

Auteurs

A.A. (Afaq) Butt, MSc (PDEng trainee Smart Buildings and Cities, TU Eindhoven);
dr.ir. C.G.M. (Roel) Loonen (Universitair docent, Faculteit Bouwkunde, TU Eindhoven).

Coatings voor schakelende gevels - een verkenning van het besparingspotentieel

Haalbaarheid, betaalbaarheid en schaalbaarheid vormen drie belangrijke speerpunten bij de (door)ontwikkeling van materialen en systemen die de energietransitie in de bestaande woningbouw mogelijk gaan maken. Binnen het kennis- en innovatieprogramma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw (IEBB) werken diverse partijen uit de bouw- en technieksector samen met kennisinstellingen aan nieuwe renovatieconcepten en bijbehorende sociale innovaties. Dit artikel beschrijft resultaten van één van de IEBB deelprojecten waarin onderzoek is gedaan naar de heroverweging van de toekomstige rol van de gebouwschil als dynamisch element voor energie-uitwisseling.

Van passief naar actief

Met het aforisme "Alle energie die je niet gebruikt hoeft je ook niet op te wekken" als vertrekpunt, wordt de toepassing van extra isolatie in de gebouwschil logischerwijs vaak gezien als de eerste stap bij het verbeteren van de energieprestaties van bestaande gebouwen. Echter, het simpelweg toevoegen van meer isolatie is vanwege de *wet van afnemende meeropbrengst* niet per definitie altijd beter [1]. Bovendien dienen de gangbare methoden voor na-isolatie nog wel een aantal stappen te maken op het gebied van snelheid van implementatie en kosten-efficiëntie, en zijn er toenemende aanwijzingen die stellen dat ver doorgevoerde na-isolatie onder de invloed van het veranderende klimaat kan leiden tot veelvuldige oververhitting of overmatig energieverbruik in de zomer bij aanschaf van air-conditioning [2].

De daken en gevels van de Nederlandse woningvoorraad bestrijken vele honderden vierkante kilometers die continu worden blootgesteld aan het veranderende buitenklimaat. De gebruikelijke oplossingsrichting die uitgaat van het minimaliseren van warmteoverdracht tussen binnen en buiten richt zich vooral op de koudste periode van het jaar, maar zet daarmee tegelijkertijd ook

de mogelijke positieve bijdragen van bijvoorbeeld het actief oogsten van zonnewarmte of het uitstralen van warmte naar de (nachtelijke) hemelkoepel buitenspel.

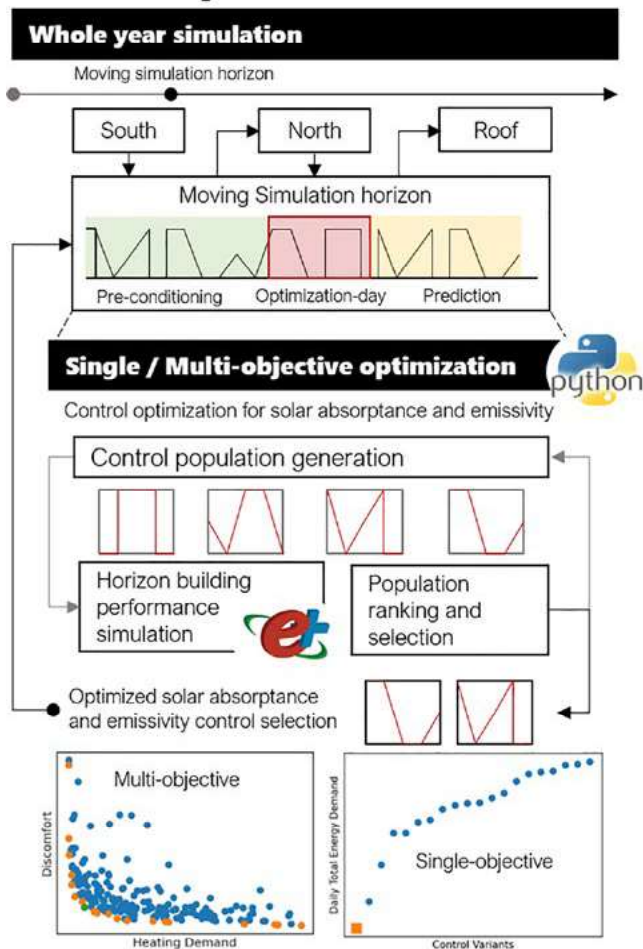
Dit artikel beschrijft de resultaten van een verkennende studie naar het potentieel van slimme coatings voor de afwerking van de gebouwschil. Deze coatings trachten de energieprestaties van woningen te verbeteren, door het verstandiger benutten van mogelijkheden voor gewenste warmteoverdracht door in te spelen op de dynamische buitencondities.

