

Stefan Karlsson, RISE Research Institutes of Sweden
Lars Österlund, Uppsala universitet
Greger Gregard, Chromogenics
Per Larsson, Ray Space AB
Anders Carlsson, Linköpings universitet
Anders Askling, Nässjö Kommun



Möjligheter för multifunktionella fönster i flerbostadshus

Teknik, visualisering och prototyper

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Bakgrund	3
Smarta fönster	3
Elektrokroma fönster.....	5
Luftrengörande och självrengörande fönster	6
Risker med nya material i den byggda miljön	7
Visualisering – Dynamiskt fönster.....	8
Prototyp – Luftrengörande fönster	9
Prototyp – Autonomt Dynamiskt Fönster	11
Demovisning	14
Fortsättning.....	14
Referenser	14

Sammanfattning

Den här förstudien fokuserade på visualisering och prototyp tillverkning av dynamiskt fönster och luftrengörande fönster. Detta är viktigt för spridning av kunskap om nya smarta fönster, dels för företag som har intresse för ny teknologi men även för spridning av information till allmänheten. Resultatet av förstudien är en VR-visualisering av Chromogenics dynamiska fönster Converlight® samt en prototyp för luftrengörande fönster. Det senare är ett nytt koncept för smarta fönster där luftreningen drivs av solljus och som även kan kombineras med ett termokromt skikt som ger ett dynamiskt fönster som styrs av temperatur. Med dynamiskt fönster menas att det kan variera i ljusgenomsläpplighet och därmed även energitillförsel till byggnader och det kan användas för att skapa ett bättre inomhusklimat. Rengöringen av inomhusluften är ytterligare en del i att skapa ett bättre inomhusklimat. VR-visualiseringen och prototypen för luftrengörande fönster är viktiga för att skapa en förståelse för innebörden av teknologin och på så vis inducera en snabbare kommersialisering av teknologierna. Projektet är ett exempel på en god samverkan mellan två VINNVÄXT initiativ, Smart Housing Småland och Visual Sweden, där man nyttjat varandras nyckelkompetenser på ett kompletterande sätt.

Bakgrund

Smart Housing Småland arbetar genom ett "triple helix" perspektiv där man interagerar med akademi, näringsliv och offentliga aktörer [1]. Den här förstudien togs fram i samarbetet med Nässjö Kommun och dess arbete med att utveckla den nya stadsdelen Västra Staden som även kallas den "digitala trästaden". För att skapa ett nationellt intresse för Nässjö valde man att i samarbete med byggtreprenörer arbeta med innovationshöjande insatser och tog i samband med det kontakt med Chromogenics som en svensk producent av smarta fönster. Chromogenics produkt Converlight® är ett elektrokromt glas [2] som ger möjligheten till dynamiska fönster med variabelt värme- och ljusinsläpp. Converlight® är framförallt användbart i fastigheter som annars skulle behöva ett kylbehov för önskad komfort och som samtidigt ger ett energieffektivt fönster. I flerbostadshus används sällan aktiv kylning i Sverige men produkten kan ändå vara av intresse på grund av att man slipper exteriöra jalousier eller markiser för att minska värmeinsläppet. Chromogenics marknadsför dock produkten framförallt mot fastigheter med särskilt behov av inomhuskomfort t. ex. kontorsfastigheter eller offentliga fastigheter [3]. Privatpersoner är generellt sett mer priskänsliga och har generellt lägre fackkunskap och därför behövs förmodligen mer lättförståelig information om fördelarna med Converlight®. En heterogen projektgrupp skapades med bakgrund i bostadsrätter som planeras byggas av GBJ Bygg i Västra Staden med det specifika syftet att titta på visualiseringstekniker för smarta fönster. För att ytterligare öka innovationsvärdet inom förstudien valde man även att undersöka visualiseringstekniker av luftrengörande fönster [4] som är en möjlig framtida produkt. Projektgruppen som skapades består av:

- RISE Research Institutes of Sweden som även är projektägare av Smart Housing Småland.
- Nässjö kommun som är projektägare av Västra Staden i Nässjö.
- GBJ Bostadsutveckling som är GBJ-gruppens utvecklingsbolag och en aktör som är delaktig i utvecklingen av Västra Staden i Nässjö.
- Chromogenics som är en av få producenter av smarta fönster i världen.
- Uppsala universitet, lärosätet där spetsforskningen knoppade av Chromogenics och där utveckling av ny kromogen – och katalytisk teknik pågår.
- Linköpings universitet, lärosätet som driver VINNVÄXT-miljön Visual Sweden.

Utöver projektgruppen bidrog Elitfönster i diskussioner om teknologin och även med fönsterdelar till prototypstillverkningen av det luftrengörande fönstret. Ray Space bidrog i utveckling av visualisering i VR av Chromogenics Converlight®.

