

## Public summary

**Title:** A computational framework for analysis and optimisation of automated solar shading systems

This research shows that advanced automated shading systems can substantially reduce building energy consumption (14-35%), increase occupant exposure to natural daylight (56-75%), and reduce visual discomfort (8-25%).

In most office buildings shading devices are operated manually by users. The “blinds closed - lights on” situation that we often find in these offices does not exploit the benefits of natural daylight and views and leads to high lighting energy consumption. In contrast, automated solar shading systems manage the admission of solar energy more actively in response to varying environmental conditions. Earlier research showed that this ability can lead to increased indoor comfort conditions that positively contribute to the health, well-being, and productivity of office workers. The performance of automated shading systems, however, greatly depends on how these screens or slats are operated. The ‘close-open’ control strategies found in the current generation of automated shading systems do not satisfy the visual comfort requirements of occupants and are frequently associated with user dissatisfaction.

Recently, several enabling developments have led to promising comfort-driven control strategies being proposed that seek to maximise the admission of daylight by closing shading devices only to the extent that is necessary to prevent daylight glare or thermal discomfort. If these strategies are to be deployed successfully at large scale, however, several challenges must be overcome. To develop these advanced control concepts, there is a need for detailed insight into the effects of control and design parameters on trade-offs between various performance aspects like glare, occupant exposure to natural daylight, and building energy consumption. Additionally, generically applicable workflows are needed that allow such control strategies to be developed and deployed at scale.

This doctoral dissertation investigates how the development and application of comfort-driven shading strategies can be supported using computational analyses and optimisation. The goal of the research was to develop a Virtual test bed (VTB) that can be used to evaluate and improve advanced shading concepts in a low-cost manner. Additionally, this research sets out to develop a set of ‘support methods’ aimed at supporting product developers in analysing and optimising their shading concepts. The VTB and the support methods together form the main contribution of

this research: a computational framework for analyses and optimisation of automated solar shading systems.

The computational framework was tested and validated by applying it to the development and optimisation of various advanced shading concepts in an iterative process involving four application studies and feedback from stakeholders in the shading industry.

A novel aspect of this research is that it led to support methods that have a beneficial trade-off between (i) their replicability, (ii) their effectiveness in finding control strategies that optimally exploit non-intrusive and non-ideal sensors, and (iii) the time, effort, and skill that are required of developers in their application. Existing approaches tend to perform well in only a subset of these aspects.

Additionally, this research gives reason to reconsider traditional approaches and commonly held conceptions in the design and engineering of building facades. In the traditional design process, façade design features (e.g., design of static shading devices) and automated shading control features are considered in isolation and optimised consecutively. This research shows that simultaneous co-optimisation of control and design features leads to outcomes with increased visual comfort (4-11%), improved energy performance (2-6%) and lower costs than the solutions that are found using traditional approaches. This research also shows that the common design heuristic that 'interior shading devices lead to higher energy consumption than exterior shading devices' no longer applies in all cases. Following this heuristic can even lead designers to miss out on substantial improvements (8-13%) in energy performance.

## Publiekssamenvatting

**Titel:** Een raamwerk voor computationele analyse en optimalisatie van geautomatiseerde zonweringssystemen

Dit onderzoek laat zien dat geavanceerde regelingen voor geautomatiseerde zonweringssystemen leiden tot substantiële verbeteringen in het energieverbruik van kantoorgebouwen (14-35%), de toetreding van natuurlijk daglicht (56-75%) en het optreden van storende verblinding (8-25%).

In de meeste kantoorgebouwen wordt zonwering handmatig bediend door gebruikers. In de 'zonwering omlaag en lichten aan' situatie die hierdoor vaak ontstaat worden de voordelen van natuurlijk daglicht en uitzicht niet benut en wordt er veel energie verbruikt voor verlichting. Geautomatiseerde zonweringssystemen zijn beter in staat om de toetreding van zonnestraling te beheersen onder uiteenlopende weers- en gebruiksomstandigheden. Eerder onderzoek toonde aan dat geautomatiseerde zonweringssystemen in potentie kunnen leiden tot een hogere kwaliteit van het binnenmilieu, hetgeen bijdraagt aan de gezondheid, het welzijn en de productiviteit van kantoorwerkers. De effecten van geautomatiseerde zonweringssystemen zijn echter sterk afhankelijk van de wijze waarop deze systemen worden aangestuurd. De 'open-dicht' strategieën die kenmerkend zijn voor de huidige generatie zonweringssystemen bieden onvoldoende visueel comfort (d.w.z. zowel verblinding als onvoldoende daglicht) en leiden veelal tot ontevredenheid onder gebruikers.

