



Schaltbare und regelbare Verglasungen

Mit einer konsequenten Tageslichtplanung kann der Energiebedarf von tagsüber genutzten Gebäuden deutlich verringert werden. Jedoch kommt es zugleich darauf an, Überhitzung und Blendung zu vermeiden. Mit schaltbaren Schichten kann – im Gegensatz zum herkömmlichen Sonnenschutz – der Strahlungsenergie- und Lichtfluss direkt in der Verglasung den klimatischen und nutzungsbedingten Anforderungen dynamisch angepasst werden.



Der Einfluss von Fenstern auf Raumkomfort und

Energiebedarf von Gebäuden ist enorm: Mit der natürlichen Belichtung durch Fenster erhöht sich der visuelle Komfort, Fenster gewährleisten den psychologisch wichtigen Blick nach draußen und sie reduzieren den Energieaufwand für Beleuchtung und Kühlung. Wird die solare Wärme zu Heizzwecken genutzt, so kann der Heizwärmebedarf von Gebäuden weiter gesenkt werden. Fensterflächen erfordern jedoch besonders bei Bürogebäuden über einen Großteil der Nutzungszeit einen wirksamen Sonnenschutz – möglichst ohne dabei die Aussicht und das Tageslichtangebot zu sehr zu schmälern. Bei den üblichen EDV-Arbeitsplätzen in Fensternähe ist zusätzlich ein wirksamer Blendschutz notwendig.

Diese teilweise gegensätzlichen Anforderungen können mit den neuen schaltbaren und regelbaren Verglasungen besser bewältigt werden: Das Schalten der Energie- und Lichtdurchlässigkeit ermöglicht – im Gegensatz zu Sonnenschutzgläsern – eine dynamische Anpassung an die jeweilige Situation. Anders als bei den meisten konventionellen Systemen können schaltbare Verglasungen auch bei Sonnenschutzfunktion eine ausreichende Tageslichtnutzung und den Blick nach draußen gewährleisten. Außerdem entfallen bewegliche, der Witterung ausgesetzte Teile.

Seit Jahren werden schaltbare Schichten für den Einsatz in der Architektur entwickelt – gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Inzwischen hat eine Technologie die Marktreife erreicht, während bei anderen Systemen eine Markteinführung innerhalb der kommenden Jahre angekündigt wird. Eine Vielzahl weiterer Konzepte und Schichten wird stetig weiterentwickelt. Entwicklungsstand, Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzbedingungen der unterschiedlichen Technologien werden im Folgenden vorgestellt.

1 Schaltvorgang einer mit thermotropen Hydrogel-Verbundscheiben ausgestatteten Bürofassade als 1:2,5-Skalenmodell.

a) klar, Schaltvorgang beginnt gerade,
b) geschaltet - d. h. das Licht wird stark gestreut.

Quelle: H. Hartwig, TU München
Thermotrope Gläser: Affinity Co. Ltd., Japan

Planung und Integration

Bei der Planung von Fenstern und Fassadensystemen geht es aus raumklimatischer Sicht vor allem darum, das Gebäude im Sommer gegen Überhitzung und im Winter gegen Kälte zu schützen. Zusätzlich müssen Blendungseffekte vermieden werden. Und dies möglichst ohne die Nutzung von Tageslicht und solarer Wärme sowie den Blick nach draußen unnötig zu schmälern. Schaltbare und regelbare Verglasungen können hierbei insbesondere für Büro- und Verwaltungsgebäude eine wichtige Rolle einnehmen.