Smarta fönster

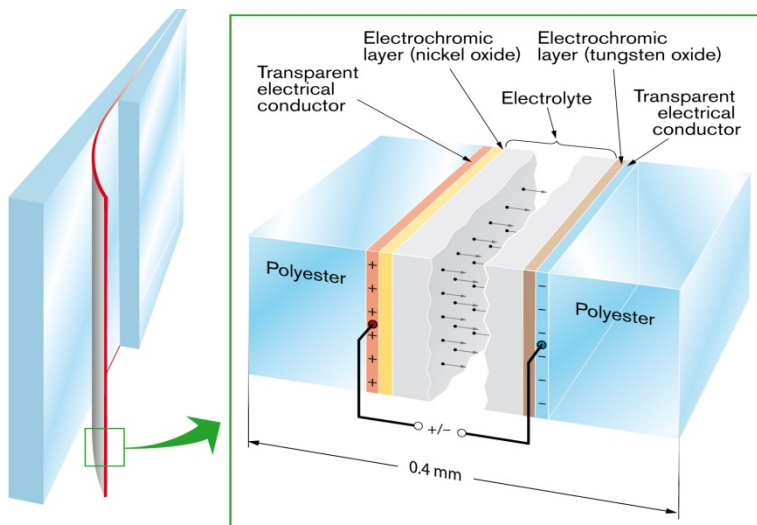
I utvecklingen av bostäder har man väldigt tidigt insett att fönster är viktigt för att släppa in ljus i bostäder och samtidigt hålla väder utanför. I Egypten upptäckte man tekniken att göra glas ca. 2000 år före Kristus och i samband med det romerska imperiet så hade man utvecklat tekniken att göra glas i tillräcklig storlek för att fungera som fönster [5]. Idag tillverkas fönsterglas genom en väldigt effektiv

process kallad float processen [6] till en mindre kostnad. I samband med oljekrisen 1973 påbörjas på allvar debatten och idén om att hushålla med energin. På 1980-talet utvecklades energibesparande fönster [7] som baserades på tunnfilmsteknologi av elektriskt ledande och transparenta tunnfilmer som möjliggjorde glas eller plast med hög värmereflektion och låg emission av värme. Samma idé med spektral selektivitet har man använt inom andra områden sedan åtminstone 1950-talet [8], t.ex. för glastermosar. I vardagligt tal har man sedan dess pratat om värmemotstånd av fönster, vanligen kallat R-värde, men det är vanligare att man använder det inverterade värdet som benämns U-värde och konstruktionens värmegenomgångskoefficient (betecknades förr i tiden K-värde), det vill säga konstruktionens förmåga att isolera värme vilket har enheten W/m^2K . Ett lågt U-värde av ett fönster ger dock ett insläpp av solenergi och samtidigt ett lågt utsläpp av värme, idealiskt i vinterklimat men i varmare klimat är det onödigt. Därför utvecklade man samtidigt ett annat alternativ som kallas solskyddsfönster som till skillnad från lågemittansbeläggningar (med förkortningen 'låg-E', eng. 'low-E') även reflekterar i det nära infraröda området men i praktiken även absorberar mer i det synliga området. Fönster har vanligen en, två eller flera spaltbredder av luft eller andra gaser som har lägre värmeledningsförmåga, och man kan då komma ner till U-värden på $<1 W/m^2K$ [9]. De andra gaserna är vanligtvis någon av ädelgaserna argon, krypton eller xenon som har väldigt låga värmeledningskoefficienter [10]. Vanligtvis används argon på grund av kostnadsskäl även om de andra är effektiva. Av samma skäl kan ett lägre U-värde erhållas med ett vakuumfönster, ner mot $0.2 W/m^2K$ har rapporterats [11, 12]. För lågemissions och solskyddsbeläggningar dominerar silverbaserade beläggningar vilket är direkt resultat av dess goda ledningsförmåga [9] och hittills har U-värde varit den dominerande och viktigaste egenskapen för fönster i kallt klimat [13]. Solkyddsfönster är dock inte flexibla i och med att det även gör fönstret mörkare så att mindre ljus släpps in i byggnaden. Idealiskt ska ett fönster endast vara mörkare när det är exponerat för starkt solljus. Det för oss in på begreppet smarta fönster som även ibland kallas dynamiska fönster. Nuförtiden har begreppet förmodligen en vidare mening med meningen att något aktivt sker på grund av ett yttre stimuli. Det finns flertalet tekniker för smarta fönster [14], en familj kan kallas elektrokroma fönster som baseras på variabel transparens som en funktion av applicerad spänning. Elektrokroma fönster kan tillverkas med olika typer av material t ex metalloxider (wolframoxid, nickeloxid, iridiumoxid, niobiumoxid etc.) och polymera elektrokroma material (polyanilin, poly(3,4-etylen-deoxytiofen) även kallad PEDOT etc.). En annan typ av smarta fönster är gasokroma fönster där vätgas används för förändring av variabel transparens istället för elektrisk spänning. Flytande kristaller är en annan typ som kan ge förmågan till variabel transparens genom applikation av elektriskt fält, flytande kristaller används frekvent inom displayteknologi. SPD (Suspended Particle Devices) liknar flytande kristaller där man riktar partiklar med hjälp av ett elektriskt fält och kan på så vis kontrollera samt variera transparensen. Termokroma material ändrar sin genomskinlighet då temperaturen ändras. Både polymera och oorganiska termokroma material finns. Till sist ska även fotokroma material nämnas. Denna klass av material fann tidigt sin tillämpning i glasögon och består av metall-organiska material. En ny typ av fotokroma oorganiska metall-oxyhydrid material har nyligen upptäckts med lovande egenskaper som lovar både bättre dynamisk cyklingsprestanda och hållbarhet. Avd. Fasts tillståndet fysik vid Uppsala universitet beforskar de flesta av de oorganiska typerna av material för dynamisk ljuskontroll.

