

Prestatiesimulatie van adaptieve gevels

Adaptieve gevels bieden de mogelijkheid om slim in te spelen op veranderende binnen- en buitenomstandigheden. Dit in tegenstelling tot traditionele gevels. Maar toepassing in de praktijk blijft vooralsnog beperkt, ondanks het beloftevolle concept. 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 conclusie is dat adaptieve gevels kunnen bijdragen aan het bereiken van de steeds scherpere energiedoelstellingen, zonder te hoeven tornen aan comfortbeleving. Gebouwsimulatie vormt daarbij een belangrijke schakel.

Ir. R.C.G.M. (Roel) Loonen, dr.dipl-ing. M. (Marija) Trčka, D. (Daniel) Cóstola, MSc. en prof.dr.ir. J.L.M. (Jan) Hensen, Unit Building Physics and Systems, Technische Universiteit Eindhoven

■ INTRODUCTIE

Historisch gezien is het altijd de gebouwschil geweest die ons beschermt tegen de grillen van het buitenklimaat. Maar de opkomst van systemen voor verwarming, koeling, ventilatie en kunstlicht in de twintigste eeuw heeft ervoor gezorgd dat deze belangrijke taak nu voor een groot deel is overgenomen door gebouwinstallaties. Hierdoor heeft de gebouwschil zijn rol als 'bemiddelaar' tussen energie en comfort overgedragen. Het is nu min of meer geaccepteerd dat de gebouwde omgeving één van de hoofdverantwoordelijken is van de huidige milieu- en energieproblematiek.

Geïnspireerd door de natuur om ons heen en gedreven door de aanhoudende vraag naar verduurzaming in de samenleving, is het zinvol om onze visie op de rol van de gevel opnieuw te beschouwen. De gevel is niet alleen van belang voor het aanzicht maar kan ook een aantal functies krijgen 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. Het gevolg is dat een reguliere gevel geen mogelijkheid heeft om in te spelen op de veranderingen waaraan zij onderhevig is. Dit is een gemiste kans om zowel energie te besparen als het binnenklimaat te verbeteren. Adaptieve gevels daarentegen, staan op principiële andere wijze in contact met hun omgeving. Een dergelijke gevel heeft het vermogen om herhaaldelijk en omkeerbaar functies, eigenschappen of gedrag te veranderen. Dit gebeurt door te anticiperen op veranderende prestatie-eisen en wisselende randvoorwaarden. Mits adequaat ontworpen en geregeld kan dit leiden tot positieve bijdragen voor zowel energie als comfort. Toepassing van adaptieve gevels biedt de gelegenheid om terug te keren van een kunstmatig geproduceerd naar een selectief gecreëerd binnenmilieu.

■ HET GEBOUWONTWERP

Er bestaat tegenwoordig een breed scala aan technologische mogelijkheden om de

gebouwschil adaptief te maken, dankzij ontwikkelingen in materiaalkunde en door algemene beschikbaarheid van sensoren en actuatoren [1,2]. De toepassing in de praktijk blijft vooralsnog beperkt [3]. Voordat de toepassing van adaptieve gevels op grote schaal kan plaatsvinden, zijn er enkele obstakels die overwonnen moeten worden. Sterker dan bij de conventionele gevel dient het ontwerp van adaptieve gevels rekening te houden met: (1) invloed van onderhoud en slijtage, (2) interactie van een dynamische gevel met de mens, en (3) de manier waarop de nieuwe technologie samenvloeit met de 'conservatieve' bouwsector. Het toevoegen van adaptieve eigenschappen is ook niet direct een garantie voor succesvol gedrag van de gevel. Om de gewenste doelen te bereiken dient de gevel verstandig en momentaan te kunnen reageren op veranderende omstandigheden. Bovendien is teamwork vereist: de verschillende componenten in de gevel moeten samenwerken; met elkaar en met overige gebouwinstallaties. Het doel hiervan is synergie te bereiken door het

voorkomen van conflicterend gedrag en het sluiten van verstandige compromissen. De meeste van de genoemde belemmeringen en uitdagingen vinden hun oorsprong in een gebrek aan bewustzijn en goed onderbouwd inzicht in de prestaties van adaptieve gevels. Dit heeft geleid tot de vraag naar effectieve instrumenten voor ondersteuning van het ontwerpproces. Deze instrumenten moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

