

## Fotovoltaisk Statusnotat 2

Sørensen, Bent

*Publication date:*  
1993

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Sørensen, B. (1993). *Fotovoltaisk Statusnotat 2*. Roskilde Universitet. <http://milne.ruc.dk/ImfufaTekster/>

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain.
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

### Take down policy

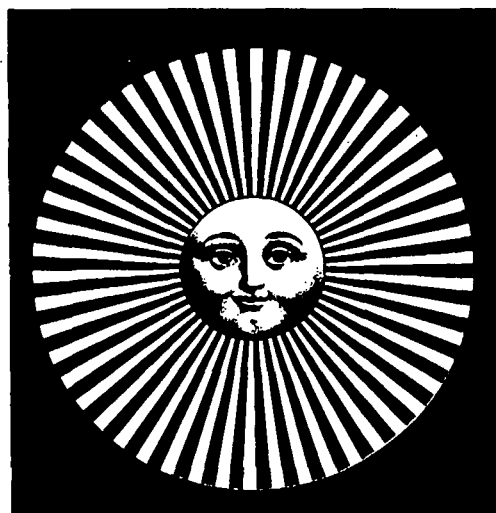
If you believe that this document breaches copyright please contact [rucforsk@kb.dk](mailto:rucforsk@kb.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2

Bent Sørensen

December 1993

Rapport fra fase 2 af projektet  
"Internationalt fotovoltaisk samarbejde",  
der udføres for Energistyrelsen under  
kontrakt nr. 51'181/93-0008.



TEKSTER fra

TEXTS from

IMFUFA

**ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER**  
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES  
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

ROSKILDE UNIVERSITY

INSTITUTE 2

ROSKILDE UNIVERSITY, P O BOX 260, DK-4000 ROSKILDE, DENMARK  
TEL: (+45) 46 757 711, FAX: (+45) 46 755 065, TELEX 43158.  
INSTITUTE OF STUDIES IN MATHEMATICS AND PHYSICS, AND THEIR FUNCTIONS  
IN EDUCATION, RESEARCH AND APPLICATION.

31. December 1993

FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2  
by Bent Sørensen  
IMFUFA text no. 264, 94 pages.

ISSN 0106 6242

---

#### ENGLISH ABSTRACT:

The purpose of this report series is to inform Danish interest groups on the progress in photovoltaic research and developments abroad. The present report no. 2 focusses on two main topics. One is the environmental aspects of the life-cycle of production, use and disposal of solar cells. The other is the development of stable amorphous cells. The latter subject bears heavily on research and development carried out in Japan. This is described and related to progress in other parts of the world. The role of government support for establishing an initial base demand for solar cell facilities is discussed, and issues related to the use of solar cells in developing countries are touched upon. This work is supported by the Danish Energy Agency under contract 51181/93-0008.

At the end, two English-language reports are appended:

Life-cycle Analysis in the Energy Field, by B. Sørensen and M. Watt.

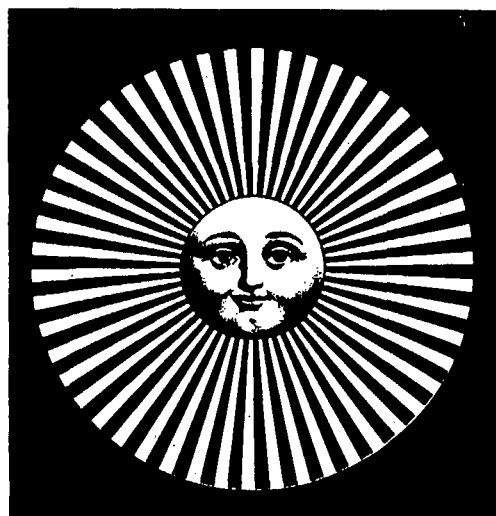
Neural Network Simulation of Solar Cells, by B. Sørensen

# FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2

**Bent Sørensen**

**December 1993**

Rapport fra fase 2 af projektet  
"Internationalt fotovoltaisk samarbejde",  
der udføres for Energistyrelsen under  
kontrakt nr. 51181/93-0008.





## Forord

Denne 2. rapport i serien Fotovoltaiske Statusnotater er opbygget ligesom den første, dvs med en eller to små artikler om udvalgte emner, efterfulgt af beskrivelser af projekter og udviklinger hos samarbejds- eller besøgs partnere i enkeltlande. Der afrundes med forfatterens refleksioner over de beskrevne emner, en liste over faktiske besøg og samarbejder, med gengivelse af udvalgte publikationer udfærdiget i perioden. Formålet med denne struktur blev beskrevet således i forordet til det første statusnotat:

"Denne rapport er knyttet til et projekt der dels sigter på "videnhjemtagning", altså at fremstille vigtige landvindinger på solcelleområdet, gjort i udlandet, for danske interessenter. Interessenterne er ikke så meget forskere på solcelleområdet (de formodes selv at opsøge resultaterne i den internationale fagpresse eller gennem personlige kontakter), som mere udviklere og bredt interesserede folk, som ikke har mulighed for eller tid til selv at opsøge originallitteraturen. Også beslutningstagere på det bevillingsmæssige område kan have interesse af dette forsøg på at granske et helt område og give et overskueligt kondensat af nogle vigtige træk.

Det andet område, der sigtes på, er konkret samarbejde med solcelle-forskningsgrupper i udlandet. Synspunktet er her, at videnhjemtagning i sig selv ikke er interessant, hvis ikke færdigheder samtidigt overføres til modtageren. Og dette kræver et mere ligeværdigt samarbejde. Dette er også i mange tilfælde nødvendigt for overhovedet at få adgang til de nyeste forskningsresultater. Noget for noget! Vi må tilføre vor viden før vi kan vente at de udenlandske forskningscentre åbner op for de dybere lag af deres erfaringer. Her er det klart, at det danske bidrag hovedsageligt vil ligge på det område, hvor vi har opbygget en ledende forskningsindsats, nemlig systemaspekter ved solcelleteknologien."

Her i den 2. statusrapport er der fokuseret på to problemstillinger. Den ene er fremdriften i den globale udvikling af teknologi og markeder for solceller. Mens den første rapport fokuserede på udviklingen af krystallinske celler, gennemgås her de forhåbninger og problemer, der knytter sig til tyndfilmsteknologier, og især til de amorfe solceller, som den japanske industri har lagt alle deres kræfter i. Det synes at være en general holdning idag, at solcelleteknologien vil udbredes i stort set det tempo, som karakteriserer dagens markeder, de næste ti år. Derefter ventes en række gennembrud at være overført fra forskningsverdenen til aktuel produktion, og følgelig håbes efterfølgende på en eksplosiv vækst i solcellesalg og teknologiens indtrængen på de store markeder, først og fremmest indenfor den netbaserede elproduktions-sektor.

Det andet hovedemne er miljøanalyse af solcelleteknologien, set som et livscyklus-problem, spændende fra udvinding af materialer og etablering af produktionsfaciliteter, over den egentlige produktion og anvendelse af fotovoltaiske celler, til en sluttelig fase af afmontering og genbrug af komponenter. Miljøaspektet er vigtigt, fordi hovedparten af miljøproblemerne ved solcelleteknologien formentlig ligger i de første skridt, dvs.

materialer og produktion. De vil derfor mærkes straks teknologien anvendes, og ikke først efter nogen forsinkelse. Den anden grund til, at miljøanalyserne bør have stor vægt nu, er at der er en række konkurrerende teknologier under udvikling. Udover silicium-baserede solceller (amorfe, krystallinske eller poly-krystallinske) udvikles celler baseret på cadmium, germanium, gallium, selen og en række andre stoffer, af hvilke nogle anses for miljømæssigt meget problematiske. Der må derfor sikres en udvikling af teknologier til fuld isolering af disse stoffer fra det naturlige miljø, med 100% genanvendelse, eller også må miljøhensynet have en afgørende indflydelse på, hvilke af de nye teknologier der satses på. Rapportens forfatter arbejder indenfor OECD, IEA og EU med etableringen af en general metodologi for gennemførelsen af livscyklusanalyser af energiteknologier, et redskab der kan sikre, at undersøgelser er sammenlignelige, uanset at de omhandler meget forskellige energiteknologier (brændselsbaserede eller vedvarende energi-baserede).

Denne rapports undersøgelser er baseret på samarbejde med og gensidige besøg af forskere i de omhandlede lande, støttet af en bevilling fra Energistyrelsens 7. kontor, og udgør samtidig afrapportering af dette projekt "Internationalt fotovoltaisk samarbejde, fase 2".

## FOTOVOLTAISK STATUSRAPPORT 2

### Indhold

<b>Forord</b>	<b>5</b>
<b>1 FOKUS</b>	
1.1 Miljøforhold.	8
<b>2 PROJEKTER</b>	
2.1 Japan	16
2.1.1 Satsning på amorfe celler	17
2.1.2 Rokko Island simulering af islandg effekten.	27
2.2 Kina	32
2.3 Korea	34
2.4 Australien	35
2.4.1 Livscyklus-analyser	39
2.4.2 Optimering	40
2.4.3 Indkobling af solceller på elnettet	41
2.5 Mexico	43
2.6 Grækenland	44
2.7 Irland	45
2.8 Schweiz	48
2.9 IEA indsats for solceller	50
2.9.1 IEA fotovoltaisk implementeringsaftale, arbejdsgruppe 5	51
2.9.2 IEA solopvarmning og -afkøling, arbejdsgruppe 16	55
<b>3 REFLEKTIONER</b>	<b>56</b>
<b>LITTERATUR</b>	<b>59</b>
<b>APPENDIX</b>	
A.1 Aktiviteter relateret til dette projekt	63
A.2 Life-cycle Analysis of Energy Systems	65
A.3 Neural Network Simulation of solar cells	82
	-94



## 1. FOKUS

### 1.1. Miljøforhold

Miljø- og samfundsmæssige påvirkninger fra fotovoltaisk teknologi kan beskrives ved en livscyklus-analyse, som metodisk udviklet i Sørensen (1993) og kort opsummeret i det i Appendix A.2 optrykte skrift, der indgår i samarbejdet med Muriel Watt, University of New South Wales, på hvilket de følgende bemærkninger er baseret.

For en krystallinsk celle er hovedskridtene i livscyklus de i Fig. 1 viste. For tyndfilms-celler kan en række andre teknologier og materialer bringes i anvendelse, inkl. tungmetaller og andre toksiske materialer. Også under driftsfasen er der en spredning i påvirkninger, afhængig af om der anvendes decentralt placerede (bygningsintegrerede) celler eller solcelle-parker. I tilfælde af alenestående anlæg (altså ikke nettilsluttede), vil miljøpåvirkninger fra lagrings eller opbakningssystemet (batterier, dieselmotorer, osv.) ofte udgøre en meget væsentlig del af de samlede. Også ved stor solcelle-andel i netværksbaserede systemer kommer reservekraft og lagring på tale.

På fordelssiden medtages i den anvendte vurdering kun fordelene ved anvendelse af den producerede strøm. Relative fordele som fravær af drivhusgasser eller radioaktive udslip betragtes som ulemper ved de andre energikilder, som udviser sådanne, og derfor uvedkommende i en opgørelse af fordele og ulemper ved fotovoltaiske systemer.

En silicium celle består af et halvledermateriale, som er "doped" med små mængder af fremmedstoffer, der giver et overskud eller underskud af ladninger i forskellige lag af cellen, og dermed fremmer transport af elektroner, som løsriveres fra deres plads i atomstrukturen, når de tilføres en passende energi fra indfald af solstråling. Der vil ofte være dæklag til reduktion af uønskede reflektioner, samt ledende strukturer, der kan opsamle elektronerne og formidle en strøm til et ydre kredsløb. Desuden kan der være tale om indkapsling og dæklag til beskyttelse af halvlederoverfladen mod mekaniske påvirkninger. Cellerne samles elektrisk i moduler, som igen samles i rækker. Vekselrettere og andet strøm-bearbejdende udstyr kan enten være integreret på modul eller ræckeniveau, eller kan betjene et helt panel. I tilfælde af fritstående systemer vil der desuden være tale om en bærende struktur, hvorpå modulrækkerne monteres, og evt. transformerudstyr mv. Endelig kan der være tilføjet systemet batterier til udjævning af korttids-fluktuationer, altså til forbedring af el-kvaliteten, og langtids-lagre til håndtering af uoverensstemmelse mellem elproduktion og forbrug.

Alle de nævnte ingredienser bidrager potentielt til systemets miljøpåvirkninger mm.

Silicium halvledermateriale kendes fra hele elektronikindustrien. Råmaterialet er silicium dioxid (sand, kvartsit), som reduceres til silicium og opgraderes til metallurgisk kvalitet ved fjernelse af urenheder. I solcelleproduktionen sker dette ved en kemisk proces, der som mellemprodukt har klorsilan (i dampform), som fortættes og herved danner

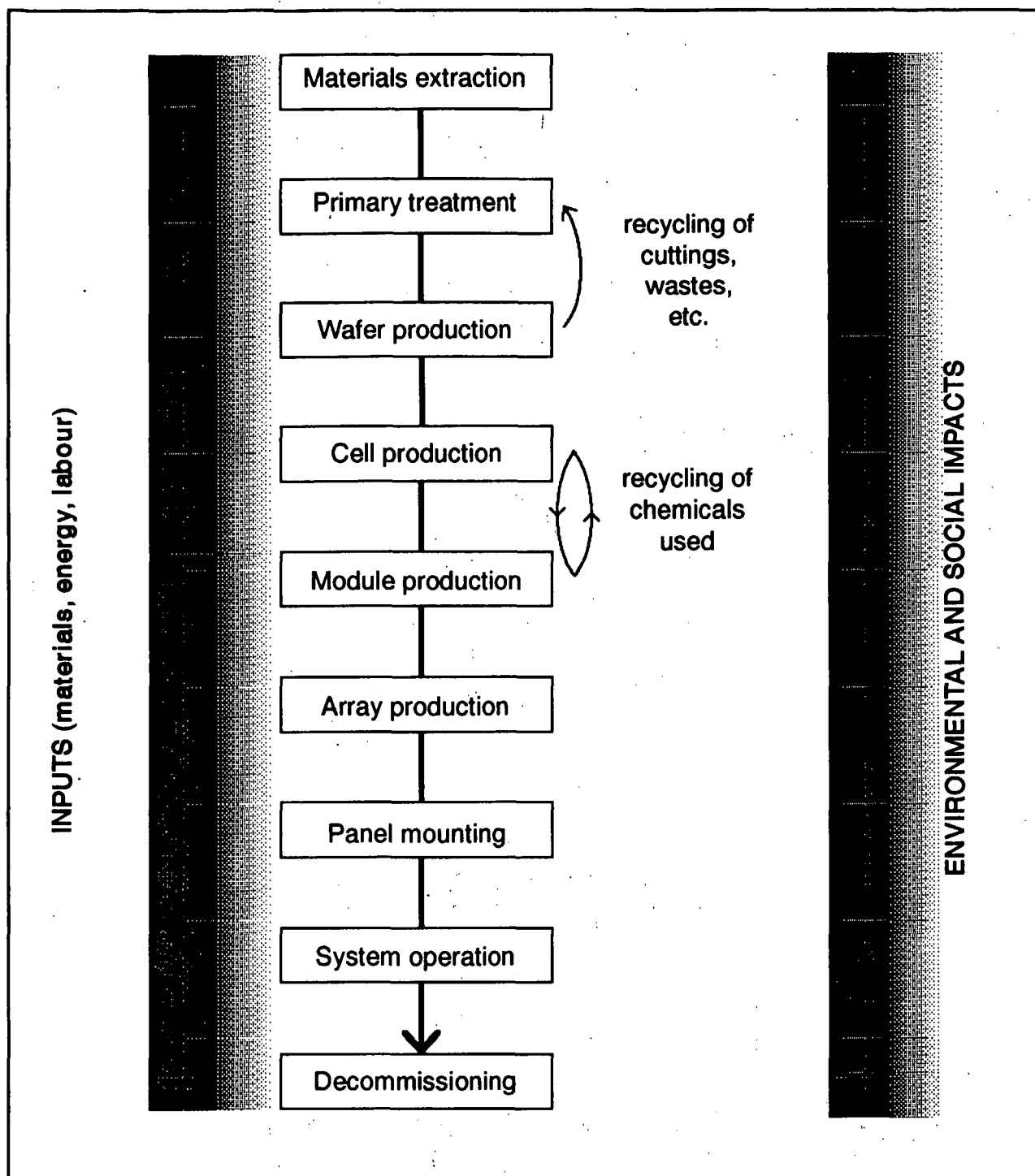


Figure 1. De vigtigste skridt i en solcelle-livscyklus

polykrystallinske silicium-stave.

Disse dopes til enkrystal-produktionen med bor og smeltes, hvorefter en mini-krystal trækkes igennem væsken, således at en større mono-krystal kan dannes. Den slibes dernæst til cylinderform og skæres ud i runde skiver.

Ved produktion af polykrystallinske celler rengøres og smeltes silicium-materialet i rektangulære forme og skæres herefter ud i skiver.

Det er muligt alternativt at få krystallinsk silicium til at vokse i båndform, så der ikke er behov for udskivning. Herved fås krystallinsk silicium i rektangulære stykker, men denne process har endnu ikke opnået at frembringe så effektive celler som de udskivede cylinderstave.

Mulige miljø- og helbredsvirkninger kan opstå ved råstofudvindingen ud fra sand eller kvartsit-indeholdende klippe (f.eks. silicone, cf. Boeniger og Briggs, 1980).

Ved drift og rensning af de ovne, som anvendes til reduktionen af kvartsit-materialet, kan arbejdere udsættes for kulilte, silicium-støv samt ilt og brintforbindelser af kisel. Støvet's nøjagtige sammensætning er ofte ukendt. Amerikanske myndigheder har foreslået en grænseværdi på 0.75 millioner partikler per kubikmeter luft for støv af denne type (ACGIH, 1976). Grænseværdien for kulilte er i USA foreslået til 35 ppm i højst 10 timer per døgn (NIOSH, 1972).

Ved produktionen af klor-silaner ud fra kisel anvendes saltsyre, som naturligvis forsøges gendannet og genbrugt i den fortløbende produktion. Klor-silanerne selv er yderst korroderende og kronisk udsættelse for disse stoffer (typisk mono-, di, tri- og tetraklor-silaner) kan medføre irritation af hud og luftveje (MCA, 1980). Personale som arbejder med disse stoffer anvender beskyttende beklædning og luftfilter-masker, og lokalerne indrettes til hurtigt luftskifte. Desuden findes brint-målere, der bevirker automatisk procesafbrydelse ved koncentrationer over 10%, pga. eksplosionsrisikoen ved brint-luft blandinger (Boeniger og Briggs, 1980).

En alternativ metode som har været anvendt bruger metylklorid i stedet for saltsyre til dannelse af klor-silanerne. Udsættes arbejdere for metylklorid, kan nervesystemet påvirkes, permanent ved kronisk påvirkning (ILO, 1972).

Dyrkning af krystaller (der gror fra en sæd-krystal) sker i vakuum. Olieforstøvning fra vakuum pumper kontrolleres idag ved brug af vand-gennemgangsbade og elektrostatisk tilbageholdelse af oliepartikler (CECSMUD, 1982). Hvis der til opvarmning anvendes fossile brændsler, kan kulbrinter findes i arbejdsmiljøet. Ofte anvendes radiofrekvens bølger til forbedring af zone-væksten i krystalopbygnings-processen, og røntgenstråling benyttes til at bestemme krystalorienteringen. Der er normalt ikke problemer med at overholde gældende sikkerhedsforskrifter i sidstnævnte tilfælde.

I produktionen af polykrystallinske celler skal de varme emner håndteres. Hvis dette

sker manuelt, bæres masker og varmeisolerende handsker.

Ved doping-processen anvendes bor-triklorid eller diboran til dannelsen af p-type halvlederkrystaller (Czochralski teknik). Bor-triklorid reagerer med vanddamp og danner saltsyre eller borsyre, der kan absorberes gennem huden. Diboran er hud-irriterende og let antændelig (Watt, 1993). Ovnene, der benyttes til doping processen, skal periodisk renses for silicium monoxid. Der er ikke fastsat grænseværdier for dette stof.

Ved slibning af cylinderformede stave og den følgende oversavning til skiver dannes siliciumholdigt slam, som kan udvikle brint og siliciumoxider. Olier og pH-stabiliserende teknikker anvendes for at holde brint-produktionen nede. Slammet indeholder således olie, ler, bindemidler, opløsningsmidler, aluminium, siliciumkarbid og stål (Gandel og Sears, 1977). Det tørres og vandet renses, hvilket skønnes at kunne gøres med ufarlige slutprodukter til følge (CECSMUD, 1982). Det bemærkes at bånd-teknikken stort set undgår disse problemer.

I nogle produktionsprocesser anvendes en ætsning med en blanding af flussyre og salpetersyre, for at fjerne slibester på celleoverfladen. For polykrystallinsk materiale anvendes istedet en blanding af vand, triklor-etan og syre. Andre fabrikker anvender natriumhydroxid eller kaliumhydroxid til at rense de udskårne enkrystal-skiver. Alle disse stoffer kræver særlig behandling. Alternativt kunne mildere opvaskemidler, kendt fra husholdninger, muligvis anvendes (Watt, 1993). Hvad ætsning-processen angår har alternative tørre processer været foreslået, med anvendelse af kul-tetrafluorid plasma i et vacuum kammer (Rose, 1983).

Selve celleproduktionen kan bestå af følgende skridt:

1. Overfladen profileres, f.eks. med en struktur af omvendte pyramider (se Fig. 5 i Sørensen, 1993b).
2. Et tyndt dopet n-lag dannes ved diffusion fra den øvre overflade.
3. Mønster-trykning (screen printing) og deponering af aluminium eller aluminium dopet sølv-pasta på cellens bagside, for at danne elektrisk kontakt og et elektrisk felt nær bagsiden af cellen.
4. Kemisk rensning.
5. Mønster-trykning og sølv påtrykning af ledende kontakter på forsiden af cellen.
6. Isolering af kanter, så for- og bagside ikke er i elektrisk kontakt.

n-laget dannes ved fosfor-doping, med anvendelse af fosfor oxyklorid ( $\text{POCl}_3$ ) eller fosfor pentoxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) i opløsningsmidler som idag er fabriks-hemmehedder (Jordan, 1992). Udsendelse af fosforforbindelser er generelt forbudt, så disse må håndteres i lukkede kredsløb. De nævnte fosforforbindelser er mindre farlige end fosfin ( $\text{PH}_3$ ), som anvendes ved doping i elektronikindustrien og formentlig også ved doping af amorfe solceller.

Ætsningsprocessen i forbindelse med strukturering af celleoverfladen anvender normalt ikke de omtalte syrer, men mindre aggressive, basiske opløsninger (Jordan, 1992). Personale involveret i dette processtrin skal bære beskyttende dragter og arbejdet foregår i velventilerede lokaler.

Ret store mængder af flydende kvælstof anvendes i tørre-processerne. Miljøpåvirkninger skyldes i denne forbindelse kvælstofproduktionen, og er især forbundet med energianvendelse i de anvendte processer.

De screen printede elektriske kredsløb består af blandinger af sølv, aluminium, glasser og organiske bindemidler. Den nøjagtige sammensætning er en fabrikationshemmelighed. Arbejdsmiljø-problemer kan opstå i forbindelse med metallerne og organiske opløsningsmidler, f.eks. ved rensning efter elektronstråle deponering af ledningsmaterialer. Rose (1983) bemærker at disse stoffer kan anvendes i andre industrier, hvis de ikke kan genbruges i solcelleindustrien på grund af høje renhedskrav.

Alternativer til screen printing har været anvendt i Martin Greens pilotproduktion af celler ved University of New South Wales, Australien, men også her kræves recykling af kemikalier, omend i mindre mængder (UNSW, 1993).

Halvledercellen dækkes med en belægning af f.eks. titaniumoxid, silicium monoxid eller -dioxid, eller tantalium dioxid, pålagt ved vakuumdeponering på celleoverfladen. Ingen af disse processer synes at udvise helbredsrisici, i modsætning til en alternative metode, hvor silicium nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) deponeres under anvendelse af diklor-silan og ammoniak (Rose, 1983).

Afprøvning af celler anvender typisk kunstigt lys fra Xenon lamper, for hvilke der findes en arbejdsmiljøgrænseværdi på  $10 \text{ mWs/cm}^2$  for ultraviolet lys (NIOSH, 1972b). Disse lamper kan også udvikle ozon. Alternative lamper, der ikke sigter mod at reproducere solens ultraviolette spektrum, kan evt. anvendes.

Ved produktion af solcellemoduler kan anvendes frontglas, aluminium indramning og polymerer som tedlar (polyvinylfluorid) eller et tedlar-polyester-tedlar trilaminat for bagsiden (Jordan, 1992). Andre anvendte materialer omfatter EVA (etylen vinylacetat) og mylar (Rose, 1983). Arbejdsmiljøeffekter kan opstå i forbindelse med lodning og de her-til knyttede afgasninger. Der synes dog ikke at være problemer med grænseværdien for bly ( $0.15 \text{ mg/m}^3$ , cf. CECSMUD, 1982). Inhalering af metaldampe skal undgås. Andre stoffer der skal kontrolleres er eventuelle opløsningsmidler anvendt til rensning af moduler, epoxy eller silicium fuger anvendt til fastgørelse af dækglass mv. Endelig skal miljøeffekter forbundet med den anvendte energi til modulproduktionen medtages.

For amorfe celler anvendes i én fabrikationsproces (Dickson, 1987) gennemsigtige, ledende tin-fluor-oxid belægninger pådampet under anvendelse af tetrametyltin, et stof der kan optages gennem hud eller ved indånding, og som ophobes i leveren og kan medføre hjerneskader (Aldridge et al., 1981; Megerle et al., 1984). Der anvendes undertryk ved udskiftning af ampuller, og luftens indhold af giftige stoffer checkes kontinuerligt. Spildes de nævnte stoffer, sprøjtes der med natriumhypokorit, og den dannede tin-salt blanding indkapsles. Brandslukningsudstyr skal anvende pulverlukningsmidler, og personalet skal bære åndedrætsfiltre og beskyttelsesklæder ved brandslukning.

Amorft silicium deponeres på et substrat ved påsprøjtning af silan gas ( $\text{SiH}_4$ ), med typiske mængder af størrelsesordenen nogle litre i minuttet. Gassen antænder spontant i luft, og derfor gemmes højst 1-2 dages forbrug på fabrikken, f.eks. i specielt ventilerede aflukker med installeret brandslukningsautomatik. Silanbeholdere udstyres med særlige mundstykker, som begrænser udstrømning selv under forhøjede trykforhold. Doping materialer tilføres som luftarter (diboran og fosfin), der må holdes i lukkede kredsløb, ligesom evt. siliciumstøv. Genbrug af silan forsøges maksimeret, men nedbrydning kan ske ved opvarmning (til silicium og brint) eller forbrænding (til silicium dioxid). Alternativer er udrensning (scrubbing) ved passage gennem et basisk vandbad, eller fortynding i ædelgasser.

Kredsløbsmønstre og forbindelser kan dannes ved laser inskription, som kræver strålings- og brandbeskyttelse, efter gængse forskrifter for de forskellige lasertyper. Personalet skal bære særlige beskyttelsesbriller, og må beskyttes mod elektrisk stød ved reparations- og vedligeholdelsesarbejde, pga. de kondensatorer, som ofte er integreret i laser-systemerne. Beskyttelseshandsker og ansigtsværn skal bæres ved udskiftning af lamper (f.eks. højtryks krypton teknik) i laserne, af hensyn til eksplosionsfare.

Fabrikationen af amorfe siliciumceller anvender typisk en række kemiske stoffer til rensning mv. (acetone, isopropanol, natriumhydroxid og diverse syrer). Disse stoffer skal anvendes, opbevares og deponeres efter gældende forskrifter. Selve fabrikationsteknikken ændrer sig i takt med stigende robotisering, typisk med lavere miljøpåvirkninger til følge. Der er også interesse i at erstatte processer ved højere temperatur med stuetemperatur-processer, hvilket vil nedsætte energiforbruget til fremstillingen. En række ny cellestrukturer er under udvikling, bl.a. med flere lag af amorfe stoffer (se afsnit 2.1.1), hvis miljøpåvirkninger derfor må undersøges.

Tyndfilm celler baseret på cadmium sulfid, cadmium zinksulfid, cadmium tellurid og cadmium kviksølv-sulfid har været undersøgt. F.eks. fremstilles cadmium sulfid celler ved påsprøjtning af tin klorid opløst i metyl alkohol på glasplader, skiftevis med påsprøjtning af cadmium sulfid opløst i thiourea, opvarmning, dypning i kobberklorid, afskrapning og vacuum påføring af zink, cadmium sulfid, kobber sulfid og silicium dioxid overflader på et kobbersubstrat (Shirland, 1966). Alternativt kan anvendes galvanisering (zink på kobbersubstrat) og efterfølgende pådampning af cadmium sulfid og kobber sulfid og tilsidst elektrolytisk påhæftning af et metalmønster. Arbejdsmiljøpåvirkninger fra sådanne processer er først og fremmest forbundet med cadmium dampe (San Martin, 1989). Påvirkninger under brug og deponering af brugte celler kan ligeledes føre til uønsket cadmium afsætning i luft og vandigt miljø generelt.

Under arbejdsprocessen anvendes åndedrætsværn, og personalet afleverer periodiske blodprøver der undersøges for forhøjet cadmium indhold. Kronisk cadmium forgiftning kan ske ved intagelse af små doser over længere tid (Boeniger og Briggs, 1980). Som nævnt anvendes i én proces thiourea, som kan erodere benmarv, hvis stoffet indtages (IARC, 1974).

I tilfælde af bygningsintegrerede solcellesystemer baseret på cadmium teknologier, er

brandrisikoen den største miljøfaktor. Ved ca. 850 °C frigøres over 50% af cadmium-indholdet i cadmium-tellurid celler med enkelt dæklag af glas (Alsema og Engelenburg, 1992). Frigivelsen kan muligvis nedsættes hvis der anvendes dobbeltlags glasdække. Tvungen returtagning af udslidte moduler og totale genbrugssystemer vil være nødvendige, hvis de cadmium-baserede teknologier tages i anvendelse.

Kobber-indium-diselenid celler (som p-lag) kan fremstilles med zink-cadmium-sulfid som n-lag, typisk på et glas-substrat med tantalum belægning (påført ved sputtering process), og med molybdæn elektrode. Efter ætsning påføres  $\text{CuInSe}_2$  laget i vakuum, dernæst  $\text{CdZnS}$  laget, og efter endnu en ætsning med påfølgende deponering af aluminium kredsløb pålægges til sidst en antirefleks belægning (Stewart, 1987).

Udover de allerede omtalte cadmium forbindelser kan miljøproblemer være forbundet med inhalering af kobberstøv, indium der er giftigt ved optagelse gennem huden, og selen støv og dampe (luftvejsirritation). Mens selen selv har lav giftighed, er forbindelser som  $\text{H}_2\text{Se}$ , der anvendes i  $\text{CuInSe}_2$  cellefabrikationen, stærkt giftige. Fremstillingen sker i lukkede beholdere med genbrug af alle kemikalier. Arbejdere skal bære luftrensende masker, især under rengøringsoperationer, og luftskiftet i arbejdslokaler skal være høj.

For at undgå udslip til omgivelserne anbringes filtre i udluftsåbninger, og fast og flydende affald sendes til behandlingsanlæg. Igen kan brand i bygningsintegrerede solcelle-installationer vise sig at være den dominerende miljøpåvirkning. Selen-dioxid sublimerer ved 350 °C (Alsema og Engelenburg, 1992).

For gallium-arsenid celler koncentrerer miljøpåvirkningerne sig om arsen-forbindelser såsom arsin, der anses for skadelig i så små doser som 6 ppm (Partain et al, 1987). Til sammenligning er den tilsvarende grænse 20 ppm for methyl-isocyanat, der blev frigjort ved Union Carbide ulykken i Bopal, Indien. Forskellige produktionsprocesser udviser forskellig risiko for udslip af arsen-forbindelser, med kemisk vakuum epitaxi som den mest miljøvenlige. Arsin kan muligvis erstattes med trimethyl arsenik, med nedsat men ikke uvæsentlig giftighed som følge (Breckenridge et al., 1983).

Gallium arsenid bruges idag i flere dele af elektronikindustrien, men det anses af mange, at gallium er et for dyrt materiale til brug for solceller.

For centrale solcellekraftværker vil det medgåede landareal bidrage til de direkte og indirekte omkostninger. Typiske arealbehov er 40000  $\text{m}^2/\text{MW}$  (spidseffekt), evt. noget mere for systemer med retningsjustering (tracking). Arealet per produceret kWt er stort set det samme som for kulfyrede kraftværker, når arealet medgået til kulminedrift medtages (San Martin, 1989). Visuelle effekter af centrale anlæg kan opfattes som negative, mens de for bygningsintegrerede anlæg afhænger af arkitekturens kvaliteter og dermed af om det er lykkedes at integrere panelerne harmonisk i bygningsflader og tage.

For centrale solcellesystemer er der yderligere påvirkninger fra installering og fra køretøjer og andre aktiviteter i forbindelse med vedligeholdelse af anlægget. For arbejdere beskæftiget med arbejde på installationer og ledningsnet er der risiko for stød (se

behandling af islanding fænomenet i Sørensen, 1993b). Generelt vil den kendsgerning, at modulerne kan begynde at producere strøm under reparationsarbejde, hvis de udsættes for lys, kræve særlige sikkerhedsforskrifter. Dette er også tilfældet pga. anlæggenes blanding af jævnstrøms- og vekselstrøms-komponenter. Arbejdet med fotovoltaiske installationer på tage o.l. er omfattet af de sædvanlige sikkerhedsforskrifter for stilladsarbejde. Eksisterende industristatistik kan anvendes til at vurdere antallet af arbejdsulykker: 1.5 mistet arbejdstime per GWt strøm produceret, og 0.00003 arbejdsulykker med dødelig udgang per GWt (Hohmeyer, 1988).

Store centrale anlæg kan ændre mikroklima og give anledning til ændrede mønstre af vindstøj. Reflektion af lys fra solpaneloverflader kan være generende. Dette er ikke mindst vigtigt at tage hensyn til ved decentrale anlæg i bymiljøer.

Normalt er rensning af panel-overflader ikke nødvendigt, men i visse typer af klima kan det være det, med et spildevandsproblem som følge. Elektrisk udstyr som vekselrettere kan udsende støj i såvel det hørbare område som i radiofrekvensområder, men mulighed for uønsket interferens med telekommunikation. Afskærmning kan afhjælpe disse problemer.

Som nævnt er en væsentlig risiko for nogle celletyper (dog ikke de silicium baserede) giftige dampe udsendt under brand. Brandrisikoen for en given bygning kan øges ved tilstedeværelsen af solcellepaneler og deres elektriske udstyr (Moskowitz og Fthenakis, 1990).

Ved afmontering af solcellenlæg skal materialer deles i genbrugsmaterialer og kemisk affald. Polymerer skal evt. forbrændes, mens giftige materialer skal udtrækkes og isoleres til genbrug eller deponering. Der bør etableres regler for håndteringen af disse problemer (ikke mindst hvis celler baseret på andre stoffer end silicium vinder udbredelse), bedst med krav til fremstillingsindustrien om at tage brugte moduler tilbage, da disse industrier bedst kan sikre en høj genanvendelsesprocent.

Forsøg på at værdisætte miljøpåvirkningerne ved solcelle-energiproduktion har været foretaget, med resultater i intervallet 0 til 2.5 øre per kWt, hvilket er betydeligt lavere end for gasfyrede kraftværker og langt lavere end for kulfyrede (Ottinger, 1990).