Det stora kommersiella genombrottet för smarta fönster har ännu inte kommit men är nu på väg på grund av ökad efterfrågan på tekniker som kan öka inomhuskomfort och minska kylbehov som annars är en energikrävande process. Idag är den industriellt mest lovande typen av smarta fönster är det elektrokroma fönstret, där teknik – och processutveckling är mogen för storskalig tillverkning. Dynamiska fönster med variabel transparens är traditionellt det som kallas smarta fönster men nuförtiden kan man vidga begreppet och definiera smarta fönster där något aktivt sker som en respons på en trigger. Den här förstudien handlar även om luftrengörande fönster som baseras på fotokatalytiska tunnfilmer som bryter ner flyktiga organiska ämnen i vår inomhusluft med hjälp av UV-ljus ifrån solen, samt kombinationer av kromogena och katalytiska beläggningar som medger synergistiska effekter för ökad inomhuskomfort.

Elektrokroma fönster

En elektrokrom (EC) anordning, [15, 16], kan liknas vid ett elektriskt batteri med anod, katod, och mellanliggande elektrolyt, utgörande tunna skikt på ett genomskinligt underlag eller mellan två genomskinliga material (glas eller polyester), se Figur 1. Optisk absorption uppkommer då "batteriet laddas" genom eltillförsel från en nätansluten eller autonom (solcellsbaserad) strömkälla, och genomskinlighet uppkommer vid urladdning. Sedan 1980-talet har i forskning på EC material och anordningar bedrivits och ett antal olika design-principer för elektrokroma smarta fönster har tagits fram. Man kan belägga fem tunna skikt på varandra på glas eller plastfolie enligt följande: 1. Ett elektriskt ledande och optiskt transparent skikt av tenn-dopad indiumoxid (ITO), 2. wolframoxid (WO_3), 3. tunnfilmjonledare (vanligen innehållande Li joner). 4. motelektrod, normalt bestående av nickeloxid (NiO), och 5. ITO [17]. Då en elektrisk spänning läggs mellan de två ITO skikten drivs de positiva jonerna i elektrolyten från NiO-filmen till WO_3 -filmen varefter båda oxidskikten mörknar. Läggspänningen i motsatta riktningen transporterar jonerna åt andra hållet och båda skikten blir genomskinliga. Fördelarna med denna design är att alla skikt kan beläggas i samma sputter-utrustning, samt att utmärkta optiska egenskaper, dvs. stor kontrast mellan transparent och mörkt tillstånd, kan erhållas. I en alternativ design har man använt två glas med tillhörande sputtrade ITO- och EC beläggningar som lamineras med en polymer jonledare [18]. Jonledarskiktet blir relativt tjockt vilket leder till god isolering och en försumbar elektronisk läckström. Dessa två typer av EC anordningar har idag kommersialiserats av industriella aktörer. EC smarta fönster av den senare typen sputtrade på plastfolier i stället för glas tillverkas sedan 2016 i Sverige av företaget ChromoGenics AB. Figur 1 visar en principskiss för ett ChromoGenics EC fönster, vilken utvecklats av forskargruppen på Avdelning för Fasta tillståndets fysik på Uppsala universitet. Affärsmodellen för ChromoGenics är att sälja polymerbaserade EC folier till fönstertillverkare, som sedan kan laminera dem mellan glasrutor och använda dem i fönster och glasfasader. Denna strategi kommer att innebära att fönster- och byggindustrier deltar i den tekniska utvecklingen.



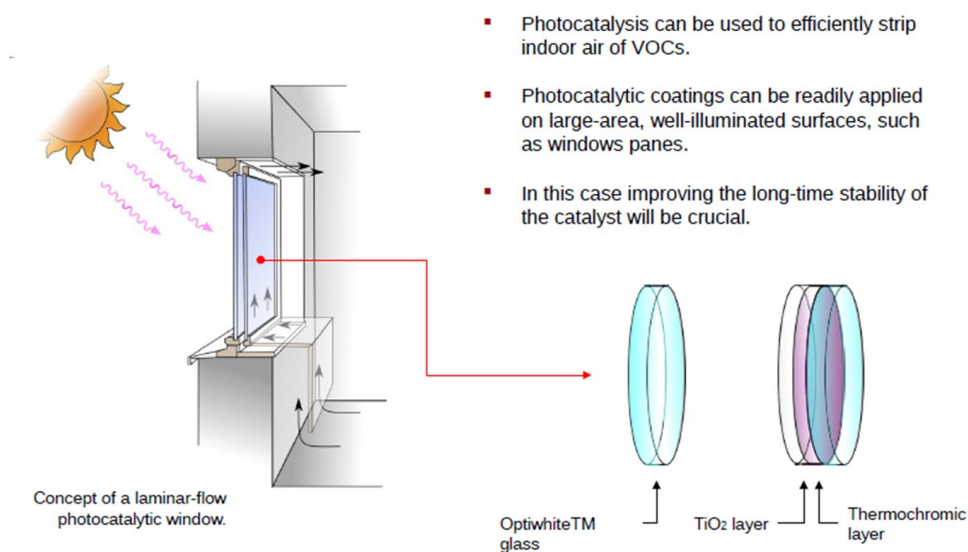
Figur 1. Principskiss för en elektrokrom anordning baserad på plastsubstrat av polyester, till vänster visas hur denna foliestruktur kan lamineras mellan glas för att integreras i ett fönster.