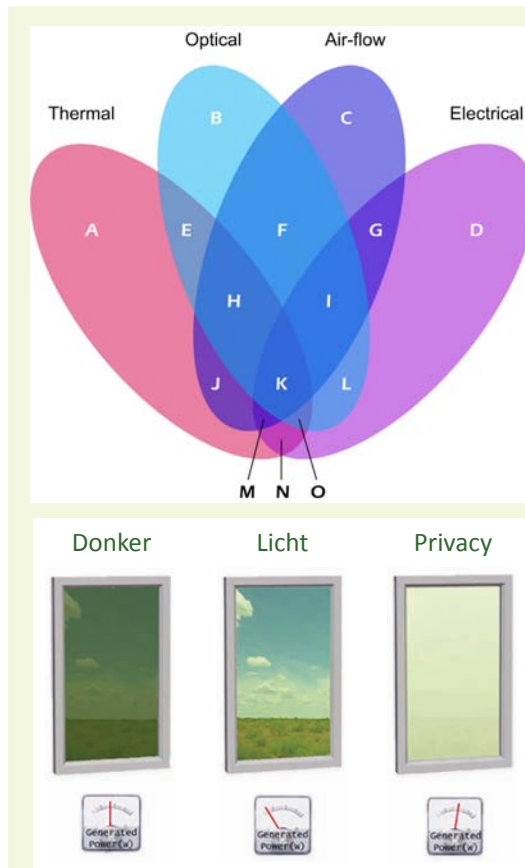
- kwantificeren van de dynamische effecten van adaptieve gevels op bouwprestaties;
- inzichtelijk maken hoe voordelen tijdens exploitatie opwegen tegen mogelijk hogere investeringen;
- meer duidelijkheid bieden over de onzekerheid en mogelijke risico's.

Voor een 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 gebruikt bij verschillende regelstrategieën. Gebouwsimulatie legt verbanden tussen de dynamica van het gebouw en installaties. Maar ook tussen de buitenomgeving en het gedrag van mensen. Daardoor kan gebouwsimulatie gebruikt worden voor het voorspellen van bouwprestaties bij toepassing van adaptieve gevels.

De meeste hedendaagse 'simulatie tools' 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 gebouw-schildmodellen. 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 [4]. Toch is er een aantal opties voor het modelleren van adaptief gedrag, dat zijn weg gevonden heeft in de tools. Voor een overzicht wordt verwezen naar [5]. Bovendien spreidt het gedrag van adaptieve gevels zich in de meeste gevallen uit over meerdere fysieke domeinen (figuur 1). Dit vraagt veelal om een integrale benadering, waarbij het gebruik van monodisciplinaire simulatie tools niet voldoet.

SMART ENERGY GLASS

Dit artikel verkent de potentiële rol die gebouwsimulatie kan spelen in het ontwerp



-Figuur 1- Iedere adaptieve gevel kan worden gekarakteriseerd door één van de vijftien overlappende vlakken [3]

