

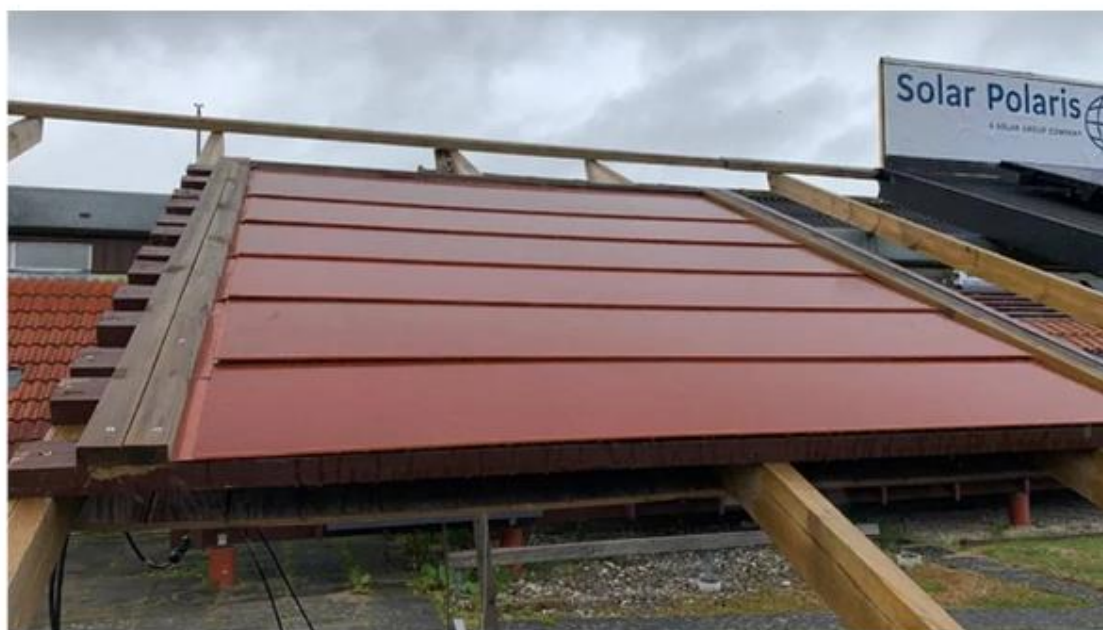
## Annex E Articles etc.

1. Interview in Energy Watch: "Det her åbner op for, at solceller ikke behøver at være øjebæer". By Mathias Julius Falkengaard. Published on 23 July 2019.
2. Exhibition poster and model for Building Green 2021, Copenhagen.
3. Exhibition poster and model for Intersolar 2022, Munich.
4. Poster presentation: 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: "Characterisation of angular dependent optical properties of different coloring technologies employed in BIPV products". By Markus Babin, Adrian A. Santamaria Lancia, Anders Thorseth and Sune Thorsteinsson, Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde, Denmark
5. Article in HVAC magazine no 13, December 2022: "Farvede solceller til byggeriet – muligheder og begrænsninger". By Peter B. Poulsen, Solcellematerialer og Systemer, DTU Elektro and Ivan Katić, Senior specialist. Energy and Climate, Danish Technological Institute.
6. Articles from DTU – only titles due the copyright of the journals)

23.07.2019 | kl. 09.38

## "Det her åbner op for, at solceller ikke behøver at være øjebærer"

Rockwool og Dansk Solenergi har fundet på at lime en ny slags farvede solpaneler fast på tagene. Projektet skal gøre op med opfattelsen af solceller som fremmedelementer på vores bygninger, fortæller to af forskerne bag.



Teknologisk Institut arbejder lige nu med at skabe en løsning, hvor solceller som disse bliver limet fast på tage. Et projekt, som de involverede forskere har stor tiltro til. | Foto: Mathias Julius Falkengaard

AF MATHIAS JULIUS FALKENGAARD

Hvad får man, hvis man kobler isolerende batts og nyudviklede solpaneler?

