

INTELLIGENTE DAGLICHTSYSTEMEN

DE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN 'SMART MATERIALS'

Dit artikel gaat over intelligente daglichtsystemen, waarbij 'smart materials' in het glasoppervlak van de gevel zijn geïntegreerd. Bij deze daglichtsystemen kan de transmissie van de beglazing op ieder moment aangepast worden aan de hand van klimaat en/of gebruikseisen. Hierdoor kan zowel het comfort van het binnenklimaat worden verbeterd, als het energieverbruik voor verwarming, koeling en verlichting worden teruggedrongen. Er zijn twee soorten intelligente daglichtsystemen: passieve en actieve systemen. Verschillende technologieën worden besproken, waarbij hun voor- en nadelen worden toegelicht. Daarnaast wordt onderzocht met welke factoren bij het gevelontwerp rekening dient te worden gehouden. Op dit moment zijn nog niet veel technologieën terug te vinden als commerciële applicatie, maar de ontwikkelingen zijn veelbelovend, met name op het gebied van electrochromische daglichtsystemen.



ir. H.J.J. (Hester) Hellinga,
Faculteit Bouwkunde,
TU Delft



ir. C.M.J.L. (Charlotte)
Lelieveld, Faculteit
Bouwkunde, TU Delft

INLEIDING

In de hedendaagse architectuur worden veel gebouwen gerealiseerd met grote raamvlakken of volledig glazen gevels. Ondanks hoogwaardige glasontwikkelingen zijn deze raamvlakken nog vaak zwakke plekken in het gebouw op het gebied van energieverbruik en comfort. Mensen hebben echter behoefte aan ramen, omdat ramen zorgen voor daglichttoetreding voor contact met buiten en de mogelijkheid bieden om met buitenlucht te ventileren. Door toepassing van daglichtsystemen kan de dag- en zonlichttoetreding door het raam worden beïnvloed. Dit heeft twee doelen:

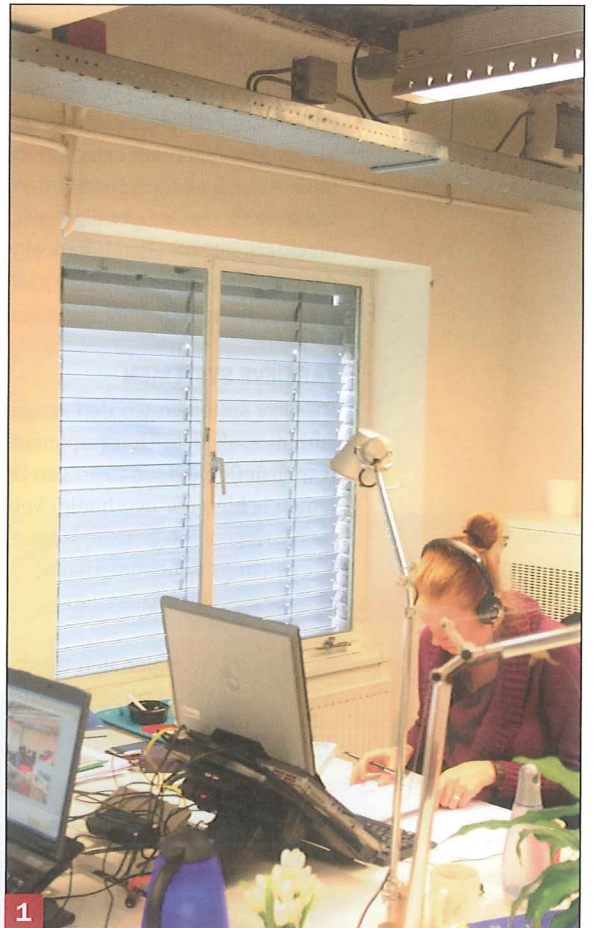
- het visueel en thermisch comfort te verbeteren;
- het energieverbruik door HVAC (verwarming, ventilatie en koeling) en kunstlicht terug te dringen.

Bij traditionele mechanische systemen, zoals lamellen en (rol)gordijnen, worden deze twee doelen niet altijd bereikt. Wanneer het daglichtsysteem bijvoorbeeld aan de binnenzijde van het raam is bevestigd, zijn de warmtewerende eigenschappen van het systeem beperkt. Ook kan door verkeerd gebruik van het systeem zowel het comfort als het energieverbruik nadelig worden beïnvloed. Het komt regelmatig voor dat in kantoorgebouwen het kunstlicht de hele dag aanstaat terwijl de zonwering volledig is gesloten (figuur 1).