Zur Tageslichtnutzung sind geeignete Fensterflächen mit ausreichend hoher Lichtdurchlässigkeit notwendig. Neben den erwünschten passiv-solaren Energiegewinnen im Winter und einer ganzjährigen natürlichen Belichtung der Räume bringt dies auch Nachteile mit sich: Gefahr von Blendung oder – bei gleichzeitig hoher Energiedurchlässigkeit der Verglasung – ungemütlich hohe Raumtemperaturen im Sommer. Dies gilt insbesondere für den Nichtwohnungsbau, wo zum solaren Energieeintrag im Gebäude noch hohe thermische Lasten durch Beleuchtung und elektrische Geräte hinzukommen. Daher sind Sonnenschutzmaßnahmen notwendig. Bislang werden zur Begrenzung des solaren Energieeintrags Sonnenschutzverglasungen oder feststehende bzw. bewegliche Verschattungseinrichtungen eingesetzt. Bei Sonnenschutzverglasungen sorgen Beschichtungen auf der Glasoberfläche dafür, dass viel sichtbares Licht, aber nur ein geringer Anteil der Energie im restlichen Sonnenspektrum ins Gebäude gelangt (Selektivität). Diese Beschichtungen sind zu allen Jahreszeiten praktisch gleichmäßig wirksam, verhindern also im Winter die Nutzung solarer Energiegewinne. Und im Sommer reicht der Sonnenschutz der Verglasung bei starker Sonneneinstrahlung nicht aus, er muss meist durch weitere Maßnahmen ergänzt werden. Mechanische Verschattungseinrichtungen wie Jalousien, Raffstores oder Markisen erlauben eine bedarfsgerechte Regelung von Licht- und Wärmeeintrag ins Gebäude zu moderaten Kosten. Die beweglichen Teile

sind jedoch anfällig gegen Störungen, was mit erhöhtem Wartungsaufwand verbunden sein kann. Schaltbare Verglasungen, die ihre optischen Eigenschaften “auf Knopfdruck” (aktive Systeme) oder selbsttätig (passive Systeme) ändern, haben das Potenzial, die genannten Nachteile der heute gängigen Systeme zu überwinden. In ② markieren die Ellipsen den Schalteffekt in den Bereichen, die durch Verglasungen mit veränderlichem Transmissionsgrad erschlossen werden sollen. Ziel ist es, bei guter Wärmedämmung, d. h. geringem U-Wert, den Gesamtenergiedurchlassgrad g (g-Wert) in einem möglichst weiten Bereich schalten zu können

Fenster und Arbeitsplätze

Fenster sind nicht allein gestalterisches Element in der Architektur. Sie müssen auch eine Vielzahl von zum Teil gegensätzlichen Anforderungen erfüllen und besitzen insbesondere bei großflächigem Einsatz in Nichtwohngebäuden eine Schlüsselrolle hinsichtlich Nutzerkomfort und Energieverbrauch. Ein hoher thermischer und visueller Komfort sichert die Gesundheit und Produktivität der Nutzer, während die Minimierung des Energieverbrauchs für Heizung, Kühlung und Beleuchtung geringe Betriebskosten garantiert.

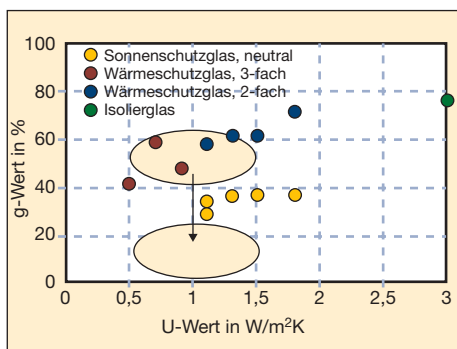
Tageslicht und Energiebilanz

Das Bilanzierungsverfahren nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) liefert noch keine vollständige Energiebilanz für Gebäude. Neben dem Heizwärmebedarf müssen auch Kühlung und Beleuchtung im Detail betrachtet werden. Wenngleich der durch solare Einstrahlung verursachte Kühlenergiebedarf in der EnEV über die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz begrenzt wird, so erfolgt – wie für die Beleuchtung – keine explizite Bilanzierung dieses Energieanteils. Bezieht man ferner alle Bedarfssektoren auf den jeweiligen Primärenergieeinsatz, so wird deutlich, dass der Energiebedarf für Kühlung/Klimatisierung und Beleuchtung zusammen durchaus eine ähnliche Größenordnung erreichen kann wie der Heizwärmebedarf. ③ zeigt dies für ein