# PV Rock Roof

## Hvilke barrierer for solcelleanlæg ved tagudskiftning?

- + Almindelige sorte solcellepaneler passer ikke altid til bygningen
- + Solceller er normalt dyrere pr. m<sup>2</sup> end et traditionelt tag
- + En simpel tagrenovering virker mere overskuelig end et solcelleprojekt
- + Ringe kendskab til nye typer tagintegrerede solceller

## Hvad handler PV-Rock-Roof projektet om?

- + Samtænkning af elproduktion ved både renovering og nybyggeri
- + Tilpasning af farve og form til forskellige bygningstyper og tage
- + Udvikling af hurtigt og sikkert montagesystem
- + Karakterisering af optiske og elektriske egenskaber for farvede solceller



## Hvad viser mockuppen?

Modellen er et eksempel på en total tagrenovering med en integreret løsning for efterisolering og solceller.

Ved at forenkle og optimere efterisoleringen, samt slutte af med den elproducerende klimaskærm, opnås en gevinst både klimamæssigt og økonomisk.

De patenteret farvede solcellepaneler udgør en aktiv klimaskærm, som monteres direkte på konstruktionen og erstatter en traditionel tagbelægning.

Den udvendige isolering og fraværet af lægter betyder, at den brandsikre konstruktion bliver hurtig at lukke af og færdigbygge.

PV-Rock-Roof er et resultat af  
Danmarks Energitekniske Landskab  
og Danmarks Energisystem

**EUDP** C

projektsøgere:

danmarksenergi

energi

energi

energi

energi

energi

energi

Danmark skal omstilles til 100% vedvarende energi inden 2050, og de mange fri tagflader på vores bygninger kan yde et væsentligt bidrag hertil, hvis de anvendes til solceller. Så hvorfor er det ikke standard at sætte bygningsintegrerede (BIPV) solcelleanlæg op i forbindelse med tagudskiftning? Det kan især begrundes i:

- Sorte standard solcellepaneler passer ikke æstetisk til alle bygninger
- Trods prisfald er solceller normalt dyrere pr m<sup>2</sup> end et traditionelt tag
- En simpel tagrenovering virker mere overskuelig end et solcelleprojekt
- Ukendskab til nye typer tagintegrerede solcelleløsninger.

**PV-Rock-Roof** projektet tager fat i udfordringerne og har som mål at udvikle et nyt koncept til tagrenovering og nybyggeri, som giver bygherre merværdi i forhold til de gængse metoder. Dette gennem:

- Samtænkning af efterisolering og elproduktion, herunder hensyn til brandsikkerhed
- Tilpasning af farve og form til forskellige bygningstyper
- Udvikling af hurtigt og sikkert montagesystem og dermed en billigere løsning
- Dokumentation af optiske og elektriske egenskaber for farvede solceller

### Udstilling af mock-up

Mock-up'en viser et eksempel på en total tagrenovering med udvendig efterisolering som uden kuldebroer kan fortsættes ned ad facaden.

Den udvendige isolering og fraværet af lægter betyder, at konstruktionen bliver hurtig at lukke af og færdigbygge.

De farvede solcellepaneler, som er produceret og patenteret i Danmark, udgør en aktiv klimaskærm som monteres direkte på konstruktionen. En rustfri stålfolie på modulernes bagside sikrer tæthed ved overgange og samlinger.

Ved at forenkle og optimere efterisoleringen, samt slutte af med den elproducerende klimaskærm, opnås både en klimamæssig og økonomisk gevinst.

### Foreløbige resultater

Et af de kritiske punkter ved bygningsintegration af solceller er afkøling: der er meget lidt udluftning bag modulerne, hvilket nedsætter deres virkningsgrad. Vi har foretaget målinger og beregninger på dette og konstateret, at nedgangen i årlig ydelse kun vil være nogle få procent under danske forhold. De farvede BIPV moduler fra Dansk Solenergi er blevet undersøgt af DTU. Som forventet har farvevalget betydning for effektiviteten: De mørkegrå nuancer taber ca. 10% og de rødlige omkring 15% i forhold til et sort referencemodul med fuldt synlige enkeltceller. Arbejdet med optimering af ydelsen og farveteknikken fortsætter.

Projektet har også testet systemet for regntæthed, vindpåvirkning og temperatur. Resultaterne giver grund til at tro på at konstruktionen vil være sikker at bruge.

