur 4.5. Intensitetsfördelning på botten av en fyrkantig strut med $C=4$, $d=5$ för infallsvinkelarna 0, 5, 10 och 15 grader. Reflektansen är antagen till 0.8. Data från datorsimulering.

Preliminära resultat uppmätta med den integrerande sfären i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby visar på god överensstämmelse med de beräknade transmittanskurvorna. I försöken användes polerad aluminiumplåt som reflektormaterial (från Daume & Jordan, Wuppertal, Västtyskland), och från figur 4.6 ses att reflektansen är ca 0.75.



Figur 4.6. Mätta och teoretiska transmittanskurvor för fyrkantiga strutar med $C=4$ och $d=10$. Preliminära resultat.

Resultaten från mätningar med kvadratiska strutar och solceller visas i figur 4.7. Mätningarna gjordes i klart solsken i augusti 1987 samtidigt som värden på direkt och diffus solstrålning registrerades vid SMHI:s mätstation i Borlänge. Som reflekterande material användes samma polerade aluminiumplåt som ovan. Den teoretiska kurvan har åstadkommits genom att anta reflektansen 0.75 samt att solcellens verkningsgrad är oberoende av koncentrationen (11%). Kurvan är normerad till direktstrålningen 800 W/m² och diffusstrålningen 47,5 W/m².



Figur 4.7. Avgiven effekt hos en 10X10 cm Solarex solcell vid olika koncentrationer. Mätning vid klart väder (800W/m² direkt strålning, 47,5W/m² diffus strålning).

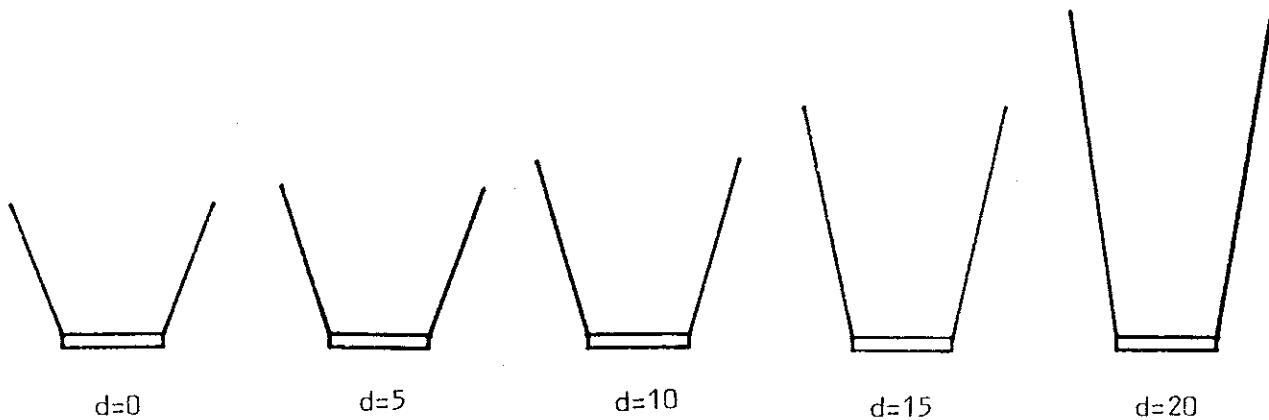
Skillnaden mellan de teoretiskt beräknade och uppmättta värdena kan antas bero främst på temperaturökning hos solcellen. Solarex uppger att deras celler får en minskad effekt på 0.3-0.5 % per gradökning över temperaturen 25 grader C (Ali, 1987). I försöket var cellen fastsatt på en aluminiumplatta med ett tunt (ca 1 mm) lager silikon. Några temperaturmätningar gjordes inte under försöken, men någon större temperaturökning märktes inte förrän vid koncentrationen 5 ggr.

5. Diskussion

Under lång tid har runda enkristallina kiselceller varit de vanligaste solcellerna. I dag är fyatkantiga polykristallina kiselceller vanligast. Detta, samt avsaknaden av "hot spots" gör också de fyatkantiga konerna att föredra framför de cirkulära strutarna.

Ökad acceptansvinkel kräver längre strut vilket medför fler reflektioner och ökade reflektionsförluster. Generellt gäller dock att transmissionsegenskaperna förbättras för acceptansvinklar upp t o m 15 grader.

I figur 5.1 ses tvärsnitt av fem olika fyatkantiga strutar med koncentrationen 4 ggr designade för acceptansvinklar mellan 0-20 grader. Då man väljer högre acceptansvinklar och större koncentrationer kan höjden på struten orsaka problem (större materialåtgång, ostadigare konstruktion). I våra försök har vi använt 10 X 10 cm celler, men vid tillverkning av moduler är det möjligt att använda 5 X 5 cm celler för att göra modulerna kompaktare.



Figur 5.1. Tvärsnitt av fem olika strutar med koncentrationen $C=4$ och acceptansvinkeln $d=0, 5, 10, 15$ och 20 grader, respektive.

5.1 Ekonomi

Den ekonomiska vinsten av att bygga solpaneler med koniska koncentratorer är att färre solceller behövs. Samtidigt tillkommer ökade kostnader i form av solföljande anordningar (stativ, ev. motorer och elektronik), reflektorer, montering, eventuella åtgärder för kylnings och (troligtvis) högre underhållskostnader. Solföljande system samlar å andra sidan in mer energi under dagen eller året.

I tillverkarledet kostar solceller med en verkningsgrad på drygt 11 % ca 3500 kr/m². Även om det är vanskligt att gissa framtida priser torde dessa fortsätta att falla. En realistisk bedömning pekar mot ca 2000 kr/m² om tio år (1997; 1987 års penningvärde) (DAY III, 1987). Försäljningspriset i Sverige är idag för färdiga solpaneler ca 10 000 kr/m² (inkl. moms).

Globalstrålningen mot en södervänd yta som lutar 60 grader är i Stockholmstrakten ca 960 kWh/m², år (SMHI:s solstrålningsdata 1984-1985). Det årliga energiutbytet från en fast monterad solpanel med arean 1 m² kan därför uppskattas till 108 kWh. Direktstrålningen på en solföljande yta (SMHI, samma plats och år) är 942 kWh/m², år och den diffusa strålningen 445 kWh/m², år.

Utifrån dess data och utbytet från de konförsedda solcellerna enligt fig 4.7 kan det årliga energiutbytet från solföljande paneler uppskattas med stor noggrannhet. Resultaten är sammanfattade i tabellerna 1 och 2.

Tabell 1. Årligt energiutbyte från en fotovoltaisk panel i Stockholm (kWh/m²).

Latitudlutande, stationär	108
Följande, conc. C=1	151
" " C=2	105
" " C=3	90
" " C=4	80
" " C=5	70

Tabell 2. Areal hos en fotovoltaisk panel i Stockholm vars årliga energiutbyte är 108 kWh (m²).

Latitudlutande, stationär	1,00
Följande, conc. C=1	0,71
" " C=2	1,03
" " C=3	1,20
" " C=4	1,34
" " C=5	1,53

Tabell 2 ger en jämförelse mellan olika paneler som vi kan utnyttja för att uppskatta kostnader, vilka kan uppdelas på följande poster:

(1) Solceller. Den solcellsarea som åtgår är lika med 1/C. Kostnaden i år är därför 3500/C kr/m² medan den om tio år antas vara 2000/C kr/m².

(2) Reflekterande plåt. Vi har beräknat reflektoråtgång per m² färdig solpanel för olika koncentrationer. För 5 graders acceptansvinkel gäller värdena i tabell 3.

Tabell 3. Reflektoråtgång per m² panel för 5 graders acceptansvinkel och fyra olika koncentrationsgrader (m²).

konc. C=2	1,1
" C=3	1,8
" C=4	2,4
" C=5	2,8

Priset i tillverkarledet för polerad och skyddad aluminiumplåt är ca 50 kr/m². Ett försök till uppskattning av kostnaden för plåtarbeten (tillverkning av koner) ger ca 100 kr/m², totalt 150 kr/m².

(3) Material till panel och uppsättning samt monteringskostnader har i sammanhanget uppskattats till 400 kr/m².

Tabell 4 ger sammanlagda kostnader för olika paneler med samma årliga energiproduktion (108 kWh i Stockholm), dels i år, dels om tio år. Av tabellen framgår att en solföljande panel i år är 11-1700 kr billigare än en stationär och om tio år 5-800 kr billigare. Då tillkommer kostnaden för dyrare upphängning och solföljning, men denna kan, åtminstone i vissa tillämpningar, vara nära noll (se avsnitt 5.2). Med dagens priser kan därför som bäst över 40 % av kostnaden sparas in.

Tabell 4. Beräknad kostnad för solpanel (material, tillverkning, montering) som ger 108 kWh/år i Stockholm (kr)

	I år (1987)	Om tio år (1997)
Latitudlutande, stationär	3 900	2 400
Följande, konc. C=1	2 780	1 710
" " C=2	2 370	1 600
" " C=3	2 210	1 610
" " C=4	2 190	1 690
" " C=5	2 330	1 870

Kostnadsuppskattningarna i tabell 4 gäller enstaka foto-voltaiska paneler på upp till ett par kvadratmeters storlek, paneler som t ex placeras på ett hustak. För solfångarfält måste man också ta med markkostnader i beräkningen. Enligt Goetzberger (1986) åtgår på mellansvenska latituder för stora modulsystem 7,0 m² mark per m² solfångare (stationära paneler) och 5,5 m² mark per m² solfångare (följande paneler). Om vi antar ett markpris på 150 kr/m² (inkl. markbearbetning och ledningar) gäller kostnadsuppskattningarna i tabell 5.

Tabell 5. Beräknad kostnad för solpanel inkl. markkostnader som ger 108 kWh/år i Stockholm (kr).

	I år (1987)	Om tio år (1997)
Latitudlutande, stationär	4 950	3 450
Följande, konc. C=1	3 370	2 300
" " C=2	3 210	2 450
" " C=3	3 200	2 600
" " C=4	3 300	2 800
" " C=5	3 590	3 130

I detta fall gäller att det mest lönsamma är att följa solen utan att koncentrera ljuset. Skälet är framför allt, att den solfångaren ger mest energi per m² panel.

Ovanstående beräkningar har byggt på Stockholmsväder, med stor andel diffust ljus, samt våra uppmätta effektvärden. Kombinationen koncentrator/solcell borde dock kunna göras effektivare genom att minska solcellens temperatur (bättre terminsk ledning mellan solcell och underlag), använda bättre

reflektorplåt och bättre ledningar på cellerna. I tropiska, solrika länder är oftast andelen diffust ljus mindre, vilket ger ett större utbyte hos koncentratorn, speciellt om den optiska verkningsgraden ökas.

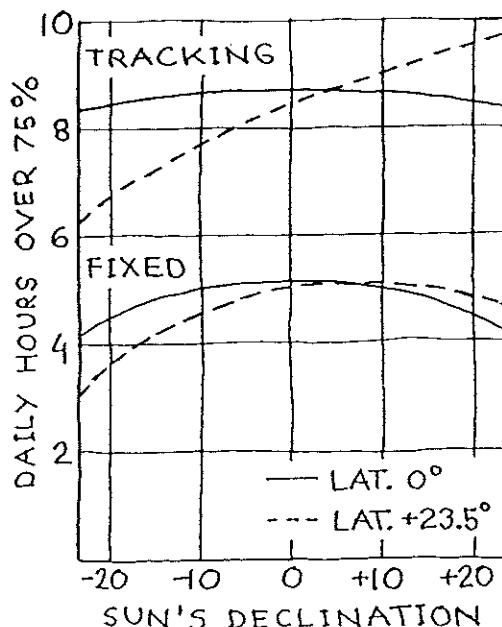
5.2 Användningsområden

Som framgick av avsnitt 1 har solgenererad elström funnit ett stort antal tillämpningar både i industrialiserade länder och i utvecklingsländer. En fortsatt utveckling hänger mycket samman med priset på solpaneler och därmed priset per producerad kWh. I konsumentledet ligger det förra idag runt 10 000 kr för en panel som ger 100 kWh/år, vilket med 20 års avskrivning och 5 % kalkyrlänta betyder 10 kr/kWh. I producentledet gäller istället ca 3 500 kr och 3:50 per kWh. En solföljande panel med 3-4 ggr koncentration torde hamna på 2 000 - 2 500 kr och 2:- - 2:50 per kWh.

