

PRESTATIESIMULATIE VAN ADAPTIEVE GEVELS – SMART ENERGY GLASS ALS CASE-STUDY

Roel Loonen, Daniel Cóstola, Marija Trčka en Jan Hensen

Unit Building Physics and Systems, Technische Universiteit Eindhoven

Contact: r.c.g.m.loonen@tue.nl

ABSTRACT

In tegenstelling tot traditionele gevels bieden adaptieve gevels de mogelijkheid om slim in te spelen op veranderende binnen- en buitenomstandigheden. Het succesvol ontwerpen van adaptieve gevels blijkt echter een complexe opgave waardoor toepassing van dit beloftevolle concept in de praktijk vooralsnog beperkt is. Dit artikel gaat in op de rol die gebouwsimulatie kan spelen in het ontwerpproces van adaptieve façades en illustreert dit aan de hand van Smart Energy Glass. De modelvorming en simulatiestrategie worden beschreven, waarna de prestaties van het concept zijn beoordeeld op basis van integrale simulaties voor verwarming, koeling, daglicht en elektriciteit. Het artikel concludeert dat adaptieve gevels kunnen bijdragen aan het bereiken van de steeds scherpere energiedoelstellingen zonder daarbij te hoeven tornen aan comfortbeleving. Gebouwsimulatie vormt een belangrijke schakel voor het bereiken van dit doel.

INTRODUCTIE

Ons streven naar een zo veilig, gezond en comfortabel mogelijke gebouwde omgeving wordt gerechtvaardigd door het feit dat de meeste mensen tot 90% van hun tijd binnen doorbrengen [1]. Historisch gezien was het altijd de gebouwschil die ons beschermde tegen de grillen van het buitenklimaat. De opkomst van systemen voor verwarming, koeling, ventilatie en kunstlicht in de 20^e eeuw heeft er echter voor gezorgd dat deze belangrijke taak nu voor een groot deel overgenomen is door gebouwinstallaties. Hierdoor heeft de gebouwschil zijn rol als bemiddelaar tussen energie en comfort overgedragen, en is het nu min of meer geaccepteerd dat de gebouwde omgeving een van de hoofdverantwoordelijken is van de huidige milieu- en energieproblematiek.

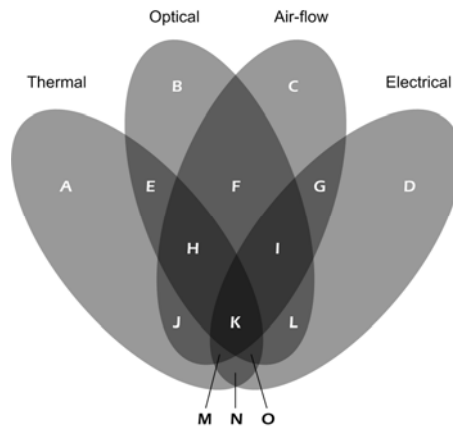
Gedreven door de aanhoudende vraag naar verduurzaming in de samenleving is het zinvol om onze visie op de rol van de gevel te herbeschouwen. De gevel is niet alleen van belang voor de aanblik, maar kan daarnaast worden uitgerust met een aantal functies die bepalend zijn voor energieconsumptie en de perceptie van het binnenklimaat. De meeste hedendaagse gevels zijn statisch, terwijl de klimatologische randcondities en gebruikersbehoeften voortdurend veranderen. Hierdoor heeft een reguliere gevel geen mogelijkheid om in te spelen op de veranderingen waaraan zij onderhevig is, wat resulteert in een gemiste kans voor zowel energiebesparing als verbetering van thermisch en visueel comfort.

Dit in tegenstelling tot adaptieve gevels, die op principieel andere wijze in contact staan met hun omgeving. Een adaptieve gevel heeft het vermogen om herhaaldelijk en omkeerbaar functies, eigenschappen of gedrag te veranderen, door te anticiperen op veranderende prestatie-eisen en wisselende randvoorwaarden. Dit kan leiden tot positieve bijdragen voor zowel energie als comfort. Toepassing van adaptieve gevels kan daardoor weer zorgen voor de terugtransformatie van een kunstmatig geproduceerd naar een selectief gecreëerd binnenklimaat.