## Projektets partnere og roller:

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Dansk Solenergi moduler           | Udvikling og produktion af farvede BIPV   |
| DTU Fotonik egenskaber            | Karakterisering af optiske og elektriske  |
| EFFEKT Arkitekter                 | Arkitektur og byggeteknisk udvikling      |
| Mernild Byg evaluering            | Opbygning af mock-ups og byggeteknisk     |
| Rockwool International klimaskærm | Udvikling af tagsoleringskoncept med BIPV |
| Solarcity Denmark                 | Videnformidling og kommunikation          |
| Teknologisk Institut              | Projektledelse og tekniske bidrag         |



PV-Rock-Roof projektet er støttet af Det Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP) og forventet afsluttet i august 2022  
Projektets hjemmeside: [www.teknologisk.dk/41425](http://www.teknologisk.dk/41425)

**EUDP** 

# Farvede solceller til byggeriet – muligheder og begrænsninger

Peter B. Poulsen, Solcellematerialer og Systemer, DTU Elektro

Ivan Katić, Seniorspecialist. Energi & Klima, Teknologisk Institut

*Bygningsintegrerede solceller kan erstatte konventionelt tag- eller facademateriale og bidrager positivt til energirammen af bygningen. Produktionen af elektricitet på forbrugsstedet kan desuden reducere transmissionstabene i elnettet, og derfor kan BIPV-løsninger være et kosteffektivt bidrag til den grønne omstilling.*

*PV Rockroof projektet er et F&U-samarbejde mellem Teknologisk Institut, ROCKWOOL International, DTU Elektro, Dansk Solenergi, Mernild Byg, EFFEKT Arkitekter og Solar City Denmark. Projektet er støttet af EUDP-programmet, og formålet er at udvikle og demonstrere en ny løsning til tagrenovering, som kombinerer varmebesparelse og elproduktion fra taget. Denne artikel fokuserer på solcellernes visuelle fremtoning.*

En af de store udfordringer ved integration af solceller på taget er det æstetiske mismatch, der kan være mellem almindelige sorte solcellemoduler og den omgivende – ofte teglrøde – tagflade. I tidens løb har der derfor været mange forsøg på at tilpasse solcellemodulernes form og farve, så de egner sig bedre til bygningsintegration.

Dansk Solenergi er et af de firmaer, der er kommet længst med et tilpasset produkt, som kan leveres i en næsten vilkårlig farve. I projektet er det undersøgt, hvordan modulerne fra Dansk Solenergi samt fra udvalgte konkurrenter reflekterer lyset i forskellige retninger, da dette er helt afgørende for det visuelle indtryk samt for, om der er stor eller lille risiko for blænding fra anlægget.



Figur 1 Prøvefelt med forskellige farver moduler fra Dansk Solenergi opstillet på Teknologisk Institut.

## Farvede

## solcellemoduler

Integration af farvede solceller (PV-moduler) i bygninger medfører næsten altid energitab, når modulerne skal være forklædt som facade- eller tagmateriale. Disse tab bunder i, at lys med en given bølgelængde enten kan absorberes i solcellen og skabe nyttig energi eller kan benyttes til

farvedannelse for at give et flot udseende – ikke begge dele på samme tid. Derfor står farvede bygningsintegrerede solceller (eller kort BIPV) altid over for en afvejning mellem effektivitet og farvevirkning.

En anden udfordring består i, at praktisk talt alle solcellemoduler bruger glas som overfladebelægning for at give dem mekanisk stabilitet og muliggøre lysoverførsel til cellerne. Almindeligt glas ser anderledes ud end almindelige byggematerialer – såsom ler eller sten – da det er væsentligt mere blankt. Andelen af reflekteret lys afhænger desuden stærkt af indfaldsvinklen.

Disse egenskaber kan påvirke det overordnede udseende af farvede solcellemoduler, der fører til forskellige grader af oplevet farvemætning alt afhængigt af observatørposition. Derudover kan direkte (spejlende) refleksioner fra glasoverflader forårsage blænding på bestemte tidspunkter af dagen for en given observatørposition. Ru (strukturerede) eller antirefleksbehandlede glasoverflader kan afbøde nogle af disse effekter.

Hos DTU Elektro er prototypeprøver med forskellige farveteknologier blevet undersøgt for bedre at forstå disse fænomener, for at identificere tabene og for at give anbefalinger til produktudvikling. Refleksionsmålinger og simuleringer er brugt til at bestemme den vinkelafhængige farvevirkning af de forskellige farveteknologier. Andre målinger er blevet brugt til at vurdere risikoen for blænding fra forskellige strukturerede glasoverflader.