## 2. PROJEKTER

### 2.1. Japan

Nettoudviklingsomkostningerne for den japanske solcelleindustri har stort set været nul, idet lav-effektivitetsceller hele tiden har været solgt i ure og lommeregnerne i et tempo, som har betalt for videreudviklingen af den japanske solcelleteknologi. Industriministeriets Solskinsprogram støttede solcelleudvikling med beskedne beløb i perioden 1978-82, men ellers har udviklingen kørt i privat regie, men med velvillighed fra "energistyrelsen" NEDO (New Energy and Industrial Development Organization). Den japanske solcelleindustri har næsten udelukkende satset på amorfe celler, som blev udviklet af Y. Hamakawa ved Osaka Universitet i 1976, kun to år efter at skotterne Spear og LeComber havde opdaget de amorfe halvledere (se Spear og LeComber, 1975, og Sørensen, 1979). Allerede i 1980 havde firmaerne Fuji og Sanyo kommercielle amorfe solceller på markedet (se Figur 2a).

Som det vil fremgå af diskussionen i afsnit 3, er den japanske solcelleproduktion faldet i 1992, efter mange års vækst. Det skyldes dels problemer med holdbarheden af amorfe celler, som har vist sig efter nogle års brug: effektiviteten, som fra starten er lav, falder yderligere med ca. 20% som følge af omdannelser i det amorfe stof, som sker under påvirkning af sollys. Argumentet for de amorfe celler var og er, at de bør være langt billigere end celler baseret på krystallinsk materiale, men hvis effektiviteten er tilsvarende lavere, så bliver situationen, at prisen pr. watt produceret ved en given solindstråling er den samme for de to typer. Det er stort set situationen idag, og da krystallinske moduler fylder mindre for samme ydelse, så foretrækkes de af mange kunder. Hertil kommer en generel afmatning af markedet for solceller (undtagen i Europa), samt japanske produkters faldende konkurrencedygtighed som følge af yen'ens kursstigning de seneste år.

Disse forhold har fået den japanske regering til i 1993 at iværksætte et nyt solskinsprogram, som over de næste ca. 10 år forventes at tilføre nye energisystemer tilskud på efter sigende 600 billioner yen (ca. 38 billioner kroner). Dette blev annonceret af det japanske industriministeriums vicedirektør, C. Watanabe på 1993 solcellekonferencen i Nagoya, men skal nok tages med et gran salt, da japanere ikke altid er gode til at få sat det rigtige antal nuller efter tal i oversættelse til engelsk. Det må forventes, at en betydelig del af disse penge vil tilflyde solcelleforskning og -udvikling, omend i konkurrence med andre energiteknologier som vind og brændselsceller. På solcelleområdet vil programmets mål umiddelbart være at udvikle amorfe celler med en stabiliseret effektivitet på over 10% (den er idag 9% for de nyeste celler, mens mange anlæg i drift har udvist effektiviteter under 4%, cf. Figur 3), og til en pris under 170 yen pr. spids-watt (maksimal ydelse eller "spids-watt"). Prisen idag er 650 yen per spids-watt. NEDO har vurderet, at hvis en årlig produktionskala på 100 MW kunne opnås, ville prisen med dagens teknologi snarere være 330 yen/spids-watt for modul og 120 yen/spids-watt for resten af systemet, svarende til en energiproduktionspris på 40 yen/kWh, og målene for år 2000-2010 er 20-25 yen/kWh (Kaminosono, 1993). Imidlertid er prisen med de faktiske produktionsforhold idag ca. 6 gange større end disse referenceværdier.

De nye statslige tilskud til japansk solcelleindustri er en erkendelse af, at udviklingen er ved at gå i stå og må stimuleres, hvis de forventninger til solcelleteknologien, som er spredt i befolkningen, skal indfris. Kun ved kunstigt at skabe et marked kan industrien overtale til at tage nye produktionsteknologier i anvendelse, som igen er nødvendige for at priserne skal nå et fornuftigt leje. Den samme konklusion er forlængst gjort i Europa, og kun i USA synes der at være tvivl om, hvorvidt samfundsstøtte bør tages i anvendelse for at bringe teknologier som solceller i spil. Udtrykt i markedsøkonomiske termer er den europæiske og nu også japanske holdning, at der er så store miljømæssige gevinster forbundet med solceller relativt til dagens brændselsbaserede teknologier, at det er samfundsøkonomisk nødvendigt at korrigere den markedsfejl, at priserne ikke afspejler sådanne miljøfordele og ulemper.

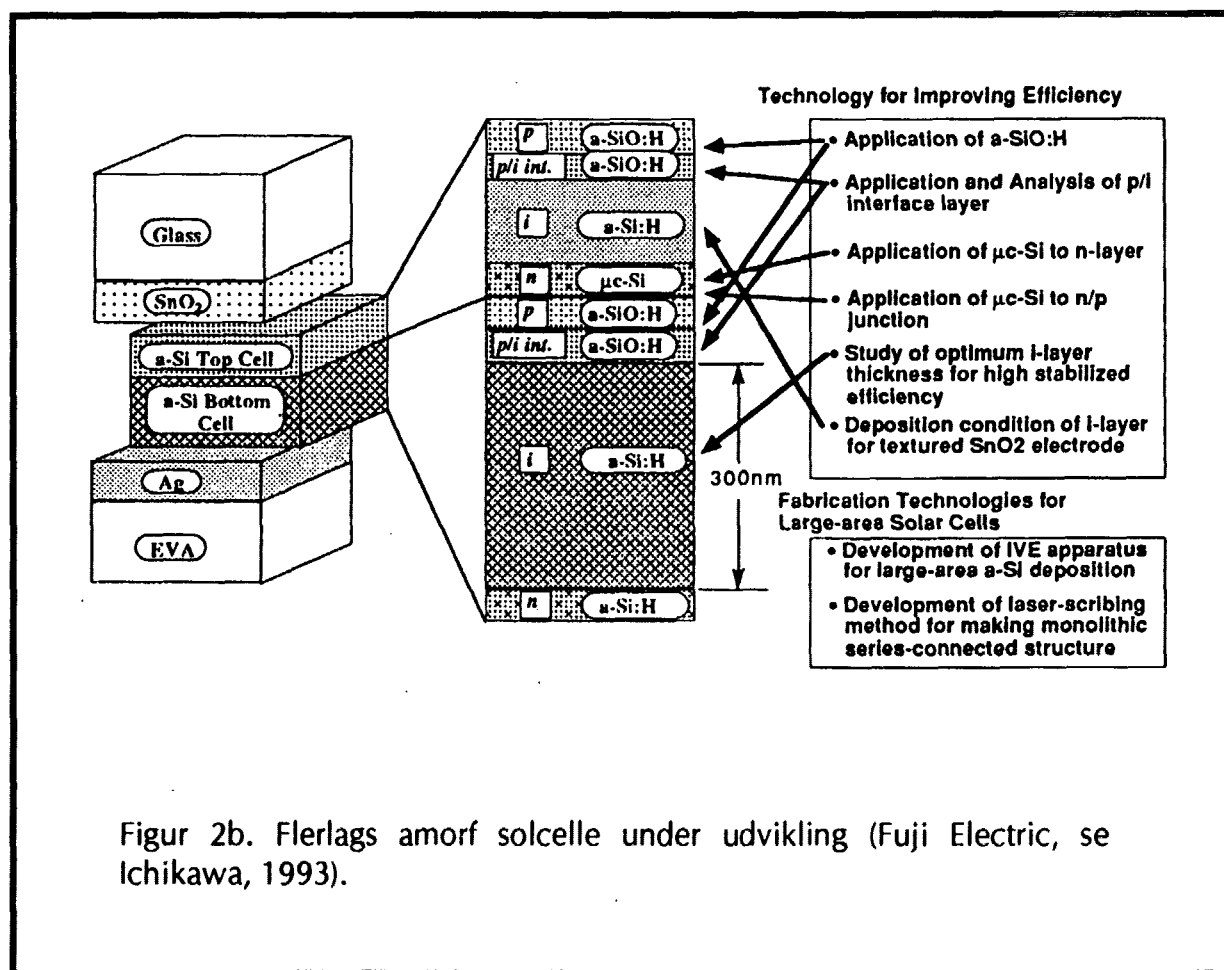
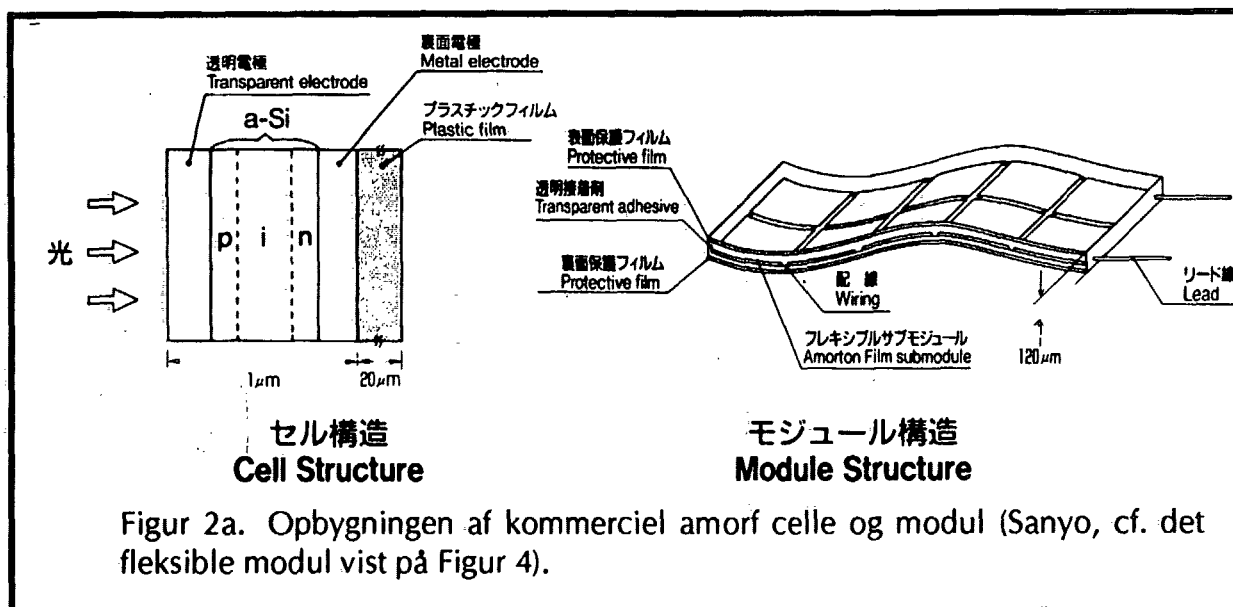
Den japanske energistyreelse ser mange fordele ved netop at satse på solceller. Dels er der tale om højteknologi af den type, som den japanske elektronikindustri er vant til at arbejde med, og dels har solindfaldet i Japan en god korrelation med elforbruget (Japan bruger nogenlunde ligeså meget energi til luftkøling som til opvarmning). "Solskinsprogrammet" har hele tiden været komplementeret af et "månelys-program", der satser på energi-effektivisering, som meget rigtigt beskrives som "at erstatte energi med teknologi".

### 2.1.1. Satsning på amorfe celler

Japan har fra starten fortrinsvist satset på amorfe celler (se Figur 2). Dette skyldes delvist et ønske om at skille sig ud fra de vestlige producenters krystallinske celler, men også den tankegang, at kun amorfe celler vil have mulighed for i fremtiden at blive så billige, at de kan bruges til almene elforsynings-formål. Indtil nu er denne filosofi ikke indfriet. De amorfe celler er idag mindst lige så dyre som krystallinske eller polykrystallinske celler, målt pr. spids-watt, og deres effektivitet er samtidig så lav (3-5% for hidtidige installationer), at der er alvorlige problemer med omkostningerne ved at skulle dække et større areal og at opsamle lave strømstyrker fra dette større areal. 58 % af den Japanske produktion af fotovoltaiske celler var i 1992 amorfe celler. Krystallinske celler indgår i mange systemer der sælges i Japan, men er oftest fremstillet i udlandet. 28% af den japanske produktion i 1992 var polykrystallinske celler.

Udover den hidtidige lave effektivitet har de amorfe celler udvist en betydelig mangel på stabilitet. Deres ydeevne er faldet med 20% eller mere efter få års brug, hvilket nu vides at skyldes molekyllære ændringer i cellestrukturen, induceret af sollyset selv. Idag er de amorfe silicium-cellers effektivitet direkte efter produktion 10-12%, og fabrikanterne udfører en fabriks-indkøring, der indebærer en degradering til et gennemsnit på højst 9% effektivitet. Afprøvninger viser, at dette effektivitets-niveau så til gengæld holder, i det mindste et par år (se Figur 7).

De japanske producenter er dog stadig overbevist om, at valget af amorf celler er det rigtige. Idag produceres disse som tynde film, hvor enkeltcellerne kan være meget store (se Figur 5), og hvor filmen kan limes på forskellige byggematerialer og indgå i næsten

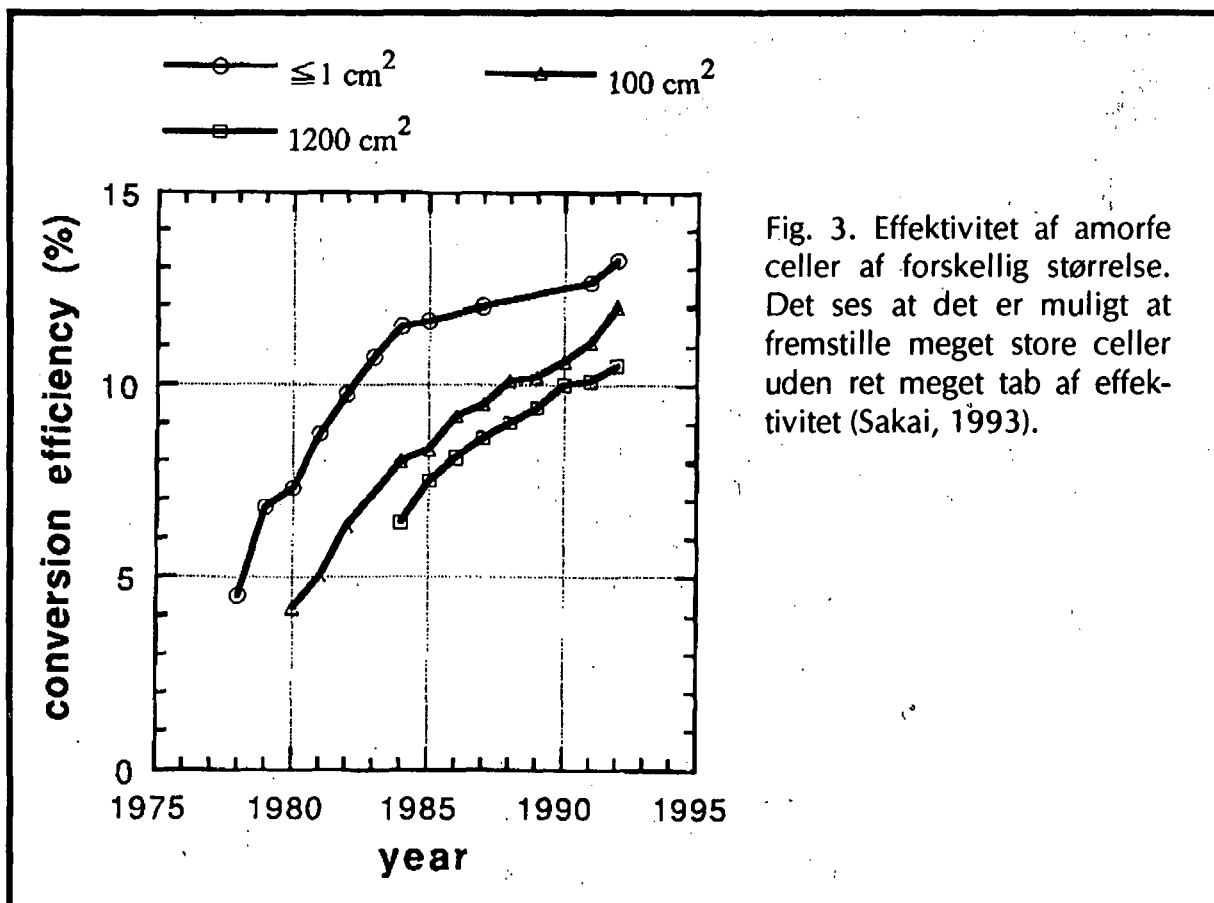


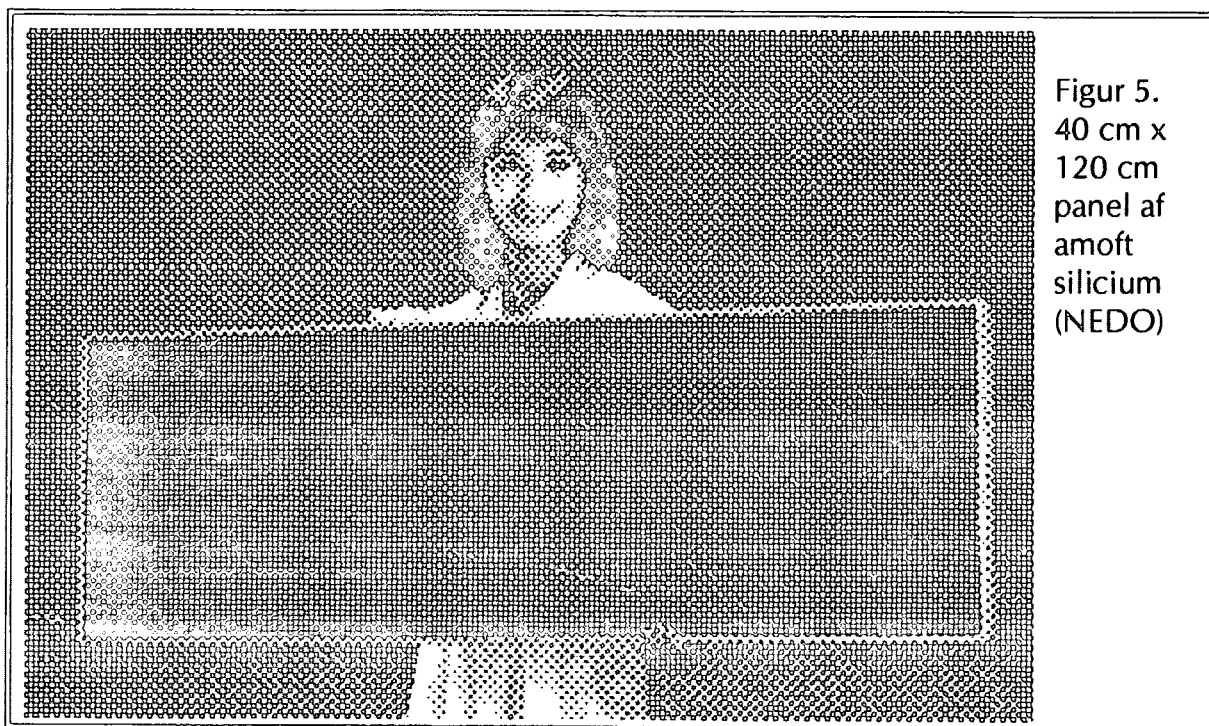
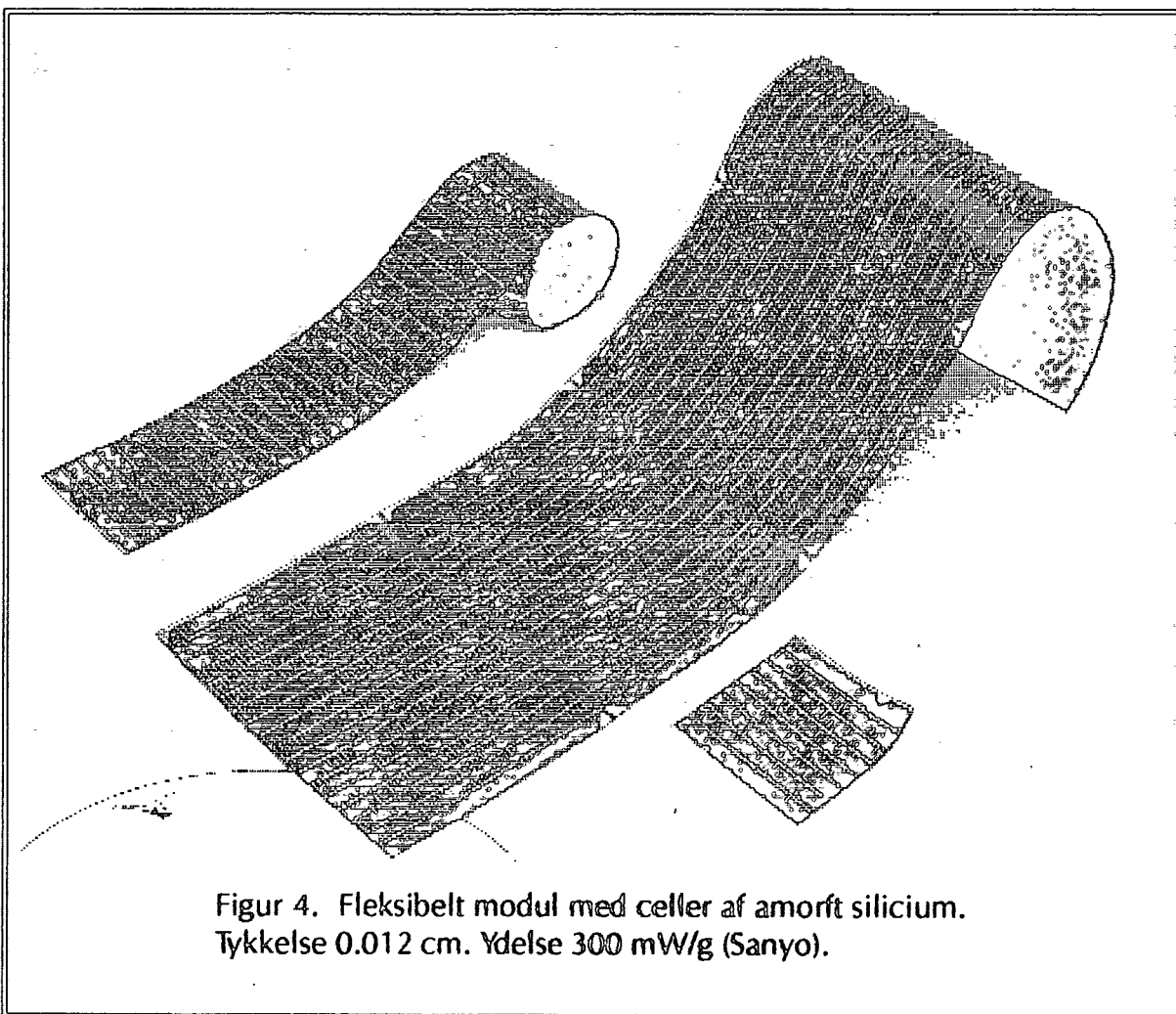
enhver slags bygnings-facader (se Figur 4). Modulerne kan også fungere som vinduer. Da solcellen ikke udnytter 100% af det indfaldende sollys, er der nemlig intet til hinder for, at overskydende lys kan transmitteres som dagslys (se Figur 6). Den understøttende plade for de fleksible moduler er selvsagt ikke længere af glas, men af en type plastic.

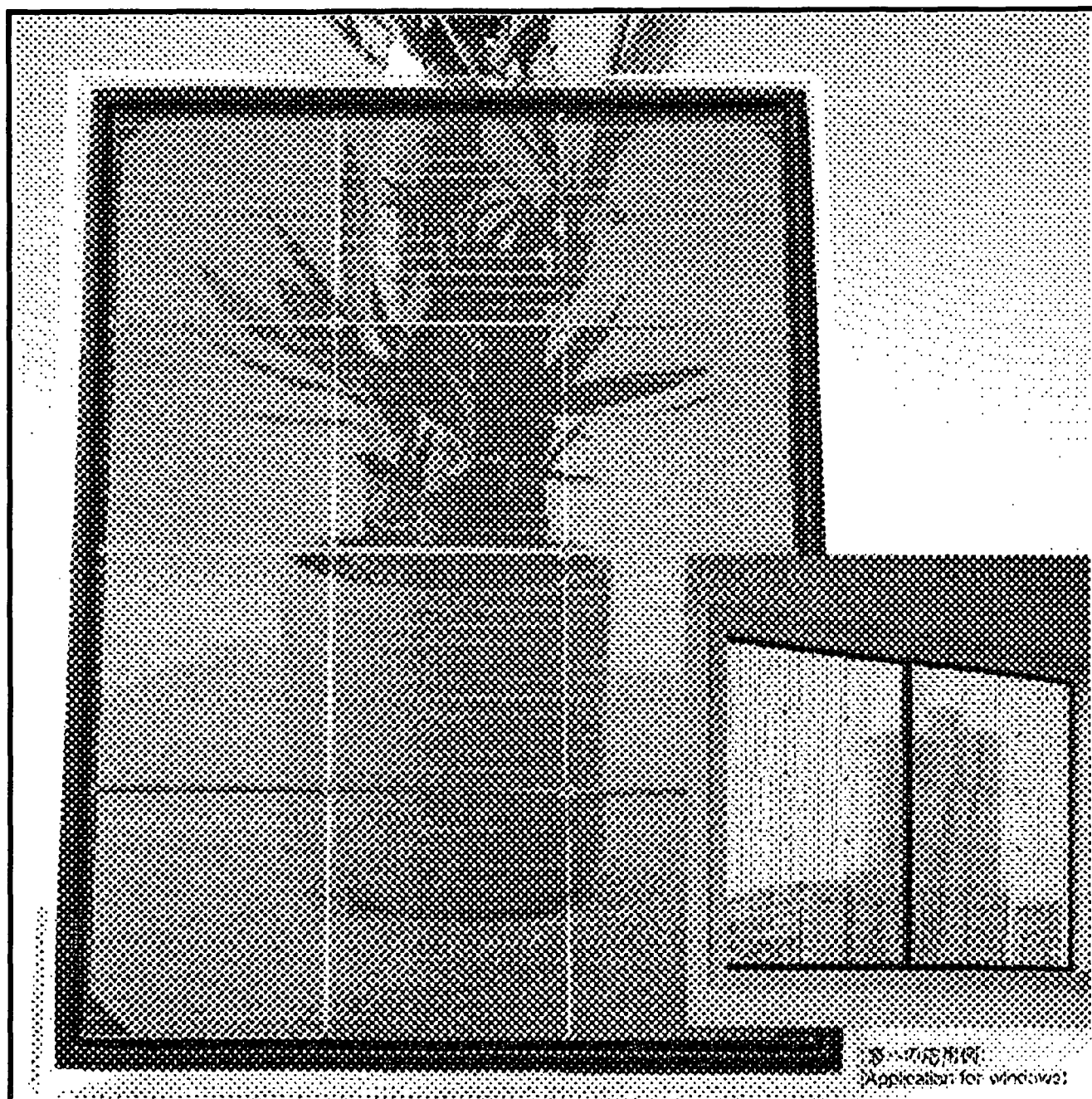
Amorfe celler har to vigtige fordele fremfor krystallinske celler: Effektiviteten falder ikke så stærkt ved voksende temperatur på kollektoroverfladen, og den falder ikke så stærkt ved lav solintensitet. Det første er vigtigt i solrige klimaer, mens det andet er vigtigt under forhold som i Danmark.

Det nye forskningsprogram Sunshine II, der køres i tæt samarbejde mellem industri og regering, har som målsætning amorfe celler med 10% effektivitet inden slutningen af dette århundrede, og 12% inden 2010. For at opnå disse effektivitetsmål, forventes det at de amorfe celler skal bestå af flere solcellelag, hvoraf amorft silicium er en, men andre kan være amorft kulstof eller amorfe legeringer. Opbygningen af en amorf solcelle er vist på Figur 2a, og et eksempel på en flerlagscelle på Figur 2b.

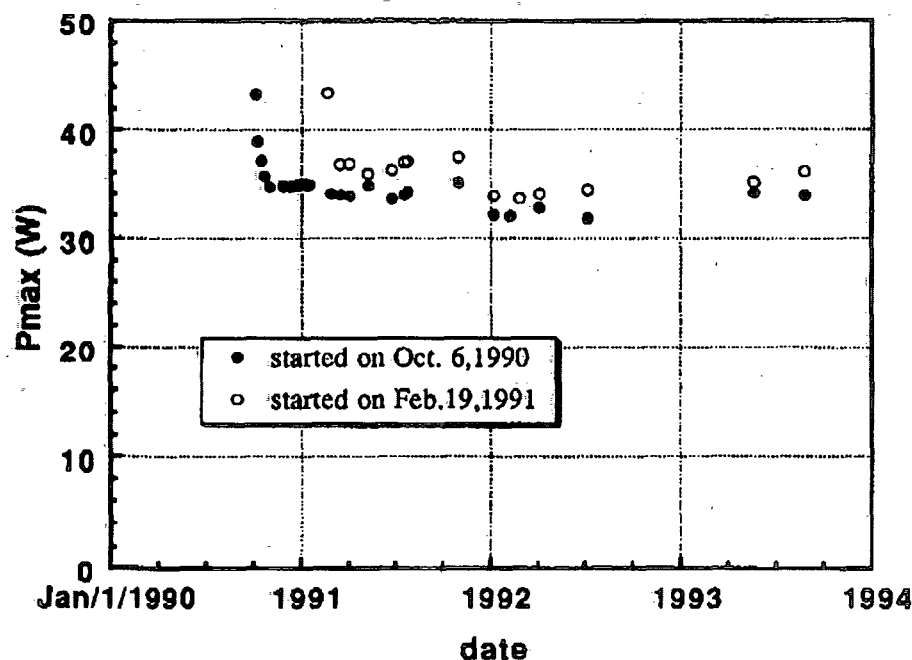
Hidtidig er de fleste amorfe celler baseret på silicium med et vist indhold af brint, a-Si:H. Brints rolle i en amorf celle er at passivere de åbne bindinger, som findes i overfladelaget af et amorft materiale. Effektiviteten af en amorf solcelle falder med stigende antal urenheder i det indre lag (se Figur 8), og betydelige anstrengelser har derfor været gjort for at finde metoder, som fører til så lille et antal urenheder som muligt. Ganguly



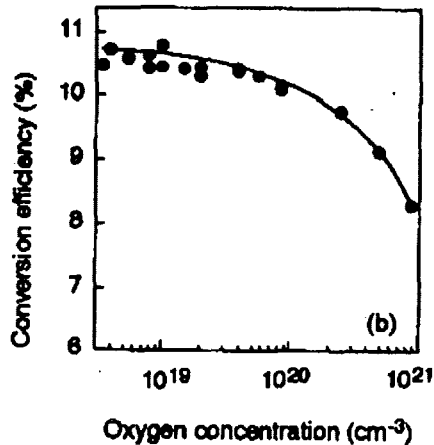




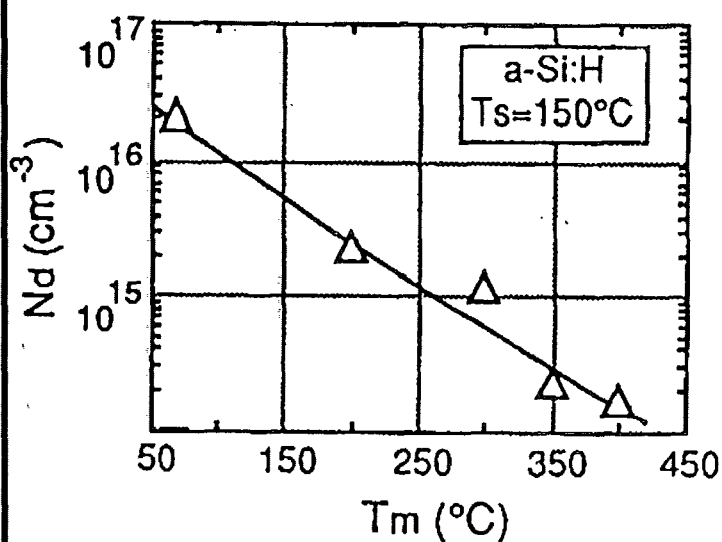
Figur 6. Gennemsigtigt solcelle-modul af amorft silicium materiale. Transmissionen af lys er 30%, og der sigtes på anvendelser som vinduer i kontorbygninger, hvor der tidligere ville være anvendt tonede ruder til nedsættelse af solindfald og den deraf følgende opvarmning af rummet bagved. Cellernes funktion er identisk med de fleksible modulers (Sanyo).



Figur 7. Indkøringsfænomenet ved kunstig degradering af amorf celle over en periode på 2 år (Sakai, 1993).



Figur 8. Effektiviteten af amorf silicium celle som funktion af mængden af ilt-urenheder. (Hishikawa et al., 1993)



Figur 9. En for nyligt identificeret vej til at opnå højere, stabile effektiviteter af amorf solceller, er muligheden for at kontrollere brint-indhold og antal defekter uafhængigt af hinanden. Figuren viser antal defekter som funktion af væksttemperatur, for  $150^{\circ}\text{C}$  substrat temperatur (Ganguly og Matsuda, 1993).

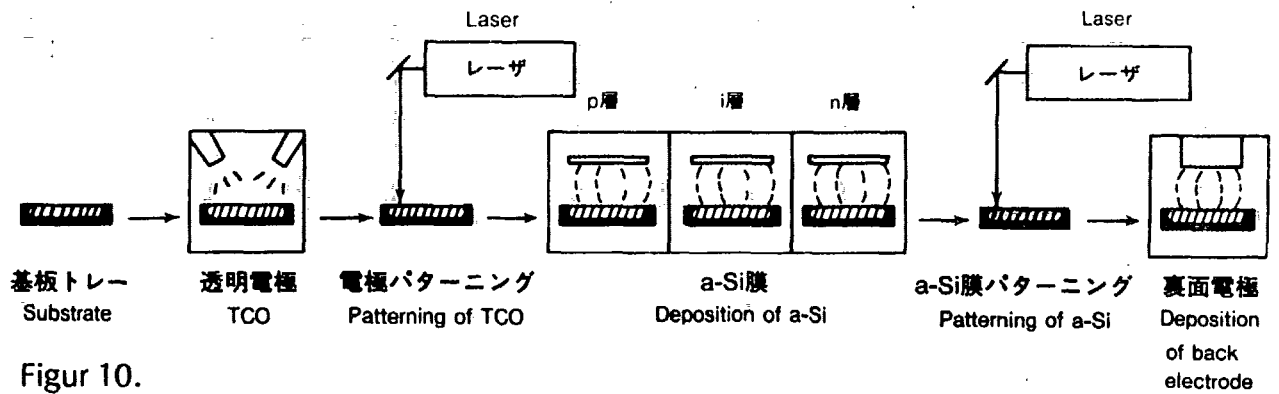
og Matsuda (1993) har undersøgt muligheden for ved en særlig deponeringsteknik at reducere antallet af defekter i i-laget (det indre lag) af en a-Si:H celle. De påviser, at dette kan lade sig gøre uafhængigt af brint-koncentrationen, ved i en plasma-forstærket kemisk damp-deponeringsproces at variere temperatur og deponeringsrate (Figur 9). Grunden hertil er, at brintkoncentrationen afhænger af temperaturen, mens der er et minimum af defekter for en passende valgt deponeringsrate.

