



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Elproducerende solafskærmninger**

Johnsen, Kjeld; Katic, Ivan ; Schmidt-Petersen, Henning; Sørensen, Henrik; Pedersen, Ulrik ;  
Årø, Dennis

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Johnsen, K., Katic, I., Schmidt-Petersen, H., Sørensen, H., Pedersen, U., & Årø, D. (2012). *Elproducerende solafskærmninger*. SBI forlag.

### **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 us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

SBi 2012:02

# Elproducerende solafskærmninger



Statens Byggeforskningsinstitut  
AALBORG UNIVERSITET



# Elproducerende solafskærmninger

Kjeld Johnsen  
Ivan Katic  
Henning Schmidt-Petersen  
Henrik Sørensen  
Ulrik Pedersen  
Dennis Årø

Titel	Elproducerende solafskærmninger
Serietitel	SBi 2012:02
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2012
Forfattere	Kjeld Johnsen, Henrik Sørensen, Ivan Katic, Henning Schmidt-Petersen og Dennis Årø
Sprog	Dansk
Sidetæl	71
Litteratur-henvisninger	Side 70
Emneord	Solceller, solafskærmning, integrerede solcelleløsninger, energibesparelser, lameller, elproduktion
ISSN	978-87-92739-01-8
Fotos	Forfatterne hvis intet andet er angivet..
Forside	Syddansk Universitet (foto: Blendex A/S)
Udgiver	SBi Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet Dr. Neergaards Vej 15 2970 Hørsholm E-post sbi@sbi.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

# Forord

I 2020 skal 30 % af det danske energiforbrug dækkes af vedvarende energi. Et væsentligt bidrag til målet vil være, at op mod halvdelen af det danske elforbrug bliver dækket af vedvarende energi, primært vindmøller. Men vindmøllerne klarer det ikke alene, og der er derfor et stort behov for, at Danmark for alvor begynder at udnytte det potentiale, der ligger i udnyttelsen af solenergien, ikke mindst gennem solceller. Trods vores nordlige breddegrad er det påvist, at potentialet i solceller udgør op imod 20 procent af det samlede elforbrug, eller ca. 6 TWh om året. Udfordringerne er først og fremmest billiggørelse af de kendte typer solceller, som i dag pr. produceret kWh privatøkonomisk koster omtrent det dobbelte af almindelig købestrøm. En anden udfordring er, at der skal udvikles smarte bygningsintegrerede løsninger, som uden videre kobles på fremtidens bygninger og smart-grids. Den internationale produktion har for tiden en vækstrate på 40 % om året, og det kan derfor forventes, at der allerede inden for de kommende fem år vil blive så stor interesse, at virksomhederne evt. med udviklingsstøtte vil investere yderligere, således at solcellestrøm privatøkonomisk bliver rentabelt inden for fem til ti år.

Nærværende rapport redegør for resultaterne af et tidligt projekt i udviklingen af bygningsintegrerede løsninger, nemlig integrering af solceller i solafskærmninger. Det er en nærliggende tanke, at når der er størst behov for at beskytte brugerne mod solindfaldet, er der også de bedste muligheder for at opsamle og udnytte solenergien. Funktionsmæssigt er det tanken, at solafskærmningen, fx i form af brede, vandrette og drejelige lameller, styres automatisk af et system efter en funktion, der optimeres ud fra basale krav vedr. energieffektivitet samt termisk og visuel komfort.

Rapporten giver en hurtig oversigt over forskellige typer af bygningsintegrerede solcelleløsninger og beskriver de teoretiske, beregningsmæssige og praktiske erfaringer med solceller, som er integreret i vandrette lameller af en solafskærmning.

Projektet er gennemført i samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut, Teknologisk Institut, SolEnergiCentret, Servodan A/S, Esbensen, Rådgivende Ingeniører A/S, Gaia Solar A/S og Dasolas International Produktion A/S (virksomheden blev lukket i projektperioden). Projektet er støttet fra Energistyrelsen med titlen Elproducerende solafskærmninger (ENS J.nr. 1213/03-0002).

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet  
Energi og miljø  
Januar 2012

Søren Aggerholm  
*Forskningschef*

# Indhold

Forord .....	3
Indhold .....	4
Indledning .....	5
Bygningsintegrerede solceller .....	5
PV-Shade projektet .....	5
Sammenfatning .....	6
Eksisterende typer af integrerede solceller .....	7
Bygningsintegrering af solceller .....	10
Markeds- og prisudvikling i PV applikationer .....	17
Udvikling af koncepter for integrering af solceller i afskærmningselementer .....	19
Grundlæggende designkrav .....	19
Lovgivning .....	22
Markedsforhold, rammebetingelser for produktion af solcellestrøm .....	24
Designkrav anvendt i projektet .....	25
Beregningsmæssig optimering af afskærmningssystemernes funktion .....	29
PVSyst beregning af ydelse for solceller på afskærmningsslameller .....	29
Beregningseksempler med solcellelameller i PVsyst .....	33
Energimæssig analyse af PV-shade .....	36
Konklusioner og anbefalinger .....	40
Afskærmningens multifunktionelle regulering .....	41
Omkostningsfunktion eller optimeringsfunktion .....	41
Bidrag til optimeringsfunktionen .....	42
Vægtningsfaktorer i optimeringsfunktionen .....	50
Erfaringer vedrørende praktisk brug af solafskærmninger .....	56
Laboratorieafprøvning og tilpasning af afskærmnings- og reguleringssystemer .....	57
Målinger på prototype .....	57
Implementering i bygning .....	60
Test installation .....	65
Testbygning Alsion, SDU .....	65
Litteratur .....	70

# Indledning

Det er en kendsgerning, at elektricitet produceret af solcelleanlæg på verdensplan allerede i dag kan konkurrere på produktionsprisen pr. kW med prisen ved spidsbelastningseffekt i detailpriser fra forsyningsselskaberne. Dette gælder især i områder med høj solindstråling, hvor et PV-system producerer 1.500 til 1.800 kWh / kW. De højeste priser på elmarkedet, primært på sommereftermiddage, svarer nogenlunde til elpriserne ved produktion i et solcelleanlæg. Dette indebærer, at i dagtimerne om sommeren er strøm fra solcelleanlæg allerede i dag omkostningseffektivt for forbrugeren i fx Californien. I Danmark, hvor den lavere totale solstråling producerer 800 til 1.000 kWh / kW, vil der formentlig gå endnu fem til ti år, inden PV-produceret elektricitet har en konkurrencedygtig pris.

## Bygningsintegrerede solceller

Bygningsintegrerede solceller (BIPV eller Building Integrated PhotoVoltaic) ses stadigt hyppigere i moderne glasfacader og tagflader af nye bygninger. Fordelen ved disse funktionelle bygningsdele er, at de producerer elektricitet ved hjælp af solenergi og kan ændre hele den energimæssige ydeevne af en bygning til det bedre. I Danmark er udbredelsen af solceller sket meget langsomt i sammenligning med andre vedvarende energiformer. Men med de stigende udfordringer i form af klimaforandringer og heraf følgende krav til reduktioner i energiforbrug og CO<sub>2</sub>-udledning samt målsætning om at øge andelen af vedvarende energi til 30 % i 2020 vil der blive en stærkt stigende fokus på alle former vedvarende energiproduktion. Derfor kan der også forudses en stor interesse for gode eksempler på bygningsintegrerede solceller, hvor de indhøstede erfaringer hurtigt skal omsættes i nye og bedre løsninger til udnyttelse af solenergien. Gradvist vil bygningsdele og -komponenter med indbyggede solceller blive standardvarer, som helt naturligt anvendes i udformningen af nye eller renovering af eksisterende bygninger. En kraftigt stigende anvendelse af bygningsintegrerede solceller vil således være et vigtigt element for realisering af målsætningen om at gøre Danmark uafhængigt af fossile brændsler i 2050.

## PV-Shade projektet

Rapporten er resultatet af et tidligt projekt med bygningsintegrerede solceller. Der blev gjort mange nyttige og dyrebare erfaringer i forbindelse med at integrere solceller i en solafskærmning og opbygge en optimal reguleringsstrategi. Siden projektstarten er der sket en hastig udvikling i anvendelse af solceller, som er integreret i solafskærmninger, og der findes i dag en række standardprodukter, som fuldt ud opfylder de målsætninger, som blev sat ved projektets begyndelse.

Rapporten beskriver fremgangsmåden i projektet med vægt på målsætninger, analyser og beregninger, som mandede ud i en metode til optimal integreret regulering og praktisk afprøvning, både i laboratoriet og i et demonstrationsprojekt. På grund af udviklingen i det lange projektforsøg medtages desuden en del af den internationale viden, som er tilvejebragt i de seneste år, inklusive nyere eksempler på bygningsintegrerede solceller samt opdaterede økonomiske vurderinger af potentialet.



# Sammenfatning

I projektet er der udviklet et koncept for integrering af solceller i solafskærmninger og et system for integreret regulering. To prototyper blev afprøvet og evalueres under laboratorieforhold og en variant med solceller monteret på vandrette glaslameller blev demonstreret i praksis ved installation i Alsion, Syddansk Universitet. Projektets ide var at udnytte det faktum, at tidens kontor-, erhvervs- og institutionsbyggeri, med glasdominerede facader, har brug for effektive solafskærmninger. Da det ud fra æstetiske hensyn ofte har været problematisk at integrere solafskærmninger i det enkle, stilrene arkitektoniske udtryk, kunne den ekstra, miljøvenlige funktionalitet i afskærmningen være ekstra motiverende for, at arkitekten i fremtiden ville vælge udvendige afskærmninger.

Ved at integrere solceller i solafskærmningen, udnyttes det, at når der er størst behov for at afskærme brugerne mod solindfaldet, er der også de bedste muligheder for at opsamle og udnytte solenergien. Til regulering af solafskærmningen - i form af brede, vandrette og drejelige lameller - blev der udviklet en integreret reguleringsfunktion, der optimeres ud fra opfyldelsen af de vigtigste funktioner for energiforbrug samt termisk og visuelt indeklima.

Sammenfattende må det dog siges, at resultaterne ikke helt indfrie forventningerne, idet der kan drages følgende konklusioner:

- Gevinsten ved at dreje lameller og solceller optimalt (om én akse) efter solen vil i praksis højst give en forøgelse af elproduktionen på ca. 10 % i forhold til en fast hældning på mellem 50° og 90°, og vil i øvrigt næppe være ideel med hensyn til visuel komfort (blænding og udsyn)
- Tanken om at lameller og dermed solceller 'automatisk' vil blive indstillet i en gunstig ('optimal') vinkel for maksimering af elproduktionen holder kun for sydvendte facader ( $\pm 30^\circ$ )
- Ved større afvigelser fra syd vil der enten være problemer med at lamellerne giver utilstrækkelig beskyttelse mod blænding eller at de udelukker for meget dagslys (og udsyn), hvorved elforbruget til belysning stiger
- Åbningsgraden, dvs. transparent areal i forhold til samlet areal af lamellerne, har stor betydning for, hvordan lamellerne vil blive oplevet af brugerne. Tedlar-film, som ofte anvendes ved fastgørelse af solceller på glaslameller, giver ikke et klart udsyn og vil normalt ikke give et acceptabelt udsyn, når lamellerne er lukket til.
- Hvis blænding skal undgås, må åbningsgraden højst være 3-5 %, afhængigt af glastypen, og derfor må lameller med solceller altid suppleres med en anden form for afskærmning, fx gardiner
- Indbyrdes skygge mellem lamellerne kræver, at der foretages omhyggelige analyser af, hvor bredt det aktive areal skal være, og hvordan skyggerne påvirker ydelsen gennem hele året
- I det samlede energiregnskab vil integrering af solceller i lamelafskærmninger sjældent være optimalt, bl.a. fordi der i opvarmningssæsonen vil være en stor konflikt mellem ønsket om udnyttelse af passiv solvarme og dagslys med ønsket om at en høj elproduktion fra solcellerne
- Integrering af solceller i lamelafskærmninger vil sjældent være den optimale form for bygningsintegrerede solceller, og løsningen bør derfor primært vælges ud fra æstetiske/arkitektoniske overvejelser eller ud fra de faktiske muligheder i et konkret byggeri.

# Eksisterende typer af integrerede solceller

## Krystallinske solceller

Langt hovedparten af de solceller, som findes på det danske marked i dag, er krystallinske og baserede på silicium, dvs. monokrystallinske eller polykrystallinske celler. Desuden findes der ikke-krystallinske (amorfe) typer af solceller og amorfe tyndfilmssolceller, som er baseret på pulveriseret silicium. De senere år er der endvidere kommet nye typer på markedet, der ikke er baseret på silicium.

### *Monokrystallinske solceller*

En monokrystallinsk solcelle består af ét siliciumkrystal. Solcellerne er som standard sorte med en ensartet overflade. De er normalt runde i hjørnerne, men ønsker man en særlig tæt pakning i det færdige modul, kan de skæres ud i kvadrater. De enkelte celler er normalt monteret mellem to lag glas eller mellem et glas- og et plastlag. Monokrystallinske celler har den højeste virkningsgrad.

### *Polykrystallinske solceller*

Polykrystallinske solceller indeholder flere siliciumkrystaller, og de er ofte i blå nuancer og firkantede. De enkelte krystaller i solcellen kaster lyset forskelligt tilbage, hvilket giver en "levende" overflade. Polykrystallinske celler har en lidt lavere virkningsgrad pr. kvadratmeter end monokrystallinske.

Standardmoduler er ofte monteret i en aluminiumsramme, som fastgøres med bolte til f.eks. tag eller facade. Der findes også moduler uden rammer. De gøres fast direkte i glasset eller tilpasses konstruktionen på en glasflade. De rammeløse moduler er især velegnede, hvis solcellerne skal integreres i taget eller facaden og ikke blot placeres ovenpå.

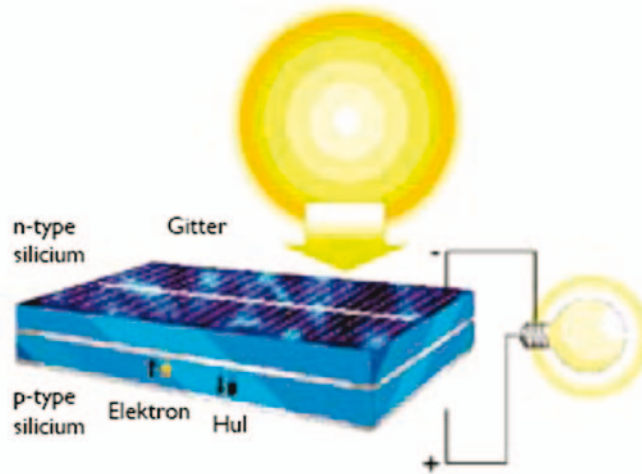
## Solcellens funktion

En solcelle er kendetegnet derved, at den er i stand til at omsætte lys til elektricitet gennem en fotoelektrisk proces. Det engelske ord for denne proces er photovoltai**c**, der er baggrunden for den typisk anvendte forkortelse PV.

Hovedparten af de solceller, der hidtil er markedsført i Danmark, anvender grundstoffet silicium som basismateriale. Dette silicium oparbejdes til blokke af krystaller, kaldet *wafers*, der efterfølgende saves i tynde skiver, der udgør det aktive lag i en solcelle. Traditionelle solceller betegnes ofte som 'krystallinske', hvilket refererer til det forhold, at de baserer sig på silicium i en krystalstruktur. En solcelle består af to lag silicium, der som følge af den bearbejdning, de har undergået i fremstillingsprocessen, har forskellige egenskaber:

- n-type silicium er tilført fosfor for at skabe overskud af frie elektroner omkring siliciumatomet.
- p-type silicium er tilført bor for at skabe et underskud af elektroner, de såkaldte 'huller'.

Figur 1 viser en principskitse for opbygning og virkemåde for en solcelle. Når lyset rammer solcellen, vil frie elektroner fra n-type siliciumlaget forsøge at vandre ind i hullerne i p-type siliciumlaget. Elektronerne vil dog blive opfanget af det metalgitter, der er påført solcellens forside.



Figur 1. Opbygning og virkemåde af en krystallinsk solcelle.

Her er vandringsretningen langt lettere end gennem siliciummaterialet. Metalgitteret er forbundet med solcellens bagside, så elektronernes vandring kan fortsætte og skabe en strøm uden nogen form for mekanisk påvirkning. Dette betegnes en fotoelektrisk proces.

Solcellen udnytter såvel direkte sollys som diffust lys, hvilket er forklaringen på, at et solcelleanlæg også producerer elektricitet på en overskyet dag, omend dette er i mindre mængder end på en dag med solskin. Solcellerne serieforbindes til solcellepaneler, også betegnet som solcellemoduler, som sammensættes til solcelleanlæg i forskellige størrelser.

### Tyndfilmssolceller

Tyndfilmssolceller er betegnelsen for en relativt ny type af solceller, der på en række områder vedrørende produktionsmetode og materialevalg adskiller sig fra de traditionelle, krystallinske solceller.

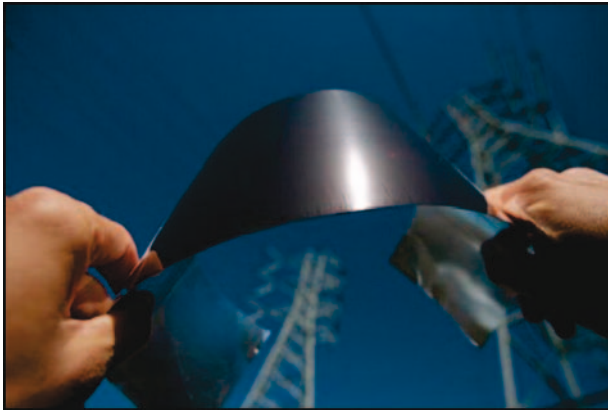
Helt generelt kan det siges, at tyndfilmssolceller er billigere at producere end krystallinske solceller; men til gengæld er virkningsgraden, altså den mængde elektricitet, der bliver produceret ved en given indstråling, lavere. Dette betyder med andre ord, at der ved anvendelse af tyndfilmsmoduler kræves et større aktivt areal for at frembringe en given årlige elproduktion. Tyndfilmsmoduler er derfor specielt egnede til anvendelse på steder, hvor der ikke er begrænsninger med hensyn til areal, og de ses derfor også typisk anvendt i store solcelleparker opført på marginaljord. Er der derimod tale om et begrænset til rådighed værende areal, høje jordpriser eller et generelt ønske om at maksimere den mulige elproduktion, vil det stadig være krystallinske solceller, der vil være det oplagte valg. Tyndfilmssolceller og amorfe og ikke-krystallinske typer.

De først udviklede tyndfilmssolceller var baseret på amorft silicium (a-Si), og senest er der kommet solceller af bl.a. kobber-indium-selen (CIS) og cadmium-tellurid (CdTe). De har et lavt materiale- og energiforbrug i fremstillingen. Siden 2005 er deres markedsandel blevet mere end fordoblet. Den fotoaktive halvleder er i dette tilfælde amorft silicium (formløst eller ikke-krystalliseret silicium), hvorpå der dampes et bærende underlag, oftest glas. Materialeforbruget er lavt, og det giver en betragtelig energibesparelse ved fremstillingen sammenlignet med krystallinsk silicium. Amorft silicium er langt den mest udviklede teknologi. Effektiviteten er imidlertid en del lavere end med krystallinske solceller. Amorfe eller mikromorfe solceller kan fås i mange former.

Der findes også solcellemoduler af metalfolie og kunststof, som i modsætning til glasmoduler kan bøjes uden at tage skade. Farven er rødligbrun til sort.

En anden type er CIS-tyndfilmssolceller (Cu = kobber, I = indium, S = selen), som er en siliciumfri teknologi. Farven er sort, og deres effektivitet kan sammenlignes med krystallinske celler. De er meget velegnede til nettilsluttede anlæg.

En del fabrikanter søger desuden at udvikle fleksible solcellemoduler, der eksempelvis kan bøjes og dermed tilpasses en krum overflade. I disse sammenhænge er det også hovedsageligt CIGS teknologien, der har fundet anvendelse. Et eksempel på denne type moduler ses på Figur 2.



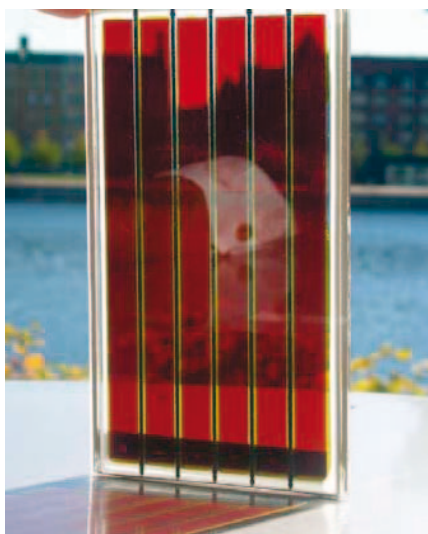
Figur 2. Flexibelt CIGS modul.

Kobber indium (gallium) selen (CIGS – CIS) udmærker sig ved at være den tyndfilmstype, der udviser højest virkningsgrad, typisk i intervallet 7-11 %. Typen fremstilles i varianter med og uden gallium og betegnes derfor CIGS henholdsvis CIS. Typisk er en del aktivt solcellemateriale fjernet fra modulet, og ydelsen bliver derfor reduceret under alle driftsforhold. Det er svært at sige noget generelt ud fra de sparsomme erfaringer, men et enkelt design er vigtigt, hvis prisen skal holdes nede.

#### *PEC cellen*

PEC cellen, den fotoelektrokemiske solcelle, er en helt speciel type tyndfilm-celle. Der har været forsket i PEC cellen igennem mange år, men de banebrydende resultater er opnået indenfor de sidste 10 år af den schweiziske kemiker, professor Michael Grätzel fra universitetet i Lausanne. PEC cellen er billig at fremstille, er i dag udviklet i størrelser på 1 m<sup>2</sup> med en ydelse i laboratorieforsøg på 7-8 %.

PEC cellen virker principielt som fotosyntesen. Når en proton rammer farvestoffet (det får tilført energi) overføres en elektron til titandioxiden. Herefter bevæger elektronen sig gennem titandioxidlaget – anastaselaget – hen til kontakten tindioxid SnO<sub>2</sub>. Farvestoffet opsamler den manglende elektron fra elektrolytten. På bagsiden sker der den modsatte reaktion, herved bevæges elektronerne fra bagsideelektroden til forsideelektroden. PEC cellen består af et halvledermateriale (elektroden) i form af titandioxid TiO<sub>2</sub> samt et farvestof. Titandioxid er velkendt som bestanddel i hvid maling og tandpasta. Titandioxiden og farvestoffet konstrueres i et sandwichelement mellem to lag glas, det yderste er tyndt mens det inderste oftest er hærdet. Cellerne serieforbinderes.



Figur 3. Eksempel på transparent PEC-celle udviklet ved Teknologisk Institut. Den består af titandioxid, der er et hvidt translucent pulver og et farvestof indkapslet imellem to stykker glas. Ved regulering af titandioxid og farvestof kan PEC-cellen fungere som filter til at regulere lyset.

Tabel 1. Egenskaber for forskellige typer af solceller.

Effektivitet i %	Monokrystallinsk	Polykrystallinsk	Amorfe/ tyndfilm
Laboratoriecelle	Ca. 24	Ca. 20	Ca. 16
Typisk siliciummoduler	12-15	10-13	4-9
Form	Runde el. kvadratiske	Kvadratiske	Smalle striber
Farve	Sort/mørkegrå/blålig	Blålig, changerende	Sort/mørkebrun
Årligt udbytte ca.	120 kWh/m <sup>2</sup>	100 kWh/m <sup>2</sup>	50 kWh/m <sup>2</sup>
Fald i modulydelse ved 1° temperaturstigning	Ca. 0,5 %	Ca. 0,5%	Ca. 0,2 %
Relativ pris pr. m <sup>2</sup>	Høj	Mellem/høj	Lav

## Bygningsintegrering af solceller

Solceller der ikke kun har en funktion som strømproducerende element, men som også kan indgå som en afskærmning i klimaskærmen, er afprøvet i adskillige projekter i ind- og udland. Fordelen ved denne type bygningsintegration af solceller er, at de steder hvor man normalt har behov for solafskærmninger på bygninger, er der gode lysforhold. Derfor vil der også være en god elproduktion fra solcellerne, hvis de er en integreret del af afskærmningen. Meromkostningen til solcellerne vil normalt også være lavere end i et separat monteret solcelleanlæg. Principielt kan man inddele de eksisterende ansystemtyper i følgende kategorier, efter virkemåde:

- 1 Moduler integreret fast i klimaskærmen, evt. med mellemrum mellem de enkelte solceller. Ikke retningsselektiv skygning.
- 2 Moduler integreret fast i klimaskærmen med retningsselektiv skyggefunktion.
- 3 Udvendigt monterede, faste moduler
- 4 Udvendigt monterede drejelige/flytbare moduler
- 5 Solceller monteret bag glasfacade

Nedenfor gives eksempler på de 5 systemtyper.

### Moduler integreret fast i klimaskærmen

Denne systemtype (1) er der gennemført flest af. Et godt eksempel er Brundtland Centret i Toftlund, hvor solceller er monteret som atriumtag, så



der opnås en fast dæmpning af den del af sollyset der kommer gennem panelerne. Modulerne er delvis transparente. Generelt er denne anlægstype uproblematisk, men man skal som altid sørge for at undgå skygge fra én række moduler til den næste. Der er derfor anvendt dummy solceller i en del af panelerne. Sammen med afstanden mellem cellerne, betyder det, at ydelsen per kvadratmeter ikke er så høj som for standardpaneler.

Figur 4. Atriet i Brundtland Centret i Toftlund. De delvis transparente solceller er monteret i taget af atriet, så der opnås en fast dæmpning af den del af sollyset, der kommer gennem panelerne.

### *Mønstret solafskærmning med solceller*

Solcellerne i Brundtland Centret er indbygget i termoruder i atriets tag og er udformet, så de tjener som solafskærmning. Den matte folie, der er brugt i forbindelse med lamineringen af tagmodulerne, udvisker solcellernes kanter og skaber en jævn skygge på gulvet i atriet. Udover at producere el og give skygge i atriet, bidrager solcellerne med et varmetilskud fra bagsiden af panelerne til atriet.

Kun cirka halvdelen af solcellerne i taget er aktive. De resterende celler ligger i skygge en stor del af året, og deltager derfor ikke i el-produktionen. De er opsat for at skabe et ensartet mønster i taget. Solcellerne er forbundet vandret. Det vil sige, at skyggen får dem til at sætte ud, én række ad gangen, uden at det berører produktionen fra de øvrige celler i modulet. Der er således ikke flaskehalse i systemet – blot et reduceret udbytte, som er proportionalt med det skyggede areal.

### Translucente solceller

Der findes på markedet specielle perforerede solceller som er delvis gennemsigtige, idet der er fjernet smalle striber af det aktive materialer (som vist i figur 5. ). På afstand vil moduler med denne type solceller se ud som en stærkt tonet røde.



Figur 5. Eksempel på fast integrerede solceller, til venstre i et glastag, hvor solcellerne er opbygget i smalle striber, således at glastaget forbliver transparent (Schott Solar), og til højre i afgrænsede solcellemoduler, der filtrerer lyset..



Figur 6. Anvendelse af solceller i ovale ovenlys på indskolingshuset Lærkelængen i Albertslund.

Generelt er der udviklet mange løsninger til integration af solceller i ovenlys. Fordi en stor del af lyset i Danmark er diffust lys, har hældningen på solcellefladerne ikke så stor betydning på årsbasis. I vintermånederne modtager en vandret flade begrænset lys, mens den om sommeren modtager mere end en lodret flade mod syd.

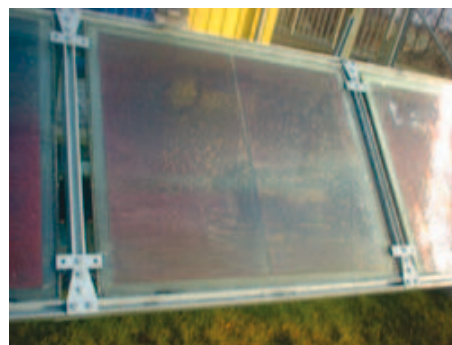
Figur 6 viser et andet eksempel på solceller i ovenlys fra indskolingshuset Lærkelængen fra 1998, som hører til Holsbjergskolen i Albertslund. Udefra kan man tydeligt se solcellerne, der er integreret i ovale ovenlys placeret på toppen af to keglestubbe på bygningens tag. Indefra opleves solcellerne som et dekorativt indslag på grund af de skyggemønstre, de kaster på gulve og vægge. For at øge el-produktionen er der desuden opsat solcellepaneler på taget af et skur. Lærkelængens samlede areal med solceller er af pædagogiske grunde valgt, så det kan dække el-forbruget i et typisk enfamiliehus.

#### *Fakta om Lærkelængen*

Den beregnede årlige ydelse fra anlægget er på 880 kWh og 575 kWh fra de to taglys og 1260 kWh fra modulerne på skurets tag. Lærkelængens solcelleanlæg er etableret som tre separate anlæg med hver sin veksleretter. Det skyldes, at de tre større flader med solceller i ovenlysene og på skurets tag har forskellig orientering og hældning og dermed forskellig strålingsintensitet.

