

TNO 2024 R10287 – 23 februari 2024
Openbaar eindrapport

Elektronisch zon regulerende gebouwschilafwerking voor
energie renovaties (EZRA)

Auteurs	Dr. ir. Jonathan van den Ham (TNO)
Rubricering verslag	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Intern
Aantal bijlagen	0
Programmanummer	1921302
Projectnaam	Elektronisch zon regulerende gebouwschilafwerking voor energie renovaties (EZRA)

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

In de gebouwde omgeving kan slimmer gebruikt gemaakt worden van zonlicht om warmte- en koelvraag te beïnvloeden. Om dit te realiseren zijn schakelende gevelelementen nodig. Al geruime tijd is bekend wat het besparingspotentieel van schakelbare gevelelementen kan zijn. Voor transparante delen van de gevel zijn hier reeds veel technische oplossingen voor. Echter, voor niet-transparante delen is een significante warmte- en koelvraagverlaging nodig om een grote energiewinst te behalen. Hier zijn slechts een beperkt aantal technologische opties voor onderzocht. In een voorgaand project is reeds aangetoond dat elektronisch schakelen veel voordelen heeft voor niet-transparante gebouwdelen. Warmtevraag (winter) en koelvraag (zomer) zouden immers geminimaliseerd worden middels reflecteren of absorberen van zonlicht. In dit project is een concept ontwikkeld om dit in praktijk te brengen, tot een grootte van één vierkante meter (1 m²).

Dit doel is bereikt door twee elektronische schakelende technologieën, namelijk elektroforese en elektrochrome reflecterende lagen te ontwikkelen en te toetsen op maximale reflectieverschillen en schaalbaarheid. Beide concepten bereikten een verschil in reflectie, maar op een verschillende manier. Elektroforese werkt middels het verplaatsen van deeltjes in elektrische velden. Elektrochrome coatings werken op basis van elektrochemische reacties die een kleurverandering veroorzaken. Om beide concepten nader te onderzoeken voor schakelbare gevels, zijn twee kleine lab prototypen gemaakt van 100 cm². Hierbij bleek echter de elektroforetische route niet technisch haalbaar op genoemde schaal en termijn van het project. Daarnaast staat het verder opschalen van deze technologie iets verder van reguliere coatingmethoden af, hierdoor zal implementatie meer ontwikkelingsstappen vereisen. Volgens het projectvoorstel zou er één technologie verder ontwikkeld worden tot een schaal van 1 m² met aantoonbare functionaliteit. Uiteindelijk is dit gerealiseerd middels de elektrochrome route met schaalbare productieprocessen.

Met een schakefficiëntie tot 47% is een grote verbetering ten opzichte van reeds beschikbare technologieën gemaakt. De schakefficiëntie van bestaande concepten is namelijk beperkt tot maximaal 27%. Tevens zijn in dit project veel kosten-effectievere productietechnologieën ingezet vergeleken met klassieke glascoating technologieën. Het nadeel dat dit doorgaans heeft voor transparante toepassingen, namelijk minder homogene verkleuring en langere schakeltijden, is voor de applicatie in niet-transparante gebouw delen geen probleem gebleken. Verdere verbeteringen in met name het assemblage proces van de 1 m² demonstrator zijn echter wel nodig voor succesvolle implementatie in de gebouwde omgeving. Daarnaast is een nauwkeurige analyse van het besparingspotentieel middels implementatie (en metingen) in een testgevel een belangrijke volgende stap in de ontwikkeling van dit concept.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding	5
2 Doelstelling & werkwijze	6
2.1 Doelstelling.....	6
2.2 Werkwijze	6
3 Project resultaten & discussie.....	7
4 Conclusies & aanbevelingen	10
5 Projectuitvoering.....	11
6 Kennisdeling	12
Referenties	13