Produktionsteknologien for dagens amorfe celler er vist på Figur. 10. Figur 11 viser til sammenligning produktionsgangen for fremstilling af polykrystallinske celler. Fremtidens produktion af amorfe celler er diskuteret af Ichikawa (1993). Han finder at en effektiv produktionsgang for flerlagsceller af den type, som Fuji er ved at udvikle (se ovenfor) vil involvere 1) Laser udskæring af elektrodegange i gennemsigtige elektroder af f.eks. tindioxid, pådampet glas eller fleksibelt basis-lag, 2) afvaskning af elektroder for at fjerne stænk og urenheder på overfladen, 3) Deponering af a-Si lag ved hjælp af glødeudladnings-apparat til damp-deponering, 4) laser indgraving af netværksmønster i a-Si laget, 5) Pådampning af metal elektrode (typisk sølv) ved sputtering process, 6) laser indgraving af netværksmønster i metal elektrode, til forberedelse af serieforbindelse mellem celler, og 7) indkapsling i plastic eller lignende overfladelag.

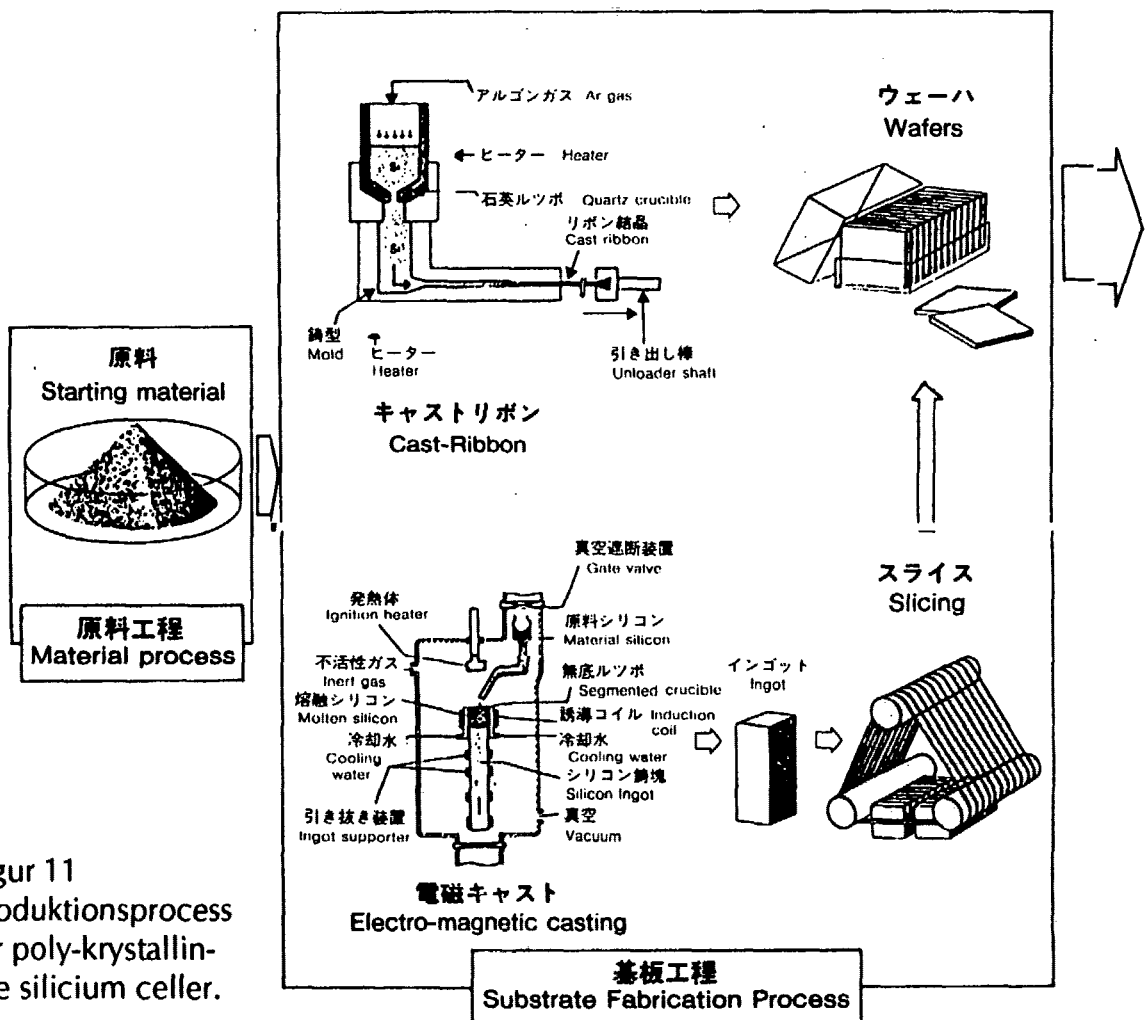
En prøve-produktion af ca. 400 celler som den i Figur 2b viste har udvist en gennemsnitlig effektivitet på næsten 10% før degradering, for celler af størrelsen 30 cm x 40 cm. Standardafvigelsen på effektiviteten var kun 2% af middelværdien. Det effektive areal af cellerne var 96% af det fysiske areal. Med anti-refleksions-lag på overfladen steg effektiviteten til godt 10%. Efter kunstig degradering i 310 timer ved 1.25 gange standard-sollyset ved vinkelret indfald på en klar dag, og ved en modul-temperatur på 48°C, fandtes effektiviteten at være 8.4%. Hvad den vil være efter 10 eller 20 års brug kan ikke siges på grundlag af de gjorte forsøg.

Nye højeffektive celler afprøves og demonstreres af de fleste fabrikker ved at deltage i udstillinger, bilvæddeløb for soldrevne biler, båd-konkurrencer osv. Figur 12-14 viser eksempler på japanske bidrag til denne genre.

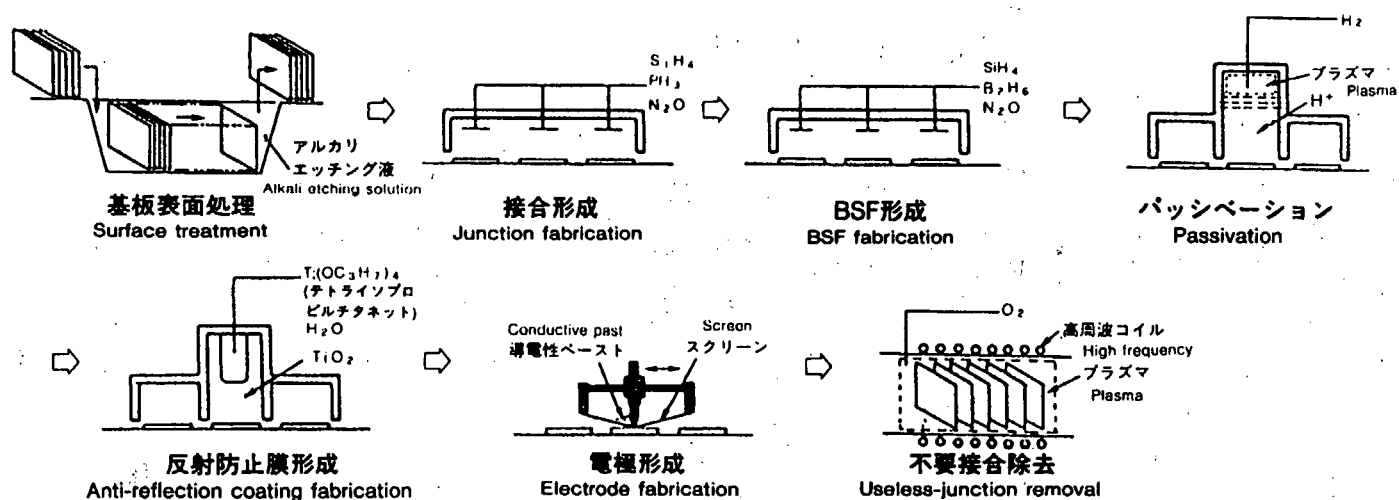
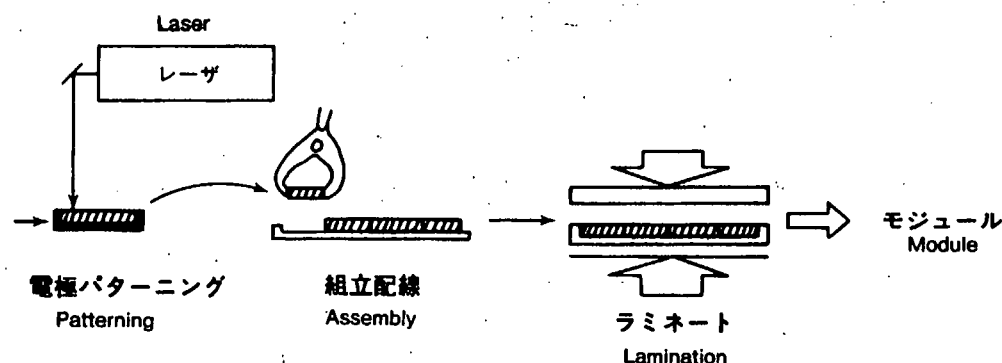




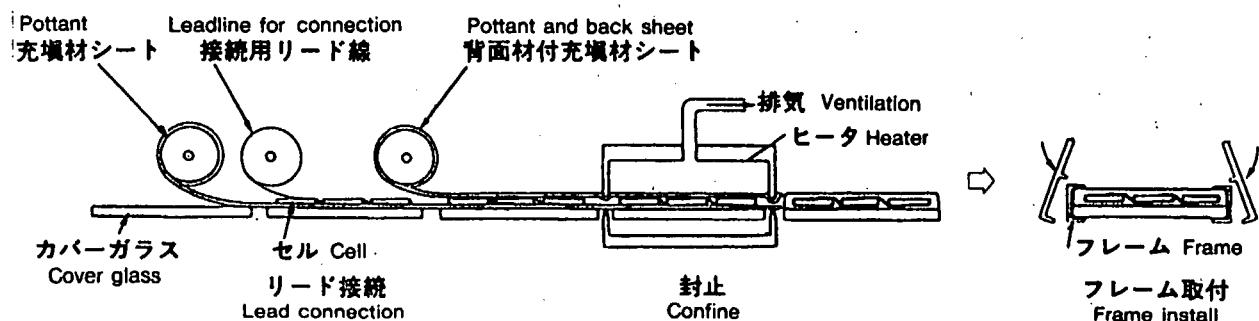
Figur 10.  
Produktionsproceß for amorphe silicium celler.



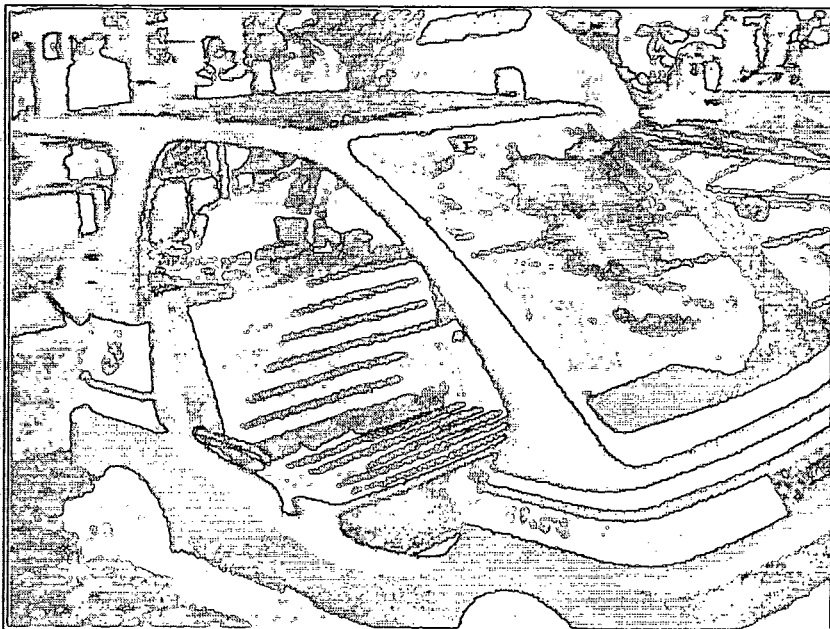
Figur 11  
Produktionsproceß for poly-krystallin-ske silicium celler.



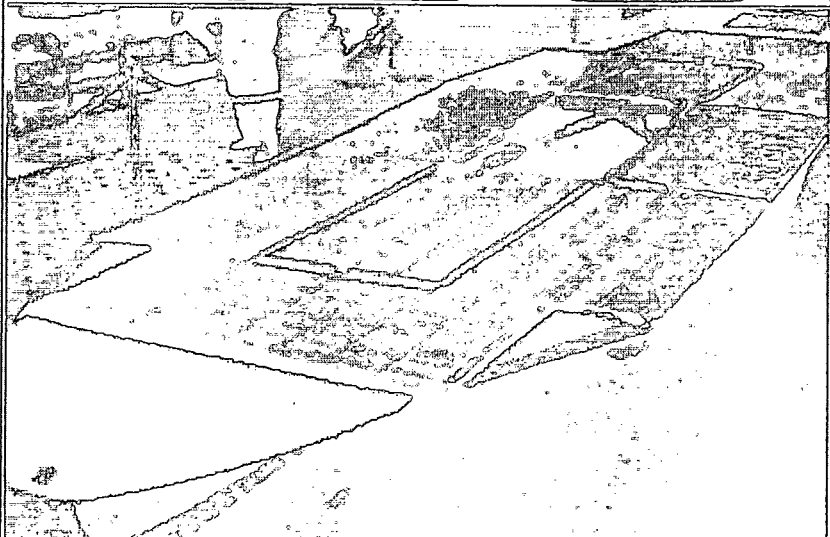
### セル化工程 Cell Fabrication Process



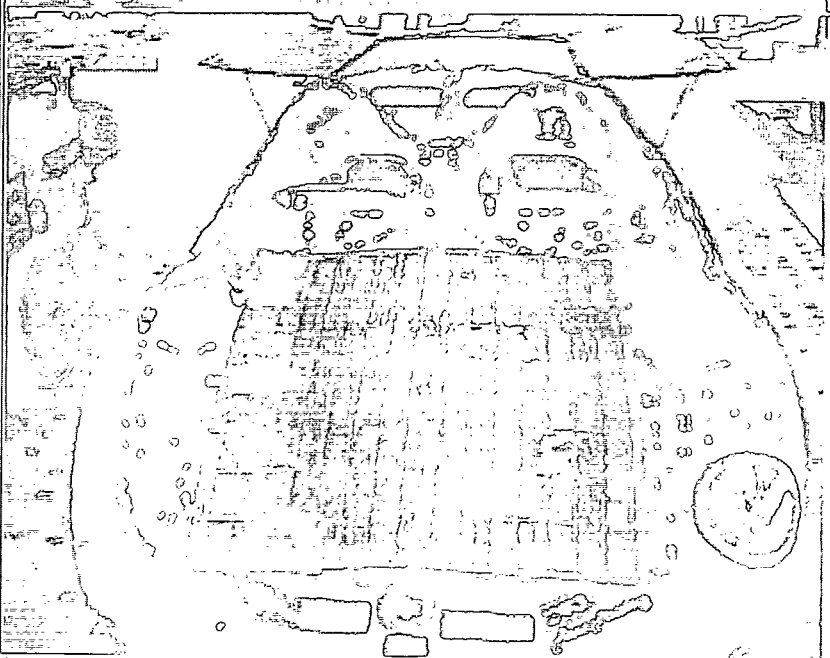
### パネル組立工程 Panel Assembly Process



Figur 12  
Soldreven bybil.



Figur 13  
Soldreven konkurrence-  
båd.



Figur 14  
Soldreven pralebil.

### 2.1.2. Rokko Island simulering af islanding effekten.

Rokko Island test faciliteten er et 500 kW solcelleanlæg etableret 1986 af den japanske energistyreelse NEDO, de japanske elværkers forskningsinstitut (CRIEPI) og elskabet Kansai Electric Power Co., der står for driften af anlægget. Faciliteten er opbygget som et realistisk eksempel på integrering af solcelleanlæg i et el-distributionssystem. Det består af en 6.6 kV substation med en række blokke af anlæg koblet til sig med de for Japan typiske el-mast-monterede transformatorer. Solcellerne er dels anbragt på hustage, med simuleret el-forbrug i hver bygning, dels i en mere central 220 kW konfiguration, der er tilføjet systemet i 1990 (Figur 15 og 16). Denne opbygning tillader afprøvning ikke blot af en række typiske driftssituationer, men også af forskellige fejlsituationer. Der er i systemet indbygget en række "fejlgeneratorer", som kan simulere de sædvanligste former for ledningsfejl og afbrydelser (kortslutning, fejl i jordforbindelse og lynafledere, osv.). Det er herved muligt systematisk at undersøge systemets funktion og dermed afsløre særlige hensyn, der bør tages ved elforsyningssystemer som omfatter anvendelse af solceller.

Således var forskerholdet ved Rokko Island faciliteten i 1990 de første, som påviste islanding fænomenet, altså at et solcellebaseret delnet kan fortsætte at fungere normalt i tidsrum af minutter eller mere, selvom resten af elsystemet er faldet bort (se beskrivelsen i Statusrapport 1, side 30). Problemet herved er, at der uventet er strøm på nettet, i tilfælde hvor personale der sendes ud for at udbedre skader (det ikke-PV baserede net var jo antaget at være nede) tror at der ikke er spænding på ledningerne. Fænomenet forekommer kun, når der i et lokalområde omkring solcelleproduktionen er en passende blanding af elforbrugende apparater (inkl. reaktive forbrugere såsom motorer). Et område med forbrug lig solcelleproduktionen kan da isoleret være i ligevægt og fortsætte produktion og forbrug uden at påvirke det omgivende net (heraf ø-betegnelsen). Systematiske test har vist, at produktion og forbrug ikke behøver at være præcist identiske, for at islanding fænomenet kan opstå, men at det sker for forbrug i intervallet 80% til 120% af solcelleproduktionen (A. Kitamura, personlig kommunikation, se også Fig. 17).

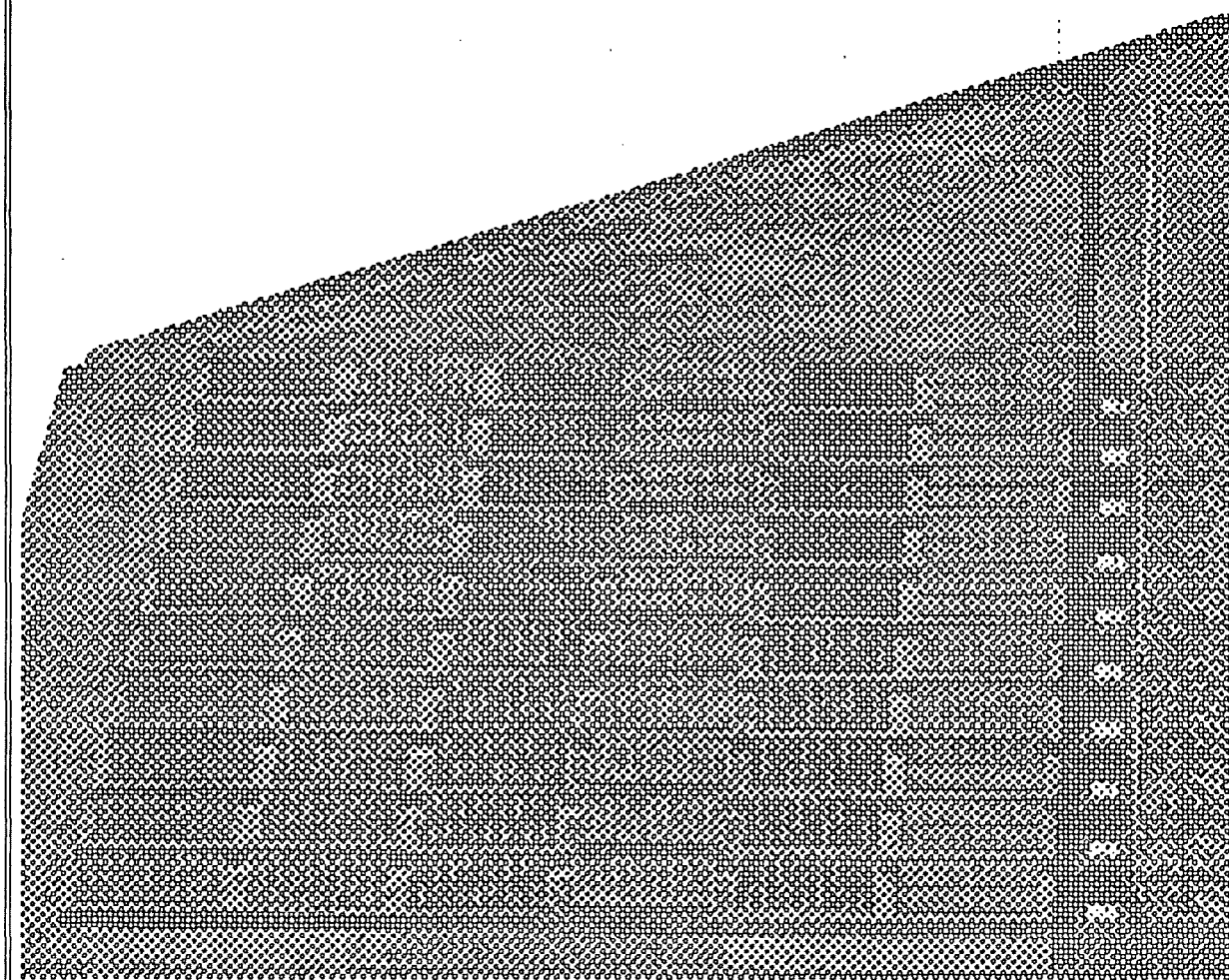
En række undersøgelser ved Rokko Island har godtgjort, at islanding fænomenet skyldes etablering af et resonanskredsløb med en frekvens lig med den, nettet havde før det blev afbrudt. (Kitamura et al., 1993). Dette giver også anledning til at identificere to grundlæggende forskellige metoder til at afhjælpe problemet. Den ene type er lokal, og kan f.eks. bestå i, at solcellernes vekselrettere udstyres med en mikroprocessor, der med mellemrum genererer en spændingsekskursion og derefter måler hvordan denne dør ud. Der måles på såvel spænding som strøm, og der ses normalt en oscillation der hurtigt dør ud. I resonanssituationen fortsætter svingningerne imidlertid, som tegn på, at islanding måske er indtrådt. En anden lokale metode er at måle overtonespektret i spændingen, og specielt at se på unormalt store udsving i den 3. harmoniske frekvens (Matsuda et al., 1993).

Den anden type af metoder kan beskrives som central (dvs. afhænger af elværket), og

Figur 15.  
Rokko Island PV Prøvestation.

Photovoltaic  
arrays

Simulated  
distribution  
lines



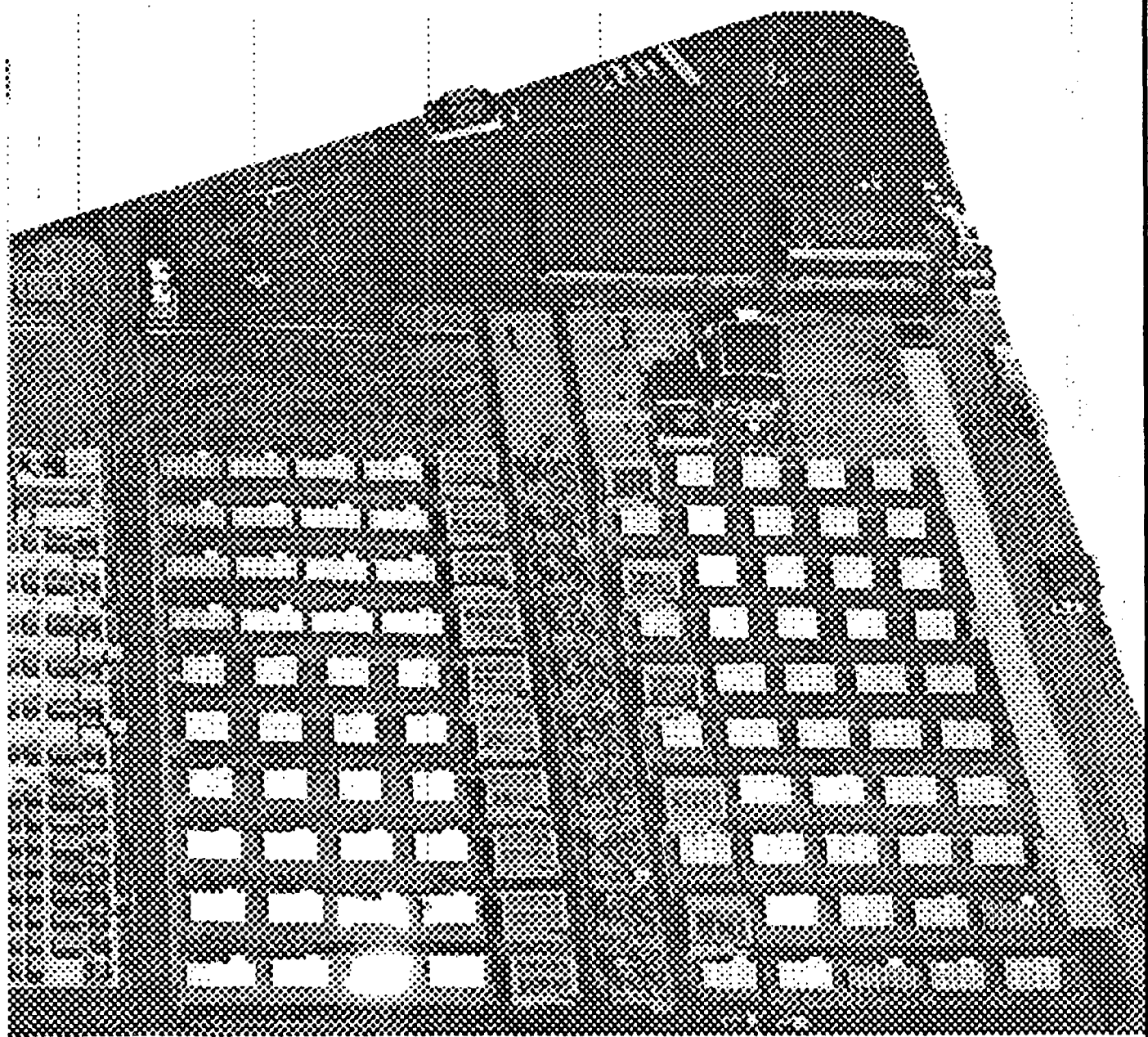
kan f.eks. bestå i, at dersom nettet falder bort, så indkobles en kondensator af passende størrelse (i forhold til solcelleanlæggenes samlede effekt). Rokko Island forsøgene har vist, at tilstedeværelsen af en sådan impedans dæmper islanding effekten (se Figur 17 og 18), så der efter ca. et sekund ikke længere er strøm på nettet. Lokale og centrale metoder kan kombineres, men teoretiske overvejelser antyder, at den foreslåede lokale løsning med pålagte ekskursioner vil give stødigt mindre gennemskuelige resultater, jo

Fuel cells

Wind turbine

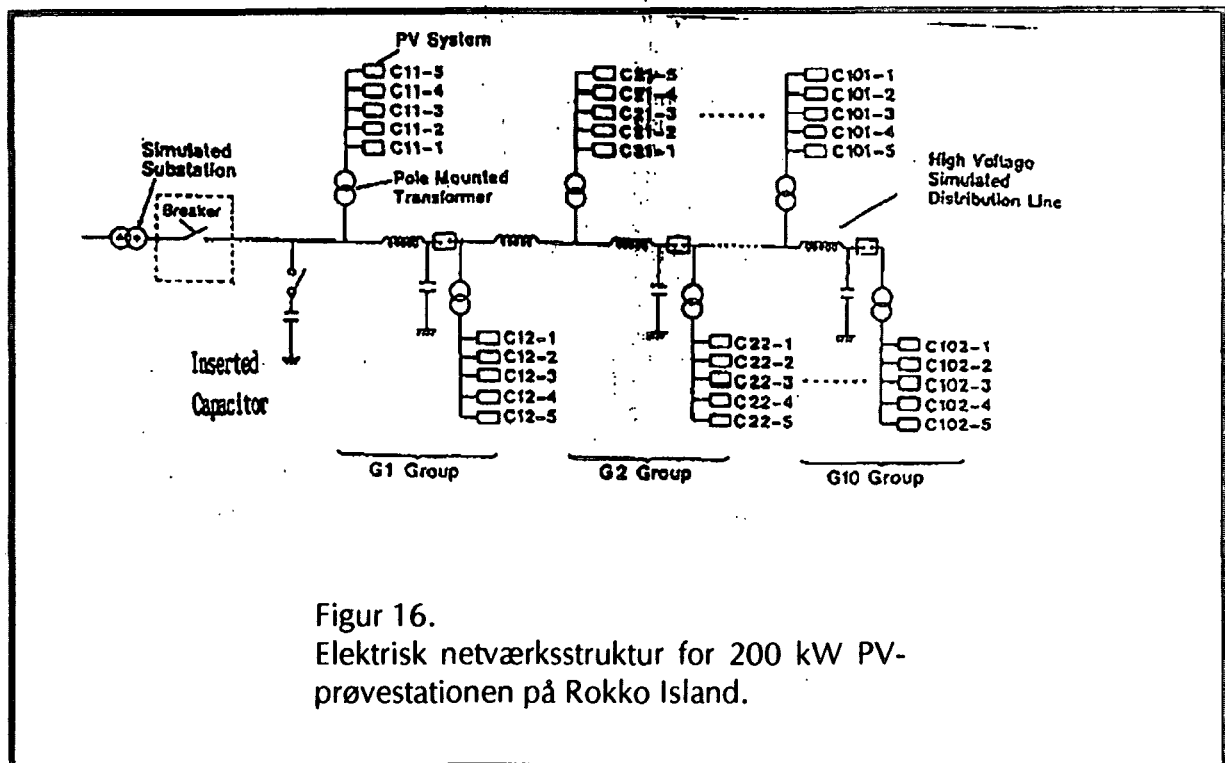
Photovoltaic  
arraysSimulated  
distribution  
lines

Wind turbine

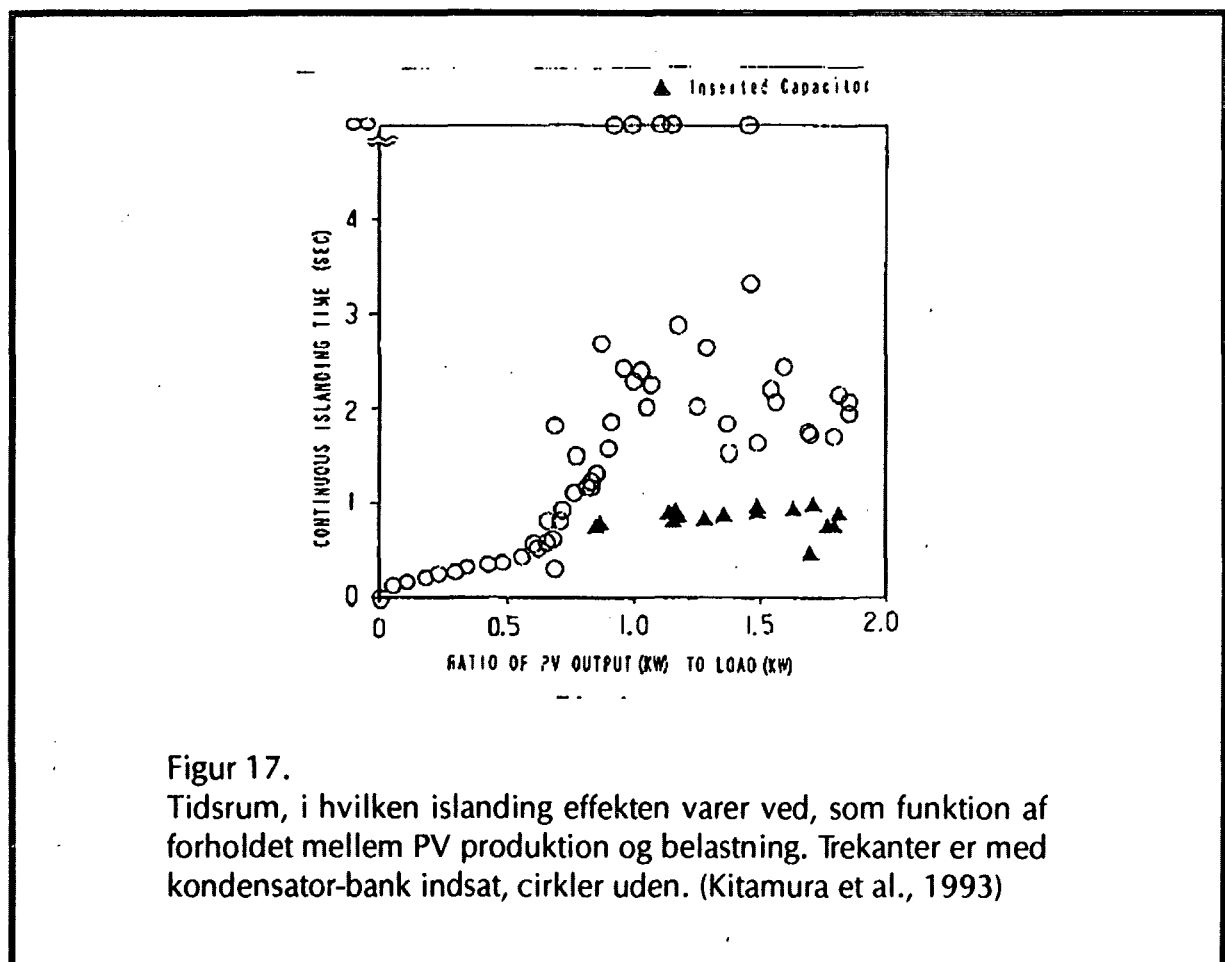
Photovoltaic  
arrays

flere systemer (invertere) der er tilsluttet det samme område (Matsuda et al., 1993).

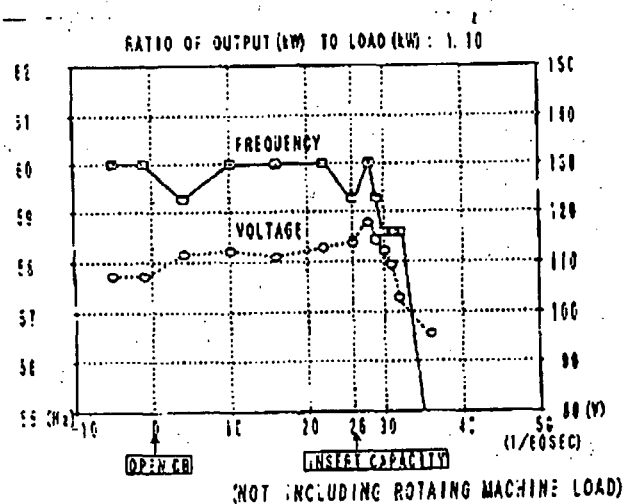
Islanding fænomenet er konstateret i en række andre lande, men netop opbygningen af installationen på Rokko Island i Japan har gjort denne facilitet ideel for en nærmere undersøgelse af både årsager og afhjælpnings-muligheder. Iøvrigt er japanerne interesseret i at udenlandske elsystem-forskere besøger Rokko Island og deltager i arbejdet i kortere



Figur 16.  
Elektrisk netværksstruktur for 200 kW PV-  
prøvestationen på Rokko Island.



Figur 17.  
Tidsrum, i hvilken islanding effekten varer ved, som funktion af  
forholdet mellem PV produktion og belastning. Trekanter er med  
kondensator-bank indsat, cirkler uden. (Kitamura et al., 1993)



Figur 18.