### Moduler integreret fast i klimaskærmen med retningssektiv skyggefunktion

Denne type (2) er sjældent set i praksis, men der har været gennemført et EU projekt med medvirken af Teknologisk Institut og en tysk fabrikant (VEGLA, nu en del af Saint Gobain Glas), som resulterede i nogle prototypemoduler med specielle egenskaber, se figur 7. Der er tale om smalle striber af tyndfilmceller under et særligt linsesystem som koncentrerer lyset på cellerne ved visse solvinkler, men lader det meste slippe igennem til bygningen ved andre vinkler.

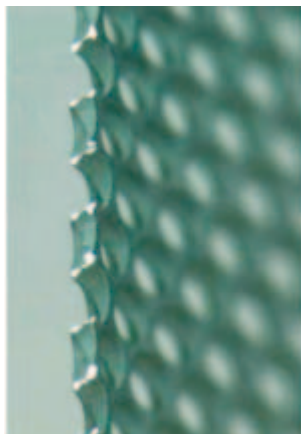


Figur 7. Forsøgsmoduler med integrerede tyndfilm og 'linsesystem', der koncentrerer sollyset.

I et andet projekt har Teknologisk Institut forsøgt at indbygge PEC solcelleprojekt de samme egenskaber i deres solceller, med henblik på indbygning i vinduer. Der har også været forsket i holografiske koncentratorer med samme linsevirkning som for VEGLA vinduerne, men så vidt vides findes der endnu ingen tilgængelige produkter af denne type med integrerede solceller.

### Mikrolameller i rustfrit stål, Microshade

En anden type af afskærmning med mikrostruktur er opbygget af transparente bånd i rustfrit stål med mikrolameller. Båndene, der monteres indvendigt på det yderste glas i en 2- eller 3-lags lavenergirude under produktionen, består af mange små perforeringer, der er vinklet, så de skærmer for direkte sollys samtidig med, at det frie udsyn bibeholdes. Afskærmningen af strålingen er således selektiv, både i forhold solens højdevinkel og i forhold til azimutvinklen mellem facaden og solen. Mens afskærmningsfaktoren ved normalstråling er ca. 0,63, er den ca. 0,25 på en sommerdag (anvendt i en 2-lags energirude). Afskærmningen er derimod ikke spektralt selektiv i transmittansen for mikrolamelstrukturen, hvilket betyder at reduktionen i solvarme og lys er ens.



Figur 8. Mikroskopi foto af mikrolamellernes struktur. Hullerne i stålfolien er skåret, så transmittansen afhænger af både azimut- og højdevinkel for solen.

Figur 8 viser et mikroskopi-foto af strukturen i mikrolamellerne. Vinklen af åbningerne er bestemmende for, hvor meget af den direkte stråling der passerer fra en given retning. Den typiske vinkel er 16°, men lamellerne fås også med en vinkel på 23° for mere afskærmning og 40° for anvendelse tagvinduer.



Afskærmningsprincippet, der er udviklet i Danmark, findes med flere typer mønstre i mikrostrukturen. De rustfrie stål-bånd, der er 70 eller 140 mm brede og har en tykkelse på mindre end 0,2 mm, absorbere en del af solvarme, hvorved de vil udvide sig mere end glasset. Derfor er de kun klæbet på glasset langs den ene kant, således at de kan udvide sig uden problemer.

Figur 9. Afskærmning med mikrolameller i bånd af rustfrit stål. Mikrolamellerne kan udføres med flere mønstre (Photosolar).

### Powershade

Ud over, at Microshade i sig selv er et interessant afskærmningprincip, er systemet spændende fordi der arbejdes på at integrere solceller i systemet, sådan at hele den faste mikrostruktur dækkes af solcellefilm. Produktet hedder PowerShades og er patenteret i Europa, Japan og USA.

Fordelen ved anvendelsen af solafskærmninger, der er integreret i selv ruden har den fordel, at de ikke kræver ekstra vedligeholdelse. Ulempen er, at de reducerer dagslyset permanent. Forskellen i transmittans for solvarme og lys skyldes udelukkende energirudens selektive belægning. Ved typer, som absorberer meget af solvarmen, vil den indvendige rude desuden blive varm, hvilket kan være et problem i tilfælde, hvor der er arbejdspladser tæt ved facaden.

### Udvendigt monterede, faste moduler

Denne type afskærmning (3) er der gennemført en del projekter med, enten med brug af standardmoduler, eller med brug af lameller med indbyggede solceller. Sidstnævnte har været testet af Teknologisk Instituts Prøvestationen for Solenergi i forbindelse med et projekt sammen med Gaia Solar og Alu-PV (Se måleresultater).



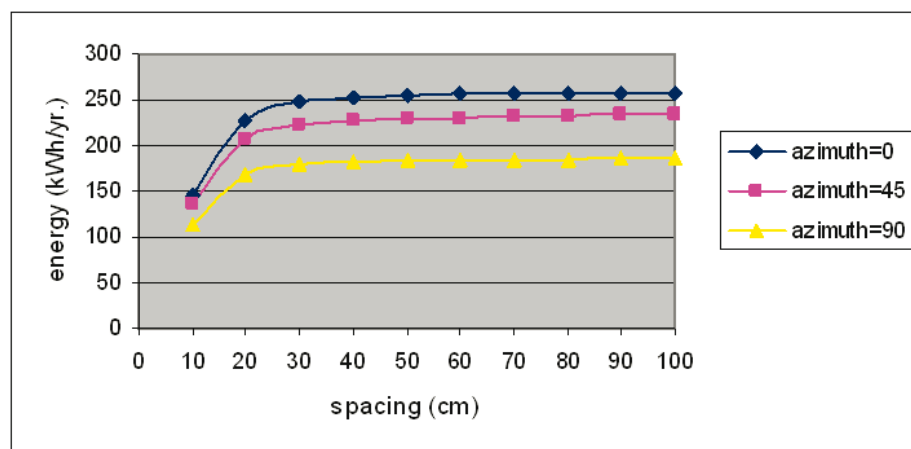
Figur 10. Billederne viser ALU PV systemet i færdig udførelse i Studenterhuset i Herning opført i foråret 2003. Projektet, som er støttet af Energistyrelsens "BIPV program", er blandt andet en demonstration af dette projekts udviklede Al lameller. Billederne viser ALU PV systemet i færdig udførelse.



Da solcellerne fylder hele fladen, reguleres lyset ved at øge eller mindske afstanden mellem modulrækkerne i projekteringsfasen. Ulempen er at man ikke kan se ud af bygningen hvis elementerne er monteret i øjenhøjde. Til gengæld er konceptet ret enkelt og robust, da der ikke er nogen bevægelige dele.

Ud fra hollandske og danske erfaringer anbefales en indbyrdes afstand på solcellelamellerne på min. 3 x bredden for at undgå alvorlig indbyrdes skyggevirksomhed ved montage på facader. Studenterhuset i Herning et eksempel på denne anlægstype, se figur 10. Dette projekt, som var støttet af Energistyrelsens 'BIPV program', er blandt andet en demonstration af dette projekts udviklede aluminiumslameller, som bestod af 10 cm x 10 cm polykrystallinske celler monteret med plastfilm. Studenterhuset er opført i foråret 2003.

I forbindelse med dette projekt blev der gennemført en beregning af betydningen af de indbyrdes afstande og skyggevirksomhed, se figur 11. Der var her tale om ca. 10 cm brede lameller.



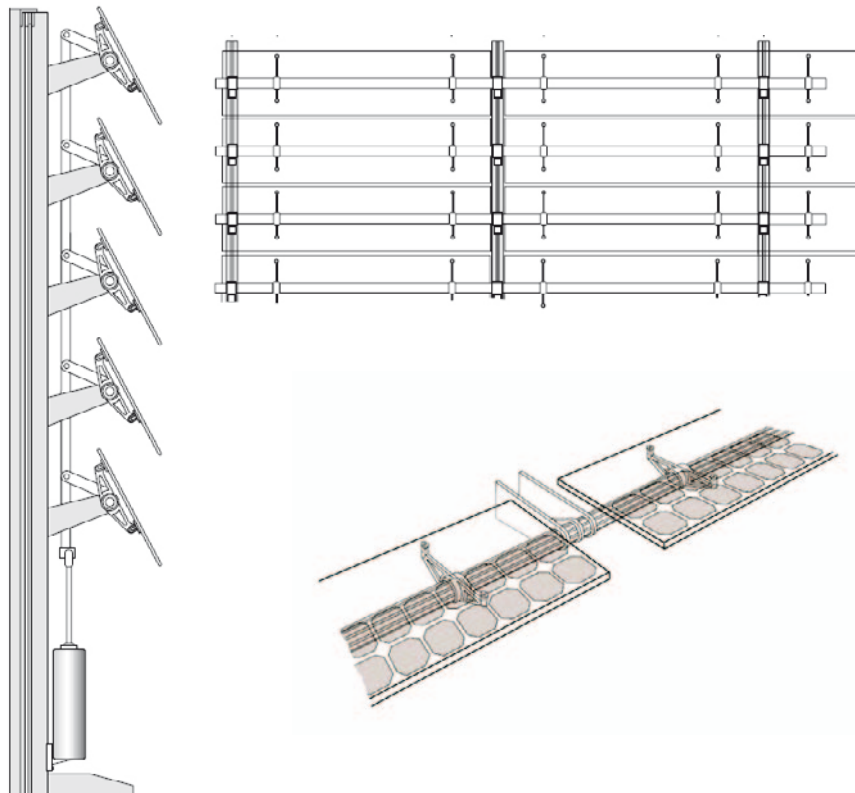
Figur 11. Beregnede energiydelse af 10 solceller på 10 cm brede lameller som funktion af lamelafstand og orientering (azimut for vinduet).



Figur 12. Wirtschaftshof kontorbygning i Linz (arkitekt H. Schimek) er et eksempel på en kombineret funktion af solafskærmning dagslysudnyttelse og PV. De øverste lameller er konstrueret som lys-dirigerende elementer, der øger dagslysudnyttelsen. Arealet af solcellerne er i alt ca. 250 m<sup>2</sup>, hvilket giver en elproduktion på 15.900 kWh eller ca. 40 % af bygningens elforbrug.

### Udvendigt monterede drejelige/flytbare moduler

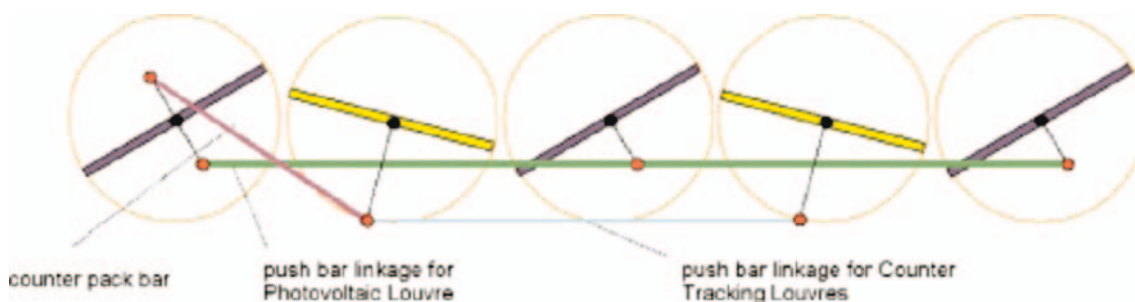
Type 4 er så vidt vides ikke set herhjemme endnu, med det engelske firma COLT fabrikere for eksempel drejelige lameller med solceller. Der er tale om sofistikerede systemer hvor hele anlægget eller dele heraf kan regulere lamellernes vinkel. For at undgå at lamellerne skygger for underliggende solceller, er der ikke monteret solceller på den bageste del af lamellerne.



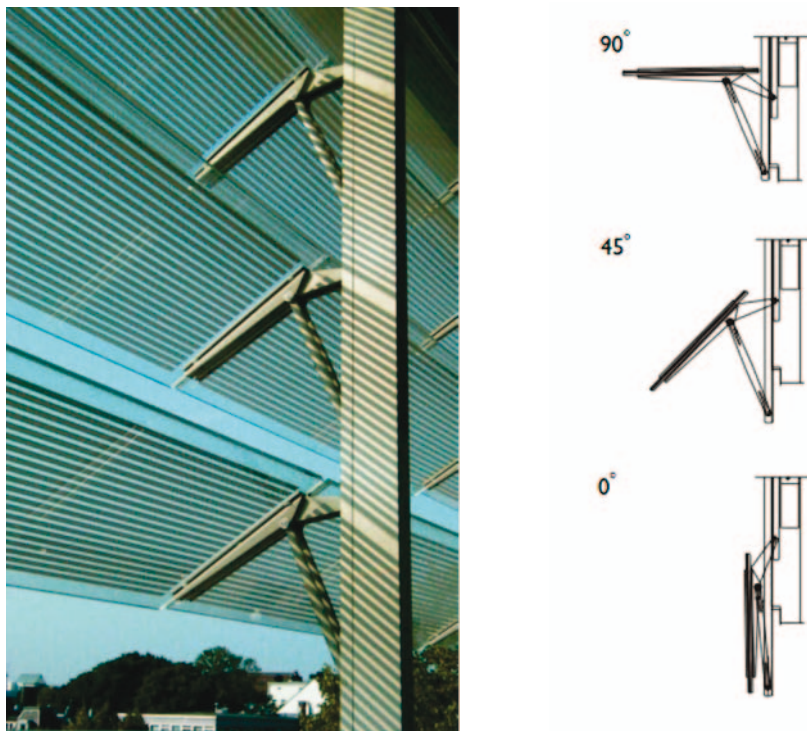
Figur 13. Eksempel på drejelige lameller med solceller (Colt).

I følge et hollandsk studium er fordelene ved den mekaniske bevægelse en op til 10 % højere el-produktion (Kaan H. F., Reijenga T. H., 1998), samt at man kan regulere udsynet. Man må dog regne med en lavere produktion hvis brugerne aktivt kan sætte vinklen, fordi den så ikke vil være optimeret efter at opnå højst mulig el-produktion.

For at undgå at skygger fra lamel til lamel begrænser strømmen gennem hele serieforbindelsen, har det været foreslået at lade hver anden lamel dreje modsat som vist på figuren (Klotz F. H., 1993), og (Zentrum für Sonnenenergie, 2006) se figur 14. Herved mister man 'kun' ydelse fra de lameller der drejer væk fra solen, men mekanikken bliver lidt mere kompliceret, og der misteres en del af det potentielle, aktive areal.



Figur 14. Eksempel på forsøg med at undgå indbyrdes skygger mellem lamellerne på afskærmninger med integrerede solceller. Hver anden lamel drejer lidt bort fra solen, hvorved der misteres en del i solintensitet og ydelse. Desuden vil afskærmningen næppe fungere optimalt som solafskærmning, der skal skærme af for solvarme og blænding.



Figur 15. Et problem med drejlige glaslameller er, at det bevægelige system ofte ser meget klodset ud, især indefra. Her et eksempel på et mere elegant system, men med begrænset spændvidde (Colt).

### Solceller monteret bag glasfacade

Denne systemtype (5) er solceller eller moduler, som er monteret bag det yderste glaslag i klimaskærmen. Dermed sidder solcellerne på den varme side, og kan evt. bidrage til bygningsopvarmningen, fx ved at lede ventilationsluft forbi solcellerne og ind i bygningen. Kollektivhuset på Hans Knudsens plads er et eksempel på denne type, se figur 16. Som tommelfingerregel kan man regne med at el-produktionen falder med 20 % for hvert ekstra lag glas, der er foran solcellerne. Hvis målet er en høj el-produktion, kan løsningen derfor ikke anbefales. Ud fra en termisk betragtning kan der være en fordel, såfremt varmen kan udnyttes en stor del af året. Spørgsmålet er imidlertid så, om man måske ligeså godt kunne lade sollyset slippe direkte ind. Løsningen kan være begrundet i æstetiske eller visuelle hensyn.



Figur 16. Solceller bag glas i facaden på Kollektivhuset på Hans Knudsens Plads, København.

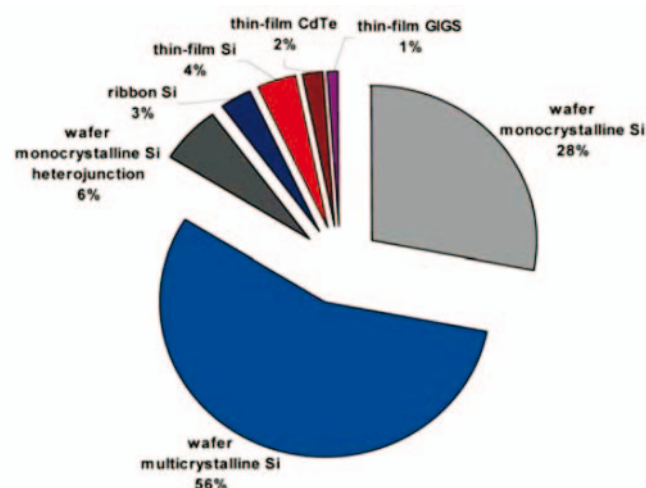
Kombinationer af ovenstående typer kan også forekomme, for eksempel har det hollandske projekt (Kaan H. F., Reijenga T. H., 1998, 1998) anbefalet brug af faste lameller, bortset fra der hvor der er direkte udsyn gennem vinduer, her er anvendt aktivt drejelige lameller. Ved sådanne løsninger skal man være opmærksom på at afsnit med forskellig hældning/orientering ikke ukritisk kan sammenkobles, idet der så vil opstå såkaldte mismatch-tab. Ideelt set skal der bruges en selvstændig inverter til hvert afsnit med egen orientering i forhold til solen.



Figur 17. Kvarterhuset i Kolding opført i sommeren 2001. Projektet, som er støttet af Energistyrelsens "BIPV program", havde til formål at lave semitransparante solcellepaneler uden boks på bagsiden, samt kabelføring i rammeprofilet.

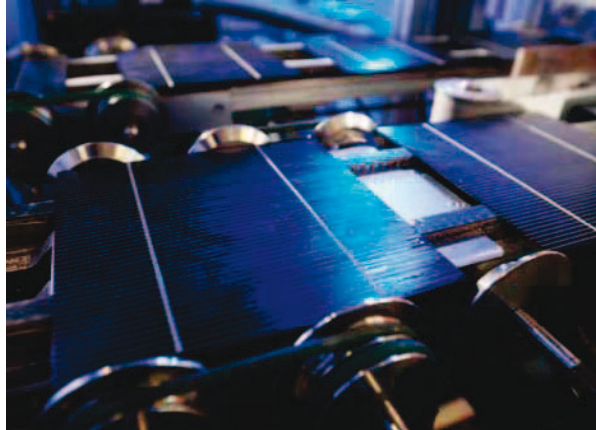
## Markeds- og prisudvikling i PV applikationer

I de sidste ti år har PV-produceret elektricitet været et hastigt stigende marked på trods af den finansielle og økonomiske krise i 2008 - 2010. Markedets størrelse i MWp / år er vokset globalt med en hastighed på omkring 45 % om året i løbet af de seneste ti år (se Figur 18). Med denne gennemsnitlige vækst siden 1998 passerede antallet af nye installationer i 2008 det imponerende tal af mere end 5 GW på verdensplan.



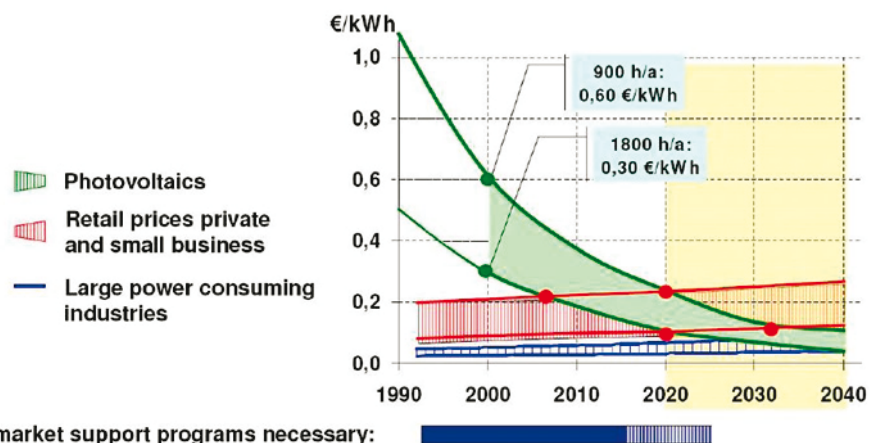
Figur 18. PV markedssegmenter af PV-teknologier in 2005 (Renewable Energy World, July-August 2006).

PV sektoren har i det sidste årti udviklet sig til en high-tech industri i en multi-milliard-dollar klassen på verdensplan. Sektoren vil udvikle sig yderligere i de næste årtier til et meget højt niveau, med mulighed for at overhale elektronikindustrien og formentlig nærmer sig bilindustrien i omfang. I dag er PV industrien i en overgangsperiode, da der i årene frem mod 2020 vil ske det, at el-produktionsomkostninger ved solcelleanlæg bliver sammenlignelig med den normale elpris.



Figur 19. PV-industrien vil gradvist blive helt uafhængig af offentlige subsidier.

Elektricitet produceret ved hjælp af solcelleanlæg er på verdensplan allerede i dag i stand til at konkurrere med omkostninger og detailpriser fra forsyningsselskaber ved elproduktion på spidsbelastningstidspunkter i et liberaliseret marked. Dette gælder specielt i områder med høj solstrålingsintensitet, hvor PV-systemer producerer 1,500 til 1,800 kWh / kW. I steder som Tyskland, hvor den lavere gennemsnitlige solstråling producerer 800 til 1,000 kWh / kW, vil det vare endnu 7-8 år før solcelleanlæg bliver prismæssigt konkurrencedygtige. Der er tre generelle forhold, som afgør det skæringspunktet for konkurrenceevnen: (i) prisfald på solcelleanlæg, der fører til et tilsvarende fald i de faktiske produktionsomkostninger; (ii) udvikling af et helt liberaliseret elmarked, så elpriserne ikke styres kunstigt ud fra politiske motiver, og endelig (iii) den store korrelation mellem den maksimale effektpris fra forsyningsselskaberne og produktion af et PV system. De højeste priser på elmarkedet, primært på sommereftermiddage, svarer direkte til den højeste produktion af et solcelleanlæg. Elpriser i et fuldt liberaliseret verdensmarked giver differentierede priser i løbet af dagen og hen over året. Dette indebærer, at i dagtimerne om sommeren vil PV solenergi allerede i dag være omkostningseffektiv for kunden i fx Californien.



Figur 20. Sammenligning af forholdet mellem omkostninger ved PV-produceret el og elektricitetspriser for henholdsvis almindelige forbrugere og store elforbrugende industrivirksomheder. (Hoffmann, 1999).

# Udvikling af koncepter for integrering af solceller i afskærmningselementer

## Grundlæggende designkrav

I forbindelse med afklaring af succeskriterierne for en velfungerende bevægelig solafskærmning med solceller indkaldte projektgruppen en gruppe arkitekter fra de større arkitektfirmaer i Danmark, til en åben diskussion om de krav og ønsker, der typisk ville være fra arkitektsiden.

Deltagerne kom fra arkitekttegnestuerne: CF Møller, Schmidt Hammer Lassen og Henning Larsen Architects.

I diskussionen blev følgende grundlæggende temaer identificeret som vigtige for beslutningen om anvendelsen af disse systemer:

- Æstetik
- Økonomi
- Elproduktion
- Drift og vedligehold
- Regulering
- Markedsforhold
- Lovgivning

I det følgende uddybes anbefalingerne og vurderingerne fra diskussionen inden for disse temaer med flere generelle designkrav og specifikationer for elproducerende solafskærmninger.

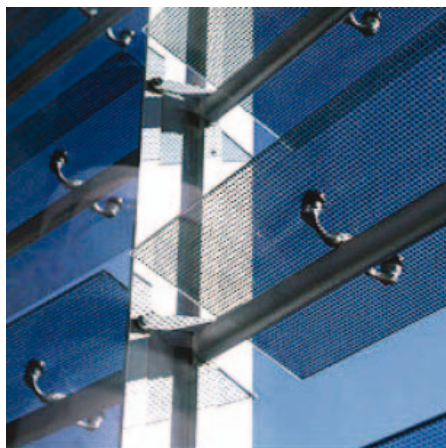
### Æstetiske forhold

En udvendig solafskærmning er helt dominerende for det visuelle udtryk der kan opnås på bygningens facader, både set udefra og indefra, og derfor også det aspekt der optager arkitekten mest foruden de funktionelle muligheder. En bevægelig solafskærmning med solceller vil stadig blive opfattet som ny i dansk arkitektur og kan udstråle en signalværdi om nytænkning og evt. en 'grøn' profil. Der har dog også været en række eksempler på byggeri, hvor solcellerne har skullet udstråle en grøn profil, uden at solcellerne indgår i bygningens kontekst og uden at bygningens design er baseret på en gennemgående og sammenhængende strategi. Ved anvendelsen af faste drejelige solafskærmninger bliver udsynsaspektet meget vigtigt, og der var i diskussionen grundlæggende enighed om at en vandret modulering af facaden var at foretrække frem for en lodret, som hurtigt giver associationer til 'tremmerne i et fængsel'.



Figur 21. Solceller integrerede i glaslameller (Colt).

Muligheden for at integrere denne type systemer med øvrige byggesystemer er meget vigtig, så der ikke for den enkelte bygning skal udføres særlige tilpasninger, beslag, inddækninger osv. Ved integrationen er det ligeledes vigtigt, at systemet kan 'løbe omkring' bygningen, således at systemet fungerer for flere forskellige orienteringer med samme udførelse, ligesom det er vigtigt, at farvevalg, valg af solceller m.v. kan varieres i forhold til den enkelte byggesag. Her giver anvendelsen af krystallinske solceller nogle særlige bindinger pga. de faste størrelser på typisk 5" eller 6" kvadratiske solceller. Jo større den enkelte solceller er, og jo mere den adskiller sig fra den lamel eller lignende, den er monteret på, jo mere vil den også dominere indtrykket af facaden.



Figur 22. Glaslameller med integrerede solceller har været en attraktiv variant af bygningsintegrerede solceller hos mange arkitekter. Denne form for bygningsintegrering af solceller passer godt ind i tidens glasdominerende facadeudtryk, og løser samtidig behovet for en at anvende en effektiv udvendig solafskærmning (Blendex A/S).

Fælles for arkitekterne var efterlysningen af mere dialog og skitsering i de tidlige faser af projekteringen, således at alle aspekter og visuelle vurderinger kunne afklares tidligere end det nu er tilfældet. Designmæssigt vurderes det også, at der mangler gode eksempler på løsninger hvor teknik og æstetik går op i en højere enhed, f.eks. rene glaslameller uden ekstra bærende konstruktion af metal i lamellens længde, motorer og kabling integreret og skjult som en del af selve designet, funktionalitet som giver forskellige muligheder for regulering, uden at bygningens facade kommer til at se 'rodet ud', se figur 22.

### Økonomiske forhold

Økonomien for systemerne er væsentlig på to områder, anlægsøkonomien og driftsøkonomien. Vurdering af rentabiliteten af investeringen afhænger af hvorledes den enkelte bygherre vægter og vurderer en lang række forhold, fx: Energibesparelsen og værdien heraf, forventninger til el-pris og renteutvikling, værdien af et forbedret indeklima, se systemet som led i en skalsikring (mod indbrud), beskyttelse af facaden (boldspil osv.) m.m.

Flere arkitekter har oplevelser fra praksis, hvor udvendig solafskærmning opfattes som noget 'ekstra' og hvor bygherren er skeptisk grundet manglende sikkerhed for de drifts- og vedligeholdelsesmæssige forhold. Den driftsansvarliges personlige erfaringer kommer ofte til at spille en stor rolle i disse beslutninger, og der mangler en systematisk og uvildig opsamling af viden og erfaringer omkring systemernes funktion.

### El-produktion

Et væsentligt element i vurderingen og udviklingen af løsninger med el-producerende solafskærmning er naturligvis den el-produktion der kan skabes, men værdien heraf er kun en mindre del af den værdi, som et anlæg tilfører bygherren, og det er vigtigt at der i et konkret design ikke kun snævert vurderes ud fra denne faktor.

I optimeringen af systemerne, omtalt i kapitlet Beregningsmæssig optimering af afskærmningssystemernes funktion side 29, gives en oversigt over

hvordan el-produktionen fra systemerne kan optimeres i samspil med de øvrige faktorer. Overordnet vil det inden for brugstiden dog altid være komfortensynet i bygningen, som har første-prioritet, idet løsningen ellers ikke vil opleves tilfredsstillende for brugerne. Givet at disse komfortkrav overholdes kan el-produktionen derefter optimeres. Her er det vigtigt at se på det samlede energiregnestykke for bygningen, idet der vil være tale om en sub-optimering, hvis elforbruget fra solceller optimeres på en måde, der giver så meget afskærmning i lokalet, at der skal bruges mere kunstlys end i en situation, hvor mindre afskærmning kunne give et dagslysbidrag, som kunne erstatte elforbrug til belysning. Med i denne vurdering er naturligvis også situationen, hvor der pga. bygningens udformning eller brug er behov for aktiv køling, hvorved den økonomiske optimering af reguleringen kan blive en anden, idet køling er den mest energiintensive del af regulering af komforten i en bygning.