ADAPTIEVE GEVELS IN HET GEBOUWONTWERP

Adaptieve gevels zijn ‘complexe systemen’ doordat ze bestaan uit verschillende intergerelateerde componenten die actief zijn in meerdere fysische domeinen (Figuur 1). Toepassing van adaptieve gevels verschuift bovendien de kern van het traditionele ontwerpproces: adaptieve gevels zijn per definitie dynamisch, wat noopt tot het ontwerp van een ‘proces’ in plaats van een ‘artefact’ [2]. Als gevolg van ontwikkelingen in materiaalkunde, en door algemene beschikbaarheid van sensoren en actuatoren, bestaat er tegenwoordig een breed scala aan technologische mogelijkheden om de gebouwschil adaptief te maken [3-5]. De toepassing in de praktijk blijft vooralsnog echter beperkt [6]. Alvorens algemene toepassing van adaptieve gevels plaats kan vinden, dienen er nog enkele obstakels te worden overwonnen. Sterker dan bij de conventionele gevel dient het ontwerp van adaptieve gevels rekening te houden met (1) onderhoud en slijtage, (2) interactie van een dynamische gevel met de mens, en (3) hoe de nieuwe technologie samenvloeit met de “conservatieve” bouwsector. Toevoeging van

adaptieve eigenschappen garandeert daarnaast niet direct ook succesvol gedrag van een gevel. Om de gewenste doelen te bereiken, dient de gevel verstandig en momentaan te kunnen reageren op veranderingen. Bovendien is teamwork vereist: de verschillende componenten in de gevel moeten samenwerken, met elkaar en met overige gebouwinstallaties, met als doel om synergie te bereiken door het voorkomen van conflicterend gedrag en het sluiten van verstandige compromissen.



Figuur 1: Iedere adaptieve gevel kan worden gekarakteriseerd door één van de vijftien overlappende vlakken.

De meeste van de genoemde belemmeringen en uitdagingen vinden hun oorsprong in een gebrek aan bewustzijn en fundamenteel inzicht in de prestaties van adaptieve gevels. Dit heeft geleid tot de vraag naar effectieve instrumenten voor ondersteuning van het ontwerpproces die voldoen aan de volgende voorwaarden:

- Kwantificeren van de effecten van adaptieve gevels op bouwprestaties;
- Inzichtelijk maken hoe voordelen tijdens exploitatie opwegen tegen mogelijk hogere investeringen;
- Meer duidelijkheid bieden aangaande de onzekerheid en mogelijke risico's.

Voor succesvol ontwerp van adaptieve gevels is het niet langer afdoende om enkel te vertrouwen op ervaring, intuïtie en andere traditionele methoden zoals analytische berekeningen, empirische relaties, nomogrammen en selectieschema's. Door gebruik te maken van gebouwsimulatie kan voorspeld worden wanneer, hoe en waarom een gebouw energie verbruikt bij verschillende regelstrategieën. Gebouwsimulatie legt verbanden tussen de dynamica van het gebouw en installaties, de buitenomgeving en het gedrag van mensen; en kan daardoor gebruikt worden voor het voorspellen van bouwprestaties bij toepassing van adaptieve gevels.

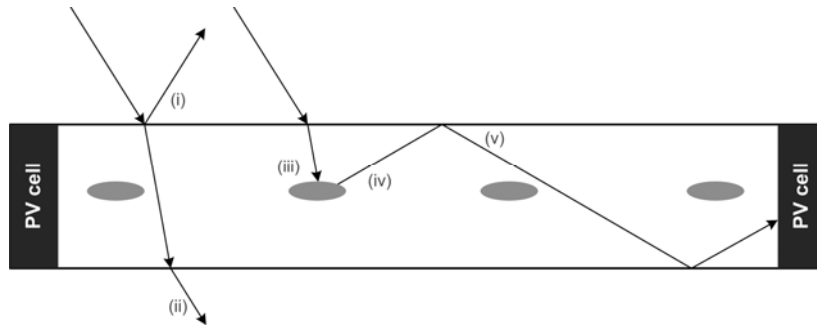
De meeste state-of-the-art simulatietools hebben een geschiedenis van geleidelijke ontwikkeling en uitbreiding van functionaliteiten. Ten tijde van het ontstaan van deze tools werden ontwikkelaars niet aangezet tot het opnemen van adaptief gedrag in de gebouwschilmodellen. Deze nalatenschap is nu de reden dat het in de meeste tools ontbreekt aan mogelijkheden voor prestatiesimulatie van adaptieve gevels. In tegenstelling tot de dynamiek van randvoorwaarden zijn de eigenschappen van de gevel geprogrammeerd als constante parameters die niet veranderen gedurende de simulatie [7]. Desalniettemin zijn er toch een aantal opties voor het modelleren van adaptief gedrag die hun weg gevonden hebben in de tools. Voor een overzicht wordt verwezen naar [8].