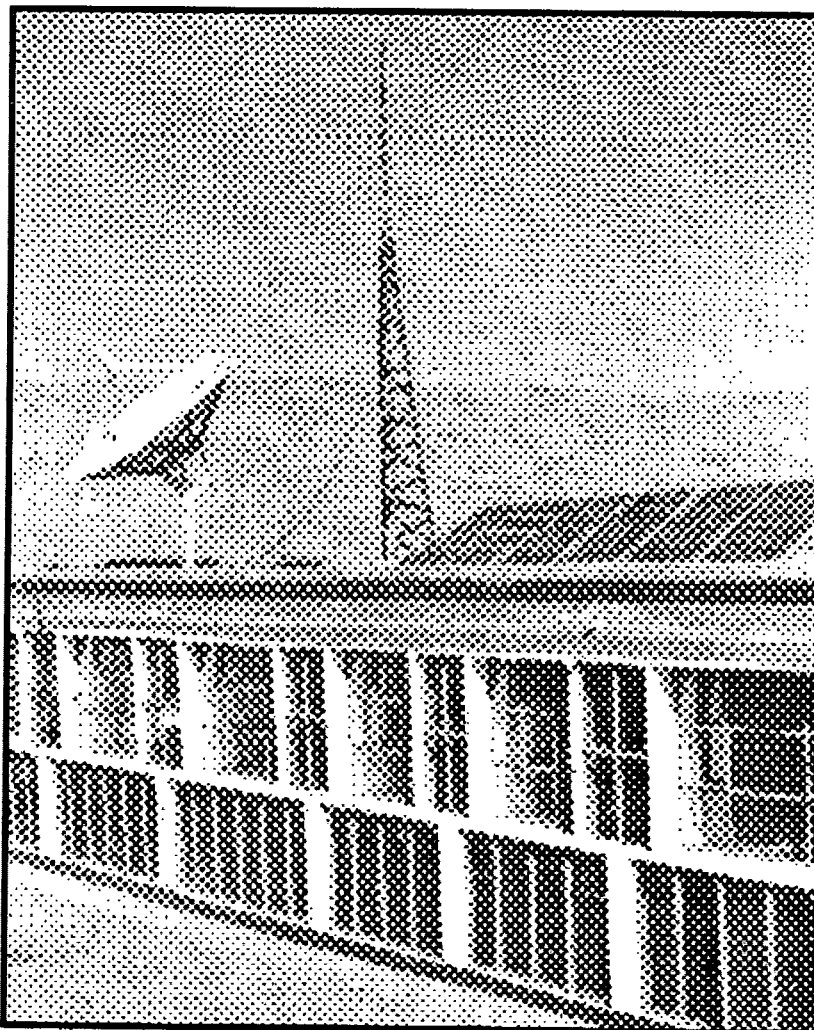
Spændings- og frekvensforløb efter islanding (tid 0), med indsættelse af kondensator-bank til tiden 26/60 sekund. (Kitamura et al., 1993).

eller længere tid, så faciliteten er åben for f.eks. europæiske forskere, som dog selv skal sørge for finansiering af rejse og ophold.



## 2.2. Kina

Kina har siden 1986 haft 5 virksomheder, der producerer solceller, baseret næsten udelukkende på krystallinsk teknologi. Den samlede årlige produktionskapacitet er 4.5 MW. Imidlertid er der ingen systematisk produktion af systemer eller elektriske komponenter tilpasset solcelleteknologien. En sådan søges stabled på benene i Lanchou, på initiativ af Mao Yinqiu, som arbejder ved et etableret forskningslaboratoriet for vedvarende energiforskning, Gansu Natural Energy Research Institute. Der satses på landsbyenergianlæg til ca. 100 familier, som hver skønnes at bruge 20W i gennemsnit (et vanskeligt skøn, idet forbruget går op når der etableres regulær energiforsyning, ihvertfald hvis prisen på energi er overkommelig). Solcelleanlæggene subsidieres, således at hver familie betaler 40-50% mere, end de før betalte for kerosin, stearinlys og små-batterier til radioer mv. Dette er skønnet at være den rette pris for på den ene side at hjælpe landsbybeboerne igang, og på den anden side ikke at vænne dem til for billig energi (Mao et al., 1993). Prisen på 10 yuan pr. måned pr. familie (ca. 8 kr/måned) er halvdelen af den danske elpris og 40 gange lavere end produktionsomkostningerne ved solcelleanlæggene.



Figur 19.  
Fotovoltaisk anlæg leverer strøm til en satellit tracking station, ved Menshi i Tibet (fra Sixth Research Institute, ved Tibet Solar Energy Research Institute).



Figur 20.  
2 kW fotovoltaisk installation i Lhasa, Tibet. (fra Sixth  
Research Institute, Tibet Solar Energy Research Institute).

Der findes demonstrationsfaciliteter og telekommunikationsapplikationer med solceller over hele Kina, fra Tibet til Beijing (se Figur 19 og 20). En meget stor del af de kinesiske solenergi-forskere er kvinder, fra lederen af Beijings solenergiinstitut, Lu Weide, til Mao Yinqi i Gansu. Indenfor atomenergiforskningen ses derimod kun mænd.

### 2.3. Korea

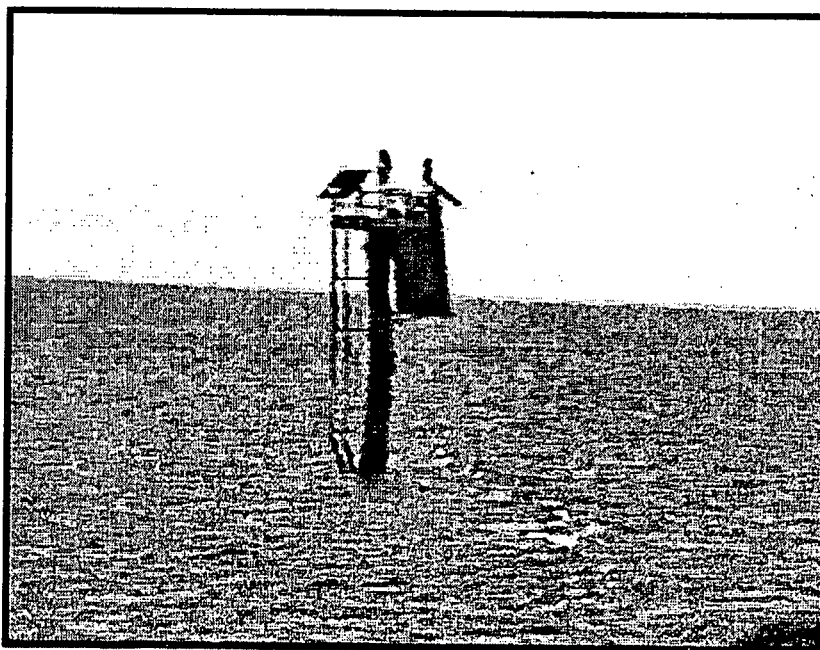
Korea har de seneste år demonstreret en stigende miljøbevisthed, som bl.a. har givet sig udtryk ved en kraftig forsknings- og udviklingsindsats indenfor vedvarende energi. Et demonstrations- og prøvecenter er etableret i Taejon, i forbindelse med Korea Institute for Energy Research. Målet for så vidt angår solceller er at etablere en produktion der kan konkurrere med den japanske, og som støttes af et garanteret hjemmemarked, baseret på energiforsyning til de mange øer og småsamfund i Korea uden centraliseret eldistribution (Kim, 1993).

På prøvestationen findes idag ca. 40 m<sup>2</sup> solceller, som dels er forbundet til et air-conditioning anlæg, dels nettilsluttet. Et antal koreanske øer har modtaget demonstrationsanlæg, og den koreanske industri overvejer at gå stærkere ind i fotovoltaiske produkter.

## 2.4. Australien

Samarbejdet med Centre for Photovoltaic Devices and Systems er fortsat i 1993, med gensidige besøg og fælles forskningsprojekter, som vil blive beskrevet nedenfor.

Australiens satsning på solceller skyldes ikke mindst de mange isolerede småsamfund langt fra eldistributionsnet, og andre anvendelser i mere eller mindre øde områder. Eksempler er TV-repeater stationer, belysning af vejskilte, afmærkningsbøjer til havs (se Figur 21), og telefonbokse, der fx. findes flere steder i den centrale Australske ørken, med solceller på taget og satellit-transmission af signalet. Derudover er der et antal anlæg til strømforsyning af isolerede bebyggelser, hvor solceller kombineres med vind eller diesel anlæg. Jeg besøgte i nærheden af den lille by Nimbin (der minder en del om Christiania) i det nordlige New South Wales The Rainbow Power Company, der dels har en egentlig fabrikation af anlæg til brug væk fra nettet, dels et udsalgssted, der er på størrelse med et velvoksnet dansk supermarked og på hylderne har rækker af fotovoltaiske moduler, vekselrettere, kontrolenheder og meget mere. Nogle produkter fremstiller Rainbow Power Company selv, men en lang række alternative australske og importerede produkter tilbydes. Virksomheden er stort set selvforsynende med elektricitet, takket være et solcelleanlæg på taget



Figur 21.

Ved revet udenfor Queensland's kyst er stort set alle bøjer drevet af solceller. Den viste er monteret udenfor Cairns.

og en nærliggende vindmølle (se Figur 22 og 23). Virksomheden sælger svarende til vel over halvdelen af sin omsætning udenfor Australien (Indonesien, Malaysia og de mindre Stillehavsøer), og indenlandske kunder kommer fra et meget stort område til butikken for at bese varerne og diskutere løsninger med det teknisk uddannede personale.

Samtidig med at Australien har ideelle solindstrålingsforhold til fotovoltaisk udnyttelse, og et stort marked for stand-alone systemer, er der også en række barrierer som forhindrer en



Figur 22.

Rainbow Power Company, Nimbin, NSW, er forsynet med 3 kW Solarex polykrystallinske Silicium solceller monteret for tracking langs en hældende akse. Reguleringen sker manuelt, typisk med tre forskellige positioner i løbet af en dag.

Figur 23.

Det ovenfor viste anlæg plus en 5 kW vindmølle leverer ca. 90% af bygningens strømforbrug (de sidste pct. leveres af et diesel anlæg).

Kraftudjævningen sker ved hjælp af det viste bly-batteri lager, med en kapacitet på ca. tre dages forbrug.

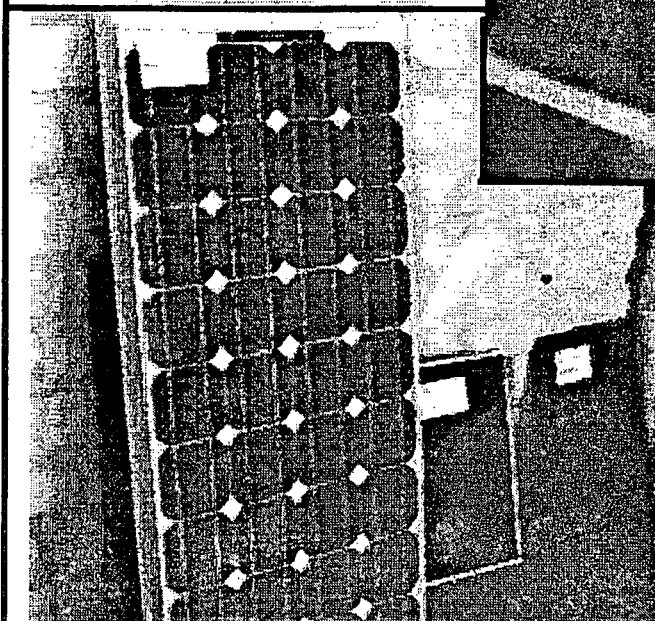


hurtig vækst i markedsindtrængningen. Dels er elselskaberne ret konservative og har hidtil modsat sig at gå ind i slutbruger-løsninger (som elværkerne i Californien har gjort i mange år). Elselskaberne tilbyder på fordelagtige vilkår at udvide nettilslutningen til områder, hvor sol- og vindbaserede løsninger ville have været økonomisk fordelagtige allerede i dag. Dels er alternative energiløsninger ikke understøttet af et politisk ønske om industriel fornyelse og eksportudvikling. I den politiske process lyttes næsten kun til Australiens kulproducenter, som udgør en dominerende lobby.

Centre for PV Devices and Systems ved universitetet i New South Wales (UNSW) har idag et universitetslaboratorium, en fabriksmæssig pilotproduktion af celler med høj effektivitet,

Figur 24.

Rainbow Power sælger en række forskellige invertere, med variationer i kvalitet og pris. Øvrige produkter omfatter mini-vandkraftværker, pumper og batterier i alle størrelser.



Figur 25.

BP Solar's standard Silicium en-krystal modul til A\$ 735, sammen med mindre amorfe celler til 135 A\$ for 4W maksimum effekt.

Figur 26.

Solcelledreven stue-ventilator.



samt en demonstrations og forskningsbygning under opførelse. Salget af højeffektive krystallinske silicium-celler til f.eks. solbiler og både har financieret de nye bygninger og over halvdelen af centrets driftsbudget. Prisen på et 110cm x 29cm modul vokser stejlt med effektiviteten:

17% effektivitet,	maks. elproduktion	50.7W,	pris	4000 US \$
18% -	-	53.7W	-	8000 US \$
19% -	-	56.6W	-	24000 US \$
20% -	-	60.0W	-	60000 US \$

Disse priser er gældende til 31. december 1993, og der ydes 10% rabat ved køb af over 100 moduler!

### 2.4.1. Livscyklus-analyser

Gennemførelsen af en livscyklus-analyse for fotovoltaiske systemer må anses for en vigtig del af bestræbelserne på at vurdere denne løsning i relation til andre energiløsninger, på et så retvist grundlag som muligt. Analysen foretages i samarbejde med Dr. Muriel Watt ved Centre for PV Devices and Systems, UNSW, med støtte fra en PhD. student, Ian McGill. De indtil nu opnåede resultater er rapporteret i en række skrifter og ved kongresser (Sørensen, 1993, 1993c, 1993d; Sørensen og Watt, 1993; Watt og Sørensen, 1993), og fremgår af artiklen vedhæftet som Appendix 2. Problemstillingen er desuden gennemgået i udvidet form i afsnit 1.1 ovenfor. Her skal blot tilføjes et par bemærkninger om arbejdsprogrammet.

Gangen i en livs-cyklus analyse er først at identificere alle skridt i teknologiens livsforløb, og dernæst at opgøre direkte og indirekte helbreds-, miljø- og samfundspåvirkninger fra hvert skridt. I nogle tilfælde vil fabrikationshemmeligheder gøre det umuligt at nå en detaljeret beskrivelse af visse proces-skridt, og for identificerede proces-skridt er det ikke altid muligt at finde alle relevante opgørelser af påvirkninger. Der anvendes da istedet generelle data for den pågældende industritype, eller specifikke data for en nært beslægtet proces. Nogle oplysninger tillader ikke kvantitativ opgørelse.

Vi har benyttet den fremgangsmåde ved analysen af krystallinske silicium-celler, at se på dels et industriforetagende (BP-Solar), hvor vi har kontakter, og dels en semi-industriel pilotproduktionslinje, som Centret i Sydney bruger til fabrikation af celler til solbil-væddeløb mv. Denne produktion sker i regie af universitets erhvervskontor (Unisearch) og er desværre heller ikke fri for en del hemmelighedskræmmeri, begrundet i de specielle højeffektivitetscellers særlige markedssituation. Overordnet må det siges at være vanskeliggere end forudset at fremskaffe de ønskede data, og det skønt det synes uomtvisteligt, at offentliggørelse af resultaterne af en livs-cyklus analyse kun kan hjælpe til at fremme markedsindtrængningen af solcelleteknologien.



### 2.4.2. Optimering

Nye ideer til optimering af solcelledesign kommer ofte via intuition blandt de eksperimentelle forskere, der har arbejdet længe med en bestemt type celler. Imidlertid er strukturen af cellerne blevet mere og mere kompliceret, med forsænkede kontaktsteder og differentieret doping, og i nogle tilfælde med flere lag af forskelligt halvledermateriale ovenpå hinanden, plus de sædvanlige antirefleksions- og beskyttelseslag. Som følge af denne udvikling sker en større og større del af optimeringsarbejdet nu med computermodeller af cellernes funktion, og ikke i laboratoriet.

I en årrække har de anvendte modeller været én-dimensionale, dvs at modelleringen, typisk en finite-element analyse, sker langs en lysstråles gang gennem cellen, antaget at være ens for alle stråler som rammer cellen. De strukturelle elementer, som der idag arbejdes med i optimeringen, er imidlertid tre-dimensionelle, og de finere detaljer i optimerings-processen afhænger af tre-dimensionelle effekter. Derfor er en ny generation af simuleringstværværktøjer taget i anvendelse, baseret på 2- eller 3-dimensionel modellering af kvanteprocesserne, der sker i cellen. Problemet er at regnetiden går op, fra få sekunder for en 1-dimensionel beregning til omkring 24 timer for en 3-dimensionel beregning, på en workstation som de findes i dag (f.eks. SPARC).

En optimering vil kræve gennemregning af en lang række tilfælde, og antallet af parametre, der kan varieres, vokser med kompleksiteten af cellestrukturen. Dette har udløst en interesse for at undersøge, hvor få sæt af dataværdier beregningerne behøver at gennemføres med, for at få de ønskede oplysninger ved en efterfølgende interpolation mellem de beregnede parametersæt.

Mine undersøgelser, som fremgår af en række publikationer (Sørensen, 1993e, 1993f, 1994) og det i Appendix 3 vedhæftede skrift, viser at optræning af et neuralt netværk giver en pæn beskrivelse af forholdene ikke alene mellem beregnede punkter, men også i en vis udstrækning udenfor det område, hvor der er foretaget finite element beregninger. I samarbejde med John Kaye, Centre for PV Devices and Systems, undersøges det hvordan det neurale netværk opnår denne generalisations-evne, og der sammenlignes med en række konventionelle interpolationsmetoder.

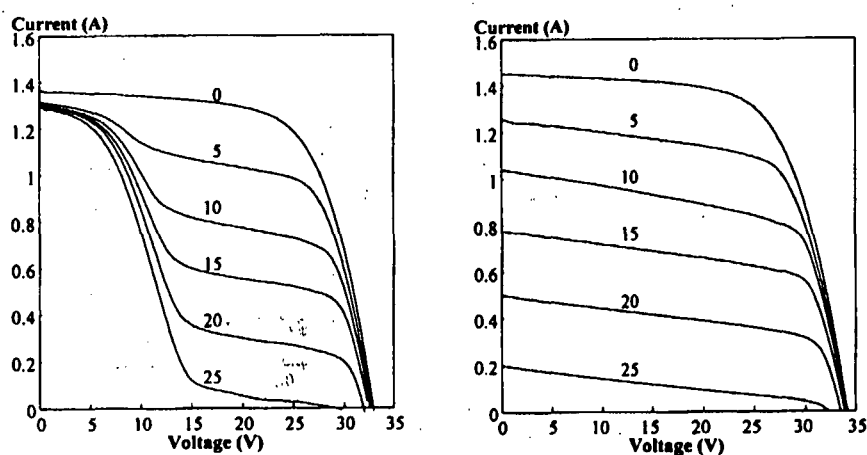
### 2.4.3. Indkobling af solceller på elnettet

I betragtning af den høje pris, der betales for selv en ganske lille forøgelse af solcellers effektivitet, er det meget vigtigt, at tab i den elektriske tilslutning af cellerne gennem moduler, rækker og systemer er så lille som muligt. Jeg har påbegyndt et samarbejde om denne type af optimering med Hugh Outhred, John Kaye og David Roche ved Centret for PV Devices and Systems. Nogle overordnede betragtninger om de forhold, der kan spille ind er publiceret i Kaye et al., (1993), og et konkret eksempel på optimering er foretaget af Roche et al., (1993). Det drejer sig om den forringelse af tilpasningen mellem de enkelte celler i et modul, som kan opstå hvis en celle går i stykker, eller hvis der kastes skygge over en del af modulet. Det kan ske, at en overskygget celle ved sin tilstedeværelse forringer den samlede effektproduktion, relativt til hvad den ville være uden den ikke fungerende celle.

En mulig løsning er at integrere bypass-dioder i systemet, så strømmen kan ledes udenom de celler, der af den ene eller anden grund ikke leverer strøm. Figur 27 viser, på grundlag af modelberegninger, bypass-diodernes indflydelse på strøm-spændingskurven ved forskellige niveauer af skygge i øst-vestlig retning.

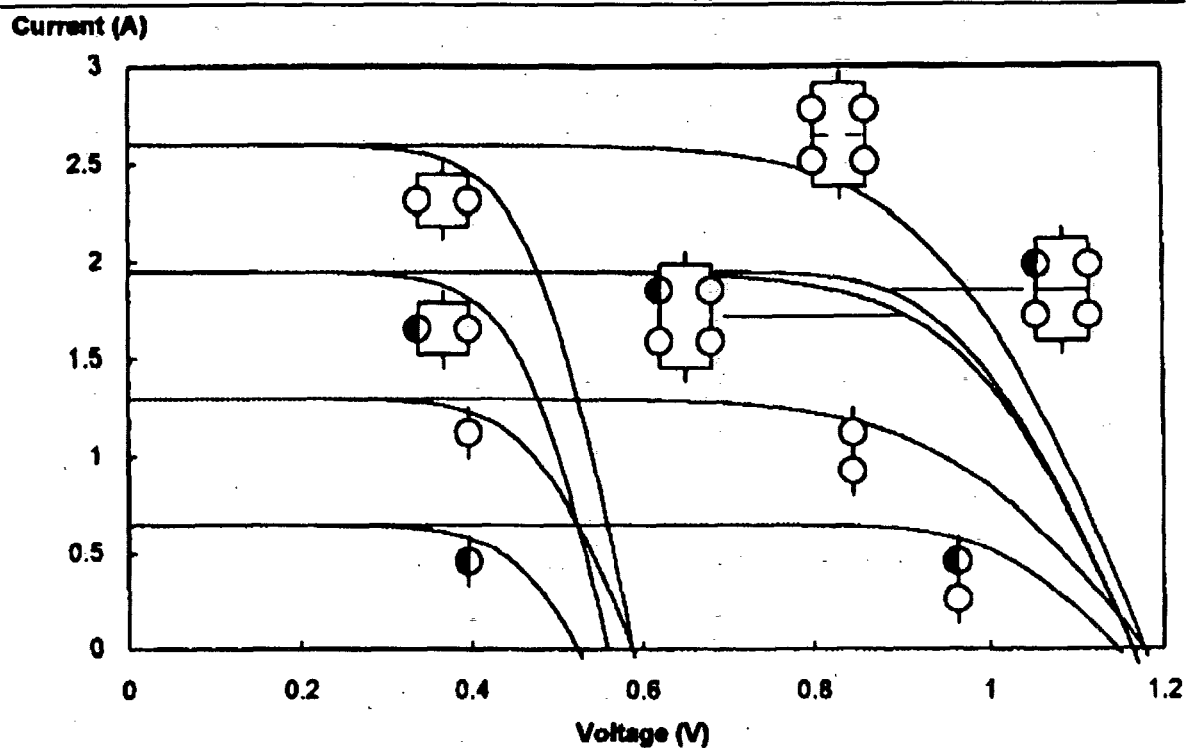
Også layout'et af de elektriske forbindelser kan have en indflydelse på den samlede effektivitet. Ved en kombination af serie- og parallelförbinding af de enkelte celler i et modul ses, at tilpasningstab formindskes med stigende parallelisme (Figur 28).

Det er planen i det videre arbejde at undersøge integrationsstrategier på eldistributionsniveau, idet der også her skønnes at være mulighed for betydelige gevinster ved optimering.



Figur 27.

IV kurver for solcellemodul med integrerede bypass-dioder (venstre) og uden (højre), som funktion af skygge-% i øst-vestgående retning (Roche et al., 1993).



Figur 28.

IV kurver for forskellige kombinationer af serie- og parallelforbindelser mellem celler i modul (Roche et al., 1993).

## 2.5. Mexico

Mexico har haft en ret negativ erfaring med demonstrationsprojekter indenfor fotovoltaik. En række anlæg opstillet som u-landshjælp, bl.a. af Tyskland, har ikke medført nogen overførsel af viden, ifgl. A. Fernandez fra PV-gruppen ved solenergiinstituttet i Morelos (Universidad Nacional Autonoma de Mexico).

Derfor har energiministeriet vedtaget en ny fremgangsmåde i et stort program kaldt "Solidaridad". Sigtet er en hurtig udvikling af Mexicos landområder. Tidligere førte investeringer i tilslutning til oliefundene i den Meksikanske Golf til en omstrukturering af det mexikanske samfund. Nogle blev meget rige, priserne steg, og da oliemarkedet faldt sammen, gik det hårdt ud over de fattige. Idag ses en delvis genrejsning af økonomien, men fortrinsvist i byerne. Landområderne er i en meget slet forfatning, og "Solidaridad" søger at afhjælpe dette, dels gennem et uddannelsesprogram, dels gennem energiprogrammet.

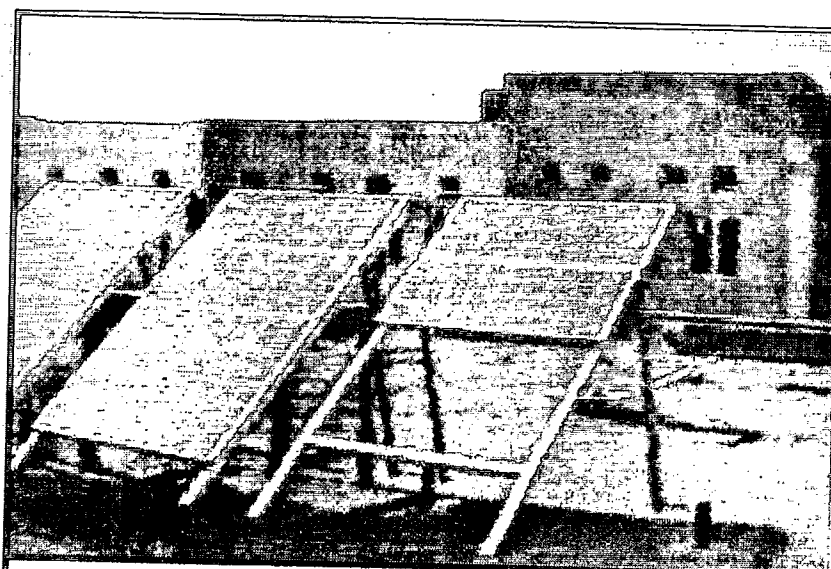
Energiprogrammet omfatter fotovoltaiske systemer, der installeres i forbindelse med skoler i landområderne, med sigte på fjernundervisning gennem TV. Iøvrigt tilsluttes rudimentære belysnings- og vandpumpningsfaciliteter. De foreløbige tilbagemeldinger siger, at programmet er yderst virkningsfuldt. De fleste solceller købes i USA (Siemens, Solarex).

På det nationale universitet er der en betydelig interesse for effektiv udnyttelse af energi, og livscyklus-analyser og andre eksternalitetsstudier ses som et nyttigt redskab til at fremme effektivisering.

## 2.6. Grækenland

De græske elværker har etableret en række fotovoltaiske anlæg i ø-havet, med støtte fra EU. Imidlertid flyttes anlæggene til mindre og mindre øer, efterhånden som de statslige elværkers program for etablering af søkabler til øerne skrider frem. Faglig ekspertise på solcelleområdet findes ikke hos elværkerne, men kun ved universiteter og særlige forskningsorganisationer.

Et sådant center er den fotovoltaiske park ved Heraklion på Kreta, finansieret af Fonden for Forskning og Teknologi (FORTH). Den daglige drift varetages af det tekniske kollegium ved Kretas Universitet. Her er opbygget en stor prøvestation (se Figur 29), et solcelle demonstrationsanlæg, afprøvningsfaciliteter for batterisystemer, og et udviklingscenter for fotovoltaiske anvendelser. Bl.a. er udviklet et vejbelysningssystem baseret på solceller. Blandt batteriforsøgene er et skema til opvarmning af batterierne med overskuds-elektricitet fra solcellerne, i perioder med lavt forbrug. Herved synes batterierne (som er indkapslede blybatterier) at kunne levere en større ydelse (se Figur 30).



Figur 29.  
Del af afprøvningsopstilling af solceller, med laboratoriebygningen ved Photovoltaic Park i Heraklion som baggrund.

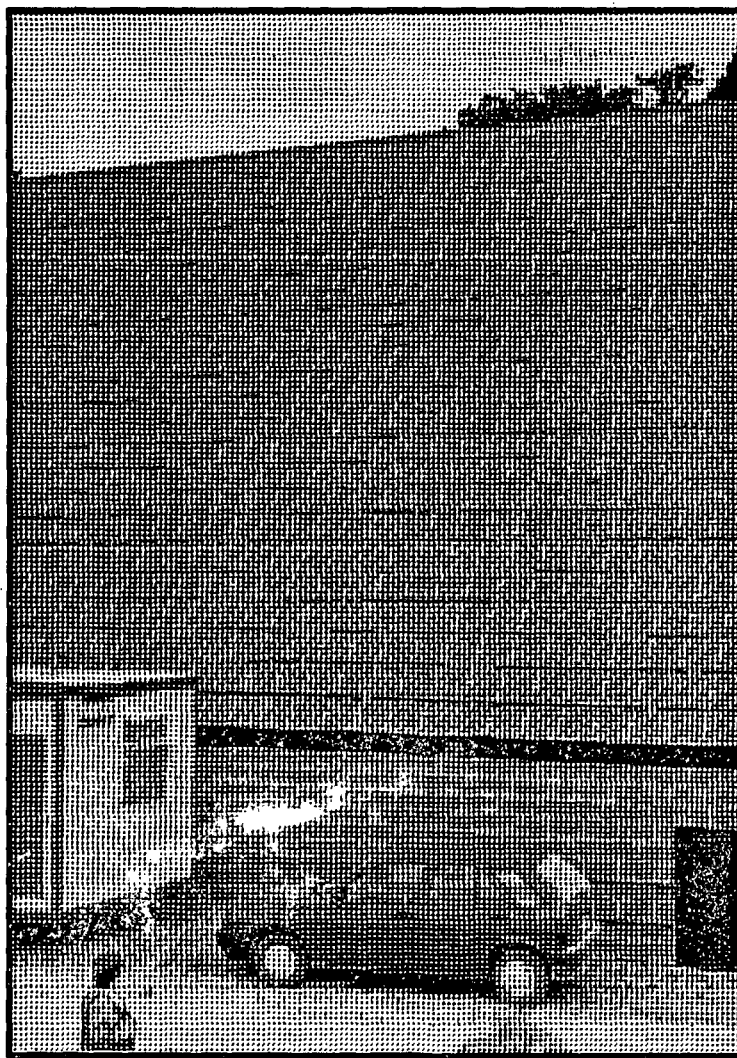


Figur 30.  
Forsøg med belysning af batterier, for bedre lagringskapacitet. Photovoltaic Park, Heraklion.

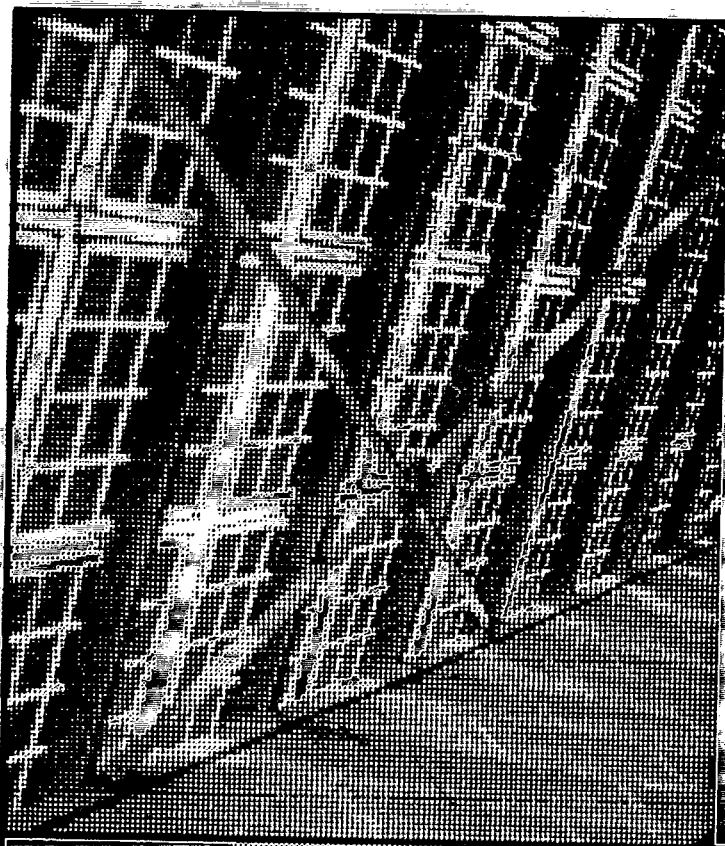
## 2.7. Irland

National Microelectronics Research Laboratory, som er et uafhængigt financeret forskningscenter placeret i Cork, har gennem en årrække stået for den fotovoltaiske forskning i Irland. Bl.a. har laboratoriet stået for driften af og eksperimenter udført på et 50 kW forsøgsanlæg installeret på øen Fota nær Cork. Dette anlæg har kørt siden 1982, først som stand-alone anlæg i forbindelse med et landbrug omfattende mejeridrift, og siden 1989 i en modificeret konfiguration tilkoblet elnettet..

Som vist på Figur 31, er anlægget placeret på en tagflade med hældning 45 grader. Solcellerne er produceret af AEG-Telefunken. Det oprindelige anlæg omfattede 161 kWh batterilagring, baseret på Varta blybatterier. Der er senere tilføjet flere batterier, og der pågår idag en række undersøgelse af samkøringsproblemer mellem solceller og batterier. Den oprindelige opdeling af batterierne i blokke har vist sig at give styringsproblemer (Imamura, 1992), og der har været en række problemer med den software, som blev udviklet til styring af anlægget.



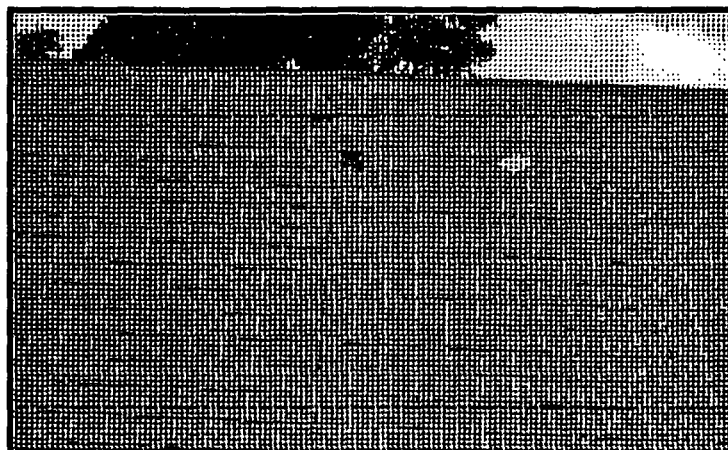
Figur 31.  
Fota PV anlæg.



Figur 32.  
Montering af solcellerne på  
Fota anlægget, set indefra byg-  
ningen.



Figur 33.  
Fota anlæggets fastspænding af solceller, set  
udefra, med synlige skader.



Figur 34.

En del solceller er beskadiget, og pga. vanskelig tilgængelighed er det dyrt at udbedre skaderne.