Detta betyder förstås att solel inte kan konkurrera kostnadsmässigt med nätström när sådan är tillgänglig. Men: Så snart investeringskostnaden för att få fram ström är några 10-tals kronor per årlig konsumerad kWh kan solenergi visa sig billigast.

I Sverige torde de intressantaste tillämpningarna finnas dels inom fritidssektorn (el till fritidshus, båtar, husvagnar, ev bärbar utrustning), dels "utspridda" ljuspunkter som fyrar och vägbelysning. I synnerhet vägbelysning i form av självförsörjande lyktstolpar skulle kunna bli en riktigt stor artikel. Ändock är kanske exportmarknaden f.n. den allra mest lovande.

Beräkningar har visat att utbytet av en solföljande panel placerad inom vändkretsarna ger ett ökat utbyte på mellan 32 och 53 procent jämfört med utbytet från en stationär panel.



Figur 5.2. Antal timmar uteffekten från en solcellspanel är över 75% av årsmaximum. Den övre kurvan är för solföljande paneler, den lägre är för stationära paneler.

Förutom att solföljning ger mer energi fås ett jämnare utbyte över dagen. I fig 5.2 ses antalet timmar då utbytet från en solcellspanel överstiger 75 procent av maximala utbytet (under ett år) en klar dag. Drivs en likströmsmotor direkt från en solpanel vid ekvatorn betyder det att utnyttjandet kan öka från 4-5 timmar per dag till 8-9 då panelen följer solen jämfört med om den är stationär.

Utvecklingen i tredje världen kräver tillgång på verktyg och maskiner. Genom användning av solcellsproducerad el direkt utan mellanlagring i batterier kan installationspriset minskas. Solföljande paneler gör detta möjligt, och antalet timmar med hög uteffekt kan räcka till att driva motorer under en hel arbetsdag.

Vi har funnit en lång rad med motorer och verktyg för 12 volt (elektronikverktyg, mekaniska verktyg, pumpar, motorer, fläktar, husgeråd mm.), vilket visar på möjligheten att bygga upp en småskalig industriverksamhet utan att investera i dyrbara transformatorer. I en småskalig verksamhet kan följandet skötas manuellt genom att panelen riktas in för hand någon gång per timme, något som ytterligare drar ner kostnaden.

6. Slutsatser och förslag

6.1 Slutsatser

De tekniska förutsättningarna för tillverkning av koncentratorer för kvadratiska solceller finns (jämn belysning av solcellsytan, tillräckligt stor acceptansvinkel). Solföljande paneler ger markanta fördelar jämfört med stationära system, vilket inte minst märks om man jämför den utnyttjningsbara tiden då motorer direktkopplas till solcellerna. Då följande solpaneler föredras kan paneler med koncentrerande strutar mycket väl vara ett alternativ.

När det gäller enstaka paneler för fritidsbruk i Sverige eller för att driva maskiner i mindre industrier i u-länder så tyder våra mätningar på att det kan vara klart lönsamt. För att kunna avgöra detta krävs dock att tillverkninssätt, montering och uppsättning studeras mer i detalj för att få en uppskattning av livslängd och kostnader för tillverkning.

6.2 Förslag till fortsatt verksamhet

TVÅ paneler bör byggas för att prova tillverkningssätt och effekt samt för att få långtidserfarenhet från utomhusförsök. Medan denna studie arbetat med de formella (matematiska) kraven på koncentratorer ska en sådan undersökning behandla tillverkning och utprovning. Följande moment ska tas upp:

- Material. Är aluminium bra som reflektormaterial? Hur sätts strutat ihop i industriell skala? Kan formpressad, aluminiumbehandlad plast vara ett alternativ? Hur täcks panelen och med vilket material? Varifrån köps solcellerna och till vilket pris?
- Kylnings. Hur stor är effektminkningen p g a temperaturökningen? Hur utformas panelen för att få bästa passiva kyleffekt?
- Sammansättning. Olika alternativ som limning och nitning behandlas. De elektriska och termiska kontakterna samt enkel industritillverkning diskuteras.
- Styrsystem. Olika enkla styrsystem byggs och utprovas. Stativ och styrsystem undersöks med avseende på vad som finns på marknaden.
- Testning. Byggda prototyper testas under en längre tidsperiod tillsammans med mästinstrument som registrerar effekt och solinstrålning. Försöken kan göras i Sverige där SERC har tillgång till solstrålningsdata från SMHI:s automatväderstation i Borlänge, samt i Gambia där The Gambia Renewable Energy Centre (GREC) är intresserad att delta i testning och utveckling av en prototyp.
- Användning. Småskalig industriavändning av solföljande paneler diskuteras. I denna undersökning bör det även ingå en inventering av befintlig 12 voltsutrustning. Liknande försök med småskalig industriuppbyggnad för isolerade områden i tredje världen diskuteras.

Om testet lyckat resultat kan en mindre serie beställas för att användas för att bygga upp en försöksstation med en mindre industri. En sådan industri skulle kunna utgöra den första grunden för ett mindre industriprojekt.

Referenser

- Ali, S.A., Humadi, M.A. and Kadim, S. (1987): "Use of heat sink for solar cell cooling", poster 1.5.04 presenterad vid ISES Solar World Congress Hamburg, 13-18 september 1987.
- Arvizu, D. E. (1987): "Progress in Photovoltaic Concentrator Research", Proc 7:th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference in Sevilla , pp. 771-780 (Dordrecht).
- Broman, A.,Broman, L. (1985): "A Sun Cell Cornet Unfolded", SERC report SERC-UCFB-002 (Borlänge).
- Broman, L. (1983): "Nonimaging Solar Concentrators with Flat Mirrors", Proc. Int. Conference on Nonimaging Concentrators, SPIE, Vol 144, pp. 102-109 (San Diego)
- Broman, L., Rönnelid, M., Nordlander, S. (1986): "Analysis of a Possibly Perfect Nonimaging Concentrator", Proc. Int. Conference North Sun'86 (Copenhagen, 1986).
- Broman, L., Broman, A., Nordlander, S., Rönnelid, M. (1987): "Analysis of four different Solar Cornet Concentrators", Uppsats presenterad vid Int. Conference Applied Optics in Solar Energy, Prag 7-9 juli 1987.
- Broman, L., Rönnelid, M., Sallah, S. O. A. (1987): "On The Role of Solar Electricity in Rural Development", uppsats presenterad vid ISES Solar World Congress, Hamburg 13-18 september 1987.
- Cunningham, Robert J. (1985): "Photovoltaics: an advocacy statement", Proc. 6:th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference in London , pp 539-543 (Dordrecht).
- Day III, J. F. (1987): "Status and Future Aspects of photovoltaics", tal hållt vid ISES Solar World Congress i Hamburg, 14 september 1987.
- Edmonds, I.R., Cowling, I.R. and Chan, H.M. (1987): "The design and performance of liquid filled stationary concentrators for use with photovoltaic cells", Solar Energy, Vol. 39, No. 2, pp113-122.
- Fraidenraich, N. and Almeida, G.J.(1987): "Optical properties of V-trough Cavities", Book of abstracts Vol. 1, ISES Solar World Congress Hamburg, paper 1.6.01.
- Fureus, P. och Akhondzadeh, S. (1985): "Testbänk för solceller", examensarbete vid högskolan i Falun/Borlänge.
- Goetzberger, A., Stahl, W., Wittner, V. (1985): "Physical limitation of the concentration of direct and diffuse radiation", Proc. 6:th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference in London , pp 209-215 (Dordrecht).
- Minano, J.C., Baida, J.M. and Salas, T. (1987): "Small Concentrators for photovoltaic static concentration applications", proc. 7:th Photovoltaic Solar Energy Conference in Sevilla , pp 890-894 (Dordrecht).
- Nordlander, S., Broman, L. (1986): "Computer Analysis of the Circular Solar Cornet Concentrator", Proc. Int. Conference North Sun'86 (Copenhagen).
- "Photovoltaic Technology for Development" (1986), United Nations Development Programme report (New York).
- Stacey, R.W. and McCormick, P.G. (1983): "Low Cost Concentrating Photovoltaic System for Remote Power Supply", SERIWA Project 330/94, Department of Mechanical Engineering, University of Western Australia.
- Welford, W. T. and Winston, R. (1978): "The optics of nonimaging concentrators, Academic Press (New York).

Bilaga 1

Paper presented at the conference North Sun '86 in Copenhagen, June 10-12, 1986

COMPUTER ANALYSIS OF THE CIRCULAR SOLAR CORNET CONCENTRATOR

Svante Nordlander and Lars Broman
 Solar Energy Research Center
 University College of Falun/Borlänge
 P O Box 10044, S-781 10 Borlänge, Sweden

Summary

The circular cornet is a useful solar concentrator for concentration factors up to about 20 and acceptance angles up to about 25 degrees. In this paper we give performance curves for a large number of cornets, covering the useful range of concentration factors and acceptance angles.

Introduction

We have for some years been engaged in the study of nonimaging concentrators, and especially of the following geometries:

(1) The symmetric trough collector with absorber bottom and flat reflecting sides. In a previously published paper (ref 1), we have shown that if multiple reflections may occur, the symmetric flat mirror trough can be an efficient geometry for various applications. That paper also serves as a design tool, providing (in closed mathematical form) all information needed to design a trough with any desired combination of concentration ratio and acceptance angle (within theoretic limits).

The geometric concentration factor $\underline{C} = \underline{A}/\underline{B}$ for an optimally designed trough type solar collector with flat mirrors and an acceptance angle \underline{d} is shown to equal $\sin(\underline{d} + (2\underline{n}+1)\underline{a})/\sin(\underline{d} + \underline{a})$, where \underline{a} = mirror angle and \underline{n} = number of reflections. The number \underline{n} is given by $\underline{n} = \text{Int}(90-\underline{d})/(2\underline{a})$) and the mirror width \underline{R} by $\underline{R}/\underline{B} = (\underline{A}/\underline{B} - 1)/(2 \sin \underline{a})$.

(2) The circular solar cornet, an internally reflecting truncated cone. An example of application is the solar stove with heat storage shown in Figure 1.

In the present paper, we give a design tool for the circular solar cornet. Since the performance of the cornet only partially is described in closed form, a ray tracing computer program has been used to find necessary design parameters. The data given in the paper include cornet performance dependence on design parameters (concentration ratio and acceptance angle), angle of incident rays, and mirror reflectance. Typical light distributions in the bottom of the cornet are also presented.

Design tool for solar cornets

The following twentyseven diagrams cover most cases where the solar cornet may be used. In each diagram is stated:

C = geometric concentration ratio A / B , where A is the aperture diameter and B is the exit diameter; see Figure 2.

d = acceptance angle, i. e. maximum angle between incidence rays and cornet axis for 100% optical efficiency, determined using the formulas for the corresponding trough.

H/A = cornet height divided by aperture diameter.

R/B = mirror length divided by exit diameter.

A/B = aperture diameter divided by exit diameter.

Each diagram gives the optical concentration ratio, determined by following approx. 14,000 rays through the cone, as a function of incidence angle i for four different reflectances of the cone: 1.0, 0.9, 0.8, and 0.7. The left scale gives the optical concentration ratio and the right scale the optical efficiency of the cornet.

One interesting result seen in the diagrams is that the acceptance angle for a cone is equal to the acceptance angle for a trough with the same A, B, H, and mirror angle a.