Dit artikel gaat over een ander soort systemen, namelijk over intelligente daglichtsystemen. Hierbij zijn 'smart materials' in het glasoppervlak van het raam geïntegreerd. Eerst worden verschillende intelligente daglichtsystemen en hun eigenschappen besproken en worden de voor- en nadelen van de systemen gegeven in vergelijking met traditionele mechanische systemen. Vervolgens wordt onderzocht welke ontwerpparameters een rol spelen bij het ontwerp van intelligente gevels waarin 'smart materials' worden toegepast.

INTELLIGENTE DAGLICHTSYSTEMEN

De term 'smart materials' is een bekende Engelse term die wordt gebruikt voor een specifieke materialengroep [1]. Deze materialen beschikken over intrinsieke eigenschappen die het mogelijk maken om hun karakteristieken te



Een voorbeeld van een traditioneel daglichtsysteem, waarbij de lamellen volledig gesloten zijn, en kunstlicht gebruikt wordt

Tabel 1: Overzicht passieve systemen en lichttransmissie waarden

technologie	stimulus	visuele lichttransmissie transparant	visuele lichttransmissie translucient
fotochromisch (PC)	ultraviolet licht	60%	4%
thermotropisch (TC)	temperatuur	70 %	16-44%
thermochromisch	temperatuur	> 50%	< 10%

veranderen onder invloed van externe stimuli [2]. De materialen beschikken over sensorische en responsieve eigenschappen, hierdoor kunnen ze hun fysieke verschijning aanpassen aan de hand van een impuls. In het geval van daglichtsystemen kan bijvoorbeeld de transmissie, transparantie en/of kleur van het materiaal worden aangepast, aan de hand van lichtintensiteit, temperatuur of elektriciteit. In de literatuur wordt de toepassing van 'smart materials' in beglazing aangeduid met 'smart window' [3], 'intelligent window' [4], of 'switchable window' [5-9], in dit artikel wordt de term 'intelligente daglichtsystemen' gebruikt voor systemen waarbij de transmissie van de beglazing op ieder moment aangepast kan worden aan de hand van klimaat en/of gebruikers-eisen [5]. Hiermee onderscheiden deze systemen zich van statische systemen waarbij gebruikt wordt gemaakt van bijvoorbeeld coatings, folies of geëmailleerd glas.

Er zijn twee soorten intelligente daglichtsystemen. Ten eerste zijn er de passieve systemen, waarbij de omgevingsstimuli direct de fysieke verschijning van het glasoppervlakte beïnvloeden, zonder inmenging van een extern systeem. Omdat het bij deze systemen een materiaaleigenschap betreft, is het lichtniveau of de temperatuur waarbij er omgeschakeld wordt niet aanpasbaar tijdens het gebruik. Daarnaast zijn er de actieve systemen, waarbij het glasoppervlak extern gestimuleerd wordt. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan door een controlesysteem, welke in de meeste gevallen geschakeld is aan één of meerdere sensors. Een voordeel van deze systemen is dat de activeringswaarden aangepast kunnen worden aan de lokale omstandigheden en wensen van de gebruiker.

PASSIEVE SYSTEMEN

Passieve systemen worden aangestuurd door omgevingsstimuli zoals licht (fotoreponsief) en warmte (thermosponsief). Het toepassen van bedrading en controlesystemen is hiervoor overbodig. Voor architectonische toepassingen zijn er twee soorten systemen:

- de chromische materialen;
- de tropische materialen.

Bij chromische materialen treedt een kleurverandering op onder invloed van ultraviolet licht (fotochromisch) of temperatuur (thermochromisch). Een voordeel van chromische systemen boven veel traditionele zonweringsystemen is dat het mogelijk is om naar buiten te kijken door het donker gekleurde oppervlak (zie figuur 2). Bij tropische materialen ontstaat een diffuus oppervlak door een polaroid effect. Thermotropische materialen zijn transparant tijdens lage temperaturen en translucient bij hoge temperaturen. In translucente toestand verdwijnt het uit-



Thermochromisch systeem [11]

zicht en ontstaat er een oppervlak dat een diffuus licht verspreidt.

In tabel 1 is een overzicht gegeven van de verschillende passieve systemen en de bijbehorende transmissiewaarden voor zichtbaar licht. Doordat passieve systemen door omgevingsstimuli worden geactiveerd, verloopt de transitie tussen de transparante en translucente fase niet homogeen over het oppervlak [9]. Er zal hierdoor een fase ontstaan waarbij delen van het glas transparant zijn en delen translucient.