Schakelende gevels

Statische, reflectieve coatings zoals de 'KeepCool' en 'Sunreflect' coatings van AkzoNobel worden regelmatig ingezet in warme klimaten om koelvraag en de effecten van het Urban Heat Island (de extra opwarming in een stedelijke omgeving) te reduceren. Door te reflecteren in het niet-zichtbare deel van het zonnenspectrum, kan een dergelijke coating tot 10% energiebesparing leiden met behoud van vrijheid in kleurgebruik [3]. Zulke coatings hebben constante optische eigenschappen, waardoor ze niet kunnen meebewegen met de verandering van de seizoenen, en daarom in het Nederlandse klimaat vaak ook een toename in energievraag voor verwarming veroorzaken. Uit eerder onderzoek naar schakelende gevelsystemen aan de TU Eindhoven blijkt aan dat 'ideaal schakelbare gevelsystemen' enorme energiebesparingen tot wel 40% kunnen realiseren voor matig geïsoleerde kantoorgebouwen in Nederland [4]. In de praktijk kan een schakeling plaatsvinden op basis van verschillende mechanismen, bijvoorbeeld de oppervlaktetemperatuur, of een elektrisch signaal. Hierbij wordt dan de absorptie- en/of emissiecoëfficiënt beïnvloed.

Om de totale impact van schakelbare coatings voor woningverduurzaming nader te onderzoeken is binnen

Model predictive control



Figuur 1: Overzicht van het simulatie-framework.

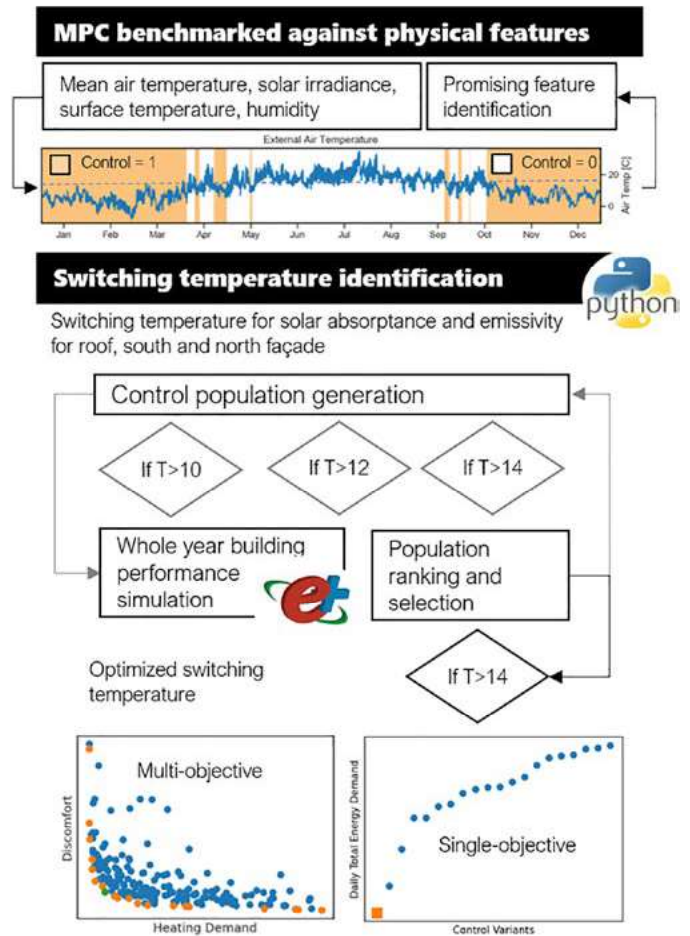
dit project een uitgebreid simulatie framework opgezet. De inzichten die hierbij zijn opgedaan dienen vervolgens als input voor projectpartners TNO en AkzoNobel bij het uitwerken van de meest kansrijke technologieontwikkeling en materialenonderzoek om het geschetste potentieel ook daadwerkelijk te kunnen ontsluiten.