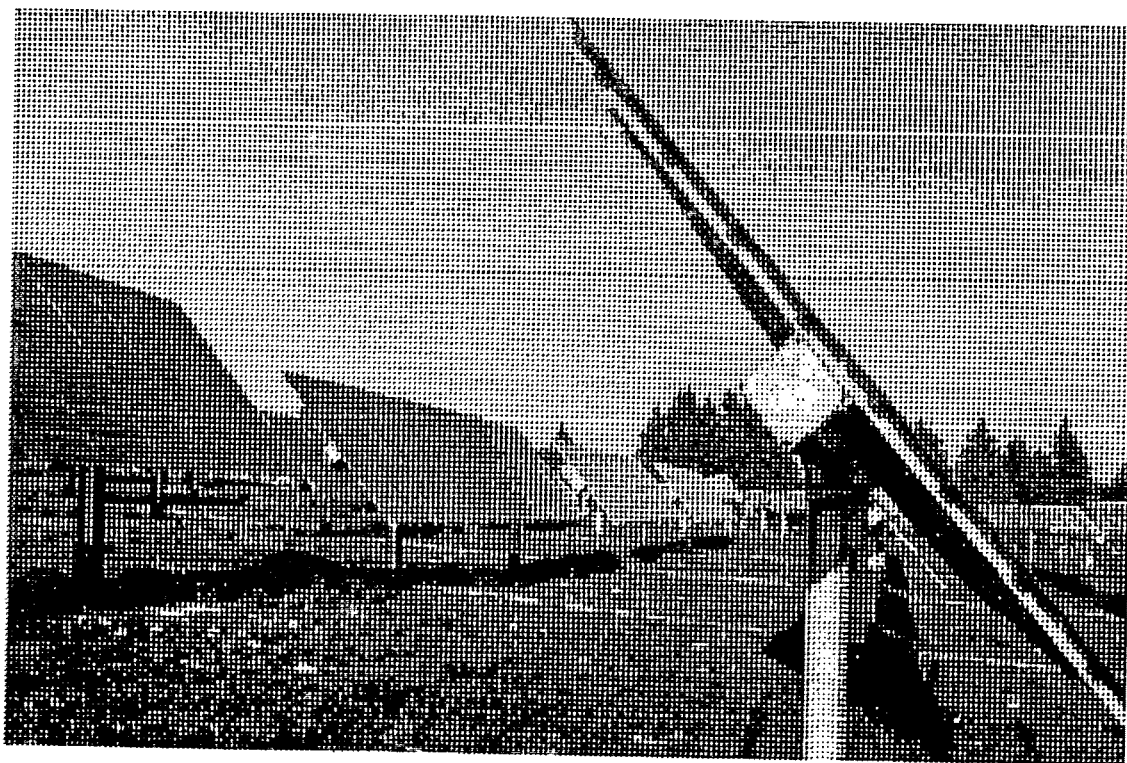
Solcellerne er skruet på en understøttende bjælke (Figur 32 og 33), hvilket har medført mekaniske spændinger og har bevirket at en del moduler er ødelagt. Cellerne udviser idag en betydelig påvirkning af vind og vejr, algedannelse mv. (se Figur 34), men har i det store og hele bevaret den oprindelige effektivitet. Den åbne konstruktion med mange mellemrum og åben adgang til både for- og bagside af modulerne har vanskeliggjort vedligehold. Det er også en fejl, at cellerne ikke umiddelbart er tilgængelige (fx. fra gangbroer i bygningen). Enhver reparation har krævet tilkaldelse af en kommerciel kran, med deraf følgende ventetid og omkostning.



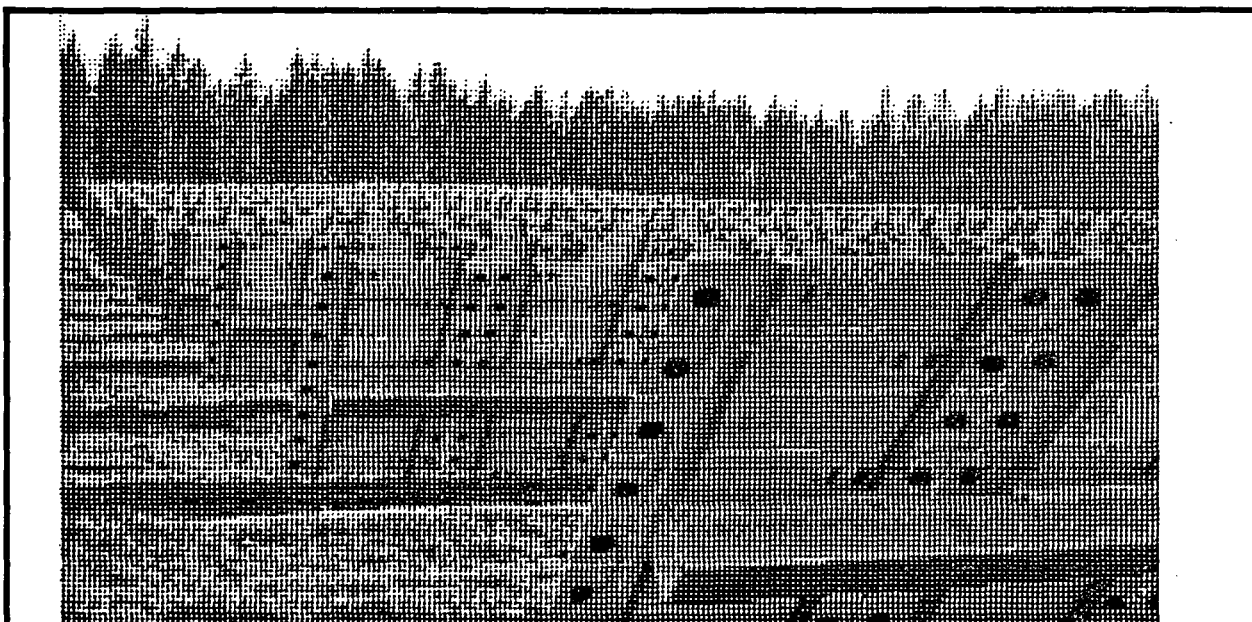
## 2.8. Schweiz

Schweitz har et af de mest omfattende fotovoltaiske programmer i verden, dækkende både installationer på private huse, kontor- og fabriksbygninger, som del af ramper og støjværn langs veje, og i centrale anlæg. Her skal kort redegøres for et besøg på 500 kW installationen på Mont Soleil, hvis drift varetages af et konsortium af svejtsiske virksomheder. Anlægsudgifterne har beløbet sig til 8.5 mio. SFr. Anlægget består af uindrammede Siemens moduler af typen M55, grupperet i to felter men med en enkelt 500 kW vekselretter, hvis effektivitet er 96% ned til 50% belastning, og stadig 92% ved 15% belastning.

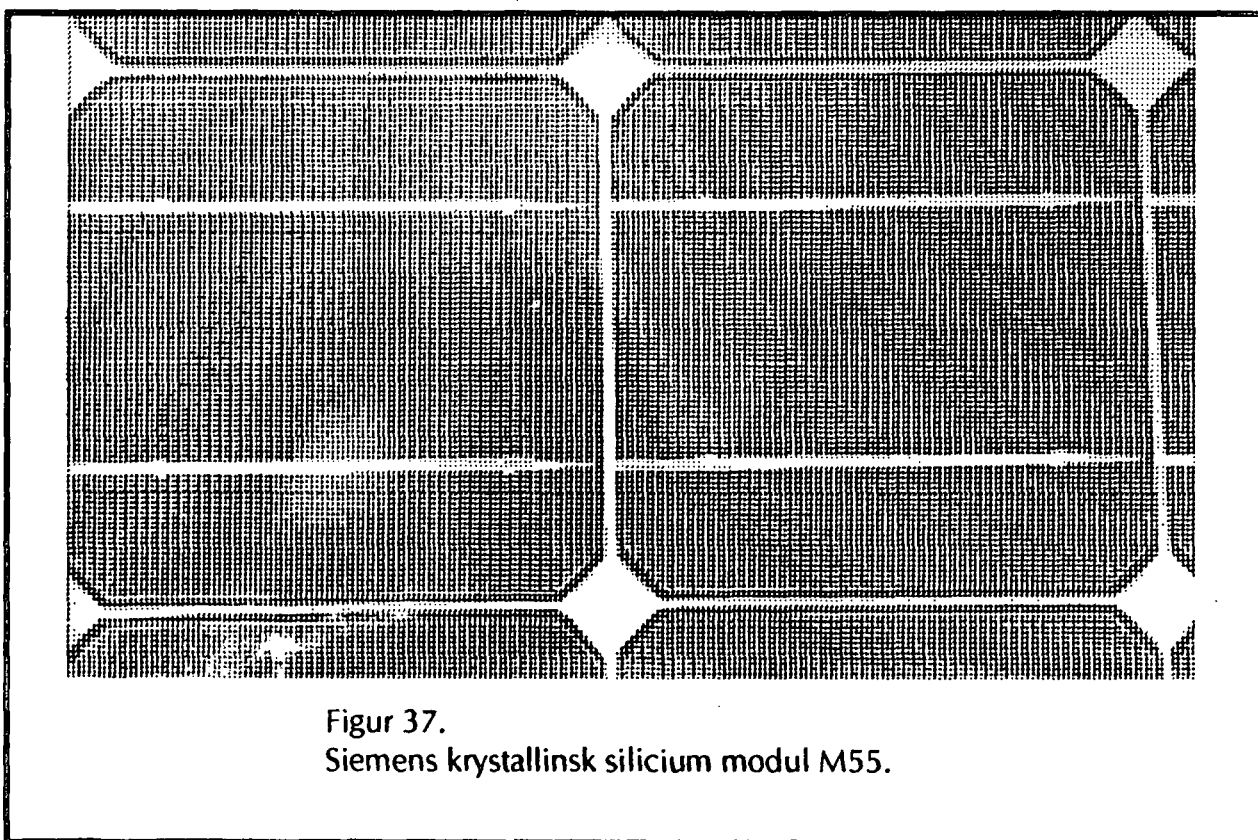
Modulerne er limet på en rammestruktur (Figur 35-37). Anlægget er beskyttet mod lynnedslag med et nedgravet jernnet, relæer på jævnstrømssiden og anvendelse af optiske ledere til dataindsamling. Det skønnes dog ikke, at et direkte lynnedslag ikke vil skade anlægget. Der har været ét stort lynnedslag, som udbrændte computersystemet i kontrolbygningen, men ikke beskadigede selve solcelle-feltet. Der er nu også sat lynafledere på kontrolbygningen! Et sikkerhedssystem med flere uafhængige afbrydere er installeret, med automatisk alarmering til et elværk. Den forventede energiproduktion er 700 MWh. Med en renteudgift på ca. 8% og 50000 SFr i årlig driftsudgift, giver dette en elektricitetspris på SFr 1.10 eller ca. 5 Kr/kWh (Minder, 1993).



Figur 35. 500 kW PHALK solkraftværk ved Mont Soleil.



Figur 36.  
Modulerne anvendt i Mont Soleil anlægget, set  
bagfra. Man bemærker monteringen uden ram-  
mer, og de elektriske forbindelser søjlevis.



Figur 37.  
Siemens krystallinsk silicium modul M55.

## 2.9 IEA indsats på solcelle-området.

I forbindelse med anden aktivitet i Japan deltog undertegnede i *IEA Implementing agreement on PV Systems Task 5* mødet i *Tokyo, 18-19 Nov. 1993* som observatør, inviteret af de japanske værter, NEDO (New Energy Development Organisation, som har status omtrent som Energistyrelsen). Nedenfor følger et kort referat af Task 5 aktivitetens møde, som jeg tænkte kunne være af interesse. I forlængelse af dette møde blev jeg også inviteret til at deltage i et fællesmøde for PV Implementing Agreement Task 5 og IEA Solar Heating and Cooling Programme's Task 16 vedr. Photovoltaics in Buildings. Tanker om sidstnævnte aktivitetens relation til Implementing Agreement Task 5 blev drøftet og er refereret i afsnit 2.9.2.

### 2.9.1 IEA fotovoltaisk implementeringsaftale, arbejdsgruppe 5

Emnet for Task 5 er *Grid Interconnection of Building Integrated and other dispersed Photovoltaic Power Systems*. Deltagerne i mødet i Tokyo gengives sidst i afsnittet. Gruppen har vedtaget foreløbigt at gennemføre 3 studier (subtasks):

**Subtask 10:** Oversigt over eksperimenter foretaget med eksisterende nettilsluttede PV-installationer af mindre størrelse (1-50 kW).

Ideen er at se på bygningsintegrerede PV-installationer, såvel ud fra driftserfaringer som ud fra de retningslinjer og påbud, som myndigheder i hvert tilfælde har pålagt installationen. Der vil blive anvendt et spørgeskema sendt til operatøren af hver installation, omfattende spørgsmål vedr.

1. Regler i relation til strømmens bølgeform og spændingsvariationer, beskyttelse overfor strøm på ledninger i fejlsituationer og lynnedslagssituationer, design af vekselretter mv., målekrav, jordledning og andre krav på jævnspændingssiden.
2. Design af det elektriske fordelingsnet i relation til PV-installationen, sikkerhedskrav og regler for at bringe solcelleproduktionen ind på nettet (fx. efter nedlukning pga fejlsituation).
3. Vurdering af omkostningerne ved at opfylde de stillede krav til sikkerhed mv.
4. Måleresultater vedr. overtoner (harmonics), spændingsvariationer, fejl i beskyttelsessystem og i vekselrettere, islandning, lynnedslag og fejl på jævnstrømssiden.
5. Diskussion af evt. krav til fremtidig justering af norm-krav og retningslinjer for PV-installationer.

Østrig eller Tyskland vil lede dette subtask.

**Subtask 20:** Nedfældning af forslag til retningslinjer, som bør afprøves ved demonstrationsanlæg.

Med udgangspunkt i resultaterne fra subtask 10 og spørgeskema ønskes relevansen af eksisterende og foreslåede retningslinjer afprøvet, idet der undervejs kan foreslås nye typer af udstyr (vekselrettere osv.). For konkret udstyr, der sigter på sammenkobling af decentralt placeret PV-anlæg og elnet, vil udstyrets begrænsninger og anvendelsesområde blive afdækket.

Holland vil lede dette subtask.

**Subtask 30:** Med udgangspunkt i Rokko Island afprøvnings-faciliteten i Japan, og evt. andre tilsvarende, evalueres tekniske forskrifter og problemstillinger identificeret i subtask 20.

Allerede accepterede afprøvningsområder omfatter strøm-kvalitet, beskyttelse af PV-anlæg og af netværks-installationer, afprøvninger under kontrollerede fejlsituationer, sikkerhedstest og konkrete tests foreslået af medlemslandene.

Japan vil lede dette subtask. Japan ser gerne at udenlandske ingeniører deltager i test-arbejdet på Rokko Island.

Udover de tre nævnte subtask vil en sammenfattende rapport blive udarbejdet. Der er planlagt årlig afrapportering indtil 1998.

Deltagere i task 5 (se næste to sider):

## Participants of 1st Task V Expert Meeting

1 1

AUSTRIA

Mr. Günther RABENSTEINER  
Tauernkraftwerke AG  
Rainerstr. 24. PB 161  
5021 SALZBURG

Tel. +43 662 88950 2281  
Fax. +43 662 88950 63

GERMANY

Mr. Hermann LAUKAMP  
FHG-ISE  
Oltmannsstrasse 22  
D-7800 Freiburg

Tel. +49 761 4014 227  
Fax. +49 761 4014 217

ITALY

Mr. Alberto Iliceto  
R&D Department  
ENEL S.p.A.  
Centro di Ricerche Elettriche  
Via A. Volta, 1  
20093 COLOGNO MONZESE  
Milano

Tel. +39 2 7224 5252  
Fax. +39 2 7224 5465

NETHERLANDS

Mr. Emil ter HORST  
NOVEM  
Netherland Agency for Energy  
and the Environment  
St. Jakob Straat, 61  
P.O. Box 8242  
3505 RS UTRECHT

Tel. +31 30 353 464  
Fax. +31 30 316 491

Mr. S.A.M. Verhoeven  
KEMA  
Utrechtseweg 310  
6812 AR Arnhem

Tel. +31 85 56 3581  
Fax. +31 85 51 3683

PORTUGAL

Mr. Fernando SANTOS  
EDP, S.A. -Electricity of Portugal  
AV. Infante Santo, 17-6  
1300 LISBON

Tel. +351 1 3955900  
Fax. +351 1 602531

USA

Mr. Ward BOWER  
Sandia National Labs  
Po Box 5800  
Albuquerque, New Mexico 87185

Tel. +505 844 5206  
Fax. +505 844 6541

DENMARK

Mr. Bent SORENSEN  
Roskilde University  
Box 260  
DK-4000 Roskilde  
Denmark

Tel. +45 46 757711  
Fax. +45 46 755065

U.K.

Mr. Harry EDWARDS  
Energy Technology Support Unit  
(ETSU)  
Harwell  
Oxfordshire  
OX11 0RA United Kingdom

Tel. +44 238 436457  
Fax. +44 238 432331

Ms. Jennifer GREGORY  
IT Power  
The Warren  
Branshill Road  
Eversley Hampshire UK

Tel. +44 734 730073  
Fax. +44 743 730820

JAPAN

Mr. Kunisuke KONNO  
New Energy Promotion Dept.  
NEDO  
1-1,3-Chome  
Hikashi-Ikebukuro  
Toshima-ku  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3987 9408  
Fax. +81 3 3590 5803

Mr. Eiji HASHIMOTO  
Power System Dept.  
CRIEPI  
2-11-1 Iwato-kita, Komae-shi  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3480 2111  
Fax. +81 3 3480 3866

Mr. Akio KITAMURA  
The Kansai Electric Power  
Company, Inc.  
Technical Research Center  
11-20 Nakoji 3-chome  
Amagasaki  
Hyogo 661

Tel. +81 6 484 9786  
Fax. +81 6 494 9728

Mr. Fumio YAMAMOTO  
The Kansai Electric Power  
Company, Inc.  
Technical Research Center  
11-20 Nakoji 3-chome  
Amagasaki  
Hyogo 661

Tel. +81 6 484 9786  
Fax. +81 6 494 9728

Mr. Shigeru TAMURA  
New Energy Promotion Dept.  
NEDO  
1-1,3-Chome  
Hikashi-Ikebukuro  
Toshima-ku  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3987 9405  
Fax. +81 3 3590 5803

Mr. Kenji SATO  
New Energy Promotion Dept.  
NEDO  
1-1,3-Chome  
Hikashi-Ikebukuro  
Toshima-ku  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3987 9405  
Fax. +81 3 3590 5803

Mr. Yoshio TOBARI  
New Energy Promotion Dept.  
NEDO  
1-1,3-Chome  
Hikashi-Ikebukuro  
Toshima-ku  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3987 9405  
Fax. +81 3 3590 5803

Mr. Tadao ISHIKAWA  
Power System Dept.  
CRIEPI  
2-11-1 Iwato-kita, Komae-shi  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3480 2111  
Fax. +81 3 3480 3866

Mr. Hiromu KOBAYASHI  
Power System Dept.  
CRIEPI  
2-11-1 Iwato-kita, Komae-shi  
Tokyo 201

Tel. +81 3 3480 2111  
Fax. +81 3 3480 3866

### 2.9.2 IEA solopvarmning og -afkøling, arbejdsgruppe 16

Mødets emne var samarbejde og fremtidig arbejdsdeling mellem task 16 og Implementing Agreement Task 5.

Task 16 har arbejdet nogle år og har bl.a. set på arkitektoniske forhold vedr. bygnings-integrerede PV-anlæg, og på nettilslutningsproblemer, effektivitet af strøm fra PV-anlæg samt tekniske forhold vedr. fx vekselrettere. En del af dette arbejde overlapper med task 5 aktiviteterne, og på fællesmøde afholdt hos NEDO (Tokyo) den 19. November 1993 blev det besluttet dels at task 16 stiller sine resultater til rådighed for task 5, og dels at der sker en jævnlig udveksling af materiale samt afholdes fællesmøder når dette skønnes muligt. Task 16 har allerede produceret arbejdsdokumenter vedr. netværkstilslutning, med behandling af strøm kvalitets- og sikkerhedsspørgsmål.

Der var fra nogle deltageres side et ønske om, at task 16's arbejde kunne fortsætte som en del af PV Implementing Agreement under task 5, når solvarme- og afkølingsprogrammet slutter om godt et år. Spørgsmålet om, hvordan de arkitektoniske integreringsspørgsmål kunne sikres fortsat bevågenhed, blev drøftet.

Task 16 har godkendt en række PV-demonstrationsanlæg i medlemslandene som officielle IEA-anlæg. Der blev fremsat ønske om, at tilsynet med disse kunne fortsættes under task 5.



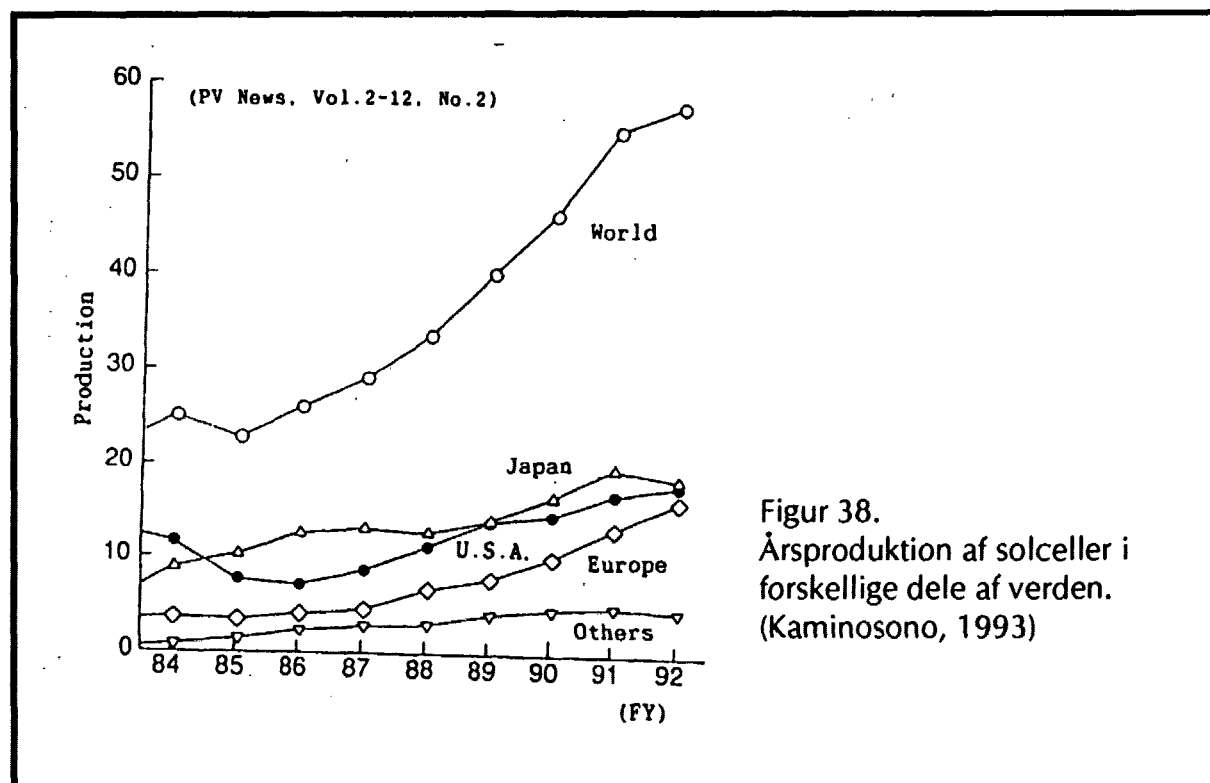
### 3. REFLEKTIONER

Det fremgår af Figur 38, at der idag produceres ca. lige mange solceller i USA, Japan og Europa. Historisk set er det først de seneste år, at Europa er kommet med. Japan har været ledende midt i 1980'erne, og som det fremgår af Figur 39 med forbrugerprodukter som soldrevne ure og lommeregnerne som drivkraft i udviklingen. Før 1984 var USA førende med produktion af solceller, som spin-off af rumfartsteknologien.

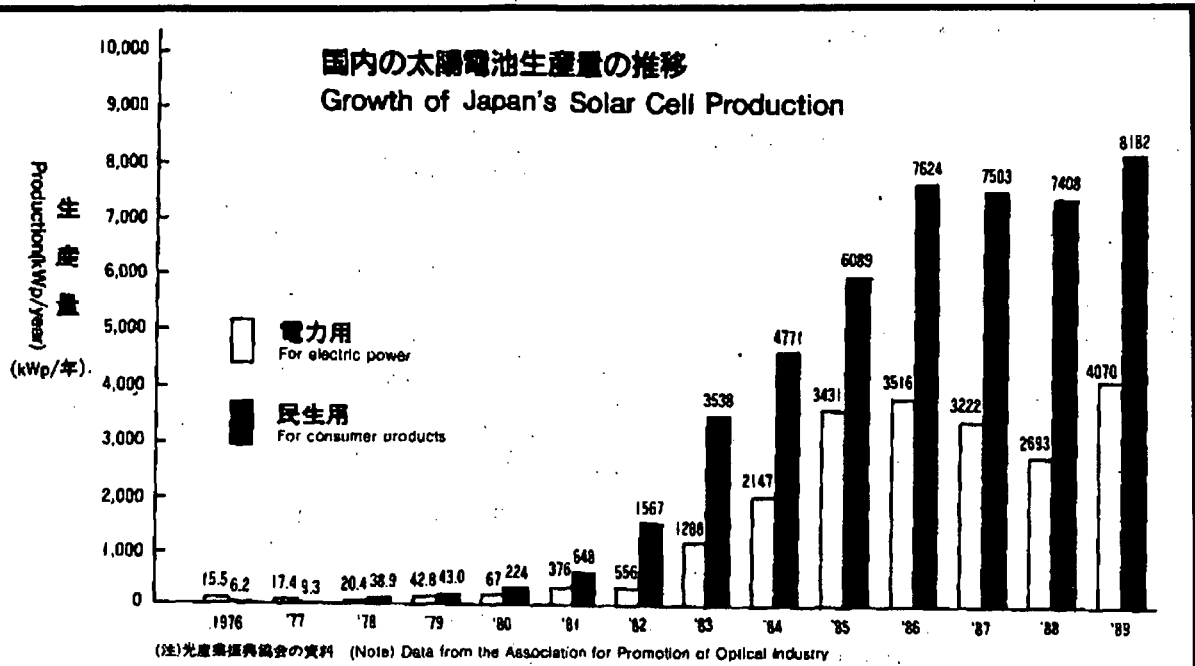
Det er bemærkelsesværdigt, at den japanske produktion er gået ned i 1992. Dette skyldes at Japans eksport af varer er stagneret, og nyhedens interesse er gået af de primitive anvendelser af solceller i ure og lommeregnerne. Desuden er som tidligere diskuteret ældningsproblemerne ved amorfe celler en faktor, der har ramt den japanske solcelleindustri hårdt.

Europas fremgang skyldes en stærkt statslig interesse for ikke-forurenende energikilder, der har medført en lang række demonstrationsprojekter. Hertil kommer særlige anvendelser, som er udviklet til brug i privat og offentlig regie. Også den amerikanske fremgang skyldes hovedsagelig tilkomsten af mange nye demonstrationsprojekter, såsom Kerman projektet omtalt i Sørensen (1993b). Der er tegn på, at disse projekter vil få et mindre omfang i USA de nærmeste år, mens der i Europa ventes stigende interesse og aktivitet på området.

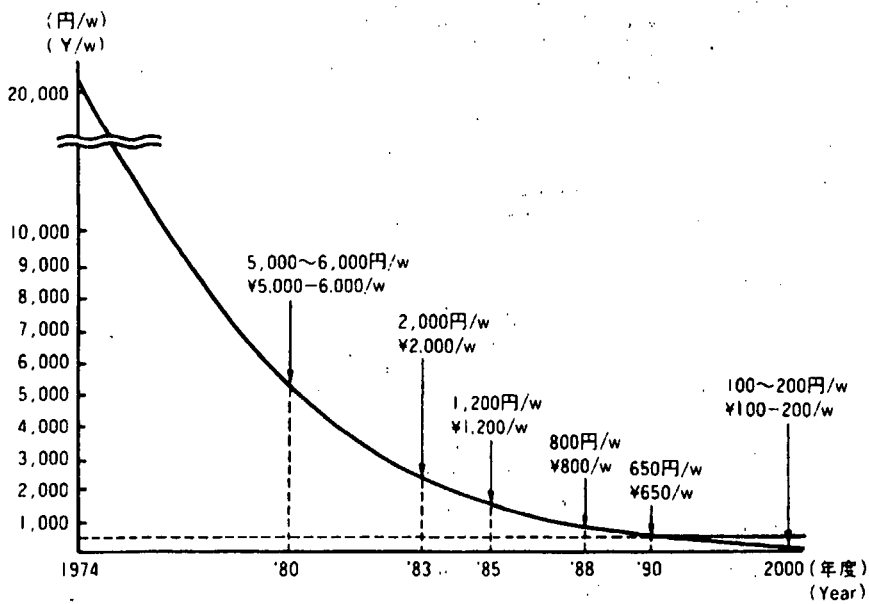
Dette medfører at Europa vil være førende indenfor solcelleteknologien de nærmeste år. Imidlertid er dette ikke ensbetydende med, at udviklingen vil forløbe glat. Der er i



Figur 38.  
Årsproduktion af solceller i  
forskellige dele af verden.  
(Kaminosono, 1993)



Figur 39.  
Andelen af den japanske solcelleproduktion der er gået til forbruger-produkter (mørke søjler), og til elproduktion (lyse søjler). (NEDO, 1990).



Figur 40.  
Udviklingen i solcellepriser og forventninger ifgl. NEDO (1991).

dag, på verdensplan en 2-3 gange større produktionskapacitet end det aktuelle behov. Det betyder alt andet lige, at innovationer som allerede er udviklet og klar, ikke vil indgå i produktionen før der igen bliver behov for at udvide produktionskapaciteten - eller alternativt at fordelene bliver så store, at nye anlæg kan udkonkurrere de gamle. I penge betyder den udsatte fornyelse, at priserne ikke vil falde så stærkt, som de kunne, hvilket er en negativ feedback cirkel, der alt i alt medvirker til at dæmpe vækstatten.

Det er på denne baggrund, at den japanske solcelle-industri har bedt regeringen om, og har fået, større støttemidler end nogensinde før. Resultatet heraf må forventes at blive en kraftig forøgelse i antallet af japanske demonstrations-projekter, og derfor sandsynligvis en udvikling henimod en japansk og europæisk dominans på markedet. Det er usikkert, om USA vil deltage i kapløbet, da USA ikke har stor forståelse for nødvendigheden af statsstøtte i en ny industris opvækstperiode. Også den kendsgerning at USA's største solcelle-fabrikant, ARCO, er blevet opkøbt af Siemens, har gjort amerikanerne mindre interesseret i solcelleteknologien.

I Europa satses der bredt, på såvel krystallinske, polykrystallinske, amorfe og nye typer af solceller. Japan's satsning på primært amorfe celler har ikke medført den prisreduktion, som var ventet. Figur 40, som giver japanske produktionspriser gennem tiden, viser tal som hele tiden er i overkanten af verdensmarkedspriserne. Idag er prisen på japanske celler, der primært er amorfe, ca. 5 US \$ pr. spids-watt, mens den i Europa og USA er 4 US \$ pr. spids-watt, i begge tilfælde for større anlæg. Det er i grunden mærkeligt, idet alle teoretiske overvejelser kommer til det resultat, at amorfe celler bør være væsentligt billigere at producere end krystallinske og formentlig også end polykrystallinske celler. Og ret beset må japanerne jo også tro herpå, siden de fortsætter med at satse på amorfe celler.

Når alt kommer til alt, skal der jo stadig en prissænkning på af størrelsesordenen en faktor 5 til, før solcelle-teknologien er klar til almindelig elproduktion i gunstige solbeskinnede egne, og over en faktor 10 i egne som Danmark. Det er svært at tro på en sådan udvikling for de krystallinske celler, inklusiv de alternative materialer som især forskere i USA tror på (se Sørensen, 1993b). Mit gæt er, at slaget kommer til at stå mellem amorfe og poly-krystallinske celler, og det forekommer ganske fornuftigt, at Europæiske forskere og virksomheder satser på begge, en udvikling som iøvrigt også ses i Japan.

Lad os håbe, at tankegangen med statslig understøttelse af nye, lovende men følsomme teknologier ikke bliver væltet af amerikanske tilstande, og at dette vil redde solcelle-industrierne gennem hvad der ellers kunne blive et vanskeligt årti. Kommer vi igennem disse ti år med stadig stigende produktion og anvendelse af solceller, er der ingen tvivl om, at den langsigtede udvikling vil være yderst positiv. Miljøproblemerne og miljøbevidstheden bliver ikke mindre. Tiden arbejder for de løsninger som solcelleteknologien tilbyder. Jeg ser det som positivt, at der i Europa udvikles en række niche-områder, fra vejbelysning til solceller integreret i bygningsselementer, der langt mere seriøst end ure og lommeregnerne kan bidrage til at demonstrere solcelleteknologien i overgangsfasen, før el-produktionsanvendelser er livs-cyklus-økonomisk rentable.

## LITTERATUR

ACGIH, 1976. Documentation of the threshold limit values for substances in workroom air. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Third Edition.

Aldridge, W., Brown, A., Brierly, J, Verschoyle, R. og Street, B., 1981. Lancet, vol. 2, p. 692.

Alsema, E. og van Engelenburg, B., 1992. Environmental risks of CdTe and CIS solar cell modules. pp. 995-998 in Eleventh EC Photovoltaic Solar Energy Conference. Harwood Academic Publ., Switzerland.

Boeniger, M. og Briggs, T., 1980. Potential Health Hazards in the Manufacture of Photovoltaic Solar Cells. Kapitel 43 i "Health Implications of New Energy Technologies" (Rom og Archer, eds.). Ann Arbor Science Publ.

Breckenridge, C., Collins, C., Hollomby, B. og Lulham, G., 1983. Society of Toxicology Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, Abstract 93.

CECSMUD, 1982. Sacramento Municipal Utility District 100MW Photovoltaic Plant, Draft Environmental Impact Report. Californian Energy Commission, State Clearing House No. 81111253, Sacramento, California.

Dickson, C., 1987. Safety procedures used during the manufacturing of amorphous silicon solar cells, Solar Cells, vol. 19, pp. 189-201.

Gandel, M. og Sears, D., 1977. Assessment of Large-Scale Photovoltaic Materials Production. Environmental Protection Agency Report EPA-600/7-77-087, Washington DC.

Ganguly, G. og Matsuda, A., 1993. Preparation of high-quality, low hydrogen content a-Si:H using PECVD. pp. 25-28 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

Hishikawa, Y., Isomura, M., Okamoto, S., Hashimoto, H. and Tsuda, S. 1993. Effects of the i-layer properties and impurity on the performance of a-Si solar cells. pp. 29-32 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

Hohmeyer, O., 1988. Social costs of energy consumption. Springer Verlag, New York.

IARC, 1974. International Agency for Research on Cancer, vol. 7, pp. 79-95. World Health Organisation, Geneva.

Ichikawa, Y., 1993. Fabrication technology for large-area a-Si solar cells. pp. 37-42 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

Ichimura, M. (ed.), 1993. Fota PV pilot plant. pp. 275-287 i "Photovoltaic System Technology: European Handbook". Commission of the European Communities and H. S. Stephens Associates, Bedford.

ILO, 1972. Encyclopedia of Occupational Health and Safety. International Labor Office. McGraw-Hill, New York.