1 Inleiding

Zonne-energie kan op verschillende manieren ingezet worden om energiebesparing in de gebouwde omgeving te bereiken. Het meest bekende voorbeeld is het gebruik van fotonvoltaïsche technologie integratie in daken of gevels (BIPV) om elektriciteit op te wekken. Deze ‘hoge’ kwaliteit van energie kan voor veel toepassingen gebruikt worden. Echter, voor het verwarmen van gebouwen – warmte is een ‘lage’ kwaliteit van energie – kan een efficiëntieslag behaald worden. Door de zonne-energie in de vorm van warmte te absorberen kan een hogere efficiëntie behaald worden omdat er geen restricties zijn vanwege het gebruik van halfgeleiders (zoals bijvoorbeeld de bandgap, E_g). Op deze wijze kan bijna 100% van het zonlicht ingezet worden voor verwarmen in plaats van een typische 20% efficiëntie voor PV. Eerder onderzoek van TNO, AkzoNobel en de Technische Universiteit Eindhoven heeft aangetoond dat het toepassen van statische (niet-schakelende) donkere coatings op gebouwen een energiewinst kan opleveren [1]. Echter, applicatie van statische coatings zal in het Nederlandse klimaat met name in de zomer een energieverlies opleveren en / of thermisch ongemak opleveren, doordat huizen sterk zouden opwarmen en gebruik van energie door air conditioners (AC) hoger zal zijn.

Door het toepassen van een dynamische coating – waarbij schakelen tussen reflectie en absorptie mogelijk is – kan een nog hogere energiebesparing bereikt worden en thermisch comfort verhoogd worden. In 2020 heeft onderzoek door eerder genoemde partijen aangetoond dat, afhankelijk van de gevel oriëntatie, tot 25% energie besparing op niet-transparante delen van een gebouw bereikt kunnen worden [2]. De besparingen omvatten hierbij het reduceren van warmtevraag (in winter / tijdens koude dagen) en het reduceren van koelvraag (reduceren AC gebruik op warme dagen). Dit is onderbouwd met uitgebreide simulaties en berekeningen, maar een technische realisatie van een dergelijk concept ontbreekt nog. Met name de vereiste schakelefficiëntie komt in bestaande concepten te kort, dat wil zeggen: een groot verschil tussen absorptie en reflectie van het schakelende materiaal. Bij voorkeur zou een schakeling van 60% gehaald moeten worden, ook wel de ‘delta total solar reflection’ (dT_{SR}) genaamd. Het moment van schakelen bleek echter ook van groot belang voor de maximaal haalbare energie-efficiëntie. Dit leidde tot de conclusie dat elektronisch schakelen (onafhankelijk van omgevingsfactoren) nodig is om niet-transparante delen van de gevel effectief te laten schakelen om energie-efficiëntie te maximaliseren [3].

2 Doelstelling & werkwijze

2.1 Doelstelling

Het EZRA project heeft als doel een elektronisch schakelbaar paneel te fabriceren met een schakel efficiëntie van 60% en een grootte van 1 m².

2.2 Werkwijze

Allereerst is technologie ontwikkeling nodig, hier zijn twee veelbelovende technologieën voor gekozen, namelijk elektroforetische (EF) en elektrochrome (EC) technologie. Eerst genoemde werkt door middel van het verplaatsen van deeltjes middels elektrische velden, het tweede concept functioneert op basis van elektrochemische reacties. Om een hoge reflectie te bereiken zijn niet nader genoemde componenten toegevoegd. Deze staan gedetailleerd beschreven in de niet-openbare documentatie van dit project.