Passieve systemen zijn weinig terug te vinden in commerciële applicaties. Een nadeel van de systemen is dat de gebruiker niet de mogelijkheid heeft om het systeem te controleren. Uit gebruikersonderzoek is gebleken dat er een voorkeur uitgaat naar systemen waarbij wel individuele controle mogelijk is [10]. Ook is het niet altijd gunstig voor het energiegebruik dat passieve systemen alleen op omgevingsparameters reageren. In de zomer zal het gewenst zijn om de zonnearmte te blokkeren, in de winter wil men juist de warmte binnenlaten.

ACTIEVE SYSTEMEN

Op het gebied van actieve systemen is er veel ontwikkeling gaande. In tabel 2 is een overzicht gegeven van de verschillende soorten actieve daglichtsystemen en de bijbehorende transmissiewaarden voor zichtbaar licht. Van al deze systemen zijn de electrochromische systemen het meest ontwikkeld.

Externe stimuli

De stimulus voor electrochromische, liquid crystal en suspended particle daglichtsystemen is elektriciteit. Zowel liquid crystal systemen, als suspended particle daglichtsystemen vereisen over het algemeen een continue energietoevoer voor het behouden van de transparante fase [3], hoewel er recent systemen zijn ontwikkeld waarbij dit niet nodig is [7, 12]. Electrochromische zonwering beschikt over een geheugen van 12 tot 48 uur, waardoor er alleen een onderhoudende pulscorrectie vereist is. Hierbij, is de frequentie afhankelijk van het gebruikte materiaal [8, 13].

Gasochromische ramen worden geactiveerd door waterstof in plaats van elektriciteit. Omdat er lage concentraties

Tabel 2: Overzicht actieve systemen en bijbehorende lichttransmissie waarden

technologie	stimulus	visuele lichttransmissie transparent	visuele lichttransmissie translucient	energie consumptie
electrochromisch (EC)	electriciteit	70-50 %	3,5-10%	1-5 V
gasochromisch (GC)	waterstof	50-60%	11-15%	niet bekend
Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC)	electriciteit	80%	30%	24-100 V
Suspended Particle Device (SPD)	electriciteit	80%	50%	100 V

waterstof worden gebruikt (0,1-10%) bestaat er geen brandgevaar [9]. Door toevoeging van waterstof aan de raamconstructie verandert deze in gekleurde toestand. Het raam wordt transparant wanneer de waterstof wordt verwijderd door toevoeging van een ander transparant gas, zoals zuurstof [3]. Een nadeel van deze technologie is dat er gasleidingen nodig zijn voor de aansturing, welke installatieruimte vereisen [9].

Kleur en lichttransmissie

De translucente fase van de electrochromische systemen kunnen in verschillende kleuren uitgevoerd worden. Het is bij deze systemen bovendien mogelijk de transparantie stapsgewijs aan te passen. Als een groot glasoppervlakte is opgebouwd uit verschillende glaselementen, zal er altijd een klein kleurverschil ontstaan tussen de verschillende elementen, er ontstaat een zogenaamd schaakbord effect [14]. Een belangrijk nadeel van electrochromische beglazing is dat de kleurintensiteit van de translucente fase degradeert over lange tijd. Omdat de verschillende panelen in een gevel niet in gelijke mate zullen degraderen, zal er in de loop van de tijd een verkleuring waarneembaar zijn. Ook bij het vervangen van panelen zal het kleurverschil met de oude panelen opvallen [15].

Bij liquid crystal systemen kan, net als bij de electrochromische systemen, de translucente fase ook in verschillende kleuren uitgevoerd worden en is het mogelijk om de transparantie te variëren. Een verschil tussen het liquid crystal daglichtsysteem en de andere systemen is dat de verschillende standen van het systeem niet de zontransmissie beïnvloeden, waardoor de transmissiewaarden gelijk blijven aan die van het glas zelf [16]. Een nadeel van liquid crystal systemen is dat door UV licht er bij de systemen degradatie kan optreden, waardoor de transparante fase een beetje gelig wordt [3].

Bij suspended particle en gasochromische systemen is er slechts een zeer beperkte keuze mogelijk tussen verschillende kleuren. Suspended particle systemen worden alleen uitgevoerd in grijs en zwart tinten en de gasochromische systemen alleen in blauwtinten. Een voordeel van gasochromische systemen ten opzichte van electrochromische systemen is dat de ramen in de transparante fase over een hogere lichttransmissie beschikken, waardoor er meer zichtbaar licht wordt binnengelaten.