## Drift og vedligehold

De vedligeholdelsesmæssige aspekter vedrører vedligehold af selve systemet, hvor mekanikken til at sikre bevægeligheden af systemet er den mest følsomme. Det var grundlæggende opfattelsen hos arkitekterne at princippet 'jo færre dele – jo færre fejl' var et vigtigt kriterium for positiv accept af systemet blandt arkitekter og bygherrer.

I forhold til vedligehold af resten af facaden giver systemerne nogle bindinger i forhold til tilgængelig ved reparationer, vinduespudsning osv. Også udskiftning af en defekt lamel bør være mulig uden at skulle afmontere et større parti af facaden for at foretage denne reparation.

Tilsmudsning af solcellerne skal der i alle konkrete udførelser være taget stilling til og på sigt kunne man måske forestille sig, at de enkelte lameller blev holdt rene gennem anvendelsen af selvrensende glastyper.

Endelig er vindstøj et tema, idet skarpe kanter, frit-siddende ledninger, tynde stålwirer, smalle sprækker mv. kan give forøget vindstøj og generende lyde fra en udvendig solafskærmning i periode med blæst.

## Regulering

Reguleringen af bevægelsen af lamellerne er nøjere behandlet i kapitlet Afskærmningens multifunktionelle regulering, side 41. På en række punkter har valget af reguleringsstrategi også stor betydning for arkitekt og bygherre.

Reguleringsstrategien vil have stor indflydelse på dagslysforholdene i de bagvedliggende rum og brugernes mulighed for at få god visuel kontakt med omgivelserne. Automatisk regulering bør altid suppleres med en manuel overstyring, så brugernes komfortbehov og egen indflydelse på systemets stilling bliver det primære mål med reguleringen.

Flere arkitekter fremhævede de blændingsmæssige aspekter ved en lamelbaseret udvendig solafskærmning, hvor kontrasten der opleves mellem lamellens bagside og omgivelserne i en synsretning ud mod lamellerne kan virke generende. I mange projekter vil der være en supplerende blændingsmæssig afskærmning i form af gardiner eller lignende, men bedst ville det naturligvis være, hvis alle afskærmningskrav kunne løses i ét system.



Figur 23. Flere arkitekter var opmærksomme på det potentielle problem med blænding, der kan opstå pga. for stor kontrast mellem solcelle og de åbne områder af afskærmningen.



Generelt var der en vis usikkerhed hos arkitekterne med hensyn til, hvordan det er muligt både at optimere energi- og indeklimaforhold. Der findes flere forskellige, mere eller mindre avancerede, systemer til at regulere lamelbaserede afskærmninger, men helt grundlæggende er det vigtigt, at systemet er i stand til at skelne mellem komfort-mode, når der er personer til stede i rummet bag afskærmningen og energi-mode, når der ikke er. Desuden er det vigtigt, at den automatiske regulering altid kan overstyres af brugeren. Reguleringen er nærmere behandlet i Afskærmningens multifunktionelle regulering, side 41.

Endelig er der den akustiske komfort vigtig at tage hensyn til, idet støj fra motorer som bevæger solafskærmningen, især for automatiske systemer, hvor brugerne ikke ved, hvornår lyden kommer, kan være meget generende, hvis systemet ikke er designet på en måde, der forhindrer lyden i at forplante sig til brugerne.

## Lovgivning

Det følgende afsnit giver en oversigt over de myndighedskrav, der findes vedrørende vinduer, dagslys og solafskærmninger. Der er tale om krav og vejledninger, som angives i Bygningsreglement 2010 (Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2010). I de følgende uddrag af teksterne er de særlig relevante afsnit i forhold til solafskærmninger understreget.

*Myndighedskrav ændres fra tid til anden. Det er derfor den projekterendes ansvar at holde sig orienteret om, hvorvidt der er ændringer i forhold til de krav, der er angivet i dette kapitel.*

### BR 2010, kapitel 6: Indeklima

#### 6.1 Generelt

Stk. 1. Bygninger skal opføres, så der under den tilsigtede brug af bygningerne i de rum, hvor personer opholder sig i længere tid, kan opretholdes et sundheds- og sikkerhedsmæssigt tilfredsstillende indeklima. (Understregningerne i vejledningsteksterne er forfatterens).

#### Vejledning

Sundhedsmæssigt tilfredsstillende forhold i bygninger omfatter også komfort og velvære. Den bygningsmæssige del af indeklimaet omfatter termiske forhold (6.2), luftkvaliteten (6.3), det akustiske indeklima (6.4) samt lysforholdene (6.5). Der henvises til SBI-anvisning 196, Indeklimahåndbogen.

Hvad angår det termiske indeklima, skal det ved planlægning af byggeri og ved valg af materialer, vinduesarealer, kølemuligheder, orientering og solafskærmning sikres, at der opnås tilfredsstillende temperaturforhold også i sommerperioden.

### Afsnit 6.5 Lysforhold

#### 6.5.1 Generelt

Stk. 1. Arbejdsrum, opholdsrum, beboelsesrum og fælles adgangsveje skal have tilfredsstillende lys, uden at det medfører unødvendig varmebelastning.

#### Vejledning

Tilfredsstillende lys skal vurderes i sammenhæng med de aktiviteter og arbejdsopgaver, som planlægges i rummet. Kravet om dagslys skal ses i sammenhæng med almene sundhedsmæssige aspekter af dagslyset. Mængden af dagslys har endvidere indflydelse på energiforbruget til elektrisk belysning.

#### 6.5.2 Dagslys

Stk. 1. Arbejdsrum, opholdsrum i institutioner, undervisningslokaler, spisestue, benævnt i det følgende arbejdsrum m.v. samt beboelsesrum skal have

en sådan tilgang af dagslys, at rummene er vel belyste. Vinduer skal udføres, placeres og eventuelt afskærmes, så solindfald gennem dem ikke medfører overophedning i rummene, og så gener ved direkte solstråling kan undgås.

#### Vejledning

I arbejdsrum mv. kan dagslyset i almindelighed anses for at være tilstrækkeligt, når rudearealet ved sidelys svarer til mindst 10 pct. af gulvarealet eller ved ovenlys mindst 7 pct. af gulvareal, forudsat at ruderne har en lystransmittans på mindst 0,75. De 10 pct. og 7 pct. er vejledende ved normal placering af bygningen samt normal udformning og indretning af lokalerne. Såfremt vinduestypen er ukendt på projekteringstidspunktet, kan omregning fra karmlysningsareal til rudeareal ske ved at multiplicere karmlysningsarealet med faktoren 0,7. Rudearealet skal forøges forholdsmæssigt ved reduceret lysgennemgang (f.eks. solafskærmende ruder) eller formindsket lysadgang til vinduerne (f.eks. ved tælliggende bygninger). Dagslyset kan ligeledes anses for at være tilstrækkeligt, når det ved beregning eller måling kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2 pct. ved arbejdspladserne. Ved bestemmelse af dagslysfaktoren tages der hensyn til de faktiske forhold, herunder vinduesudformning, rudens lystransmittans samt rummets og omgivelsernes karakter. Der henvises til By og Byg Anvisning 203: Beregning af dagslys i bygninger samt SBI-anvisning 219: Dagslys i rum og bygninger.

Stk. 2. Arbejdsrum m.v. skal forsynes med vinduer, der er anbragt, så personer i rummene kan se ud på omgivelserne.

#### Vejledning

Udsynet eller udsigten til omgivelserne er en af de vigtigste faktorer for oplevelsen af rummet. Arbejdsrum m.v., der primært belyses via ovenlys, skal altid forsynes med sidevinduer, så der etableres udsyn til omgivelserne.

## BR 2010, kapitel 7: Energiforbrug

### 7.2 Energirammer for nye bygninger

#### 7.2.1 Generelt

Stk. 1. Energirammen omfatter bygningens samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling, varmt brugsvand og eventuel belysning.

Tilført energi fra forskellige energiforsyningsformer sammenvejes. Bilag 6 med beregningsforudsætninger finder anvendelse ved eftervisning af, at energirammen er overholdt.

Stk. 2. Bygninger skal udformes, så energibehovet efter stk. 1 ikke overstiger energirammen i kap. 7.2.2 og 7.2.3.

#### Vejledning

Ved beregning af energibehovet tages der hensyn til bygningens klimaskærm, bygningens placering og orientering, herunder dagslys og udeklima, varmeanlæg og varmtvandsforsyning, bygningens varmeakkumulerende egenskaber, ventilation, eventuel køling, solindfald og solafskærmning og det planlagte indeklima. Desuden indgår belysning også for bygninger omfattet af kap. 7.2.3.

#### 7.2.3 Energirammer for kontorer, skoler, institutioner m.m. ikke omfattet af 7.2.2

Stk. 1. Bygningens samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling, varmt brugsvand og belysning pr. m<sup>2</sup> opvarmet etageareal må højst være 71,3 kWh/m<sup>2</sup> pr. år tillagt 1650 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal.

Bilag 6. Energistyrelsen har besluttet, at der til brug for vurdering af bygningers energirammer anvendes en faktor på 2,5 ved sammenvejning af el med henholdsvis gas, olie og fjernvarme.

#### 7.4.2 Enkeltforanstaltninger ved ombygning, vedligeholdelse og udskiftning

Stk. 1. Energibesparelser skal gennemføres, hvis ombygning eller ændringer vedrører klimaskærmen. Enkeltforanstaltningerne vedrører kun den del af klimaskærmen, der er omfattet af ændringen.

Stk. 4. Ved udskiftning af vinduer må energitilskuddet gennem vinduet i opvarmningssæsonen ikke være mindre end -33 kWh/m<sup>2</sup> pr. år.

##### Vejledning

Energitilskuddet beregnes som angivet i bilag 6. Kravet gælder for et referencevindue på 1,23 m x 1,48 m forsynet med producentens standardrude. For et vindue udformet f.eks. som dannebrogsvindue eller forsynet med friskluftsventil benyttes ligeledes kravet for referencevinduet, forudsat vinduet forsynes producentens standardrude. Bestemmelsen gælder også ved udskiftning af vinduer i erhvervsbygninger. [I erhvervsbygninger eller andre bygninger med stort solindfald bør udskiftning af vinduer kombineres med en beregning eller vurdering af indeklimaet, således at overophedning undgås. Vinduesudskiftningen kan så kombineres med etablering af f.eks. udvendig solafskærmning eller solafskærmende glas.](#)

#### Restriktioner i lokalplaner vedrørende anvendelse af (tag-)materialer

Solceller skal, i henhold til lovgivningen, betragtes som alle andre materialer. I lokalplaner kan solceller specifikt være benævnt og undtaget for krav til fx en specifik tagløsning. Men der kan også være krav om maksimal glansværdi for tagmaterialer. Disse krav skal solcelleanlæg i de fleste tilfælde overholde.

## Markedsforhold, rammebetingelser for produktion af solcellestrøm

### *Private husstande*

Folketinget har vedtaget den såkaldte 'nettomålingsordning', der i foråret 2010 blev lovfæstet. Det betyder, at man ikke skal betale afgift for solcelleanlæg, som dækker forbruget af strøm i boliger og institutioner. Ordningen gør det muligt at 'indsætte' eventuel overskydende el fra solcellerne på det offentlige elnet. Denne el kan så 'hæves' igen, når solen ikke skinner, og du har brug for elektriciteten. Husstandens elmåler løber ganske enkelt baglæns eller fremad, afhængigt af den aktuelle solcelleproduktion og husstandens aktuelle strømforbrug.

### *Boligforeninger og offentlige institutioner o.l.*

For solceller installeret i anden, ikke-erhvervsmæssigt benyttet bebyggelse gælder samme regler som for private husstande. Her må maksimalt installeres et solcelleanlæg med en effekt på 6 kWp per 100 m<sup>2</sup> gulvareal. Der må dog maksimalt installeres 50 kWp.

### *Erhvervsbygninger og Industri*

For el, der produceres på forbrugsstedet, samtidig med at det forbruges, skal der ikke betales energifgifter mv. Ved selv at producere en del af sin elektricitet kan man altså spare hele elprisen. Solceller producerer mest om dagen, hvor virksomheder typisk har det største forbrug. Ved integration af solceller i erhvervsbyggeri kan der altså typisk spares 1 kWh på elregningen pr. produceret kWh. Produktion fra solceller på erhvervsejendomme, hvor elektriciteten ikke bruges samtidig med at den produceres, kan afsættes på elnettet efter følgende regler. Den systemansvarlige virksomhed afsætter elproduktionen på spotmarkedet og der gives et pristillæg, som sammen med markedsprisen sikrer en afregning på 60 øre/kWh i 10 år og 40 øre/kWh i de følgende 10 år. (Disse tal gælder pr. august 2010).

## Sammenfatning af arkitekternes vurdering

Den store udfordring omkring design og anvendelse af en udvendig elproducerende solafskærmning, set med arkitektens øjne, er at kunne fastholde alle de parallelle designkrav listet i ovenstående gennemgang. Det gøres særligt vanskeligt, idet der vil være forskellige vægtninger af de enkelte kriterier fra projekt til projekt, og det vurderes også at være en af grundene til, at der endnu ikke har været en større udbredelse af generelle produkter eller systemer på markedet endnu. En stor del af de realiserede systemer er således baseret på systemer, som er udviklet specifikt til et bestemt projekt.

I den videre udvikling og demonstration af systemer, anbefales det derfor, at der lægges vægt på at kortlægge og konkretisere de listede kriterier og bane vejen for at opbygge systemer modulært med mulighed for at vægte kriterierne i henhold til det enkelte byggeprojekt.

Endelig blev den økonomiske vinkel fremhævet, idet belysningen af den tilførte værdi til projektet er vigtig at kunne dokumentere og diskutere med bygherren på de præmisser, som bygherren anvender i sin vurdering af rentabilitet ved denne type tiltag.

I konceptudviklingen udnyttes erfaringer fra tidligere pilotprojekter, der har vist, at solceller med enkle modifikationer kan integreres i solafskærmninger bestående af lodrette eller vandrette lameller. Der lægges vægt på koncepter for indbygning, der giver en stabil, og prisbillig sammenkobling af de elektriske forbindelser i et beskyttet system, der sikrer cellerne en lang levetid.

## Designkrav anvendt i projektet

I konceptudviklingen udnyttes erfaringer fra tidligere pilotprojekter, der har vist, at solceller med enkle modifikationer kan integreres i solafskærmninger bestående af lodrette eller vandrette lameller. Der lægges vægt på koncepter for indbygning, der giver en stabil, og prisbillig sammenkobling af de elektriske forbindelser i et beskyttet system, der sikrer cellerne en lang levetid.



Figur 24. Lamellerne, som de der er anvendt på Studenterhuset i Herning indgik i overvejelserne, men blev fundet mindre egnede og ikke arkitektonisk attraktive. Billedet viser tydeligt problemet med egenskygger på lamellerne.

Da Dasolas i forvejen havde stor erfaring i udførelse af solafskærmninger baserede på aluminiumslameller, med en stor produktserie, blev der indledningsvis gjort forsøg med solceller som var monteret alu-lameller. Gaia Solar havde også netop gennemført udviklingsprojektet "Solceller på Aluminiumslameller" med erfaringer, som kunne overføres til dette projekt. Der er en

række fordele ved at benytte eksisterende materiel, som opsummeret i slutrapporten (Gaia Solar, 2003) fra nævnte projekt:

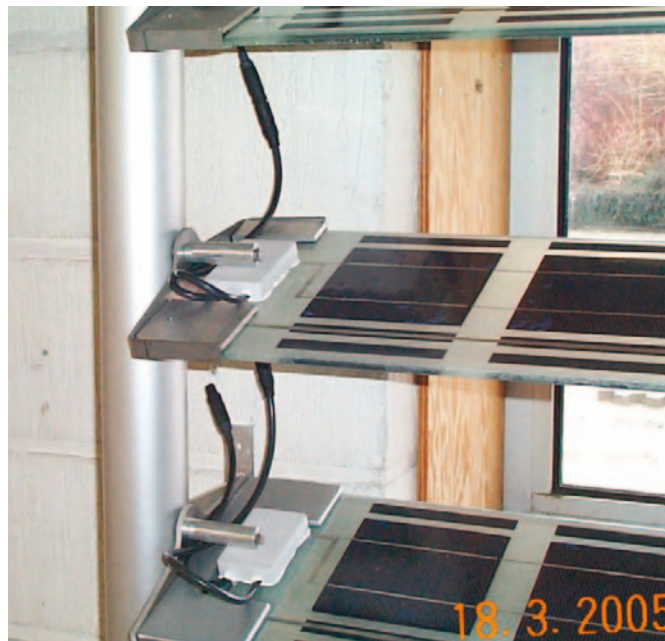
- Ingen ukendte faktorer mht. styring
- Ingen indkøringstid
- Udnyttelse af restkapacitet
- Stor fleksibilitet mht. til produktionsvolumen
- Ingen anlægsomkostninger der kan belaste virksomhedens drift

Imidlertid viste det sig, at flere af designkravene vanskeligt lod sig opfylde ved denne løsning, ligesom der syntes at være større tekniske vanskeligheder ved montage af solceller på alu-lameller end på glaslameller.

I projektet er der med udgangspunkt i de generelle krav udvalgt en række designkriterier som har ligget til grund for design, forsøg og afprøvning. I forbindelse med litteraturstudie og besøg på forskellige demonstrationsprojekter, herunder Energi E2, beskrevet i foregående kapitel, blev det klart, at det ville være meget vanskeligt inden for de økonomiske rammer i nærværende projekt at udvikle og producere en helt ny lamel, som kunne anvendes i et bygningspilotprojekt. På grund af de nævnte forhold omkring den store betydning af den visuelle fremtoning af bygningen, vil det være overvejende sandsynligt, at arkitekten altid vil have en relativt stor indflydelse på den specifikke udformning af den solafskærmende lamel, og det ville derfor kun være af meget begrænset værdi at udvikle et 'generelt' design.

Projektgruppen besluttede derfor at tage udgangspunkt i en lamel, der allerede var under udvikling, og fokusere på analyse-, optimerings- og reguleringsaspekterne. Glaslamellen som var blevet udviklet til Energi E2's hovedsæde repræsenterede på mange måder en løsning til de visuelle krav, men energimæssigt var den ikke blevet analyseret i en anvendelse hvor lamellen kunne bevæges (lamellerne på Energi E2 - bygningen er låst i en fast vinkel), og den visuelle vurdering har heller ikke været genstand for et egentligt forsøg under mere systematiske afprøvningsbetingelser.

Derfor blev et af Dasolas' alu-lamelsystemer tilpasset, således at der kunne indbygges glaslameller, hvorpå der var monteret polykrystallinske solceller. Figur 25 viser mockup'en hos Dasolas, men figur 26 viser, hvordan glaslamellerne ser ud hos Københavns Energi i Ørestaden.



Figur 25. Montage af glaslameller fra Københavns Energi E2 hovedsæde i Ørestaden

Dasolas A/S, (nu overtaget af Blendex A/S), har i en årrække produceret relativt store bevægelige, udvendige solafskærmninger til erhvervsbyggeri. Regulering af lamellerne har været fokuseret på opbygning af et mekanisk

system som binder bevægelsen af en gruppe lameller sammen, så de altid står med samme vinkel. Til ændringen af lamellernes vinkel betjener en enkelt motor det mekaniske system.

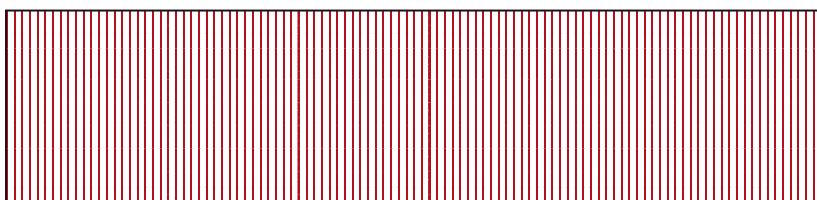


Figur 26. Billede fra Københavns Energis Hovedsæde i Vejlandshuset i Ørestaden.

Ved anvendelse af glaslameller i Vejlandshuset er der anvendt en kombination af 40 % "dummy paneler" og 60 % solcellelameller, da der en del af tiden vil være skygge på lamellerne tættest på loggia (betonfremspring). Lamellerne er udført med syreætset bagside og et silketryk på forsiden, hvorpå solcellerne er placeret. På den måde har både dummy- og solcellelamellerne samme visuelle udtryk såvel inde- som udefra. Montagesystemet er udviklet i samarbejde med Schmidt, Hammer & Lassen, og er senere genbrugt i andre projekter. I alt blev der opsat 3.600 solcellepaneler på domicilet i Ørestaden.

De lameller der er udviklet i forbindelse med projektet er fremstillet af en glasplade, hvorpå der er monteret polykrystallinske, kvadratiske solceller, som endelig er afdækket med transparent Tedlar film på oversiden. Hver lamel indeholder 8 solceller, som er koblet i serie for at opnå tilpas høj spænding. De enkelte lameller er ligeledes koblet i serier á 8 stk. Når solceller kobles i serie, er det cellen med den mindste strøm, som bestemmer hele ydelsen, og det er derfor vigtigt at der ikke opstår skygge på væsentlige dele af den enkelte celle. (For eksempel fra en overliggende lamel).

Man kunne mindske denne risiko ved at vælge solceller med en anden udformning, som mindre sandsynligt ville blive udsat for 100 % skygge. Det kunne være lange, tynde bånd, som det kendes fra normale tyndfilm solceller. Denne solcelletype kan desuden fås delvist transparent, og der er dermed mulighed for at opnå en ensartet struktur på hele lamellen, samtidig med at man bibeholder en vis grad af transparens.



Figur 27. Forslag til lamel med tyndfilm solceller. Ved seriekobling af de mange smalle celler opnår man automatisk en høj spænding på hver lamel, hvad der alt andet lige er en installationsmæssig fordel.

## Regulering

Reguleringen af lamellernes stilling kan dels udføres manuelt eller via et styresignal fra et CTS-anlæg. Imidlertid har standard-udførelsen ikke en såkaldt 'sand tilbagemelding' af lamellernes stilling, idet motoren reguleres ud fra gang-tiden. Det vil sige at motoren får et bestemt tidsrum til at flytte lamellernes stilling, men der sker ikke nogen tilbageføring af et signal om hvilken stilling lamellerne har på et givet tidspunkt. For at opsamle slør, føres systemet en gang i døgnet ud til en yderstilling, og kører lidt længere end det princip-

pet er nødvendigt. Herved sikres, at lamellerne virkelig står i den pågældende yderstilling, hvorefter motoren kører tilbage til en forudbestemt stilling. Derved bliver evt. forskelle mellem stillingerne af lamellerne i systemer med flere metoder udjævnet.



Figur 28. Montage af lamelsystemet hos Dasolas. Til højre detalje vedr. inddækning.

### Visuel vurdering af lamellerne

Til brug for den visuelle vurdering, blev den same type lamel som anvendt i E2-bygningen monteret i det nævnte bevægelige system. I denne sammenhæng er nøjagtigheden af reguleringen ikke vigtig, idet lamellerne blev vurderet ud fra en række forskellige variationer i lamellernes stilling. Vurderingerne blev foretaget i SBI's Dagslyslaboratorium i form af subjektive bedømmelser af hvordan lamellerne påvirkede lysindfald, lyset i rummet, udsyn samt blændingsforhold ved forskellige lamelhældninger. Resultaterne kan kort konkluderes således:

- Stor reduktion i lysindfaldet, når lamellerne er lukket mere i end svarende til ca. 30°
- Udjævning af forskellen i lysintensitet nær ved vinduet og bagerst i rummet. Udjævningen virkede dog ikke behagelig, pga. store kontraster i vinduesområdet
- For stor kontrast mellem solceller (sorte) og åbne felter (mellem lameller og gennem lameller omkring solceller)
- Udsyn acceptabelt, når der ikke var direkte sol
- Ubehagsblænding med direkte sol på lamellerne, ikke pga. reflekser fra glaslamellerne (tedlar-overflade), men høj luminans af den matte overflade



Figur 29. Fra lamelmontagen hos Dasolas, hvor man får en fornemmelse af ubehaget ved ved at se ud pga. de store kontraster. Til højre det helt 'lukkede' system, med solcellerne drejet indad. Dette vil svare til, hvordan systemet ofte vil ses udefra, når der er maksimal afskærmning.

# Beregningsmæssig optimering af afskærmningssystemernes funktion

Solceller på drejelige afskærmningselementer vil kunne give en forøgelse af elproduktionen med ca. 10 % i forhold til faste celler. Regulering af afskærmningen optimeres ud fra de samlede energi- og indeklimatekniske forhold, og derfor gennemføres der omhyggelige analyser af systemernes samlede funktion ved hjælp af forskellige edb-værktøjer.

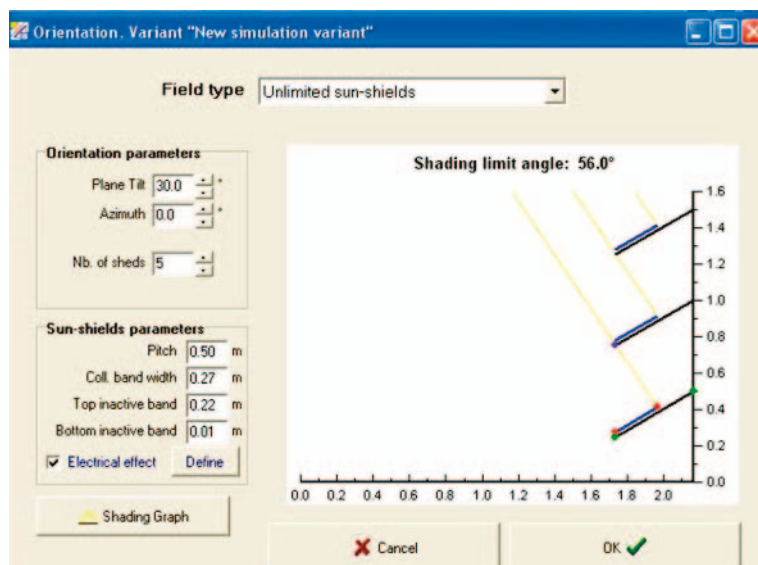
Der er i det følgende foretaget en serie beregninger i det anerkendte PV simuleringstværværktøj PVsyst (PVsyst, 2009) med henblik på at undersøge følsomheden for forskellige anlægsudformninger.

## PVsyst beregning af ydelse for solceller på afskærmningslameller

PVsyst (PVsyst, 2009) er en software-pakke til dimensionering, simulering og dataanalyse af komplette solcelleanlæg. Programpakken kan benyttes ved nettilsluttede, stand-alone, pumpning og DC-net systemer, og rummer omfattende databaser for meteorologiske data og PV-komponenter. Softwaren er rettet mod arkitekter, ingeniører og forskere, og rummer meget nyttige værktøjer for undervisning og uddannelse. Pakken indeholder desuden en omfattende kontekstuelle help-fil, som i detaljer forklarer de procedurer og modeller, der anvendes.

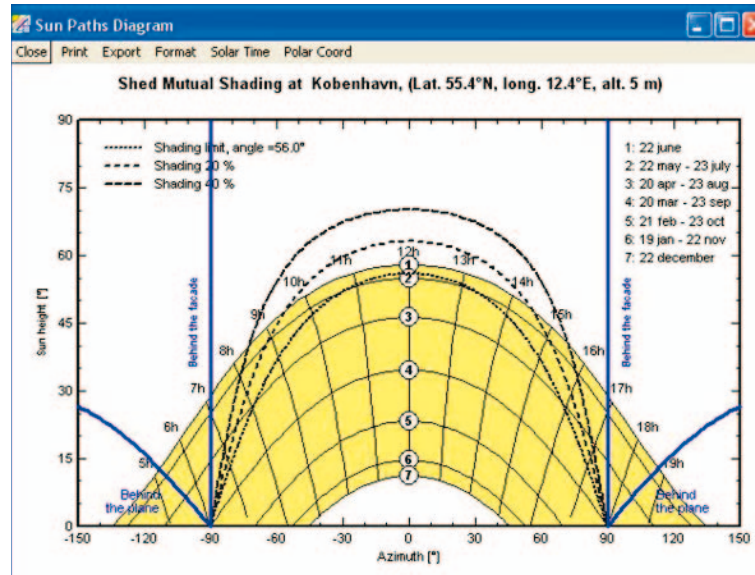
Der er en del af PVsyst, som kan regne på solceller i parallelle rækker (eksempelvis placeret på tag eller som solafskærmningslameller) med indbyrdes skyggevirksomheder. Disse skyggevirksomheder kan beregnes på tre forskellige måder:

1. I menuen 'Orientation' vælges under 'Field type' *unlimited sheds* eller *unlimited sun sheds* og der defineres parametre for rækker (bredde, afstand, hældning osv.) Beregningen af skyggevirksomheden foregår 'lineært', således at elproduktionen formentlig reduceres proportionalt med det afskyggede areal. Der regnes her med, at rækkerne er uendeligt lange.