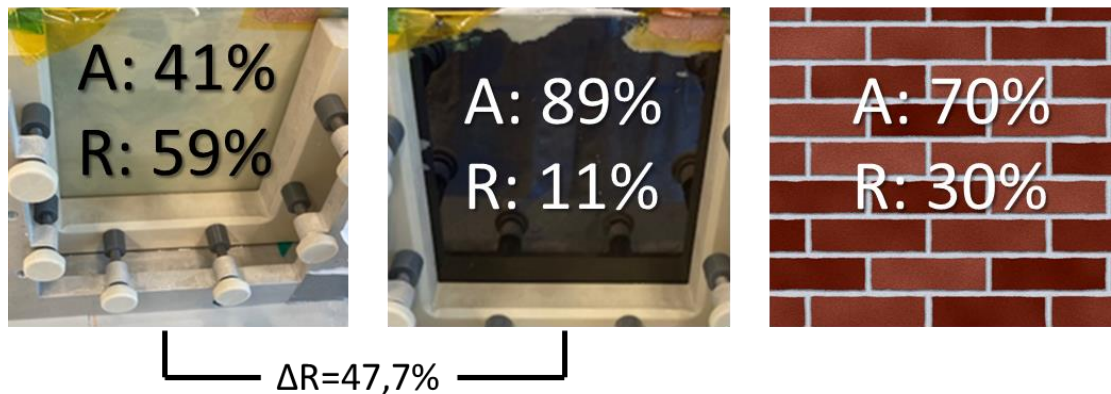
Aan het begin van dit project is de technologie deels aangetoond op zeer kleine schaal van 2 cm². In een eerste stap zijn twee prototypen gemaakt met een afmeting van 100 cm² (10 x 10 cm). Hierna is een keuze gemaakt voor de meest belovende technologie, die tot een formaat van 1 m² gebracht is in de project demonstrator.

3 Project resultaten & discussie

In dit project is lang gewerkt aan het prototype van de 100 cm² voor de EF technologie. Echter bleek het doel op twee manieren onhaalbaar. De schakel efficiëntie (dT_{SR}) bleef namelijk ver achter bij het potentieel. Daarnaast was een groter probleem dat het schakelen niet-reversibel verliep op deze schaal; het was niet mogelijk meerdere licht/donker cycli te halen. Er zijn hypothesen geformuleerd waarom dit niet mogelijk was (zie niet-openbare documentatie D1.3), maar het aangaan van de gerelateerde uitdagingen viel buiten het bereik van het EZRA project. Het niet slagen van deze route was een tegenvaller, aangezien deze technologie een hoge dT_{SR} zou kunnen halen. Daarnaast was verdere optimalisatie van kleur mogelijk, iets wat veel lastiger is voor de andere route. Meer details over de EF route kan men vinden in D1.3. Tot slot bleek de aard van de EF technologie er voor te zorgen dat het deze technologie lastiger op te schalen is met bekende methodieken in de coating industrie. Met name het gebruik van laag viskeuze vloeistoffen was hier een nadeel. Het opschalingspotentieel staat verder beschreven in niet-openbare documentatie D2.1.

De EC technologie die in dit project ontwikkeld voldeed wel aan de verwachtingen, waarbij een schakel efficiëntie tot 47% gehaald kon worden voor het 100 cm² prototype. Om dit te bereiken is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van kosteneffectieve en commercieel beschikbare materialen [4]. Echter moest er redelijk wat werk gestoken worden in het opschalen van de EC coatings, die helaas niet commercieel beschikbaar waren op deze schaal in combinatie met de vereiste specificaties. De TNO infrastructuur was geschikt om tot 20 x 20 cm op te schalen; groter bleek lastiger te realiseren dan vooraf gedacht. Binnen het project is samen met een commercieel coating bedrijf hier een belangrijke stap in gemaakt, waardoor de coating op vele vierkante meters aangebracht kon worden. Ondanks de grote stappen die hierin zijn gezet, is verdere verbetering echter nog steeds mogelijk zoals later in dit rapport zal blijken. In de basis zijn de materialen die nodig zijn om dit concept op te schalen zeer schaalbaar. Het assemblage proces wijkt echter wel af van bestaande industriële processen. De mogelijkheid tot gebruik van hoog viskeuze vloeistoffen is hierbij een voordeel. Verder informatie hierover is te vinden in niet-openbare documentatie D2.1.