Werkwijze

Om het energiebesparingspotentieel van de schakelende coatings in te schatten is gebruik gemaakt van dynamische gebouwprestatiesimulaties in EnergyPlus. Hierbij is uitgegaan van een typische rijtjeswoning met verschillende isolatiewaarden volgens de kenmerken die beschreven zijn in de voorbeeldwoningen van RVO [5].

Een grote inspanning in het project ging uit naar het opzetten en implementeren van een multi-objective optimalisatie-framework. Dit om de effecten van schakelbare gebouwschil-eigenschappen door te kunnen rekenen op basis van eenvoudige en complexe regelstrategieën voor de aansturing van de schakelbare optische eigenschappen (Figuur 1).

Rule-based control

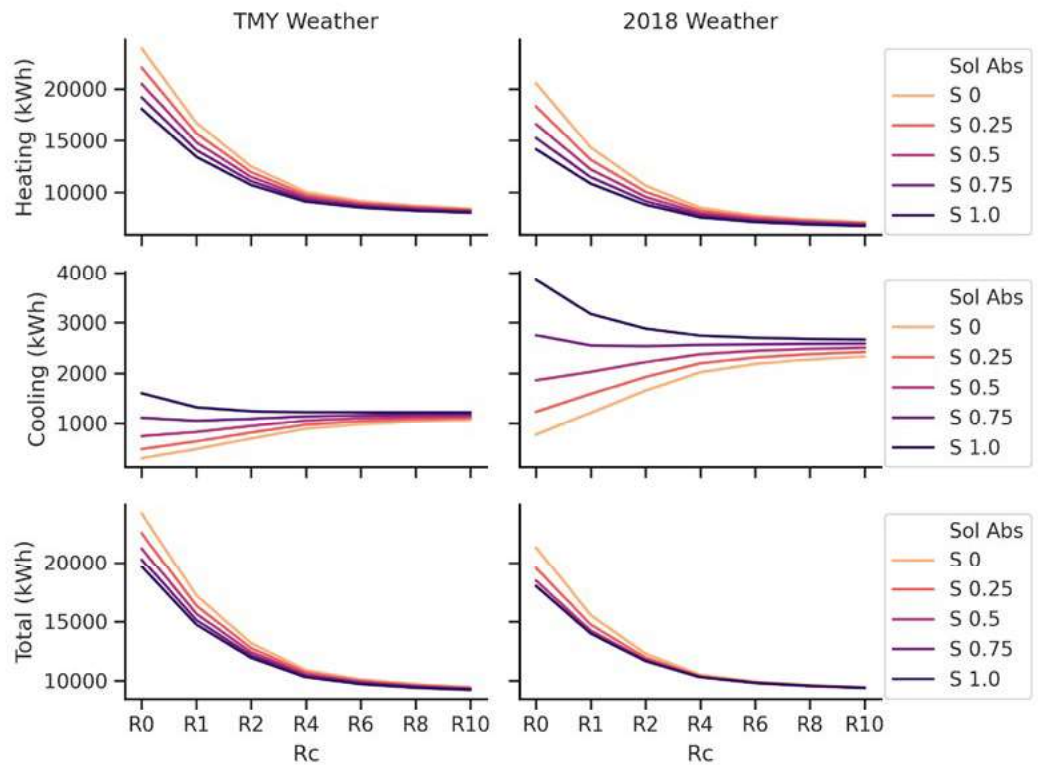


Met behulp van dit framework is vervolgens het theoretisch maximale besparingspotentieel van de coatings bepaald door te kijken naar een hypothetisch systeem met maximaal schakelbereik in materiaaleigenschappen en een perfecte simulatiegebaseerde regeling. Naast een indicatie van de te behalen prestaties geeft deze aanpak ook goede inzichten in de veelbelovende praktische regelstrategieën en een beeld van welke combinaties van dynamische materiaaleigenschappen verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van het besparingspotentieel. Op basis van deze kennis zijn vervolgens meerdere parametrische studies gedaan met realistische coatings en praktisch uitvoerbare regelingen, waarbij naast energiebesparing ook thermisch comfort onder de loep genomen is.