Luftrengörande och självrengörande fönster

Genom fotokatalys kan beläggningar av så kallade halvledande metalloxider oxidera hälsoskadliga organiska ämnen då det aktiveras med solljus. Den fotokatalytiska processen är välkänd och används i kommersiella produkter för luftrening där TiO_2 nanopartiklar belyses av UV lampor i en fläktdriven filteranordning. En annan produkt som finns på marknaden sedan drygt ett decennium är fönster belagda med TiO_2 på den yttre rutan. De säljs av alla stora fönsterleverantörer i Sverige och produceras i flera tusen km^2 årligen. Dessa fönster uppvisar hydrofila egenskaper då det belyses med solljus och vatten helt flyter ut på ytan utan att bilda vattendroppar vilket medför att dimbildning undviks. Dessutom vidhåfter smuts inte lika lätt på dessa ytor och det sköljs bort då vatten väter ytan, varför dessa fönsterbeläggningar benämns självrengörande. En mycket tunn film av TiO_2 (bara ca. 10 nm tjock) beläggs med kemisk förångningsteknik på glas på ett tunt spärrskikt (typiskt kiseloxid) för att undvika diffusion av natriumjoner från glaset till TiO_2 skiktet vilket annars deaktiverar den katalytiska aktiviteten för ytan.

Principen för den ljusinducerade oxidationsmekanismen baseras på absorption av ljus (TiO_2 absorberar i UV områden, dvs. våglängder mindre än ca. 400 nm) vilket genererar energirika elektroner som kan reagera med syre, vatten och organiska ämnen på ytan av TiO_2 [19]. Normal inomhusluft innehåller vattenånga (den relativa luftfuktigheten brukar ligga mellan 30-70 % i Sverige). En oxidfilm av TiO_2 är hygroskopisk och en vattenfilm bildas därför på dess yta, vilket betyder att den ljusinducerade reaktionen i TiO_2 framför allt producerar hydroxyl- och syreradikaler. Forskargruppen på Avdelningen för Fasta tillståndets fysik vid Uppsala universitet har utvecklat metoder att optimera både

de fotokatalytiska [20] och de självrengörande [21] egenskaperna för tunna TiO₂ skikt på glas. Forskarna har påvisat att man kan konstruera fönsterbeläggningar som renar luft som passerar en spalt mellan två glas, där det ena är belagt med en TiO₂ film [22] och har därmed hittat en lösning på ett problem som tidigare omöjliggjort fotokatalytisk luftrening, nämligen ansamling av produkter från ofullständig oxidation som blockerat den katalytiska aktiviteten. Figur 2 visar en utveckling av denna teknologi, där ett fotokatalytiskt skikt kombineras med ett termokromt vanadiumoxid (VO₂) skikt. Det termokroma (TC) skiktet modulerar transmissionen av ljus, speciellt den infraröda delen av solljuset. Då filmen blir varm minskar ljusinsläppet, då den blir kall igen så blir den åter transparent; analogt med den reversibla spänningskontrollen av ett EC fönster. Kombinationen medger en synergistisk effekt som ökar både transmissionen av synligt ljus för dubbellagret jämfört med ett enkelt VO₂ skikt, och samtidigt fördubblar den fotokatalytiska aktiviteten, se figur 2.



Figur 2: Principskiss för luftrengörande fönster baserad på fotokatalytisk luftrening och kombinationen med termokromt skikt.

Risker med nya material i den byggda miljön

Noga övervägande av potentiella negativa hälsoeffekter måste alltid göras när man introducerar nya material i den byggda miljön. De beläggningar och beläggningstekniker som vi avhandlat i denna rapport resulterar i mekaniskt tåliga beläggningar eller anordningar (av EC eller TC typ) där de aktiva skikten inte är exponerade mot omgivningen. Icke desto mindre måste man försäkra sig att materialet inte medför hälso – eller miljörisker i en livscykelanalys. Riskerna med de vanligt förekommande wofram-, nickel- och titanoxiderna kan anses vara små baserad på tillgängliga data, men bör undersökas i alla processled då de kan förekomma i nanopartikulär form under både tillverkning och

eventuell destruktion/återanvändning. Nanotoxikologidata för NiO och WO₃ nanopartiklar är bristfällig medan förhållandevis mycket data för TiO₂ finns tillgänglig. Fler miljoner ton TiO₂ partiklar tillverkas årligen som färgpigment (70%) och tillsats i livsmedel. År 2010 tillverkades ca. 5,000 ton TiO₂ nanopartiklar, där det vanligaste användningsområdet är solkrämer [23]. TiO₂ används som färggivande tillsats i livsmedel och har det europeiska livsmedelstillsatsnumret E171. Weir et al. [23] har rapporterat att barn exponeras för 2 mg/kg/dag av TiO₂ partiklar i mat eller kosmetiska produkter, varav 36% är nanopartiklar. Även om TiO₂ nanopartiklar generellt inte anses vara cytotoxiska har det rapporterats att de kan ge upphov till inflammatoriska reaktioner i humana cellinjer [24] och preventiva procedurer och rutiner för främst produktion, destruktion och återanvändning bör därför utarbetas för att eliminera potentiella risker.