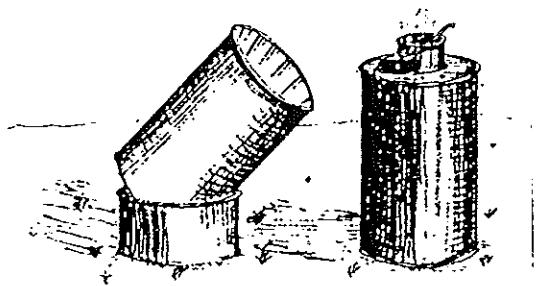


Fig 1
Solar stove

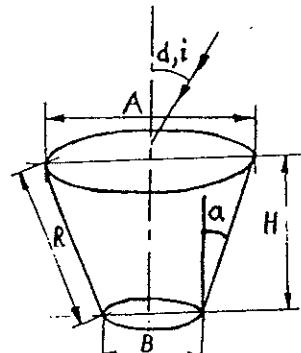


Fig 2
Cornet dimensions

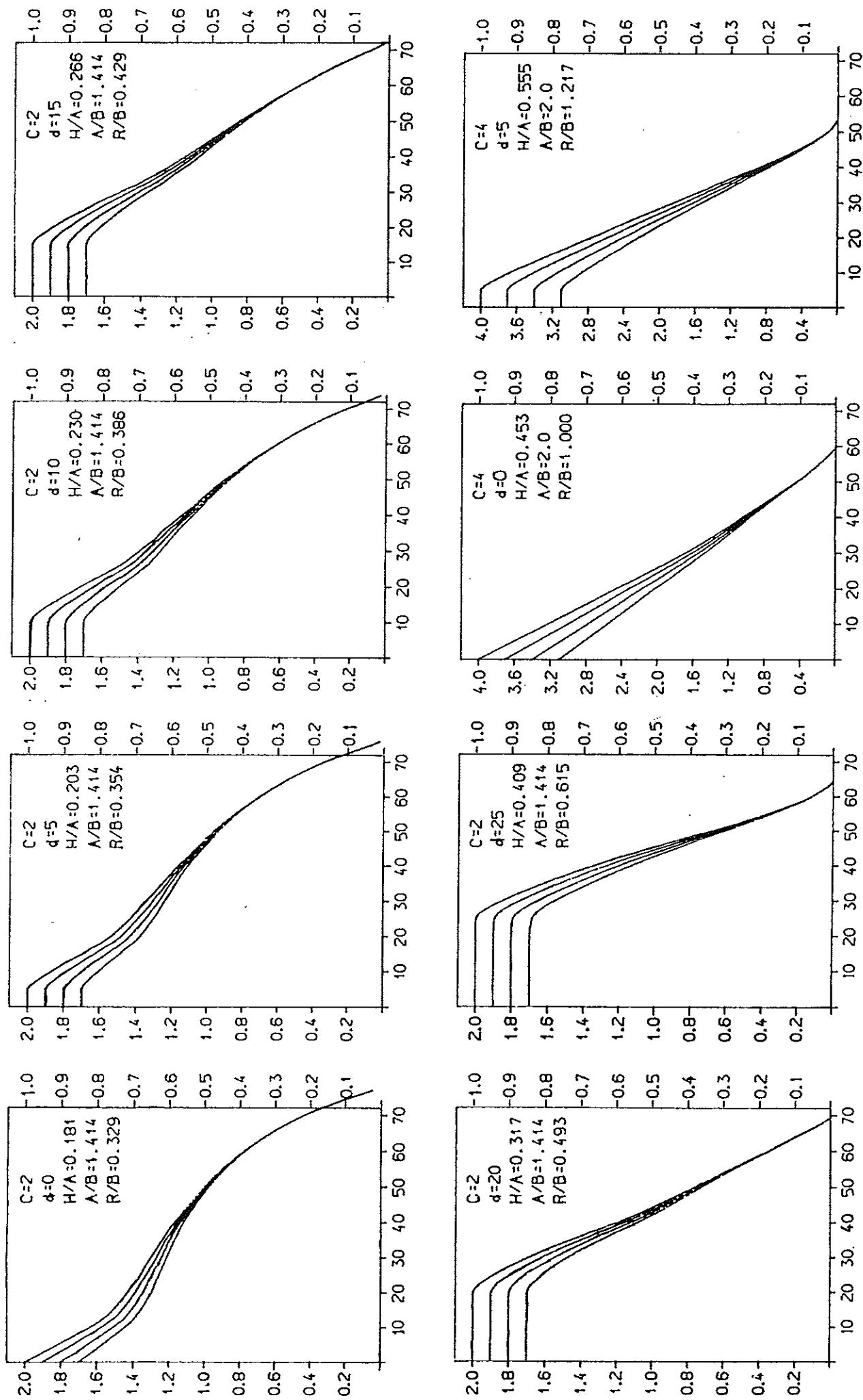
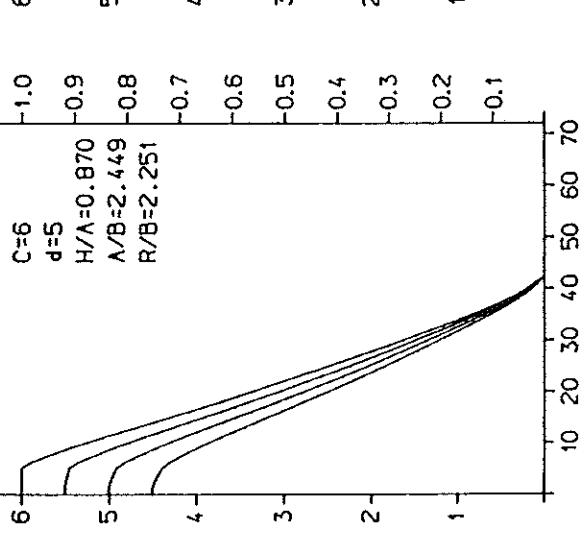
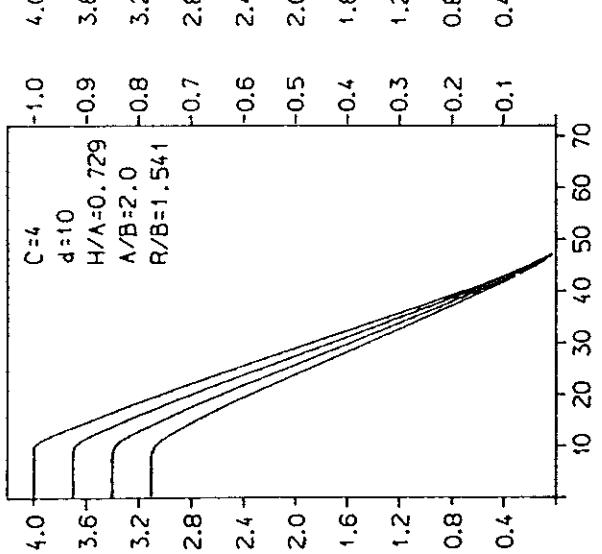
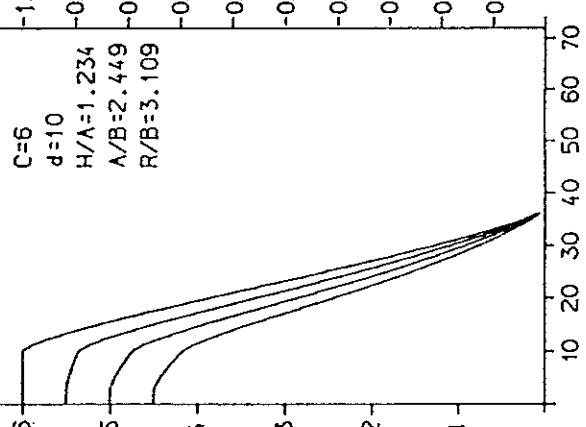
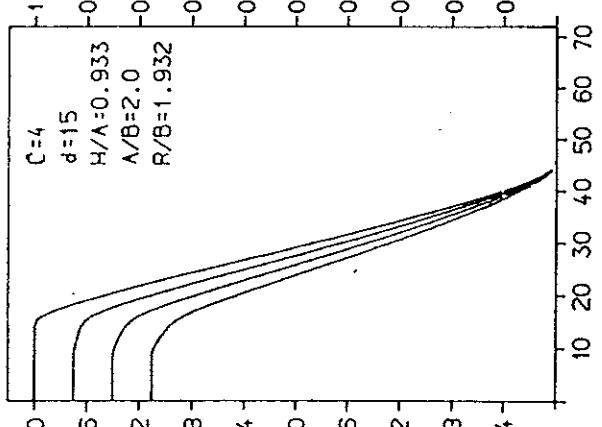
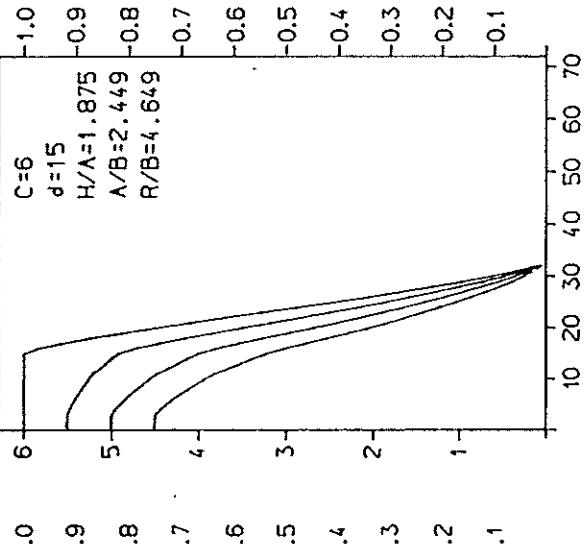
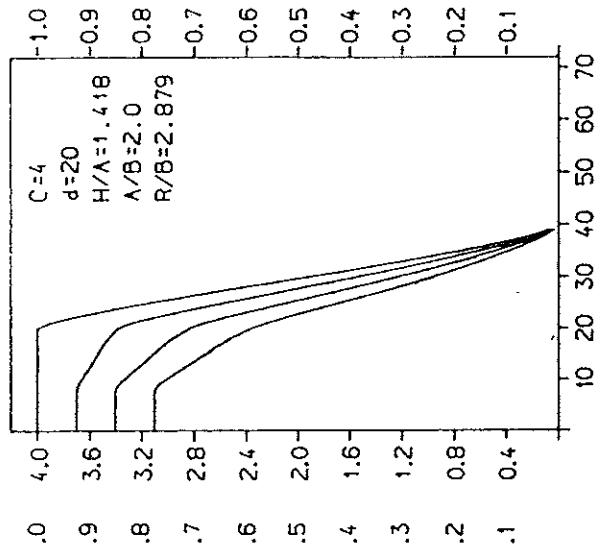
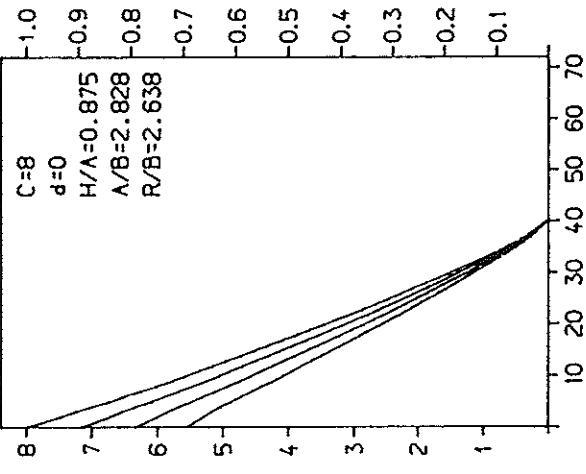
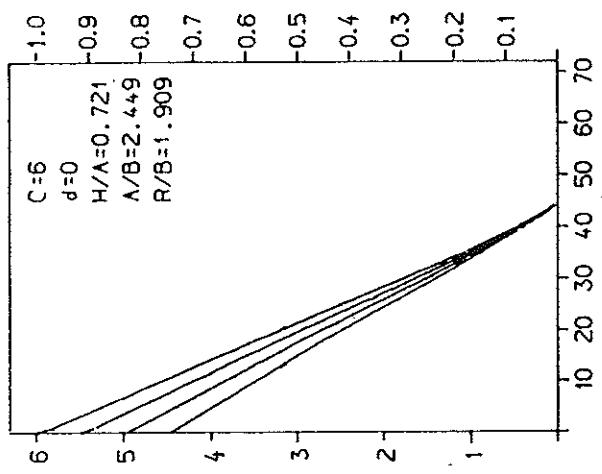
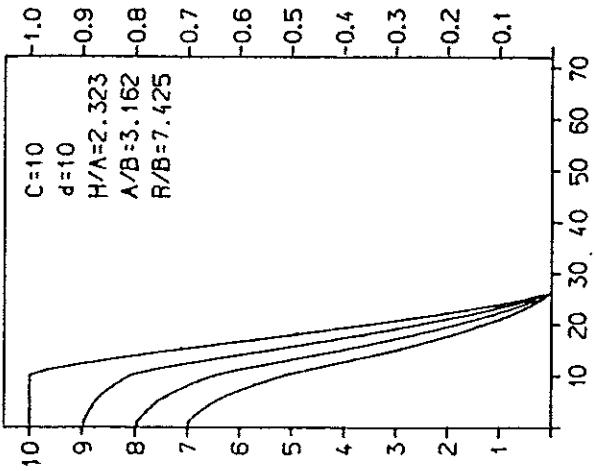
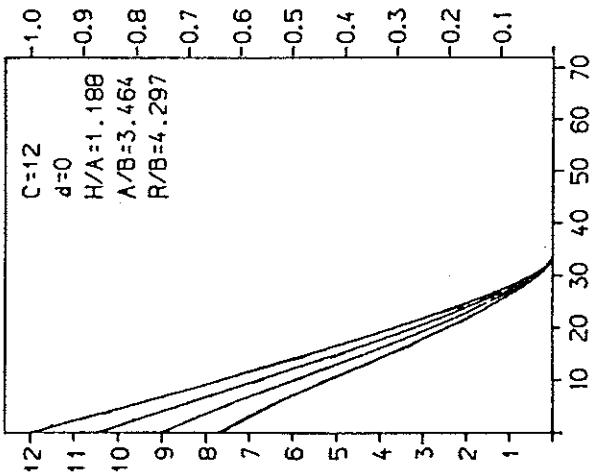
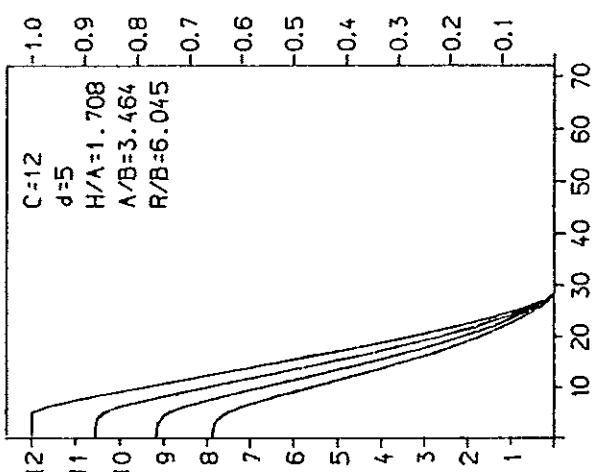
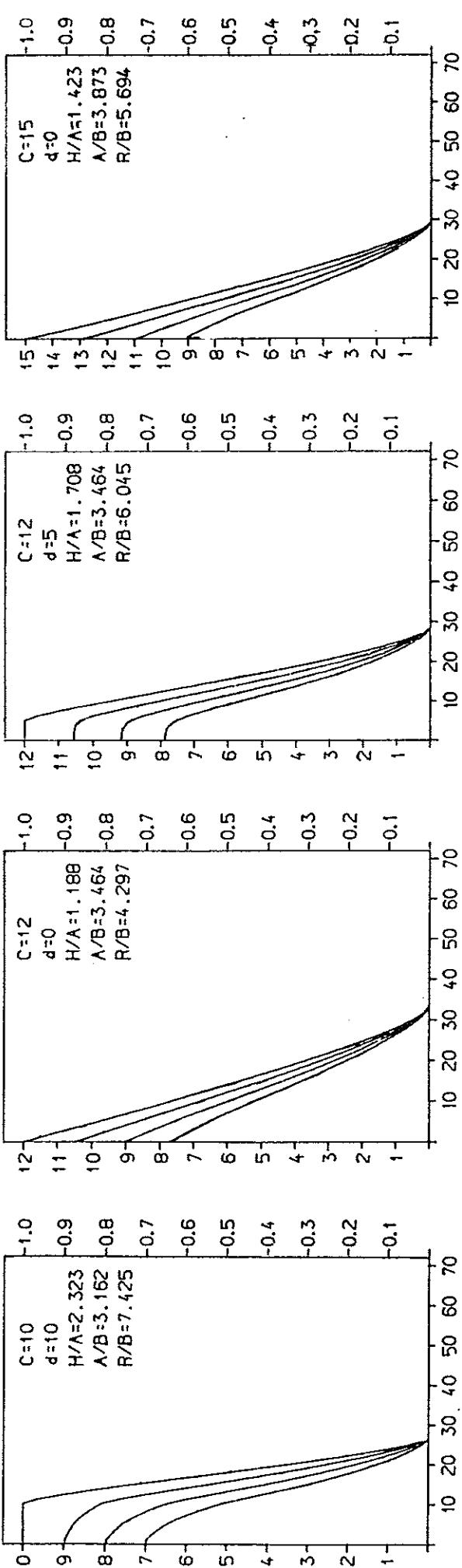
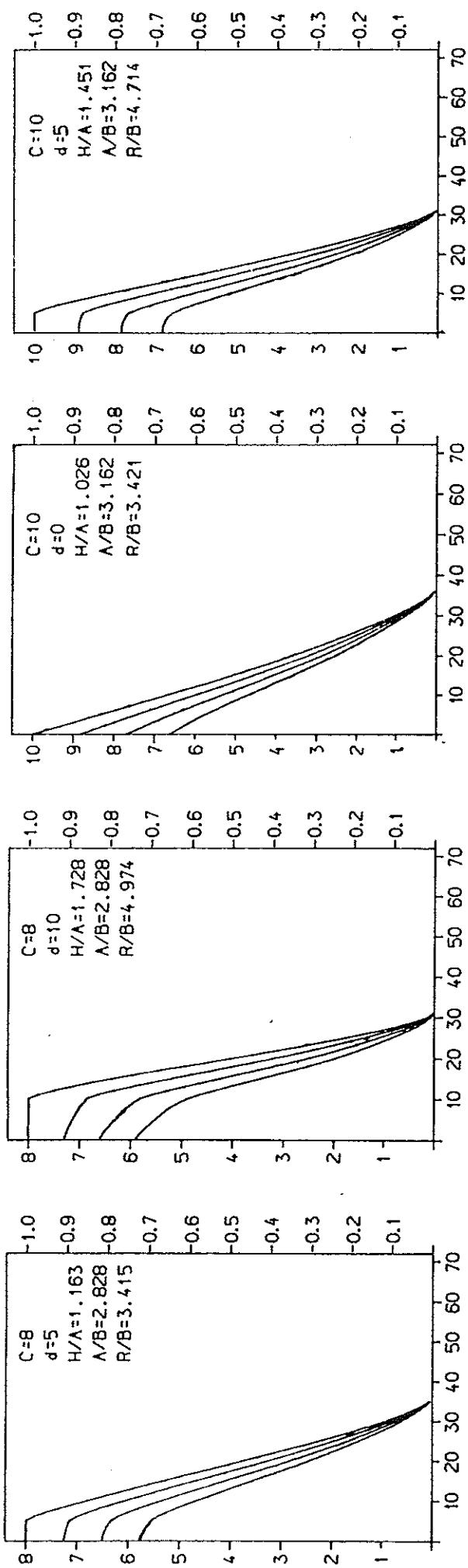
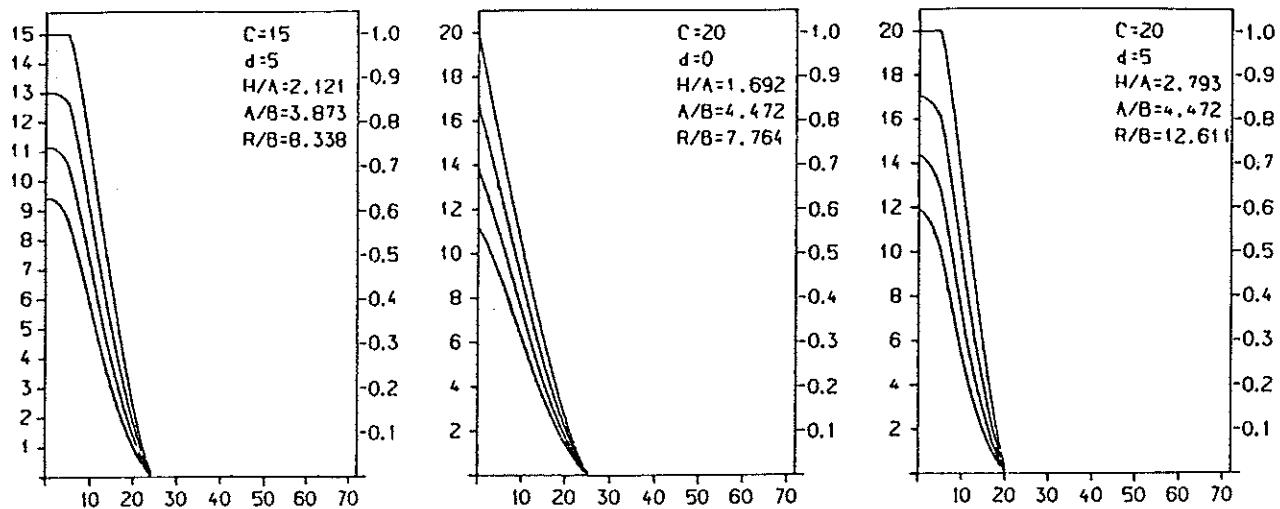