MODELLEREN EN SIMULEREN VAN SMART ENERGY GLASS

Dit artikel verkent de potentiële rol die gebouwsimulatie kan spelen in het ontwerp van gebouwen met adaptieve gevels door het beschouwen van de case-study smart energy glass (SEG). Het werkingsprincipe van SEG is gebaseerd op een polymere coating, geplaatst tussen twee lagen glas, die samen de buitenste laag van een dubbele beglazing vormen. De optische eigenschappen van het glas kunnen adaptief gewijzigd worden door het aanbrengen van een elektrische spanning. SEG kan geschakeld worden in die standen: donker, licht en translucient. De coating in SEG werkt daarnaast als 'planar waveguide' op dezelfde wijze als in een luminescent solar concentrator (LSC) [9]. Speciale moleculen in de coating absorberen een deel van het zonlicht en emitteren fotonen in random richting. Het mechanisme zorgt ervoor dat een deel van het licht wordt afgevangen en getransporteerd naar de zijkanten van het glas, waar het door zonnecellen wordt omgezet in elektriciteit. Dit maakt SEG tot een autonoom 'product'; doordat externe bedrading niet noodzakelijk is, is de technologie uitermate geschikt voor renovatieprojecten [10]. SEG is nog geen marktrijp product, maar bevindt zich momenteel in de onderzoeks- en ontwikkelingsfase, met aandacht voor optimalisatie van: absorptie en emissie spectra, thermische prestaties van het glas, optische verliezen, elektrische circuits, stabiliteit van de coating etc. Het werk beschreven in dit artikel draagt bij aan dit innovatieproces door het bieden van computationele ondersteuning.

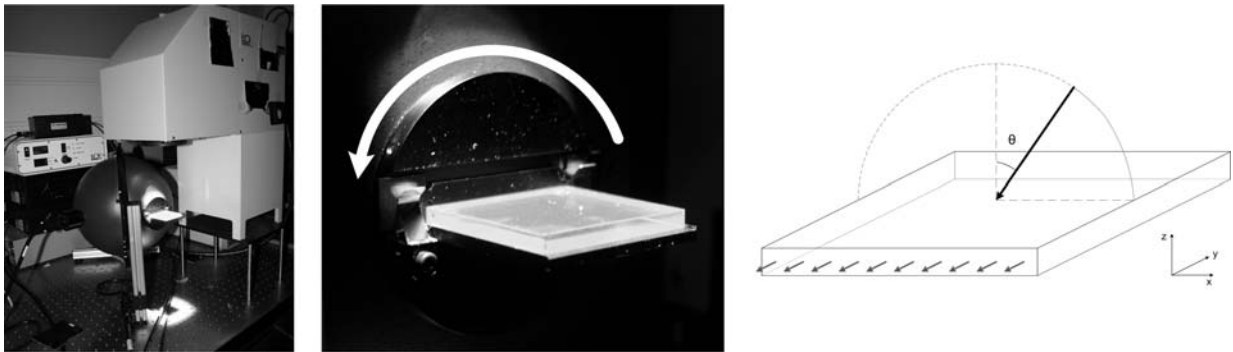
Elektrisch model

SEG laat zich in meest elementaire vorm beschrijven als een LSC met veranderbare optische eigenschappen. De werking van LSC's berust op twee principes: (a) collectie en concentratie van fotonen, en (b) conversie van fotonen in elektriciteit (Figuur 2).



Figuur 2: Schematische weergave van de fysische verschijnselen in SEG, met (i) reflectie, (ii) transmissie, (iii) absorptie, (iv) re-emissie, en (v) interne reflectie.

Wetenschappelijke literatuur op het gebied van LSC's omvat enkele methoden voor het modelleren van elektrische output (e.g. [11-14]). Deze modellen richten zich met name op het berekenen van fotonpaden en het onderzoeken van verliesmechanismen, en zijn daardoor te gedetailleerd voor het voorspellen van gebouwprestaties. In dit onderzoek is het elektrische gedrag van SEG op een hoger abstractieniveau gemodelleerd dat beter past bij de doelstellingen. Een serie experimenten is opgezet voor het verkrijgen van de benodigde kennis, waarbij de nadruk lag op het bepalen van de hoekafhankelijkheid op de opbrengst.



Figuur 3: (a) overzicht van de opstelling, (b) close-up van het sample, (c) schematische weergave.