Visualisering – Dynamiskt fönster

För att på enkelt sätt kunna visa skillnaden mellan så kallade smarta fönster där fönstret ändrar på genomsläpplighet av solljus och fasta markiser som fysiskt blockerar solljus skapades en demonstrator i Virtual Reality (VR). För att göra VR miljön så realistisk och användbar som möjligt har inkluderades även en del inom scen-återskapande vilket möjliggör att det går att fånga en befintlig miljö till exempel ett kontor och sedan bygga upp den i VR med smarta fönster och direkt kunna se hur dessa fungerar. Ur ett tekniskt perspektiv är resultatet en demonstrator som tillåter användaren att testa två typer av solskydd, det ena bygger på ChromoGenics smarta fönster och det andra på en mer traditionell version med fysiska fasadmarkiser. Inledningsvis tog vi in och processade mätningar från en lägenhet med både fasad och takfönster. Vi valde ut en del av lägenheter för demonstratorn och utvecklade tekniken för att dimma fönsterna. Efter lite testande insåg vi att det är nödvändigt att visualisera större fönster för att uppnå en bättre känsla för hur fasadmarkiser faktiskt tar bort kontakten med utemiljön. För att uppnå detta gjordes ytterligare en VR miljö denna gång helt på digital väg så det gjordes ingen ny insamling av data då det redan har visats fungera väl och vi ej hade tillgång till en sådan fysisk miljö. Den nya miljön består av en enplans villa med stora fönster i samtliga riktningar. I figur 3 visas skillnaderna mellan smarta fönster och fasadmarkiser. Redan här går det tydligt att se hur markiserna stänger ute utemiljön betydligt mer än smarta fönster.



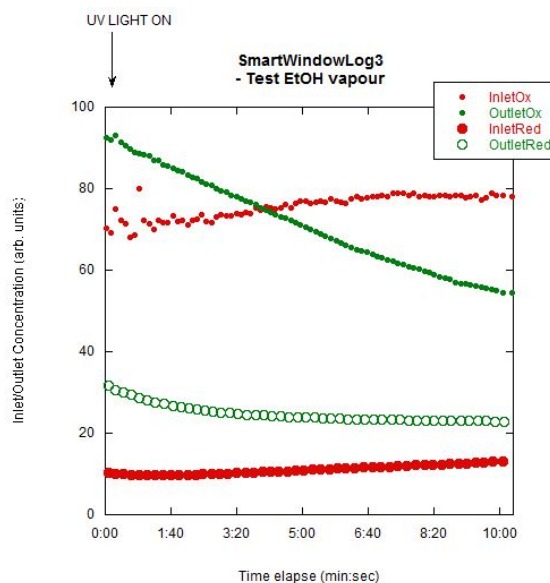
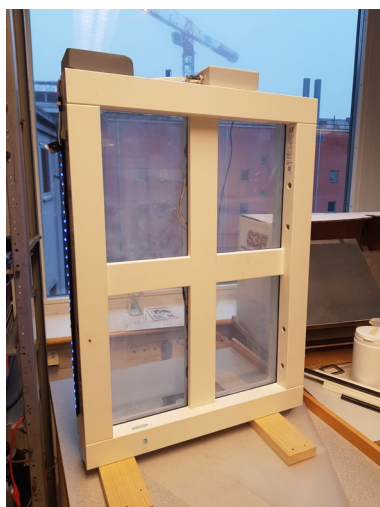
Figur 3: Bilder från demonstratorn. Översta raden från vänster är helt utan solskydd överst till höger är med fysiskt skydd (fasadmarkis). Stora bilden är med ChromoGenics smarta fönster.

Då det finns flera tillverkare av VR headsets har vi valt att testa två olika typer, där den stora skillnaden är att den ena typen kräver en stationär dator samt att det monteras upp tracking hårdvara i rummet där VR miljön ska upplevas. Denna typ av headset ger generellt lite bättre realism och kan hantera betydligt mer avancerade scener men den är också betydligt dyrare och kräver en fast installation. Den andra typen av headset är ett headset som innehåller allt i form av både display och hårdvara för att generera VR miljön, dessa headset kräver inte heller någon fast installation utan går enkelt att ta med och demo hos kund. Dock blir grafiken lite mindre realistisk och scenerna måste begränsas lite. Efter att ha testat och utvärderat båda varianterna tog vi beslutet att kostnaden och den enklare installationen var fördelaktig för ändamålet och utvecklade därför slutversionen av demonstratorn för Oculus Quest vilket är ett headset som inte kräver någon stationär dator.