Optimale statische eigenschappen

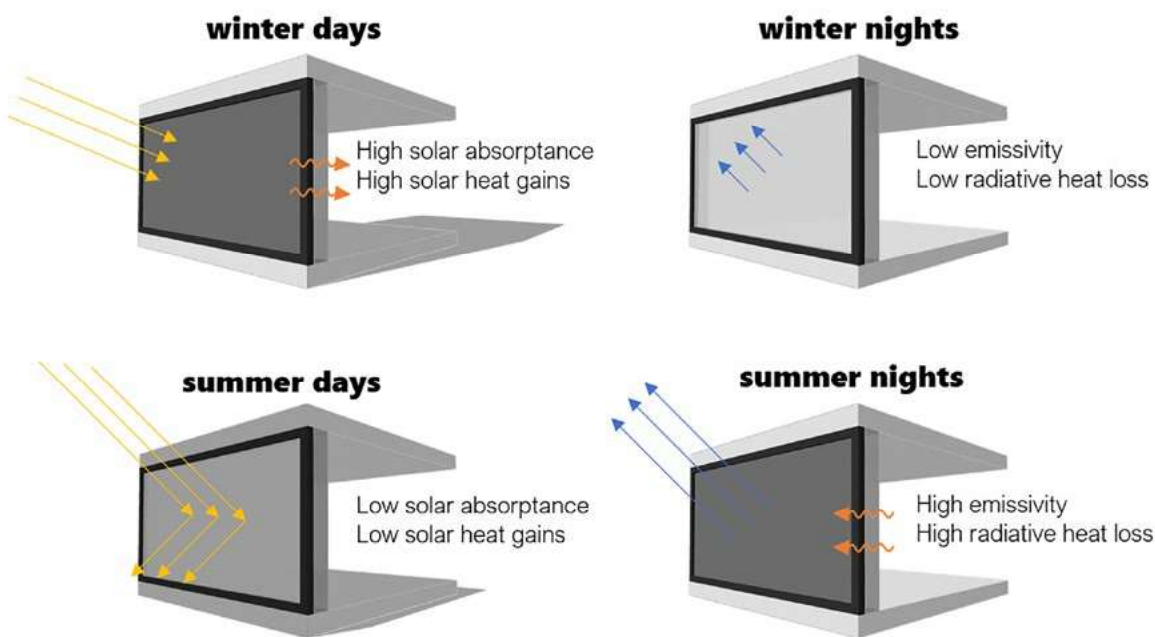
Voorafgaand aan het onderzoek naar schakelbare gevels is eerst gekeken naar de invloed van coatings met

Figuur 2: Energievraag voor verwarming en koeling voor een rijtjeshuis als functie van isolatieniveau en verschillende waardes voor de absorptie van de statische coating (S 0-1.0), voor gemiddelde (TMY) of 2018 weergegevens.



statische eigenschappen. Simulaties voor gebouwen met verschillende isolatiewaarden (variërend van $R_c=0$ (geen extra isolatie) tot $R_c=10$ voor de isolerende laag) zijn uitgevoerd, waarvan de resultaten in Figuur 2 zijn weergegeven. In een Nederlands klimaat is over een geheel jaar gerekend, een hoge absorptiewaarde het meest gunstig voor het totale energieverbruik, aangezien de energievraag voor verwarming de dominante

factor is. Woningen zijn dus netto beter af met een donkere gevelafwerking, al geeft dat in de zomers wel meer energieverbruik en/of minder comfort omdat de energievraag voor koeling sterk toeneemt, zeker wanneer gerekend wordt met de weergegevens van het warme jaar 2018 in plaats voor het referentieklimaatjaar (TMY).



Figuur 3: Energievraag voor verwarming en koeling voor een rijtjeshuis als functie van isolatieniveau en verschillende waardes voor de absorptie van de statische coating (S 0-1.0), voor gemiddelde (TMY) of 2018 weergegevens.

Vergeleken met regulier metselwerk (circa 0,7 absorptie) is er dus zowel winst te behalen tijdens koude periodes (met hogere absorptie) als in de zomer door het reduceren van de vraag naar koeling (met lagere absorptie, dat wil zeggen: hogere reflectie). Daarnaast geven de simulaties duidelijk aan dat het effect van de gebouwschilafwerking sterk afneemt met een hoger isolatieniveau.