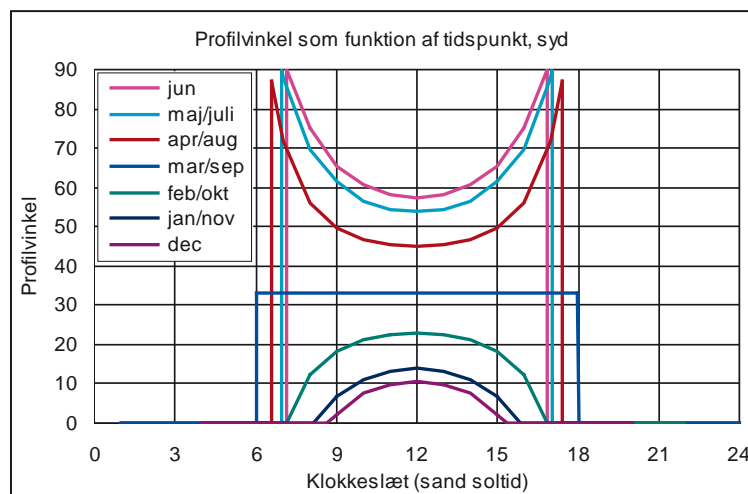
Figur 30. Beregning af indbyrdes skygge af (uendeligt lange) lameller. Skyggen er bestemt af profilvinklen, og ydelsen reduceres proportionalt med den skyggede andel.





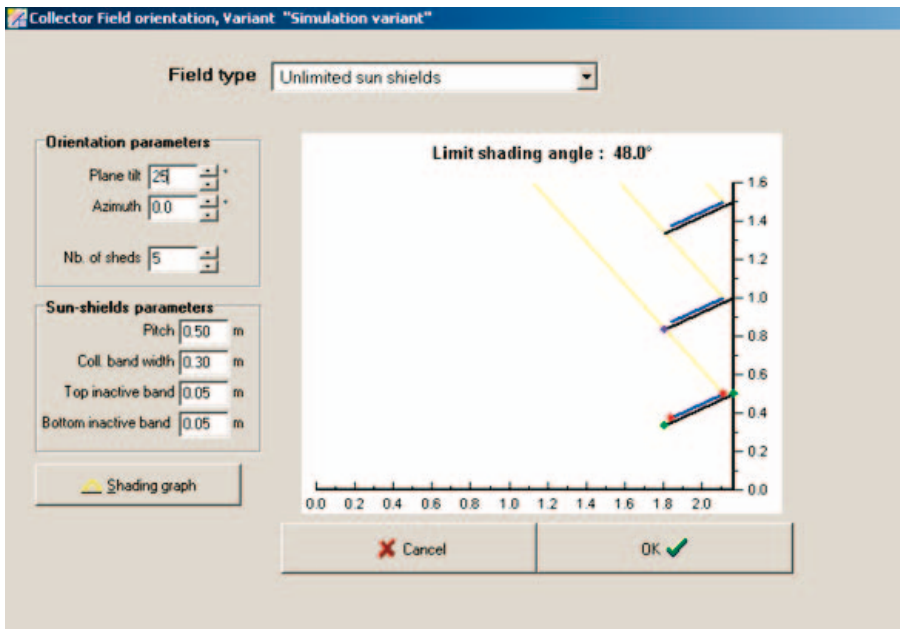
Figur 31. Soldiagram udskevret fra PV-syst, som illustrerer andelen af skygge på lamellerne ved en given grænsevinkel for skygge (her 56°). I maj (kurve 2) er der fx fuld skygge før kl. 11 og efter kl. 13.

Skyggen fra én lamel på den underliggende lamel er bestemt af solens profilvinkel for den pågældende facadeorientering. Profilvinklen er solhøjdens projektion ind på facadens normalplan. Figur 32 viser profilvinklen for en sydvendt facade for alle årets måneder. Det ses fx, at i juni måned varierer profilvinklen mellem solens maksimale solhøjde på 57° og 90°, og i alle månederne april-august vil lamellerne i ovenstående eksempel være i delvis skygge i timerne efter solopgang og før solnedgang.



Figur 32. Solens profilvinkel den 21. i hver måned for en sydvendt facade. For eksemplet i figur 30 viser kurverne, at i alle månederne april – august vil der være delvis skygge på lamellerne i timerne efter solopgang og før solnedgang, hvor profilvinklen er større end 56°.

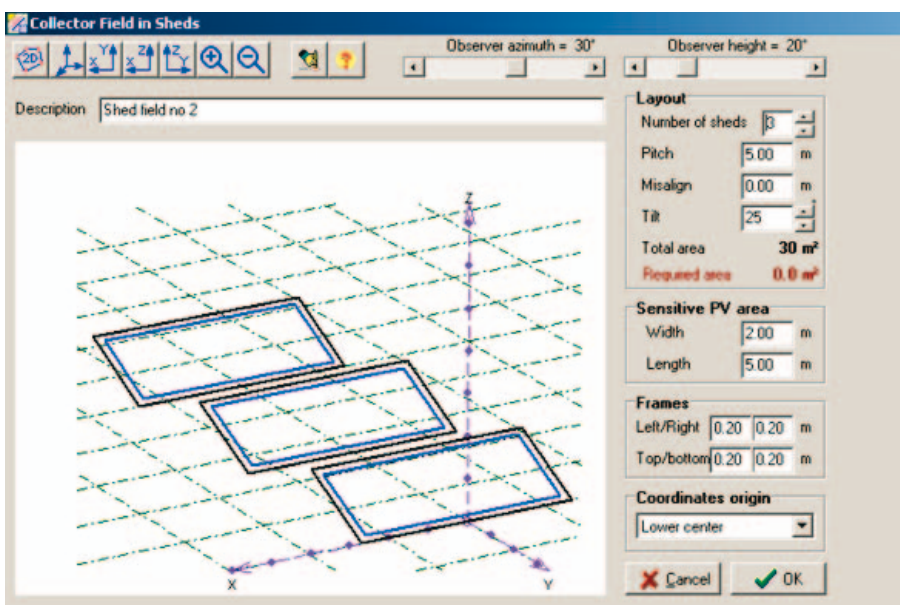
Da lameller, som ligger lodret over hinanden altid vil medføre delvis skygge på underliggende lameller i visse timer af året, er det vigtigt at kortlægge, hvordan skyggerne påvirker den potentielle elproduktion. For en sydvendt facade optræder skyggerne om foråret og efteråret på tidspunkter, hvor solens indfaldsvinkel er stor, og derfor udgør tabet i elproduktion ikke en væsentlig del af potentialet ved normale lameldimensioner. Midt på sommeren skal lamellerne være lukket meget i, for at undgå for store tab hele døgnet, hvilket betyder, at der skal prioriteres mellem elproduktion og bevarelse af et acceptabelt udsyn. Figur 33 illustrerer, hvordan den kritiske profilvinkel reduceres fra 56° til 48°, når lamelhældningen ændres fra 30° til 25°. Ved en lamelhældning på 25° vil der være delvis skygge på underliggende lameller stort set hele dagen i alle månederne april - august.



Figur 33. Beregning i PVsyst af skygger på lameller ved en lamelhældning på 25°, her med lidt andre forudsætninger end i figur 30 og med betydelig mere kritisk indbyrdes skygger, allerede ved en profilvinkel på 48°.

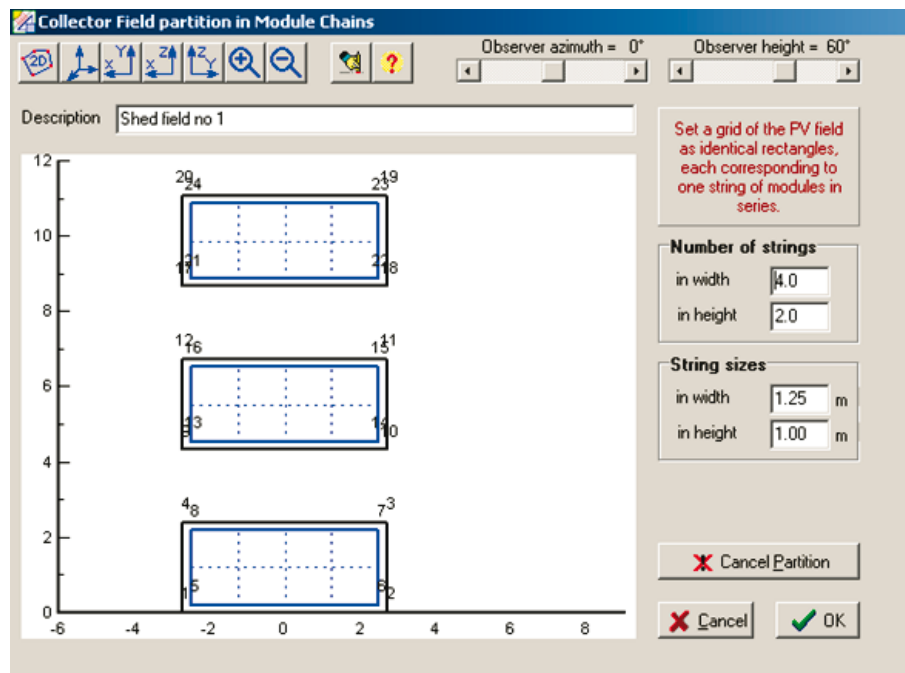
- En anden måde at beregne skyggevirksomhed i PVsyst mellem forskellige flader med solceller er ved at definere et PV-plan i 'nærskygge' scenen. En beregningsmetode, hvor der tages hensyn til rækkekanter, og det kan defineres hvordan modulerne i et PV-felt er bundet indbyrdes sammen. Sidstnævnte er kun anvendeligt i systemer, hvor hver parallel række består af flere moduler i længden og bredden, se figur 34.

Det er heller ikke muligt at angive, at nogle moduler i én række er serieforbundet med nogle moduler i en anden række. Endeligt kan beregningen kun laves for rækker, der står placeret bag hinanden og dermed altså ikke for solafskærmningslameller.



Figur 34. Beregning i PV-Syst af skyggevirksomhed på solcelleflader placeret bag hinanden.

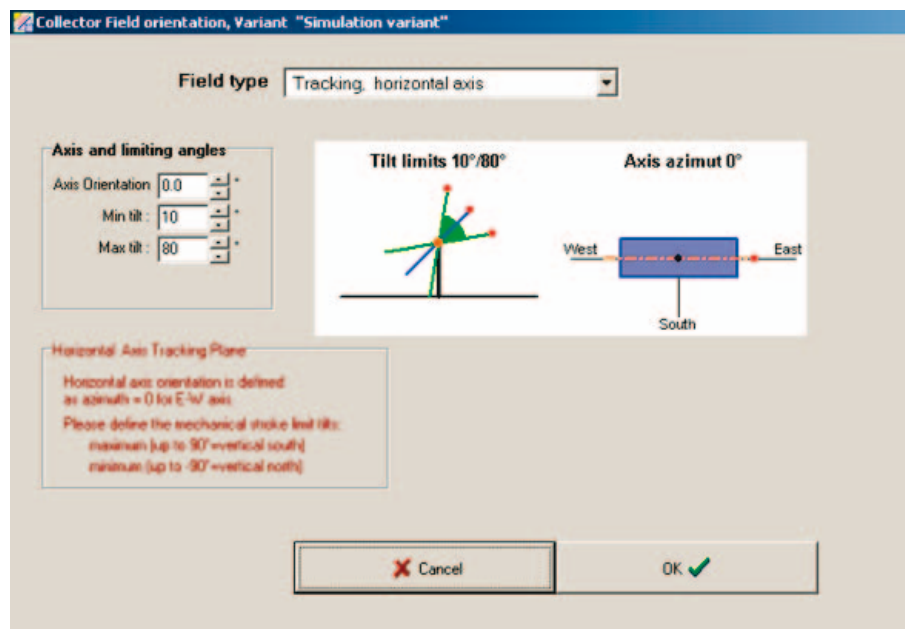
- I 'nærskygge' scenen opbygges hvert enkelt solafskærmningslamel samt eventuelle andre nærskygger som bygningsfremspring mv. Beregningen har samme svagheder som nævnt under beregningsmulighed 2, med at der kun i bestemte situationer kan tages højde for, hvordan modulerne er elektrisk sammenkoblede.



Figur 35. Beregning af indbyrdes skyggevirksomhed på solcellepaneler i en række serieforbundne 'kæder'.

### Mulighed for at regne på bevægelige lameller

PVsyst giver også mulighed for at regne på solcellefelter med variable hældninger eller orienteringer. Dette kan kun gøres for 'tracking systemer', som er solcellefelter der hele tiden indretter sig efter solens position. Disse systemer kan enten dreje om en akse eller to akser. I menuen 'orientation' kan der under 'Field type', vælges 'Tracking, horizontal axis' se figur 36.



Figur 36. Beregning af ydelse af solcellepaneler med variabel drejning og hældning. Brugeren angiver, om panelerne skal drejes efter solen omkring én eller to akser.

Som beskrevet ovenfor, er der dog ikke her mulighed for at regne med indbyrdes skyggevirksomhed mellem flere solcellefelter (lameller).

Nogle fabrikanter benytter i dag den såkaldte 'backtracking strategi', der fungerer på den måde, at tracking-funktionen ophører, når lamellerne begynder at skygge for hinanden. I stedet drejer lamellerne sådan, at de længst muligt undgår skygger. Herved øges solens indfaldsvinkel naturligvis, men tabet reduceres.

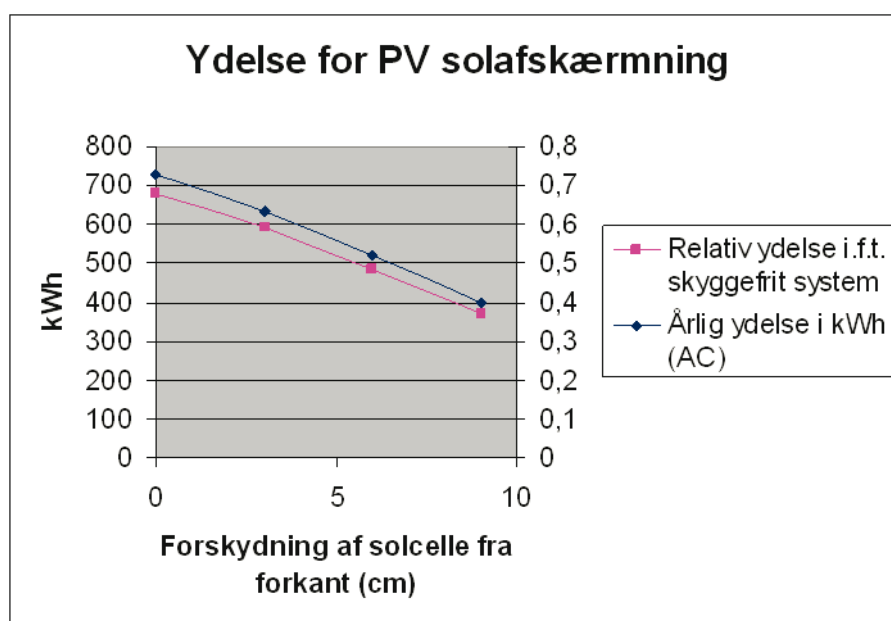
## Beregningseksempler med solcellelameller i PVsyst

### Data

Vejrdata	Klimadata fra København (MeteoNorm)
Beskrivelse	Moduler er regnet fordelt på lameller med samme geometri som E2 projekt Lamelbredde 22 cm, c-c afstand 22 cm Solcelle starter 3,5 cm fra forkant og slutter 6 cm fra bagkant
Celler og inverter	Fiktivt anlæg bestående af SunnyBoy 850 inverter og 24 Eurosolare 42 Wp moduler
Størrelse	Der er regnet med 20 lameller ovenpå hinanden, uendeligt lange

Modellen regner ikke med lysgennemgang i de områder af lamellen, hvor der ikke er solceller. Derfor vil den beregnede reduktion som følge af skygge være overdrevet. I gunstigste fald kan kanten foran solcellerne regnes 100 % transparent, hvilket giver overgrænsen for hvor meget lamellerne kan yde. I værste fald er kanten ikke gennemskinnelig overhovedet. Der er foretaget en flytning af det aktive bånd på lamellen for at vise produktionen ved forskellige placeringer idet lamellen er regnet ikke gennemskinnelig.

Ydelse som funktion af solcellernes placering på lamellen ved sydvendt orientering og 30 grader fast hældning



Figur 37. E2 anlæggets teoretiske ydelse ved forskellig placering af solceller fra forkant af 22 cm bred lamel.

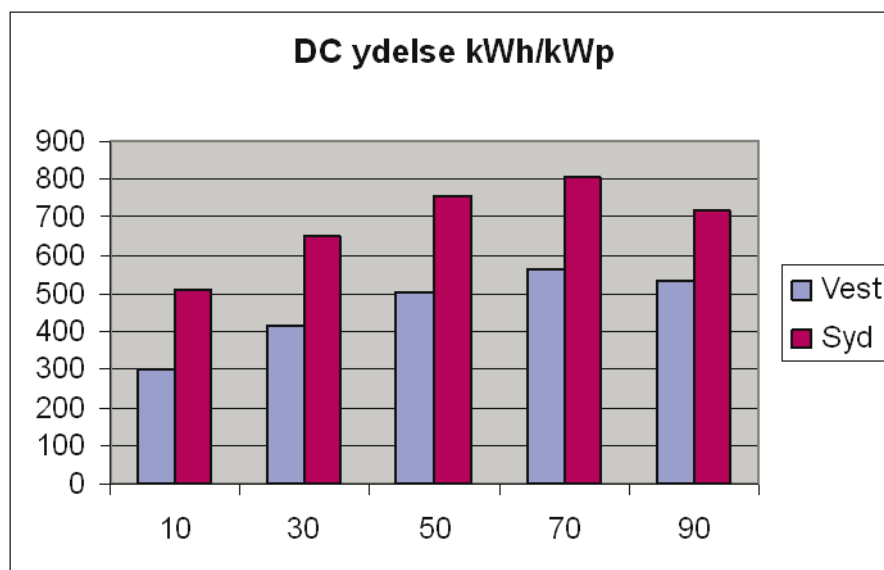
### Variation af geometri, forskydning fra forkant

Aktuel på E2 er tilfældet med 3 cm forskydning 22 cm bred lamel, 22 cm mellem rækker (c-c)

Forskydning af 13 cm bredt solcellebånd fra forkant af lamel, cm	0	3	6	9
PV syst AC ydelse for 1 kW system (20 rækker, syd, 30° hældning.), kWh/år	679	590	483	372
Relativ ydelse ift. ideal (fritstående)	0,73	0,63	0,51	0,40

Et fritstående anlæg (et enkelt felt med samme data) giver 931 kWh/år, og reduktionen ved placering i solafskærmning er derfor minimum 27 %.

## Ydelse for E2 lameller ved varierende hældning, ved henholdsvis syd- og vestvendt montage



Figur 38. Beregnede ydelser for solcelleanlæg med 20 stk. 22 cm E2 lameller ved forskellige orienteringer og hældninger.

Det fremgår, at ydelsen bliver størst ved en relativt stejl hældning, da det giver mindre tab på grund af indbyrdes skyggevirksomhed.

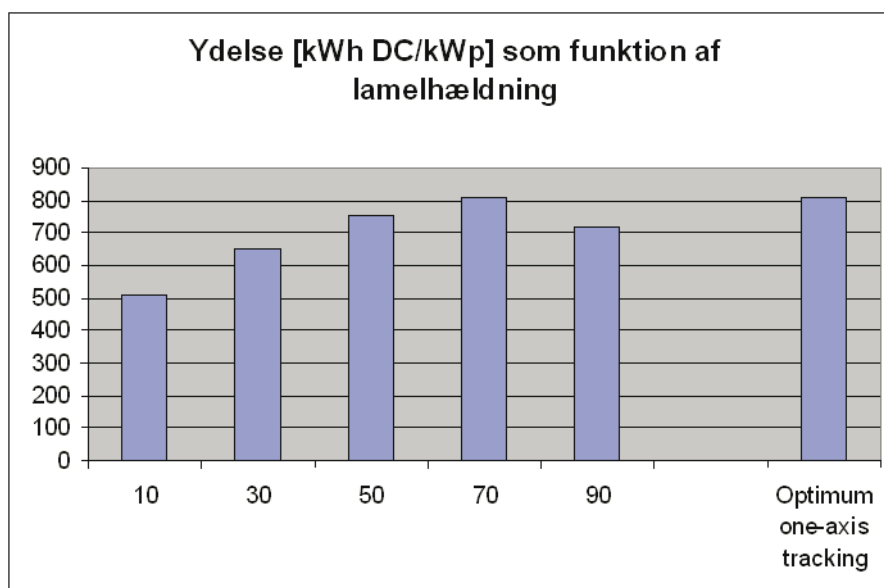
### Variation i hældning og orientering

DC ydelser i kWh/år pr. kWp ved forskellig orientering (22 cm lamel fra E2 projekt)

	Hældning	10	30	50	70	90
Orientering						
Vest		300	415	504	565	530
Syd		509	653	755	809	717

### Ydelse ved fast, henholdsvis variabel hældning for E2 lameller, syd

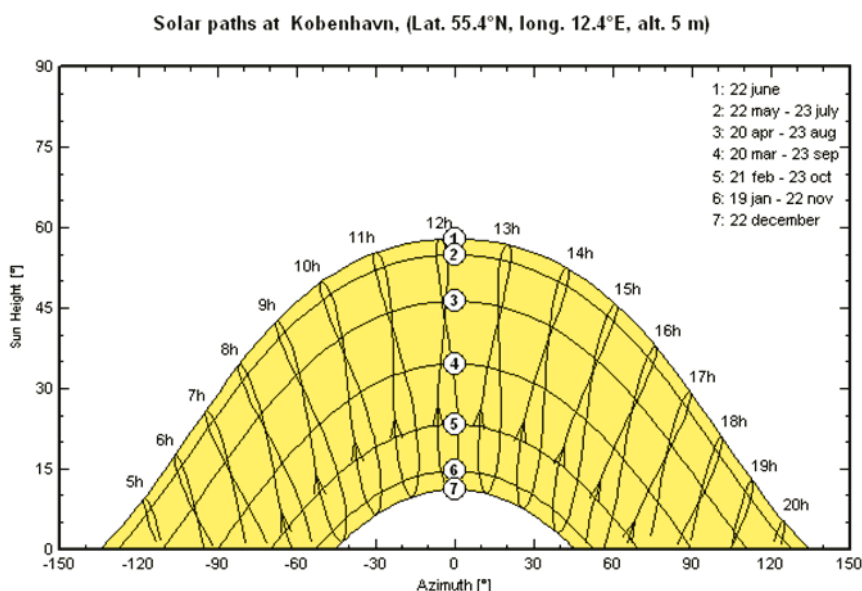
Lamelhældningens betydning for ydelsen fremgår af figur 39. Lidt overraskende ses det, at der (mod syd) ikke opnås en forøgelse af ydelsen ved at tracke efter solens position i forhold til en fast hældning på 70°.



Figur 39. Beregnede ydelser af E2-solceller mod syd og med forskellige hældninger. Det fremgår, at ved at dreje lamellerne i forhold til solen ikke kan opnå forøget ydelse i forhold til en fast hældning på 70°.

Beregningen af ydelsen i ved tracking figur 39 er gennemført ved at tage den største produktion for hver hældning time for time og summere for hele året. Det fremgår, at der i det konkrete tilfælde er meget lidt at hente i forhold til en fast vinkel på 70 grader.

Til orientering er der i figur 40 gengivet kurver for solhøjden i Danmark. Ved at integrere solceller i solafskærmningen, udnyttes det, at når der er størst behov for at afskærme brugerne mod solindfaldet, er der også de bedste muligheder for at opsamle og udnytte solenergien.



Figur 40. Soldiagram for 55,4° N bredde, hvoraf man ved kombination med graferne i figur 39 kan danne sig et indtryk af, udbyttet af skrå eller lodrette solceller hen over året.

Solafskærmningen, fx i form af brede, vandrette og drejelige lameller, styres af et system efter en funktion, der optimeres ud fra opfyldelsen af fem forskellige funktioner, som alle har stor betydning for det resulterende energiforbrug og den oplevede komfort (termisk og visuelt indemiljø):

- opsamle og udnytte solenergien i integrerede solceller
- reducere solindfaldet i sommerperioden og dermed reducere ventilationsbehov og reducere/eliminere kølebehov
- sikre en bedre udnyttelse af dagslyset og derved reducere behovet for kunstlys
- at yderligere reducere brugen af kunstlyset ved at regulere dette efter dagslyset
- medføre mindst mulig reduktion eller forvrængning af udsynet gennem vinduerne

Den samlede varmebelastning bliver væsentligt reduceret og afskærmningen vil yderligere medføre bedre termisk og visuel komfort med optimal dagslysudnyttelse, bedre dagslysfordeling i rummet samt beskyttelse mod blænding med samtidig bevarelse af udsyn/udsigt. Fordelene ved at integrere solcellerne i en solafskærmning er: - stor fleksibilitet i integrering på udvalgte steder i facaden, - automatisk tilpasning af vinklen på lameller og solceller efter solhøjden (maksimering af solintensiteten), - nemmere udbygning, udskiftning og vedligeholdelse, - dobbeltudnyttelse af en solafskærmning, der ellers ofte betragtes som et fremmedelement i facaden (der bliver bedre argumenter for at forsyne bygningen med en kvalitetsafskærmning, som der i alle tilfælde er brug for). Konceptet kan i princippet benyttes på alle typer bygninger, hvor en solafskærmning er påkrævet.

## Energimæssig analyse af PV-shade

### Solafskærmningens primære funktioner

Ved at integrere solceller i solafskærmninger tilføjes en ekstra funktionalitet, som skal integreres i reguleringsstrategien for systemet. Traditionelt betragtes nedenstående funktioner som de primære for afskærmningen:

Komfort:	reduktion af overtemperaturer reduktion af blænding og refleksioner bevarelse af udsyn og udsigt maksimere udnyttelsen af dagslys
Energi:	reduktion af ventilationsbehov reduktion af kølebehov maksimere udnyttelsen af dagslys og passiv solvarme

Hertil kommer nu funktionen

Energi: maksimere elproduktionen fra solcellerne

Dette komplicerer naturligvis den 'optimale' reguleringsstrategi, men i praksis ændrer dette hensyn ikke meget. Da brugeraccept altid er afgørende for om reguleringen vil fungere, må der opereres med to hovedsituationer: én for den tid, hvor der er personer til stede i rummet bag afskærmningen (komfort-mode), og en anden for den tid, hvor der ikke er (energi-mode). I komfort-mode styres lamellerne altså efter komfortkravene nævnt ovenfor, også selv om udbyttet fra solcellerne kunne øges i en lidt anden indstilling. Den vanskeligste afvejning vil derfor være i energi-mode, hvor der vil være tidspunkter hvor der skal tages stilling til, om udnyttelse af passiv solvarme vil give større gevinst end aktiv udnyttelse af solvarmen gennem solcellerne.

Systemets funktioner som *solafskærmning* er dels at reducere solindfaldet på tidspunkter, hvor solindfaldet er uønsket, fordi indetemperaturen bliver for høj, og dels at reducere direkte solindfald, som kan medføre gener i form af blænding og refleksioner i pc-skærme eller andre overflader i nærheden af arbejdspladserne. Herved forbedres både den termiske og den visuelle komfort samtidig med at behovet for ventilation og eventuel køling reduceres. Ønsket om at afskærmningen ikke må forstyrre udsigten/udsynet mere end højst nødvendigt samt ønsket om at opnå størst mulig dagslysudnyttelse medfører, at afskærmningen kun bør lukkes så meget, at de primære funktioner er opfyldt bedst muligt. Umiddelbart kan man forestille sig 4 forskellige reguleringsstrategier:

1. Regulering til en fast lamelvinkel afhængigt af sol-/lysintensitet på facaden, eventuelt årstidsafhængig.
2. Fuld, kontinuert regulering efter udvendig solintensitet ( $W/m^2$ ) eller belysningsstyrke (lux)
3. Cut-off vinkel, som lukker lamellerne så meget at direkte solindfald netop undgås
4. Regulering af lameller til en position vinkelret på solens profilvinkel, dvs. solhøjdens projektion på facadens normalplan

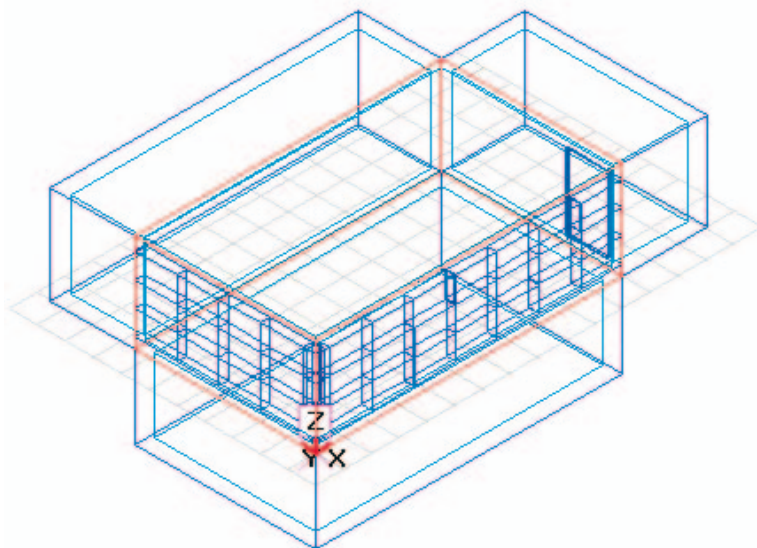
### Analyser med BSim

Analyserne i BSim er gennemført for en model af prøvelokalerne ('plus-kontorer') i Syddansk Universitet, se figur 41, SDU, som beskrevet i kapitlet *Implementering i bygning* side 60. Den teoretiske analyse af afskærmningssystemernes funktion er gennemført med udgangspunkt i ovenstående overvejelser. Formålet med disse analyser er at opstille den samlede energibalance for et typisk kontorområde og gennem en række scenarier identificere de kritiske design- og reguleringsparametre for en regulerbar afskærmning med solceller.