Fig 3

1:4







Light distribution at cornet bottom

Circular cornets have been successfully used for heat production. Are they also useful for (moderate) concentration of sunlight onto photovoltaic cells? For such an application, a fairly even distribution of light at the cornet bottom is required.

We have investigated this distribution for a number of cornets. Here we present, as an example, the $C = 6$, $d = 5^\circ$ cone for $i = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$, and 15° .

As is seen from Figure 4, circular cornets do not have an even light distribution at the bottom. Work on square cornets is in progress.

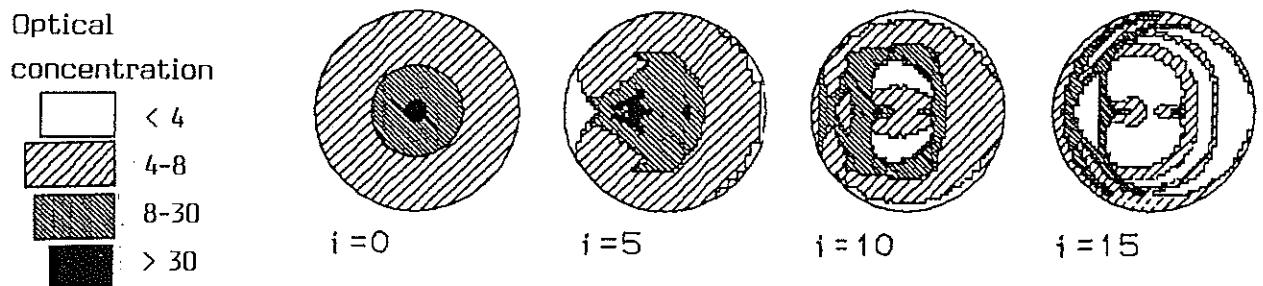


Fig 4

Reference

- (1) L. Broman, Nonimaging concentrators with flat mirrors, Proc. International Conference on Nonimaging Concentrators, San Diego, August 1983, SPIE vol. 441 (1983).