In recent onderzoek zijn veelbelovende comfort-gedreven regelstrategieën voorgesteld die de toetreding van daglicht maximaliseren door de zonwering slechts zo ver te sluiten als noodzakelijk is ter voorkoming van verblinding en thermisch ongemak. De opschaling van deze strategieën wordt vooralsnog gehinderd door een gebrek aan gedetailleerde kennis tijdens de productontwikkeling. Er is behoefte aan nauwkeurige inzichten in de effecten van regel- en ontwerpparameters op gebouwprestaties als verblinding, daglichttoetreding en energieverbruik. Ook inzicht in de afruil tussen deze aspecten is hierbij van belang. Verder is er behoefte aan algemeen toepasbare processen voor het ontwerpen en uitrollen van geavanceerde zonweringssystemen op schaal.

In dit proefschrift is onderzocht hoe de ontwikkeling en toepassing van comfort-gedreven zonweringstrategieën ondersteund kan worden met computationele analyse en optimalisatie.

Het doel van dit onderzoek was om een Virtuele Test Omgeving (VTO) te ontwikkelen die gebruikt kan worden om geavanceerde zonweringconcepten te testen en verbeteren op een betaalbare en snelle manier. Het tweede doel van dit onderzoek was om een stel 'ondersteuningsmethoden' te ontwikkelen. Deze

methoden zijn erop gericht om productontwikkelaars en ontwerpers te ondersteunen in het effectief toepassen van simulaties in het analyseren en optimaliseren van hun concepten. De VTO en de ondersteuningsmethoden vormen tezamen het resultaat van dit onderzoek: een computer-gedreven raamwerk voor het analyseren en optimaliseren van geautomatiseerde zonweringsystemen.

Het computationele raamwerk is getest en gevalideerd door het toe te passen op de ontwikkeling en optimalisatie van een aantal geavanceerde zonweringsconcepten binnen een iteratief proces bestaande uit vier simulatiestudies en feedback van belanghebbenden uit de zonweringsindustrie.

Innovatief aan dit onderzoek zijn de ontwikkelde ondersteuningsmethoden. Deze methoden hebben als voordeel dat zij (i) zeer reproduceerbaar zijn, (ii) effectief zijn in het vinden van regelstrategieën die optimaal gebruik maken van niet ideale sensoren, en (iii) slechts weinig tijd, moeite en vaardigheden vereisen van de ontwikkelaar van de regeling. Bestaande methoden leggen veelal de nadruk op slechts enkele van deze aspecten.

Ten slotte geven de inzichten uit dit onderzoek reden om bestaande noties rondom zonwering, helderheidswering, en gevelontwerp te herzien. In het traditionele ontwerpproces worden aspecten van het gevelontwerp (bijvoorbeeld statische zonweringselementen) en regelparameters voor geautomatiseerde zonwering veelal gescheiden behandeld en achtereenvolgens geoptimaliseerd. Dit onderzoek toont aan dat gelijktijdige co-optimalisatie van regel- en ontwerpaspecten tot gebouwen leidt met een beter visueel comfort (4-11%), verbeterde energiestaat (2-6%) en lagere kosten dan bij het volgen van het traditionele proces. Ook laat dit onderzoek zien dat de veel gehanteerde vuistregel 'binnenzonwering leidt tot een hoger energieverbruik dan buitenzonwering' niet langer in alle gevallen opgaat. Het volgen van deze vuistregel kan er zelfs toe leiden dat een substantiële verbetering van het energieverbruik (8-13%) over het hoofd gezien wordt.