De experimenten zijn uitgevoerd door een SEG sample (5 x 5 cm) zonder PV cellen te belichten met een zonnesimulator. De geëmitteerde output komende uit een rand is gemeten in een integrerende bol, om op deze manier de spectrale intensiteit te bepalen. De invalshoek van het licht is veranderbaar in de richting van de witte pijl in Figuur 3. Resultaten van deze experimenten hebben geleid tot een uitdrukking voor elektrische output in de vorm van Vergelijking (1),

$$P_{el} = P_{opt} \times h_{pv} = 4 \times I_{tot} \times A_f \times \cos(q) \times K_q \times h_{opt,\wedge} \times h_{pv} \tag{1}$$

waarin P_{el} is elektrische output [W], P_{opt} is optische output aan één zijde [W], h_{pv} is fotovoltaïsch rendement [-], I_{tot} is zoninstraling [W/m^2], A_f is frontoppervlak van het glas [m^2] and q is zoninstralingshoek [$^\circ$].

Vergelijking (1) introduceert daarnaast K_q and $h_{opt,\wedge}$. De correctiefactor (K_q) is een empirisch verkregen relatie, en karakteristieke eigenschap van SEG, die de afname van output als functie van de hoek met de zon beschrijft. De loodrechte component van het optische omzettingsrendement ($h_{opt,\wedge}$) is verschillend voor elke stand van het raam, maar onafhankelijk van zowel intensiteit als hoek van zoninstraling.

Thermisch en optisch model

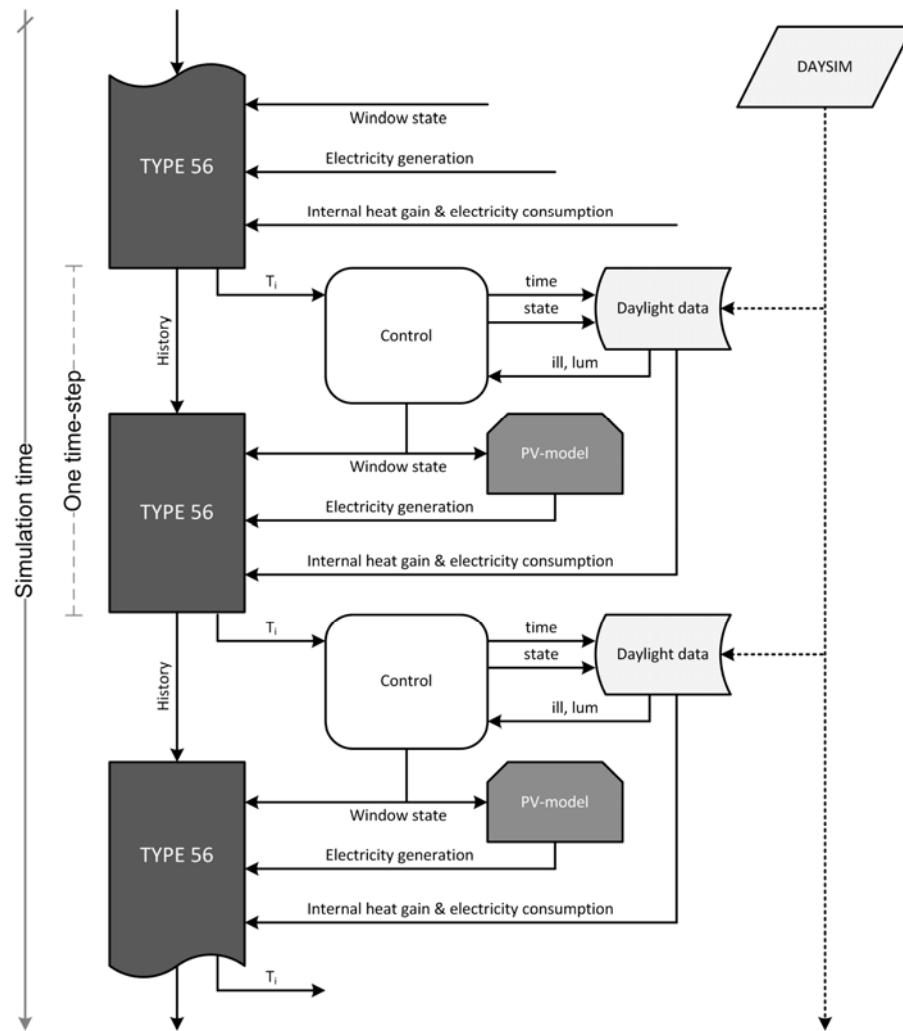
De glaseigenschappen van SEG zijn veranderbaar door wijziging van globale oriëntatie van de moleculen in de coating. Karakterisering van deze eigenschappen is analoog aan die van normaal glas en vindt plaats in een standaardopstelling met integrerende bol en spectrofotometer, in overeenstemming met NEN-EN-ISO 9050

[15]. De thermische en optische eigenschappen van SEG die benodigd zijn voor de simulaties zijn vervolgens verkregen met behulp van software van Lawrence Berkeley National Laboratory [16]. Het programma leest de data in als 'laminare interlayer construction' en berekent vervolgens wat de optische eigenschappen van de coating zijn. De software doet daarna dienst als 'virtueel glas laboratorium', doordat de coating naar believen geplaatst kan worden tussen elke type glas uit de uitgebreide database.