typisches Bürogebäude mit unterschiedlichen Wärmedämmstandards. Wird der sommerliche Wärmeschutz nicht ausreichend beachtet, kann bei großen Glasflächen der notwendige Kühlaufwand drastisch ansteigen. Der Gesamtprimärenergiekennwert wird also zur ausschlaggebenden energetischen Zielgröße für die Planung von Gebäuden. Folglich ergeben sich für unterschiedliche Gebäudenutzungen jeweils eigene Optimierungsansätze für die Verglasungen. In Wohngebäuden sind solare Energiegewinne in der Heizperiode erwünscht, um den Heizwärmebedarf zu reduzieren. Beim Passivhaus sind sie unerlässlich. Anders stellt sich die Situation in Büro- und Verwaltungsgebäuden dar, weil hier tagsüber oft interne und solare Energiegewinne gleichzeitig anfallen und interne Wärmelasten zumeist auch bedeutsamer sind. Solare Gewinne können hier zum Heizen nur geringfügig genutzt werden; vielmehr sorgt die Kombination innerer Energiegewinne mit (zu hohen) solaren Gewinnen eher dafür, dass – z. T. schon an sonnenreichen Tagen in der Heizperiode – ein Überangebot an freier Wärme entsteht, mit entsprechendem Bedarf an Kühlenergie. Obwohl die meisten Nichtwohngebäude hauptsächlich tagsüber genutzt werden, spielt die künstliche Beleuchtung eine wichtige Rolle in der Gesamtenergiebilanz. Dies liegt am geforderten hohen Beleuchtungsniveau und an dem oft durch bauliche Gegebenheiten reduzierten Tageslichtangebot in den Arbeitsbereichen. Eine konsequente Tageslichtplanung kann den Bedarf an Kunstlicht auf deutlich weniger als 50% der Nutzungszeit im Jahr reduzieren (vgl. ④). Vorteilhaft ist hierbei nicht allein der reduzierte elektrische Energiebedarf für Kunstlicht sondern die dadurch gleichzeitig reduzierten Wärmelasten, die sonst ggf. unter Aufwendung elektrischer Energie abgeführt werden müssten.

Verglasungsanteil

Der positive Einfluss großer Verglasungsflächen auf die Energiebilanz wird im Allgemeinen stark überschätzt. Lediglich im Wohnungsbau ist eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs mit steigender Glasfläche (an Südfassaden!) zu verzeichnen, wobei sich



② Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) typischer Verglasungen – Schaltbare Verglasungen im Kontext von marktgängigen Verglasungen. Quelle: Fraunhofer ISE

Anforderungen an Arbeitsplätze

Arbeitsstätten-Richtlinie

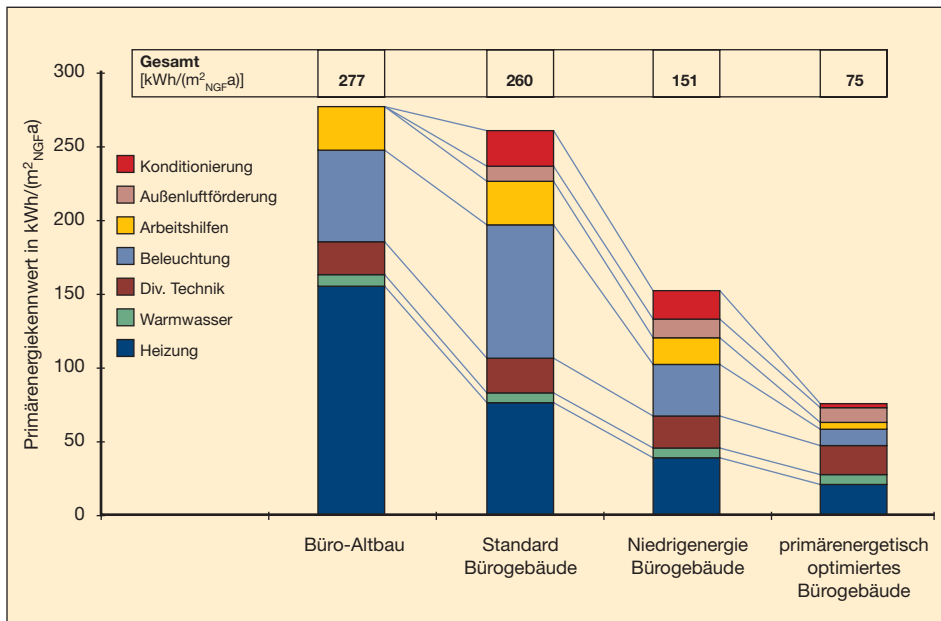
- Sichtverbindung nach außen

Lichttechnische Anforderungen

- Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Tätigkeit
- Tageslicht in Innenräumen
- Blendungsbegrenzung (Direktblendung, Reflexblendung, Kontraste)
- keine Veränderung der Tageslichtfarbe und der Farbwiedergabe