Omschakelsnelheid en levensduur

De omschakelsnelheid van electrochromische systemen is afhankelijk van de gebruikte kleurtechnologie en afmetingen van het systeem. Bij grotere paneelafmetingen neemt de reactietijd af. Bij temperaturen boven de 10°C worden

omschakelsnelheden gevonden variërend van 1 tot 7 minuten [14]. De omschakelsnelheid neemt af bij omgevingstemperaturen onder de 10°C, waarbij de omschakeltijd kan oplopen tot soms wel 85 minuten [3]. Liquid crystal en suspended particle systemen hebben een veel lagere omschakelsnelheid van respectievelijk 10 milliseconden [17] tot enkele seconden [13].

De gemiddelde levensduur van liquid crystal en suspended particle systemen ligt op $3 \cdot 10^6$ [17] tot 10^6 cycli [13]. Electrochromisch glas ligt daarbij in de buurt met 10^5 cycli [3]. Het is bij electrochromisch glas gebruikelijk een garantie van 5 tot 10 jaar te geven [3, 18]. Gasochromische systemen zijn nog niet commercieel leverbaar, deze bevinden zich in een onderzoeksfase.

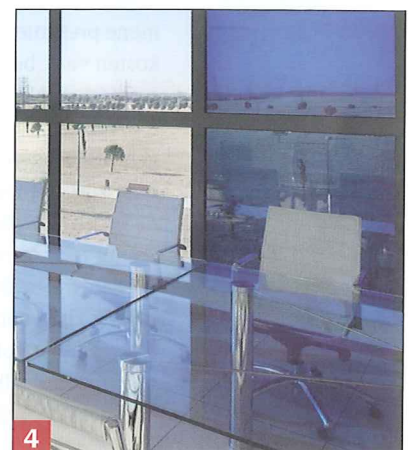
INTELLIGENTE VERSUS MECHANISCHE DAGLICHTSYSTEMEN

Intelligente daglichtsystemen worden op dit moment bij weinig projecten toegepast. Verschillende factoren moeten nog geoptimaliseerd worden, voordat de systemen geschikt zijn voor applicatie op grote schaal, zoals de afmetingen, omschakelsnelheid en duurzaamheid van de systemen. De toepassing van actieve intelligente daglichtsystemen op grote glasoppervlakken is niet optimaal. Bij de fabricatie op grote oppervlakken treden defecten op [7]. Een ander nadeel van intelligent daglichtsystemen zijn de hoge productiekosten, waardoor de toepassing van HR-glas met een traditionele zonwering een stuk rendabeler is. De kosten voor HR-glas is op het moment 145 €/m² in vergelijking met 700 €/m² voor electrochromische beglazing [19].

Intelligente daglichtsystemen hebben ten opzichte van mechanische systemen echter een paar belangrijke voordelen. Voor mechanische systemen is er een grotere con-



Liquid crystal systeem [11]

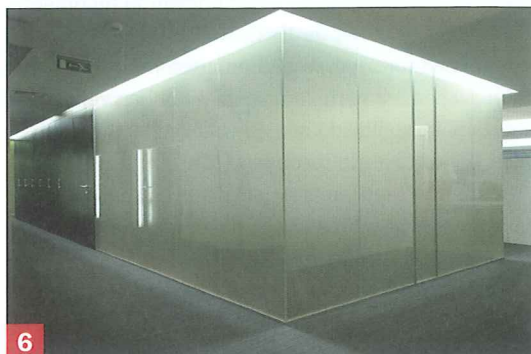


Electrochromisch systeem [18]



5

Liquid crystal systeem, transparant [18]



6

Liquid crystal systeem, translucet [18]

structieruimte nodig en ze zijn vaak onderhoudsgevoelig. Buitenzonwering is onderhevig aan weersinvloeden, waardoor deze sneller zullen uitvallen dan binnenzonwering (figuur 7) De meeste intelligente daglichtsystemen hebben deze nadelen niet, waardoor de installatie- en onderhoudskosten voor klimaatinstallaties en mechanische zonwering worden verlaagd. Daarnaast kunnen externe mechanische daglichtsystemen niet op grote hoogte worden toegepast in verband met de windbelasting. Intelligente systemen ondervinden geen nadelige effecten bij toepassing op hoogbouw. Ook produceren ze geen geluid bij de overgang tussen transparant en translucet, wat bij mechanische systemen meestal wel het geval is.

