

# Zoektocht naar de ideale adaptieve gevel

Dit artikel geeft een beknopte samenvatting van de simulatieactiviteiten die zijn uitgevoerd in het kader van het door RVO gesubsidieerde EOS-LT project Facet (Facade als Adaptief Comfortverhogend Energiebesparend Toekomstconcept). Binnen het Facet project is uitgegaan van een zogenaamde inverse aanpak. Hierin is op basis van vooraf gedefinieerde gebouwprestaties (minimale energievraag met optimaal thermisch en visueel comfort) gezocht naar gebouwschilconcepten met adaptieve eigenschappen die hier het beste aan voldoen. De simulaties tonen aan dat met toekomstige adaptieve gevels de toepassing van nul-energiegebouwen met hoogwaardig binnenklimaat binnen handbereik komt.

Ir. R.C.G.M. (Roel) Loonen(a), ir. B.J. (Bart) de Boer(b), ing. W. (Wim) Kornaat(b),  
ir. L.G. (Leo) Bakker(b), prof.dr.ir. J.L.M. (Jan) Hensen(a)  
a. Unit Building Physics and Services, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven  
b. TNO Energy & Comfort Systems, Delft

De gevel zoals die traditioneel wordt ontworpen en gemaakt, is in hoofdzaak een statisch systeem. Eigenschappen, zoals thermische massa, isolatiewaarde, albedo en de verhouding 'open' en 'dichte' delen, zijn het hele jaar door nagenoeg gelijk. Zon- en lichttoetreding kunnen vaak slechts met handmatig geregelde (binnen)zonwering gereguleerd worden. Op het gebied van energiebesparing en comfort leidt dit tot een niet-optimale situatie, omdat veelal niet adequaat en tijdig op wisselende binnen- en buitencondities kan worden ingespeeld. Een dergelijke statische schil is eveneens niet ingesteld op verandering van functie gedurende de levensloop van een gebouw of veranderende eisen in de toekomst vanuit klimatologisch perspectief. Dit leidt tot onnodig frequente gevelrenovatie en een groot beslag op materialen en energiegebruik.



-Figuur 1-  
Voorbeelden van  
adaptieve gevels.  
Een uitgebreid  
overzicht met  
400 voorbeelden  
is beschikbaar  
op [www.pinterest.com/  
CABSoverview](http://www.pinterest.com/CABSoverview) [1]

## ■ PROBLEEMSTELLING

De hypothese van het Facet project luidt dat in gebouwen, die zijn voorzien van gevels met automatisch geregelde, klimaatgestuurde thermische en lichttechnische eigenschappen, het energiegebruik beduidend lager zal zijn terwijl aan de huidige of zelfs hogere comforteisen wordt voldaan. Een economisch en ecologisch voordeel is daarbij te behalen doordat de schil door zijn adaptieve karakter toekomstbestendig is ten aanzien van verandering in de gebruiksfunctie en veranderingen in buitencondities.

In dit project werd de vraag gesteld wat de ideaal gewenste, dynamische eigenschappen van de gevel zouden moeten zijn als het ideaal gewenste binnenklimaat zo goed mogelijk dient te worden benaderd met de variabele, adaptieve eigenschappen van de gevel. Vervolgens werd onderzocht op welke wijze dit 'ideale' gedrag met huidige of toekomstige materialen en/of technologieën bereikt zou kunnen worden. Deze methode geeft aan welke oplossingsrichtingen mogelijk zijn met huidige materialen en technologieën [1] (figuur 1), en ook welke R&D ontwikkelmogelijkheden er gewenst zijn [2].

## ■ INHOUDELIJKE AANPAK

Het onderzoek is uitgevoerd in vier fasen:

- Fase 1 - Definiëren van scenario's voor binnen- en buitenmilieu
- Fase 2 - Vaststellen optimaal fysisch gebouw-schilgedrag en theoretisch besparings-potentieel
- Fase 3 - Ontwikkelen gebouw(schil)concepten en specificaties materialen en technologieën
- Fase 4 - Beoordelen en evalueren gebouwschil-concepten

Er is ten opzichte van gangbare ontwerp- en simulatiemethodiek uitgegaan van een fundamenteel nieuwe aanpak van het probleem, de zogenaamde 'inverse benadering'. Hiermee wordt bedoeld dat door middel van te ontwikkelen simulatiemodellen afgeleid kan worden wat, gedurende de loop van het jaar, de (variabele) eigenschappen van de gebouwschil idealiter zijn, gegeven de gewenste eisen aan het binnenklimaat en gegeven het (wisselende) buitenklimaat.