Figur 41. Foto af sydfacaden på Syddansk Universitet i Sønderborg, hvor prøvekontorerne er placeret ca. midt i billedet (med lidt mere åbne lameller end de øvrige kontorer, som har fast lamelhældning).

For at afskærmningssystemet kan fungere tilfredsstillende er det nødvendigt til ethvert tidspunkt at prioritere mellem de mange funktioner som systemet samtidigt skal kunne opfylde. Grundlaget for en optimal reguleringsstrategi er beskrevet i kapitlet *Afskærmningens multifunktionelle regulering* på side 41. I BSim er der foretaget flere successive simuleringer for at kunne optimere lamelhældningen i forhold til solen, hvilket ikke er en indbygget funktion i programmet.



Figur 42. BSim-model for bygningen, der er simuleret som beskrevet i tabel 2 og tabel 3.

For bygningsmodellen er følgende der opstillet 3 modeller, som vist i tabel 2.

Tabel 2. Beskrivelse af modeller for bygning og solafskærmning, som er opbygget i BSim.

Model	Beskrivelse
A	Model af kontor svarende til testkontorets geometri med mekanisk køling og indvendig solafskærmning (svarende til lyse gardiner).
B	Model af kontor svarende til testkontorets geometri med køling. Udvendig solafskærmning af faste lameller svarende til de almindelige kontorer på SDU.
C	Som B, men med bevægelige lameller.



For disse modeller integreres der følgende teknologier:

- 1 Ingen øvrig teknologi integreres
- 2 Der integreres dagslysstyring
- 3 Integrering af solceller i solafskærmningen
- 4 Der integreres både dagslysstyring og solceller i solafskærmningen

Ved at kombinerer de forskellige modeller med de forskellige teknologiske løsninger er følgende scenarier beregnet:

Tabel 3. Gennemregnede varianter af de tre bygningsmodeller, beskrevet i tabel 2.

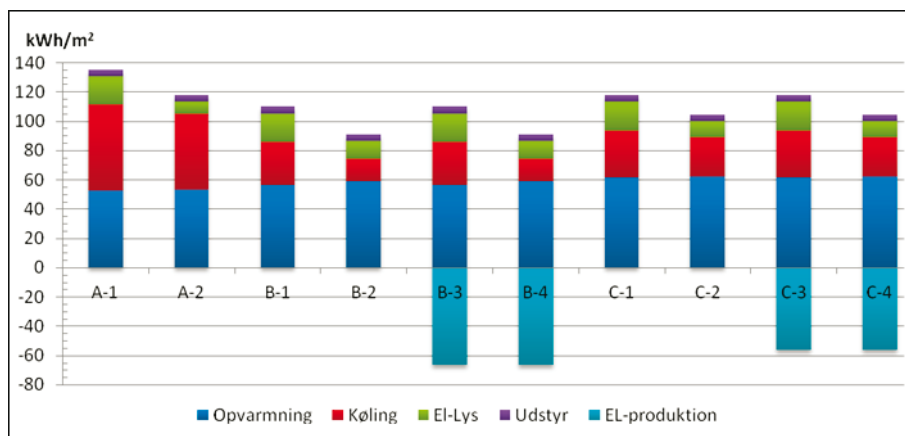
Scenarie	Beskrivelse
A-1	Dette scenarie svarer til et traditionelt kontor med mekanisk køling.
A-2	Som A-1, men med dagslysstyring.
B-1	Et scenarie med en fast udvendig solafskærmning af glaslameller.
B-2	Som B-1, men hvor der er dagslysstyring. Dette scenarie svarer til de almindelige kontorer på SDU
B-3	Som B-1, men hvor der er integreret solceller i solafskærmningen.
B-4	Som B-1, men hvor der er integreret både dagslysstyring og solceller.
C-1	Et scenarie hvor der er udvendig bevægelig solafskærmning.
C-2	Som C-1, men hvor der er integreret dagslysstyring
C-3	Som C-1, men hvor der er integreret solceller i solafskærmningen.
C-4	Som C-1, men hvor der er integreret både dagslysstyring og solceller. Scenariet svarer til prøvekontorerne på SDU

#### *Uddybning af scenarier*

- Kombinationsmulighed A-3 og A-4 er ikke simuleret, da integrering af solceller i solafskærmningen ikke har relevans.
- Ved beregningerne er det tilstræbt at få samme visuelle og termiske indeklima ved de forskellige scenarier, således at energiforbruget sammenlignes på sammen grundlag.
- I model B er de faste solafskærmning vinklet  $45^\circ$  i forhold til vandret.
- For model C og simuleringerne i scenarie 3 er der ikke tale om en direkte implementering af reguleringsalgoritmen, som den fysisk er realiseret i SDU, i BSim, men i stedet er der opstillet en tilnærmet regulering, som respekterer de forudsætninger og giver en korrekt energimæssig vurdering på årsbasis.
- Den bevægelige solafskærmning i model C kan dreje  $90^\circ$  i forhold til vandret. Styringen af afskærmningen i tidsrummet mellem kl. 8-17, på alle hverdage hvor det antages at der er personer på kontoret, er reguleret efter at direkte solstråling netop ikke kan passere gennem afskærmningen.
- Udenfor tidsrummet 8-17, reguleres solafskærmningen efter en optimal vinkel, i forhold til solen, så effekten fra solcellerne bliver størst mulig. Da denne reguleringsform ikke er mulig i BSim, antages den optimale vinkel til  $45^\circ$ .
- Lysniveauet på kontoret følger DS700:2005 krav, om at belysningsstyrken på arbejdsplanet skal være på 200 lux. Arbejdspladsen er placeret midt i lokalet 1,5 meter fra vinduet.

## Resultater af beregningen

Figur 43 viser energiforbrugsfordelingen for alle scenarier. For overblikkets skyld er ventilation og opvarmning slået sammen under fællesnævneren opvarmning.



Figur 43. Resultater af BSim-beregninger for tilfælde A1 – C4.

Tabel 4 giver en samlet oversigt over de beregningsmæssige resultater vedrørende energiforbrug til opvarmning, køling og belysning. Sidste kolonne viser det vægtede energiforbrug, svarende til det vurderingsgrundlag som anvendes i bygningsreglementet for energirammen, hvor elforbruget vægtes med en faktor 2,5 i forhold til varmekonsumet.

Tabel 4, Resultaterne fra BSim beregningerne. Alle værdier er omregnet til kWh/m². Det bemærkes, at tallene ikke umiddelbart kan lægges sammen, da opvarmning i ventilationsanlæg er lagt ind i 'opvarmning' og elforbrug til ventilation er ens i alle tilfælde.

Scenario	Opvarmning og ventilation	Køling	Lys	El-produktion	Vægtet energiforbrug
A-1	53,0	58,6	19,3	0	135,5
A-2	53,4	51,6	8,5	0	118,2
B-1	56,4	29,8	19,3	0	110,2
B-2	59,0	15,7	11,7	0	91,1
B-3	56,4	29,8	19,3	-66,3	43,9
B-4	59,0	15,7	11,7	-66,3	24,8
C-1	62,0	32,0	19,3	0	118
C-2	62,2	27,1	10,8	0	104,9
C-3	62,0	32,0	19,3	-56,3	61,7
C-4	62,2	27,1	10,8	-56,3	48,6

## Diskussion af beregningsresultater

Elforbruget til opvarmning og ventilation stiger med 17 % fra scenarie A-1 til C-4. Grunden til denne stigning skal dels findes i at solafskærmningen er flyttet ud på den udvendige siden af vinduer. Så solens varmestråling inde i rummet reduceres i forhold til scenarie A-1.

Med dagslysstyring i lokalet halveres elforbruget til belysning. Det siger dog intet om der forekommer blænding for personer der opholder sig i lokalet. I model C, hvor lamellerne reguleres således at direkte solstråling netop ikke passerer lamellerne, er eventuelle blændingsproblemer reduceres i forhold til model B's faste lameller.

Årsagen til scenarie C-3 og C-4 har et højere samlet elforbrug end scenarie B-3 og B-4, er at solafskærmningen, i tidsrummet 8-17 på hverdage, afskærer direkte solstråling i at passerer gennem solafskærmningen. Den varierende vinkel på lamellerne, gør at solcellernes effektivitet bliver reduceret og de vil derfor ikke opnå en optimal effekt.

## Resultaternes anvendelighed i andre bygningsudformninger

Den aktuelle analyse vedrører simuleringer for en bestemt bygningsudformning og orientering. I forhold til andre bygningsudformninger vil der være en række forhold der forskyder resultaterne og tendenserne fra disse beregninger:

Ved orienteringer af facaden mod øst og vest vil det energimæssige potentiale fra solcellerne skulle reduceres med op til ca. 30 %. Endvidere vil der være tale om længere perioder med lavtstående sol, som bevirker at vandrette lameller vil skulle stå mere lukkede, og derved igen giver anledning til et forøget elforbrug til belysning. I disse situationer skal det overvejes om en lodret lamel ville være en bedre løsning, idet lamellen derved ville kunne få en mere sydlig orientering og det vil være muligt hurtige at få en fri synsretning ud gennem lamellen i en retning vinkelret på solindfaldet.

I bygninger med en større etagehøjde kan det være fordelagtigt at tænke en anden solafskærmningsstrategi for den højest siddende del af vinduerne i facaden, idet disse især vil bidrage til, at dagslys kan trænge dybt ind i rummet og reducere mængden af kunstlys. Tilsvarende kan brystningspartiet udnyttes mere målrettet mod produktion af el fra solceller, idet denne zone kun i meget begrænset omfang har indflydelse på dagslysniveauet i lokalet.

## Konklusioner og anbefalinger

På baggrund af de foretagne analyser og bygningssimuleringer kan der gøres følgende konklusioner og anbefalinger vedrørende integrering af solceller i vandrette, solafskærmende lameller:

- Gevinsten ved at dreje lameller og solceller optimalt (om én akse) efter solen vil i praksis højst give en forøgelse af elproduktionen på ca. 10 % i forhold til en fast hældning på mellem 50° og 90°, og vil i øvrigt næppe være ideel med hensyn til visuel komfort (blænding og udsyn)
- Tanken om at lameller og dermed solceller 'automatisk' vil blive indstillet i en gunstig ('optimal') vinkel for maksimering af elproduktionen holder kun for sydvendte facader ( $\pm 30^\circ$ )
- Ved større afvigelser fra syd vil der enten være problemer med at lamellerne giver utilstrækkelig beskyttelse mod blænding eller at de udelukker for meget dagslys (og udsyn), hvorved elforbruget til belysning stiger
- Åbningsgraden, dvs. transparent areal i forhold til samlet areal af lamellerne, har stor betydning for, hvordan lamellerne vil blive oplevet af brugerne. Tedlar-film, som ofte anvendes ved fastgørelse af solceller på glaslameller, giver ikke et klart udsyn, og vil normalt ikke give et acceptabelt udsyn, når lamellerne er lukket til
- Hvis blænding skal undgås, må åbningsgraden højst være 3-5 %, afhængigt af glastypen, og derfor må lameller med solceller altid suppleres med en anden form for afskærmning, fx gardiner
- Indbyrdes skygge mellem lamellerne kræver, at der foretages omhyggelige analyser af, hvor bredt det aktive areal skal være, og hvordan skyggerne påvirker ydelsen gennem hele året
- I det samlede energiregnskab vil integrering af solceller i lamelafskærmninger sjældent være optimalt, bl.a. fordi der i opvarmningssæsonen vil være en stor konflikt mellem ønsket om udnyttelse af passiv solvarme og dagslys med ønsket om at en høj elproduktion fra solcellerne
- Integrering af solceller i lamelafskærmninger vil sjældent være den optimale form for bygningsintegrerede solceller, og løsningen bør derfor primært vælges ud fra æstetiske/arkitektoniske overvejelser eller ud fra de faktiske muligheder i et konkret byggeri

# Afskærmningens multifunktionelle regulering

Der er to store udfordringer ved at opstille en funktion for 'optimal', integreret regulering. Den ene er, at man skal veje energiomkostninger mod komfort, den anden - og ofte endnu større udfordring - er, at man skal veje en form for komfort mod en anden form for komfort. En solafskærmning påvirker energiforbruget til belysning, opvarmning, ventilation og køling, samtidig med at den betjenes for at forbedre visuel og termisk komfort. For at tage hensyn til alle disse forhold i en matematisk formel, som udtrykker en reguleringsstrategi, er det hensigtsmæssigt i stedet for komfort at regne med diskomfort eller sandsynligheden for diskomfort. Der er generelt stor enighed om, at der kan være store omkostninger forbundet med diskomfort, fx i form af mindre produktivitet, større sygefravær, etc. Både energiforbruget og forskellige former for diskomfort kan altså regnes som driftsomkostninger. Når betydningen af komfort indregnes ved sandsynligheden for diskomfort i optimeringsfunktionen, skal optimeringsfunktionen sikre, at summen af 'omkostninger' holdes på det laveste mulige niveau.

## Omkostningsfunktion eller optimeringsfunktion

Fordi alle bidrag til funktionen indgår som en 'omkostning' kaldes funktionen ofte en *cost function* (litt.), men et måske lidt bedre beskrivende udtryk vil være en *optimeringsfunktion*, som benyttes i det følgende. En simpel, generel formel for en optimeringsfunktion for reguleringen af en solafskærmning kan beskrives ved et sum-udtryk, som vist i formlen nedenfor.

$$U = W_1 \cdot Q_{heat,cool}(Q_{gn}) + W_2 \cdot Q_{light} + W_3 \cdot f_{th} \cdot Occ + W_4 \cdot f_{vis} \cdot Occ + W_5 \cdot f_{view} \cdot Occ \quad (1)$$

- $U$  er den samlede 'omkostning' eller det samlede ubehag  
 $W_1 \dots W_5$  er vægtningskonstanter  
 $Q_{heat,cool}$  er den elektriske energi til opvarmning, ventilation og køling, idet parentesen angiver, at størrelsen især afhænger af varmetilskuddet  $Q_{gain}$   
 $Q_{light}$  er den elektriske energi til belysning  
 $g_{gn}$  er 'gratis' varmetilskud fra solindfald og belysning, som jo er påvirket af solafskærmningens indstilling  
 $f_{th}$  er en funktion, der beskriver sandsynlighed for termisk diskomfort  
 $f_{vis}$  er en funktion der beskriver sandsynligheden for visuel diskomfort  
 $f_{view}$  er en funktion der tager hensyn til sandsynligheden for ubehag ved (begrænsninger i) udsynet gennem vinduet  
 $Occ$  er en binær funktion, der tager højde for at brugernes komfortkrav, når de er til stede i rummet.

Funktionen  $Occ$  er sin simpleste form blot en tilstedeværelsesparameter, (*occupancy*) som har værdien 1,0, når der er personer i det aktuelle rum og værdien 0, når der ikke er. Herved opnås det, at når der ikke er personer til stede, reguleres solafskærmningen kun for at minimere energiforbruget. Optimeringen sker ved at minimere størrelsen af  $U$ . Det bemærkes, at de enkelte led i optimeringsfunktionen kun skal tage hensyn til ændringer i de variable, som skyldes ændringer i solafskærmningens indstilling.

Når en regulerbar solafskærmningen har integrerede solceller vil elproduktionen afhænge af afskærmningens indstilling, fx hældningen på lamellerne i en lamelbaseret afskærmning. Der må derfor tilføjes et led i formel (1), nemlig el-tilskuddet fra solcellerne. Der er altså tale om en negative omkostning, som i nogle tilfælde vil bevirke, at summen af 'omkostninger' bliver negativ:

$$U = -W_0 \cdot Q_{PV} + W_1 \cdot Q_{heat,cool}(Q_{gn}) + W_2 \cdot Q_{light} + W_3 \cdot f_{th} \cdot Occ + W_4 \cdot f_{vis} \cdot Occ + W_5 \cdot f_{view} \cdot Occ \quad (2)$$

$W_0$  er vægtningskonstant for solcelleenergi  
 $Q_{PV}$  er den elektriske energi produceret af solcellerne

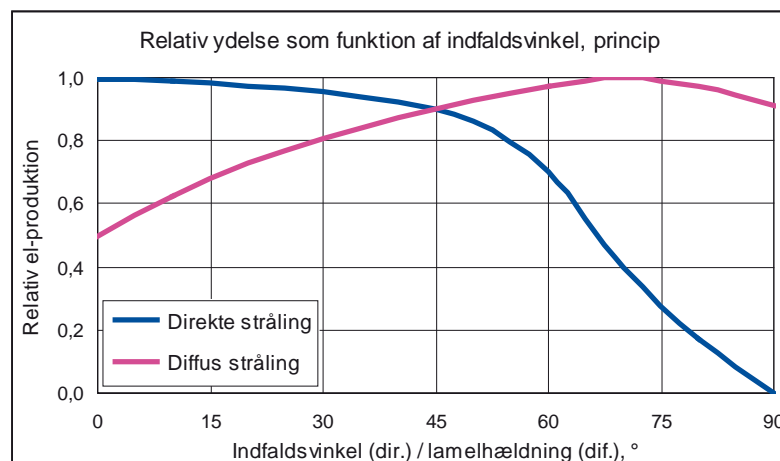
I sin simpleste form skal reguleringsenheden programmeres således, at den til ethvert øjeblik (tidsstep) kan minimere værdien af  $U$ , og i denne form indregnes  $Q$ -værdierne som effekter (kW), eller som energi (kWh), hvis den korte periode der betragtes, er en time. Vægtningsfaktorerne bør fastlægges omhyggeligt af bygherre og brugere i forhold til, hvad det må koste af afvige fra maksimal komfort. I en mere avanceret optimeringsfunktion må værdien af  $U$  integreres over tiden, og da skal der også tages hensyn til akkumulerede virkninger af de gratis varmetilskud og bygningens termiske masse. I denne variant af optimeringsfunktionen indregnes  $Q$ -værdierne altid som energi.

## Bidrag til optimeringsfunktionen

I det følgende beskrives, hvordan hvert led indgår i optimeringsfunktionen. Det er vigtigt at bemærke, at komfortparametrene skal vægtes meget højt, til tidsperioder, hvor der er personer til stede i det aktuelle rum.

### El-produktion fra solceller i lamelafskærmning

El-produktionen for den givne type solceller afhænger naturligvis af lysindfaldet, fordelingen mellem direkte og diffus stråling samt reflektans / absorptans af solcellens overflade / dæklag. For den direkte solstråling afhænger strålingsintensitet og ydelse af indfaldsvinklen på en måde som skitseret i Figur 44 (blå kurve). Ud fra beregning af solens position (azimut- og højdevinkel) samt hældningen på lamellerne med solceller kan indfaldsvinklen beregnes, ligesom det kan beregnes, om el-produktionen kan øges ved at dreje lamellerne. Men solcellen udnytter også den diffuse stråling (fra himmel og omgivelser), og her vil ydelse afhænge af den aktuelle lysfordeling på himlen. Den røde kurve i figur 44 viser i princip, hvordan udnyttelsen af den diffuse stråling vil afhænge af lamellernes (solcellernes) hældning.



Figur 44. Relativ ydelse eller udnyttelse af lyset fra henholdsvis den direkte stråling og den diffuse stråling. Kurverne er kun principielle, og vil bl.a. afhænge af solcellernes overfladereflektans, lysfordelingen på himlen og omgivelsernes reflektans.

Ved beregningen af den samlede, aktuelle ydelse fra solcellerne skal der altså benyttes to 'effektivitetsfaktorer', én for den direkte stråling og en anden for den diffuse stråling.

### Energiforbrug til opvarmning

Solafskærmningens indflydelse på varme- og kølebehov hænger sammen med ændringen i solvarmetilførsel samt evt. ændring i belysningen. I opvarmningssæsonen bidrager solindfaldet til at minimere værdien af  $U$  (negativt bidrag til summen), mens det er omvendt i sommerperioden, hvor solindfaldet bidrager til at øge ventilations- og kølebehovet og derfor øger værdien af  $U$ . Energiforbruget til opvarmning kan for en given periode beskrives ved formlen:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (3)$$

$$Q_{H,ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (4)$$

- $Q_{H,nd}$  er varmebehovet (nd for need), kWh
- $Q_{H,ht}$  er det totale varmetab i opvarmningstilfældet (heat transfer), kWh
- $\eta_{H,gn}$  er udnyttelsesfaktoren for varmetilskud (gn for gain)
- $Q_{H,gn}$  er summen af varmetilskud, kWh
- $Q_{tr}$  er det totale varmetab ved transmission, kWh
- $Q_{ve}$  er det totale varmetab ved ventilation, kWh
- $H$  er et indeks som angiver, at der er tale om opvarmningstilfælde.

I praksis kan reguleringen i øjeblikssituationen kun være optimal, hvis systemet 'ved', om det aktuelle øjeblik ligger inden for opvarmningsperioden. En pragmatisk måde at fastslå, om et givent øjeblik falder inden for opvarmningsperioden vil være at betragte varmebalancen for et helt døgn, for at afgøre, om der totalt vil være et varmebehov inden for de 24 timer. Opvarmningssæsonens periode fra første til sidste dag i kan principielt beskrives ved udtrykket angivet i formel (5), jf. Dansk Standard, 2008:

$$\theta_e \leq \theta_{i,set} - \frac{\eta_{H,gn,1} \cdot Q_{gn,day}}{(H_{tr} + H_{ve}) \cdot 24} \quad (5)$$

- $\theta_e$  er døgnmiddelværdi af udetemperaturen (°C)
- $\theta_{i,set}$  er vinter-setpunktstemperaturen for det aktuelle rum (°C)
- $\eta_{H,gn,1}$  er udnyttelsesfaktoren for varmetilskud, når  $g_H = 1,0$
- $Q_{gn,day}$  er middelværdi af varmetilskud over døgnet (kWh)
- $H_{tr}$  er specifikt varmetab ved transmission (kW/K)
- $H_{ve}$  er specifikt varmetab ved ventilation (kW/K)

Udnyttelsesgraden for varmetilskuddet afhænger af bygningens tidskonstant og af forholdet mellem varmetab og varmetilskud:

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_C^{(a_H+1)}} \quad (6)$$

- $g_H$  er forholdet mellem varmetilskud og varmetab, som afhænger af tidskonstanten  $\tau_C$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (7)$$

$\tau$  er tidskonstanten, der afhænger af bygningens termiske masse og det specifikke varmetab

$\tau_{H,0}$  og  $a_{H,0}$  er størrelser, som bl.a. afhænger af bygningstypen og den tidsperiode, som anvendes i metoden

Typiske værdier for  $\tau_{H,0}$  og  $a_H$  er angivet i tabel 5, jf. Dansk Standard, 2008.

Tabel 5. Værdier for den dimensionsløse parameter  $a_{H,0}$  og tidskonstanten  $\tau_{H,0}$  (i timer), som anvendes i formel (6) og (7).

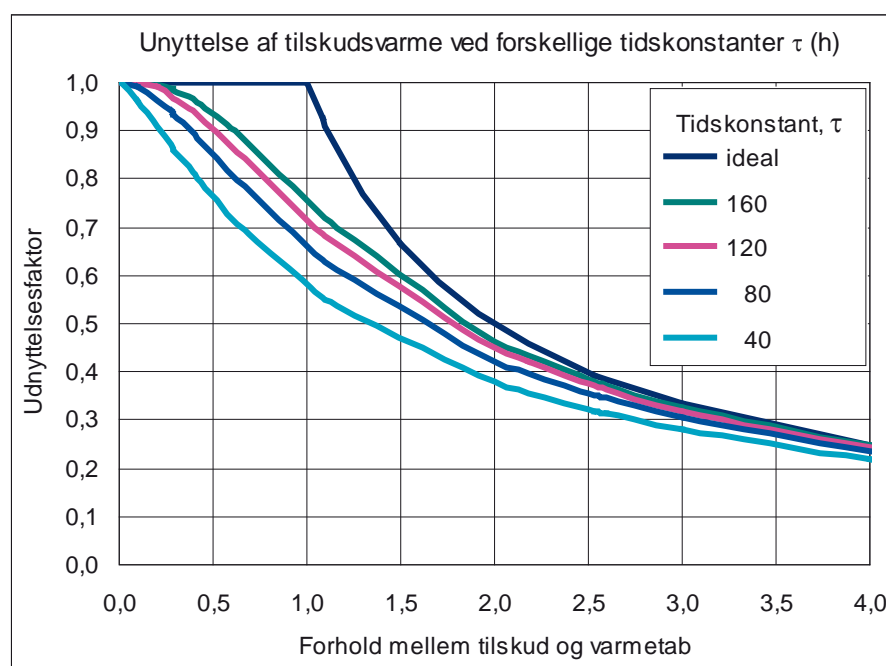
Metodetype	$a_{H,0}$	$\tau_{H,0}$ (h)
Månedsbaseret	1,0	15
Periodebaseret (døgn)	0,8	30

Værdierne kan også fastsættes nationalt, og andre værdier benyttes i BE10.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr} + H_{ve}} \quad (8)$$

$C_m$  er rummets eller bygningens varmekapacitet, kWh/K

Figur 45 viser kurverne for udnyttelsesfaktoren, som den beregnes i Be06-programmet. Når varmetilskud er lig med varmetab (1,0 på x-aksen) varierer udnyttelsesgraden mellem 0,57 i den ekstremt lette bygning til 0,76 i den meget tunge bygning.



Figur 45. Kurver for udnyttelse af varmetilskud (interne varmebelastninger plus sol) som funktion af forholdet mellem varmetilskud og varmetab.

### Energiforbrug til køling

Ligesom varmebehovet kan udtrykkes ved varmetab minus udnyttet varmetilskud, kan kølebehovet beskrives som varmetilskud minus 'udnyttet' varmetab:

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ht} \cdot Q_{C,ht} \quad (9)$$

$Q_{C,nd}$  er nødvendigt energiforbrug til køling, kWh

$Q_{C,gn}$  er døgnmiddelværdi af varmetilskud (interne og sol) i køleperioden (C for cooling og gn for gain)

$\eta_{C,ht}$  er 'udnyttelsesfaktoren' for varmetabet  
 $Q_{C,ht}$  er middelværdi af varmetab (heat transfer) over døgnet (kWh)

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (10)$$

$Q_{int}$  er summen af interne varmetilskud over en given periode  
 $Q_{sol}$  er summen af soltilskud over en given periode

Formel (5) kan omskrives, så den udtrykker udetemperatur i forhold til kølelesepunkt, eller med andre ord beskriver køleperiodens længde:

$$\theta_e \geq \theta_{i,set,C} - \frac{Q_{gn,day}}{\eta_{C,ht,1} \cdot (H_{tr} + H_{ve}) \cdot 24} \quad (11)$$

$\theta_e$  er døgnmiddelværdi af udetemperaturen (°C)  
 $\theta_{i,set,C}$  er sommer-setpunktstemperaturen for det aktuelle rum (°C)  
 $Q_{gn,day}$  er middelværdi af varmetilskud over døgnet (kWh)  
 $\eta_{C,ht,1}$  er udnyttelsesfaktoren for varmetab, når  $g_C = 1,0$   
 $H_{tr}$  er specifikt varmetab ved transmission (kW/°C)  
 $H_{ve}$  er specifikt varmetab ved ventilation (kW/°C)  
 $g_C$  er forholdet mellem varmetilskud og varmetab

$$\eta_{C,ht} = \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}} \quad (12)$$

$g_C$  er forholdet mellem varmetilskud og varmetab,  $Q_{C,gn} / Q_{C,ht}$   
 $a_C$  er en dimensionsløs størrelse, som afhænger af tidskonstanten  $\tau_C$

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} \quad (13)$$

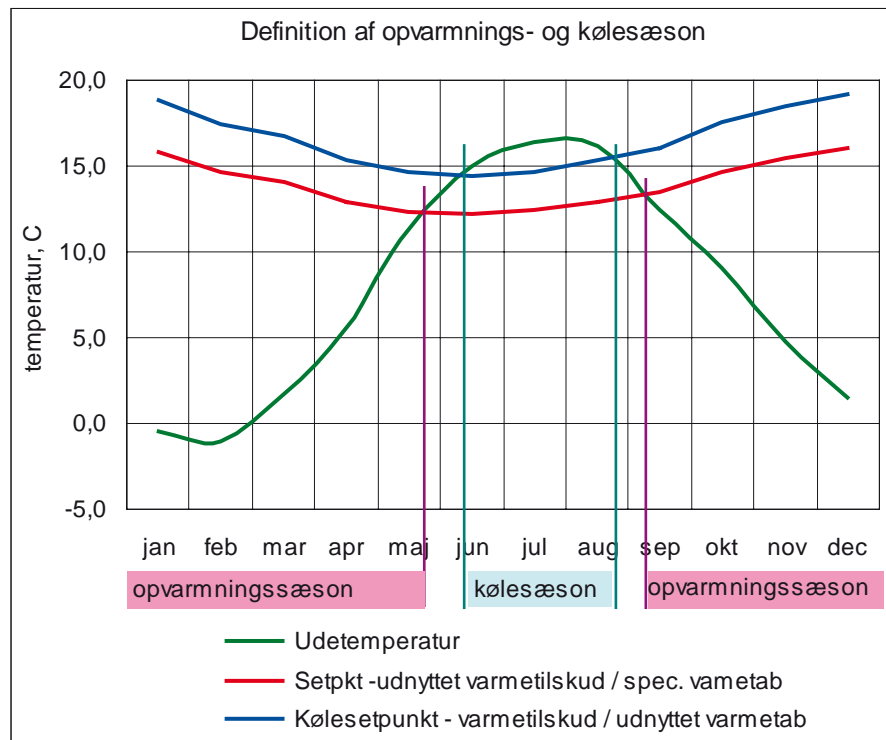
Værdierne af  $\tau_{C,0}$  og  $a_{C,0}$  er størrelser, som bl.a. afhænger af bygningstypen og den tidsperiode, som anvendes i metoden. Værdierne kan antages at have samme størrelse som angivet for varmetilfældet i Tabel 5 (hvor de angives med indeks  $H$  for heating).