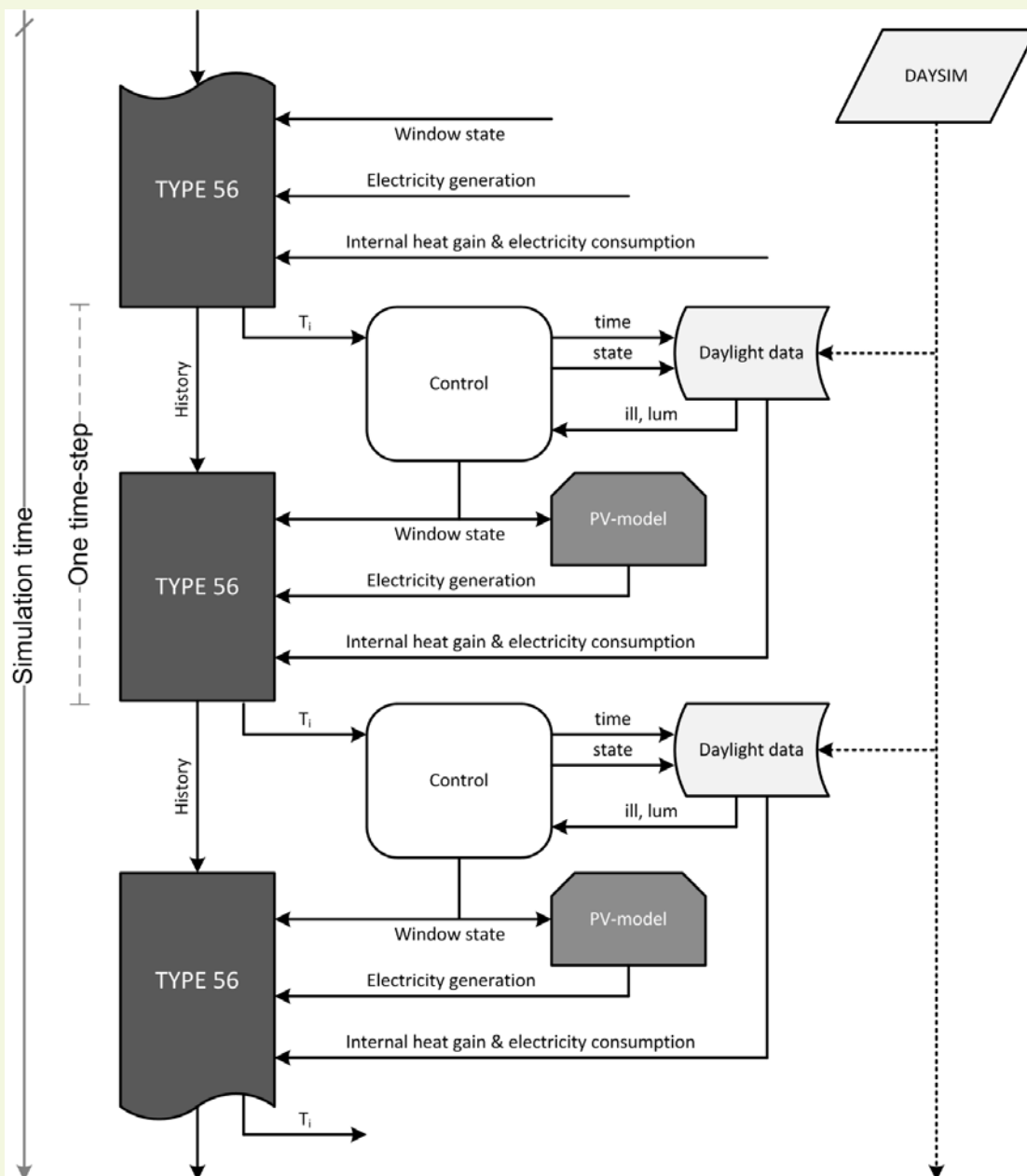
-Figuur 2- Smart Energy Glass

van gebouwen met adaptieve gevels door het beschouwen van de casestudy smart energy glass (SEG). SEG is een innovatief type beglazing dat momenteel ontwikkeld wordt door een spin-off bedrijf van de TU Eindhoven (www.peerplus.nl). 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 drie standen: donker, licht en translucent (figuur 2). De coating in SEG werkt daarnaast als zonnepaneel. Het mechanisme zorgt ervoor dat een deel van het inkomend licht wordt afgevangen en getransporteerd naar de zijkanten van het glas. Daar wordt het door zonnecellen omgezet in elektriciteit, op dezelfde wijze als in een luminescent solar concentrator (LSC) [6]. Dit maakt SEG tot een autonoom 'product'; doordat externe bedrading niet noodzakelijk is, is de technologie uitermate geschikt voor renovatieprojecten [7]. SEG is nog geen marktrijp product, maar bevindt zich momenteel in de onderzoeks- en ontwikkelingsfase. Het eerste pilotproject is