De ideale oplossing

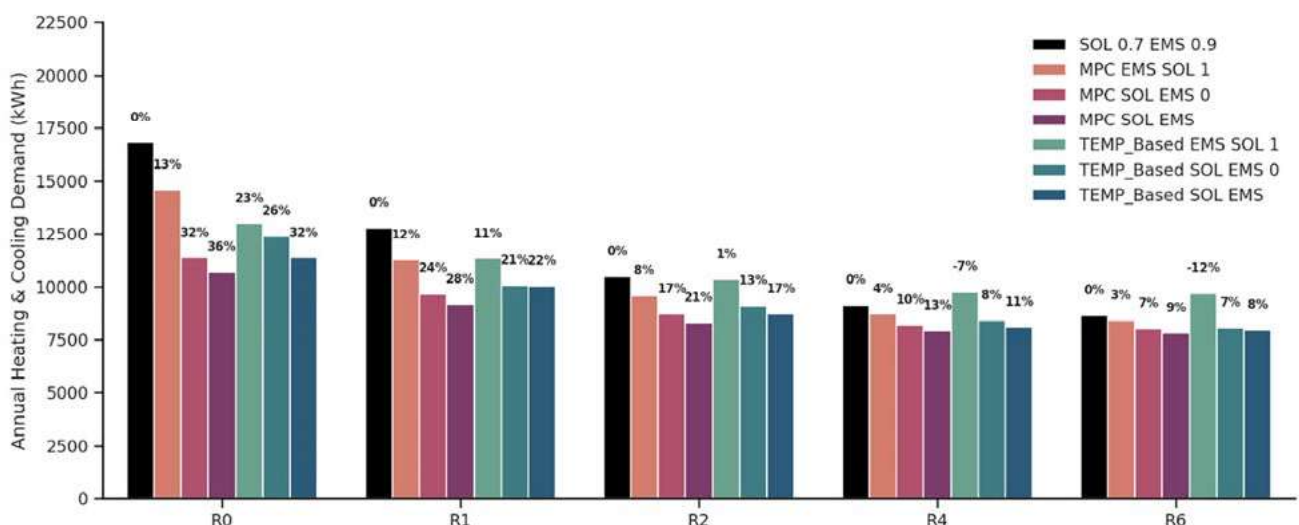
Voor schakelende gevels, blijkt uit een analyse van de energiebalans van de rijtjeswoning met verschillende isolatiediktes, dat voor de Nederlandse situatie de optimale aansturing van de schakelbare gebouwschil ontstaat door het verhogen van de absorptiefactor (α) en het verlagen van de emissiviteit (ϵ) in de winter en het verlagen van de absorptiefactor en het verhogen van de emissiviteit in de zomer. Hierdoor worden de thermische interacties tussen het gebouw en de omgeving optimaal beïnvloed en daarmee de totale energievraag verminderd (Figuur 4).

De optimalisatiestudie is vervolgens uitgevoerd voor twee varianten van de thermo-optische coating, een hypothetisch optimale coating met de mogelijkheid om zowel de absorptiefactor als de emissiviteit te schakelen tussen de maximale limieten ($\alpha_{\text{low}}=0, \alpha_{\text{high}}=1$ en $\epsilon_{\text{low}}=0, \epsilon_{\text{high}}=1$) en een state-of-the-art (SOTA) elektrochrome coating die momenteel in ontwikkeling is met een schakelbereik van 80% ($\alpha_{\text{low}}=0.2, \alpha_{\text{high}}=1$) en constante emissiviteit.