Thermische Anforderungen

- keine Zugerscheinung und Strahlungskälte in der Nähe von Fenstern bzw. Verglasungen
- Einhalten der Grenzen für die operative Raumtemperatur (20°C - 26°C; bei höheren Außentemperaturen als 26°C sind höhere Innenraumtemperaturen zulässig)



3 Primärenergiekennwerte von Bürogebäuden mit unterschiedlichen Energiestandards
Quelle: IWU

dieser Effekt bei Verglasungsanteilen von mehr als 50% minimal wird. Bei Bürogebäuden sind die mit zunehmender Fläche anwachsenden solaren Gewinne nicht mehr nutzbar, so dass der Heizwärmebedarf aufgrund der ebenfalls steigenden Transmissionswärmeverluste mit dem Verglasungsanteil ansteigt; lediglich an Südfassaden bleibt er relativ konstant (5).

Weitaus bedeutender ist der Einfluss der Verglasungsfläche auf den Kühlenergiebedarf, der – außer an Nordfassaden – mit zunehmender Fläche stärker ansteigt als der Heizwärmebedarf (5). Auch für die Tageslichtnutzung sind keine Verbesserungen für die Gesamtausleuchtung des Raums mehr erzielbar, wenn die verglaste Fläche einer Fassade zusätzlich noch den Brüstungsbereich mit einschließt. Hier ist vielmehr eine möglichst hohe Position der Fenster in der Fassade (möglichst geringer Sturz) sowie die effektive Öffnungsfläche (Rahmenanteile, Fassadentiefe, Breite in Bezug zur Raumbreite) neben anderen Einflussgrößen entscheidend.

Sonnenschutzverglasung

Gestalterisch gewollte größere Verglasungsanteile müssen also – insbesondere bei kritischen Orientierungen (>Osten, >Westen) – über die Verglasungseigenschaften und zusätzliche Sonnenschutzmaßnahmen kontrolliert werden. Hierzu stehen einmal Sonnenschutzverglasungen zur Verfügung, mit denen vielfältige Kombinationen von Gesamtenergiedurchlassgrad und Lichttransmissionsgrad realisierbar sind. Allerdings geht ein hochwirksamer Sonnenschutz ($g < 20\%$) deutlich zu Lasten der Tageslichtnutzung – insbesondere zu Zeiten, in denen die Sonnenschutzfunktion nicht gefragt ist. Außerdem gibt es praktisch keine solaren Wärme Gewinne mehr.

Sonnenschutzverglasungen können nur bei nördlich orientierten Fassaden als alleinige

Schutzmaßnahme eingesetzt werden, wenn die Tageslichtnutzung noch gewährleistet sein soll. Bei anderen Orientierungen sind Kombinationen von Sonnenschutzverglasung und zusätzlicher Verschattung erforderlich. Ausgeprägt selektive Verglasungen (heute sind Selektivitätszahlen von bis zu 2 verfügbar) ermöglichen dabei noch eine gute Tageslichtautonomie.

Verschattungssysteme

Der Nachteil der statischen Eigenschaften von Sonnenschutzgläsern wird durch den Einsatz von beweglichen Sonnenschutzsystemen umgangen. Außenliegende Systeme erreichen eine hohe Wirksamkeit, allerdings zunächst zu Lasten der Tageslichtnutzung und der Aussicht, die bei herkömmlichen Lamellensystemen fast vollständig unterbunden werden. Nur Jalousien mit unabhängig verstellbaren Lamellen im Überkopfbereich stellen eine geeignete Lösung für ein kombiniertes Sonnenschutz-, Blendschutz- und Tageslichtlenksystem dar. Nachteilig sind die hohen Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit – insbesondere die mechanische Stabilität bei höheren Gebäuden, die damit verbundenen Investitionskosten sowie der bei beweglichen Systemen immer entstehende Wartungs- und Reparaturaufwand. Hinzu kommen in der Praxis oft nicht optimierte optische Kennwerte der Oberflächen hinsichtlich des Energie- und Lichtflusses bzw. der Außenblendung.

