

Stand der Anwendung der Elektrochromie in der Architektur

Dr. Sabine Heusing, Prof. Dr. M.A. Aegerter

INM - Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH

Im Stadtwald, Gebäude D2 2, 66123 Saarbrücken

Tel.: ++49 (0)681 9300 327, Fax: ++49 (0)681 9300 249,

e-mail: sabine.heusing@inm-gmbh.de, <http://www.inm-gmbh.de>

Vorstellung elektrochromer Systeme

Elektrochrome Materialien ändern ihre optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion) reversibel bei Reduktion bzw. Oxidation, was z.B. durch Anlegen einer Spannung und Fließen eines elektrischen Stromes bewirkt werden kann [1, 2]. Großflächige elektrochrome (EC) Verglasungen können als „Smart Windows“ und Sonnendächer zur variablen Kontrolle der Energieeinstrahlung in der Gebäude- und Fahrzeugverglasung eingesetzt werden und dadurch zur Energieeinsparung beitragen. Weitere Anwendungen für EC-Systeme sind EC-Displays und selbst abblendbare EC-Automobil-Rückspiegel, die bereits seit mehreren Jahren auf dem Markt verfügbar sind (Gentex, Magna Donnelly). Beispiele für elektrochrome Materialien sind anorganische Komplexe (z.B. Berliner Blau), organische Moleküle (z.B. Viologene => Anwendung in EC-Automobil-Rückspiegeln), organische Polymere (z.B. Polyanilin, PEDOT) und eine große Anzahl von Übergangsmetalloxiden (z.B. Wolframoxid (WO₃), Nioboxid (Nb₂O₅), Nickeloxid (NiO)).

Eines der bekanntesten und häufig verwendeten EC-Materialien ist Wolframoxid (WO₃). WO₃ Schichten ändern ihre Farbe reversibel von transparent nach tiefblau bei Reduktion und gleichzeitigem Einbau („Interkalation“) von kleinen Ionen (z.B. H⁺, Li⁺) aus dem Elektrolyten, während sie bei Oxidation und Ausbau (Deinterkalation) der Ionen entfärben:



Es gibt verschiedene Konfigurationen von EC-Fenstern. Ein typischer Aufbau vom Batterietyp ist in Abbildung 1 gezeigt. Das EC-System besteht aus 5 funktionellen Schichten die zwischen zwei Glasscheiben angeordnet sind. Jede Glasscheibe ist mit einer transparenten leitfähigen Schicht beschichtet (TE, z.B. ITO (Indiumzinnoxid)

oder FTO (Fluor-dotiertes Zinnoxid wie z.B. K-Glas)). Eine der TE-Schichten wird mit einer elektrochromen Schicht (EC1, z.B. WO_3), die andere mit einer Ionenspeicherschicht (IS-Schicht) bzw. einer zweiten EC-Schicht (EC2) beschichtet. Beide Schichtsysteme werden mit einem ionenleitenden Elektrolyten verbunden (z.B. Li^+ -Ionenleiter), der eine sehr geringe Elektronenleitfähigkeit besitzen soll. Die elektrischen Kontakte werden an den TE-Schichten befestigt. Es gibt auch Systeme mit festen Elektrolyten die als Schichtverbund auf nur einem Glassubstrat („monolithisch“) aufgebracht sind (Saint-Gobain Glass [3], SAGE Electrochromics [4]).

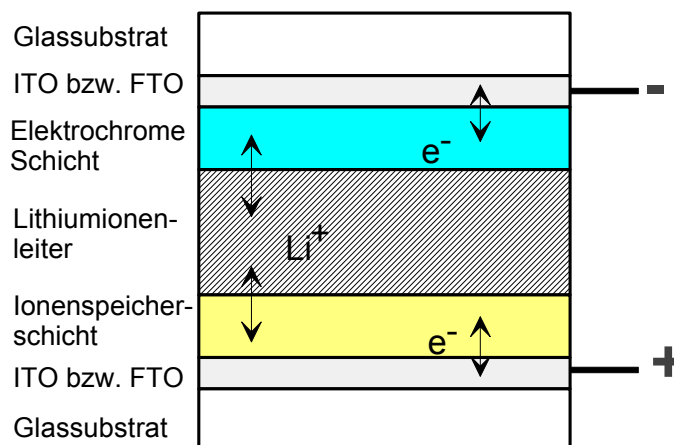


Abbildung 1: Aufbau einer elektrochromen (EC) Dünnschichtzelle

Bei Anlegen einer Spannung mit negativer Polarisierung an der WO_3 -Seite wird WO_3 reduziert und gleichzeitig diffundieren Li^+ -Ionen in die WO_3 -Schicht ein. Dabei entsteht eine tiefblau gefärbte Lithium-Interkalationsverbindung (Li_xWO_3). Bei Umpolung der Spannung wird Li_xWO_3 oxidiert und die Li^+ -Ionen wandern durch den Elektrolyten in die Ionenspeicherschicht. Die IS-Schicht sollte ihre Transmission bei Einbau von Li^+ -Ionen entweder nicht ändern (z.B. $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$) oder aber anodisch elektrochrome Eigenschaften (EC2) haben (z.B. Nickeloxid, welches bei Oxidation einfärbt und bei Reduktion entfärbt), so dass sie die Färbung der kathodisch elektrochromen WO_3 -Schicht im EC-Fenster verstärkt.