onlangs afgerond. Daarnaast is er aandacht voor optimalisatie van: absorptie- en emissiespectra, thermische prestaties van het glas, optische verliezen, elektrische circuits, stabiliteit van de coating etc. Het werk dat in dit artikel wordt beschreven draagt bij aan dit innovatieproces, door het bieden van computationele ondersteuning, en is uitgevoerd met experimentele productsamples.

SIMULATIESTRATEGIE

Op basis van de systeembeschrijving kan SEG worden ingedeeld in vlak O van figuur 1. Deze voorwaarde vereist een gelijktijdige analyse van de drie aspecten. Hierdoor is een combinatie van 'stand alone'-applicaties voor elk van de domeinen afzonderlijk niet mogelijk. Trnsys Type 56 biedt de mogelijkheid om gedurende de simulatie glaseigenschappen te wijzigen en voorziet in componenten voor het modelleren van elektriciteitsopwekking. Trnsys kent echter geen daglichtmodule en wordt om deze reden gekoppeld aan de resultaten van daglichtsimulaties uit Daysim. De thermische en optische eigenschappen van SEG die benodigd zijn voor de simulaties, zijn na uitvoering van laboratoriumproeven verkregen met behulp van de Window- en Optics-software, ontwikkeld door



-Figuur 3- Simulatie strategie voor het SEG model

Lawrence Berkeley National Laboratory.

Figuur 3 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 die horen bij de toegepaste regelstrategie. Deze ontkoppelde aanpak wordt gerechtvaardigd door de instantane schakelbaarheid van SEG en de korte tijdconstante van daglicht waarbij traagheidseffecten geen rol spelen. De 'Control'-component speelt een belangrijke rol in de simulatiestrategie. Ruwe uitvoer van Daysim wordt eerst bewerkt in een spreadsheetprogramma en daarna geïmporteerd in Trnsys via datareaders in expertmodus. De regelstrategie is vervolgens geïmplementeerd via equation-types. Die vergelijken op basis van booleaanse uitdrukkingen simulatie-uitvoer

(bijvoorbeeld temperatuur of verlichtingssterkte) met setpoints en geven de stand van het raam (window ID) in de volgende tijdstap als output. 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 door middel van het stochastische gebruikersmodel van Daysim.

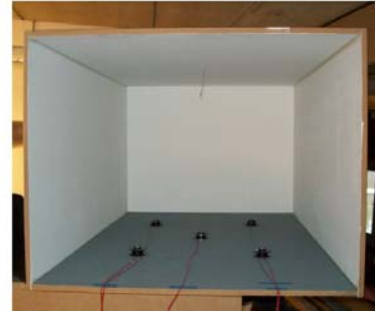
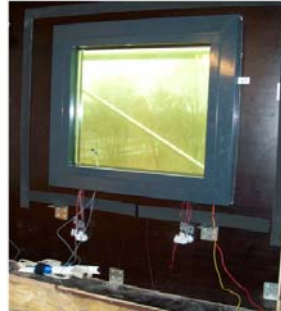
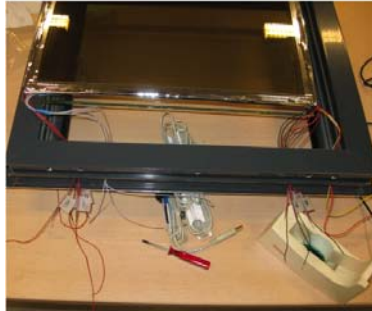
VALIDATIE