In fase 1 is op basis van binnenmilieuscenario's (comfortoverwegingen) en scenario's voor buitenmilieu (klimaat) de vraag en het aanbod gedefinieerd. In fase 2 is het optimaal theoretisch fysisch gedrag van de gevel bepaald met behulp van simulaties. In de derde fase zijn innovatieve gebouwschilconcepten ontwikkeld (proof-of-principle) die in fase 4 zijn gesimuleerd (thermisch en licht). De ontwik-

kelde concepten werden ten slotte beoordeeld op reductie van het energiegebruik en op comfortverbetering. De focus in dit artikel ligt op de inverse simulatieaanpak in fase 2.

## ■ INVERSE AANPAK

De doelstelling voor het ontwikkelen en uitvoeren van de inverse simulatiemethodiek is tweeledig:

- kwantificeren van het potentieel van een adaptieve gebouwschil op het gebied van het verbeteren van binnenklimaat en energieprestaties;
- ondersteuning van de ontwikkeling van nieuwe adaptieve gebouwschilconcepten [3].

De prestaties van een adaptieve gebouwschil kunnen worden geanalyseerd met de focus op een aantal aspecten, zoals energiebesparing, binnenluchtkwaliteit, visueel comfort, daglicht, gebruikersgedrag en interactie of flexibel ruimtegebruik. Vergeleken met conventionele gebouwen zijn deze aspecten veel meer onderling verbonden in gebouwen met een adaptieve schil. Bovendien veranderen de interacties en prioriteiten in de tijd, en kunnen deze actief beïnvloed worden. Deze multidomein, multi-scale, eigenschappen dragen ertoe bij dat de optimalisatie van dynamische gevels een complex probleem is. In plaats van het optimaliseren van een enkele configuratie, is het doel van het optimalisatieproces bij aanpasbare façades het vinden van de beste reeks dynamische geveleigenschappen.

In vergelijking met simulatie-gebaseerde optimalisatie van statische gevels zorgt dit voor twee belangrijke voorwaarden voor de simulatiemethode:

- modelleren van dynamische geveleigenschappen: geveleigenschappen moeten veranderbaar zijn tijdens een simulatierun, om transiënte warmteoverdracht en energieopslag op correcte wijze mee te nemen [4]. In nagenoeg alle gebouwprestatiesimulatieprogramma's zijn dit soort mogelijkheden zeer beperkt. De simulatieaanpak die wij hier voorstellen biedt een oplossing voor dit probleem;
- modelleren van de aansturing van dynamische geveleigenschappen: de dynamische interacties in adaptieve gevels introduceren een sterke onderlinge samenhang tussen het ontwerp en de regeling van de gevel. De uiteindelijke prestaties van een dynamische schil zijn volledig afhankelijk van de manier waarop de gevel geregeld en aangestuurd wordt. Voor het identificeren van optimale concepten dienen daarom niet alleen ontwerp-eigenschappen, maar ook een inzicht in goed presterende regelstrategieën meege-

nomen te worden in de vroege ontwerpfase [5]. Eerder ontwikkelde methodes voor optimalisatie van de gebouwschil richten zich enkel op het analyseren van eigenschappen die niet veranderlijk zijn in de tijd.

Vanwege voornoemde twee redenen ontberen de bestaande methoden mogelijkheden om korte-termijn adaptiviteit te onderzoeken. De ontwikkeling van een nieuwe, toepassingsgerichte optimalisatieaanpak was daarom nodig om de hoofdvraag van dit onderzoek te beantwoorden.

Hiertoe zijn vervolgens twee complementaire simulatiemethoden uitgewerkt voor het uitvoeren van de inverse aanpak in bestaande simulatietools:

- multi-objective optimalisatie;
- sequentiële aanpak.

Bij de eerste methode is een 'toolchain' ontwikkeld voor het gekoppeld simuleren en optimaliseren van zowel visueel als thermisch comfort met open-source programma's. De koppeling van ESP-r met BCVTB voor meer vrijheid van simuleren van geavanceerde regelstrategieën in algemene zin is beschikbaar gemaakt [5]. Er is een superpositieaanpak in Radiance gemaakt voor het snel doorrekenen van verschillende gevelvarianten. Een in Matlab geïmplementeerd regelsysteem stuurt vervolgens het gehele simulatieproces aan. Op basis van de multi-objective aanpak worden de trade-offs tussen comfortverbetering en energiebesparing expliciet in kaart gebracht. Door de lange rekentijd is de focus in deze aanpak gericht op de analyse van karakteristieke weken in de vier seizoenen.