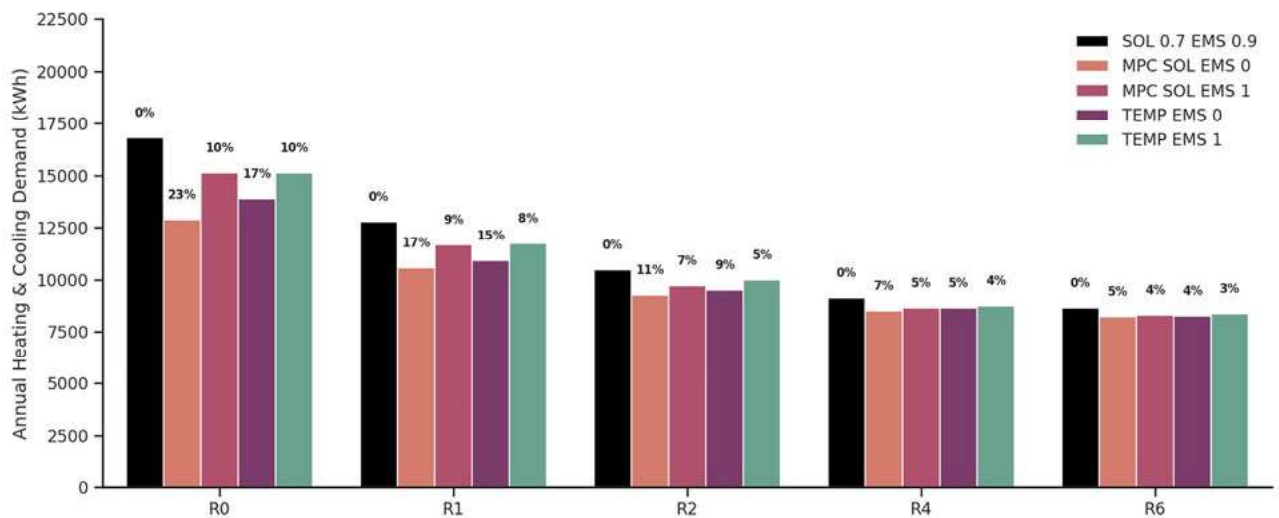
Het simulatieframework is ontwikkeld om twee aansturingstrategieën te kunnen testen, namelijk een modelgebaseerde regeling (MPC-regeling, ook wel bekend als 'model predictive control') en een conditionele regeling (gebaseerd op alsdan logica). De MPC-regeling in combinatie met de theoretische coating slaagt erin de zonnewarmte winsten en thermische stralingsverliezen van de woning te reguleren door dynamisch te schakelen tussen hoge en lage waarden van de

absorptiefactor en emissiviteit. Dit resulteert in een jaarlijkse besparing op verwarming en koeling die varieert tussen 803 en 6133 kWh (9-36%) voor respectievelijk Rc=6 en Rc=0 (on)geïsoleerde rijtjeshuizen. De toepassing van MPC-aangestuurde theoretische coatings elimineert de noodzaak van hoge isolatie in de gebouwschil, aangezien een dergelijke coating in combinatie met Rc=2-isolatieniveaus een hogere energiebesparing oplevert dan een hoogwaardig geïsoleerde Rc=6 woning (Figuur 4). Bij de ontwikkeling van dynamische coatings die alleen de absorptiefactor of emissiviteit kunnen schakelen, is het van groot belang dat de statische coatingeigenschappen weloverwogen worden gekozen om het dominante type energievraag te verminderen. Vanwege de hoge warmtevraag in Nederland is het verstandig om dynamische zon-reflecterende coatings te koppelen aan een lage constante emissiviteit, terwijl coatings met aanpasbare emissiviteit gepaard zouden moeten gaan met een hoge constante absorptiefactor.

Door het meest gunstige schakelprofiel te destilleren uit de MPC-regeling is een conditionele regeling geïmplementeerd die optische eigenschappen aanstuurt op basis van de buitentemperatuur (TEMP_Based in Figuur 4). Zodra de buitentemperatuur boven



Figuur 4: Simulatieresultaten voor de geïdealiseerde coating (MPC: Model Predictive Control; TEMP: controle op basis van buitentemperatuur; SOL # of EMS # geeft de absorptie- of emissiecoëfficiënt aan. Bij enkel SOL of EMS wordt uitgegaan van de referentiewaarde 0.7 respectievelijk 0.9).



Figuur 5: Simulatiesresultaten van de state-of-the-art (SOTA) coating (MPC: Model Predictive Control; TEMP: controle op basis van buitentemperatuur; SOL # of EMS # geeft de absorptie- of emissiecoëfficiënt aan. Bij enkel SOL of EMS wordt uitgegaan van de referentiewaarde 0.7 respectievelijk 0.9).

een drempelwaarde komt, schakelt de coating tussen lage en hoge waarden. Met deze vereenvoudigde aansturing van de theoretische coatings slagen we erin om in veel situaties een vergelijkbare energiebesparing te bewerkstelligen als voor de vele malen complexere MPC-regeling met een jaarlijkse besparing op verwarming en koeling tussen 693-5438 kWh (8-32%) voor respectievelijk Rc=6 en Rc=0 (on)geïsoleerde rijtjeshuizen.