Tot op heden zijn de eigenschappen en prestaties van SEG enkel getest als kleine 'samples', onder geconditioneerde laboratoriumom-

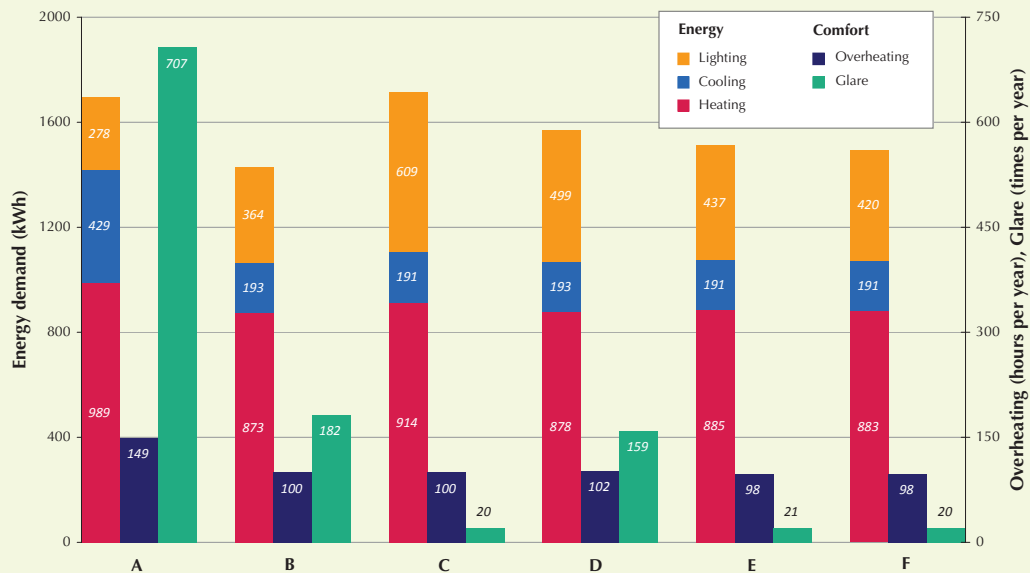
standigheden. Voor het verkrijgen van het benodigde vertrouwen in de uitkomsten van het model is daarom een empirische validatiestudie opgezet. Hiertoe is een prototype SEG (35 x 40 cm) geïnstalleerd in de testgevel van de faculteit bouwkunde van de TU Eindhoven. Op basis van de vergelijking tussen gemeten 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 [5].

OPZET CASESTUDY

In de hier 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 met een glaspercentage van 30%. Om gepaste vergelijkingen te maken is uitgegaan van een



-Figuur 4- Impressie van de experimentele opzet van de validatiestudie



-Figuur 5- Vergelijking tussen prestaties op het gebied van energie en comfort voor de referentie (A) en SEG (B tot F) in een renovatieproject; op de linkeras: energievraag voor verwarming, koeling en kunstlicht (kWh); op de rechteras: risico van oververhitting (uren) en verblinding (keren)

referentiecasi die representatief is voor het jaar 1975 [8]. Dit komt tot uiting in o.a. standaard dubbele beglazing en een Rc-waarde van 0,67 m².K/W. Zon- en helderheidswering vindt plaats door middel van verticale lamellen aan de binnenzijde, die geregeld worden via het Active users profiel in Daysim.

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. Ook is gekeken naar de waarde van de piekbelasting. Thermisch comfort is beoordeeld door te kijken naar het risico op temperatuuroverschrijding. 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 de kans op verblinding. Hierbij is het aantal keren per jaar geteld dat de verhou-

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

-Tabel 1- Overzicht van de zes onderzochte cases

ding tussen de luminantie van het raam en de luminantie van het werkvlak groter is dan 10:1 zoals aanbevolen door lesna.