Bij de tweede methode worden eerst door middel van de superpositie aanpak in Radiance verschillende gevelvarianten gesimuleerd om de geoptimaliseerde daglichttoetreding te bepalen. Vervolgens worden deze Radiance resultaten als uitgangspunt voor minimale daglichttoetreding aan de Trnsys-simulaties gekoppeld. Deze regeling van de gevel op basis van energiebalans geeft de mogelijkheid om het energiebesparingspotentieel van Facet (op jaarbasis) voor de verschillende toepassingsgebieden kantoor, school en appartement adequaat te kunnen simuleren.

Kenmerkend voor beide simulatiemethoden is dat de gevel is opgedeeld in een grid van groot aantal kleinere elementen (figuur 2). In plaats van vaste wanden en ramen zorgt deze decompositie voor flexibele optimalisatie van vorm, aantal, positie, transparantie en thermische eigenschappen van de 'raam'vlakjes. De optimalisatie houdt dus rekening met de tijds- en locatie-afhankelijke eigenschappen van daglicht [6]. De veranderlijke materiaal-

eigenschappen voor elk van deze elementen is geoptimaliseerd voor iedere tijdstap in de simulatie, rekening houdend met uitzicht, verblinding, daglichttoetreding en het risico op temperatuuroverschrijding.

## RESULTATEN

Voor verschillende toepassingsgebieden zoals kantoren, appartementen en scholen zijn middels case studies de Facet varianten gesimuleerd en is het energiebesparingspotentieel bepaald door een vergelijking met de referentie (nieuwbouw) situatie. De case study die we hier presenteren betreft een kantoorruimte van 3.6 m breed, 5.4 m diep en 3 m hoog. Als referentie is gekozen voor een nieuwbouwsituatie met bouwfysische eigenschappen kenmerkend voor het jaar 2009. In de adaptieve variant kan de gevelisolatie variëren tussen een Rc-waarde vergelijkbaar met enkelglas tot aan de passiefhuisstandaard. Zontoetreding kan dynamisch gemoduleerd worden tussen 0 en 98%.

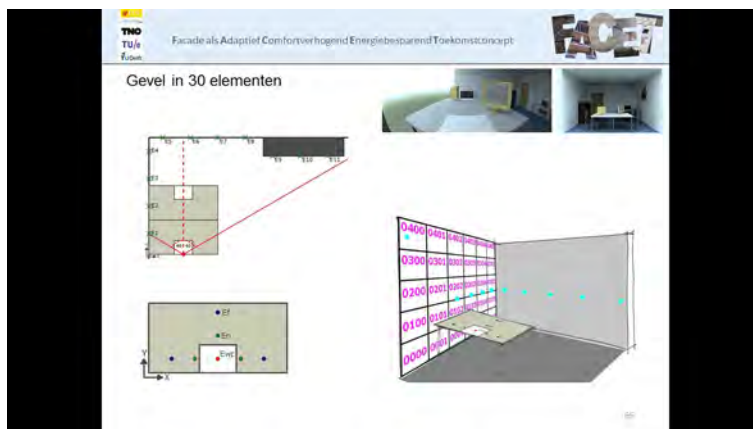
De energiebesparing voor verwarmen en koelen en verlichting is met de Facet gebouwschil zeer groot (figuur 3). De verwarmingsbehoefte kan nagenoeg geëlimineerd worden en de koelbehoefte kan circa gehalveerd worden. De post verlichting kan door de Facet regeling eveneens circa gehalveerd worden en na inzet van energiezuinige verlichting nog met 80% verder teruggebracht worden. Het totale energiegebruik wordt bij de Facet variant in totaal met circa een factor 10 gereduceerd ten opzichte van de referentiesituatie.

Uit de resultaten blijkt dat het van belang is dat zowel de transparantie als de isolatiewaarden variabel zijn. Het kunnen regelen van de ventilatiehoeveelheid (spuien) en de inzet van warmteterugwinning (met bypass) is eveneens zeer belangrijk voor het reduceren van de energievraag. Een verdere analyse leert dat de isolatiewaarde met name significante verschillen oplevert wanneer de wisselingen plaatsvinden in een dag-nacht ritme. Om visueel comfort te kunnen waarborgen is veranderbaarheid van de geveltransparantie gebaat bij een snellere adaptatiefrequentie. De verdeling in vlakjes laat zien dat de optimale geveltransparantie de baan van de zon volgt. Op momenten dat de kans op verblinding groot is, wordt het daglichtoppervlak verkleind en vice versa.