Bilaga 2

Paper presented at the conference North Sun '86 in Copenhagen, June 10-12, 1986

ANALYSIS OF A POSSIBLY PERFECT NONIMAGING CONCENTRATOR

Lars Broman, Mats Rönnelid and Svante Nordlander
 Solar Energy Research Center
 University College of Falun/Borlänge
 P O Box 10044, S-781 10 Borlänge, Sweden

Summary

We have done calculations and computer simulations (ray tracing) on two special nonimaging concentrators: A symmetric trough collector with absorber bottom, flat reflecting sides, and the top covered with a linear lens. An internally reflecting truncated cone, whose larger opening is covered with a lens. Our results indicate that the geometries investigated may be close approximations to the theoretic limits for 2D and 3D geometries, respectively.

Introduction

Nonimaging concentrators are optical systems which do not form an image like parabolic troughs and cusps, Fresnel lenses, etc. Typically, a nonimaging concentrator has a fairly large acceptance angle \underline{d} . Most well known of this class is the CPC or Winston collector.

The geometric concentration ratio is defined as area of entrance aperture divided by area of exit aperture, $C = \underline{A}/\underline{B}$. If all incident rays emerge from the exit aperture, this equals the optical concentration ratio. There exists a theoretic limit to this ratio, $C_{max} = 1/\sin^2 \underline{d}$. For a 2D system, such as a trough concentrator, the theoretic limit is $C_{max} = 1/\sin \underline{d}$ (ref 1).

We have done calculations and computer simulations (ray tracing) on two special nonimaging concentrators: A symmetric trough collector with absorber bottom, flat reflecting sides, and the top covered with a linear lens; this is a 2D system. An internally reflecting truncated cone, whose larger opening \underline{A} is covered with a lens; this is a 3D system.

Our interest in these geometries comes from several years' work with reflecting troughs and cones. We have shown that troughs with flat mirrors and spherical cones may be attractive concentrator geometries when multiple reflections are taken into account (ref 2, 3).

2:2

Williamson (ref 4) has developed a simple geometric method for theoretic study of the symmetric, flat mirror trough. Instead of following a ray through its reflections in the trough mirrors, he follows straight rays through consecutive mirror images of the trough; see Figure 1. He found that combining the trough with a linear ideal lens gives a maximum concentration close to the theoretic limit $1/\sin \underline{d}$.

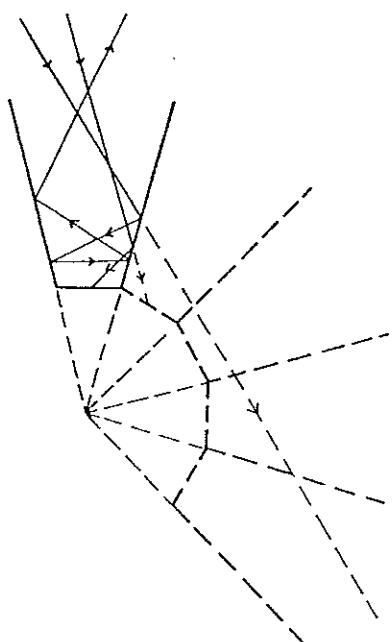


Figure 1

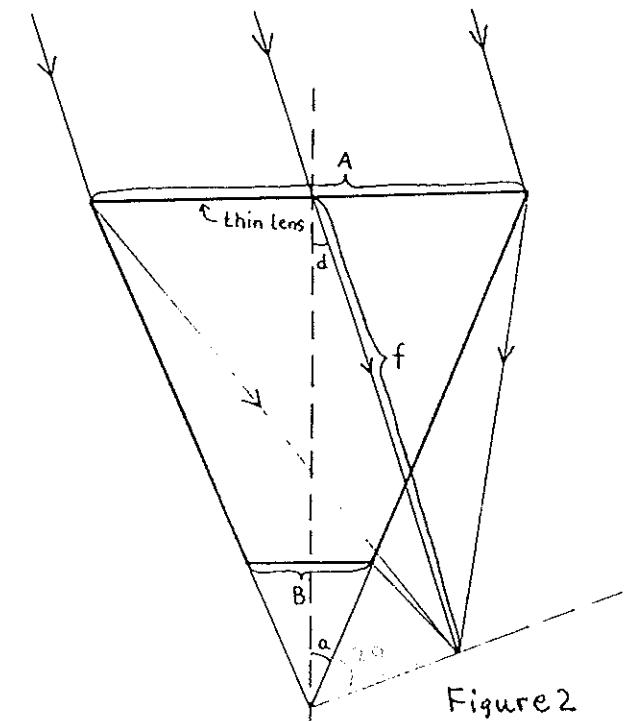


Figure 2

Witte (ref 5) suggested that the most favorable system gives $A/B = 1/(\sin \underline{d} \cos \underline{a})$, where \underline{a} is the mirror angle (see Figure 2).

It is easy to show that this holds for a trough with the geometry shown in Figure 2. The maximum concentration is achieved when the focal line of the (ideal) lens falls exactly at the edge of the absorber image as Figure 2 shows. This happens, as is easily obtained from the figure, when $f/A = \cos \underline{d}/(2 \tan(30 - \underline{d}/3))$.

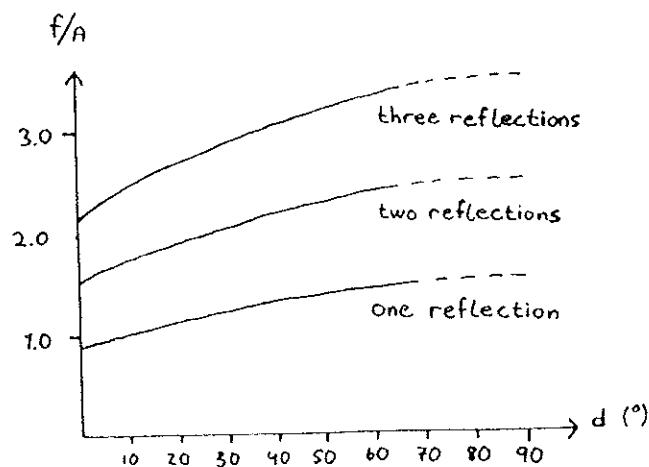


Figure 3

Similarly, if the focal line falls at the edge of the second absorber image, this equation turns into $f/A = \cos d/(2 \tan(18 - d/5))$. Allowing three reflections, the equation becomes $f/A = \cos d/(2 \tan(90/7 - d/7))$. The corresponding curves are shown in Figure 3.

A slightly different geometry of the lens-mirror-combination has been investigated by Collares-Pereira *et al.*, using the so-called edge ray principle (ref 6). Their result is very similar to Witte's and ours, giving a possible concentration which is a fraction of a percent higher.

As is easiest seen from Witte's formula, the calculations indicate the possibility to construct a nonimaging concentrator which is better than the theoretic maximum. That this should hold in practice is highly unlikely, since this should contradict the second law of thermodynamics (ref 5, 6). Different authors have different suggestions about how to overcome this difficulty. The impossibility to make an ideal lens seems to be a probable solution.

Matters, however, are far from solved. We have not been able to find any calculations using thick lenses in literature. Also, all results concerning lens-cone geometries have only been inferred from 2D calculations.

Computer program

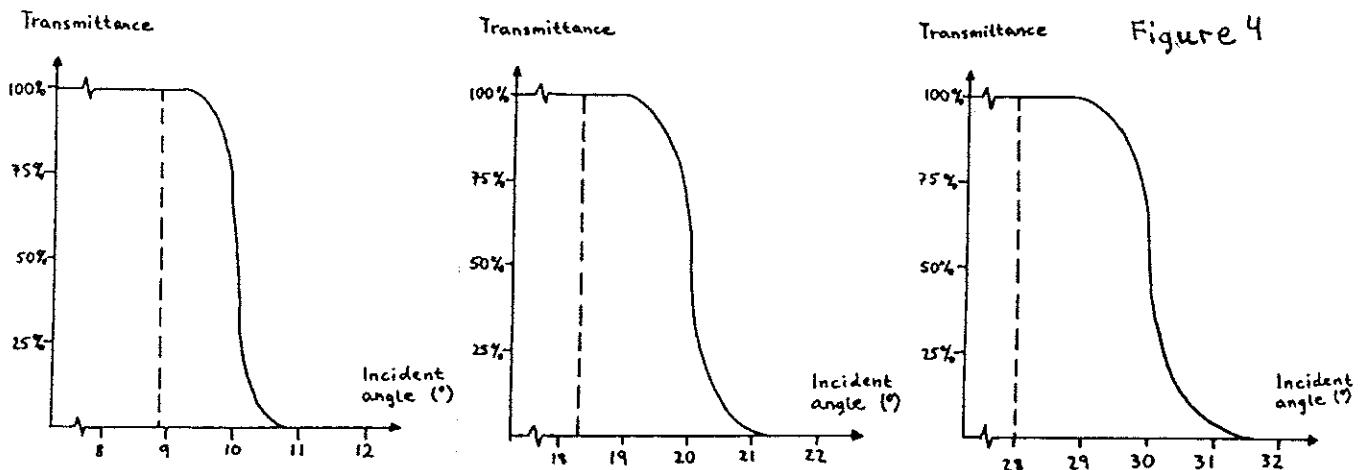
Our main tool when doing this work is a ray-tracing program. It is partly based on a program written for ray-tracing in solar cornets (ref 3). It is described in detail elsewhere (ref 7).

While it frequently is rather easy to find an expression in closed mathematical form for the optical concentration ratio in a 2D-system, 3D-concentrators usually cannot be described in that way. A very useful tool is then a computer program which permits large numbers of rays to be followed through the optical system. The program used in the present work can handle troughs with flat sides and circular truncated cones whose apertures are covered with ideal lenses. A version of the program that takes thick lenses is in the making but not yet completed.

Computations and results

The CPC trough is an ideal collector, i. e. it reaches the theoretic limit for a 2D concentrator. The circular CPC cone is however not an ideal 3D

concentrator (ref 1). In fact, Winston and Welford (ref 1) assumes that such a device as an ideal 3D concentrator does not exist at all (ref 1). Our interest was therefore firstly directed towards investigations of some circular cones with ideal lenses. The results are shown in Figure 4.



The three curves in Figure 4 show transmittance curves for cones with the geometric concentration ratio C equal to 41.528, 10.139, and 4.530, respectively. An ideal concentrator has 100% transmission up to the theoretic limit for incident angle d , determined by the relation $C = 1/\sin^2 d$. This gives, for the cones described, d equal to 8.93° , 18.30° , and 28.02° , respectively. As Figure 4 shows, the three cones not only reach these limits, but go beyond them. Approximately, the transmittance is 100% up to an angle d which satisfies the equation $C = 1/(\sin^2 d \cos a)$ and passes 50% at a d which satisfies the equation $C = 1/(\sin^2 d \cos^2 a)$; here a is the cone angle.