Systeme innerhalb von Verglasungen und insbesondere innenliegende Son-

Energieoptimierte Planung von Fenstern - relevante Aspekte

Heiz- und Kühlenergiebedarf

- externe und gebäudeeigene Verschattungen
- Orientierung der Fenster
- Verglasungsanteil an den einzelnen Fassaden
- Verglasungsqualität
- Sonnenschutzeinrichtungen

Tageslichtnutzung

zusätzlich zu den o.g. Punkten:

- Anordnung des/der transparenten Bauteile/s in Bezug auf den Raum
- Blendschutzeinrichtungen

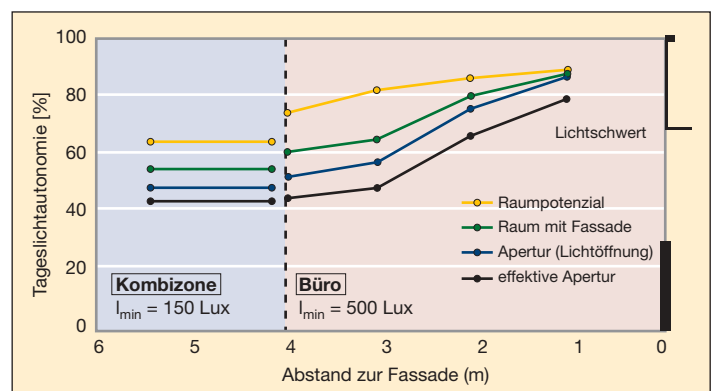
nenschutzanlagen weisen deutlich höhere g-Werte auf und sind damit weniger effektiv.

Richtungsselektive Systeme

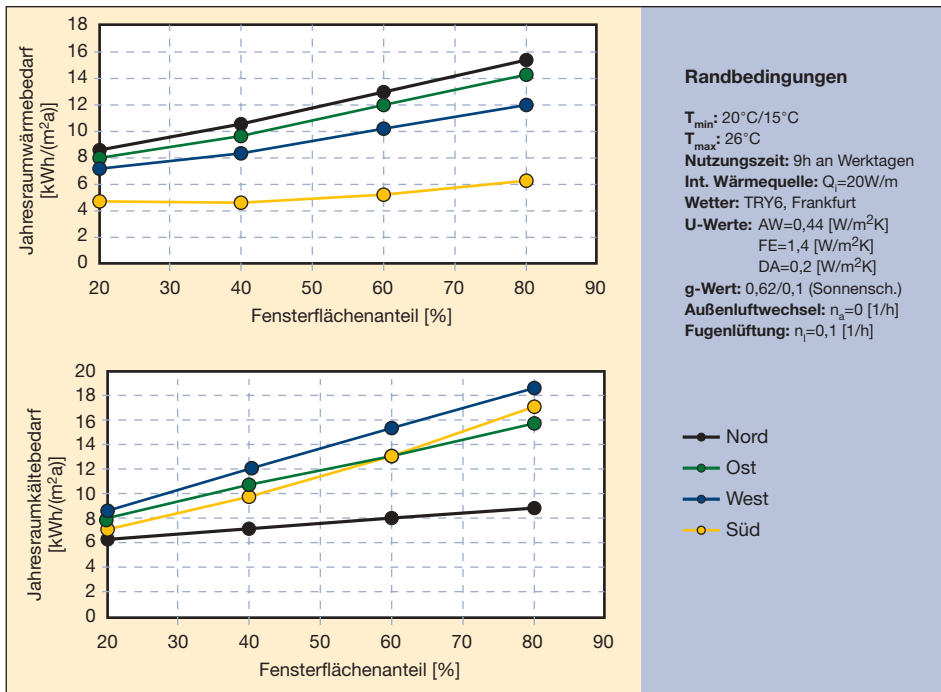
Eine weitere Möglichkeit des Sonnenschutzes bieten richtungsselektive Verglasungen (und auch Lamellensysteme >Retrolamelle), die über einen bestimmten Winkelbereich das direkt einfallende Sonnenlicht ausblenden und lediglich diffuse Strahlung durchlassen. Je nach Struktur wird eine saisonale oder ganzjährig wirksame Richtungsselektivität erzielt. Bei bedecktem Himmel wird das Tageslichtangebot im Raum gegenüber einer klaren Verglasung allerdings deutlich reduziert. Der Blick nach draußen ist meist nur für bestimmte Blickwinkel gegeben. Kritisch ist z. T. – wie beim außenliegenden Sonnenschutz – die Außenblendung durch verspiegelte oder stark reflektierende Flächen.