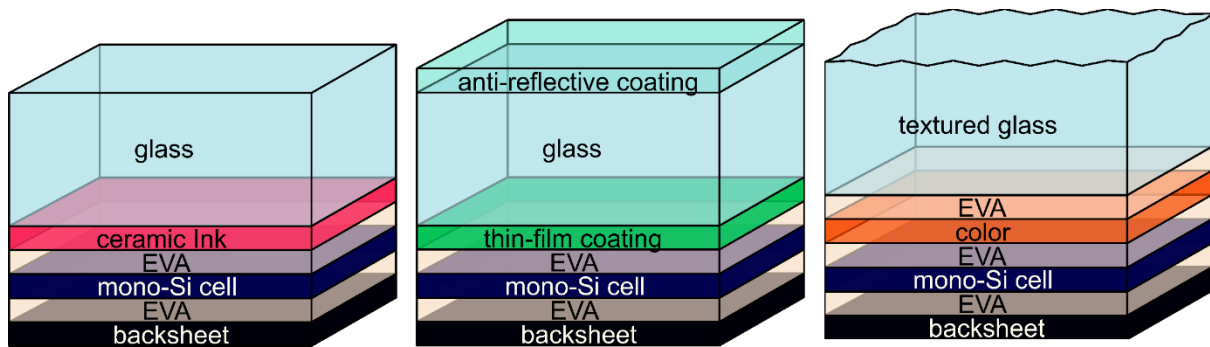
### **Farver**

Solceller kan fuldstændig camoufleres i facadebeklædninger eller tagdækningsprodukter gennem en kombination af forskellige farveteknologier og strukturerede glasoverflader – hver med deres egne fordele og ulemper:

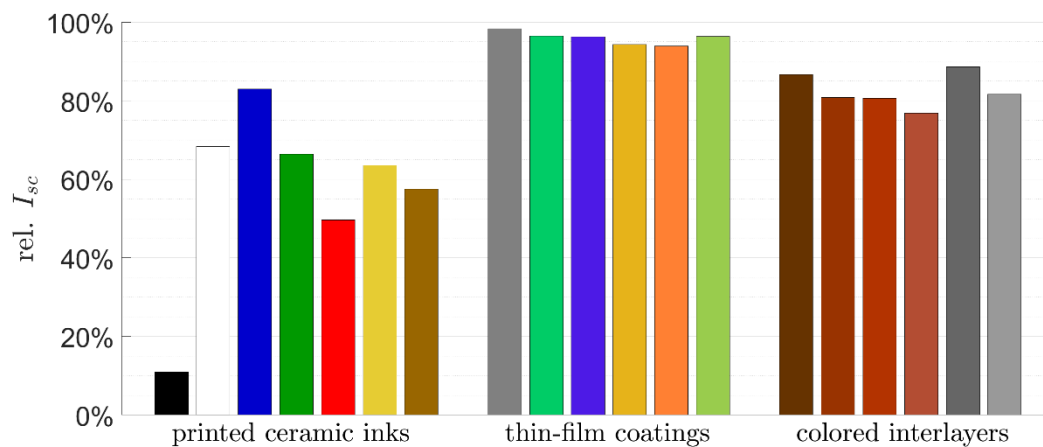
- Gennemfarvet glas eller keramisk tryk på glas er en billig løsning, der normalt udføres på overfladeglasset før fremstilling af solcellemoduler. Ulemper inkluderer betydelige effektivitetstab (afhængigt af farvevalg og intensitet) på grund af absorptionen af sollys i farvelaget, som forhindrer det i at nå solcellerne.
- Farvede mellemlag består af farvede folier (ofte polymerer) lamineret mellem overfladeglasset og solcellerne under fremstilling af solcellemoduler. De giver en høj grad af fleksibilitet, da de let kan justeres i størrelse og farveintensitet. Overfladestrukturen af glasset kan vælges uafhængigt af farve, men også her er der tab på grund af lysabsorption. Dansk Solenergi bruger denne metode.
- Strukturelle farver er ekstremt tynde lag af f.eks. metaloxider med forskelligt brydningsindeks – f.eks. deponeret på indersiden af overfladeglasset. Forskellene i brydningsindeks samt lagtykkelsen giver refleksion af specifikke bølgelængder og dermed farver. Derved opnås meget lave transmissionstab, da der ikke er lysabsorption. Ulempen ved disse lag er, at de er dyre at producere, ufleksible og generelt udviser farveændring afhængigt af observatørens position og solens vinkel i forhold til fladen.