Simulatie strategie

Op basis van de systeembeschrijving kan SEG worden ingedeeld in vlak *O* in Figuur 1. Deze voorwaarde vereist een gelijktijdige analyse van de drie aspecten waardoor een combinatie van stand-alone applicaties voor elk van de domeinen afzonderlijk niet mogelijk is. TRNSYS TYPE 56 biedt de mogelijkheid om glaseigenschappen te wijzigen gedurende de simulatie en voorziet ook in componenten voor het modelleren van elektriciteits-opwekking. TRNSYS [17] kent echter geen daglichtmodule en wordt om deze reden gekoppeld met de resultaten van daglichtsimulaties uit DAYSIM [18].

Figuur 5 geeft een schematische weergave van de strategie die gebruikt is bij het simuleren van de prestaties van SEG. Allereerst zijn afzonderlijk voor iedere stand van het raam daglichtsimulaties uitgevoerd in een preprocessing stap. TRNSYS leest vervolgens deze data in, en selecteert tijdens de simulatie de juiste gegevens horende bij de toegepaste regelstrategie. Deze ontkoppelde aanpak wordt gerechtvaardigd door de korte tijdconstante van daglicht waarbij traagheidseffecten geen rol spelen.



Figuur 4: Simulatie strategie voor het SEG model.

De 'Control' component speelt een belangrijke rol in de simulatiestrategie. Ruwe uitvoer van DAYSIM wordt eerst bewerkt in een spreadsheet programma en daarna geïmporteerd in TRNSYS via data readers in expert modus. De regelstrategie is vervolgens geïmplementeerd via equation-types die op basis van booleaanse uitdrukkingen simulatie-uitvoer (bijvoorbeeld temperatuur of verlichtingssterkte) vergelijken met setpoints, en

de stand van het raam (window ID) in de volgende tijdstap als output geven. Deze stand van het raam dient vervolgens als input voor de berekeningen van het thermische gebouwmodel (TYPE 56) en het elektrische model, dat is gemodelleerd met behulp van equations (voor collectie en concentratie van fotonen) en PV-type 180 voor de omzetting naar elektriciteit.

De hoeveelheid kunstlicht, en dus interne warmtelast is afhankelijk van de stand van het raam, en wordt daarom adaptief ingelezen vanuit DAYSIM. Dit geldt ook voor de aanwezigheid van personen die wordt bepaald middels het stochastische gebruikersmodel van DAYSIM

VALIDATIE

Tot op heden zijn de eigenschappen en prestaties van SEG enkel getest als kleine samples, onder geconditioneerde laboratoriumomstandigheden. Voor het verkrijgen van het benodigde vertrouwen in de uitkomsten van het model is daarom een empirische validatie studie opgezet. Hiertoe is een prototype SEG (35 x 40 cm) geïnstalleerd in de testgevel van de faculteit bouwkunde (Figuur 5).



Figuur 5: Impressie van de experimentele set-up van de validatie studie.

Op basis van de vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde waarden kan worden geconcludeerd dat de voorspellingen van het model voldoende betrouwbaar zijn binnen de grenzen en doelstellingen van de huidige studie. Voor meer details en informatie wordt verwezen naar [8].

OPZET VAN DE CASE-STUDY

In de in dit artikel gepresenteerde simulaties is gekeken naar de toepasbaarheid van SEG in een renovatieproject in Nederland. De analyse gaat uit van een tweepersoons standaard kantoorvertrek georiënteerd op het zuiden dat is gemodelleerd volgens SenterNovem referentiekantoorgebouw [19]. Om gepaste vergelijkingen te maken is uitgegaan van een referentiecasse die representatief is voor het jaar 1975 [20]. Dit komt tot uiting in o.a. standaard dubbele beglazing en een Rc-waarde 0,67 m²K/W. Zon- en helderheidsvering vindt plaats door middel van verticale lamellen aan de binnenzijde die geregeld worden via het *Active users* profiel in DAYSIM [21].