All three cones investigated were of the "one reflection" type (according to Figure 3; this does not mean that all rays actually are reflected just once), so their f/A -values are close to 1. Such a lens is either quite thick or a Fresnel lens. Rays incident on a Fresnel lens with large incident angle

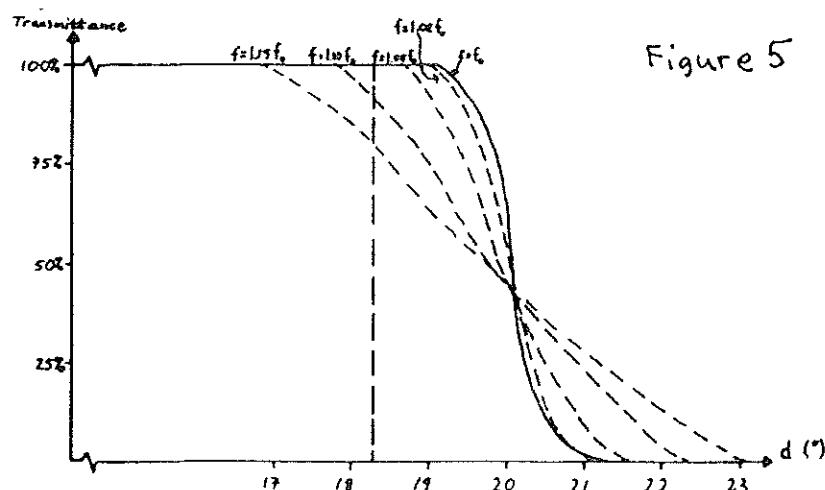


Figure 5

have a good chance to hit a "wrong" face, so many rays are lost. A thick lens does not have a point focus due to aberration. In order to get some idea of what happens when the focal point is replaced by a patch, we have run the program with focal lengths which are too long by two to fifteen percent. The corresponding transmittance curves are shown in Figure 5. From this figure is evident that even a 110% f barely affects the transmittance curve left of the theoretic limit. This corresponds to a patch with 1/10th the diameter of the lens.

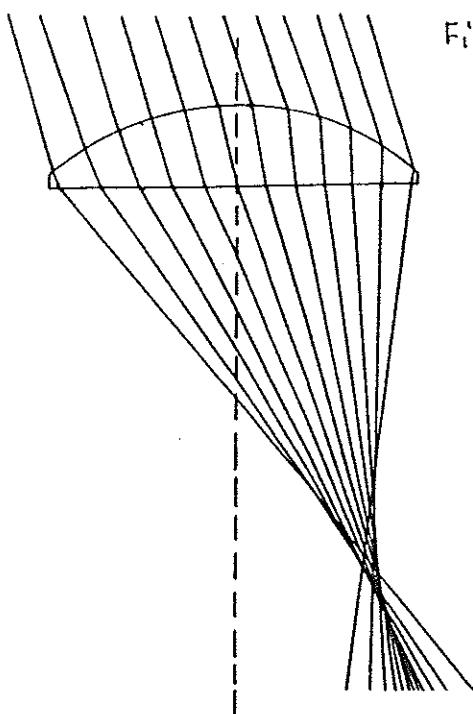


Figure 6

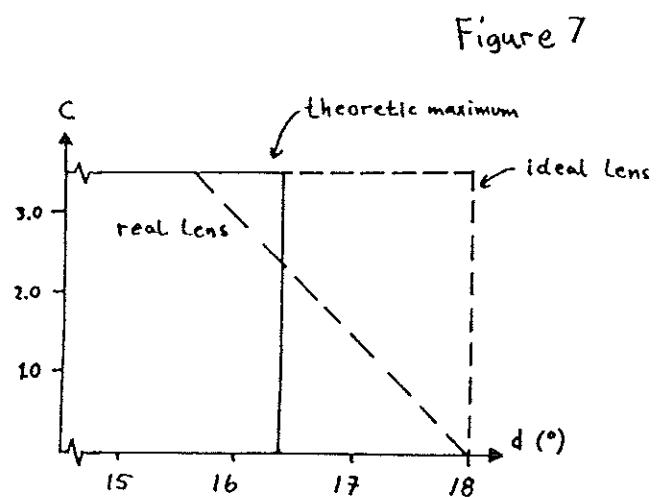


Figure 7

How does a thick lens affect the 2D case? In Figure 6 is presented the lens needed to replace the thin lens in the trough in Figure 2 in order to get a correct focal length (the lens is assumed to have n equal to 1.5). The line focus is now replaced with a band focus, the width of which is about 5% of the width of the lens. This indicates a performance approximately described by the 105% curve in Figure 5, but this is not the case, since all rays pass outside the ideal focus. Measurements in the figure indicate that the transmittance gradually decreases from 100% to 0% as d increases from 15.65° to 18° . This shall be compared with the theoretic limit 16.39° for this trough and the limit 18° with an ideal lens (according to Witte, ref 5). The situation is presented in Figure 7.

Discussion

Our results indicate the possibility of an almost perfect nonimaging concentrator, also in the 3D case. To our knowledge, the truncated cone covered with

a lens may be closer to perfect than any other geometry hitherto published. We intend to continue the present study by including the possibility to use thick lenses in our ray tracing program. Experiments are also planned.

There are several applications of this geometry that we can think of. We have e. g. previously built solar ovens and heat storing solar stoves using solar cornets, i. e. truncated cones with no aperture lens. Adding a lens, in practice most certainly a thin plastic Fresnel lens, adds to the cost, but can both reduce the size of the concentrator and increase the acceptance angle.

References

1. W. T. Welford and R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators*, Academic Press, New York 1978.
2. L. Broman, Nonimaging solar concentrators with flat mirrors, Proc. International Conference on Nonimaging Concentrators, San Diego 1983, SPIE Vol. 144.
3. S. Nordlander and L. Broman, Computer analysis of the circular solar cornet, paper presented at the conference North Sun '86 in Copenhagen.
4. D. E. Williamson, Cone channel condenser optics, *J. Opt. Soc. Am.* 42, 712(1952).
5. W. Witte, Cone channel optics, *Infrared Physics* 5, 179(1965).
6. M. Collares-Pereira, A. Rabl, and R. Winston, Lens-mirror combinations with maximal concentration, *Appl. Opt.* 16, 2677(1977).
7. M. Rönnelid, Experimental and theoretic study of a lens and mirror system, M.Sc. thesis at University of Uppsala, to be published.

Bilaga 3

Paper presented at the International Conference
Applied Optics in Solar Energy, Prague, Czechoslovakia,
July 7-9, 1987.

ANALYSIS OF FOUR DIFFERENT SOLAR CORNET CONCENTRATORS

Lars Broman, Arne Broman, Svante Nordlander and Mats Rönnelid
Solar Energy Research Center (SERC)
University College of Falun/Borlänge
P.O. Box 10044
S-781 10 Borlänge, SWEDEN

Abstract

In this paper four different types of nonimaging concentrators are presented: Square cones, circular cones with and without lenses and cones with square top and circular bottom. Various theoretic calculations and computer simulations of the cornets are presented and different applications are discussed.

Keywords: Nonimaging concentrators, flat reflectors, lens-mirror systems, solar cells, ray tracing.

Introduction

Nonimaging concentrators are optical systems which do not form an image like parabolic troughs, lenses etc. Typically, a nonimaging concentrator has a fairly large acceptance angle \underline{d} .

The geometric concentration ratio is defined as area of entrance aperture divided by area of exit aperture (or receiver area) $\underline{C} = \underline{A}/\underline{B}$. The optical concentration ratio is always less than or equal to \underline{C} . For a 3D system, there exists a theoretic limit to this ratio, $\underline{C}(\max) = 1/\sin^2\underline{d}$. The corresponding limit for a 2D system is $\underline{C}(\max) = 1/\sin \underline{d}$ (ref 1).

It can be shown that an optimally designed 2D trough solar collector with flat mirrors and a mirror angle \underline{a} has $\underline{C} = \sin(\underline{d} + (2\underline{n}+1)\underline{a})/\sin(\underline{d}+\underline{a})$, where \underline{n} is the number of reflections = $\text{Int}(90-\underline{d})/(2\underline{a})$ (ref 2). The mirror width \underline{R} is given by $\underline{R}/\underline{B} = (\underline{A}/\underline{B}-1)/(2\sin \underline{a})$.

We have done calculations and computer analysis on three different 3D cones (figure 1a-c) and compared the results with the theory for 2D concentrators. In the comparison of the geometries presented below, we have assumed both trans-

mittances through lenses and reflections to be ideal. Computer simulations using values less than 1 are presented elsewhere (ref 3-5). Concerning the analysis of the cornet in figure 1d, see below.

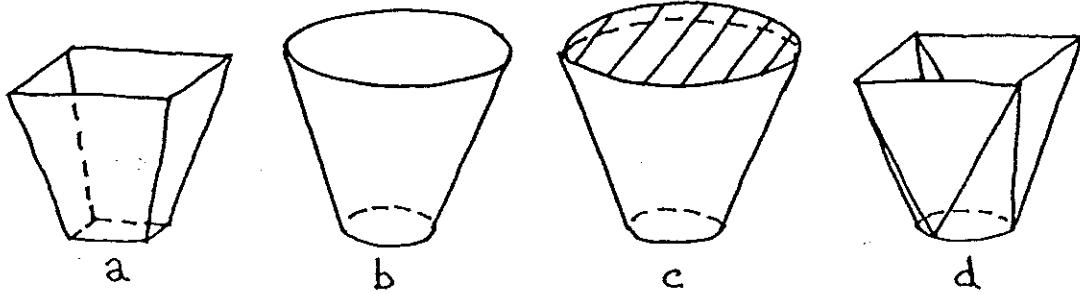


Figure 1

Square cones

If the result from the 2D case is squared, it will be almost valid for square cones (figure 1a) designed for large acceptance angles a. However, the difference increases for smaller acceptance angles. The reason for this is that some rays incident on the corners of the aperture will be lost after multiple reflections.

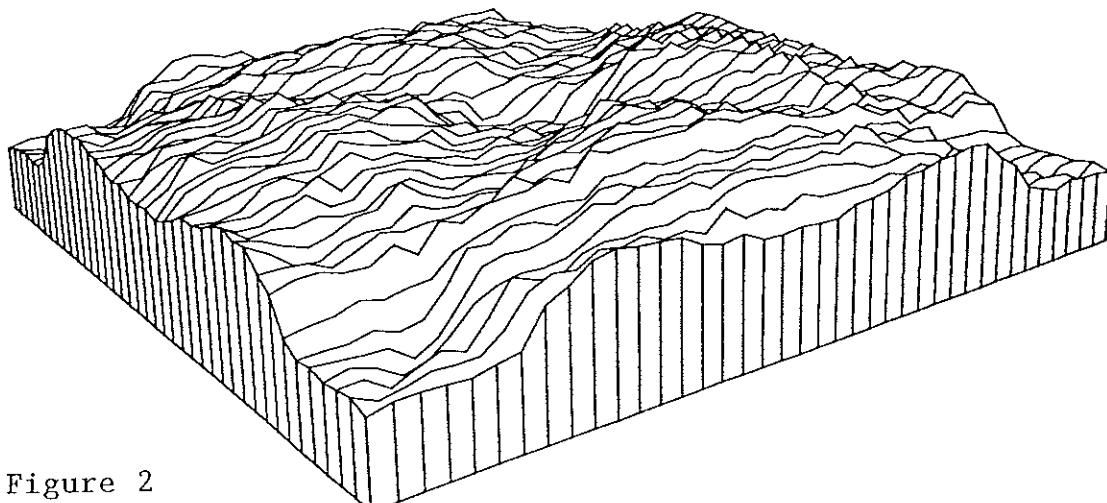


Figure 2

This type of concentrator will show a rather even light distribution at the bottom (figure 2). In the example presented here, an optical system with C = 6.0 and d = 5 degrees is simulated with 360,000 rays incident parallel to the optical axis. The picture is similar for other incident angles as well.

Circular cones

The concentrating properties of the cone (figure 1b) have been shown to agree well with the squared result of the 2D theory.

As seen from the computer simulation graph in figure 3, this type of reflector has not an even light distribution at the bottom. Our work on circular cones is presented in ref 3.