De EC route bleek zeer dichtbij de gewenste specificaties te komen, met een maximale schakeling van 47% en absorptie en reflectie waarden zoals weergegeven in figuur 1. Ten opzicht van een referentie (bakstenenmuur), kan in de winter maximaal ~300 W/m² gewonnen worden, terwijl de koelvraag in de zomer met maximaal ~200 W/m² teruggebracht kan worden. Uiteraard hangt het benutten van deze warmteflux sterk af van aspecten die buiten het bereik van deze studie liggen, maar wel goed in kaart gebracht zijn in een voorgaand project. Zo is de mate van isolatie zeer belangrijk, waarbij dit concept in huidige vorm (directe applicatie op de gevel) het beste werkt bij relatief lage isolatiewaarden [2].



Figuur 1: foto van de licht en donker staat, inclusief bijbehorende waarden van het EC prototype (links en midden), vergeleken met absorptie en reflectie waarden van een bakstenen muur (rechts)

Wegens het wegvallen van de EF route, is voor de opschaling gekozen voor de EC route. Hier zaten grote uitdagingen aan, zoals beschreven in niet-openbare documentatie D3.1. Het coating proces was reeds in de prototype fase al geschikt gemaakt voor opschalen. Deels vanwege leveringsproblemen van grote glasplaten (zie opmerking over COVID-19 pandemie), en deels vanwege mechanische uitdagingen, werd gekozen voor een veelvoud van 30 x 30 cm platen die samen een groot schakelbaar vlak vormden (1 m²).

Echter bleek vooral het opschalen van de mechanische behuizing weerbarstig, aangezien assemblage en lek dicht krijgen van alle systemen op 1 m² lastiger was dan op 100 cm² schaal. Hier zijn veel lessen uit geleerd. Indien de demonstrator van 1 m² nogmaals in elkaar gezet zou moeten worden, zou het waarschijnlijk beter gaan. Echter was het project budget niet toereikend om dit te optimaliseren.

Enkele verbeteringen zouden bij een herontwerp eenvoudig doorgevoerd kunnen worden:

- De EZRA demonstrator heeft een erg hoog gewicht. Door meer polymeer en / of dunnere metaal materialen te gebruiken zou het totale gewicht sterk teruggebracht kunnen worden.
- Assemblage van de mechanische behuizing zou geoptimaliseerd moeten worden. Een combinatie van gemakkelijker in te passen onderdelen alsmede langzamer drogende lijm (meer tijd om te verwerken) zouden een grote verbetering in het proces betekenen.
- De spacer dikte (afstand tussen voor en achterkant van de actieve coatings) moet sterk afnemen om verkleuring meer homogeen te laten verlopen.
- Het coating proces kan verbeterd worden door ter plaatse een calcinatiestap uit te voeren van 500°C [4]. Dit was nu niet mogelijk omdat infrastructuur bij coating bedrijf daar niet op in was gericht. Hierdoor is dit in een latere stadium bij TNO gedaan, waardoor de coatings waarschijnlijk sneller verouderden.
- Aansturing kan met eenvoudige microchips gedaan worden in plaats van geavanceerde lab apparatuur (potentiostaten) zoals in het project gedaan. Het energie verbruik (combinatie van stroom en voltage van 10 mA en 1,2 V) bleek voldoende laag, waardoor geen power electronics nodig zijn. Aansturing via microchips zoals bijvoorbeeld een Arduino® of Raspberry Pie® is hiermee mogelijk en belangrijk voor verdere kosten reductie.
- Tot slot kan er een verbeteringslag gemaakt worden in de niet nader te noemen componenten, zoals aangegeven in D1.3 en D3.2 (niet-openbaar).

- Toepassen van anti-reflectie coatings kan circa 8% extra schakel efficiëntie toevoegen. Dit zijn kosteneffectieve en gemakkelijk aan te brengen coatings aan de buitenkant van het glas (ook gebruikt voor PV panelen).