Schaltbare Verglasungen

Mit schaltbaren Verglasungen können die Nachteile der statischen und der beweglichen Systeme zum großen Teil verringert oder ganz eliminiert werden. Maßgeblich aus energetischer Sicht ist ein geeigneter Schalhub für Gesamtenergiedurchlass und Lichttransmission. Im geschalteten Zustand erreichen einige der bislang entwickelten Schichten g-Werte, die einen ausreichenden alleinigen Sonnenschutz für sehr viele Anwendungsfälle garantieren (6, 9). Der sich im geschalteten Zustand einstellende Lichttransmissionsgrad von etwa 0,15 (elektrochrome und gaschrome Schichten) bis 0,19 (thermotrope Schichten) ist bei direkter Sonneneinstrahlung für die Tageslichtversorgung von Arbeitsplätzen in Raumtiefen von bis zu 5 m und damit für typische



4 Beispiel für hohe Tageslichtautonomie (= ausreichendes Tageslichtangebot in Prozent der gesamten Nutzungszeit)



5 Jahreswärmebedarf (oben) und Jahreskältebedarf (unten) eines Büroraums in einem Niedrigenergie-Bürogebäude für unterschiedlich ausgerichtete Fensterflächen – ohne Berücksichtigung des Außenluftwechsels
 Quelle: IWU

Büroräume meist ausreichend. Für fenster-nahe Arbeitsplätze ist jedoch ein zusätzlicher Blendschutz vorzusehen, der die Tageslichtverteilung im Raum möglichst nicht beeinträchtigt (z. B. von unten nach oben zu bewegendes System).

Während die relativ niedrigen g-Werte ($< 0,50$) einiger Systeme im ungeschalteten Zustand für Bürogebäude – insbesondere bei größeren Glasflächen – zu keiner nennenswerten Erhöhung des Heizwärmebedarfs führen, so bewirkt der im Vergleich zu normalen Wärmeschutzverglasungen momentan noch geringere Lichttransmissionsgrad von durchsichtigen schaltbaren Verglasungen einen erhöhten Kunstlichtbedarf im Winterhalbjahr (ähnlich wie bei Sonnenschutzverglasungen).

Insgesamt bieten schaltbare Verglasungen einen größeren gestalterischen Spielraum für verglaste Flächen – ohne bewegte Teile vor

oder in einer Fassade, ohne dass der Kühlenergiebedarf des Gebäudes ansteigt.

Das aktive Schalten der elektrochromen bzw. gaschromen Schichtsysteme kann entweder manuell oder automatisch in Abhängigkeit von der Einstrahlung auf die Fassade bzw. der Raumtemperatur erfolgen. Eine stufenlose Regelung ist ebenfalls möglich. Dagegen bestehen thermotrope Systeme durch ihre völlige „Autarkie“, wobei die Schalttemperatur mit der Fertigung festgelegt wird und später keine Änderung dieser Schalteigenschaft mehr möglich ist.

Thermischer und visueller Komfort

Der thermische Komfort in der Nähe von Fenstern stellt bei kalten Außentemperaturen mit den heute verfügbaren Verglasungsqualitäten kein Problem mehr dar. Passivhaustaugliche Fenster können sogar ohne

darunter positionierte Heizkörper eingebaut werden, eine merkliche Strahlungsasymmetrie oder Zugerscheinungen treten nicht auf. Lediglich bei raumhohen Verglasungen wird ein Heizkörper zur Kompensation der abfallenden Kaltluft benötigt.