Einen solchen prinzipiellen Aufbau haben mehrere EC-Systeme, die bereits als Prototypen von verschiedenen Firmen bzw. Instituten hergestellt wurden.

Dabei wird als EC-Schicht häufig blau einfärbendes WO_3 verwendet. Im INM (Leibniz-Institut für Neue Materialien) wurde darüber hinaus eine grau färbende EC-Schicht auf der Basis von Nioboxid [5] entwickelt (Abbildung 2). Als Gegenelektrode

werden entweder eine nicht färbende Ionenspeicherschicht (Flabeg [6], INM [5, 7]) oder eine anodisch elektrochrome Schicht verwendet (Berliner Blau, Gesimat [8]). Die Schichten werden unterschiedlich hergestellt: mittels Vakuumtechnologie (Sputtern, Flabeg), mittels Sol-Gel-Technologie (INM) bzw. mittels elektrischer Abscheidung (Gesimat), wobei die Investitionskosten zum Aufbau solcher Anlagen sehr unterschiedlich sind. Als Elektrolyten werden verschiedene Materialien verwendet: Flabeg verwendet einen Polymerelektrolyten, INM einen anorganisch-organischen Kompositelektrolyten, der nach dem Befüllen der EC-Fenster thermisch gehärtet wird, und die Firma Gesimat eine ionenleitende PVB (Polyvinylbutyral) Folie, wobei die PVB-Folie den Vorteil hat, dass sie dem EC-Fenster ähnliche Eigenschaften wie Verbundsicherheitsglas verleiht [8]. Ein Vorteil der Sol-Gel Technologie ist, dass auch die Beschichtung gebogener Scheiben gut möglich ist [9], was für die Anwendung der EC-Fenster im Automobilbereich von großer Bedeutung ist.



Abbildung 2: Entfärbtes und grau bzw. blau eingefärbtes EC-Fenster des INM (Größe 400 mm x 300 mm). Die Transmission im sichtbaren Bereich (T_L -Wert) kann zwischen 60 % (entfärbt) und 20 % (grau gefärbt) bzw. 70 % und 25 % (blau gefärbt) variiert werden (Spannung: < 3 V, Schaltzeiten: 2 - 3 min) [5, 10] .

Eigenschaften und mögliche Energieeinsparung

Durch Anlegen einer kleinen Spannung (ca. 3 V) kann die Transmission stufenlos im sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich verändert werden, die Durchsicht bleibt dabei immer erhalten. Der entfärbte und gefärbte Zustand sowie die Zustände dazwischen sind dabei ohne angelegte Spannung über längere Zeit stabil, so dass lediglich zur Änderung des Transmissionszustands (Färben/ Entfärben) eine Spannung angelegt werden muss und ein Strom fließt. Der Energieverbrauch ist dadurch sehr gering (ca.

0,04 - 0,1 Wh/m²). Die elektrische Ansteuerung erfolgt über ein Steuergerät, welches entweder raumweise von Hand bedient oder auch mit der Gebäudeleittechnik verbunden werden kann.

Die Schaltzeiten sind abhängig von der Größe der Fenster und der Temperatur und liegen für eine komplette Ein- bzw. Entfärbung im Bereich von 2 - 10 min, was für den Architekturbereich akzeptabel ist.

Die Transmission wird durch eine erhöhte Absorption langwelliger und nah-infraroter Strahlung reduziert, was hohe Glas- und Schichttemperaturen bewirken kann. Daher sollte beim Aufbau einer elektrochromen Wärmeschutzverglasung (Isolierverglasung) das elektrochrome Verbundglas nach außen und eine niedrigemittierend (Low-E) beschichtete Glasscheibe auf der Innenseite angeordnet werden, wobei der Zwischenraum wie sonst auch üblich mit einem Edelgas befüllt wird [6, 11].