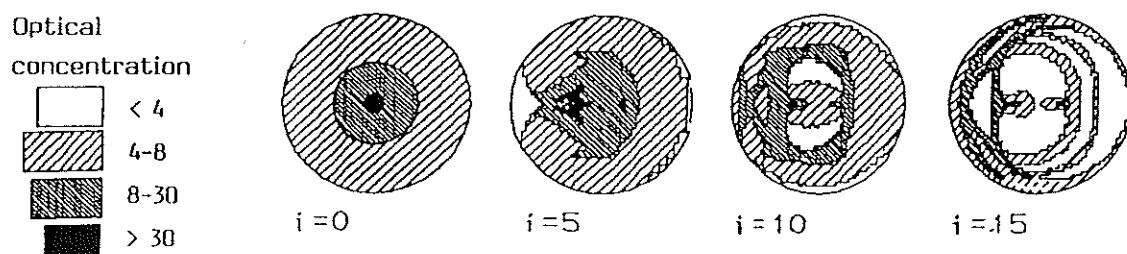


Figure 3. i equals incidence angle.

Circular cone with a lens

If the top of a circular cone is covered with a thin lens where the focal length is chosen as in figure 4, it can easily be shown that the 2D case gives $A/B = 1/(\sin d \cos a)$,

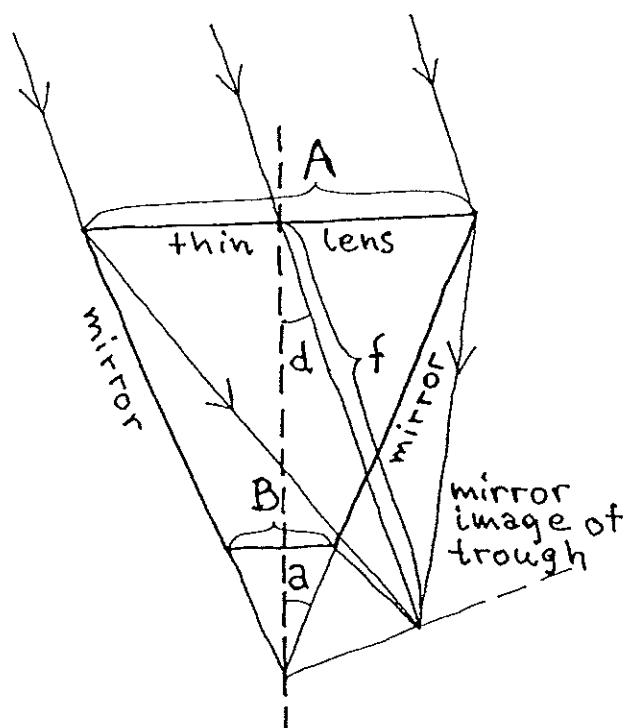


Figure 4

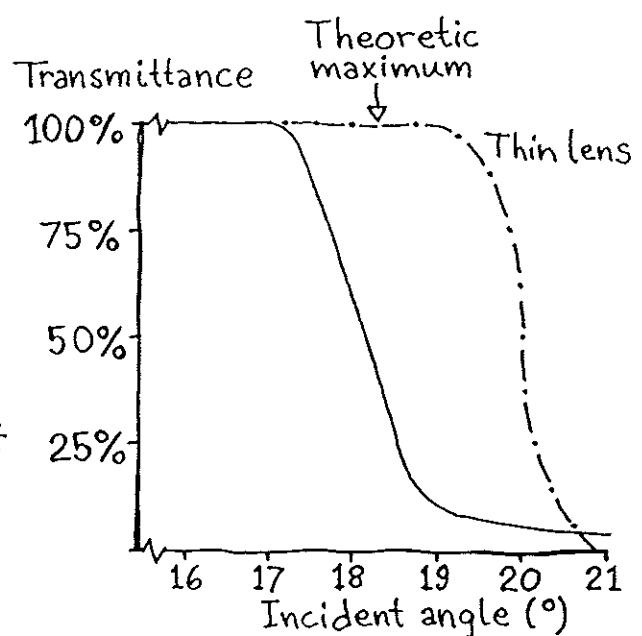


Figure 5

i. e. a concentration ratio which is greater than the theoretic limit. However, ray tracing with a thick lens (fortunately!) gives a lower acceptance angle (ref 5,6).

In figure 5, a summary of some ray tracing results from a lens-mirror system with $C = 10.14$ is shown. As seen from the figure, rays start to get lost before the incident angle approaches the theoretic maximum acceptance angle when tracing is done for a realistic (thick) lens.

Cones with square tops and circular bottoms

In a previous work (ref 7) we have shown that such cones can be made out of flat material, folded together into cones consisting of four flat triangles and four sectors of elliptic cones (see figure 6). In that work, necessary formulas for writing a computer program that generates the various shapes were also given.

In the present paper we give the parameters needed for construction of a wide variety of such cones. The constructions are simplified by the fact that the curved lines can be approximated with circular arcs; the error is of the order of magnitude 1/1000. Parameters are defined in figure 6 and listed in table 1.

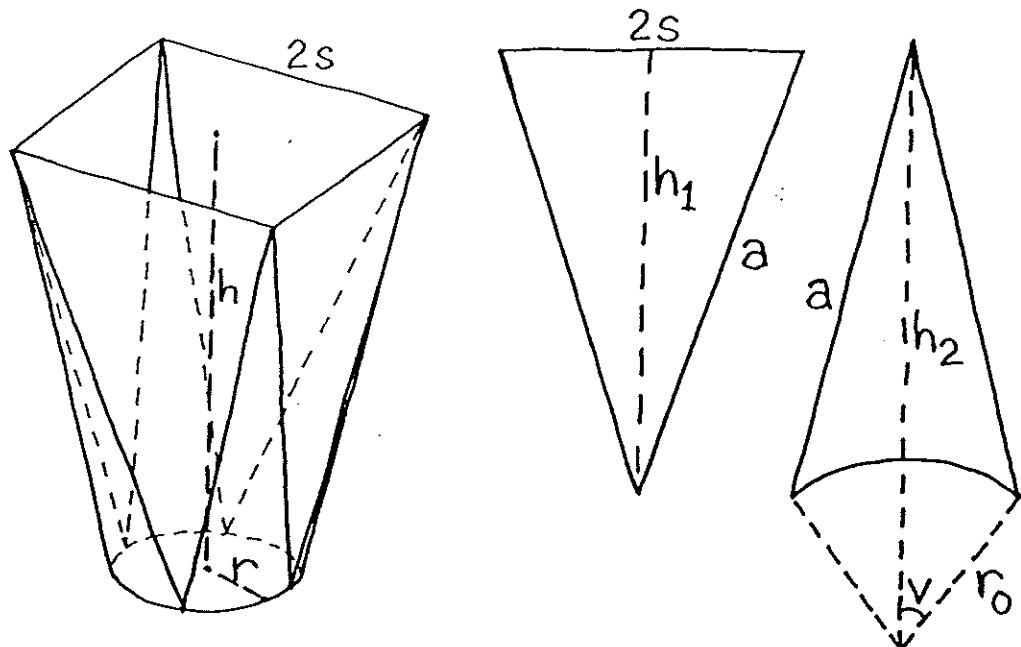


Figure 6

Table 1. Construction parameters for cone with square top and circular bottom. In all cones, bottom radius r equals 5 (cm). C equals top area divided by bottom area and d is the acceptance angle of the cone.

$d=0$

C	s	h	a	h_1	h_2	r_0	v
2	6.27	5.81	10.59	8.53	6.97	9.93	22.68
3	7.68	11.45	15.32	13.26	12.86	11.93	18.83
4	8.86	18.64	21.87	19.99	20.10	14.43	15.60
5	9.91	24.21	27.31	25.45	25.83	15.43	14.59
6	10.85	30.16	33.15	31.32	31.88	16.54	13.61
7	11.72	36.64	39.53	37.76	38.43	17.79	12.65
8	12.53	43.88	46.65	44.94	45.66	19.22	11.71

$d=5$

C	s	h	a	h_1	h_2	r_0	v
2	6.27	6.88	11.41	9.30	7.89	11.32	19.90
3	7.68	15.40	18.46	16.79	16.48	15.38	14.63
4	8.86	22.72	25.44	23.85	23.94	17.23	13.06
5	9.91	31.88	34.30	32.83	33.13	19.85	11.34
6	10.85	42.59	44.75	43.42	43.82	22.80	9.87

$d=10$

C	s	h	a	h_1	h_2	r_0	v
2	6.27	8.70	12.41	10.71	9.52	13.73	16.39
3	7.68	18.86	21.43	20.01	19.75	18.49	12.17
4	8.86	32.54	34.49	33.33	33.40	24.11	9.33
5	9.91	47.02	48.69	47.67	47.87	28.75	7.83

Discussion

An advantage with cone-type nonimaging concentrators is that they all can be cut out of planar reflector material making them easy to manufacture. The four types presented also have their individual qualities.

The lack of hot spots at the bottom of the squared cone indicate that it can be useful for concentrating radiation onto solar cells. Work on this is under progress (ref 4).

The hot spots in the circular cones make them less favourable for solar cells. They have however been tried in thermal applications (ref 3).

Use of lenses on circular cones both reduces the length of the concentrator and increases the acceptance angle. The incident light is collimated by the lens, which in some geometries lower the number of reflections. This counteracts the transmittance losses in the lens.

The squared cone with circular bottom could be used as a concentrator for circular solar cells. Since these cones can be stacked together, panels which make use of all incoming sunlight can be built.

This study was partly financed by the Swedish Board for Technical Development and partly by the Swedish Building Research Council.

References

1. W.T. Welford and R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators*, Academic Press, New York 1978.
2. L. Broman, Nonimaging solar concentrators with flat mirrors, Proc. Int. Conference on Nonimaging Concentrators, San Diego 1983, SPIE Vol. 144.
3. S. Nordlander and L. Broman, Computer analysis of the circular solar cornet, Proc. Int. Conference North Sun'86, Copenhagen 1986..
4. L. Broman, M. Rönnelid and S. Nordlander, Development of conic reflectors for concentrating radiation on solar cells, to be published.
5. L. Broman, M. Rönnelid and S. Nordlander, Analysis of a possibly perfect nonimaging concentrator, Proc. Int. Conference North Sun'86, Copenhagen 1986.
6. M. Rönnelid, Computer analysis of cone-lens nonimaging systems. MSc thesis at University of Uppsala (to be published).
7. A. Broman and L. Broman, A sun cell cornet unfolded, SERC-report nr SERC-UCBF-002, Borlänge 1985.

Bilaga 4

Paper presented at ISES Solar World Congress 1987, Hamburg, September 13-18.

ON THE ROLE OF SOLAR ELECTRICITY IN RURAL DEVELOPMENT

Lars Broman*, Mats Rönnelid* and Saihou Omar A. Sallah**

*Solar Energy Research Center, University College of Falun/Borlänge, P.O. Box 10044, S-78110 Borlänge, Sweden

**The Gambia Renewable Energy Centre (GREC), The Energy Section, Ministry of Economic Planning and Industrial Development (MEPID), Central Bank Building, Banjul, The Gambia

ABSTRACT

Rural industry development in developing countries using solar electricity is proposed. A preliminary survey of 12V DC equipment is presented. Square cornets for concentrating sunlight onto square solar cells are described. Tracking the sun is shown to be favorable in connection with village industry use. The Gambia is suggested for testing solar powered village industry.

KEYWORDS

Solar energy; photovoltaics; developing countries; concentrators; solar powered industry.

INTRODUCTION

Rural development is a necessity in most developing countries in order to lower the rate of migration into urban areas. This development includes social services such as schools and health centers, improved farming techniques and infrastructure, and small scale village industries. It has so far almost been taken for granted that the latter are of the extreme low-technology type.

The authors however disagree strongly with this. Village industries does not have to be limited to low-technology. When the number of trained engineers grows in a country, a good fraction of them can run small town industries where modern technology is employed. In the absence of electric grids, electricity has to be produced in situ. Solar panels can at present begin to compete favorably with diesel generated electricity in many instances (Cunningham, 1985; Sorensen and Wills, 1985).