Wat verdere kostenbesparing betreft is in dit project ook gekeken naar het gebruik van folies, wat zeer veel belovend was voor de EF route. Echter bleek de EF route zelf ongeschikt in dit project, waardoor de folies alsnog toegepast werden voor de EC route. Hoewel dit tijdelijk werkte met een hoge schakel efficiëntie bleek de stabiliteit wegens het ontbreken van 500 °C calcinatie stap zeer beperkt. Dergelijke temperaturen zijn niet mogelijk in combinatie met folies. Door het toepassen van innovatieve processing technologie, namelijk photonic flash sintering (PFS), is in dit project een poging gedaan dit probleem te ondervangen. Hierbij worden de coatings zeer lokaal verwarmd middels licht in plaats van een traditionele warmte (waarbij het geheel een hoge temperatuur bereikt), echter bleken de folies hier niet tegen bestandig. Om deze reden is deze folie technologie niet gebruikt in de uiteindelijke EZRA demonstrator.



Figuur 2: 1 m² demonstratie panel van het EZRA project op basis van EC technologie.

4 Conclusies & aanbevelingen

In dit project is middels twee technologieën realisatie van schakelbare geveltechnologie onderzocht om energieverbruik in de gebouwde omgeving terug te dringen.

Elektroforetische (EF) technologie bleek niet voldoende om de doelen te halen binnen de randvoorwaarden van dit project. Dit was wel het geval voor de elektrochrome (EC) route. Hierbij is een succesvol prototype ontwikkeld van 100 cm², en vervolgens een 1 m² demonstrator met een schakel efficiëntie tot 47%. Met laatstgenoemde waarde kan circa 500 W/m² aan zoninstraling aangepast worden. In de winter loopt dit op tot circa 300 W/m² aan warmtevraag reductie ten opzichte van gemiddelde bakstenenmuur. In de zomer is onder gelijke condities tot circa 200 W/m² koelvraag mogelijk. Op het totaal van niet-transparante delen van een rijtjeshuis (35 m²) kan dit oplopen tot een flinke energie winst. Uiteraard hangt het daadwerkelijk nuttig gebruik van deze warmte af van de gevel oriëntatie en isolatie niveau. Toepassing op de zuidgevel en een relatief laag isolatieniveau zullen hierbij tot de hoogste energie-efficiëntie leiden.

Hoewel in een voorstadium uitgebreide simulaties zijn gedaan is de aanbevolen vervolgstap om deze technologie te gaan testen in veldcondities (aanbrengen op een gevel) en de warmte uitwisseling te meten. Echter zal hiervoor nog een korte optimalisatie plaats moeten vinden zoals omschreven in de resultaten en discussie (met name assemblage). Dit zijn echter geen fundamentele bezwaren om een volgende stap te zetten voor realisatie van dit concept.

Wat betreft de kosteneffectieve aanpak zal vooral de assemblage kritisch bekeken moeten worden. Dit is momenteel een arbeidsintensief proces dat geautomatiseerd zal moeten worden. Tot die tijd is het lastig om een marktaspecten expliciet uit te lichten anders dan wat reeds in niet-openbare documentatie D2.1 en D2.2 gedaan is. Naast kostenbesparingen aan de assemblagekant valt er een optimalisatieslag te maken in de keuze van het glas. De huidige kwaliteit was gekozen op basis van PV technologie, waarvoor hogere stroomdichtheid nodig is. Door dunnere lagen aan te brengen op het glas kan de transparantie van het glas verhoogd worden (hogere schakel efficiëntie) en kunnen de kosten omlaag gebracht worden. Het proces om geleidend glas te maken is namelijk redelijk kostbaar; versnellen van dit proces door dunnere lagen te maken zal daardoor een gunstige ontwikkeling zijn ten aanzien van de prijs.