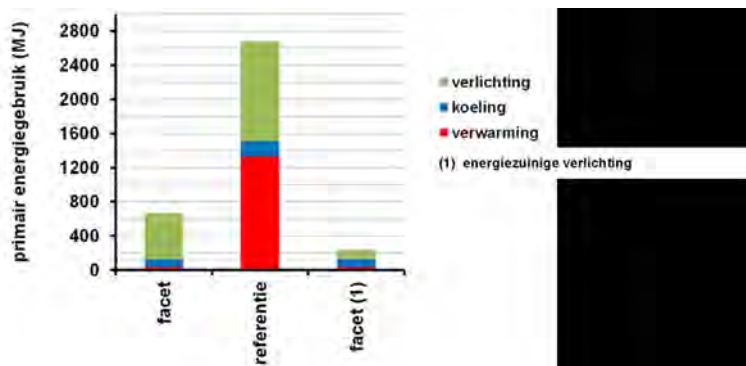
Voor een uitgebreidere onderbouwing van de resultaten van dit onderzoek verwijzen we u graag naar de openbare eindrapportage van het Facet project ([www.eosfacet.nl](http://www.eosfacet.nl)).

## TOEKOMSPERSPECTIEF

Dit onderzoek heeft bijgedragen aan het vergroten van het inzicht in het technolo-



-Figuur 2- De gevel is opgedeeld in een groot aantal kleine elementen



-Figuur 3- Energiebesparingspotentieel voor een standaard kantoorvertrek

gisch potentieel van adaptieve gevels voor kantoorgebouwen. De resultaten duiden op een significant energiebesparingspotentieel dat niet alleen benut kan worden in de utiliteitsbouw, maar bijvoorbeeld ook in de woningmarkt of voor tuinbouwkassen [7]. Onderzoek naar de toepassing en ontwikkeling van adaptieve gevelsystemen maakt een exponentiele groei door [2]. Op internationaal niveau worden de krachten gebundeld in de onlangs gestarte EU COST Action – Adaptive Facade Network [8]. Voorts heeft het Facet onderzoek aangetoond dat bewegingen in de gevelzone en de acceptatie daarvan in de praktijk niet als hinderlijk hoeven worden ervaren. Op basis van enquêteonderzoek is inzicht in gebruikersacceptatie en ergernisfactoren van geautomatiseerde regelingen verkregen en is een overzicht gegeven van de aspecten die van belang zijn voor ervaring en beleving van een regelbare, dynamische gebouwschil [9].

## DANKWOORD

Dit onderzoek is gesubsidieerd door RVO, EOS-LT project Facet, een samenwerking tussen ECN, DPA Cauberg-Huygen, TNO, TU Delft en TU Eindhoven. Zie [www.eosfacet.nl](http://www.eosfacet.nl) voor meer informatie.

## REFERENTIES

1. Loonen RCGM. Climate Adaptive Building Shells 2014:<http://www.pinterest.com/CABSOverview/>
2. Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM. Climate adaptive building shells:

State-of-the-art and future challenges.

Renew Sustain Energy Rev 2013;25:483–93

3. Loonen RCGM, Singaravel S, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM. Simulation-based support for product development of innovative building envelope components. Autom Constr 2014;45:86–95
4. Loonen RCGM, Hoes P, Hensen JLM. Performance prediction of buildings with responsive building envelopes - some challenges and solutions. Proc. Build. Simul. Optim., 2014
5. Hoes P, Loonen RCGM, Trčka M, Hensen JLM. Performance prediction of advanced building controls in the design phase using ESP-r, BCVTB and Matlab. Proc. Build. Simul. Optim., Loughborough, UK: 2012
6. Bakker LG, Schaberg LM. Facade als adaptief comfortverhogend en energiebesparend toekomstconcept (facet): een zoektocht naar de ideale gevel vanuit licht perspectief. Proc. IBPSA-NVL Event, 2010
7. Lee C, Costola D, Loonen RCGM, Hensen JLM. Energy-saving potential of long-term climate adaptive greenhouse shells. Proc. Build. Simul. 2013, 2013, p. 954–61
8. COST 1403. COST Action 1403 - Adaptive Facade Network. <http://www.adaptive-facade.eu/>
9. Bakker LG, Hoes-van Oeffelen ECM, Loonen RCGM, Hensen JLM. User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study. Build Environ 2014;78:44–52