Jordan, D., 1992. BP Solar Australia, Brookvale NSW, privat kommunikation.

Kaminosono, H. 1993. The role of the electric power industry for population of photovoltaic power generation in Japan. pp. 3-6 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

Kaye, J., Outhred, H. og Sørensen, B., 1992. System aspects of grid-connected photovoltaic power systems. pp. 1195-1198 i "Eleventh EC Photovoltaic Energy Conference, Montreux 1992". Harwood Academic Publ., Schweiz.

Kim, J-H., 1993. Energy: the Challenge of New Road to Development. I Proceedings of the 5th Int. Energy Conference, Seoul, Korea, forthcoming.

Kitamura, A., Okamoto, M., Hotta, K., Takigawa, K., Kobayashi, H. og Ariga, Y., 1993. Islanding prevention measures: Demonstration testing at Rokko Test Center for Advanced Energy Systems. I Proc. 23rd IEEE PV Specialists Conference, Louisville, Kentucky, USA.

MCA, 1980. Preliminary material safety data sheet on chlorosilanes. Manufacturers Chemical Association, Washington DC.

Mao, Y., Qin, Y. and Shixi, B., 1993. Present status of project "Development of PV system in Western China" and strategy for promoting PV market in Western China. In Proceedings of the 5th Int. Energy Conference, Seoul, Korea, forthcoming.

Matsuda, H., Orai, S., Kitamura, A., Takigawa, K., Kobayashi, H. og Arige, Y., 1993. Testing and Evaluation of Measures for Preventing Islanding of Grid-connected Residential-scale PV Systems. pp. 385-6 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

Megerle, C., Gupta, R., Lewis, K. McVey, E., Kapur, V. og Herron, D., 1984. P. 212 in Proc. 17th Photovoltaic Specialists Conf., IEEE, New York.

Minder, R., 1993. The Swiss 500 kW Photovoltaic Power Plant Phalk Mont Soleil. pp. 1009-1013 i "Eleventh EC Photovoltaic Energy Conference, Montreux 1992". Harwood Academic Publ., Schweiz.

Moskovitz, P. og Fthenakis, V., 1990. Toxic Materials released from Photovoltaic Modules during Fires: health risks. Solar Cells, vol. 29, pp. 63-71.

NEDO, 1991. Sunshine Project: Solar Energy Utilization Technology. Japans New Energy and Industrial Cevelopment Organization.

NEDO, 1992. Creates New Energy. Japans New Energy and Industrial Cevelopment Organization.

NIOSH, 1972. Criteria for a recommended standard for occupational exposure to carbon momoxide. National Institute for Occupational Safety and Health, USA.

NIOSH, 1972b. Criteria for a recommended standard for occupational exposure to ultraviolet radiation. National Institute for Occupational Safety and Health, USA.

Ottinger, R., 1990. Environmental Costs of Electricity, Pace University Center for Environmental Legal Studies, Oceana Publ., New York.

Partain, L., Fraas, L., McLeod, P. and Cape, J., 1987. Safety comparison of various gas source deposition technologies for large-scale production of III-V solar cells. *Solar Cells*, vol. 19, pp. 245-257.

Roche, D., Outhred, H., og Kaye, J., 1993. Optimized design of photovoltaic arrays. I "Bridging Gaps between Research, Development and Markets, Fremantle Conf." (T. Pryor, ed), vol. 2, Australian and New Zealand Solar Energy Society.

Rose, E., 1983. Environmental, Health and Safety Assessment of Photovoltaics. Jet Propulsion Laboratory, Publ. No. 83088, Pasadena, California.

Sakai, H. 1993. Status of amorphous silicon solar cell technologies in Japan. pp. 169-172 i Technical Digest of 7th Int. PV Science and Engineering Conf., Nagoya, Japan.

San Martin, R., 1989. Environmental Emissions from Energy Technology Systems: The total fuel cycle. US Department of Energy, Washington DC.

Sawada, T., Terada, N., Takahama, T, Tarui, H., Tanaka, M., Tsuda, S. and Nakano, S. 1993. Numerical approach for high-efficiency a-Si solar cell.

Shirland, F., 1966. The history, design, fabrication and performance of CdS thin solar cells. *Advanced Energy Conversion*, Series G. pp. 201-221.

Spear, W. og LeComber, P., 1975. *Solid State Communications* vol 17, p.1193.

Sørensen, B. 1979. *Renewable Energy*. 689 pp. Academic Press, London and New York.

Sørensen, B. 1993. What is life-cycle analysis? pp. 21-53 in "Life-cycle analysis og energy systems", OECD og IEA, Paris

Sørensen, B. 1993b. Fotovoltaisk Statusrapport 1: Tekst 241 fra IMFUFA, Roskilde Universitetscenter.

Sørensen, B., 1993c. Environmental impacts of photovoltaic and wind-based electricity production evaluated on a life-cycle basis. pp. 516-521 in "Int. Symp. on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects, Cancún", ICHMT & Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Sørensen, B., 1993d. Life-cycle Analysis. In "Encyclopedia of Conservation and Environment", Gorland Publ., New York. Forventet udgivelse 1994.

Sørensen, B., 1993e. Optimization of PV-cells and systems. In "Proceedings of the 5th Int. Energy Conference", Seoul, Korea, under udgivelse.

Sørensen, B., 1993f. Model optimization of PV-cells. pp. 221-222 in "7th Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf., Nagoya, Technical Digest" (M. Umeno, ed.). Nagoya Institute of Technology.

Sørensen, B., 1994. Model optimization of Photovoltaic Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, under udgivelse.

Sørensen, B. og Watt, M., 1993. Life-cycle Analysis in the Energy Field. In Proceedings of the 5th Int. Energy Conference, Seoul, Korea, under udgivelse.

UNSW, 1993. Annual Report 1992. Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, Australia.

Watt, M. 1993. Environmental and health considerations in the production of cells and modules. Centre for Photovoltaic Devices and Systems, Report No. 1993/02.

Watt, M. og Sørensen, B., 1993. Using Life-cycle Analysis to bridge the development and marketing gap for photovoltaics. pp. 404-409 in "Bridging Gaps between Research, Development and Markets, Fremantle Conf." (T. Pryor, ed.), vol. 2, Australian and New Zealand Solar Energy Society.

## Appendix A.1

Aktiviteter relateret til dette projekt:

### Marts 1993:

Diskussion med professor Martin Green og Stuart Wenham, lektor Hugh Outhred og John Kaye, Drs. Muriel Watt, Amin Aberlee og Ted Spooner, samt forskningsstipendiaterne David Roche, Mark Hancock og Ian McGill, Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales.

Diskussion med professor David Mills, University of Sydney.

Diskussion med Dr. David Crossley, afdelingsleder, Pacific Power.

Diskussion med professor Cliff Hooker, University of Newcastle, NSW

Diskussion med Dr. Mark Diesendorf, Australian Conservation Foundation.

(Bent Sørensens rejse til Australien)

### Juni 1993:

Diskussion og samarbejde med Dr. John Kaye, University of New South Wales.

(under John Kaye's ophold ved Roskilde Universitet).

### Juli 1993:

Diskussion med professor G. Wrixon og Dr. Andrew O'Riordan, National Microelectronics Research Centre, Cork, Ireland.

(Bent Sørensens rejse til Irland).

### August 1993:

Diskussion med Dr. Panos Tzanetakis, Photovoltaic Park, Heraklion, Kreta.

Diskussion med Dr. Yannis Franghiadakis, Technical College, Heraklion, Kreta

(Bent Sørensens rejse til Kreta)

Diskussion med Professor Mariano Bauer, National University of Mexico

Diskussion med Dr. A.N. Fernandez, Photovoltaic Systems Group, Laboratory for Solar Energy, Morelos

Diskussion med Underdirektør P. Maldonado og civ.ing. S. Grandi, Energiprogrammet, Universidad de Chile, Santiago.

(Bent Sørensens deltagelse i energikonference, Cancun)

### Oktober 1993:

Diskussion med Dr. P.C. Auh, Korea Institute of Energy Research, Taejon

Diskussion med Dr. J-S Choi, Korea National University, Chungbuk

Diskussion med direktør H-K Kim, Siltron Solar Cell Research Group, Seoul

Diskussion med underdirektør Yinqiu Mao og direktør, professor Anhua Wang, Gansu Natural Energy Research Institute, Lanzhou.

Diskussion med direktør Wei Guang-Pu og Dr. Wang Langxman, Shanghai University of Science and Technology, Thin Film Physics Laboratory.

Diskussion med Dr. Peter Catania, University of Regina, Saskatchewan

Diskussion med afdelingsleder Y. Porat, Israel Electric Corp., Haifa



(Bent Sørensens deltagelse i energikonference, Seoul)

November 1993:

Diskussion med Dr. Akio Kitamura, Kansai Electric Power Company, Amagasaki

Diskussion med Dr. Kunisuke Konno, adm. direktør T. Kidahashi, NEDO, Tokyo

Diskussion med Dr. E. Hashimoto og T. Ishikawa, CRIEPI Power Systems Group, Tokyo

Diskussion med øvrige deltagere i IEA PVIA task 5 og SHC task 16 møde i Tokyo

Diskussion med professor M. Konogai, Tokyo Institute of Technology

Diskussion med Mr. K. Gotoh, Canon Solar Cell Business Center, Kyoto

Diskussion med Dr. Y. Kuwano, adm. direktør, Sanyo Electric Co., Osaka

Diskussion med M. Terauchi, teknisk direktør, PV Power Generation Technology Research Association, Tokyo

Diskussion med Dr. F. Touati, Nagoya Institute of Technology

Diskussion med Dr. Paul Basore, Photovoltaics Technology Research Dept., Sandia National Lab., Albuquerque

Diskussion med professor R. Hill, Centre for PV Research, Northumbria.

Diskussion med Dr Günther Rabensteiner, Tauernkraftwerke, Salzburg.

Diskussion med professor Abid Sayigh, University of Reading

Diskussion med Dr. Heribert Schmidt, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systeme, Freiburg

(Bent Sørensens deltagelse i solcelle-konference, Nagoya)

Diskussion og samarbejde med Drs. John Kaye, Amin Aberlee, Muriel Watt, David Roche, professor Martin Green, forskningsstipendiat Ian McGill og Dean Travers, Centre for PV Devices and Systems, UNSW

Diskussion med professor David Mills, University of Sydney.

Diskussion med Dr. David Jordan, BP Solar Australia

Diskussion med Mr. Bruce James, solar architect, Sydney

Diskussion med Dr. Sharon Beeder, University of Wollongong

Diskussion med Dr. Stuart White, Lismore energi konsulent, og Dr. David Crossley, Pacific Power

Diskussion med direktør Eric Groom og Dr. Keith Larry, Government Pricing Tribunal of NSW, Sydney

(Bent Sørensens ophold i Sydney og Lismore)

## Appendix A.2

# LIFE-CYCLE ANALYSIS IN THE ENERGY FIELD

Bent SØRENSEN

Roskilde University, Institute 2, PO Box 260, DK-4000 Roskilde, Denmark

Muriel WATT

Centre for Photovoltaic Devices & Systems, University of New South Wales  
PO Box 1, Kensington, NSW 2033, Australia

## INTRODUCTION

Present understanding of the implications of energy conversion, such as air pollution and contributions to enhancing the greenhouse effect, has made it generally accepted that both consumer energy costs and planning decisions must take into account these environmental impacts. Also to be included are other types of impacts not usually reflected in the direct cost, e.g. security of supply and technical stability of supply. Recent severe accidents in nuclear power plants and oil distribution have highlighted the need to include the cost of accidents in the price of energy.

Despite the awareness of these issues, there are methodological problems that have delayed actual introduction of indirect costs in the prices and assessments of energy systems. These include the need to compare solutions with different impact profiles, and each item being expressed in different units and sometimes not quantified at all. Further problems arise due to the different social settings, that a system may experience through its lifetime. These rule out basing impact assessment on conventional input-output tables, since these are static in nature.

Life-cycle analysis is a tool that can be made to accommodate such issues in a consistent manner. Time dependence and technology dependence may be incorporated in the framework, and the usual approach of discounting the future may be avoided, e.g. by basing system choice on a comparison of alternatives that generally uses zero interest rate in comparing solutions with a different time profile of impacts, but includes the penalty of high financing costs as one impact to consider.

The life-cycle approach is particularly useful for comparing a range of different energy solutions, i.e. for debating the pros and cons of systems contemplated for the future (cf. Figure 1). Due to the long transition time needed for any substantial change in the energy system, and even the long lead time for bringing large, conventional units on line, the use of a time-dependent approach is really a must (1).

## A SHORT DESCRIPTION OF LIFE-CYCLE ANALYSIS

An assessment of all direct and indirect impacts of a given technology, be it a product, a

system or an entire sector in society, is called a life-cycle analysis (LCA). Not only are direct impacts from cradle to grave included, but also indirect effects from materials, energy and other inputs to the manufacturing process and subsequent handling - from building the production facilities, from transport of related goods and services, from use of the product, and finally from disposing of it, whether in the form of reuse, recycling or waste deposition.

The ideas behind LCA were developed during the 1970s, and went under different names. such as "total assessment", "including externalities", or "least cost planning". The first applications of LCA were in the energy field, including both individual energy technologies and entire energy supply systems (2-4). It was soon realized, that the procurement of all required data was a difficult problem. As a result, the emphasis went towards LCA applied to individual products, where the data handling seemed more manageable. However, it is still a very open-ended process, because manufacture of say a milk container requires both materials and energy, and to assess the impacts associated with the energy input anyway calls for an LCA of the energy supply system. Only as the gathering of relevant data has been ongoing for a considerable duration of time, has it become possible to perform credible LCA's.

The impacts to be included in an LCA may be grouped into categories (1):

- 1) Economic impacts such as impacts on owners economy and on national economy, including questions of foreign payments balance and employment.
- 2) Environmental impacts, e.g. land use, noise, visual impact, local pollution of soil, water, air and biota, regional and global pollution and other impacts on the Earth-atmosphere system, such as climatic change.
- 3) Social impacts, related to satisfaction of needs, impacts on health and work environment, risks, impact of large accidents, institutions required.
- 4) Security impacts, including both supply security and also safety against misuse, terror actions, etc.
- 5) Resilience, i.e. sensitivity to system failures, planning uncertainties and future changes in criteria for impact assessment.
- 6) Development impacts relate to the consistency of a product or a technology with the goals of a given society.
- 7) Political impacts include impacts of control requirements, and on openness to decentralization in both physical and decision-making terms.

It is clear that a list of this kind is open-ended, and that some impacts will never become quantifiable. This raises new problems of how to present and how to use an LCA, which would typically produce a list of impact estimations, some of which quantified

and some not, and with the quantifiable impacts often given in quite different units (e.g. tons of sulphur dioxide, number of work accidents, capital cost of equipment).

One philosophy is to try to convert all impacts into monetary values, i.e. replace the sulphur dioxide amounts with either the cost of reducing the emissions to some low threshold value (avoidance cost) or alternatively an estimated cost of the impacts: hospitalization and workday salaries lost, replanting cost of dead forests, restoration of historic buildings damaged by acid rain. Accidental death would be replaced by the insurance cost of a human life, and so on (damage costs). Unavailability of numbers has led to the alternative philosophy of interviewing cross sections of affected population on the amount of money they would be willing to pay to avoid a specific impact or to monitor their actual investments (revealed preferences).

All of these methods are deficient, the first by not including a (political) weighing of different issues (e.g. weighing immediate impacts against impacts occurring in the future), the second by doing so on a wrong basis (influenced by peoples knowledge of the issues, by their accessible assets, etc.). The best alternative may be to present the entire impact profile to decision-makers, in the original units and with a time-sequence indicating when each impact is believed to occur, and then to invite a true political debate on the proper weighing of the different issues.

Major product LCA's performed include assessments of aluminum cans and of milk containers, while system LCA's have been mainly the analyses of energy supply systems based on fossil, nuclear or various renewable energy sources.

The difficulties encountered in using LCA in the political decision-making process have been partly offset by the advantages of bringing the many impacts often disregarded (as "externalities", meaning issues not included in the economic analysis) into the debate. It may be fair to say that LCA will hardly ever become a routine method of computerized assessment, but that it may continue to serve a useful purpose by focussing and sharpening the debate involved in any decision-making process, and hopefully help increase the quality of the basis information, upon which a final decision is taken, whether on starting to manufacture a given new product, or to arrange a sector of society (such as the energy sector) in one or another way.

## CONCRETE LIFE-CYCLE STUDIES OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Emerging technologies often are more perceived to be more expensive than highly developed, existing ones. This can be due to higher unit costs while production levels are low, possibly influenced by the need to defray development and infrastructure costs. However, it can also be due to subsidies accorded to existing technologies and to a failure to include the total costs associated with the technologies considered. Both types of market distortion are common in the energy sector: direct and indirect subsidies are routinely provided to fossil and nuclear fuel based technologies, while their associated social, environmental, health and disposal costs are not included in the evaluation of

the relative merits of the existing and new technologies.

If a more comprehensive assessment finds the new technologies more benign than the old ones, it may be of advantage to a society to devise schemes for accelerating the penetration of the new technologies into the marketplace. Such concepts could be spurred by a broader technology assessment, and life-cycle analysis is one systematic method offered for conducting the surveys needed for such overall assessments.

The impacts are divided into categories such as economic, environmental and social, and data are presented in units relevant for the category in question. In presenting the corresponding impact profiles to decision-makers, a scale of -1 to 1 is used, because the weighing of incommensurable impacts will anyway involve the decision-maker's choice of weight factors. It may seem, that the accuracy of this approach is lower than if physical units (such as death per kWh or kilos of SO<sub>2</sub> per kWh) had been used. However, this is normally not the case, since the precision with which the physical data can be given is quite consistent with a fairly coarse indication, allowing a resolution of perhaps less than ten levels in the range of impacts being evaluated as negative over neutral to positive.

## WIND TURBINES

The analysis pertains to wind turbines currently produced and installed in Denmark. Typical unit sizes are around 400 kW, and the units feature three-bladed glassfibre rotors mounted on steeltube or concrete towers, with an induction generator and attached to the standard utility gridlines.

The following list of impacts corresponds to those indicated in Figure 2. They constitute the bulk of the life-cycle impacts identified in (1). It is realized that several of the impacts exhibit a dependence on the natural, social and human setting. Thus one should be careful in transferring data to other settings than the Danish one.

The penetration of wind power in the Danish electricity system is currently 4-5%. If penetrations above some 20% were achieved, the question of energy storage would have to be addressed. However, given the strong international links, e.g. to the Norwegian hydro system based on annual storage cycles, the cost of dealing with the variability of wind energy production could turn out to be very low (5).

### Economic Impacts .

The overall cost of producing wind energy in Denmark is currently about 35 øre/kWh (5 US cents per kWh) (6), with O&M constituting an average of 7 ø/kWh (1 c/kWh) out of this, averaged over an assumed 20 year lifetime. Because the capital cost is dominating, there is much less uncertainty in cost after the turbine is installed, than there would be for a fuel-based system.

The import fraction of the capital cost is 28%, that of the running cost 15% (7). The em-

ployment factor is about 3 (fulltime equivalent per million Danish Kr. spent, extrapolated from (8)). Labour is considered a negative impact in Figure 2, but it might be viewed as a positive attribute by some societies (with activity deficiency or inefficient distribution of wealth), especially in times of unemployment. In any case, creating jobs within a society is often viewed as preferable compared with creating jobs abroad.

### **Environmental Impacts.**

The land-use associated with wind turbines is difficult to assess. In order not to experience reduced wind access, wind turbines in a wind park have to be placed several rotor diametres apart. Danish wind turbines are placed both in park configurations and individually. The land between them and right up to the towers may be used for agriculture, so that the largest cost in terms of land-use is often the access roads needed for service purposes. Typical values are  $10 \text{ m}^2$  per kW rated power (7). Land resources may be returned after decommissioning.

The visual impact of wind turbines also depends on whether individual turbines or arrays of turbines are occupying a given location. Aesthetically, slender towers and white blades have been found to produce a positive reception. The further expansion of Danish wind power supply is believed to increasingly involve off-shore siting, due to the dense population of the country. However, off-shore foundation is presently more expensive than warranted by the increased power production (due to better wind access over water). The cost of wind-produced power may thus increase by 20-50% for off-shore installations, relative to the best locations on land, assuming all other factors to remain constant.

The mechanical noise from Danish wind turbines is below current minimum regulatory limits (35dB(A) in the audible range, and about 70 dB(A) for infrasound, cf. (9)) a few rotor diametres away from the turbine. Aerodynamical noise from the blades is similar to that of other structures or vegetation (10). Telecommunication interference has been studied and found similar to that of static structures (e.g. buildings), with the exception of frequency modulations propagating in particularly shaped mountain locations (7). No such locations are found in Denmark.

The extraction of power from the wind has a slight influence on the microclimate below and behind the turbines, but otherwise the pollution associated with the operation of wind turbines is limited to minor issues such as oil used for greasing. The main potential source of pollution is the manufacture and maintenance operations, which are subject to the usual industrial regulation. Fritsche finds a  $\text{CO}_2$  emission from wind turbine manufacture of 11 kg for each MWh of power later produced, plus negligible amounts of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and particulate matter (11). This estimate assumes that fossil energy is used to provide the energy needed in the wind turbine manufacturing process. If renewable energy such as power from the wind turbines themselves are used as a base, there are no impacts of this type.

### **Social Impacts.**

The work environment at manufacturers of windmill components is similar to that of

other equipment manufacturers, while the work environment for tower building, assembly and maintenance is similar to that of work in the building industry, with lots of open air activities and scaffold work at a height. With proper safety precautions, such work is generally offering a varied and challenging environment.

Health problems are primarily present in the industrial part of manufacture, including in particular the use of epoxy resins in blade manufacture. Modern production lines have confined this step of production to closed spaces with fully automated facilities, implying that employees only do control-room work, and that the risk of exposure to harmful chemicals is basically an accident risk. 18 years of blade manufacturing experience has proven that the accident risk can be kept extremely low.

Numerical estimates of health and accident risks are uncertain, because of the lack of statistical significance of existing data, and because of the different production techniques used by different wind turbine manufacturers today. Rowe finds 0.01 occupational accident fatalities and 187 work days lost per TWh of electricity produced by wind turbines (12,13), while Fritzsche finds 0.12 fatalities (0.10 occupational and 0.02 public) per TWh (14,15), on average for the entire cycle of production, operation and disposal.

The social benefits of wind turbines is through the electric power produced. As discussed above, this benefit might decrease, if at higher penetration of wind energy in the power supply system the variations of wind-produced power would lead to dumping of power, or to technical problems of operating the entire system. As explained, this is not an issue for Denmark, and is unlikely to become so even for large wind energy penetrations.

Wind energy can have impacts on the infrastructure of the electricity supply system, particularly if wind turbines are sited in a dispersed fashion, such that the demands on the power transmission network might be reduced.

#### **Security and Resilience Impacts.**

Security of supply is generally high, with the qualifications related to the variability of wind conditions made in the preceding subsection.

Failures occur in all parts of the system, but not according to any particular pattern. Around 10% of Danish wind turbines experience a component failure in any given month. About 4% of the failures result in replacement of a component (e.g. a blade, the generator, the control unit), according to the Newsletter Windpower Monthly/Windstats Quarterly. These failures are represented in the overall O&M costs, which include an insurance premium.

A wind power system has little sensitivity to individual turbine failures, due to the modular nature of the system. Because of the short time lag between deciding to build a turbine, and its operation, wind technology is much less sensitive to planning errors (e.g. wrong forecast of future loads) and changes in criteria used for selecting technology,



than systems with several years lag between decision and operation.

### **Development and Policy Impacts.**

Wind power is consistent with keeping options open for the future. It might be abandoned without repercussions (in contrast to e.g. nuclear installations and waste repositories, which have to be looked after long after decommissioning). In Denmark, wind power is consistent with present goals of creating an energy system with as little environmental impact as possible. It is a national solution and it avoids global issues such as the over-use of resources by the rich countries, while at the same time it ensures national independence of energy supply, in proportion to its penetration.

Wind power allows for broad participation in the decision-making in the energy field, and as one of several possible decentralised solutions, it would permit different local communities to choose different solutions. Few institutional constructions would be needed, if ownership is dispersed, but one possible setup would be for present utility companies to own the wind turbines, in which case the regulatory implications are no different from current ones. With dispersed ownership, key questions are free access to the power distribution grid, and price fixation for buying from and selling to the national grid. Presently, grid access is in Denmark regulated by the authorities according to general criteria, and price negotiations are conducted between the utility companies and the wind turbine owner's organisation. However, they are overseen by the Department of Energy, which is supposed to intervene if fair pricing is not obtained between the unevenly sized institutions.

### **SILICON SOLAR ROOFTOP MODULES**

The manufacture of photovoltaic cells is today barely suitable for generic assessment. Some mass-scale production is taking place, but the technology continues to change, as it has to in order to approach a price level catering to major market segments such as bulk power production. Furthermore, the worldwide industrial capacity is currently not fully used, and this slows down an introduction of improvements that are already identified and ready for implementation. Some of these improvements are known to lead to substantial improvements in conversion efficiency, while others reduce the manufacturing cost and at the same time reduce the environmental impacts of cell and module manufacture.

The life-cycle analysis presented in Figure 4 pertains to the current manufacturing technology for silicon-based cells. These comprise the substantially different technologies of crystalline and amorphous cells, and of solid or thin-film techniques. When impacts depend on these differences, it will be pointed out. Furthermore, there are several differences between the impacts of modules for centralised power plants, and those aiming at decentralised use, integrated into building structures such as roofings. One of these differences has to do with the possibility of using concentrator cells and tracking devices, while other obvious differences have to do with area use. Also the possible modularity of electricity conditioning equipment such as inverters may differ.

It should be kept in mind, that a major portion of photovoltaic installations today are used in stand-alone applications, and also that many manufacturers expect a transition to materials other than silicon within the next two decades, which will imply the emergence of a range of problems distinct from those of silicon cells (16-17).

The present analysis assumes non-concentrating cells in modules mounted on individual buildings. Cell and module fabrication is assumed to take place in the country using the modules, and the penetration of the technology plus the structure of the residual electricity supply system is assumed to be such, that no particular requirements for energy storage arise in conjunction with the photovoltaic panels. The main steps in the life-cycle of photovoltaic devices are depicted in Figure 3.

#### **Economic Impacts.**

Current cost of photovoltaic power is about 40 US cents per kWh, but expected to fall to around 10 c/kWh early in the next century (18). Of the 40 c/kWh, about 25 c derive from module capital cost and 1 c from O&M, the rest being balance of system (BOS) capital cost (see e.g. (19)). The projection would be for around 6 c/kWh for the modules and 3 c/kWh for the BOS in the rooftop mounted case, assuming integrated PV-building elements or thin-film modules glued onto a cheap substrate building element. No installation cost apart from electric connection is included, assuming that mounting costs are the same as for other roofing elements.

The national economy items are similar to those of wind turbines, except for the higher labour content associated with the higher cost.

#### **Environmental Impacts.**

The use of dedicated land resources is zero for rooftop mounted panels. Silicium is abundant everywhere, in the form of silicon dioxide, but as for any mining operation, its extraction may affect the natural environment. The operation of solar panels is without noise or smell, but the integration of panels in buildings does require architectural skills in order to produce acceptable visual impacts.

Silicon ingot formation (grinding to specified diameter) and wafer slicing produce silicon waste and slurry, while ribbon and sheet techniques minimize such problems.

The industrial handling of silicon, throughout the steps of crystal growth, ingot and wafer production, or the formation of amorphous silicon-hydrogen compounds, doping of the material, laser-grooving or chemical etching of patterns, contact formation, texturing, addition of coatings and support substrate, drying and the final mounting in modules, all involve potential pollution of the environment, unless all materials used are accounted for and recycled (20). The processes involved are typical of many chemical/mechanical industries or particularly of the semiconductor industry, so one may use data from that industry in the analysis. The use of fossil fuels (mining, furnaces, etc.) for the PV manufacture leads to a CO<sub>2</sub> production of some 30 kg/MWh, and negligible amounts of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> (11).

74

The uncertainty of the estimates arise from the differences in the production schemes used, but each stage should be similar to a large number of other industrial enterprises, and hence the estimates in principle should have little uncertainty.

#### **Social Impacts.**

Mining of the silicium material, and refining it, involve hazards of dust inhalation (silicosis) and exposure to cleaning agents and agents used in the production of chlorosilanes (hydrochloric acid or methyl chloride).

The production of silicon rods from chlorosilanes should avoid exposure to this corrosive material, and workers have to wear protective clothing and face masks, in addition to working in controlled air spaces (also due to explosion risk from hydrogen mixtures). Further risks stem from operating furnaces, vacuum pumps and from the doping processes, using e.g. boron trichloride or diborane for producing p-type material, and the phosphorous oxychloride or pentoxide used for the n-type doping of crystalline cells, or the more offensive phosphine used for n-type doping in amorphous cells (20).

Few impacts are expected during operation of PV systems or their retirement. The precautions needed for the PV-specific electricity safety aspects of building-integrated systems are well understood (21).

Rowe and Groncki (12) finds 0.004 fatalities and 47 work days lost per TWh of power produced by the solar panels, while Fritzsche (14) finds 0.34 fatalities per TWh, for the entire life-cycle of mining, production, use and disposal. It seems that Rowe has not dealt with the impacts associated with materials used. It is also surprising, that 2/3 of Fritzsche's impacts are said to be public and not occupational. Further investigations would seem appropriate.

Benefits from the power produced by the PV systems are subject to the same remarks on penetration and need for energy storage as wind energy. Savings in distribution infrastructure is derived from the dispersed rooftop-mounting (22).

#### **Security and Resilience Impacts.**

Average security of supply with solar radiation is high, the variability being subject to the remarks made above. In the decentralised mode, the sensitivity to failure is very low. As regards power quality, it depends e.g. on the inverters used, but the distributed PV panels may contribute positively (23). Like for wind, the sensitivity to planning errors and change of criteria is low. Details of failure modes have been collected, e.g. for the PVUSA test installation (24).

#### **Development and Policy Impacts.**

Again these impacts are very similar to those of wind power, with centralized PV systems resembling wind farms, and rooftop PV systems even more decentralized than dispersed wind turbines. The flexible modularity of design makes this technology ideal for broad participation and control.

## CONCLUSIONS

The impact profiles of Figures 2 and 4 are in many ways typical of renewable energy systems. It is therefore relevant to place them in perspective, by comparing them to the profiles pertaining to conventional fuel-based systems. Figure 5 shows such a profile, for electric power produced by a large coal-fired plant. Data pertains to the Danish level of particulate removal, SO<sub>2</sub> scrubbing etc. The data are derived from several sources (13, 25, 26, 11, 15), and they consider such impacts as crop, forest and building damage by air pollution, in order to establish the actual damage.

The profiles exhibit, in addition to the wellknown differences between fuel-based and renewable energy systems, in economic impacts, a number of stark differences in all other impact areas, which strongly favours renewable energy. The political decision-process involves a weight being attached to each component in the profile, and the choice should be made on the basis of the weighted sum, unless there are individual items appearing unconditionally unacceptable (1). It is important to convey the picture of the profiles, which is highly significant in spite of the uncertainty of many of the underlying numbers, to the political process, in order that decisions are based on the best available knowledge, and not just on partial evidence.

### Literature cited

1. Sørensen, B. 1993. Life-cycle assessment of energy systems. pp. 21-53 in "Expert Workshop on Life-cycle analysis of Energy Systems", OECD and IEA, Paris.
2. Sørensen, B. 1979. Renewable Energy. 687 pp, see particularly chapter 7. Academic Press, London.
3. Sørensen, B. 1981. Comparative assessment of energy systems . pp. 2209-2216 in "Beyond the Energy Crisis" (Fazzolare and Smith, eds.), Pergamon Press, London.
4. Sørensen, B. 1982. Comparative risk assessment of total energy systems. pp. 455-471 in "Health impacts of different sources of energy", IAEA, Vienna.
5. Sørensen, B. 1981. A combined wind and hydro power system. Energy Policy, March, pp. 51-55.
6. Styrbro, G. 1993. Director of Danish Utility Association ELSAM to Politiken, 19. april, p. 2.
7. Sørensen, B. 1986. The status of wind generators in Europe. 36 pp. Energy Authority of New South Wales Report EA86/18, Sydney.
8. Blegaa, S., Hvelplund, F., Jensen, J., Josephsen, L., Linderorth, H., Meyer, N., Balling, N. and Sørensen, B. 1976. Skitse til alternativ energiplan for Danmark. OOA, Copenhagen.
9. Holley, W. and Bell, B. 1990. Low frequency sound from wind turbine arrays. pp. 743-747 in "European Community Wind Energy Conference", Madrid 10-14 Sept., Stephens and Assoc., Bedford.
10. Sørensen, B. 1981. Wind Energy. pp. 97-116 in "Renewable sources of energy and the environment" (El-Hinnawi and Biswas, eds.), Tycoon International Press,

Dublin.

11. Fritzsche, U. 1993. Temis - a computerized tool for energy and environmental fuel & Life cycle analysis. pp. 103-111 in "Expert Workshop on Life-cycle analysis of Energy Systems", OECD and IEA, Paris.
12. Rowe, M. and Groncki, P. 1980. Occupational health and safety impacts of renewable energy sources. Brookhaven Nat. Lab., Upton.
13. UNEP 1985. The environmental impacts of production and use of energy, Part IV Phase 1. Energy Report Series ERS-14-85, Nairobi.
14. Fritzsche, E. 1989. The health risks of energy production. Risk Analysis vol. 9, pp 565-577.
15. Pearce, D. and Bann, C. 1993. The social costs of electricity generation in the UK. pp. 71-82 in "Expert Workshop on Life-cycle analysis of Energy Systems", OECD and IEA, Paris.
16. Moskowitz, P., Fthenakis, V., Hamilton, L. Low, J. and Bulawka, A. 1985. Gas health and safety hazards and controls associated with the production of thin-film PV cells. pp. 1261-1266 in "Proc, 18th IEEE PV Specialists Conference", Washington.
17. Moskowitz P., and Zweibel, K. 1992. Recycling of cadmium and selenium from PV modules and manufacturing wastes. 99 pp. Workshop in Golden March 11-12. Brookhaven Nat. Lab. Internal report 47787, Upton.
18. USDOE 1991. Photovoltaics program plan FY1991-85. US Nat. PV Program Report DOE/CH10093-92, Washington.
19. Shugar, D., Eyer, J., Hay, G., Newberger, J. and Kearney, D. 1991. Comparison of PV with solar thermal trough electric systems as a central station utility resource in the 1990s. pp. 576-585 in "Proc. 22th IEEE PV Specialists Conf.", Las Vegas, October.
20. Watt, M. 1993. Environmental and health considerations in the production and use of photovoltaic power cells and modules. 34 pp. UNSW Centre for PV Devices and Systems Report 1993/02, vol. 1.1. Sydney.
21. Schmid, J. 1993. PV in buildings. pp. 1659-1663 in "11th EC PV Solar Energy Conf.", Montreux, October 92. Harwood Academic Publ., Chur.
22. Iannucci, J. and Shugar, D. 1991. Structural evolution of utility systems and its implications for PV applications. pp. 566-573 in "Proc. 22th IEEE PV Specialists Conf.", Las Vegas, October.
23. Kaye, J., Outhred, H. and Sørensen, B. 1993. System Aspects of grid-connected PV power systems. pp. 1195-1198 in "11th EC PV Solar Energy Conf.", Montreux, October 92. Harwood Academic Publ., Chur.
24. Gough, E., Hutchinson, P., Townsend, T., Candelario, T. and Farmer, B. 1991. Experience gained from the first years of the PVUSA project (1988-1990). Paper presented at "53th American Power Conf.", Chicago, May.
25. Hohmeyer, O. 1990. Latest results of the international discussion on the social costs of energy. pp. 718-724 in "European Community Wind Energy Conference", Madrid 10-14 Sept., Stephens and Assoc., Bedford.
26. IAEA 1991. Comparative environmental and health effects of different energy systems for electricity generation. Key issues paper no. SM-323/3 for "Symposium on electricity and the environment", Helsinki.