•





Figur 2: Principper for farvede solceller. Fra venstre keramisk glastyk, strukturel coating og farvet mellemlag.



Figur 3: Relativ ydelse med forskellige teknikker og farver som målt af DTU. Kolonnerne til højre er for et udpluk af de moduler, Dansk Solenergi har bidraget med til projektet. [1].

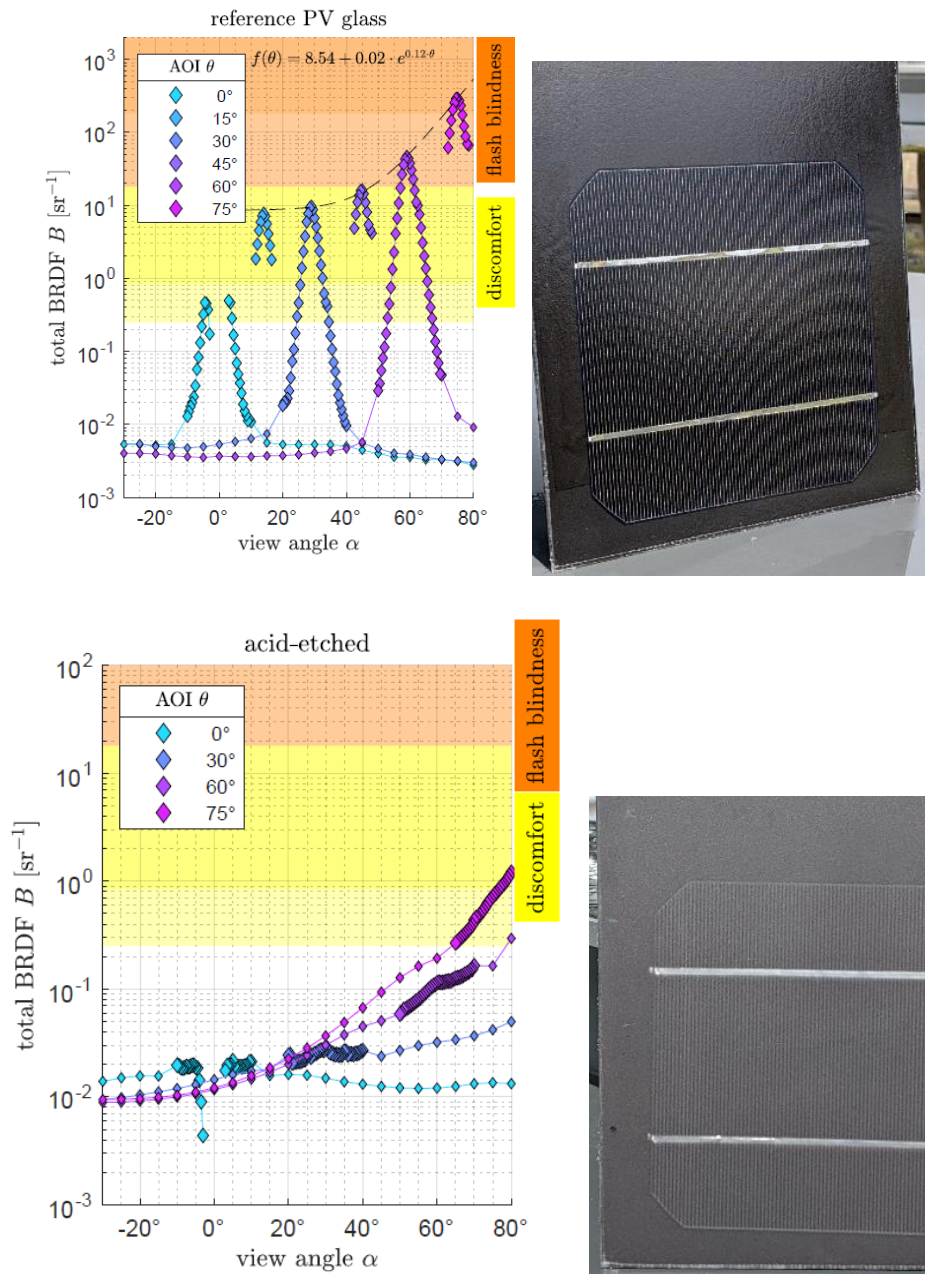
### Risiko for blænding?