Prototyp – Luftrengörande fönster

I projektet har ett spröjsat 2-glas fönster med fotokatalytisk TiO_2 beläggning för rening av inomhusluft konstruerats (figur 4). Insidan på det ena fönsterglaset är belagd med en TiO_2 beläggning. I detta projekt har en sol-gel-baserad metod används för att syntetisera reaktiva TiO_2 partiklar, som vi tidigare

patenterat [25]. Beläggningen har >10 ggr högre effektivitet än motsvarande kommersiella TiO₂ material vilket är nödvändigt för att uppnå önskad reningsgrad i en luftpassage genom fönstret. Det andra glaset är ett järnfritt glas med god transparens för UVA ljus (300 nm < λ < 400 nm). Luftkanaler är borrarade mellan de fyra fönsterpanelerna och ett luftflöde drivs genom de fyra 2-glaspanelerna med en liten fläkt eller genom naturlig konvektion. Ingen flödesmekanisk modellering av luftströmmen genom fönster har gjorts i detta projekt. Den föreliggande prototypen uppvisar dock principen och den grundläggande funktionaliteten. Fönstret har utrustats med gassensorer i spalten mellan glasen; en sensor vid inloppet och en i ramen mellan den tredje och fjärde glaspanelen där också en fukt- och temperatursensor är placerad. Utsignalen från sensorerna är kopplad till en kontrollenhet som trådlöst skickar signalerna vidare till en dator eller mobiltelefon genom ett Bluetooth protokoll. En mobilapplikation har gjorts för att samla in och visualisera sensormätdata.



Figur 4. Fotografi av fönster belagd med ca 100 nm tjock TiO₂ film med sol-gelmetod, samt sensordata för koncentration av in- och utloppskoncentration av en injicerad etanolpuls.

En kontrollbox med ett 5-poligt kontaktdon ger signalerna för RGB-remsan och sensorns LED remsa. Det finns tre sensorer - 2 flerkanalsgassensorer märkta inlopp och utlopp och RH & T-sensorer. Varje sensor har sin egen digitala adress så det spelar ingen roll var den är ansluten, så länge inloppssensorn är korrekt placerad på fönstergasinloppet och utloppssensorn placeras nära utloppet. RH & T-sensorn kan placeras oavsett (men uttaget föredras eftersom det ger en bättre bild av förhållandena inuti fönstret).

1. Ström: Inställningen kan drivas antingen med en USB-adapter via den medföljande USB-kabeln eller med en strömadapter (mittpositiv) kompatibel med Arduino-eluttaget. Spänningen är 5V för USB eller 7,5 - 12 V genom eluttaget.

2. Funktionsprincip: Styrenheten läser signalen från gassensorerna 50 gånger per sekund och beräknar värdena för RGB-remsorna och visar en lutning över de 30 lysdioderna. RGB-displayen är självkalibrerande, vilket betyder att den kommer att baseras på den lägsta och högsta signalen från gassensorerna. Informationen kan också hämtas via en Android-app på en enhet ansluten till Bluetooth (BT). BT-anslutningen görs via en BT-adapter och data skickas via en begäran till styrkortet med kommandot "GE" (ingen rad slutar). Inställningarna för den seriella anslutningen är en standard 9600-8-1 och kan nås även via den seriella anslutningen över enhetens USB-port. Styrenhetsrutan svarar genom att skicka en datalinje i formen:

AX.XXXXBY.YYYYCZ.ZZZDX.XXXEY.YYYYFZ.ZZZGXX.XXHYY.YYI,

där mellan A & B ox-signalen från inloppssensorn sänds, mellan B & C sänds den röda signalen från inloppet, mellan C & D sänds NH₃-signalen från inloppet följt av röd, ox och NH₃ hos utlopp mellan D & E, E & F respektive F & G, därefter temperaturen mellan G & H och fuktighet mellan H & I. Uppgifterna analyseras av Android-appen och visas. Datasträngen skickas utan radslut.

3. En applikation för Android OS har gjorts för BT avläsning av sensordata. Data uppdateras varannan sekund och visas som värden och ett diagram. Sensordata presenteras som volt inuti applikationen, men beräknas om för att lättare visualiseras (det beräknas som om motståndet från gassensorn driver en spänningsdelare som i tidigare inställningar - det bör vara i intervallet 0 - 5V). I loggfilen sparas emellertid som gassensorns motstånd. Loggfilen sparas i smartkortens SD-kortkatalog (den kan hittas med hjälp av filhanteringsapplikationen för smarttelefonen). Loggen läggs till varje gång en ny logg startas (det vill säga den gamla informationen bevaras). Varje gång en ny logg startas kommer den att separeras med en tidsstämpel för den nya loggen. Uppgifterna sparas som en tabell med märkta kolumner, som innehåller alla motstånd (inlopp, utlopp, reducerande gaser, oxiderande gaser, NH₃), samt värden för temperatur i C och RH i %.

Prototyp – Autonomt Dynamiskt Fönster

Den här prototypen är en framtagna produkt av Chromogenics, i samarbete med andra aktörer i ett relaterat projekt: "Smarta Multifunktionella Glas" finansierat av Vinnova (Dnr. 2018-01558). Prototypen är viktig i sammanhanget flerbostadshus eftersom produkten är autonom och inte kräver någon extern elförsörjning och därför berättigad att presenteras i denna rapport.

Produkten ser ut som ett vanligt fönster men med skillnaden att den har en liten solcell som sitter på utsidan av fönsterbågen i fönstrets nederkant, se figur 5. Glaset är elektrokromt dvs glasets transparens för solljus (både värmestrålning och synligt ljus) kan förändras med hjälp av en elektrisk signal. Dolt i

fönsterbågen, alternativt i en liten diskret box på fönsterbågen, sitter ett litet kretskort med elektronik och ett laddningsbart batteri, se figur 6.



Figur 5: Foto av autonomt dynamiskt fönster där man ser att det sitter en liten solcell i nederkant.