### Længden af opvarmingsæson og kølesæson

Figur 46 viser kurver for venstre- og højresiderne i ligningerne (4) og (10). Skæringspunkterne mellem udetemperaturen (grøn kurve) og den røde og den blå kurve angiver henholdsvis opvarmingsperioden og køleperioden, altså de perioder, hvor varmetilskuddet bidrager til at reducere optimeringsfunktionen (ønsket virkning), henholdsvis øge optimeringsfunktionen (uønsket virkning).

I praksis er det overgangsperioderne mellem opvarmings- og kølesæsonerne, der giver de største udfordringer i optimering af reguleringen, fordi der inden for samme dag kan optræde både et opvarmingsbehov og et kølebehov. Et pragmatisk valg af reguleringen i overgangsperioderne kunne være, at reguleringen accepterer varmetilskud i morgentimerne (fx indtil kl. 9:00) og afviser/reducerer varmetilskud resten af dagen. Energimæssigt vil en lille afvigelse i reguleringen fra det helt optimale ikke have væsentlig betydning, mens det indeklimateæssigt kan medføre lidt større sandsynlighed for diskomfort.





Figur 46. Opvarmnings- og kølesæson defineret ud fra temperatursetpunkter og varmetilskud/varmebelastning.

### Vægtning af termisk komfort mod energibesparelse

Temperaturstigningen som skyldes at varmetilskuddet er større end det, som kan udnyttes i opvarmningstilfældet eller som kan fjernes ved varmetab i køletilfældet kan udtrykkes ved ligningerne:

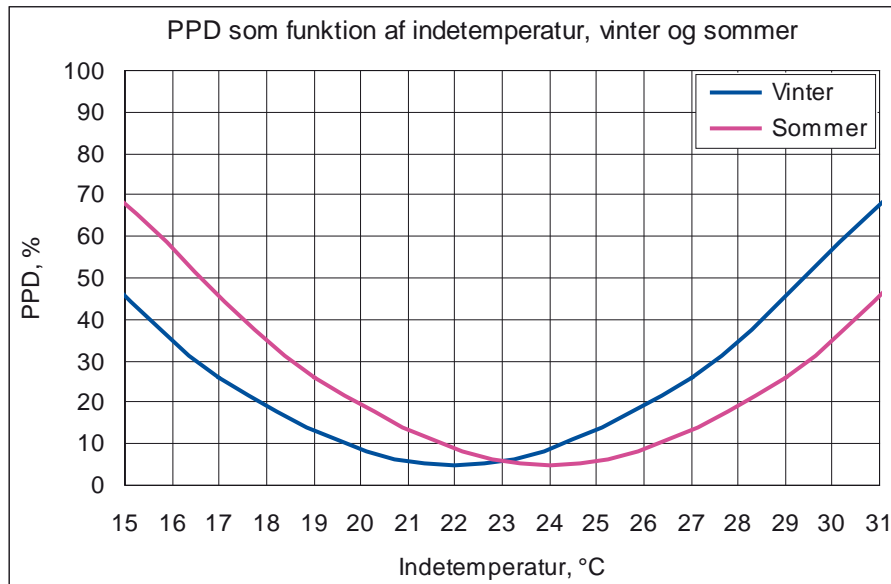
$$\Delta\theta_H = \frac{(1 - \eta_{H,gn}) \cdot Q_{H,gn}}{(H_{tr} + H_{ve}) \cdot t} \quad (14)$$

og

$$\Delta\theta_C = \frac{Q_{C,gn}}{(1 - \eta_{C,gn}) \cdot (H_{tr} + H_{ve}) \cdot t} \quad (15)$$

Formel (13) udtrykker, at den del af varmetilskuddet, som ikke udnyttes i opvarmningen, vil medføre at temperaturen stiger over setpunktet for opvarmning. Tilsvarende udtrykker formel (14), at den del af varmetabet, som ikke kan 'udnyttes' til at udligne varmetilskuddene vil medføre en temperaturstigning over setpunktet for køling.

Figur 47 viser kurver for Fangers komfortligning, her udtrykt ved det forventelige procentdel af en persongruppe, som vil opleve termisk diskomfort, Predicted Percentage of Dissatisfied (*PPD*), under givne forudsætninger mht. påklædning, aktivitetsniveau samt lufthastighed og luftfugtighed. Det bemærkes, at kurverne gælder for den operative temperatur, altså den oplevede vægtning af lufttemperatur og strålingstemperatur. Figuren viser, at mindre afvigelser fra temperatur-setpunkterne sommer og vinter kun øger sandsynligheden for diskomfort ubetydeligt.



Figur 47. Typiske kurver for 'predicted percentage of dissatisfied' mht. termisk komfort, henholdsvis vinter (blå kurve) og sommer. Kurverne er baseret på typiske værdier af påklædning, aktivitetsniveau og lufthastigheder, som i dette tilfælde giver laveste PPD-værdier ved 22 °C, henholdsvis 24 °C.

I et rum med mange personer kan der i praksis ikke opnås en *PPD*-værdi på 5 %, dels pga. forskelle i påklædning og aktivitetsniveau, og dels pga. lokale variationer i de termiske parametre. Det betyder, at bundniveauet typisk sættes til 10 %, hvilket udtrykkes ved at der anvendes en tolerance på temperaturen på 2 - 2,5 °C. Inden for disse grænser viser kurverne, at der kan antages en stigning i *PPD* på ca. 2 % ved en afvigelse på 1 °C fra den optimale. Med betegnelsen *TDP* (thermal discomfort probability) i stedet for *PPD* fås:

$$\frac{\Delta TDP}{\Delta \theta_i} = 0,02 \quad [2 \% \text{ pr. } ^\circ\text{C}], \text{ inden for toleranceområdet} \quad (16)$$

Uden for toleranceområdet er temperaturafvigelsen mere kritisk, eller i nogle tilfælde måske helt uacceptabel. Som regel tillades et vist antal timer af brugstiden uden for tolerancegrænserne, og derfor må man også se på ændringen i *PPD* i et vist interval uden for toleranceområdet, fx 2 grader uden for dette område. I disse områder vil *PPD*- eller *TDP*-værdien typisk stige 4 - 5 % ved en stigning i temperaturafvigelsen på 1 °C. For at prioritere indeklimaet højest kan værdien sættes til 5 %, som angivet i formel (16):

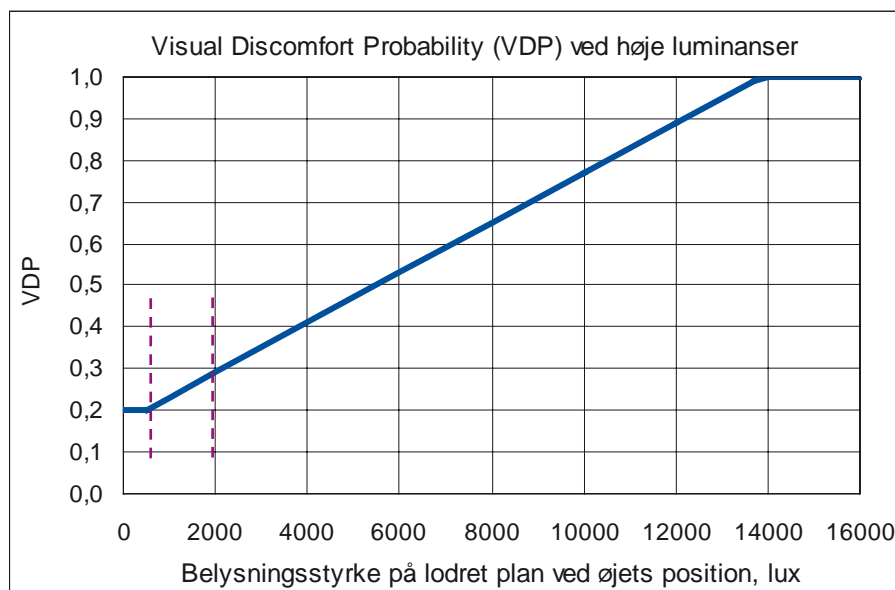
$$\frac{\Delta TDP}{\Delta \theta_i} = 0,05 \quad [5 \% \text{ pr. } ^\circ\text{C}], \text{ uden for tolerancer, kritisk område} \quad (17)$$

Det kritiske område kan defineres som det område, indetemperaturen i alle tilfælde skal være indenfor. Det betyder, at vægtningsfaktoren på termisk komfort skal være meget (uendelig) stor uden for dette område.

### Visuel diskomfort på grund af blænding

Erfaringer viser, at en solafskærmning i kontor- og erhvervsbyggeri primært benyttes, når brugerne føler sig generet af lyset, og altså ikke – som det ofte antages – for at reducere varmebelastningen i rummet. Men lyset kan virke generende på flere måder, fx ved direkte blænding, ved at lyset på arbejdsbordet eller en pc-skærm bliver for kraftigt eller ved at lyset giver for høje luminanser i synsfeltet i forhold til den aktuelle arbejdsopgave.

Et enkelt mål for, hvornår en person føler sig blændet af lyset fra et vindue, kan angives ved belysningsstyrken på (et lodret plan ved) persons øje.



Figur 48. Diskomfort pga. blænding (Visual discomfort probability due to glare, VDPG), normalt defineret ved belysningsstyrken på lodret plan ved brugerens øjenposition.

Figur 48 viser denne sammenhæng, som er beskrevet i (Wienold og Christoffersen, 2008). Kurven udtrykker sandsynligheden for at en person vil føle sig generet af blænding som funktion af belysningsstyrken på øjet. Der er tale om en forenkling af sammenhængen, men som reguleringsfunktion af solafskærmningen i typiske rum er det fordelagtigt at forenkle udtrykket. Formlen for kurven er:

$$f_{vis}(B_{pos}) = VDPG = 6,0 \cdot 10^{-5} \cdot E_{v,eye} + 0,2 \quad (18)$$

Kurven gælder ved belysningsstyrker over 500 lux, og det fremgår, at der altid må regnes med at mindst 20 % giver udtryk for diskomfort. Det bemærkes, at den meget høje procentdel, som altid vil udtrykke diskomfort er udtryk for, at præferencer og tolerancer med hensyn til visuel komfort er langt mere forskellige end med hensyn til termisk komfort. Hældningen på kurven giver følgende sammenhæng:

$$\frac{\Delta VDPG}{\Delta E_v} = 0,00006 \quad [0,006 \% \text{ pr lux eller } 0,6 \% \text{ pr. } 100 \text{ lux}] \quad (19)$$

Dette svarer til, at sandsynligheden for visuel diskomfort pga. høj luminans stiger med 3 % når den vertikale belysningsstyrke på øjet stiger med 500 lux, eller 5 % når belysningsstyrken stiger med 830 lux.

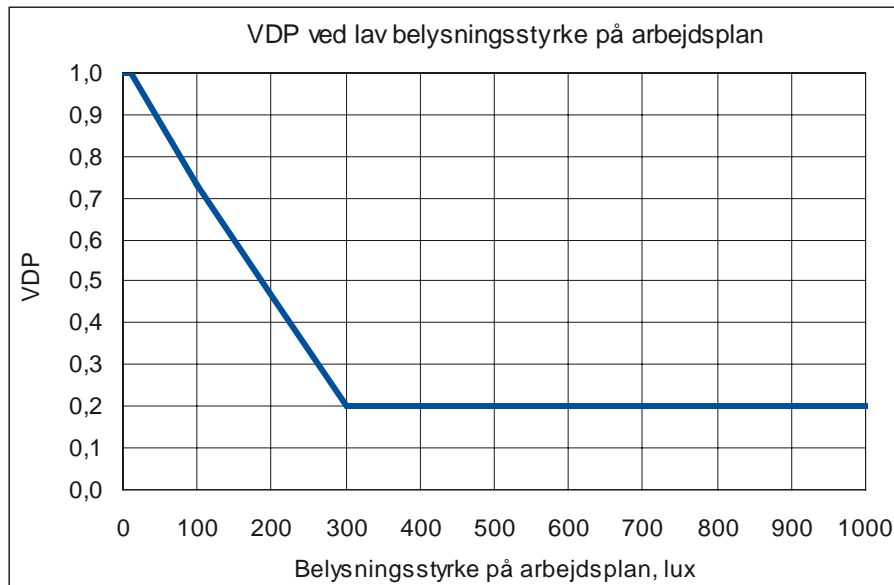
### Visuel diskomfort på grund af for lidt lys til arbejdsopgaven

For at kunne optimere reguleringen af solafskærmningen må sandsynligheden for oplevelse af visuel diskomfort på grund af blænding vurderes i sammenhæng med sandsynligheden for diskomfort pga. for lav belysningsstyrke. Et udtryk for sandsynligheden for oplevelse af diskomfort på grund af for lav belysningsstyrke på arbejdsplanet er udviklet af Lindelöf (2005):

$$\begin{aligned} \text{hvis } E_h < 10 \quad f_{vis}(B_{pos}) &= VDPL = 1,0 \\ \text{hvis } E_h > E_{opt} \quad f_{vis}(B_{pos}) &= VDPL = (1 - VDPL_{min}) \cdot (E_{opt} - E_h) / E_{opt} \\ &\quad + VDPL_{min} \\ \text{ellers} \quad f_{vis}(B_{pos}) &= VDPL = VDPL_{min} \end{aligned}$$

$E_h$  er belysningsstyrken på horisontalplan (arbejdsplan)

- $E_{opt}$  er den ønskede (optimale) belysningsstyrke på arbejdsplanet (eller arbejdsobjektet), som afhænger af arbejdsopgaven
- $VDPL$  er sandsynligheden for visuel diskomfort pga. for lidt lys (L for lav, altså for lav belysningsstyrken på arbejdsbordet)
- $VDPL_{min}$  er den laveste værdi som indekset kan antage (typisk 0,2)



Figur 49. Diskomfort pga. for lav belysningsstyrke på arbejdsbordet (Visual discomfort probability due to low illuminance,  $VDPL$ ).

Værdierne af den optimale belysningsstyrke  $E_{opt}$  og (mindste-)værdien for  $VDPL_{min}$  afhænger af den konkrete arbejdsopgave, og kurven i Figur 49 bør derfor betragtes som vejledende. Det bør endvidere bemærkes, at de to funktioner for visuel komfort, for henholdsvis for høj belysningsstyrke og for lav belysningsstyrke, bør betragtes under ét, og i praksis næsten aldrig vil være i konflikt med hinanden.

Hældningen på den skrå linje i funktionen udtrykker, at sandsynligheden for diskomfort stiger med ca. 0,25 %, når belysningsstyrken på arbejdsbordet falder med 1 lux, eller med ca. 5 %, når belysningsstyrken på arbejdsbordet falder med 20 lux

$$\frac{\Delta VDPL}{\Delta E_h} = -0,0025 \quad [-0,25 \% \text{ pr. lux eller } -25 \% \text{ pr. } 100 \text{ lux}] \quad (20)$$

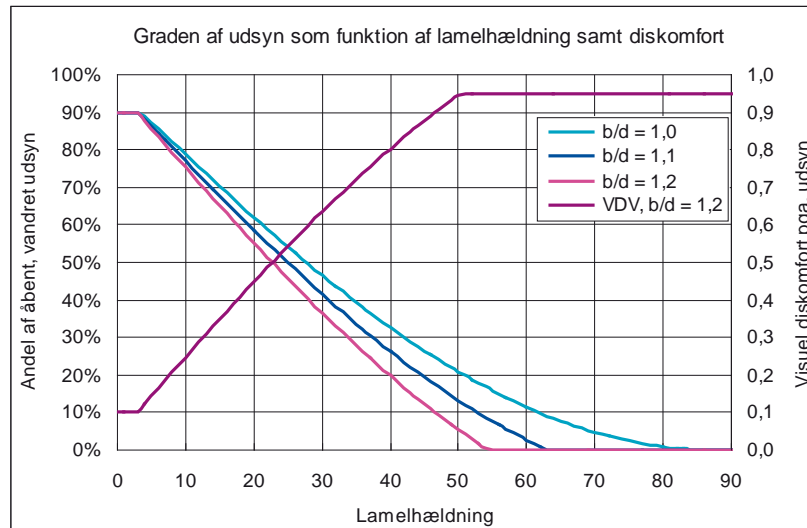
Selv om konstanterne i funktionen afhænger af den aktuelle situation, kan denne sammenhæng mellem diskomfort og lav belysningsstyrke med tilnærmelse benyttes generelt. I praksis har denne funktion begrænset interesse i situationer, hvor brugerne har individuelle (energieffektive) arbejds-lamper, da energiomkostningen ved at hæve komforten for den enkelte er meget beskedent. I dybe lokaler, hvor belysningen udelukkende er baseret på almen lofts-belysning, kan situationen derimod være mere kompleks, idet der kan være en konflikt imellem behovet for at afskærme for kraftigt dagslys og behovet for at have tilstrækkeligt lys på arbejdsbordet (arbejdsbordene).

## Udsyn

Den vigtigste egenskab ved et vindue er, at man kan se ud og følge med i hvad der sker udenfor bygningen, herunder det skiftende vejrlig (SBI-rapport 318..). Derfor betragtes udsynet også som en væsentlig komfortparameter i forbindelse med egenskaberne for facaden, herunder den aktuelle afskærmning. Muligheden for at have et godt udsyn til omgivelserne vil i nogle tilfælde være i konflikt med behovet for at afskærme mod generende blænding fra sollyset. Men da synsnedsettende blænding kan medføre, at en given

arbejdsfunktion ikke kan udføres, vil man normalt prioritere det *at undgå blænding* højere end det *at bevare udsynet*.

Diskomforten pga. af forringet udsyn kan beskrives i forhold til, hvor meget det frie udsyn reduceres eller forvanskes (fx misfarves eller forringes i skarphed). Figur 50 viser sammenhængen mellem lamelhældningen og det frie udsyn for persienner med forskelligt overlap af lamellerne (forhold mellem lamelbredde og lamelafstand på henholdsvis 1,0, 1,1 og 1,2).



Figur 50. Graden af vandret frit udsyn gennem persienner som funktion af lamelhældning. Figuren viser kurver for persienner, hvor forholdet mellem lamelbredde (b) og lamelafstand (d) er henholdsvis 1,0, 1,1 og 1,2. Mange simple persienner har i lukket tilstand et overlap på 20 % (svarende til den cyanfarvede kurve), og blokerer helt for udsynet, når lamellerne er drejet til ca. 55°, målt fra vandret. Den lilla kurve, der aflæses på højre skala, antyder en mulig kurve for sandsynligheden for visuel diskomfort (VDV) pga. reduceres udsyn (V for view out).

Figuren viser, at for en typisk persienne, hvor lamelbredden er ca. 20 % større end lamelafstanden, blokerer persienne for 50 % af det frie, vandrette udsyn ved en lamelhældning på ca. 23°, mens den lukker helt for udsynet ved en vinkel på ca. 56°. Figur 50 antyder - som et simpelt udtryk for sandsynligheden for diskomfort - solafskærmningens blokering af udsynet, dvs. 1-(andelen af udsyn).

## Vægtningstfaktorer i optimeringsfunktionen

For at kunne vægte energibidrag og komfortbidrag i optimeringsfunktionen må alle led i formlen bringes på samme enhed (fx kr. eller kr./år) eller gøres dimensionsløse. Da komfortbidragene (eller diskomfortbidragene) i forvejen er dimensionsløse og ligger mellem 0 og 1,0, vil det være passende at gøre energibidragene dimensionsløse inden for samme interval. Da vægtningstfaktorerne i alle tilfælde fastlægges ud fra subjektive vurderinger af vigtigheden af de enkelte led i optimeringsfunktionen, er det i realiteten underordnet, hvordan energibidragene gøres dimensionsløse. Da bygningsreglementets energiramme vægter varme og el i forholdet 1:2,5, vil det dog være rimeligt også at vægte på denne måde i optimeringsfunktionen. Ved at betragte de aktuelle energiforbrug som en andel af det maksimalt tilladelige energiforbrug, fx udtrykt ved energirammen i BR 2008, kan energiledene i optimeringsfunktionen gøres dimensionsløse.

Energirammen for større bygninger i BR 2008 udtrykkes som:

$$95 + 2200/A \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ pr. år}] \quad (21)$$

A er det opvarmede etageareal, m<sup>2</sup>.

I praksis betyder det at en større BR 2008 bygning har et energiforbrug på tæt ved 100 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, og derfor vil en division af de aktuelle årlige energiforbrug med 100 give en passende størrelse på de dimensionsløse energiforbrug.

Ved optimering af reguleringen for en solafskærmning i et givet øjeblik (i det følgende tidsstep) vil det enkleste være at tage udgangspunkt i den aktuelle position af afskærmningen. Hvis tidssteppet har en længde på 1 time, vil afskærmningens position ved udgangen af et tidsstep være baseret på, hvordan forholdene var 60 minutter tidligere. For at optimere reguleringen af solafskærmningen i det følgende tidsstep må man derfor se på, hvilke ændringer, der er sket siden sidste valg af afskærmningsposition. Til disse ændringer hører bl.a. ændringer i solindstråling, solens position, inde- og ude-temperatur samt evt. persontilstedeværelse i det aktuelle rum. Det er altså *ændringerne* af de enkelte led i optimeringsfunktionen, der har interesse, og derfor vil en minimering af funktionen være det samme som en minimering af ændringer fra det ene tidsstep til det næste, hvilket kan udtrykkes ved:

$$\Delta U = W_1 \cdot \Delta Q_{heat,cool}(Q_{gn}) + W_2 \cdot \Delta Q_{light} + W_3 \cdot \Delta f_{th} \cdot Occ + W_4 \cdot \Delta f_{vis} \cdot Occ + W_5 \cdot \Delta f_{view} \cdot Occ \quad (22)$$

Hvor alle variabel-leddene i formlen, angivet med et  $\Delta$  foran, er den beregnede eller forventede ændring i den variable ved en ændring af solafskærmningens position.

### Vægtning af termisk komfort mod en reduktion i energiforbrug

For at kunne vægte den termiske komfort mod en reduktion i energiforbruget må man have et vist kendskab til sammenhængen mellem energiforbruget og de valgte temperatursetpunkter for opvarmning og køling. For større bygninger, som opfylder energirammen i BR 2008 vil energiforbruget til opvarmning typisk ligge omkring 60 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, og en reduktion af ønsket inde-temperatur med 1,0 °C vil typisk medføre en reduktion på ca. 12 % af varmemeforbruget, eller ca. 7 kWh/m<sup>2</sup>. Så længe indetemperaturen ligger inden for det kritiske område kan det antages, at den relative energiændring (i % pr. °C) er konstant. Det dimensionsløse energiforbrug har vi valgt at definere som energiforbruget divideret med 100 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, svarende til et typisk maksimalforbrug for en BR 2008 bygning. I dette tilfælde bliver den dimensionsløse energiændring derfor:

$$\frac{\Delta Q_{heat,cool}(Q_{gn})}{100} \frac{\text{kWh/m}^2 \text{ pr. år}}{\text{kWh/m}^2 \text{ pr. år}} = \frac{7}{100} = 0,07$$

Vægtningen mellem termisk komfort og energiforbrug vil inden for toleranceområdet altså være en sammenligning mellem 2 % flere der oplever diskomfort i forhold til en besparelse på 7 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, mens det inden for det kritiske område vil være en sammenligning mellem 5 % flere der oplever diskomfort i forhold til en besparelse på 7 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, jf. formlerne (15) og (16) side 47. For at vægte disse værdier mod hinanden må man benytte de dimensionsløse størrelser, som vist i Tabel 6 (der skal opfattes som taleksempele for en konkret (BR2008-bygning). En ligelig vægtning af komfort og energi til opvarmning/køling fås ved at benytte en vægtningsfaktor på 3,5 inden for toleranceområdet, og på 1,4 inden for det kritiske område. Da vi imidlertid også ønsker at vægte komforten højere end en elbesparelse, skal disse vægtningsfaktorer øges yderligere med en faktor 2,5, hvorved de bliver henholdsvis 8,75 og 3,5. Da man altid vil vægte komforten højere, foreslås her, at der benyttes en faktor 10 inden for toleranceområdet, svarende til at komforten vægtes lidt højere (ca. 15 % højere) end energien. Inden for det kritiske område er der foreslået en vægtningsfaktor på 20, svarende til at komforten vægtes ca. 6 gange højere end energien.

Tabel 6. Taleksempel med sammenlignelige ændringer i termisk komfort og energiforbrug ud fra en ændring af indetemperaturen på 1,0 °C. Vægtningstaktorerne vælges således, at komfortforbedringer altid vægtes højere end energibesparelser.

		Toleranceområde	Kritisk område	Uden for kritisk område
<b>Vægtning komfort/energi</b>	vinter	22 ± 2 °C	18 – 20 °C	< 18 °C
	sommer	24 ± 2 °C	26 – 28 °C	> 28 °C
$\Delta DTPI / \Delta \theta_i$		0,02 / °C	0,05 / °C	> 0,05 / °C
Dimensionsløs komfortændring		0,02	0,05	> 0,05
Energiaændring		7 kWh/m <sup>2</sup> pr. år / °C	7 kWh/m <sup>2</sup> pr. år / °C	7 kWh/m <sup>2</sup> pr. år / °C
Dimensionsløs energiaændring		0,07	0,07	0,07
Forhold varme- og køleenergi / komfort		3,5	1,4	-
Vægtningstaktorer varme / el / komfort: W1 / W2 / W3		1 / 2,5 / 10	1 / 2,5 / 20	1 / 2,5 / 100

Værdierne i Tabel 6 betyder, at hvis vægtningstaktoren for varme- og køleenergi, W1 er 1,0, skal vægtningstaktoren for el-energi W2 sættes til 2,5 og den for termisk diskomfort W3 bør sættes til 10 i toleranceområdet og 20 uden for toleranceområdet, men inden for det kritiske område.

### Vægtning af blænding

Den primære funktion af en solafskærmning er at beskytte bygningens eller rummets brugere mod blænding. Men når afskærmningen lykkes mere i for at beskytte mod blænding, kan det både medføre en stigning i elforbruget til belysning og en *ændring* (positiv eller negativ) i varme- eller kølebehovet. Hvis reguleringen sker i opvarmningssæsonen vil lukningen udelukke en større del af et ønsket solvarmetilskud, og altså medføre et større varmeeforbrug til ugunst for optimeringen. Hvis reguleringen sker i kølesæsonen, reduceres energiforbruget til (ventilation og) køling til gunst for optimeringen. Samtidig sker der en reduktion af udsynet, hvilket vil øge sandsynligheden for diskomfort pga. reduceret udsyn.

For at vægte disse komfort- og energiaændringer mod hinanden, må man have et mål for hvor meget hvert led i optimeringsfunktionen vil eller kan ændre sig ved en given justering af solafskærmningen.

Tabel 7 viser, hvorledes en ændring i solafskærmningen fra et tidsstep til det næste kan tænkes at ændre på de visuelle komfortparametre, på solindfald og på energiforbrug. Afskærmningen er her tænkt at være en persienne med lamellerne i vandret stilling (Blindposition  $B_{pos}$  0° i tidsstep 1).

Tabel 7. Taleksempel for, hvordan en ændring i solafskærmningens indstilling fra ét tidsstep til det næste (drejning af persienne lameller fra 0 til 60°) kan ændre komfortparametre, udnyttet solvarmetilskud og energiforbrug. Talværdierne for energi svarer til typiske værdier for en BR 2008 bygning.