Elektrochrome Verglasungen können in allen Fassadenbereichen eingesetzt werden, bei direktem Sonnenlicht gibt es allerdings keinen sicheren Blendschutz, eine mögliche Blendung wird nur stark reduziert [11]. Die Anforderungen an den Sonnenschutz werden dagegen voll erfüllt: Mit einer elektrochromen Wärmeschutzverglasung mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 1,1 W/(m²K) kann die Transmission im sichtbaren Bereich von z.B. 50 % auf 15 % verringert werden, wobei der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von 36 % auf 12 % gesenkt wird [11, 12]. Im Vergleich dazu liegen die g-Werte von Wärmeschutzglas (2-fach bzw. 3-fach) und Sonnenschutzglas (neutrale Farbe) im Bereich von ca. 60 %, 50 % bzw. ca. 30 % und sind nicht schaltbar [11]. Durch den Einsatz von elektrochromen Fenstern in Gebäuden kann die Sonnen- und Wärmeeinstrahlung bei Bedarf reduziert werden und dadurch Kosten für die Kühlung und Klimatisierung im Sommer eingespart werden, so dass eine deutliche Reduktion des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs um ca. 30 % erreicht werden kann [13].

Da die EC-Fenster für einen Zeitraum von ca. 30 Jahren problemlos funktionieren sollen, sind die Anforderungen an die EC-Fenster sehr hoch: Sie sollen eine hohe Schaltzyklenstabilität von mindestens ca. 50000 Schaltzyklen haben, eine hohe UV-Stabilität und eine hohe thermische Stabilität (ca. -30°C, +90°C) und Temperaturwechselbeständigkeit aufweisen. Dies muss in Tests vor dem Verkauf als Architekturverglasung sichergestellt werden.

Großflächige elektrochrome Verglasung - Stand der Technik und Anwendung in der Architektur

Mehrere Prototypen bis zu einer Größe von 2000 mm x 1200 mm (Flabeg [6]), 1200 mm x 800 mm (Firma Gesimat GmbH [8]) bzw. 800 mm x 500 mm (INM GmbH [10, 14]) wurden bereits hergestellt und getestet. Das weltweit erste elektrochrome Sonnenschutzglas wurde von der Firma Flabeg in den Jahren 2000/ 2001 in den Markt eingeführt und z.B. in der schaltbaren Glasfassade der Stadtparkasse Dresden installiert [11, 12]. Obwohl die damals dem Stand der Technik entsprechenden Prüfungen erfüllt wurden, zeigten sich unter realen Einsatzbedingungen vor allem bei großen Scheibenformaten elektrochemisch induzierte Veränderungen die zu einer Funktionsunfähigkeit im Randbereich führten [6, 15]. Die EC-Fenster wurden daher im Sommer 2001 vom Markt und in eine „Redesignphase“ genommen. Es zeigte sich bei anschließenden Laboruntersuchungen, dass das Zusammenwirken von UV-Licht, erhöhter Temperatur und die elektrochemische Überanspruchung zu einer irreversiblen Reaktion mit einem Bestandteil des Polymer-elektrolyten und damit zum Ausfall in entsprechenden Randbereichen führt [15]. Die Verbesserung des Systems ist in Arbeit [6, 15, 16].

Zur Zeit gibt es nur das EC-Fenster der Firma SageGlass [17] auf dem Markt, welches von der Firma VELUX America als Dachfenster bis zu einer Größe von 1175 mm x 776 mm vertrieben wird. Nach SageGlass werden die hohen Anforderungen an die UV-Stabilität und thermische Stabilität sowie Zyklenstabilität erfüllt, sodass die Fenster im Architekturbereich angewendet werden können. Eine Studie zeigt, dass die Verwendung von SageGlass EC-Fenstern (Abbildung 3) den Energieverbrauch zum Kühlen um 20 %, zur Beleuchtung um 60 % und den Peak-Stromverbrauch um 30 % verringert.

Neben dem System der elektrochromen Fenster gibt es weitere Varianten von schaltbaren Verglasungen, die auf anderen schaltbaren Schichten beruhen, wie z.B. gasochrome Schichten, photochrome, photoelektrochrome, thermochrome oder thermotrope Schichten, Polymer dispersed Liquid Crystal (PDLC)-Systeme, Suspended Particle-Devices (SPD) und schaltbare Spiegel auf Metallhydridbasis [11]. Einige davon sind bisher nur im Labormaßstab hergestellt worden oder färben bei Einwirkung von Licht bzw. hoher Temperatur selbständig (z.B. photochrom, thermochrom) und können somit nicht aktiv beeinflusst werden.



Abbildung 3: Eingebaute elektrochrome Fenster von SageGlass® zur Beurteilung des Energiesparpotentials und des Einflusses auf den Menschen [17].