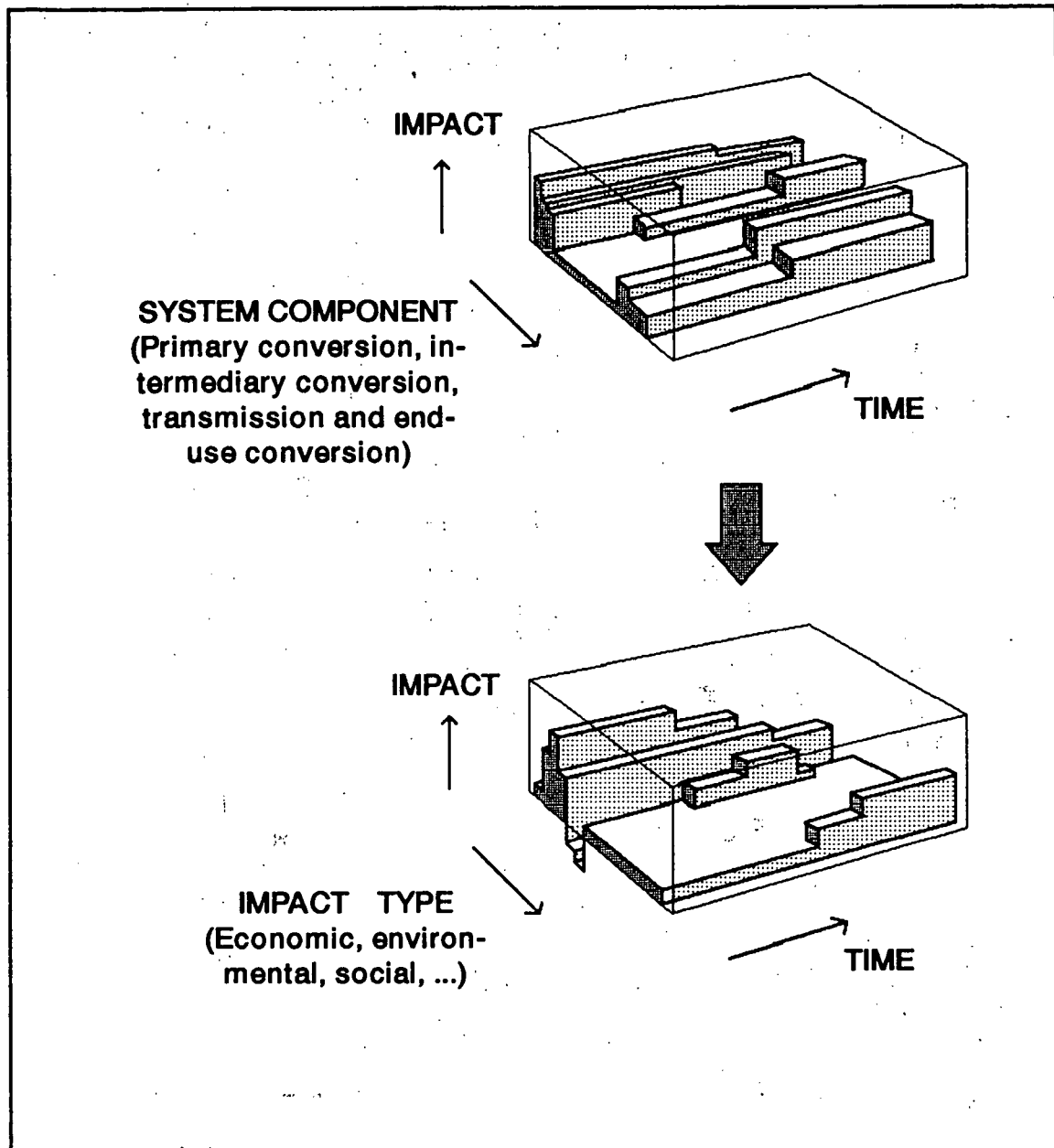


Figure 1. A schematic illustration of the three-dimensional character of life-cycle analysis. At the top, impact levels are plotted versus time and system component, while at bottom, they are plotted versus time and impact type (1).

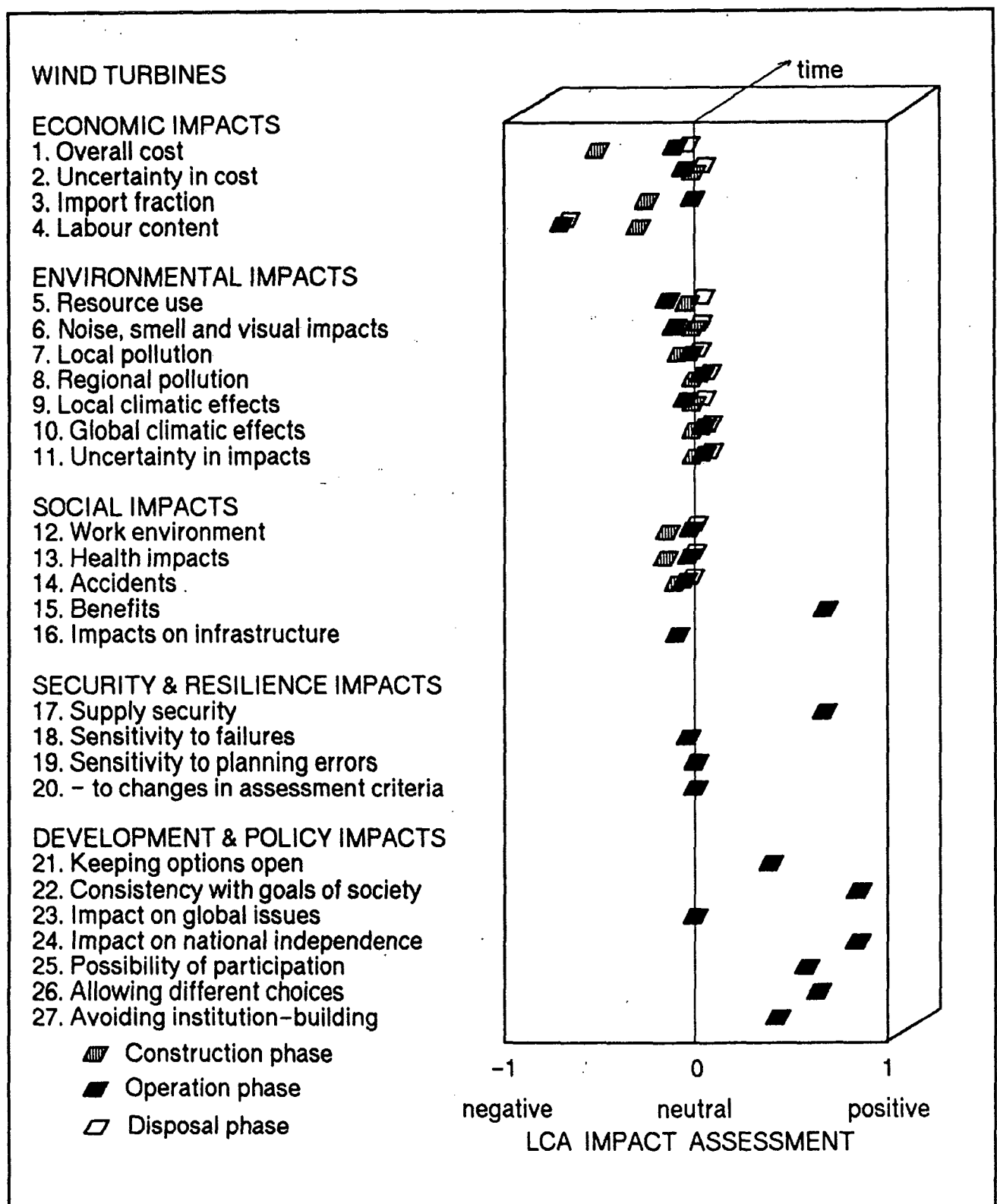


Figure 2. Wind turbine LCA.

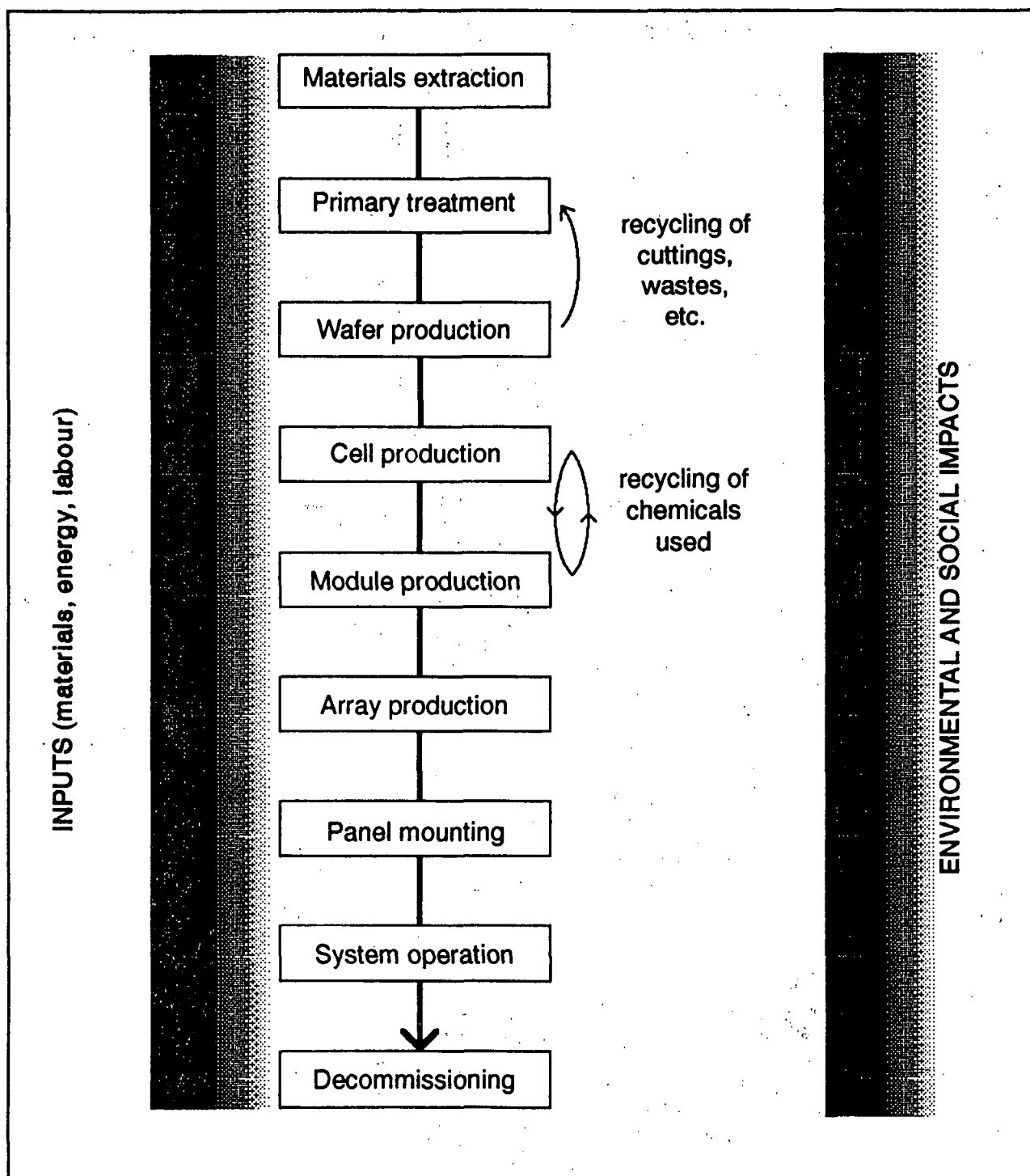


Figure 3. Main steps in PV life-cycle.



# SILICON PV ROOFTOP PANELS

## ECONOMIC IMPACTS

1. Overall cost
2. Uncertainty in cost
3. Import fraction
4. Labour content

## ENVIRONMENTAL IMPACTS

5. Resource use
6. Noise, smell and visual impacts
7. Local pollution
8. Regional pollution
9. Local climatic effects
10. Global climatic effects
11. Uncertainty in impacts

## SOCIAL IMPACTS




12. Work environment
13. Health impacts
14. Accidents
15. Benefits
16. Impacts on infrastructure

## SECURITY & RESILIENCE IMPACTS

17. Supply security
18. Sensitivity to failures
19. Sensitivity to planning errors
20. - to changes in assessment criteria

## DEVELOPMENT & POLICY IMPACTS

21. Keeping options open
22. Consistency with goals of society
23. Impact on global issues
24. Impact on national independence
25. Possibility of participation
26. Allowing different choices
27. Avoiding institution-building

-  Construction phase
-  Operation phase
-  Disposal phase

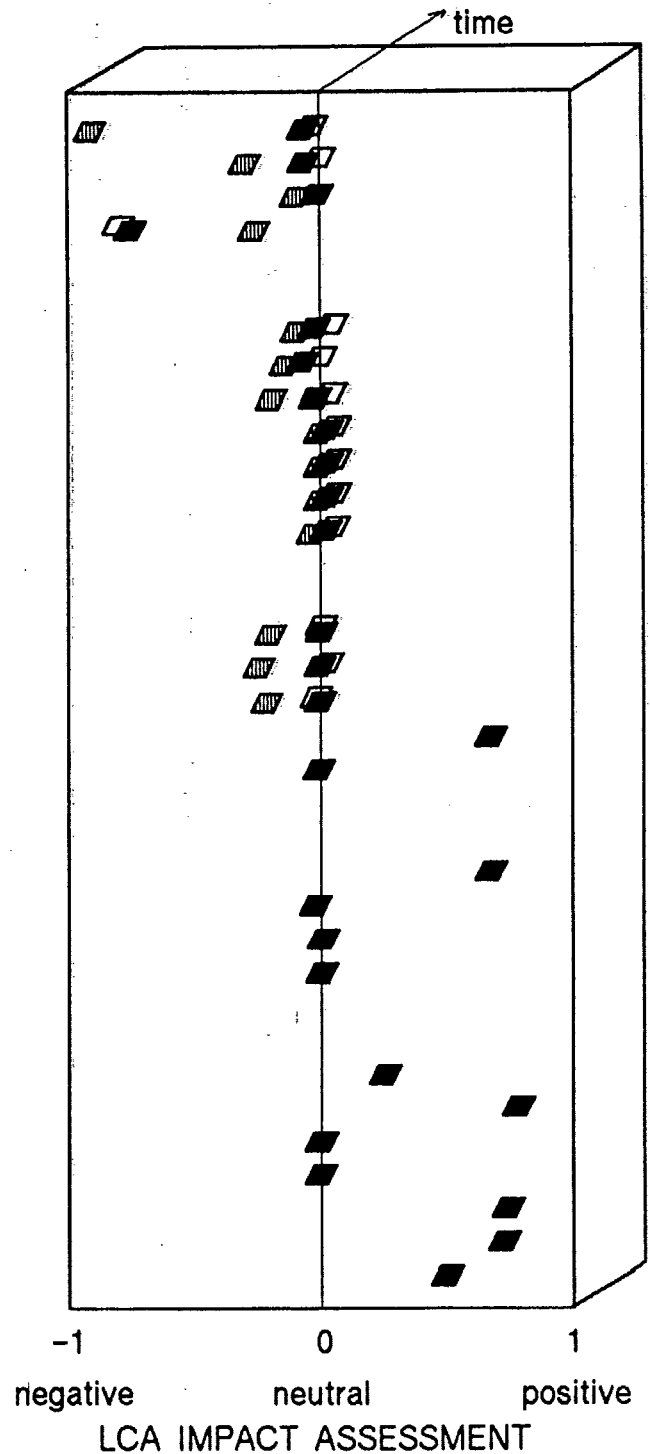


Figure 4. Rooftop solar cell panel LCA.

# COAL-FIRED POWER PLANT

## ECONOMIC IMPACTS

1. Overall cost
2. Uncertainty in cost
3. Import fraction
4. Labour content

## ENVIRONMENTAL IMPACTS

5. Resource use
6. Noise, smell and visual impacts
7. Local pollution
8. Regional pollution
9. Local climatic effects
10. Global climatic effects
11. Uncertainty in impacts

## SOCIAL IMPACTS




12. Work environment
13. Health impacts
14. Accidents
15. Benefits
16. Impacts on infrastructure

## SECURITY & RESILIENCE IMPACTS

17. Supply security
18. Sensitivity to failures
19. Sensitivity to planning errors
20. - to changes in assessment criteria

## DEVELOPMENT & POLICY IMPACTS

21. Keeping options open
22. Consistency with goals of society
23. Impact on global issues
24. Impact on national independence
25. Possibility of participation
26. Allowing different choices
27. Avoiding institution-building

-  Construction phase
-  Operation phase
-  Disposal phase

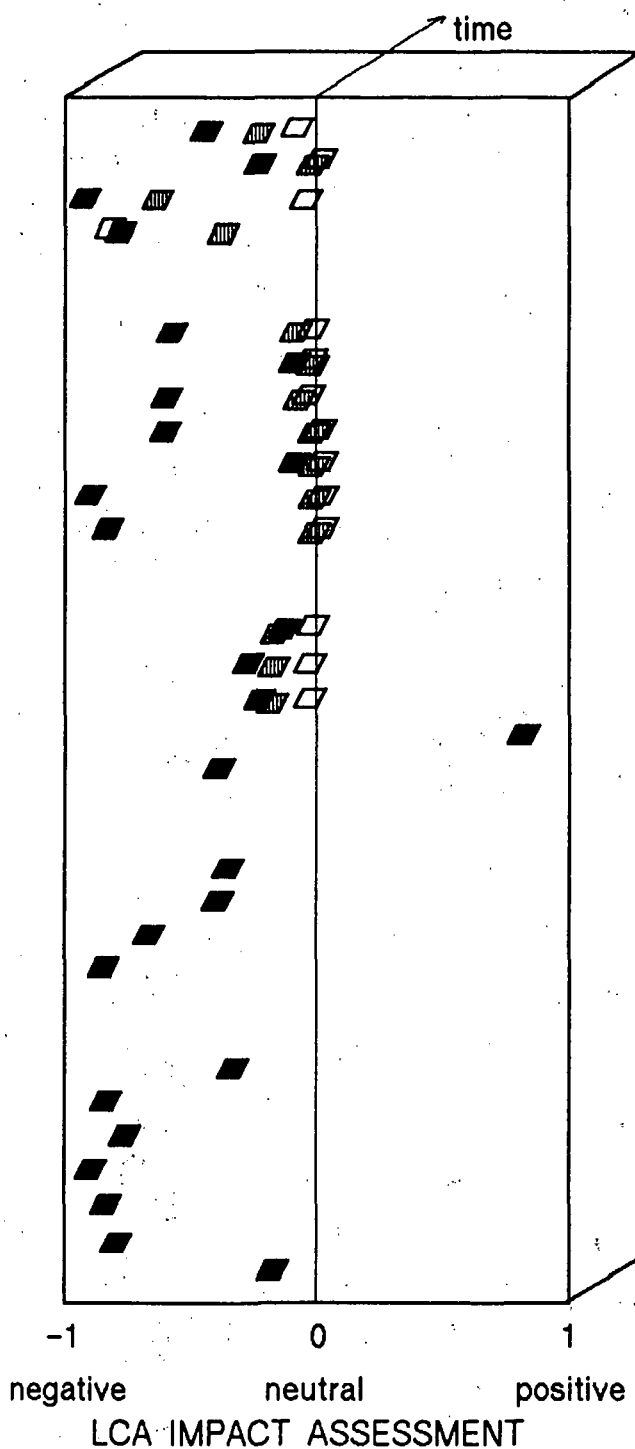


Figure 5. Coal power plant LCA.

## Appendix A.3

# NEURAL NETWORK SIMULATION OF SOLAR CELLS

Bent Sørensen

Roskilde University, Institute 2  
PO Box 260, DK-4000 Roskilde, Denmark  
fax +45 46 755 065

## SUMMARY

Because finite element calculations of solar cell behavior are rather time-consuming, especially in three dimensions, there is a need to exploit them in an optimum way. Rather than using interpolation and extrapolation from a limited set of calculations, this paper suggests that a neural network is trained on the basis of a small number of finite element calculations. It is shown that the generalization ability of the network makes such a model much more versatile than any interpolative approach, and that even small non-linear anomalies pointing to interesting structure outside the parameter interval covered by the finite element calculations are picked up by the neural network.

## 1. THE USE OF MODELS FOR OPTIMIZING SOLAR CELLS

Advances in raising the efficiency of solar cells based on monocrystalline, polycrystalline or amorphous materials have employed a fairly complex layout of the light capture and cell structure [1-3]. The identification of suitable layouts have been achieved using both models of selected processes [4,5], and also trial and error processes of experimental optimization. This paper explores the possibility of constructing theoretical models suited for optimizing complex cell structures involving many components, without having computation times blow up unmanageably.

To this end the use of trained, neural networks is explored, based upon carrying through a number of concrete examples of training (extending the work reported in [6]). The network is trained on the basis of one-dimensional finite element calculations, in order to illustrate the principles, but three-dimensional finite element calculations could as well have been used. The generalization ability is then investigated by presenting data to the network, outside the area of parameters with which the neural network was trained.

## 2. FINITE ELEMENT CALCULATION

The main parameters of a crystalline solar cell are dimensions, layout (such as placement of contacts, surface films and texture) and doping characteristics (which in turn influences recombination properties). The present model is based on a buried con-

tact silicon cell developed at University of New South Wales for pilot series production [3]. A cell efficiency above 20% has been demonstrated.

A cell with characteristics as similar to this design as feasible with the one-dimensional program used (PC-1D, see [4]) has been used as the starting point for a systematic mapping of results for parameters in a neighborhood of those corresponding to the manufactured cell. Only doping parameters were varied in this model study. There are three of those: a bulk p-type doping assumed to be uniform over the cell, a front n-type doping described by an error function diffusion model with a depth of diffusion fixed at  $4.55 \times 10^{-5}$  cm, and a uniform p-type back layer doping of diffusion depth  $3 \times 10^{-4}$  cm. The front diffusion is in the one-dimensional model thought of as describing the combined effect of contact and non-contact regions, which have very different recombination characteristics. In our model, the contacts are buried and believed to have a much reduced effect on surface electron transport and capture.

Other parameters are kept at default values of the program data file [4]. The effect of a textured front surface is simulated by a facet feature of the PC-1D program, selecting a 10  $\mu$ m facet depth and an angle of  $59^\circ$ . The path through the cell, assumed by the program's finite element calculation, is thus a curved one. Fig. 1 gives the surfaces of identical efficiency under  $1000 \text{ W/m}^2$  air mass-1.5 radiation, as function of bulk and front doping levels. The dependence on back doping is weak, and the optimum always at  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Thus this parameter is not included in the neural network simulation. The maximum efficiency in Fig. 1 is seen to be consistent with the measured one. The UNSW production cell has parameters corresponding to the upper middle region of Fig. 1.

It is worthwhile noticing, that the behaviour of the calculated efficiency in the region studied is fairly peculiar. In addition to the expected maximum at a bulk and front doping of  $10.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and  $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , respectively, there is another, narrow ridge at a bulk doping of around  $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and a front doping of about  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , with a maximum as high as the nearby regularly shaped peak. Inspecting the behavior of carrier concentrations as one moves from the left to the right hand maximum of Fig. 1, one finds that the hole density increases by some 40% near the front of the cell, but strongly decreases deeper into the cell (having dropped by nearly a factor of 4 near the back end). This reveals a higher rate of recombination and a smaller current density except at the front of the cell. In other words, the two maxima represent a fairly delicate interplay between the behavior near the surface and deeper into the cell. One should also keep in mind, that the overall variations in efficiency is only of the order of one percent over the entire parameter interval under study.

### 3. NEURAL NETWORK SIMULATIONS

A neural network aimed at behaving like the finite element model described above would have two input neurons (the front and bulk doping parameters) and at least one output neuron (the efficiency). The network used further had one hidden layer of 10 neurons. A backpropagation software package [7] was used to perform the calcula-

tions.

### 3.1 REGULARLY SPACED GRID

The training of the network were based on 9 to 36 input-output sets covering the parameter area indicated by the dashed box in Fig. 2. A much wider area of parameter data is subsequently presented to the trained network, in order to test the generalization ability of the neural network. Figure 3 and 4 show the results of this for two networks trained on the 9 and 36 evenly spaced data points shown in Fig. 2, respectively. Fig. 5 indicates what a simple interpolation/extrapolation from the input data could have achieved.

The effectiveness of using the training data has been optimized by two techniques: First, the data are transformed into differences from a typical efficiency value (20%) in the parameter region studied, in order to emphasize the structure contained in the data. Secondly, the order, in which the data are presented to the network, has been randomized. This is known to speed up the learning process, but usually does not alter the final results.

An important question is the ability of the network to generalize its application to parameter values outside the interval used for training. It is seen that the network trained with 9 data points, although excellent within the input data area, gives a smooth extrapolation and misses some strong features in the actual data. However, the network trained on 36 points seems to have "noticed" the small anomaly in the lower left area of data, and it predicts some features in the external left area, which would certainly have prompted the investigation of this area, if it had not been done already.

Another feature of the training procedure is illustrated in Fig. 6. Here the results of training by the 36 data points are shown as function of decreasing tolerance. The tolerance is a root mean square deviation between normalized training data and network results. Comparing the lowest tolerance, for which the training could successfully be carried through (Fig. 6D), with the results of slightly lower tolerances (Fig. 6C and Fig. 4), one sees that insisting on the smallest possible tolerance may actually decrease the generalisation ability of the network. This is a well known feature of neural networks, where it is customary to add noise to the data, in order that the network does not focus too much on particularities in the chosen training data set. The lesson is to keep the tolerance above the value characterizing possible structure between the data points.

### 3.2. MONTE-CARLO CALCULATION

The success obtained by randomizing the order, in which data are presented to the network, may make one suspect, that using a Monte Carlo method to select the data sets presented to the network, may provide an efficient way of training the network. If this is so, it would be helpful in dealing with multiparameter cases, where the grid approach will be much more time consuming than for the present two-dimensional pa-

parameter space, and where one might hope that the Monte Carlo method would reach a fair representation of the data more quickly.

The results of using a Monte-Carlo simulations with stochastically uniform selection of data sets within the prescribed intervals is presented in Fig. 8 and 9, for the 9 and 36 randomly chosen data points indicated in Fig. 7. It is seen that the Monte-Carlo type training is far inferior to using regularly spaced training data. As more than one set of random grid points were tried with similar results, this is not an accidental behavior.

The reason for the failure of the Monte-Carlo approach is to be found in the nature of a neural network. What the network does is to represent highly non-linear data. This is possible because of the non-linear trigger function operating at each neural node. Comparing to the lowest order extrapolation or interpolation (Fig. 5), the results of e.g. Fig. 4 or Fig. 6D clearly represent the network's ability to describe the training data as a highly non-linear function, by sensing the anomalies of higher order present in the data set.

A neural network further excels by not representing non-linearities in a polynomial fashion, likely to blow up as one goes away from the data region. The behavior of the neural network efficiency predictions further away from the data region is in all cases seen to be stable and fairly devoid of strong features or divergencies.

This behavior depends on the structure of the data set. By choosing a regularly spaced set of data, the non-linear terms represented by the network get an identical scaling, i.e. the network can be said to treat the non-regularities by difference quotients of identical definition. If on the other hand, stochastically spaced data points are used, then the non-linearities built into the network are not equivalent to those described by difference quotients, and the different scale effectively employed in different parameter regions will show up as a slower learning process and for any given number of data points a poorer representation of the actual behavior of the system.

The Monte-Carlo study thus indicates to us, that the use of regular, grid-bound training data gives a much quicker convergence of the neural network representation of the data, i.e. a much smaller number of required data in the training set, than the Monte Carlo approach.

#### 4. CONCLUSIONS

The present pilot study on a simple model may be interpreted as a quite promising point of departure for future work on neural network simulation of solar cell optimization routines. The speed gain obtained in the present study is a factor of about 1000 (running the trained network rather than the finite element program), and considerable higher gains are expected by neural simulation of three-dimensional finite element programs, because the running times of the finite element programs would increase by perhaps another factor 1000 over those of the one-dimensional program, while time-use for the application of a trained network is not significantly altered.

The overall question is of course, whether the accuracy of the neural models is sufficiently good to allow them to be used in practical applications. Here, the present study finds a high accuracy in determining the actual extremum in the parameter region considered. The other key question is, whether many simulations have to be performed for a given type of cell. If only one were needed, there would be no point in using the neural network. Practice shows, that both for educational purposes, but also in actual laboratory search for optimized cell structures, many repeated calculations within or adjacent to some prescribed parameter interval are usually performed, and thus the assistance of a neural network should be highly relevant, especially because of the generalizing ability capable of directing attention to interesting phenomena in neighboring parameter regions.

The aim is to construct networks trained on data for different types of solar cells (material, number of layers, etc.), so that the generalizing ability of the networks may be made to cover quite a wide area of cases.

This work is supported by the Danish Department of Energy (grant # 51181/93/0008).

## REFERENCES

- [1] Hamakawa, Y. (1992). Recent Advance of Amorphous Silicon Solar Cells and its Technologies. pp. 67-76 in Renewable Energy Technology and the Environment (Sayigh, ed.). Pergamon Press, Oxford.
- [2] Kazmerski, L. (1992). Photovoltaic Technology: The Status and The Future. pp. 101-113 in Renewable Energy Technology and the Environment (Sayigh, ed.). Pergamon Press, Oxford.
- [3] Green, M. and Wenham, S. (1993). Silicon cells: single junction, one sun, terrestrial, single- and multi-crystalline. In Solar cells and their applications (Partain, L, ed.). Wiley, New York. See also University of New South Wales Centre for Photovoltaic Devices and Systems Annual Report 1992, pp. 24-25.
- [4] Basore, P. (1991). PC-1D Installation Manual and Users Guide, version 3.2. Sandia Report 0516/rev. UC-274, Albuquerque.
- [5] Fichtner, W. et al. (1992). Simul 1.0 (alpha) Manual. Integrated Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- [6] Sørensen, B., (1993). Optimization of PV-cells and systems. In Proc. Energex '93 Conference, Seoul, Korea; Model Optimization of PV-cells, In Technical Digest, 7th Int. PV Science and Eng. Conference, Nagoya 1993.
- [7] California Scientific Software (1990). Brainmaker Professional.



## Figure captions

Fig. 1. Cell efficiency obtained by the finite element calculation as function of doping parameters. About 150 finite element calculations were used to construct the equal-efficiency curves, including extra dense calculations in areas of rapid change.

Fig. 2. Position of the 9 or 36 points in parameter space used to train the neural networks.

Fig. 3. Efficiencies calculated with a neural network trained on 9 regularly spaced data points. The training tolerance was 0.01.

Fig. 4. Efficiencies calculated with a neural network trained on 36 regularly spaced data points. For reasons discussed in the text, the training tolerance was taken as 0.021 rather than the lowest possible value, 0.017, for which the results are shown in Fig. 6D.

Fig. 5 An indication of, what a naive interpolation/extrapolation of the values for the 36 data points may look like.

Fig. 6. The four pictures (A-D) gives the neural network results as the tolerance is lowered from 0.100 to 0.017, the lowest value for for the training could be carried through successfully. The network was trained on the 36 uniformly-spaced data points indicated in Fig. 2.

Fig. 7. Position of the 9 and 36 data points selected for the Monte-Carlo calculations. The points are randomly distributed within the data area of Fig. 2.

Fig. 8. Efficiencies calculated by a neural network trained on the 9 randomly picked data points indicated in Fig. 7. The network was trained to the lowest possible level of the tolerance.

Fig. 9. Efficiencies calculated by a neural network trained on the 36 randomly picked data points indicated in Fig. 7.

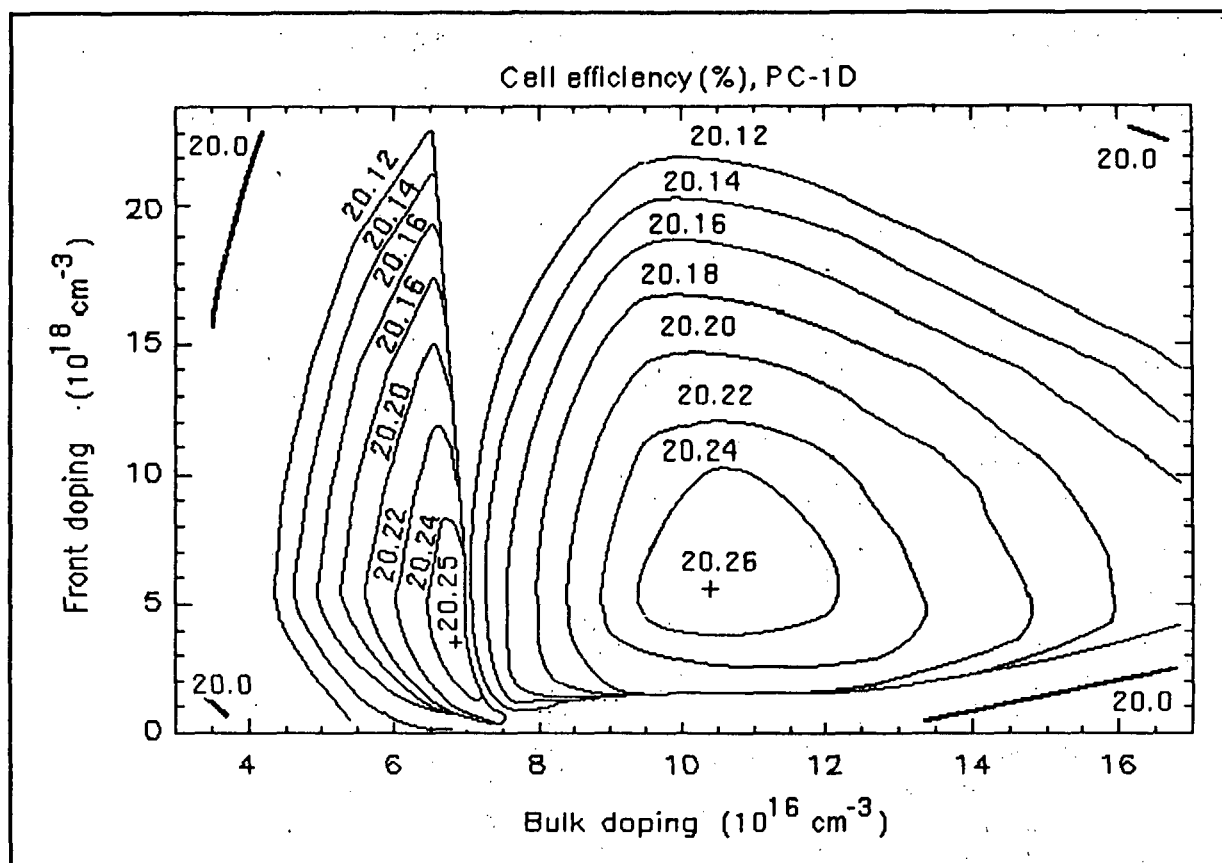


Figure 1

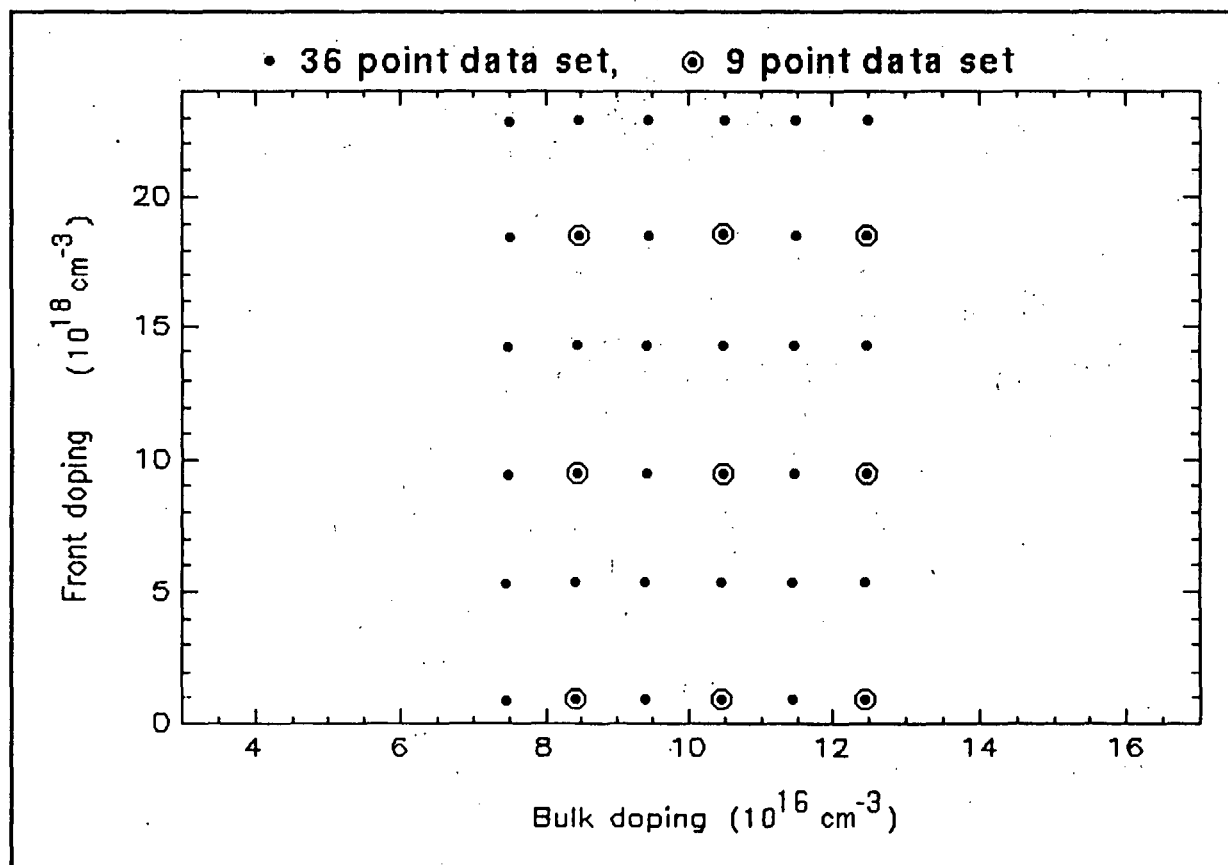


Figure 2.