	$B_{pos}$	$E_{v,eye}$	VDPG	$g$	$Q_{sol,udnyttet}$	$Q_H$	VDPV	$Q_{light}$
	°	lux	-	-	kWh/m <sup>2</sup> pr. år	kWh/m <sup>2</sup> pr. år	-	kWh
Tidsstep 1	0	2200	0,30	0,56 <sup>1)</sup>	10 <sup>2)</sup>	(60) <sup>2)</sup>	0,1	
Tidsstep 2	60	500	0,20	0,12 <sup>1)</sup>	2,1	(67,9)	0,95	+
Ændring			-0,10		(-7,9)	+7,9	+0,85	$\Delta Q_{light}$
Dimensionsløs ændring			-0,10	-	-	+0,079	+0,85	$\frac{2,5 \cdot \Delta Q_{light}}{100}$

<sup>1)</sup> Talværdier beregnet ud fra 30° profilvinkel (tabelværdier i BSIm). <sup>2)</sup> angiver typiske talværdier for en BR 2008 bygning.

Uden ændring vil belysningsstyrken på øjeplan være 2200 lux svarende til at sandsynligheden for visuel diskomfort på grund af blænding vil være 0,3. For at reducere blændingen lukkes persiennen til 60°, hvorved VDPG falder til minimal-værdien 0,2, jf. figur 48. Når persiennen lukkes mere i, reduceres dens solvarmetransmittans (g-værdi), i dette tilfælde fra 0,56 til 0,12. Det betyder, at solvarmetilskuddet reduceres, hvilket øger optimeringsfunktionen i opvarmningssæsonen (øget varmemeforbrug, hvilket er uønsket), mens det reducerer den i kølesæsonen (reduceret køleforbrug, hvilket er ønsket). I praksis er det derfor kun i opvarmningssæsonen, at vægtningen har interesse, da det er her at komfortforbedringen udmønter sig i et større energiforbrug. For at gøre stigningen i energiforbrug til opvarmning dimensionsløs, kan man se på, hvor meget soltilskuddet typisk betyder i opvarmningssæsonen. Typisk udnyttes soltilskuddet med ca. 10 kWh/m<sup>2</sup> (etageareal) pr. år, og størrelsen er tæt på at være proportional med g-værdien for rude + afskærmning. En ændring af g-værdien vil medføre et reduceret solvarmetilskud, der tilnærmet kan beregnes som tilskuddet før ændringen multipliceret med forholdet mellem g-værdierne (tilnærmet fordi udnyttelsesfaktoren ændrer sig):

$$Q_{sol,2} \approx \frac{g_2}{g_1} \cdot Q_{sol,udnyttet} \quad (23)$$

I eksemplet betyder det, at opvarmningsbehovet (for det tænkte tilfælde, at g-værdien reduceredes i hele opvarmningssæsonen) vil stige med omtrent lige så meget som det udnyttede solvarmetilskud reduceres:

$$\Delta Q_{sol} = Q_{sol,1} - Q_{sol,2} \approx \left(1 - \frac{0,12}{0,56}\right) \cdot 10 = 7,9 \text{ kWh/m}^2 \text{ pr. år}$$

Lige som ved vægtningen af energiforbrug mod termisk komfort, kan denne energiændring gøres dimensionsløs ved at dividere med det typiske (vægtede) energiforbrug i et BR 2008-hus, nemlig 100 kWh/m<sup>2</sup>. Den dimensionsløse størrelse fås altså ved at dividere differencen mellem de udnyttede soltilskud (forholdet mellem g-værdierne) med 10.

### Vægtning af udsyn

Næstsidste kolonne i tabel 7 viser, at diskomforten stiger kraftigt på grund af reduceret udsyn (VDPV).

Når solafskærmningen lukkes i for at beskytte mod blænding, reduceres udsynet samtidig, hvilket betyder at to komfortkriterier virker imod hinanden. Undersøgelser har vist (ECCO-BUILD, 2006), at de fleste brugere har en større tolerance over for blænding, når det skyldes dagslys eller sol, samt at en del personer prioriterer udsynet så højt, at de accepterer en vis grad af blænding. På den anden side kan blænding medfører, at en given arbejdsopgave ikke kan udføres, hvilket kan antages at være uacceptabelt for alle. Endelig har det vist sig at enkelte personer prioriterer udsynet ganske lavt. Derfor er den største værdi af visuel diskomfort pga. udsyn sat til 0,95, jf. figur 50.

Generelt bør ønsket om at undgå blænding prioriteres højere end hensynet til at bevare udsynet. Men for at tilgodese at ønsket om at et vist udsyn kan bevares, selv om der kan optræde en lille grad af blænding, bør der opereres med et toleranceområde for blænding. Ud fra den foreliggende viden (ECCO-BUILD, 2006) kan tolerancegrænsen for blænding sættes ved ca. 2.000 lux på øjets plan, svarende til at VDPV på 0,28.

### El til belysning

Sidste kolonne i tabel 7 indikerer, at elforbrug til belysning kan stige, når afskærmningen lukkes mere i. Der er ikke angivet talværdier for dette, idet det kan antages, at denne situation sjældent indtræffer. Når situationen optræ-



der, skal (stigningen i) elforbruget indregnes i optimeringsfunktionen med en vægtningsfaktor på 2,5.

Den dimensionsløse størrelse for elforbruget til belysning i optimeringsfunktionen er det øjeblikkelige vægtede (med faktor 2,5) 'energiforbrug' til almenbelysningen i rummet divideret med 100. Forbruget afhænger til en vis grad af solafskærmningens indstilling, især hvis der ikke anvendes arbejds-lamper i rummet. Reguleringen bør så vidt muligt fungere sådan, at af-skærmningen ikke lukkes så meget, at det medfører et øget behov for kunstlys (almenbelysning). I praksis vil dette sjældent være et problem, da af-skærmningen normalt kun benyttes når der er direkte solindfald på facaden, hvilket som regel vil give tilstrækkeligt dagslys, selv om afskærmningen er trukket for. I den bagerste del af meget dybe rum (dybere end 6 - 7 m) kan det være nødvendigt at øge kunstlyset, når solafskærmningen trækkes for.

### Vægtningstfaktorer

Eksemplet i tabel 7 viser, hvordan *VDPV* stiger ved lukning af persiennens lameller til 60°. Da *VDPV* ændrer sig markant selv ved en mindre ændring i solafskærmningen, og da vi normalt ønsker at prioritere blænding højere end udsyn, skal vægtningsfaktoren for udsyn sættes noget lavere end for blænding. I toleranceområdet for blænding kan forholdet mellem vægtningsfaktoren for visuel diskomfort (blænding) *W4* være og vægtningsfaktoren for reduceret udsyn *W5* være 10:1, mens forholdet i det kritiske område kan være 20:1.

Eksemplet i tabel 7 viser også, at for at optimere reguleringen i et givet øjeblik kan det være en fordel at betragte ændringerne af alle leddene i optimeringsfunktionen ved en given ændring af solafskærmningens indstilling: Hvis indstillingen er optimal i tidsstep 1, og forudsætningerne (solindstråling, udetemperatur etc.) har ændret sig ved starten af tidsstep 2, hvilken ændring er så nødvendig for også at optimere i tidsstep 2? Optimeringsfunktionen kan da skrives.

$$\Delta U = -W_0 \cdot Q_{VP} + W_1 \cdot \Delta Q_{heat,cool}(Q_{gn}) + W_2 \cdot \Delta Q_{light} + W_3 \cdot \Delta TDP \cdot Occ + W_4 \cdot \Delta VDPG \cdot Occ + W_5 \cdot \Delta VDPV \cdot Occ \quad (24)$$

Tabel 8 giver en oversigt over vægtningskonstanterne, som typisk vil være passende for en BR 2008 bygning. For andre bygninger kan det være nødvendigt at vælge andre faktorer.

Tabel 8. Typiske vægtningsfaktorer, som kan benyttes for en BR 2008 bygning.

	<i>W1</i>	<i>W0 og W2</i>	<i>W3</i>	<i>W4</i>	<i>W5</i>
	Varme- køle-energi / el	el	Termisk diskomfort	Visuel diskomfort	Begrænset udsyn
Toleranceområde	1 / 2,5	2,5	22 ± 2 °C 24 ± 2 °C    10	< 2000 lux    10	1
Kritisk område	1 / 2,5	2,5	18 – 20 °C 26 – 28 °C    20	> 2000 lux    20	1
Uacceptabelt	1 / 2,5	2,5	< 18 °C > 28 °C    100	> 4000 lux    100	10

### Reguleringssystemets opbygning

For at reguleringssystemet kan udfører den optimale regulering, som beskrevet i det foregående, skal systemet dels løbende registrere en række parametre og dels have informationer om, hvordan nogle af disse parametre vil ændre sig, når afskærmningen ændres. Alle de variable er beskrevet i nedenstående tabel.

Tabel 9. Oversigt over nødvendige parametre/variabler, som skal måles for at den optimale regulering kan fungere. Flere af de variable beregnes eller bestemmes indirekte ud fra andre målinger.

Status variabel	Forklaring	Benyttes til	Enhed
$Occ$	Occupancy. Tilstedeværelsesparameter, der har værdien 1, når der er personer i det aktuelle rum, og 0 når der ikke er.	Bestemmelse af om der skal reguleres efter komfort eller kun efter energi	-
$B_{pos}$	Blind position. Afskærmningens aktuelle indstilling. det kan være nødvendigt at definere flere parametre til at beskrive indstillingen, for en persienne fx de to nedenstående.	Indgår i reguleringsenhedens 'opslagstabel' for sammenhæng mellem position og g-værdi samt LT-værdi/lysreduktion	-
$a$	Åbningsgrad, 0 = lukket; 1 = åben	Parametre til beskrivelse af afskærmnings position afhænger af typen. Benyttes som beskrevet ovenfor	-
$b$	Lamelhældning, 0 = vandret, åben; 90 = lodret, lukket		°
$\theta$	Aktuel indetemperatur, om muligt være operativ temperatur ved arbejdsplads	Som ovenfor samt til at bestemme, om temperaturen er inden for toleranceområdet	°C
$E_{v,eye}$	Belysningsstyrke på lodret plan ved brugerens øje. Kan omregnes fra belysningsstyrken målt på vertikalt plan foran brugeren, fx sidevæg i et kontor	Bestemmelse af sandsynlighed for visuel diskomfort på grund af blænding, $VDPG$	-
$E_{h,i}$	Belysningsstyrke på arbejdsplan	Bestemmelse af sandsynlighed for visuel diskomfort på grund af for lav belysningsstyrke på arbejdsbord, $VDPL$	-
$Q_{VP}$	Aktuel el-produktion i solceller. Den aktuelle effekt omregnes til et årsenergiforbrug pr. m <sup>2</sup> . Kan ofte fratrækkes direkte i elforbrug til andre systemer, fx belysning.	Indgår direkte i optimeringsfunktionen	-
$Q_{el}$	Aktuelt elforbrug til belysning. Den aktuelle effekt omregnes til et årsenergiforbrug pr. m <sup>2</sup> . Gøres dimensionsløst ved at dividere med 100 kWh/m <sup>2</sup>	Indgår direkte i optimeringsfunktionen	-
$Q_{heat,cool}$	Aktuelt energiforbrug til opvarmning eller køling. Den aktuelle effekt omregnes til et årsenergiforbrug pr. m <sup>2</sup> . Gøres dimensionsløst ved at dividere med 100 kWh/m <sup>2</sup>	Indgår direkte i optimeringsfunktionen	-
Klima-variabel	Forklaring	Benyttes til	Enhed
$time$	Aktuelt klokkeslæt og dato	Beregning af solens azimut, højdevinkel og profilvinkel samt bestemmelse af opvarmnings- eller køletilfælde	-
$I_{v,e}$	Udvendig solindstråling på lodret (på facaden)	Kun to solparametre er nødvendige, så direkte og diffus stråling kan adskilles. Bruges til beregning af forventet transmission af solvarme og lys ved en aktuel position af afskærmningen	W/m <sup>2</sup>
$I_{h,e}$	Udvendig globalstråling på vandret		W/m <sup>2</sup>
$I_{h,e}$	Udvendig diffus stråling på vandret		W/m <sup>2</sup>
$\theta_e$	Aktuel udetemperatur	Sammen med $time$ og indetemperatur til at bestemme opvarmnings- eller køletilfælde	°C

## Erfaringer vedrørende praktisk brug af solafskærmninger

Solafskærmninger og deres regulering har afgørende betydning både for indeklima og energiforbrug. Lykkelig vis er der ofte en meget god overensstemmelse mellem reguleringen af hensyn til indeklimaet og reguleringen af hensyn til energiforbruget. De tidspunkter, hvor solindfaldet generer brugerne mest falder godt sammen med tidspunkter, hvor solindfaldet vil skabe overtemperaturer og øge behovet for ventilation og køling. I det følgende gives en oversigt over erfaringer fra praktisk brug af solafskærmninger fra en gennemgang af resultater af en række internationale undersøgelser.

- Solafskærmninger benyttes oftere, jo større vinduerne er
- Mere end 60 % ønsker en vis mængde direkte solskin i deres kontor, især i vinterperioden
- Manuelt betjente solafskærmninger reguleres kun få gange i løbet af dagen
- Manuelt betjente solafskærmninger reguleres kun ved radikale ændringer i vejrforholdene eller når der opstår helt uacceptable visuelle forhold
- Blænding fra vindue/afskærmning samt refleksioner i edb-skærme er de hyppigste årsager til regulering af solafskærmninger
- Motoriserede, manuelt fjernbetjente afskærmninger betjenes 3 gange så hyppigt som manuelt betjente
- Mens den enkelte bruger er meget konsekvent i sin brug af solafskærmningen, er der meget store forskelle mellem den måde forskellige brugere anvender den samme solafskærmning på
- En stor del af de automatisk bestemte reguleringsaktioner misbilliges af brugerne
- Specielt i åben-plan kontorer er mange brugere utilfredse med de visuelle forhold (blænding og manglende udsyn) ved automatisk regulering af solafskærmningen
- Facadens orientering har betydning for, hvorledes solafskærmninger betjenes: jo større solindfald på facaden og jo dybere solen trænger ind i rummet, desto mere lukkes afskærmningen
- En automatisk afskærmning, som lige netop udelukker at direkte sol passere afskærmningen, opfattes som uacceptabel/utilstrækkelig af brugerne
- Middel-grænseværdien for, hvornår en solafskærmning lukkes ligger omkring 43.000 lux på facaden ( $\pm 6.000$  lux)
- Middel-grænseværdien for, hvornår en solafskærmning åbnes ligger omkring 23.000 lux på facaden ( $\pm 5.000$  lux)
- Når vinduets luminans overstiger ca. 1800 cd/m<sup>2</sup>, vil brugeren regulere (lukke) afskærmningen inden for 30-60 minutter
- Belysningsstyrken målt på et lodret plan ved brugerens øjenposition er et godt mål for oplevelsen af generende blænding eller visuel diskomfort fra vinduer, og indgår i dag i et nyudviklet indeks for visuel diskomfort (Visual Discomfort Probability, VDP)
- Hvis der er mere end én afskærmning i et kontor (eksempelvis to afskærmninger), benyttes de ofte forskelligt: Den ene bruges til at beskytte mod visuelle gener (blænding og refleksioner i edb-skærm), mens den anden holdes mere åben for at bevare udsynet

# Laboratorieafprøvning og tilpasning af afskærmnings- og reguleringssystemer

Det udviklede koncept for integrerede solceller i afskærmningselementer blev afprøvet og evalueret på af SBI og SolEnergiCentret på TI i SBI's Dagslyslaboratorium. SolEnergiCentret gennemførte de fysiske målinger af den faktiske effektydelse, mens SBI vurderede lysfordeling og visuelle forhold. Herved sikredes det, at de energimæssige gevinster kunne sammenholdes med de vurderede visuelle kvaliteter og problemer.

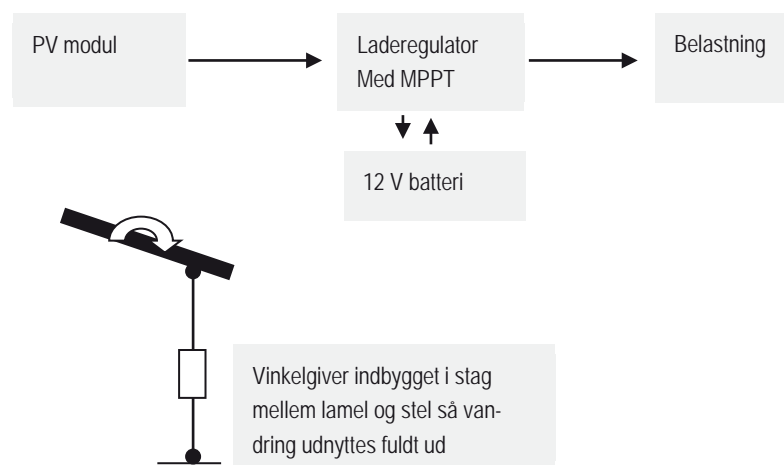
## Målinger på prototype.

Teknologisk Institut opsatte i marts 2006 et målesystem til de viste lameller på SBI. Formålet med målingen var primært at vurdere el-produktionen som funktion af lamellernes stilling samt solhøjden. Målesystemet blev opbygget af en PC med tilhørende dataopsamling, kombineret med en specielt fremstillet elektrisk belastning. Sidstnævnte bestod af et 12 V batteri, en laderegulator og et par 12 V lamper som energiafløb.

Regulatoren er af en type med indbygget 'maximum power point tracking' som derfor trækker al den el ud af solcellerne som de kan producere. Energien lader batteriet op og driver lamperne. Regulatoren afbryder lamperne ved lav batterispænding.

Tabel 10. Målekanaler

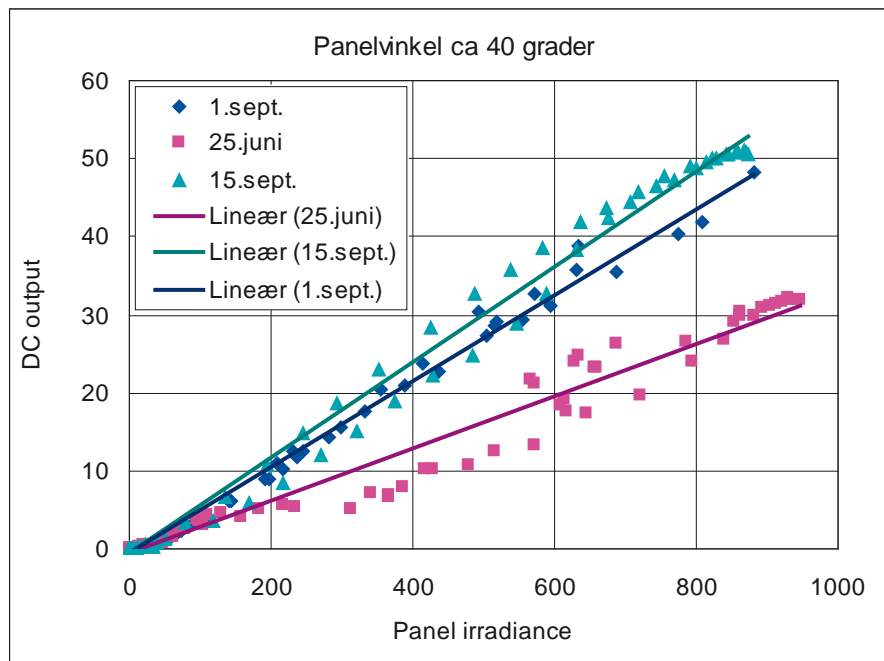
Parameter	Sensor	Signal	Kalibrering
1.Globalstråling	Reference-solcelle, vandret	mV	1000W/m <sup>2</sup> pr 147 mV
2.Panelstråling	Reference-solcelle, bevægelig	mV	1000W/m <sup>2</sup> pr 32,67 mV
3.Udetemperatur	Pt100 sensor i afskærmet hus	Ohm	Integreret
4.Paneltemperatur	Pt100 overfladeføler	Ohm	Integreret
5.Panelstrøm	Målemodstand	mV	1A pr 10 mV
6.Panelspænding	Spændingsdeler	V	11,375 V/Vin
7.Panelvinkel	Positionsmelder (spændingsdeler)	V	
8.Reserve1		V	
9.Reserve2		Ohm	



Figur 51. Skematisk illustration af systemet.

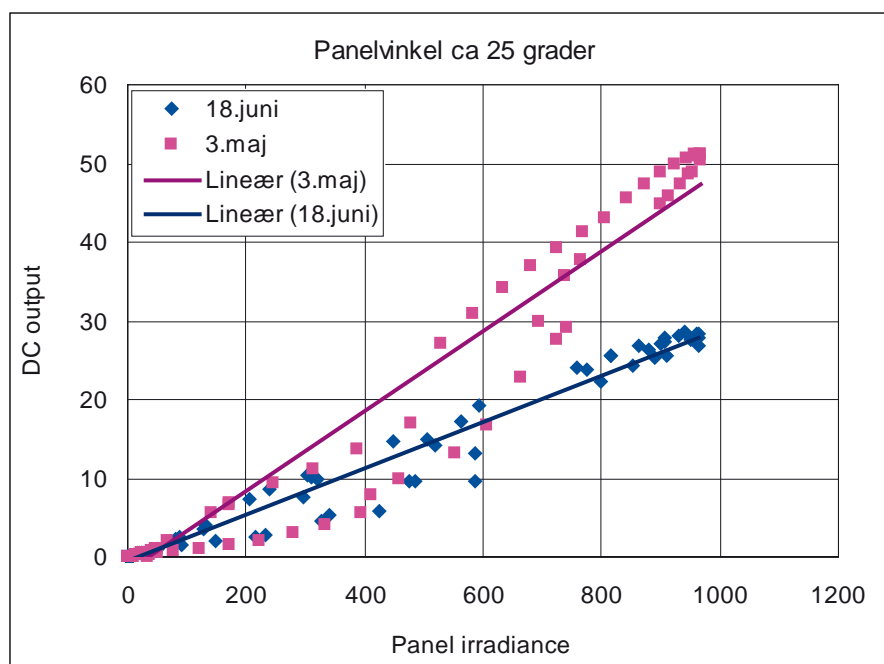
## Måleresultater

Figur 52 viser en grafisk afbildning af solcelleydelse som funktion af indstråling ved en fast vinkel på ca. 40 grader. Det fremgår at den indbyrdes skyggevirkning mellem de enkelte lameller reducerer ydelsen ved store solhøjder (midsommer).



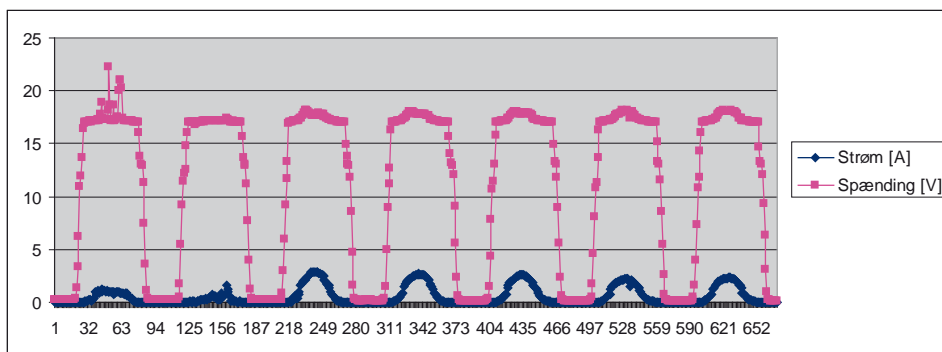
Figur 52. Måleresultater af ydelsen af afskærmningspanelet ved en hældning af lamellerne på 40° fra midsommer til 15. september.

Figur 53 viser resultaterne af målingerne foretaget ved en vinkel på 25 grader i forhold til vandret. Den ikke helt lineære sammenhæng mellem ydelse og solintensitet skyldes formentlig lokale skyggeeffekter. Desværre blev den automatiske vinkelstyring aldrig implementeret, og måleresultaterne er derfor gennemført med trinvis manuel styring af vinklen.



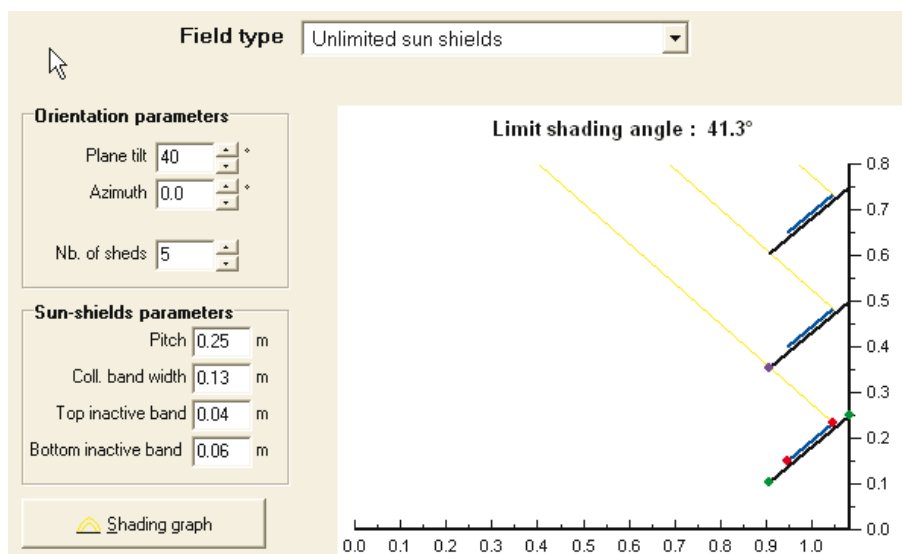
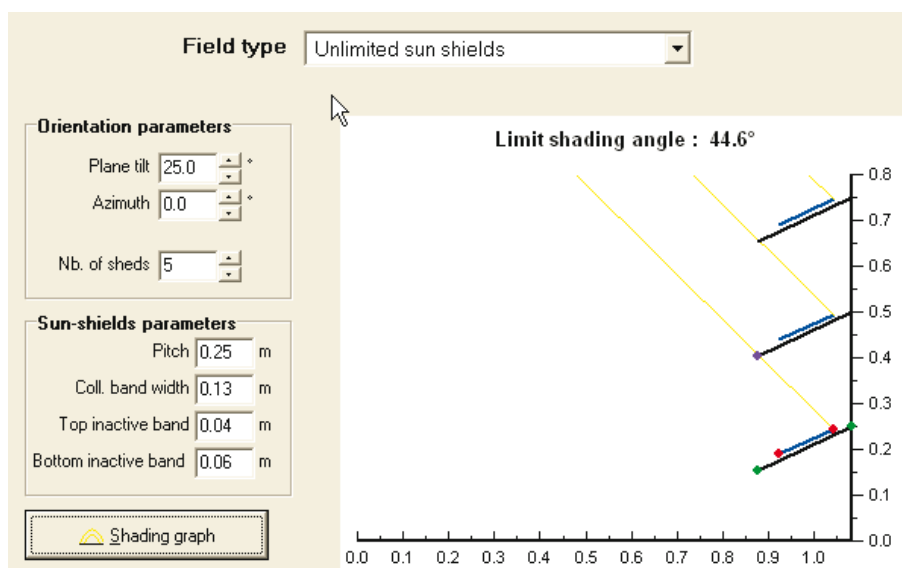
Figur 53. Måleresultater af ydelsen af afskærmningspanelet ved en hældning af lamellerne på 25° fra starten af maj til midt i juni.

For at checke målesystemets reguleringsevne blev strøm og spænding registreret kontinuerligt, se figur 54. Efter en lille justering den første dag ligger spænding på ca. 17 volt, svarende til  $V_{mp}$ , når anlægget er i drift.



Figur 54. Registrering af strømforbrug og spænding for solcellemodulet i maj måned.

Illustration af solvinkelgrænse for interne skygger (PVsyst) ved de samme lamelhældninger er vist i figur 55.



Figur 55. Illustrationer fra PVsyst af grænsevinkler for indbyrdes skygger ved de afprøvede lamelhældninger, øverst 25° og nederst 40°.

# Implementering i bygning

Ud over afprøvningen i laboratoriet var det fra starten planen, at solafskærmningen med integrerede solceller skulle afprøves i en rigtig bygning. Da det viste sig, at der parallelt med gennemførelsen af dette projekt, blev opført det nye byggeri af Syddansk Universitet (SDU) i Sønderborg, blev det besluttet, at det var muligt at integrere en bevægelig udvendig solafskærmning med solceller ud for en række kontorer i den sydvendte facade. På grund af tidsplanmæssige forskydninger var det ikke umiddelbart muligt direkte at bruge de designmæssige anbefalinger, som var identificeret i dette projekt, men da det omvendt også var den reguleringsmæssige afprøvning, som var største praktiske udfordring i konkret byggeri, blev SDU en god mulighed for at etablere en avanceret regulering og etablere det nødvendige måleudstyr til registrering af lamellernes stilling og registrering af energiforbruget i de kontorer, der havde bevægelig afskærmning og sammenligne med tilsvarende arealer uden bevægelig afskærmning.

Den reguleringsmæssige algoritme er softwaremæssigt baseret på den generelle model udviklet i Eccobuilt projektet og køres på en PC. Derved er der mulighed for at udnytte en samlet regulering af kunstlys, solafskærmning og optimering af elproduktionen fra solcellerne.