Basic requirements of a majority of households in rural areas of developing countries have been estimated to a few Wh per day,

clearly most economically produced by PV techniques. Even basic community needs of electricity could well be met by PV systems (de Goward and Cornut, 1986). In the present paper, use of PV generated electricity also for industrial purposes is suggested. In fact, the cost per kWh used in manufacturing is much lower than the cost per kWh used by other parts of the community, since the industry's demand is typically during daytime while the community demand has a peak in the evening. Thus a higher percentage of the industry's electricity may be delivered directly from the PV panel, while community used electricity has to be stored before use. Battery banks are costly and not always trouble-free (Nilsson, 1987). There is no general agreement whether 12V DC or 220V AC systems should be preferred (Starr, 1985). We have however found a multitude of 12V equipment intended for mobile developed country use, and therefore believe that the higher simplicity and efficiency of the 12V DC system speaks strongly in favor of it.

As discussed in the present paper, there are certain advantages by concentrating the sun. Reflecting materials cost only a fraction per m² of what PV cells do. Several authors indicate lower cost per kWh from PV concentrating collectors (Schueler, 1981; Berry and co-workers, 1982). Low concentration systems and even non-concentrating flat plate tracking systems have also been shown to be cost effective (Stacey and McCormick, 1985). Below, we present a cornet type PV concentration system, which may prove to be very cost effective, especially for small industry and other applications, where no or little storage is required.

SURVEY OF 12V EQUIPMENT

We have made a survey of 12V DC equipment available on the Swedish market. Our list is by no means complete, but we have entries under the following headings (with examples given):

Computers and electronics. Computers (Bondwell, Epson), printer (Epson), photo copier (Canon; available next year), oscilloscope (Hitachi), soldering equipment.

School and education. Tape recorder, radio, TV, physics experimental equipment (PHYWE).

Domestic. Electric bulbs, fluorescent tubes, refrigerators (Electrolux), immersion heater, percolator, vacuum cleaner, flat-iron, shaver.

Tools and motors. Drilling-machine, circular saw, universal saw, grinding and polishing machines, engraving pen (Minicraft, Black&Decker), DC motors, fans, water pumps (Bosch), compressors, electric winch.

Transportation. Outboard motors (Johnson, Mercury), motor cycle, truck (Berix).

We are convinced that the list will grow and we would appreciate communication. Our aim is to make a special report with a more complete survey in the not so distant future.

THE CORNET CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC PANEL

Cornets belong to a class of concentrators called nonimaging concentrators. The cornet geometry has been mathematically

described elsewhere (L. Broman, 1983). One virtue of a non-imaging concentrator is that a large acceptance angle d is possible.

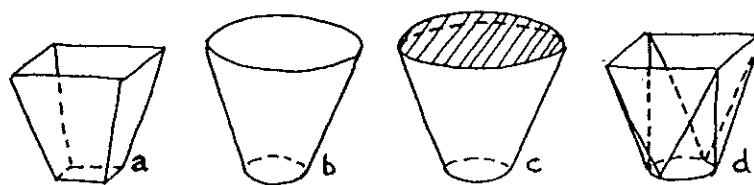


Fig. 1

We have done calculations and computer analysis of the cornets shown in Fig. 1: (a) square cornet, (b) circular cornet (c) circular cornet with a lens, and (d) cornet with square top and circular bottom (Broman, Nordlander and Rönnelid, 1987; A. Broman and L. Broman, 1987). The optimum geometry for PV applications seems to be the combination of square solar cell and square cornet, since this is a concentrator without "hot spots" at the bottom.

We have performed clear sky (direct light 800W/m^2 , diffuse light 47W/m^2) measurements of the maximum electric power output from a $10 \times 10\text{ cm}$ standard Solarex PV cell without concentration and with six different cornet concentrators made of polished aluminum. The only "customizing" we did was to solder two 1.5 mm copper wires onto four points each of the surface grid of the cell. The results are shown in Fig. 2 together with a calculated curve that takes mirror reflectivity and the fact that diffuse light cannot be concentrated into account but assumes constant cell efficiency. The experimental points fall only slightly under this curve; the discrepancy being easily explained by higher cell temperature and increased resistance losses with increased concentration.

TRACKING THE SUN

When concentrators are used, the sun has to be tracked. The use of cornets decrease the requirements of precision. As Robbins (1986) has described, so called passive sun-tracking using freon-filled tubes can easily track the sun within 2° . With an acceptance angle of 5° , manual redirection every 40-60 minutes will work fine. With higher cornets, $10-15^\circ$ acceptance angle is easily reached with correspondingly longer intervals between redirections.

Tracking, even if it is un-precise, increases the energy output from a solar panel (even if it is just a flat plate panel that doesn't need tracking). Table 1 compares the daily output from a tracking and a fixed (latitude tilt) collector during a clear day (direct and diffuse light) at some different locations and dates. The output from the tracking collector is between 32 and 53 percent higher than the output from the fixed collector. The difference is even more striking if we regard the special case of a DC motor running directly on the current from a PV panel. In a crude mathematical model, current output from the

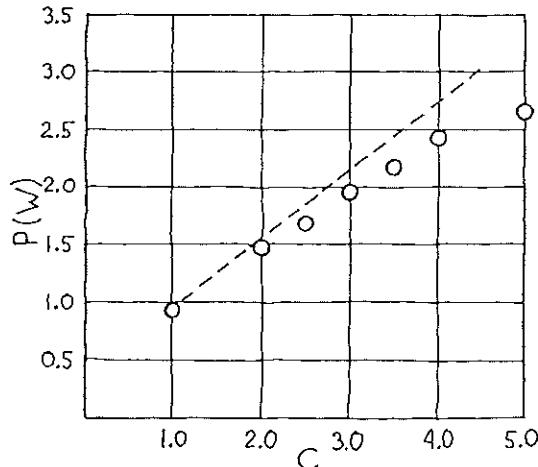


Fig. 2

panel is proportional to insolation and the work done by the motor is proportional to the current squared. Tracking the sun increases the work done between 49 and 89 percent.

TABLE 1 Relative Daily Clear Day Outputs from PV Collector

Location	Equator		Tropic		
	Summer solstice	Equinox	Winter solstice	Equinox	Winter solstice
Time of year	Equinox	Solstice			
Tracking collector	100	97	111	97	77
Fixed collector	76	68	73	74	58

A third comparison between the two geometries uses the fact that the output from a tracking collector is fairly constant during several hours of a clear day while the output from a fixed collector has a typical "cosine" shape. Since the use of electricity in a small industry can be assumed to be fairly constant throughout the day, extensive use of electricity storage can be avoided only if tracking is employed. In Fig. 3 is shown how many hours the power output from a PV panel exceeds 75 percent of maximum during a clear day. The upper curve is for a tracking collector and the lower curve for a fixed collector.

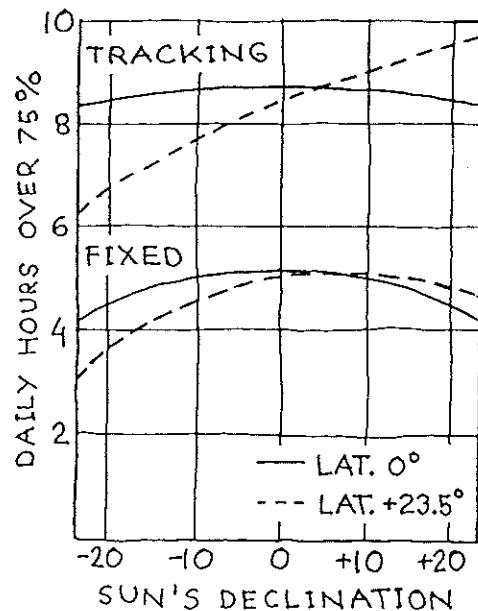


Fig. 3

SOLAR ENERGY IN THE GAMBIA

The Gambia is a good example of a country with great solar energy potentials, which fact has been discussed by Sallah (1986) and others. The country enjoys an well-balanced, seasonally and locally independent distribution of insolation levels that average more than 5 kWh per m^2 and day. The seasonal independence is primarily attributed to the fact that the shorter days of the winter are characterized by clear skies (except for periods of heavy dust pollution caused by the dry harmattan winds), while the rainy season during the summer is marked by intermittent cloudiness that reduces the effective insolation level.

The incident solar energy is monitored at various parts around the country. The monthly mean daily insolation in Yundum (1970-73) varied between 6.50 (April) and 4.99 (August) kWh/m² day, in Basse (1980) between 6.60 (March) and 3.96 (December), and in Sapu between 6.24 (March) and 4.20 (December). The monthly average of daily sunshine hours in Yundum varied between 9.5 (February) and 6.0 (July).

In The Gambia, solar generated electricity is presently used for pumping water (two installations), telecommunication systems

(nine single-channel VHF systems) and power for rural dispensaries and health centers (two installations). Present plans include conversion of twenty rural telephone stations to solar power, to equip twentyfive health centers and dispensaries with solar powered refrigerators and fluorescent lamps, and to install a number of PV water pumps - some 2000 drilled wells would provide enough potable water to satisfy the needs of the entirely Gambian population.

The Gambia would be a very suitable country for testing the thoughts advocated in the present paper. The insolation is high and evenly distributed over the year. Interest and competence in solar energy is quickly growing in the country. The organizational body for such an undertaking exists since the recent establishment of GREC, The Gambia Renewable Energy Centre, as well as CRES, Centre Regional d'Energie Solaire, with office in Mali and cooperation between several West-African countries. Project financed in part by Sw. Board for Technical Development.

REFERENCES

- Berry, J. P. and co-workers (1982). Photovoltaic generators with concentration. Solar Energy, 29, 235-243.
- Broman, A. and Broman, L. (1987). A special type of cornet concentrator for solar cells. Abstract book, Int. Conf. Applied Optics in Solar Energy II, Prague. p 9.
- Broman, L. (1983). Nonimaging solar concentrators with flat mirrors. Proc. Int. Conf. on Nonimaging Concentrators, San Diego. SPIE, Vol 144. pp 102-109.
- Broman, L., Nordlander, S. and Rönnelid, M. (1987). Computer analysis of solar cornet concentrators. Abstract book, Int. Conf. Applied Optics in Solar Energy II, Prague. pp 9-10.
- Cunningham, R. J. (1985). Photovoltaics: an advocacy statement. Proc. 6th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht. pp 539-543.
- de Gromard, C. and Cornut, B. (1986). Solar energy for pre-electrification in rural areas. Proc. 7th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference. D Reidel Publishing Company, Dordrecht. pp 20-26.
- Nilsson, A. O. (1987). Nickel-cadmium pocket plate batteries in photovoltaic installations. Abstract book, Int. Conf. Applied Optics in Solar Energy II, Prague. pp 51-52.
- Robbins, R. (1986). Sun-Tracking the Passive Way. Solar Age, February 1986. 14-16.
- Sallah, S. O. A. (1986). Renewable Energy Technologies in The Gambia, Report 0239/CRES/DTP/86. Ministry of Economic Planning and Industrial Development, The Gambia.
- Schueler, D. (1981). Overview - recent developments and potential of photovoltaic concentrating collectors. Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, New York. pp 367-371.
- Sorensen, A. and Wills, R. (1985). The economics of remote photovoltaic/generator systems. Proc. 9th Biennal Congress of ISES. Pergamon Press, New York. pp 1714-1718.
- Stacey, R. W. and McCormick, P. G. (1985). Seasonal performance of reflector augmented photovoltaic modules. Proc. 9th Biennal Congress of ISES. Pergamon Press, New York. pp 1674-78.
- Starr, M. R. (1985). Photovoltaic prospects for rural electrification. Proc. 9th Biennal Congress of ISES. Pergamon Press, New York. pp 1698-1703.