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 en ook niet om beperkt te worden door praktische implementatie-aspecten. Tabel 1 geeft een overzicht van de bestudeerde strategieën.

RESULTATEN

In figuur 5 zijn de jaarlijkse energievraag en comfortprestaties voor elk van de zes strategieën in tabel 1 weergegeven. 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 het thermisch comfort aan te tasten (niet zichtbaar in de figuur).

Figuur 5 laat bovendien zien dat energievraag voor verwarming in de referentiecasse gelijkwaardig is aan die voor SEG. Dit 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 van passieve zonnwinst. 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 de toepassing ervan in de gebouwde omgeving. Gevolg hiervan is dat uitkomsten van een experimentele validatiestudie nodig bleken om de 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 ontwerp praktijk.

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. [9,10]). 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 dit experimentele SEG vindt met name plaats in het zichtbare golflengte gebied. Het weren van zonstraling gaat hierdoor in veel gevallen 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. Bovendien vind op dit moment gebruikersonderzoek plaats, waarbij de tolerantie van lagere verlichtingsterkten bij gebruik van enkel daglicht nader bekeken wordt.

-De schakelbare bandbreedte (verschil tussen lichte en donkere stand) van de gebruikte SEG-samples is relatief klein vergeleken met ander schakelbaar glas. Daarnaast was het in dit experiment slechts mogelijk om SEG te schakelen in één van de drie standen, zonder de mogelijkheid van geleidelijke transitie in transmissie. 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. De hier gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op één van de eerste prototypen en dienen als startpunt voor vervolgonderzoek op productniveau. Simulaties zullen onderdeel blijven uitmaken van de zoektocht naar glaseigenschappen en een regelstrategie die uiteindelijk resulteren in de ideale 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 systeem-dynamica van adaptieve gevels en maakt het ook mogelijk de integrale effecten van verschillende operationele strategieën op gebouwprestaties te voorspellen. Gebruik van gebouwsimulatie kan dus bijdragen aan het nemen van goed onderbouwde ontwerpbeslis-

singen. Op deze manier kunnen simulaties dienen als katalysator om de verdere ontwikkeling van adaptieve gevels te bevorderen. Zo kan optimaal worden geproefed 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 casestudy van SEG. De traditionele rol van simulatie als ondersteuning in het ontwerpproces is bevestigd. Daarnaast heeft gebouwsimulatie bewezen waardevol te zijn als actief gereedschap in innovatie en productontwikkeling.

REFERENTIES

1. Klooster, T. (2009) Smart Surfaces - and their Application in Architecture and Design. Basel: Birkhäuser.
2. Schumacher, M., Schaeffer, O. en Vogt, M. (2010) Move: architecture in motion - dynamic components and elements. Basel: Birkhäuser.
3. Loonen, R. (2010) Overview of 100 Climate Adaptive Building Shells, onderdeel van afstudeerrapport: 'Climate Adaptive Building Shells - What can we simulate?', Technische Universiteit Eindhoven.
4. Crawley, D., Hand, J., Kummert, M. en Griffith, B. (2008) 'Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs'. Building and Environment, 43(4):661-673.
5. Loonen, R. (2010) Climate Adaptive Building Shells - What can we simulate?, Afstudeerrapport, Technische Universiteit Eindhoven.
6. Goetzberger, A. en Greube, W. (1977) 'Solar energy conversion with fluorescent collectors'. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 14(2):123-139.
7. Benson, D. en 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.
8. Petersdorff, C., Boermans, T. en 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.
9. Lee, E. en Tavil, A. (2007) 'Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs'. Building and Environment, 42(6):2439-2449.
10. Mardaljevic, J. en Nabil, A. (2010) 'Electrochromic glazing and facade photovoltaic panels: a strategic assessment of the potential energy benefits'. Lighting Research and Technology, 40(1):55-76.