Figur 6: Elektronik och batteri för det autonoma dynamiska fönstret kan antingen sitta i ett litet hålrum i fönsterbågen (se foto till vänster ovan) alternativt kan elektronik och batteri sitta i en liten box på fönsterbågen, då kan den i vissa fall tom installeras i efterhand på ett redan installerat fönster (se foto till höger ovan).

Det elektrokroma glaset består av en elektrokrom plastfolie som är inlaminerad mellan två glasskivor, se figur 1 för principskiss. Den elektrokroma folien har två elektriskt ledande transparenta skikt, två elektroder, anod och katod, samt en jonledande elektrolyt. Elektrokemiskt fungerar den mycket likt ett

laddningsbart litiumbatteri, med den skillnaden att när den är uppladdad minskar foliens transparens (mörkt läge) för ljus och värmestrålning, medan när den laddas ur ökar transparensen (ljus läge). Likheter med ett batteri gör att den drar i stort sett ingen energi när den är i vila, oavsett om glaset är i det mörka eller ljusa läget. Dock går det åt en del energi vid växling mellan mörkt och ljus läge (storleksordningen 100 J/m²). Även urladdningen drar energi då urladdningen vid kortslutning är alldeles för långsam så att man måste lägga på en negativ spänning för att snabba upp urladdningen. Glaset blir aldrig helt ogenomskinligt men i det mörka läget stoppas ca 90 % av solinstrålningen. 90 % gör avsevärd skillnad för hur mycket uppvärmning som sker av lokalen och hur mycket lokalen behöver kylas. Tack vare det mänskliga ögats stora dynamiska område och förmåga att anpassa sig till olika starkt ljus så innebär reduktionen med 90 % att man en solig dag fortfarande får in tillräckligt med dagsljus och även kan se ut genom fönstret utan problem.

Solcellen används till två olika uppgifter. Den första är att ladda batteriet med energi som sedan används för att strömförsörja elektroniken samt till att ladda upp och ur glaset vid växling mellan ljus och mörkt läge. Den andra uppgiften är att fungera som sensor och mäta solljusets intensitet. Den ström som solcellen ger över en väl vald resistans är i huvudsak proportionell mot solljusets styrka. Den uppmätta solljusintensiteten används sedan av processorn för att styra om glaset skall sättas i mörkt eller ljus läge. Normalt sätts glaset i mörkt läge vid solljusintensitet som överstiger 25000 Lux. Genom att solcellen sitter på fönsterbågen och i samma riktning som glaset, är den uppmätta intensiteten representativ för hur mycket solstrålning som faller in mot fönstret. För att klara av att strömförsörja fönstret är dimensioneringen av solceller (och batteriet) viktigt för att energin i batteriet aldrig skall ta slut oavsett väderförhållanden och årstid. På sommaren kommer fönstret förstås att mörkas ofta och även ljusas upp ofta (på natten eller när moln passerar) så att fönstret behöver mycket energi, men den energi som kan utvinnas är också väsentligt större på sommaren med fler ljusa timmar per dygn. Under vintermånaderna kan betydligt mindre energi erhållas från solcellen men då behöver fönstret inte heller mörkas lika ofta.

Det laddningsbara batteriet laddas kontinuerligt från solcellen och försörjer elektroniken med ström samt glaset vid mörkning och ljusning. Batteriet måste lagra tillräcklig energi för att försörja elektroniken även under de ibland långa perioder under vintermånaderna då solstrålningen är mycket liten. Vid starkt solljus skall fönstret mörkas vilket drar energi men samtidigt genererar solcellen energi. När solen går ner eller i moln skall fönstret ljusas upp vilket även det drar energi som då inte kan erhållas från solcellen utan måste tas från batteriet. I nuvarande design används ett vanligt NiMH-batteri. Elektroniken är byggd på ett litet kretskort för närvarande 65 x 22 mm stort. Från kretskortet går sex kablar, två till batteriet, två till solcellen och två till det elektrokroma glaset.

Demovisning

Den 29:e november vid Träcentrum hölls en demovisning av visualiseringen av Converlight och prototypen luftrengörande fönster. Deltagare ifrån RISE, Visual Sweden, Linköpings universitet, Smart Housing Småland, Uppsala universitet, Nässjö Kommun, GBJ Bostadsutveckling, Ray Space, Elitfönster, Nordan, Peab, Linden Fastighet och Forserum Safety Glass deltog i eventet.

Fortsättning

Visualiseringen och den luftrengörande prototypen som är direkta och dessutom fysiska resultat ifrån den här studien kommer förmodligen att vidareutvecklas av Chromogenics respektive Uppsala universitet. De kommer även att återanvändas i sammanhang där det lämpar sig att visa upp dessa. Rapporten är även den ett resultat som till skillnad från vetenskapliga artiklar och patent är på svenska och mer populärvetenskaplig, på så vis är förhoppningen att den kommer till gagn för svenska företag men även för allmänheten. Sett ur ett längre perspektiv med bakgrunden i att Sverige är och har varit världsledande inom smarta fönsters teknologi i flera årtionden så finns det ständigt en plan att skapa nya större projekt så att den kulturen kan fortsätta. Projektet har även visat på en god samverkan mellan två VINNVÄXT initiativ, Smart Housing Småland och Visual Sweden, där man nyttjat varandras nyckelkompetenser på ett bra sätt och med en förhoppning om att det kan leda till ytterligare samarbeten.