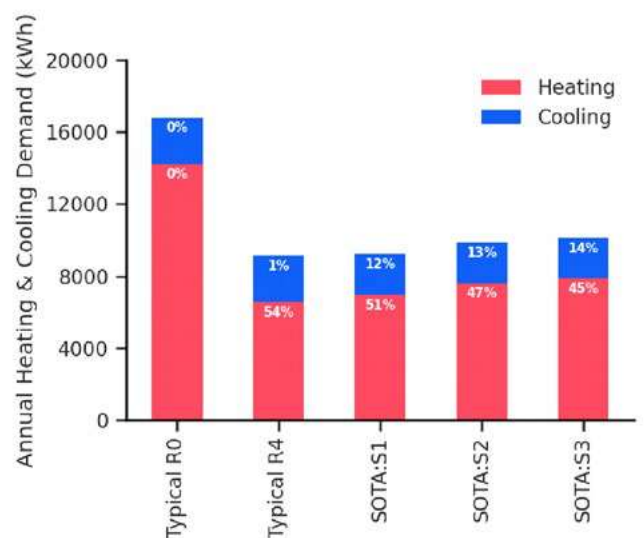
Vertaalslag naar de praktijk

Een dergelijke regeling kan ook worden toegepast in combinatie met de state-of-the-art (SOTA) elektro-chrome coatings. Door het schakelbereik van 80% en het ontbreken van een emissiviteitsregeling levert een SOTA-elektro-chrome coating met MPC-regeling een besparing op voor verwarming en koeling van 411 en 3905 kWh (5-23%), en een (buiten)temperatuurgeregelde SOTA-elektro-chrome coating een jaarlijkse besparing voor verwarming en koeling van 377 en 2918 kWh (4-17%) voor respectievelijk Rc=6 en Rc=0 (on)geïsoleerde rijtjeshuizen (Figuur 5). Het energiebesparingspotentieel van de onderzochte elektrisch aangestuurde dynamische coatings neemt af bij hogere isolatieniveaus; het adaptieve karakter van deze coatings zorgt echter voor flexibiliteit en robuustheid in het kader van klimaatverandering. Deze coatings verminderen zowel de vraag naar verwarming als naar koeling (en/of thermisch discomfort) in de loop van het jaar, terwijl hogere isolatieniveaus enkel de verwarmingsvraag verminderen, waardoor het risico op oververhitting in de zomer toeneemt.

In het laatste deel van het simulatieonderzoek is het simulatie-

framework uitgebreid naar een bi-level nested optimalisatie-aanpak om verschillende combinaties van gebouwparameters en SOTA elektrochrome coatings te vergelijken in een techno-economische analyse voor woningverduurzaming in de Nederlandse residentiële sector. Deze simulaties laten zien dat het aanbrengen van coatings op de zuidgevel het kostenefficiëntst is en hebben bovendien een kansrijke propositie geïdentificeerd.

Figuur 6: Vergelijking tussen standaard isolatie en de schakelbare coatings in verschillende configuraties.



Typical R0: dak en gevel zonder na-isolatie
Typical R4: dak en gevel geïsoleerd met Rc=4
SOTA:S1: dak (Rc=4), gevel zuid (Rc=1, schakelend), gevel noord (Rc=4)
SOTA:S2: dak (Rc=4), gevel zuid (Rc=1, schakelend), gevel noord (Rc=1, schakelend)
SOTA:S3: dak (Rc=4), gevel zuid (Rc=1, schakelend), gevel noord (Rc=1)