5 Projectuitvoering

Het project startte tijdens de COVID-19 pandemie. Direct overleg en een deel van de praktische werkzaamheden waren hierdoor lastiger. Er heeft in de beginfase veel online overleg plaatsgevonden, en werk in het laboratorium moest op voldoende afstand van elkaar gedaan worden. Dit was soms lastig, maar het was wel overkomelijk. Wat lastiger bleek, vooral na afloop van de pandemie, was een verandering in logistieke netwerken en verlengde levertijden als gevolg van de pandemie. Met name voor het verkrijgen van de goede basis materialen was dit een uitdaging die tot vertraging van het project heeft geleid (zoals reeds besproken met TKI Urban Energy). Voorts bleek de technische haalbaarheid van de EF route meer weerbarstig dan gedacht. Tot slot was de assemblage van de 1 m² een uitdaging binnen de mogelijkheden van de projectpartners, aangezien dit een combinatie van chemisch, mechanisch en elektronische facetten was die niet eerder bij project partners uitgevoerd was op deze schaal (1 m²). Het uiteindelijke resultaat zou daarom bij herhaling van de assemblage zeer waarschijnlijk beter zijn op basis van geleerde lessen. Helaas was er in het project geen ruimte meer qua tijd of budget om hier een optimalisatieslag te maken.

De duur van het project is opgelopen, vooral vanwege vertragingen in levertijden en een minder voortvarende start dan gehoopt in de COVID-19 pandemie.

De technische specificaties van het project zijn deels behaald. De 1 m² is behaald zoals beschreven, de schakel efficiëntie is echter lager dan de streefwaarde van 60%. Dit komt met name doordat aannames in het projectplan waren gebaseerd op schakel efficiëntie van materialen, maar niet van het totale systeem. Een aantal verwachte schakeling verliezen (in o.a. het gebruikte glas) pakte hoger uit dan aanvankelijk gedacht. Toepassen van een (reeds genoemde) anti-reflectie coating zou bijvoorbeeld 8% winst betekenen. De actieve lagen in het project halen zodoende een efficiëntie van boven de 60%, maar van het systeem als geheel is de waarde 47%. Echter is dit nog altijd een grote verbetering ten opzichte van bestaande, commerciële concepten die rond 27% halen.

Dit alles is de hoofreden om het project resultaat (volgens TKI classificatie) te duiden als: "Het project is naar tevredenheid afgerond, maar de inhoud van de mijlpalen is gewijzigd".

6 Kennisdeling

Omdat de meest aansprekende resultaten pas aan het einde van het project verkregen waren, was er weinig ruimte meer binnen het project voor kennisdeling. Desondanks heeft er op de volgende manieren kennisdeling plaatsgevonden:

- De external advisory board (EAB), waar kennis deling heeft plaats gevonden binnen relevante partijen in de sector. De groep bestond uit NBA Architecten (architectuur), de TU Eindhoven (academische instelling) en Emergo (prefab bouw).
- Interview met o.a. Jonathan van den Ham (TNO) door VV+ magazine (non-peer review) artikel

Verdere ontwikkeling van dit concept is nodig om tot de uiteindelijke toepassing te komen, waardoor de spin-off op dit moment beperkt is. Er zal actief ingezet worden om verdere ontwikkeling te realiseren.

Het openbare eindrapport is met beperkte oplage gratis te verkrijgen via TNO. Voor meer informatie over dit project, de betrokken technologie of beoogde toepassing kunt u contact opnemen met Jonathan van den Ham (TNO).

Het project is uitgevoerd met PPS-programmatoeslag subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat voor TKI Urban Energy, Topsector Energie. www.tki-urbanenergy.nl.

Referenties

- [1] Butt et al., Applied Energy 291 (2021) 11678
- [2] Butt et al., “Effect of static and dynamic surface properties in reducing the energy demand of residential dwellings” (2021)
- [3] Van den Ham et al., TNO 2021 R10069 “Technology screening – commercial thermo- and electro-switchable coating systems for adaptive facades” (2021)
- [4] Van den Ham et al., RSC Adv. (6), 51747 (2016)