Blænding eller genskin, forstået som farlige eller irriterende refleksioner fra solcellemoduler, har tidligere været et forholdsvis lidt undersøgt emne. Når solcellemoduler anvendes i byer og integreres i facader eller tage på bygninger, bliver det dog vigtigt at undgå blænding, således at solcellerne ikke er til unødige gene i bymiljøet. Derfor er det vigtigt at forstå mekanismerne til bunds.

Forskere fra gruppen Solcellematerialer og Systemer på DTU Elektro har undersøgt forskellige strategier for at undgå blænding fra solcellemoduler – herunder antirefleksbelægninger og forskellige strukturerede glasoverflader. Ved at sprede lyset, der rammer solcellemodulernes glasoverflade, kan disse strukturer ikke blot reducere de blændende refleksioner, men endda øge solenergiudbyttet ved skæve indfaldsvinkler.

Styrken af refleksioner fra solcellemoduler, der fører til blænding, afhænger i høj grad af sollysets vinkel, når det rammer overfladeglasset. Meget høje indfaldsvinkler resulterer normalt i mere blænding, end når solen skinner vinkelret på overfladen. Målinger viser, at satinerede (matte) glasoverflader er mest effektive til at reducere blænding fra solcellemoduler, og disse kan for de fleste vinkler reducere blænding til et ufarligt niveau.





Figur 4: Refleksionsmålinger på et standardsolcelleglas øverst og et satineret glas nederst. Graferne viser intensiteten af det reflekterede lys (per steradian rumvinkel) som funktion af observationsvinkel. Der er kurver for forskellige indfaldsvinkler (AOI) på glasset. [1].

De spejlende refleksioner ses tydeligt i topglasset med maksimumsværdier, hvor indfaldsvinklen (AOI) er lig med observansvinklen (View angle). Målinger på det nederste glas ligger på et langt lavere niveau og har ikke spidser på samme måde, hvilket stemmer overens med, at det reflekterede lys i høj grad diffuseres.

I PV Rockroof-projektet er der i de realiserede mock-up konstruktioner brugt solcelleglas med en nopret overfladestruktur, hvilket betyder, at lyset ikke spejles som i plant glas, hvor indfaldsvinkel = udfaldsvinkel. De enkelte fordybninger vil sprede lyset i mange retninger, hvilket giver et blødere udtryk, end en plan flade ville gøre. Alt efter struktur og mønster vil lyset blive reflekteret i nogle hovedretninger, eller det vil blive spredt over et større vinkelrum. Det er derfor vanskeligt at regne risikoen for blænding ud, hvis man ikke har et godt kendskab til detaljerede glasegenskaber – noget som ofte er vanskeligt at skaffe.