ONTWERPPARAMETERS

Er zijn veel factoren die van invloed zijn op de prestatie van intelligente daglichtsystemen. Voor de bouwfysische prestatie is de range aan transmissiewaarden van zowel het zichtbare licht als het niet zichtbare deel van het licht spectrum (IR en UV) van belang. In de literatuur wordt vaak alleen de transmissie van een enkele golflengte gegeven, maar dit geeft weinig informatie over de algemene prestatie van het systeem [3]. Daarnaast zijn de kosten vaak bepalend voor de keuze voor een bepaald systeem. De kosten hangen samen met de aanschafkosten, levensduur, het benodigde onderhoud en het energiegebruik. Andere kenmerken van intelligente daglichtsystemen zijn de thermische eigenschappen van de materialen, de bedieningsmogelijkheden, de overgangstijd van transparant naar translucet en eventueel het benodigde voltage. Tabel 3 geeft een overzicht van parameters die van belang zijn voor het ontwerp van intelligente daglichtsystemen. In de volgende paragraaf wordt verder ingegaan op de materiaalkeuze.



7

Traditionele mechanische daglichtsystemen zijn vaak erg onderhoudsgevoelig

Materiaalkeuze van de verschillende geveldelen

Voor de materiaalkeuze is het aan te raden om niet naar de gevel als één geheel te kijken, maar een onderscheid te maken tussen verschillende delen van de gevel. Wanneer gekeken wordt naar bijvoorbeeld de glazen vliesgevel van een kantoorvertrek kan deze opgedeeld worden in drie delen met ieder hun eigen functie. De bovenkant dient er vooral voor om daglicht diep in de ruimte te brengen, zodat er een gelijkmatige lichtverdeling ontstaat. Het middelste deel is belangrijk voor het uitzicht, en zorgt voor een hogere daglichttoetreding voor in de ruimte. De onderkant kan het gevoel van veiligheid en privacy van de kantoormedewerkers beïnvloeden. Ieder van deze delen heeft andere aandachtspunten. Door te kiezen voor afzonderlijk bedienbare geveldelen is het mogelijk om een gevel te ontwikkelen waarbij de verschillende functies optimaal tot hun recht komen. Het kan interessant zijn om hierbij verschillende (intelligente) daglichtsystemen met elkaar te combineren. Hiervan zijn echter nog nauwelijks voorbeelden te vinden. Nitz en Hartwig [5] bespreken een ontwerplossing waarbij thermotropische systemen worden gecombineerd met mechanische zonwering. Een nadeel van dit voorstel is dat het uitzicht op zichthoogte volledig wordt geblokkeerd. Voor het behoud van uitzicht kan beter gebruik worden gemaakt van chromische systemen.

CONCLUSIE

Intelligente daglichtsystemen beschikken over de voordelen van in het raam geïntegreerde materialen en dynamische zonwering. Met de toepassing van intelligente daglichtsystemen is het mogelijk om het uitzicht te handhaven en tegelijk de lichttransmissie en warmtetransmissie te verlagen, waardoor verblinding en nadelige effecten voor de warmte- en/of koellast worden voorkomen. Hierbij is een aanzienlijke energiewinst te halen.

Tabel 3: Ontwerpparameters voor het ontwerp van intelligente daglichtsystemen, gebaseerd op [20]

input	omvat	bepaalt
project locatie en omgeving	coördinaten locatie, context (bijv. stad of dorp), klimaattype (wind- en zonbelasting)	raamgrootte, systeemkeuze: isolatiewaarden, kleur en reflectie
gebouw dimensies	diepte, hoogte breedte gebouw, oriëntatie gevel, plattegrond	raamgrootte, systeemkeuze: isolatiewaarden zonwering en lichttransmissie
gebruik	functie gebouw/ruimte, benodigde lichtniveaus, belastingschema's (energie, warmte- en koellast)	bediening intelligent daglichtsysteem en kunstlicht, type ventilatie (natuurlijk of mechanisch), benodigde installaties
ontwerpdoelstellingen m.b.t. visueel comfort	uitzicht, daglichttoetreding, verblinding	raamgrootte, systeemkeuze: transparantie en transmissie zichtbaar licht, zonwering
complexiteit	mate van automatisering, installaties	bediening intelligent daglichtsysteem, kunstlicht en ventilatie, benodigde installaties
kosten	aanschafkosten, levensduur, onderhoud, energiegebruik	systeemkeuze, onderhoud, bedieningsstrategie