Referenser

1. Etzkowitz, H. and L. Leydesdorff, *The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations*. Research policy, 2000. **29**(2): p. 109-123.
2. Niklasson, G.A. and C.G. Granqvist, *Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these*. Journal of Materials Chemistry, 2007. **17**(2): p. 127-156. DOI: 10.1039/b612174h.
3. Lagerbielke, E., L. Grund Bäck, M. Lang, and T. Sirkka, *Förstudie - Ny glasgång för Kulturparken Småland: Hur kan transparent intelligens utnyttjas i en offentlig miljö?* 2016, Smart Housing Småland.
4. Stefanov, B., *Doctoral Thesis: Photocatalytic TiO₂ thin films for air cleaning: Effect of facet orientation, chemical functionalization, and reaction conditions*. 2015, Uppsala University.
5. Bricknell, D., *Float: Pilkington's Glass Revolution*. 2009: Carnegie Publishing.
6. Pilkington, L.A.B., *Review Lecture - The Float Glass Process*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1969. **314**(1516): p. 1-25.



7. Lampert, C.M., *Heat mirror coatings for energy conserving windows*. Solar Energy Materials, 1981. **6**(1): p. 1-41.
8. Gillham, E.J. and J.S. Preston, *Transparent Conducting Films*. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1952. **65**(8): p. 649.
9. Granqvist, C.G., *Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007. **91**(17): p. 1529-1598. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.031>.
10. Hanley, H.J.M., R.D. McCarty, and W.M. Haynes, *The Viscosity and Thermal Conductivity Coefficients for Dense Gaseous and Liquid Argon, Krypton, Xenon, Nitrogen, and Oxygen*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1974. **3**(4): p. 979-1017. DOI: 10.1063/1.3253152.
11. Manz, H., S. Brunner, and L. Wulschleger, *Triple vacuum glazing: Heat transfer and basic mechanical design constraints*. Solar Energy, 2006. **80**(12): p. 1632-1642. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.003>.
12. Cuce, E. and P.M. Cuce, *Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **54**: p. 1345-1357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.134>.
13. Jelle, B.P., A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, and R. Hart, *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012. **96**(0): p. 1-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.08.010>.
14. Baetens, R., B.P. Jelle, and A. Gustavsen, *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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>.
15. Mortimer, R.J., D.R. Rosseinsky, and P.M. Monk, *Electrochromic materials and devices*. 2015, Weinberg, Germany: John Wiley & Sons.
16. Granqvist, C., *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. 1995, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
17. Sbar, N., M. Badding, R. Budziak, K. Cortez, L. Laby, L. Michalski, T. Ngo, S. Schulz, and K. Urbanik, *Progress toward durable, cost effective electrochromic window glazings*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1999. **56**(3): p. 321-341. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00141-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00141-X).
18. Granqvist, C.G., *Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices*. Thin Solid Films, 2014. **564**: p. 1-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.02.002>.
19. Fujishima, A., K. Hashimoto, and T. Watanabe, *TiO₂ Photocatalysis, Bkc*. 1999: Tokyo, Japan.
20. Stefanov, B.I., G.A. Niklasson, C.G. Granqvist, and L. Osterlund, *Quantitative relation between photocatalytic activity and degree of $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ orientation for anatase TiO₂ thin films*. Journal of Materials Chemistry A, 2015. **3**(33): p. 17369-17375. DOI: 10.1039/c5ta04362j.
21. Topalian, Z., G.A. Niklasson, C.G. Granqvist, and L. Österlund, *Photo-fixation of SO₂ in nanocrystalline TiO₂ films prepared by reactive DC magnetron sputtering*. Thin Solid Films, 2009. **518**(4): p. 1341-1344. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.230>.
22. Stefanov, B.I., G.A. Niklasson, C.G. Granqvist, and L. Österlund, *Gas-phase photocatalytic activity of sputter-deposited anatase TiO₂ films: Effect of $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ preferential orientation, surface temperature and humidity*. Journal of Catalysis, 2016. **335**: p. 187-196. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2015.12.002>.
23. Weir, A., P. Westerhoff, L. Fabricius, K. Hristovski, and N. von Goetz, *Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products*. Environmental Science & Technology, 2012. **46**(4): p. 2242-2250. DOI: 10.1021/es204168d.



SMART
HOUSING

SMÅLAND

24. Ekstrand-Hammarström, B., C.M. Akfur, P.O. Andersson, C. Lejon, L. Österlund, and A. Bucht, *Human primary bronchial epithelial cells respond differently to titanium dioxide nanoparticles than the lung epithelial cell lines A549 and BEAS-2B*. *Nanotoxicology*, 2012. **6**(6): p. 623-634. DOI: 10.3109/17435390.2011.598245.
25. Österlund, L., M. Leideborg, and G. Westin, *PRV/P726SE00: Highly reactive Photocatalytic material and manufacturing thereof*. 2009.

SMART HOUSING SMÅLAND

351 96 VÄXJÖ
TEL 010-516 50 00
E-MAIL INFO@SMARTHOUSING.NU
SMARTHOUSING.NU



SMART HOUSING SMÅLAND

351 96 VÄXJÖ
TEL 010-516 50 00
E-MAIL INFO@SMARTHOUSING.NU
SMARTHOUSING.NU