Elektrisch schaltbare Systeme sind die gasochromen (bei Verwendung eines Elektrolyseurs zur Herstellung von Wasserstoffgas) und die PDLC sowie die SPD-Systeme. Gasochrome Fenster zeigen ähnliche Eigenschaften wie die elektrochromen Fenster, doch im Gegensatz zu EC-Fenstern wird hier eine WO_3 -Schicht chemisch mittels reduzierendem Wasserstoffgas bzw. Luft reversibel reduziert und oxidiert [18]. Probleme sind hier die Dichtigkeit des Systems und die Verwendung von Elektrolyseuren im Fensterrahmen. Die PDLC und SPD-Systeme sind schon auf dem Markt erhältlich (PDLC: SGG PRIVA-LITE, Saint-Gobain Glass [19], SPD: Research Frontiers [20]). Die Anwendungen beruhen auf einer Ausrichtung von Flüssigkristallen bzw. optisch anisotropen, absorbierenden Teilchen im elektrischen Feld bei Anlegen einer Spannung. Sie sind ohne angelegte Spannung opak (PDLC) bzw. dunkelblau gefärbt (SPD) und nur bei angelegter Spannung transparent bzw. hell, was einen höheren Energieverbrauch als bei EC-Fenstern zur Folge hat. Beide Systeme sind auch im hellen Zustand leicht getrübt. Bei PDLC-Systemen wird der g-Wert nicht mit dem Schaltprozess verändert, so dass kein Sonnenschutzeffekt erreicht wird [11, 19].

Danksagung

Die Forschung und Entwicklung der EC-Fenster im Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH (INM) wurde zu jeweils 50 % mit Mitteln des BMBF (Förderzeichen: 2A67/03 N 9040) und des Saarlandes gefördert.

Literatur

- [1] Electrochromism, P.M.S. Monk, R.J. Mortimer, D.R. Rosseinsky, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1995.
- [2] Handbook of inorganic electrochromic materials, ed. by C.G. Granqvist, Elsevier, 1995.
- [3] F. Béteille, Ph. Boire, J.-C. Giron, Highly durable all-solid-state electrochromic glazings, Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Switchable Materials and Flat Panel Displays, ed. by C.M. Lampert, 21.-22 July 1999, Denver, Colorado.
- [4] N.L. Sbar, L.A. Michalski, H.N. Volltrauer, T.D. Ngo, G.J. McComiskey, Durability testing of electrochromic window glazings, *Electrochimica Acta* **44** (1999) 3263.
- [5] S. Heusing, D.-L. Sun, J. Otero-Anaya, M.A. Aegerter, Grey, brown and blue coloring sol-gel electrochromic devices, *Thin Solid Films* **502** (2006) 240.
- [6] H. Wittkopf, Flabeg Econrol-die neue Generation, Vortrag auf 6th International Meeting on Electrochromism IME-6, 29.08. - 02.09.2004, Brno, Tschechische Republik.
- [7] H. Schmidt, H. Krug, N. Merl, A. Moses, P. Judeinstein, A. Berni, Electrochromic thin-film systems and components thereof, WO 95/ 28663.
- [8] A. Kraft, M. Rottmann, K.-H. Heckner, Large-area electrochromic glazing with ion-conducting PVB interlayer and two complementary electrodeposited electrochromic layers, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **90** (2006) 469, and www.gesimat.de
- [9] M. Mennig, S. Heusing, N. Niegisch, P. Zapp, H. Schmidt, Fabrication of large area curved electrochromic modules for automotive application, Proc. 3rd International Conference on Coatings on Glass (ICCG), 29.10. - 02.11.2000, Maastricht, NL, S. 787.
- [10] www.inm-gmbh.de
- [11] BINE-Themen-Info I/02- Schaltbare und regelbare Verglasungen (www.bine.info)
- [12] FLABEG Econrol - Verkaufsprospekt für Elektrochromes Glas der Firma Flabeg (www.flabeg.com)
- [13] S. Papaefthimiou, E. Syrrakou, P. Yianoulis, Energy performance assessment of an electrochromic window, *Thin Solid Films* **502** (2006) 257.
- [14] S. Heusing, B. Munro, T. Koch, P. Zapp, M. Mennig, H. Schmidt, Weiterentwicklung elektrochromer Dünnschichtsysteme auf Glas über naßchemische Verfahren, Kurzreferate (Vorträge) der 73. Glastechnische Tagung, Halle (Saale), 31.05. - 02.06.1999, S. 40.
- [15] H. Wittkopf, D. Jödicke, Flabeg Econrol-die neue Generation, Kurzreferate (Vorträge) der 78. Glastechnische Tagung, Nürnberg, 7.- 9. Juni 2004, S. 195.
- [16] D. Jödicke, Elektrochrome Fenster in der Herstellung und Freibewitterung, Sechstes Symposium „Zukunft Glas“, OTTI , 31.05. - 01.06.2006, Zwiesel.
- [17] www.sage-ec.com
- [18] www.ise.fhg.de
- [19] www.saint-gobain.com
- [20] www.refr-spd.com