Prestatie indicatoren

Het energiebesparingspotentieel van SEG is beoordeeld door te kijken naar de totale jaarlijkse energievraag. Onderscheid is hierin gemaakt tussen de posten verwarming, koeling en verlichting, en ook is gekeken naar de waarde van de piekbelasting. Thermisch comfort is beoordeeld door te kijken naar het gevaar op oververhitting. Het aantal uren dat de grens van 25°C overschreden wordt geldt hierbij als indicator. Visueel comfort ten slotte is beoordeeld door te kijken naar het risico op verblinding. Hierbij is het aantal keren per jaar geteld dat de verhouding tussen de luminantie van het raam en de luminantie van het werkvlak groter is dan 10:1 [22].

Regelstrategie

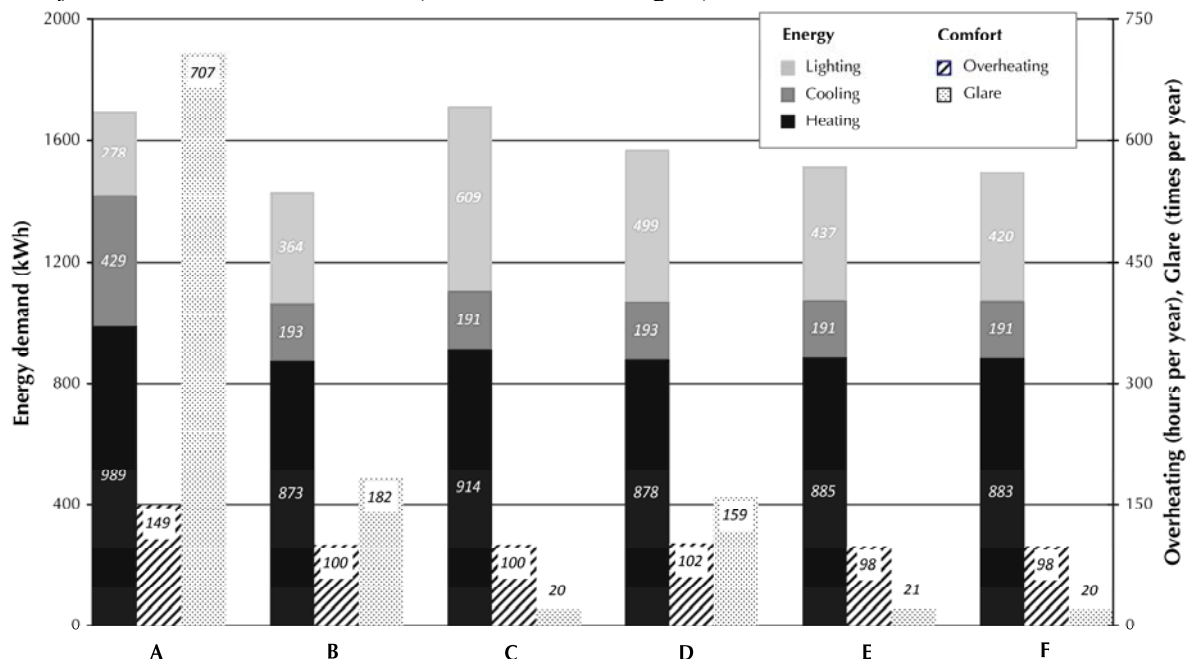
Het adaptieve gedrag van SEG kan op vele manieren geregeld worden. De focus in dit onderzoek ligt op het verkennen van de mogelijkheden en het verkrijgen van inzicht in de oorzaak-gevolg relaties van de verschillende opties. Het doel hierbij is niet om op zoek te gaan naar de best mogelijke optie, noch beperkt te zijn door praktische implementatieaspecten. Tabel 1 geeft een overzicht van de bestudeerde strategieën.

Tabel 1: Overzicht van de zes onderzochte cases

A	Referentiecasi
B	SEG continu in lichte stand
C	SEG continu in donkere stand
D	SEG in donkere stand als binnentemperatuur (T_i) ≥ 21 °C
E	SEG in donkere stand als verlichtingssterkte van daglicht op het werkvlak (E_h) ≥ 700 lx
F	SEG in donkere stand als luminantie in raamvlak (L_v) ≥ 1500 cd/m ²

RESULTATEN

Figuur 6 geeft de jaarlijkse energievraag en comfortprestaties voor elk van de 6 strategieën in Tabel 1. De resultaten laten zien dat energievraag voor koeling na vervanging met SEG gereduceerd wordt met meer dan een factor twee. Daarnaast blijkt de geïnstalleerde koelcapaciteit met 30 % verkleind te kunnen worden zonder daarbij thermisch comfort aan te tasten (niet zichtbaar in de figuur).



Figuur 6: Vergelijking tussen prestaties op het gebied van energie en comfort voor de referentie (A) en SEG (B tot F) in een renovatieproject. Met op de linker-as: energievraag voor verwarming, koeling en kunstlicht [kWh], en op de rechter-as: risico van oververhitting (uren) en verblinding (keren).