De resultaten laten zien dat door de combinatie van SOTA elektro-chrome coatings en een beperkte verbetering van de gebouwschilisolatie, bijvoorbeeld in de vorm van spouwmuurisolatie, voor niet-geïsoleerde woningen, scenario's uitgewerkt kunnen worden met een energiebesparing die vergelijkbaar is aan het effect dat verkregen wordt met sterk geïsoleerde renovatiestrategieën op basis van voorzetgevels (Figuur 6). Door het aanbrengen van SOTA elektro-chrome coatings op de zuid- en noordgevel en het upgraden van de muren van $R_c=0$ naar $R_c=1$ en het dak van $R_c=0$ naar $R_c=4$, kan 90% van de energiebesparing voor verwarming van een compleet tot $R_c=4$ nageïsoleerd rijtjeshuis worden verkregen. Het dynamische karakter van de elektro-chrome SOTA-coatings zorgt voor een verdere vermindering van het energiegebruik voor koeling, waardoor de kans op oververhitting in de zomer aanzienlijk wordt verkleind. De dunne opbouw (enkel spouwmuurisolatie volstaat) en snelle toepasbaarheid van deze coatings kunnen het tempo van de renovatieopgave in Nederland versnellen, waardoor flexibele en robuuste woningen ontstaan die in staat zijn zich aan te passen aan de veranderende eisen van de toekomst.

Conclusies en vervolg

De simulatiestudie die gepresenteerd is in dit artikel laat zien dat de toepassing van schakelbare coatings, als onderdeel van een adaptief gevelconcept, kan leiden tot een flinke energiebesparing bij bestaande woningen. Indien zowel absorptie als emissie gereguleerd kunnen worden, tonen simulaties op gebouwniveau aan dat theoretische besparingen tot 32% mogelijk zijn. Naarmate het isolatieniveau in de gevel stijgt, daalt het rendement van de adaptieve gevel (tot 8%, $R_c=6$). Dat toont aan dat het concept in principe zeer geschikt is voor gebouwen met een lage isolatiewaarde, wat het uitermate geschikt maakt voor een renovatie concept. Door simulaties te koppelen aan specificaties van state-of-the-art, praktisch haalbare technieken zoals beschreven in het technologie review dat binnen dit project is gedaan, lopen de besparingen uiteen van 23 tot 5% (van $R_c=0$ tot $R_c=6$). Een logische vervolgstap is verder onderzoek naar optimale combinaties van (spouwmuur)isolatie, beglazing, zonnepanelen en energiesystemen om zo te komen tot integrale renovatieconcepten die de prestaties van de schakelbare coating ondersteunen.

Een belangrijke conclusie die uit de uitgebreide simulatie-activiteiten tijdens dit project getrokken kan worden is dat verdere ontwikkeling van schakelbare coatings georiënteerd moet zijn op i) het verbreden van de range van schakelwaarden en ii) omgevingsonafhankelijke schakelmethodieken (zoals elektro-schakelende coatings) om maximaal rendement te halen.

Parallel aan de ontwikkeling van de simulaties is in het project een technologie overzicht gemaakt, waarbij belangrijke aspecten van de technologie (schakelwaarde, drempelwaarden, kosten, levensduur) in kaart zijn gebracht. Hieruit is een top 5 van technologieën naar voor gekomen die verder uitgewerkt zijn in de technologie screening, waarbij commerciële materialen gevalideerd zijn op labniveau en op dit moment in een vervolgetraject verder opgeschaald worden. Voor verdere informatie over deze ontwikkeling wordt verwezen naar het openbare eind van het IEBB deelproject [6].

Dankwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het project integrale energietransitie bestaande bouw IEBB) met Topsector Energie subsidie van het Ministerie van Economische Zaken. De auteurs danken de collega's van TNO en AkzoNobel voor de prettige samenwerking.

Referenties

1. Koenders, S. J. M., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2018). Investigating the potential of a closed-loop dynamic insulation system for opaque building elements. *Energy and Buildings*, 173, 409-427.
2. Loomans, M.G.L.C., & Hensen, J.L.M. (2018). Oververhitting in (BENG-)woningen. *TVVL Magazine*, 2018(08), 19-23.
3. AkzoNobel. <https://www.akzonobel.com/en/about-us/what-we-do/keepcool-sunreflect>
4. Loonen, R.C.G.M. (2018) 'Approaches for computational performance optimization of innovative adaptive façade concepts', proefschrift TU Eindhoven
5. RVO. Voorbeeldwoningen particuliere woningen en verhuursector. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/woningbouw/particuliere-woningen/voorbeeldwoningen>
6. Van den Ham, J. & Loonen, R.C.G.M. (2021) Eindrapport IEBB integrale energietransitie bestaande bouw. Deelproject 3.1.6. Renovatieoplossingen door regulerende gebouwschil.