Cell efficiency (%), NN grid-9 tol=0.01

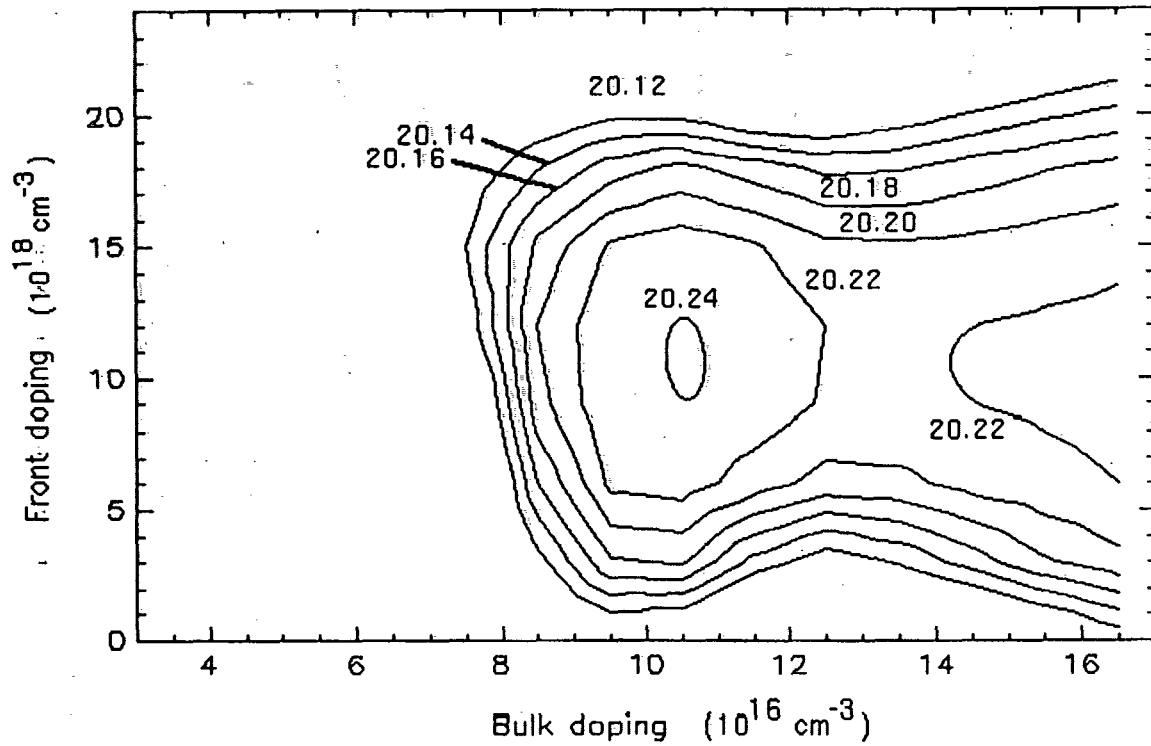


Figure 3

Cell efficiency (%), NN grid-36 tol=0.021

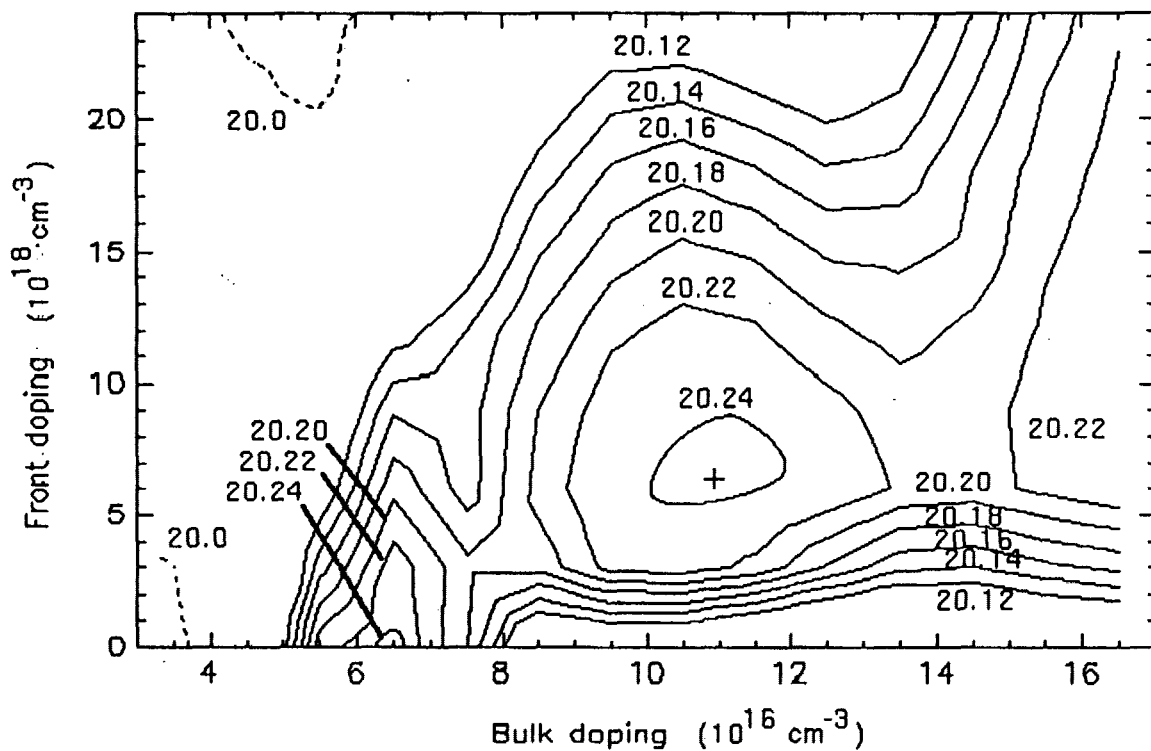


Figure 4

Cell efficiency (%), PC-1D, 36 points

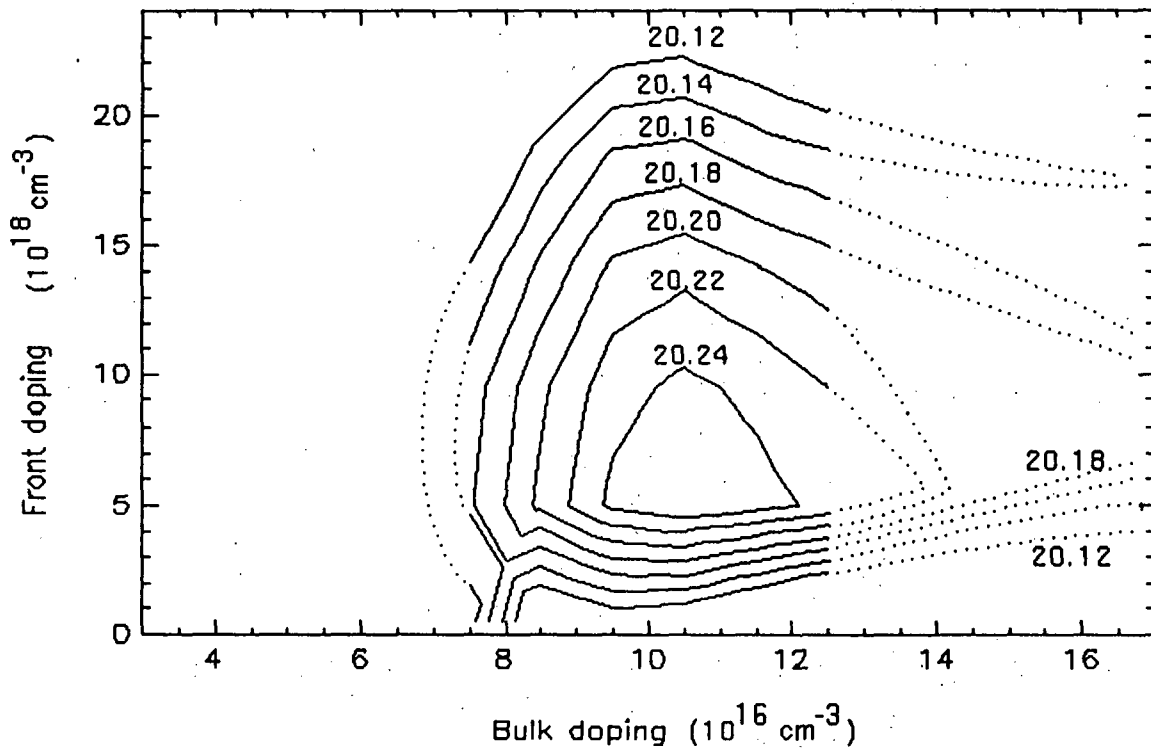


Figure 5

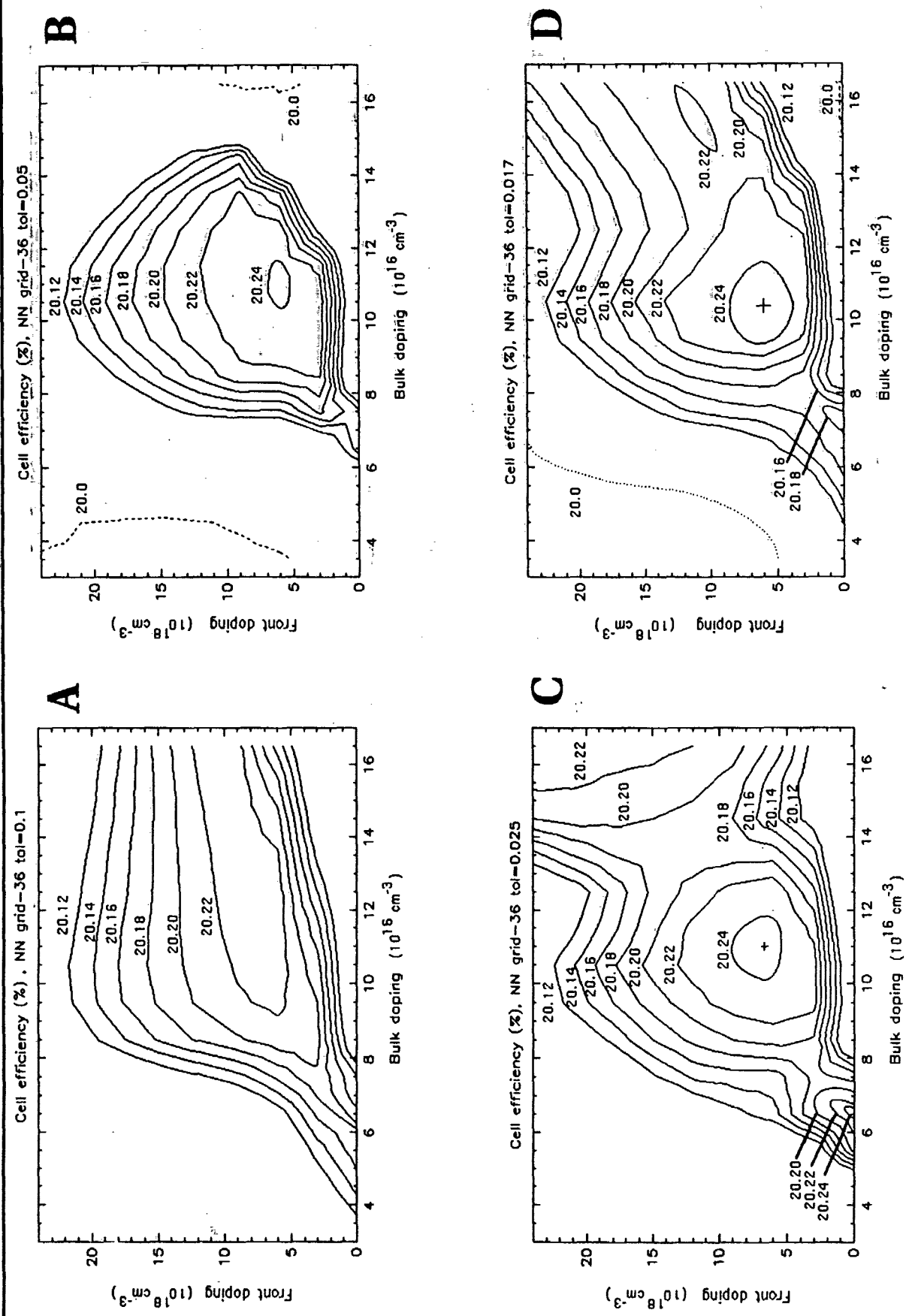


Figure 6

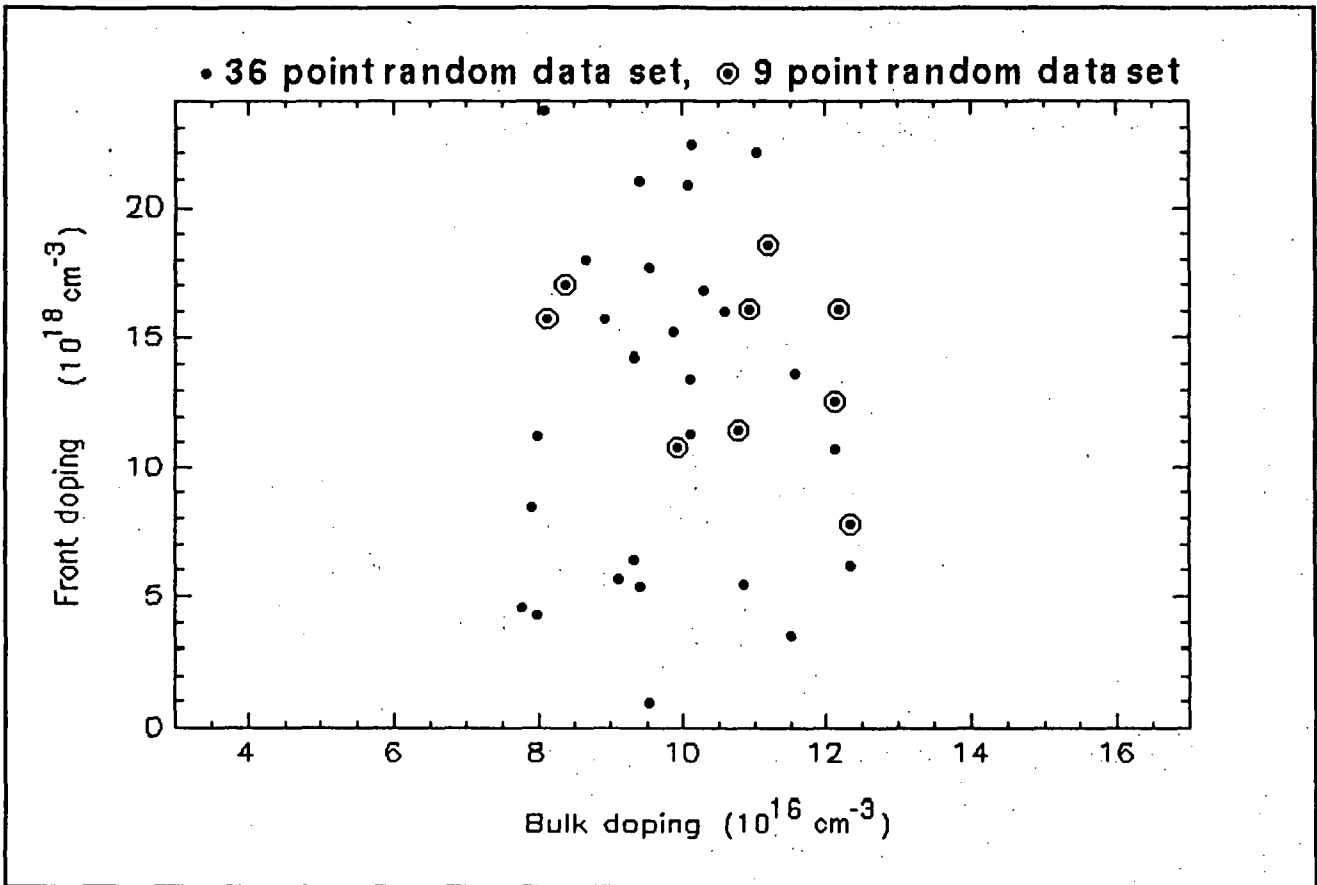


Figure 7.

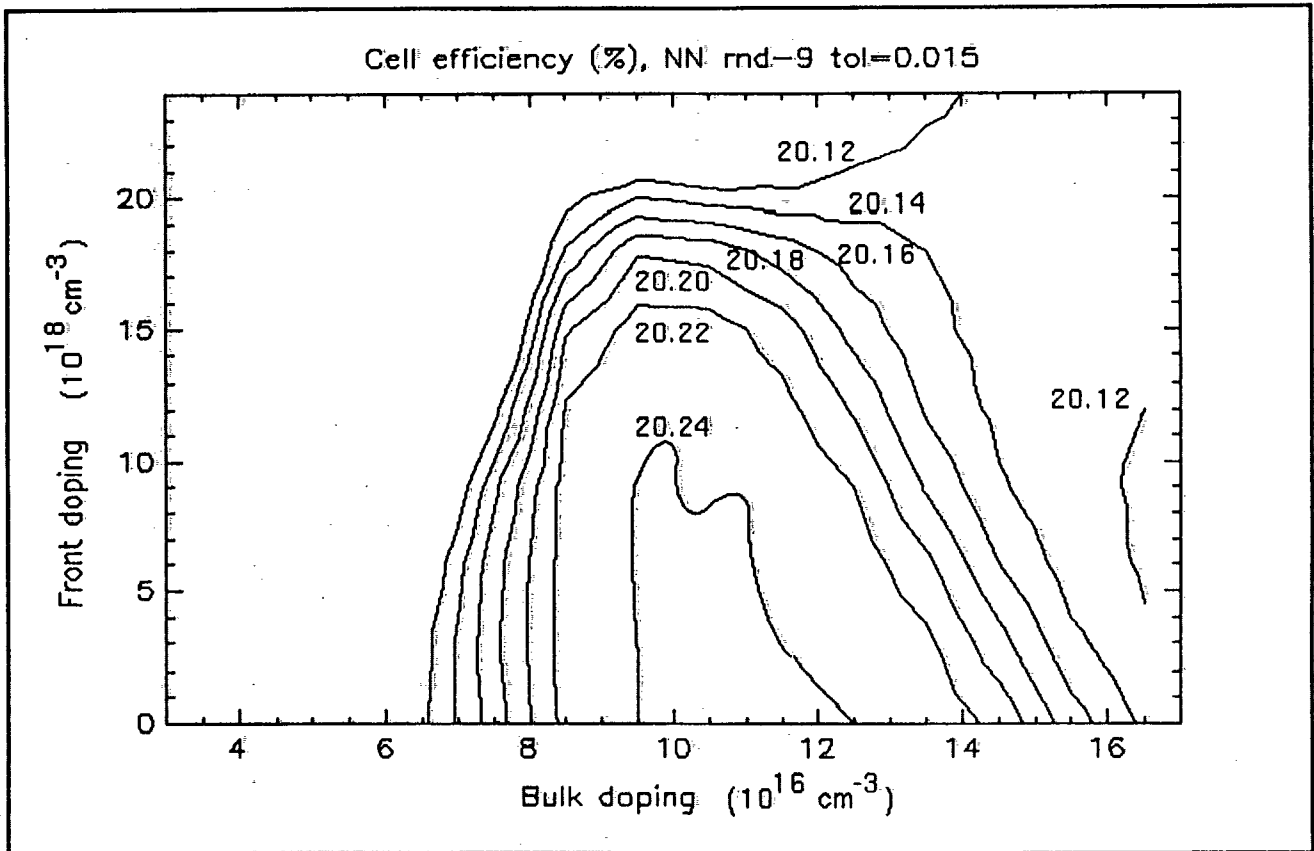


Figure 8

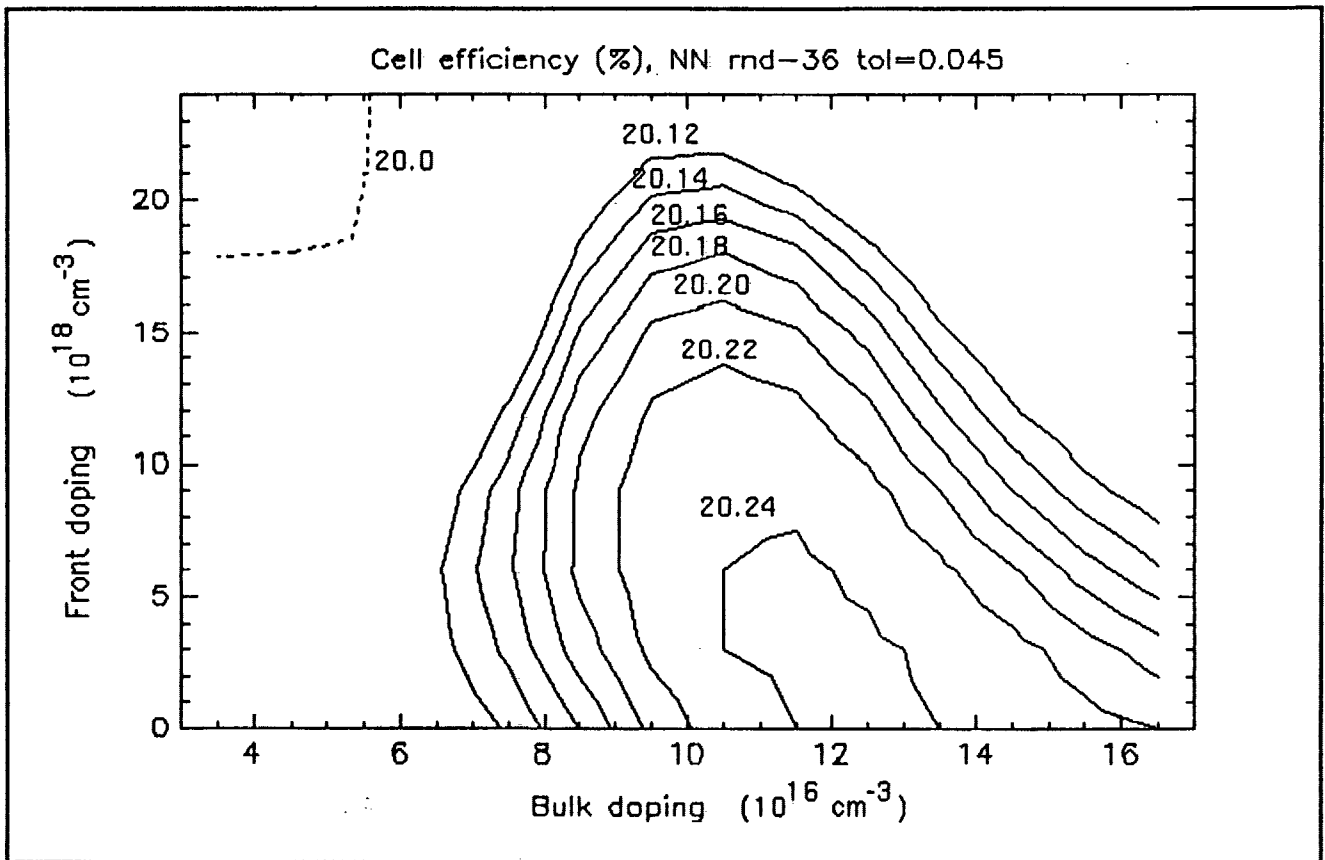


Figure 9

- 236a/93 INTRODUKTION TIL KVANTE  
HALL EFFEKTEN  
af: Anja Boisen, Peter Bøggild  
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen,  
Erland Brun Hansen
- 236b/93 STRØMSSAMMENBRUD AF KVANTE  
HALL EFFEKTEN  
af: Anja Boisen, Peter Bøggild  
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen  
Erland Brun Hansen
- 237/93 The Wedderburn principal theorem and  
Shukla cohomology  
af: Lars Kadison
- 238/93 SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (2)  
Vektorbånd og tensorer  
af: Peder Voetmann Christiansen
- 239/93 Valgsystemer - Modelbygning og analyse  
Matematik 2. modul  
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen,  
Maria Hermannsson, Allan Jørgensen,  
Ragna Clauson-Kaas, Poul Lützen  
Vejleder: Mogens Niss
- 240/93 Patologiske eksempler.  
Om særlige matematiske fænomeners betydning for  
den matematiske udvikling  
af: Claus Drøby, Jørn Skov Hansen, Runa  
Ulsøe Johansen, Peter Meibom, Johannes  
Kristoffer Nielsen  
Vejleder: Mogens Niss
- 241/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 1  
af: Bent Sørensen
- 242/93 Brovedligeholdelse - bevar mig vel  
Analyse af Vejdirektoratets model for  
optimering af broreparationer  
af: Linda Kyndlev, Kåre Fundal, Kamma  
Tulinus, Ivar Zeck  
Vejleder: Jesper Larsen
- 243/93 TANKEEKSPERIMENTER I FYSIKKEN  
Et 1. modul fysikprojekt  
af: Karen Birkelund, Stine Sofia Korremann  
Vejleder: Dorte Posselt
- 244/93 RADONTRANSFORMATIONEN og dens anvendelse  
i CT-scanning  
Projektrapport  
af: Trine Andreasen, Tine Guldager Christiansen,  
Nina Skov Hansen og Christine Iversen  
Vejledere: Gestur Olafsson og Jesper Larsen
- 245a+b  
/93 Time-Of-Flight målinger på krystallinske  
halvledere  
Specialerapport  
af: Linda Szkotak Jensen og Lise Odgaard Gade  
Vejledere: Petr Viscor og Niels Boye Olsen
- 246/93 HVERDAGSVIDEN OG MATEMATIK  
- LÆREPROCESSER I SKOLEN  
af: Lena Lindenskov, Statens Humanistiske  
Forskningsråd, RUC, IMPUFA
- 247/93 UNIVERSAL LOW TEMPERATURE AC CON-  
DUCTIVITY OF MACROSCOPICALLY  
DISORDERED NON-METALS  
by: Jeppe C. Dyre
- 248/93 DIRAC OPERATORS AND MANIFOLDS WITH  
BOUNDARY  
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski
- 249/93 Perspectives on Teichmüller and the  
Jahresbericht Addendum to Schappacher,  
Scholz, et al.  
by: B. Booss-Bavnbek  
With comments by W.Abikoff, L.Ahlfors,  
J.Cerf, P.J.Davis, W.Fuchs, F.P.Gardiner,  
J.Jost, J.-P.Kahane, R.Lohan, L.Lorch,  
J.Radkau and T.Söderqvist
- 250/93 EULER OG BOLZANO - MATEMATISK ANALYSE SET I ET  
VIDENSKABSTEORETISK PERSPEKTIV  
Projektrapport af: Anja Juul, Lone Michelsen,  
Tomas Højgård Jensen  
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 251/93 Genotypic Proportions in Hybrid Zones  
by: Freddy Bugge Christiansen, Viggo Andreassen  
and Ebbe Thue Poulsen
- 252/93 MODELLERING AF TILFÆLDIGE FÆNOMENER  
Projektrapport af: Birthe Friis, Lisbeth Helmgård,  
Kristina Charlotte Jakobsen, Marina Mosbæk,  
Johannessen, Lotte Ludvigsen, Mette Bass Nielsen
- 253/93 Kuglepakning  
Teori og model  
af: Lise Arleth, Kåre Fundal, Nils Kruse  
Vejleder: Mogens Niss
- 254/93 Regressionsanalyse  
Materiale til et statistikkursus  
af: Jørgen Larsen
- 255/93 TID & BETINGET UAFHÆNGIGHED  
af: Peter Harremoës
- 256/93 Determination of the Frequency Dependent  
Bulk Modulus of Liquids Using a Piezo-  
electric Spherical Shell (Preprint)  
by: T. Christensen and N.B.Olsen
- 257/93 Modellering af dispersion i piezoelektriske  
keramikker  
af: Pernille Postgaard, Jørn Rasmussen,  
Christina Specht, Mikko Østergård  
Vejleder: Tage Christensen
- 258/93 Supplerende kursusmateriale til  
"Lineære strukturer fra algebra og analyse"  
af: Mogens Brun Beffelt
- 259/93 STUDIES OF AC HOPPING CONDUCTION AT LOW  
TEMPERATURES  
by: Jeppe C. Dyre
- 260/93 PARTITIONED MANIFOLDS AND INVARIANTS IN  
DIMENSIONS 2, 3, AND 4  
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski



Liste over tidligere udkomne tekster  
tilsendes gerne. Henvendelse herom kan  
ske til IMFUFA's sekretariat  
tlf. 46 75 77 11 lokal 2263

- 
- 217/92 "Two papers on APPLICATIONS AND MODELLING  
IN THE MATHEMATICS CURRICULUM"  
by: Mogens Niss
- 218/92 "A Three-Square Theorem"  
by: Lars Kadison
- 219/92 "RUPNOK - stationær strømning i elastiske rør"  
af: Anja Boisen, Karen Birkelund, Mette Olufsen  
Vejleder: Jesper Larsen
- 220/92 "Automatisk diagnosticering i digitale kredsløb"  
af: Bjørn Christensen, Ole Møller Nielsen  
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 221/92 "A BUNDLE VALUED RADON TRANSFORM, WITH  
APPLICATIONS TO INVARIANT WAVE EQUATIONS"  
by: Thomas P. Branson, Gestur Olafsson and  
Henrik Schlichtkrull
- 222/92 On the Representations of some Infinite Dimensional  
Groups and Algebras Related to Quantum Physics  
by: Johnny T. Ottesen
- 223/92 THE FUNCTIONAL DETERMINANT  
by: Thomas P. Branson
- 224/92 UNIVERSAL AC CONDUCTIVITY OF NON-METALLIC SOLIDS AT  
LOW TEMPERATURES  
by: Jeppe C. Dyre
- 225/92 "HATMODELLEN" Impedansspektroskopi i ultrarent  
en-krystallinsk silicium  
af: Anja Boisen, Anders Gorm Larsen, Jesper Varmer,  
Johannes K. Nielsen, Kit R. Hansen, Peter Bøggild  
og Thomas Hougaard  
Vejleder: Petr Viscor
- 226/92 "METHODS AND MODELS FOR ESTIMATING THE GLOBAL  
CIRCULATION OF SELECTED EMISSIONS FROM ENERGY  
CONVERSION"  
by: Bent Sørensen

- 227/92 "Computersimulering og fysik"  
af: Per M. Hansen, Steffen Holm,  
Peter Maibom, Mads K. Dall Petersen,  
Pernille Postgaard, Thomas B. Schrøder,  
Ivar P. Zeck  
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 228/92 "Teknologi og historie"  
Fire artikler af:  
Mogens Niss, Jens Høyrup, Ib Thiersen,  
Hans Hedal
- 229/92 "Masser af information uden betydning"  
En diskussion af informationsteorien  
i Tor Nørretranders' "Mærk Verden" og  
en skitse til et alternativ basseret  
på andenordens kybernetik og semiotik.  
af: Søren Brier
- 230/92 "Vinklens tredeling - et klassisk  
problem"  
et matematisk projekt af  
Karen Birkelund, Bjørn Christensen  
Vejleder: Johnny Ottesen
- 231A/92 "Elektrondiffusion i silicium - en  
matematisk model"  
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,  
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen  
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 231B/92 "Elektrondiffusion i silicium - en  
matematisk model" Kildetekster  
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,  
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen  
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 232/92 "Undersøgelse om den simultane opdagelse  
af energiens bevarelse og isærdeles om  
de af Mayer, Colding, Joule og Helmholtz  
udførte arbejder"  
af: L. Arleth, G.I. Dybkjær, M.T. Østergård  
Vejleder: Dorte Posselt
- 233/92 "The effect of age-dependent host  
mortality on the dynamics of an endemic  
disease and  
Instability in an SIR-model with age-  
dependent susceptibility  
by: Viggo Andreasen
- 234/92 "THE FUNCTIONAL DETERMINANT OF A FOUR-DIMENSIONAL  
BOUNDARY VALUE PROBLEM"  
by: Thomas P. Branson and Peter B. Gilkey
- 235/92 OVERFLADESTRUKTUR OG POREUDVIKLING AF KOKS  
- Modul 3 fysik projekt -  
af: Thomas Jessen
-

261/93 OPGAVESAMLING  
Bredde-kursus i Fysik  
Eksamensopgaver fra 1976-93

262/93 Separability and the Jones  
Polynomial  
by: Lars Kadison

263/93 Supplerende kursusmateriale til  
"Lineære strukturer fra algebra  
og analyse" II  
af: Mogens Brun Heefelt

264/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2  
af: Bent Sørensen

---