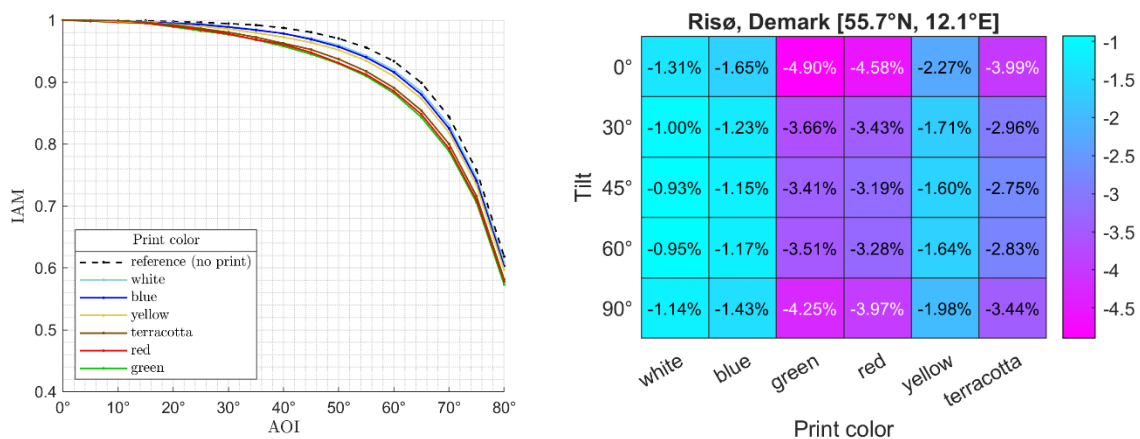


Figur 2: Et hjørne af modulene, hvor cellen kan anes som en mørk skygge, og glassets struktur kan ses som regelmæssige prikker. De uregelmæssige tråde stammer fra materialet mellem glasset og cellen.

### Vinkelafhængige

### tab

Solcellemoduler producerer mest energi fra direkte sollys, men det nøjagtige energiudbytte afhænger blandt andet af sollysvinklen, der når overfladeglasset. Ved flade indfaldsvinkler reflekteres og absorberes mere lys fra glasoverfladen og andre komponenter foran solcellerne, såsom farvede lag, end når solen skinner vinkelret på overfladen. DTU Elektro har undersøgt, hvordan forskelligt farvede keramisk blæk påvirker refleksionstabene fra disse lag. Reduktionsfaktoren benævnes IAM (incidence angle modifier). Analysen viser, at farvevalget har stor indflydelse på de vinkelafhængige tab og tegner sig for op til 5 % yderligere energitab over et helt år – altså ud over de tab, der grundlæggende er ved af have et farvefilter foran solcellen.



Figur 3: Vinkelafhængig reduktionsfaktor og årlige vinkelafhængige tab for et sydvendt anlæg i Danmark. [2].

## Perspektiver

Da solceller generelt er faldet 90 % i pris over de seneste 10 år, og da æstetisk integration i bygninger er vist mulig, har projektet belyst nogle muligheder for, hvordan lokal elproduktion på bygninger er mulig, samtidig med at et æstetisk udtryk på bygninger kan bevares. Projektet har også vist, at indfarvning af solceller fører til energitab, men at tabene kan reduceres til et tåleligt niveau. Håbet er, at markedet vil acceptere, at værdien af de muligheder, de nye farvede løsninger tilvejebringer i solcellemarkedet, er mere værd end de energitab, der uundgåeligt skal til for at skabe farven for beskueren.

PV Rockroof-projektet har vist, at den visuelle karakterisering af et solcellemodul er en uhyre kompleks opgave. Det er ikke kun farven, men også samspillet med glasset der bestemmer, hvad man ser. Endvidere betyder lysets retning og styrke meget, da et produkt kan se helt anderledes ud i gråvejr end i klart solskin. Et visualiseringsværktøj, der kan tage hensyn til dette, ville derfor være til stor hjælp ved produktvalg ved følsomme placeringer af solcelleanlæg. I PV Rockroof er der udviklet et produkt, der giver stor frihed i farvevalg og et minimum af genskin – uden at det dog er helt elimineret.

### Henvisninger:

[1] M Babin et al, "Characterisation of Angular Dependent Optical Properties of Different Coloring Technologies Employed in BIPV Products", EUPVSEC 2020 DOI:10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.32

[2] M. Babin et al: "Glare potential evaluation of structured PV glass based on gonioreflectometry", PVSC 2022

[3] M. Babin et al, Dependency of IAM losses in colored BIPV products on the refractive index of colorants, EUPVSEC 2021 4BO.4.2

[4] PV-Rockroof projektets hjemmeside: <https://www.teknologisk.dk/41425>

Publications from DTU:

8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion

**STUDY OF OPTICAL TRANSMISSION LOSSES  
OF SATINATED PV GLASS**

Markus Babin, Anna Bertomeu i Baldé, Sergiu V. Spataru, Michael L. Jakobsen, Sune Thorsteinsson  
Department of Electrical and Photonics Engineering, Technical University of Denmark  
Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde, Denmark

**ABSTRACT:** Satinated glass is an increasingly important component of PV modules, especially in the building integrated (BIPV) sector, where it can contribute to more uniform appearance as well as significantly reduce the risk of glare. Different satination methods, such as wet chemical etching or mechanical abrasion, are available, which can impact the PV-relevant optical parameters in different ways. In order to characterize the associated performance losses, in this study eight different satinated glass types are compared in terms of spectral transmittance, surface morphology, relative transmission loss and angular dependent reflection losses.