Reguleringen er kombineret med bygningens CTS-anlæg, hvor bl.a. temperaturer og data fra vejstationen vedr. solintensitet indgår. I lokalet måles dagslys med en sensor rettet mod vinduet.

Kunstlyset er opdelt i 2 zoner som kan reguleringen kan justere uafhængigt og endelig har brugeren direkte indflydelse på lamellernes stilling gennem en manuel regulering, som han kan nå fra sin arbejdsplads.

## Controller i Alsion lokale 408.

På den sydvendte facade på Alsion, blev lokale nr. 408 valgt som det kontor, hvor den ny controller blev integreret. Kontoret er adskilt af en gang til et teknikrum, hvor at installation blev samlet.

## Beskrivelse af installation.

Kontor nr. 408 og fem yderligere kontorer er forsynet med bevægelige lameller, hvorpå der er monteret solceller. Disse bevægelige lameller tjener til afskærmning imod direkte sollys, sikring af udsyn når der er personer tilstede i kontoret, samt optimering af varmestråling fra vindue. De følgende sider viser, hvordan de forskellige komponenter er forbundet til kontrol enhed, samt installationen.

I kontoret er der et trådløst batteriløst tryk, hvorfra man kan regulere åbning eller lukning af afskærmning indenfor et defineret interval. Dette tjener det formål at kunne justere på mere eller mindre lys i lokalet, eller mere udsyn. Der trådløse tryk sender til en modtager, der omsætter signal til kontroller.

En lyssensor i loftet måler på det dagslys der kommer ind gennem vinduet. Lyssensoren vil få kontrolleren til at variere kunstlyset så det ønskede minimum niveau er opfyldt. Ligeledes vil kontrolleren sørge for, at lyset nær vinduet udnyttes, at der er mere dagslys end kunstlyset længere ind i lokalet, der vil være dæmpet mindre. Lyset kan således opdeles i tre zoner i henhold til kontrollerens beregnede dagslysfaktorer.

En PIR-sensor vil registrere tilstedeværelse i rummet. Denne registrering udnyttes til at slukke lyset idet det tændes manuelt. Afskærmningen reagerer også ved tilstedeværelsessensor, idet den vil lukke for afskærmning i som-

merhalvåret og åbne i vinterhalvåret for at opnå den bedste udnyttelse af varmen fra solen. Tilstedeværelsessensoren sender også en besked til det overordnede CTS anlæg, om der har været personer i lokalet, for at konstatere om rengøring er påkrævet.

Ved indgang til lokalet er der placeret to tryk. Der ene i afbryderhøjde og det andet i ca. 1,80 cm. Højde.

Tryk i afbryderhøjde er et tryk hvor man manuelt tænder lyset i lokalet. Dette gør det muligt at hente ting i lokalet uden at lyset tændes. Denne funktion er af hensyn til besparelse og det individuelle ønske om selv at bestemme tændtidspunkt. I 1,80 cm's højde er der monteret et fire tryk, hvor det er muligt at lave et manuelt tænd eller sluk af belysningen. Når man trykker på manuel dæmpning af lyset, vil lyset ikke være zoneopdelt, men blive dæmpet ens i alle zoner. Man kan således indstille sit eget lys niveau i lokalet efter behov. Trykkes der på automatik, vil lyset slukke automatisk via tilstedeværelsessensoren og blive tændt over det manuelle tryk i afbryderhøjde.

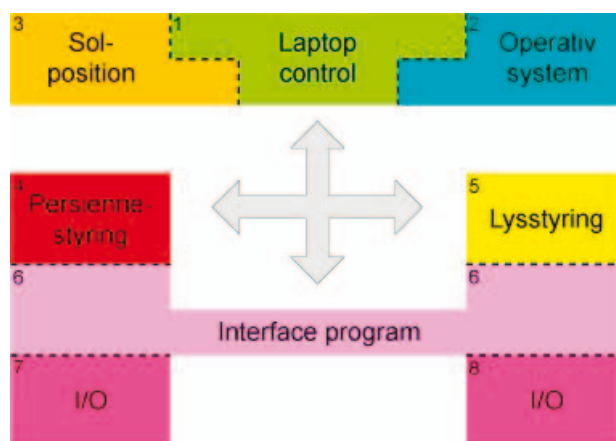
Der er også en indgang i kontrolleren for temperatur. Kontrolleren vil således regulere i forhold til rumtemperatur med hensyn til afskærmning og kunstlys.

På taget af bygningen er der placeret to sensorer. Den ene sensor er en vindsensor, der lukker afskærmning under kraftig vindforhold. Den anden sensor er en indium sensor der måler solen stråling i området 300 nm til 1100 nm. Desuden registreres solskin når der registreres et niveau > 120W/M2.

For at overvåge lokalet er der installeret et webcam. Det er med dette kamera muligt at efterprøve kontrollerens funktioner og via net opkobling at korrigerer software.

## Controller struktur

Controller softwaren (funktionen) er sammensat, af to hovedrutiner, som interaktivt og sammen med støtterutiner varetager den samlede systemregulering. Den ene rutine varetager styring af solafskærmningen (persienne) og den anden, styring af lokalets almenbelysning (kunstlys) i relation til bedst mulig udnyttelse af dagslysindfald. Figur 56 anskueliggør softwaresammenhængen i form af modulblokke.



Figur 56. Skematisk illustration af controllerens opbygning

Nedenfor gives en mere detaljeret beskrivelse af de enkelte blokke:

1. Laptop control  
Denne blok betragtes som den overordnede del af kontrollen, og indeholder de kode- og beregningstunge støtterutiner. Afviklingen sker i et Linux miljø.
2. Operativsystem



Systemets operativsystem er baseret på Mandrake Linux ver. 10.1.

3. Solposition

En støtterutine som sørger for at udregne solens nøjagtige position, på himlen, minut for minut, dag for dag, året rundt. Beregningen foretages på basis af indtastede nøgledata over installationsstedets aktuelle geografiske placering. Det vil med andre ord sige længde- og breddegrad, vinduets geografiske orientering samt aktuel urtid.

4. Persiennestyring

Denne rutine beregner indstillingsvinklen af lamellerne for således at disse justeres til cutoff når solen skinner og i relation til solens aktuelle position på himlen. Justeringsberegningen foretages på basis af indtastet model af den aktuelle persienne som beskriver lamelstørrelse og -afstand samt yderpositioner som komplet åben og lukket. Persiennen justeres kun når der er personer til stede. Forlades lokalet returneres til udgangspositionen. Det er muligt at forøge eller mindske cutoff-vinklen (offset) manuelt, hvilket systemet adaptivt indbygger i rutinen således at dette respekteres fremover.

5. Lysstyring

Lysstyringsdelen sikrer at det på arbejdsplanet er den nødvendige belysningsstyrke [Eø] i relation til det aktuelle dagslysindfald i lokalet. Dette sker i samklang med persienne styringen, således at der ikke opstår situationer hvor der er for meget eller for lidt lys i forhold til det valgte minimumsniveau. I manuel mode kan belysningen tændes, slukkes eller dæmpes til et vilkårligt valgt niveau.

6. Interface program

Dette program kan betragtes som gateway for signaler/værdier mellem beregnings- /styringsalgoritmer, sensorer og betjeningsenheder.

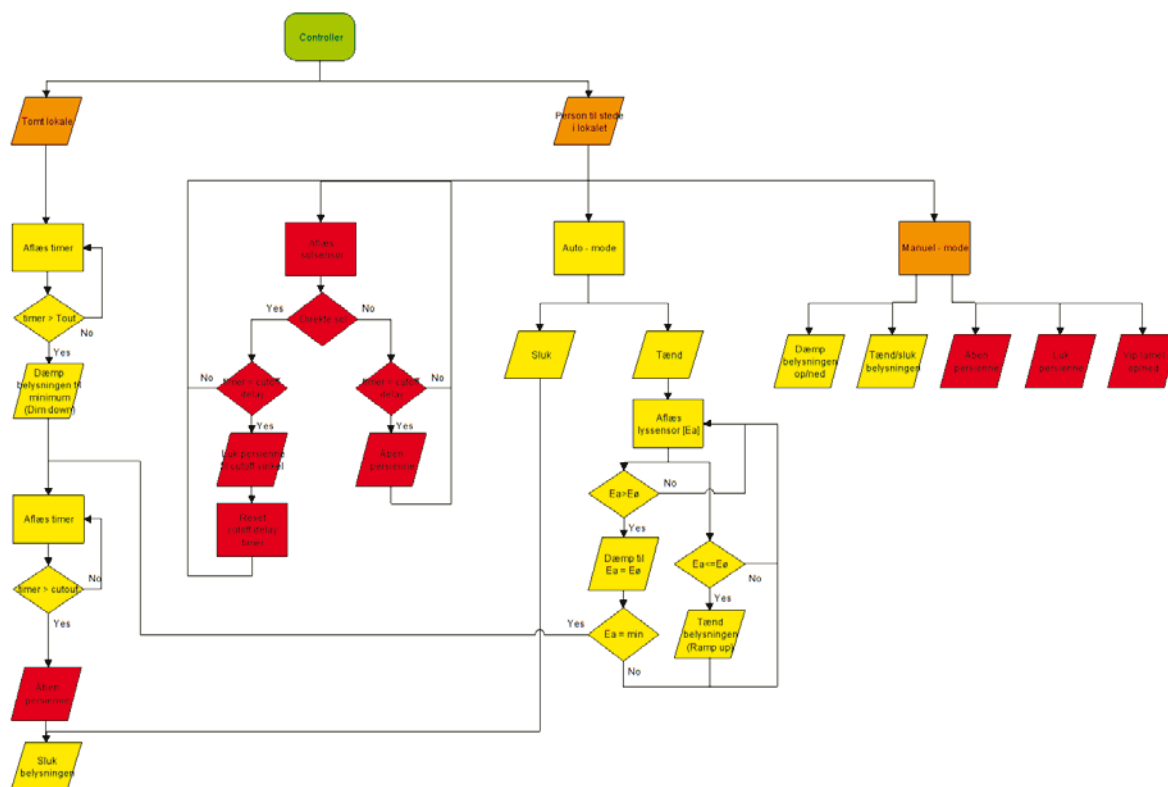
7. I/O

En samling device drivere, som er hardware tilpassede, og som styrer Input/Output for persiennedelen.

8. I/O

En device driver der styrer Input/Output for Lysstyringsdelen.

## Controller funktion



### Diagram syntax

Lysstyring: Gul markering. ■  
 Persiennestyling: Rød markering. ■

Figur 57. Flow-diagram, der illustrerer reguleringssystemets funktioner.

## Funktionsbeskrivelser

Figur 57 illustrerer systemets reguleringsfunktioner i de tre modes: Energi-mode, komfortmode og manual mode. Funktionerne er nærmere beskrevet i det følgende

### Generelt

Controlleren vil altid starte i Auto-mode. Forlades lokalet for længere tid, vil systemet re-sette persienne- og lysstyringsfunktionen. Med andre ord vil kontrolleren altid finde tilbage til en foruddefineret udgangsposition eksempelvis åben solafskærmning og slukket almenbelysning.

### Lysstyring

Dagslysstyring 1 - 10 V i 2 zoner med manuel tændt / sluk via tryk. Med almenbelysningen tændt og betjeningspanel (4-tryk) i stilling auto-mode vil belysningsstyrken blive styret iht. det indfaldne dagslys. I takt med stigende dagslysindfald dæmpes lyset i lokalet til indstillet lysniveau. Er der tilstrækkeligt med lysindfald i de enkelte zoner slukker belysningen i den pågældende zone.

### En lyssensor styrer begge zoner

Lyssensor er placeret, på loftet, bag solafskærmningen (blinds), hvilket bevirker at almenbelysningen i lokalet automatisk korrigeres, når solafskærmningen aktiveres.

Belysningen tændes altid via tryk, og slukkes den ikke hvis lokalet forlades, slukkes belysningen automatisk efter en forudbestemt periode, når lokalet er tomt.

Ønsker man selv at styre almenbelysningen, uanset lysforhold, er der mulighed for manuel tænd/sluk og dæmp via betjeningspanel (4-tryk). Dette panel er placeret ca. 1,70 m over gulv, således at man ikke uforvarende kommer til at tænde lyset i manuel funktion, og dermed sætter dagslysstyringen ud af funktion. Uanset valgt funktion på betjeningspanel, slukkes belysningen automatisk og returnerer til Auto-mode, når lokalet er tomt og tiden er udløbet.

#### *Lamelstyring*

Solafskærmningen justerer altid lamellerne til aktuel cut-off vinkel, således at der ikke forekommer direkte solindstråling, i lokalet. Dette sikres af controlalgoritmen som beregningsmæssigt holder styr på solens aktuelle position sammenholdt med input fra den udvendige solsensor.

Persiennen vil altid stå i en fast udgangsposition, fx 30 grader. Persiennen justeres automatisk, når solen skinner og bevægelsessensor registrerer personer i lokalet. Ønskes der mere eller mindre sol- eller dagslys kan det ske via manuelt tryk for vip af lameller. Korte tryk indstilling i step, langt tryk vil henholdsvis åbne eller lukke persiennen. Systemet vil fremover huske denne manuelle indstilling og indbygge dette som en fast offset i den automatiske styringsalgoritme. Et indbygget cut-off delay sikrer uhensigtsmæssig og generende efterjustering af lameller.

Hvis der bliver overskyet vil persiennen åbne lamellerne for at tillade fri dagslysfald i lokalet. Tilsvarende vil solafskærmningen automatisk, efter en forudbestemt periode, returnere til udgangsposition, hvis lokalet forlades.

### Variable

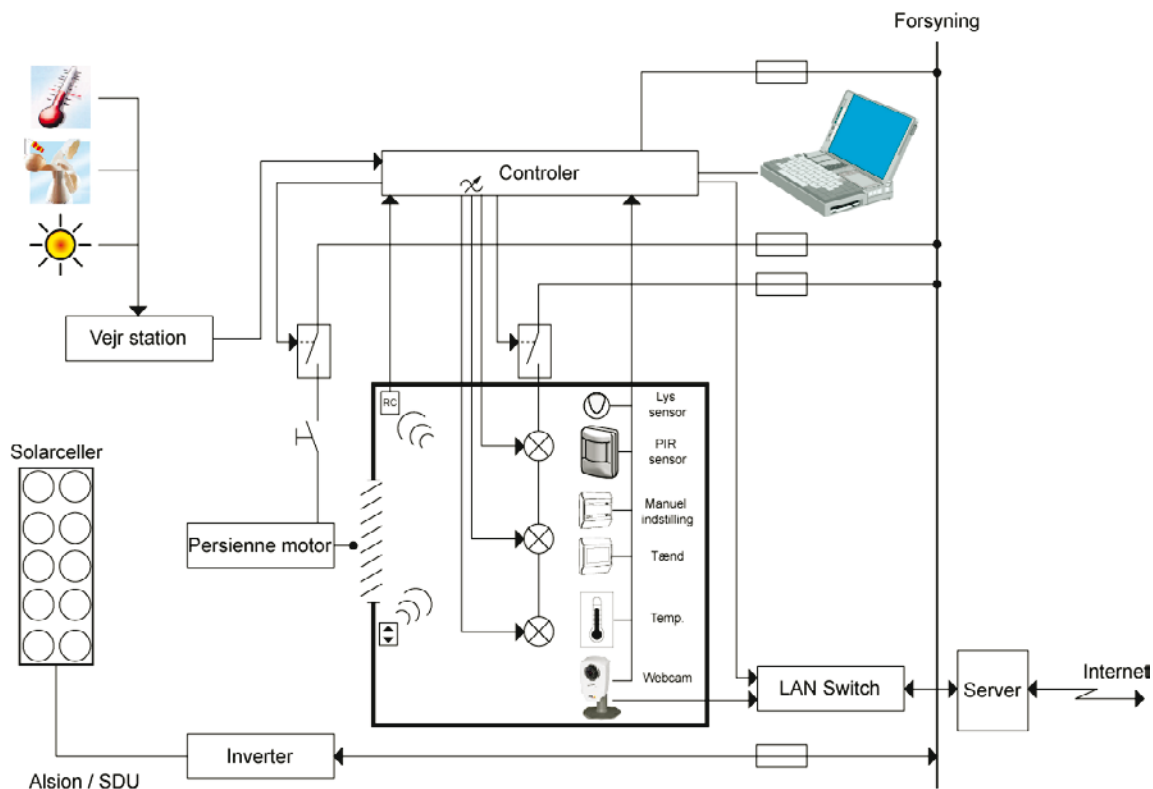
#### *Lyssstyring*

Lyssensor område .....	30 - 3000lx
Lx ind 1, 2 .....	200 lx, 160 lx
Setpoint zone 1, 2 [EØ] .....	500 lx
Vout minimum 1, 2 .....	0,0 V
Vout maximum 1, 2 .....	10,0 V
Fade up 1, 2 .....	10 sec.
Fade down 1, 2 .....	10 sec.
Off delay .....	30 min.
Cutoff delay .....	8 min.

#### *Persiennestyring*

Tidszone .....	CET + 1
Længdegrad .....	9.77915
Breddegrad .....	54.91287
Orientering af bygning .....	- 48
Cutoff delay .....	1800 sec.
Lamel vinkelområde .....	(40, 90)
Åben lamel .....	40
Lukket lamel .....	40
Vinkel - aktor coefficienter til 3.gr polyn. ..	(0.0,0.0,1.4883,-59.533)
Aktor - vinkel coefficienter til 3.gr polyn. ....	(0.0,0.0,0.6719,40.0)
Off delay .....	300 sec.
Delay til reset af bruger offset .....	3600 sec.

## Test installation



Figur 58. Installationsdiagram, der viser følerelementer, og hvordan signalerne sendes til controlleren, således at der kan foretages en integreret regulering, der både tager hensyn til udeklima og elproduktion i PV-systemet.

## Testbygning Alsion, SDU

Prototypeinstallation af controlleren var installeret i lokale 408, etage 2, 1.sal. Lokalet har et vinduesareal der er forsynet med solafskærmning (blinds) med indbyggede solarceller. Almenbelysningen består af 4 stk. lysstofrørsarmaturer på loft, og opdelt i 2 zoner. Armaturerne er forsynet med dæmpbare HF ballaster 1-10 V.

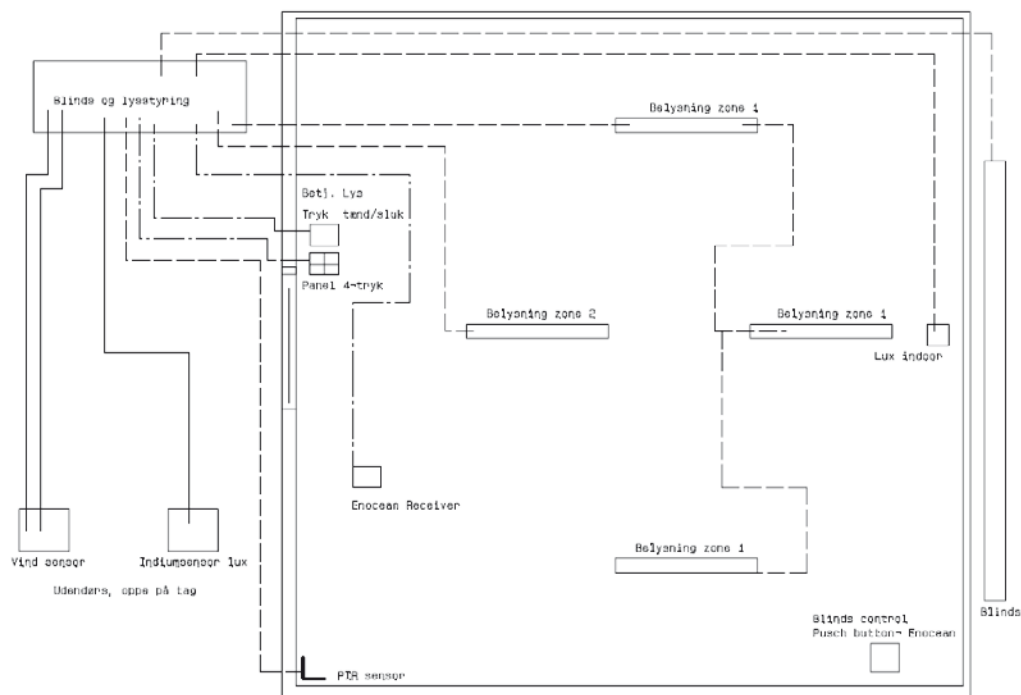


Figur 59. Foto af sydfacaden på Syddansk Universitet, hvor solafskærmningen og reguleringssystemet var installeret i 'plusenergikontoret'.

Der var monteret manuelle betjeningstryk er placeret ved indgangsdøren til lokalet. Bevægelsessensor (PIR) og lyssensor er placeret på loft, se figur 60. Betjeningstryk til manuel indstilling af solafskærmning kan placeres på eller ved arbejdspladsen, da der er installeret tråd- og batteriløs EnOcean teknik til dette.

På bygningens tag er der monteret en vejrstation til måling af sol og vindforhold, se tabel 12.

## Installationsoversigt



Figur 60. Eldiagram, der viser den kontakter for den manuelle betjening af solafskærmning og belysning.

## Tavle komponenter



Figur 61 viser el-tavlen med den endelige installation, mens tabel 11 viser en oversigt over de komponenter, som indgår i det integrerede reguleringssystem, og tabel 12 viser de eksterne komponenter.

Figur 61. Foto af styringstavle med den midlertidige styring via en laptop. I den endelige udformning var det tanken, at kontrolenheden skulle indbygges i en lille boks monteret på væggen.

Tabel 11. Oversigt over de anvendte komponenter i reguleringssystemet.

Id	Fabrikat	Type	
1.1	Servodan	Luxstat Control	78-050
1.2	Servodan	Luxstat Power Pack	78-983
1.3	Omron	Relæ 24 V DC	G2R-1S
1.4	Servodan	Relæ 24 V DC	
1.5	Servodan	Tylan I Gruppeafb.	61-012
2.1	Jung	6 channel Binary input	2126 REG
2.2	Jung	4 channel Analog	2214 REG
2.4	Jung	Heat Traffo	WSSV 10
2.6	Servodan	Power Supply	78-980
2.7	Servodan	Stikdåse	PC 16/2
3.1	Jung	Power Supply	2002 REG
3.2	Jung	RS 232	2130 REG
3.3	Elka	RS 232	827 568 14
3.4	Servodan	Laptop - Controller	Compaq EVO N800c
4.1	Hüppelux	Sunny EIB-J-4AC-M	3620 970 300

## Eksternt udstyr

Tabel 12. Oversigt over eksterne sensorer til registrering af udeklima.

Id	Fabrikat	Type	
1.10	Servodan	4-tryk	74-592
1.11	Servodan	tryk	74-593
1.12	Servodan	PIR 24V DC 90 gr	41-272
1.13	Servodan	Lyssensor	43-197
2.10	Jung	Vindsensor	WS 10W
2.11	Indium	Solsensor	3291/05
4.10		Blinds	
5.10	Servodan	Receiver EnOcean	OMNIO UPJ 230/01
5.11	Servodan	Tryk EnOcean	76-922

## Den færdige bygning



Figur 62. Fotos af sydfacaden på Alsion, SDU.



Figur 63. Interiørfotos fra lokalerne i Alsion, hvor solafskærmning og reguleringssystem var installeret.



# Litteratur

Aggerholm, S., Sørensen, K. G. & Wittchen, K. B. 2010. *Be10 - Beregningsvejledning*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Arbejdstilsynet 2007. *Arbejdsrum på faste arbejdssteder* (At-vejledning A.1.11). København. Lokaliseret 20070803 på:  
[http://www.at.dk/Vejledninger/A-1-11?sc\\_lang=da](http://www.at.dk/Vejledninger/A-1-11?sc_lang=da)

Cenergia Energy Consultants, 2004. *Solceller monteret på fast solafskærmning* (Studenterhuset i Herning). ISBN 87-90314-33-6. Ballerup.

Christoffersen, J., Petersen, E., Johnsen, K., Valbjørn, O., and Hygge, S. 1999. *Vinduer og dagslys - en feltundersøgelse i kontorbygninger*. SBI-rapport 318. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut. .

Christoffersen, J. & Wienold, J. 2004. *Monitoring Procedure for assessment of user reaction to glare (Report ECCO-DBUR-0303-01)*, European Community, Energy, Environment and Sustainable Development' Programme (1998-2002).

Christoffersen, J. & Wienold, J. 2006. *Assessment of user reaction to glare (Report ECCO-SBI-0406-01): All systems*, European Community, Energy, Environment and Sustainable Development' Programme (1998-2002).

Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). 1995. *Discomfort Glare in Interior Lighting*, CIE Publication 117. CIE, Vienna, Austria.

Dansk Standard, 2008. DS/EN ISO 13790. *Bygningers energieffektivitet - Beregning af energiforbrug til rumopvarmning og -køling*. 2. udgave

Dansk Standard 1993. DS 474. *Norm for specifikation af termisk indeklima*. 1. udgave december 1993 (inkl. rettelsesblad 1:1995). Lokaliseret 20100414 på: <http://webshop.ds.dk/product/16922/ds-4741993.aspx>

Dansk Standard 2001. DS CR 1752 *Ventilation i bygninger - Projekteringskriterier for indeklimaet*. 1. udgave, 2001-08-22. Lokaliseret 20100414 på: <http://webshop.ds.dk/product/23965/dscencr-17522001.aspx>

Dansk Standard 2011. DSF 3033 *Frivillig klassifikation af indeklimaets kvalitet i boliger, skoler, daginstitutioner og kontorer*.

ECCO-BUILD (Energy and Comfort Control for Building management systems). 2002-2006. Project funded under the 5th Framework Programme of the EC. Contract N<sup>o</sup>: ENK6-CT-2002-00656. Lokaliseret 20100414 på: [http://www.ingelux.com/ecco\\_build/mainhome.htm](http://www.ingelux.com/ecco_build/mainhome.htm)

Erhvervs- og Byggestyrelsen 2010. *Bygningsreglement 2010*. København. Lokaliseret 20100414 på: <http://www.ebst.dk/bygningsreglementet.dk>.

Foster, M., Oreszczyn, T. 1999. *Occupant control of passive systems: the use of venetian blinds*. The Barlett School of Architecture, University college London.

Gaia Solar, 2003. *Solceller på Aluminiumslameller*. Slutrapport for udviklingsarbejde for Gaia Solar A/S. UVE projekt, journalnr. 51181/00-0036.

Kaan, H. F., Reijenga T. H. 1998. *PV-integration in solar shading: A retrofit case study*. Netherlands Energy Research Foundation ECN (EuroSun 98)

Klotz, F. H., 1993. *Passive Solar Control and Daylighting Techniques with Thermo-hydraulics - New Concepts*. Proceedings of the 3rd European Conference on Architecture, Florence, H.S. Stephens & Associates.

Katic I., Badran, J. 2003, a. *Kollektivhuset Hans Knudsens Plads - solceller i forbindelse med glasinddækning* (målinger juli 2003). Tåstrup.

Katic I., Badran J. 2003, b. *Solcellemarkise på Folkecentret - målinger marts 2003*. Tåstrup.

PVsyst 2009. Study of photovoltaic systems, software version 5.41. Institute for the Science of the Environment. University of Geneva. Lokaliseret 20100414 på: <http://www.pvsyst.com/>

Solarpraxis AG, 2010. Solar Energy in Germany/Solarenergie in Deutschland. 4th Edition, November 2010. Berlin, Germany.

Teknologisk Institut, 2000. *Measurements on photovoltaic modules from VEGLA*. Tåstrup.

Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), 2006. *Lightweight PV Louvres For Multi-Functional Solar Control And Daylighting Systems With Improved Building Integration*. EU-rapport, contract no.: NNE 5-2001-00550. Lokaliseret: [http://ec.europa.eu/energy/renewables/solar\\_electricity/doc/pv\\_light.pdf](http://ec.europa.eu/energy/renewables/solar_electricity/doc/pv_light.pdf)

Wittchen, K., Johnsen, K., & Grau, K. 2010. *BSim: Et integreret edb-værktøj til analyse af indeklima og energiforbrug + vejledning*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut. <http://www.sbi.dk/indeklima/simulering/bsim-building-simulation>





Ved at integrere solceller i solafskærmningen udnyttes, at når der er størst behov for at afskærme brugerne mod solindfaldet, er der også de bedste muligheder for at opsamle og udnytte solenergien. Rapporten beskriver resultaterne af et udviklingsprojekt for en solafskærmning i form af brede, vandrette og drejelige lameller med solceller samt en integreret reguleringsfunktion, der samtidig er optimeret ud fra energiforbrug samt termisk og visuelt indeklima. Projektets ide var at tilgodese behovet for effektiv solafskærmning i tidens kontor-, erhvervs- og institutionsbyggeri, hvor glasfacader er dominerende. Konklusionen af udviklingsprojektet er, at det sjældent vil være optimalt at integrere solceller i bevægelige afskærmninger. Det vil normalt kun være relevant i tilfælde, hvor det er begrundet i arkitektoniske hensyn.

1. udgave, 2012  
ISBN 978-87-92739-01-8