Figuur 6 laat daarnaast zien dat energievraag voor verwarming in de referentiecasi gelijkwaardig is aan die voor SEG, ondanks dat de U-waarde bij SEG lager is als gevolg van een low-E coating. Nadere inspectie van de energiebalans laat zien dat transmissieverliezen na renovatie inderdaad lager zijn, maar dat dit verschil nagenoeg gecompenseerd wordt door de vermindering in passieve zonnewinst. De relatief lage transmissie in het zichtbare spectrum draagt bij aan een toename van de elektriciteitsvraag voor kunstlicht.

De grootste voordelen bij de toepassing van SEG zijn te behalen op het gebied van visueel comfort. Hierbij blijkt dat een regelstrategie die schakelt op basis van daglichtcondities (case E of case F) tot de meest gunstige prestaties leidt.

DISCUSSIE

Deze studie is de eerste die een poging doet de kloof te dichten tussen fundamenteel onderzoek in LSC's, en toepassing ervan in de gebouwde omgeving. Gevolg hiervan is dat uitkomsten van een experimentele validatie studie nodig bleken om betrouwbaarheid van resultaten te waarborgen. Er dient te worden opgemerkt dat zulke voorzieningen doorgaans niet beschikbaar, en inspanningen niet te rechtvaardigen zijn in de dagelijkse advies- en ontwerppraktijk.

Op basis van de gepresenteerde simulaties is het nog niet mogelijk om een sluitend oordeel te vellen over het energiebesparingspotentieel van SEG. Een meer uitgebreide parametrische studie is vereist om een algemeen geldend beeld van de prestaties te verkrijgen. Het concept lijkt echter veelbelovend doordat energiebesparing haalbaar is en tegelijkertijd de kwaliteit van het binnenklimaat toeneemt. De resultaten laten ook zien dat er nog wel ruimte voor verbetering bestaat in vergelijking tot andere recente studies met schakelbaar glas (e.g.[23-26]). De verschillen kunnen als volgt worden verklaard:

- De vergelijkbare studies zijn gebaseerd op enkel thermische of lichttechnische prestaties terwijl deze studie beide aspecten integraal analyseert. Hierdoor wordt de wisselwerking daadwerkelijk meegenomen in de afwegingen waardoor de tendens naar oplossingen die in onbalans zijn verdwijnt.
- Het schakelen bij SEG vindt met name plaats in het zichtbare golflengte gebied. Het weren van zoninstraling gaat hierdoor vaak gepaard met een proportionele toename van energie voor kunstlicht. De resultante is dat warmtelast van de zon wordt vervangen door interne warmte waardoor een deel van de energiebesparing verdwijnt. De LSC technologie maakt het echter mogelijk om de schakelbare range te verschuiven naar het infrarode gebied. Onderzoeksinspanningen zijn gaande om dit gunstigere gedrag te bewerkstelligen.
- De schakelbare bandbreedte (verschil tussen lichte en donkere stand) van SEG is relatief klein vergeleken met ander schakelbaar glas. Daarnaast schakelt SEG slechts in één van drie standen, zonder de mogelijkheid van geleidelijke transitie's.

Uiteindelijk spelen meer aspecten dan enkel energie een rol in de overwegingen bij de toepassing van SEG. Een van de voordelen van SEG is het feit dat zonwering niet langer noodzakelijk is. Dit verzekert de mogelijkheid tot uitzicht, vermindert onderhoudskosten en zorgt voor betere benutting van de gunstige psychologische en fysiologische aspecten van daglicht.

SEG bevindt zich momenteel midden in het traject van onderzoek en ontwikkeling. Verdere inspanningen zijn noodzakelijk in het streven naar optimalisatie van de productspecificaties. Het hier gepresenteerde model kan dienen als startpunt voor vervolgonderzoek naar welke glaseigenschappen en regelstrategie uiteindelijk resulteren in de optimale balans tussen comfortbeleving en totale energievraag voor verwarming, koeling en verlichting.

CONCLUSIES

Ondanks de veelbelovende vooruitzichten van adaptieve gevels blijft toepassing in de praktijk vooralsnog beperkt. Omdat het ontwerpen van adaptieve gevels een complexe opgave blijkt, zijn opdrachtgevers vaak nog terughoudend met het nemen van het risico. Dit heeft echter tot gevolg dat ook de potentiële kansen onbenut blijven.