Measurements show only insignificant transmission losses of  $< 1\%$  for acid-etched glass compared to reference PV glass at normal incidence, with significant gains at high incidence angles  $> 60^\circ$ . No significant differences between different acid-etched samples can be observed, all featuring homogeneous appearance. Other satination technologies, such as sandblasting or laser-etching show significantly higher transmission and reflection losses at low incidence angles, making them less viable for use in PV applications.

**Keywords:** Optical Losses, Performance, PV Materials, Texturisation

37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

**CHARACTERISATION OF ANGULAR DEPENDENT OPTICAL PROPERTIES OF  
DIFFERENT COLORING TECHNOLOGIES EMPLOYED IN BIPV PRODUCTS**

Markus Babin, Adrian A. Santamaria Lancia\*, Anders Thorseth, Sune Thorsteinsson  
Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark  
Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde, Denmark

\*Corresponding Author: aasl@fotonik.dtu.dk; +45 46774584

**ABSTRACT:** Accurate determination of the angular dependent color of BIPV products is necessary to aid architects in matching BIPVs to surrounding building materials. A methodology for the study and characterization of visual appearance at different viewing angles is presented. This includes measurements of spectra of reflected light from BIPV samples for the determination of single-plane BRDF and IAM. BRDFs are converted to CIELAB color coordinates to analyze lightness, chroma and color saturation. Samples of three different technologies (printed ceramic inks, thin-film coatings and colored interlayers) are investigated. Results show vastly different angular dependency for sample groups, ranging from almost uniform (ceramic ink) to iridescent (thin-film coating) appearance. Differences are also observed between ceramic inks of different colors with correlation between specularly of reflection, IAM and angular constancy of appearance. For thin-film coated samples, correlation is shown between reflectance spectra, IAM and iridescence. Samples with colored interlayers show irregular angular appearance due to a textured glass surface.

**Keywords:** Building Integrated PV (BIPV), Experimental Methods, Optical Properties, Performance, Color

**DEPENDENCY OF IAM LOSSES IN COLORED BIPV PRODUCTS  
ON THE REFRACTIVE INDEX OF COLORANTS**

Markus Babin\*, Sune Thorsteinsson, Adrian A. Santamaria Lancia, Peter B. Poulsen,  
Anders Thorseth, Carsten Dam-Hansen, Michael L. Jakobsen  
Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark  
Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde, Denmark  
\*Corresponding Author: marbab@fotonik.dtu.dk

**ABSTRACT:** Measurements of the incidence angle modifier (IAM) of colored PV modules based on inkjet-printed glass have shown differences between colors, which are uncorrelated with the total transmittance and reflectance of the colored glass. In this paper, the complex refractive index of ceramic inks is estimated based on measurements of reflectance and transmittance spectra. These estimates are used in ray-tracing simulations to determine the IAM of coupon-sized PV modules with printed ceramic inks. Comparisons of the simulation results to measured IAMs show a high correlation between the refractive index of colorants and the IAM.

Furthermore, estimations of the impact of IAM on performance based on TMY data at different locations are performed. The results indicate that changes in IAM due to sample coloration can lead to annual irradiance losses of up to 5% compared to uncolored glass. These losses are caused by additional reflections at the glass-ink interface according to the Fresnel equations, dependent on the refractive index of the ceramic inks.

**Keywords:** Building Integrated PV (BIPV), Optical Losses, Performance, Ray Tracing, Color

## Glare potential evaluation of structured PV glass based on gonioreflectometry

Markus Babin, *Graduate Student Member, IEEE*, Sune Thorsteinsson, Michael L. Jakobsen, Sergiu V. Spataru

TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK



MASTER THESIS

**Experimental characterization of angular dependent  
color perception of colored PV samples in combination  
with IAM measurements targeting building integrated  
photovoltaic products**

Markus Babin

July 26, 2020

DTU Fotonik  
Department of Photonics Engineering

---

# **Title: Degradation study of colored building integrated photovoltaic modules**

Author: Marco Marcellan