Op dit moment worden intelligente daglichtsystemen nog bij weinig projecten toegepast. Verschillende factoren moeten nog geoptimaliseerd worden, voordat de systemen geschikt zijn voor applicatie op grote schaal, zoals de kosten, afmetingen, omschakelsnelheid en duurzaamheid. Van alle beschikbare systemen is de ontwikkeling van electrochromische systemen op dit moment het verst gevorderd. Deze systemen hebben als groot voordeel dat in de translucente fase het uitzicht wordt behouden. Een nadeel van electrochromische systemen is dat er problemen kunnen ontstaan met de omschakelsnelheid tussen de transparante en translucente fase.

Er zijn veel parameters die een rol spelen bij de uiteindelijke keuze voor een bepaald type intelligente daglichtsysteem. Voor de materiaalkeuze wordt aanbevolen een onderscheid te maken tussen verschillende delen van de gevel, omdat deze ieder een andere functie hebben ten aanzien van het visueel comfort. ■

Een uitgebreide beschrijving van intelligente daglichtsystemen kunt u vinden in een artikel van Baetens e.a. [3]. Hierin worden de systemen besproken die op de markt zijn, evenals de materialisatie en precieze eigenschappen.

BRONNEN

- ▶ [1] Addington, M. and Schodek, D., Smart Materials and Technologies, 2005, Oxford: Architectural Press
- ▶ [2] Ansari, F., Maji, A., and Leung, C., Intelligent civil engineering materials and structures a collection of state-of-the-art papers in the applications of emerging technologies to civil structures and materials, 1997, New York: ASCE, 299
- ▶ [3] Baetens, R., Jelle, B.P., and Gustavsen, A., Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(2): p. 87-105
- ▶ [4] Watanabe, H., Intelligent window using a hydrogel layer for energy efficiency, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998, 54(1-4): p. 203-211
- ▶ [5] Nitz, P. and Hartwig, H., Solar control with thermotropic layers, Solar Energy, 2005, 79(6): p. 573-582
- ▶ [6] Platzer, W.J., Switchable Facade Technology - Energy Efficient Offices with Smart Facades, in ISES Solar World

Congress, 2003: Goteborg, Sweden

- ▶ [7] Lampert, C.M., Progress in switching windows, in Solar and Switching Materials 2001, San Diego, CA, USA: SPIE

- ▶ [8] Lampert, C.M., Large-area smart glass and integrated photovoltaics, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 76(4): p. 489-499

- ▶ [9] Lampert, C.M., Chromogenic smart materials, Materials Today, 2004, 7(3): p. 28-35

- ▶ [10] Wilson, H.R., Chromogenic Glazing: Performance and Durability Issues as Adressed in IEA task 27, 2002, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

- ▶ [11] www.pleotint.com, Pleotint, 2011-04

- ▶ [12] www.peerplus.nl, Peer+ Glass, 2010-04-07

- ▶ [13] www.smartglass.com, Smart Glass, 2011-04

- ▶ [14] Lee, E.S., et al., Advancements of Electrochromic Windows, P. California Energy Commission, Editor, 2006: Berkeley

- ▶ [15] Lee, E.S. and DiBartolomeo, D.L., Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 71(4): p. 465-491

- ▶ [16] Carmody, J., Window systems for high-performance buildings, 2004, New York: Norton, 400

- ▶ [17] www.interpane.com, Interpane, 2011-04

- ▶ [18] www.quantumglass.com, Saint-Gobain, 10/11/2009

- ▶ [19] www.nrel.gov, National Renewable Energy Laboratory, 14-10-2010

- ▶ [20] Ochoa, C.E. and Capeluto, I.G., Advice tool for early design stages of intelligent facades based on energy and visual comfort approach, Energy and Buildings, 2009, 41(5): p. 480-488

- ▶ [21] Hubalek, S., Brink, M., and Schierz, C., Office workers daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood, Lighting Research and Technology, 2010, 42(1): p. 33-50

- ▶ [22] Velarde, M.D., Fry, G., and Tveit, M., Health effects of viewing landscapes - Landscape types in environmental psychology, Urban Forestry & Urban Greening, 2007, 6(4): p. 199-212

- ▶ [23] Begemann, S.H.A., Van Den Beld, G.J., and Tenner, A.D., Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses, International Journal of Industrial Ergonomics, 1997, 20(3): p. 231-239