Gebouwsimulatie biedt de mogelijkheid tot het verschaffen van inzichten in de systeemdynamica van adaptieve gevels, en maakt het ook mogelijk de integrale effecten van verschillende operationele strategieën op gebouwprestaties te voorspellen. Gebruik van gebouwsimulatie kan daarom bijdragen aan het nemen van goed onderbouwde ontwerpbeslissingen. Op deze manier kunnen simulaties dienen als katalysator die de verdere ontwikkeling van adaptieve gevels bevordert om zo optimaal te profiteren van de geboden voordelen op het gebied van comfort en energie.

De aanname dat gebouwsimulatie een waardevol gereedschap is voor ontwerp van adaptieve gevels is bevestigd in de case-study van SEG. De traditionele rol van simulatie als ondersteuning in het ontwerpproces is hierbij bevestigd. Daarnaast heeft gebouwsimulatie ook bewezen waardevol te zijn als actief gereedschap in innovatie en productontwikkeling.

REFERENTIES

- [1] Bougdah, H. and Sharples, S. (2010). *Environment, Technology and Sustainability*. London & New York: Taylor & Francis.
- [2] Moloney, J. (2007). A Framework for the Design of Kinetic Façades. In Proceedings of Computer-Aided Architectural Design Futures 2007, pages 461–474, Sydney, Australia.
- [3] Klooster, T. (2009). *Smart Surfaces - and their Application in Architecture and Design*. Basel: Birkhäuser.
- [4] Ritter, A. (2007). *Smart materials in architecture, interior architecture and design*. Basel: Birkhäuser.
- [5] Schumacher, M., Schaeffer, O. and Vogt, M. (2010), *Move: architecture in motion - dynamic components and elements*, Basel: Birkhäuser.
- [6] Loonen, R. (2010a) *Overview of 100 Climate Adaptive Building Shells*, part of MSc-Thesis: ‘Climate Adaptive Building Shells – What can we simulate?’, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- [7] Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., and Griffith, B. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661-673.
- [8] Loonen, R. (2010b) *Climate Adaptive Building Shells – What can we simulate?*, MSc-Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- [9] Goetzberger, A. and Greube, W. (1977). *Solar energy conversion with fluorescent collectors*. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 14(2):123–139.
- [10] Benson, D. and Branz, H. (1995). Design goals and challenges for a photovoltaic-powered electrochromic window covering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 39(2-4):203–211.
- [11] Chatten, A., Barnham, K., Buxton, B., Ekins-Daukes, N., and Malik, M. (2003). A new approach to modelling quantum dot concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75(3-4):363–371.
- [12] Schüler, A., Kostro, A., Galande, C., Valle del Olmo, M., de Chambrier, E., and Huriet, B. (2007). Principles of Monte-Carlo Ray-Tracing Simulations of Quantum Dot Solar Concentrators. In Proceedings of ISES World Congress 2007, pages 1033–1037, Beijing, China.
- [13] van Sark, W., Barnham, K., Slooff, L., e.a. (2008). Luminescent Solar Concentrators – a review of recent results. *Optics Express*, 16(26):21773–21792.
- [14] Goldschmidt, J. (2009). *Novel Solar Cell Concepts*. PhD thesis, Universität Konstanz, Germany.
- [15] ISO 9050 (2003) Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
- [16] LBNL (2010). Window & Daylighting software tools. Web: <http://windows.lbl.gov/software/default.htm>
- [17] TRNSYS (2010) TRNSYS - A TRaNsient SYstems Simulation program. Web: <http://sel.me.wisc.edu>
- [18] DAYSIM (2010) DAYSIM – Dynamic Daylight Simulations. Web: <http://www.daysim.com>
- [19] SenterNovem (2009). EP Varianten Utiliteitsgebouwen. Report: DV1.3.189
- [20] Petersdorff, C., Boermans, T., and Harnisch, J. (2006). Mitigation of CO2 Emissions from the EU-15 Building Stock. Beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. *Environmental Science and Pollution Research*, 13(15):350–358.
- [21] Reinhart, C. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77(1):15–28.
- [22] IESNA (2000). *Illuminating Engineering Society of North America Lighting Handbook*. New York.
- [23] Lee, E. and Tavit, A. (2007). Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. *Building and Environment*, 42(6):2439–2449.
- [24] Piccolo, A. (2010). Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell. *Energy and Buildings*, 42(9):1409–1417
- [25] Mardaljevic, J. and Nabil, A. (2008). Electrochromic glazing and facade photovoltaic panels: a strategic assessment of the potential energy benefits. *Lighting Research and Technology*, 40(1):55–76.
- [26] Jonsson, A. and Roos, A. (2010). Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations. *Solar Energy*, 84(1):1–9.