Im Sommer allerdings können Funktionsschichten in den Verglasungen zu hohen Oberflächentemperaturen ($> 35^\circ\text{C}$) führen, die den Aufenthalt in Fensternähe merklich beeinträchtigen. Bei den absorbierenden schaltbaren Verglasungen wird daher die Funktionsschicht idealerweise auf der Innenseite der Außenseite angebracht. Eine weitere, auf der Außenseite der raumseitigen Scheibe aufgebrachte IR-reflektierende Schicht unterbindet die Wärmestrahlung der absorbierend geschalteten Schicht nach innen. Diese zusätzliche statische Schicht garantiert auch die erforderliche Wärmeschutzfunktion (niedriger U-Wert) in der Heizperiode.

Bei außen liegenden Sonnenschutzsystemen mit hohen Reflexionsgraden ist mit keiner Beeinträchtigung des Komforts durch Wärmestrahlung an den Raum zu rechnen. Bei innen liegendem Sonnenschutz steigt die Gefahr hoher Temperaturen je nach Absorptions- und Reflexionsverhalten des Systems Sonnenschutz/Verglasung, so dass der thermische Komfort in der Regel schlechter ist. Daneben spielt auch der visuelle Komfort in Räumen – speziell an heute fast durchweg mit Computern ausgestatteten Arbeitsplätzen – eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz und Zufriedenheit. Im Gegensatz zum thermischen Komfort gibt es bislang keine Summengröße zur quantitativen Bewertung von Raumsituationen. Die wichtigsten Faktoren zeigt **7**.

Während mit beweglichen Sonnenschutzsystemen auch ein Blendschutz realisierbar ist, kann eine Sonnenschutzverglasung diese Funktion nur in wenigen Fällen (nördlich orientierte Fassaden, eingefärbte Sonnenschutzgläser mit sehr geringem Lichttransmissionsgrad) mit erfüllen. Auch die schaltbaren Verglasungen besitzen im geschalteten Zustand zu hohe Lichttransmissionswerte, um bei direkt auf die Fassade scheinender Sonne einen ausreichenden Blendschutz

Exemplarische Kennwerte verschiedener Sonnenschutzsysteme	
System	Gesamtenergie-durchlassgrad g
außenliegende Jalousien oder Markisen	
■ Sonnenschutzverglasung	0,36 / 0,13
■ Wärmeschutzverglasung	0,58 / 0,20
zwischen den Scheiben liegende Jalousien oder Rollos	
■ Sonnenschutzverglasung	0,36 / 0,18
■ Wärmeschutzverglasung	0,58 / 0,29 ... 0,65 / 0,07
innenliegende Jalousien oder Rollos	
■ Sonnenschutzverglasung	0,36 / 0,29
■ Wärmeschutzverglasung	0,58 / 0,46
elektrochrome Verglasung	0,36 / 0,12
gaschrome Verglasung	0,50 / 0,15
thermotrope Verglasung	0,48 / 0,15

Bewertung von Raumsituationen	
Kriterium	Bemessungsgröße
Aussicht nach draußen (Außenbezug)	
Tageslichtangebot im Raum	Tageslichtquotient, Beleuchtungsstärke (jeweils Absolutwerte an bestimmten Stellen im Raum und deren Verteilung)
■ bei bedecktem Himmel	
■ mit direkter Sonneneinstrahlung	
Blendungsvermeidung	Leuchtdichte von Flächen im nahen und fernen Gesichtsfeld des Nutzers
Einfachheit von Sonnenschutz oder Lichtlenksystem	
Regelbarkeit Beschattungseinrichtung und Kunstlicht	

sicherstellen zu können. Hier wären deutlich niedrigere Werte erforderlich, allerdings ohne die Durchlässigkeit im hellen Zustand zu erniedrigen (höherer Schaltheub). Ansonsten muss – wie beim Sonnenschutzglas – ein zusätzliches System vorgesehen werden, was den Vorteil des dauernd vorhandenen Außenbezugs schmälert; auch das geringere Tageslichtangebot im Raum während des Winterhalbjahres führt zu einer Minderung des visuellen Komforts.

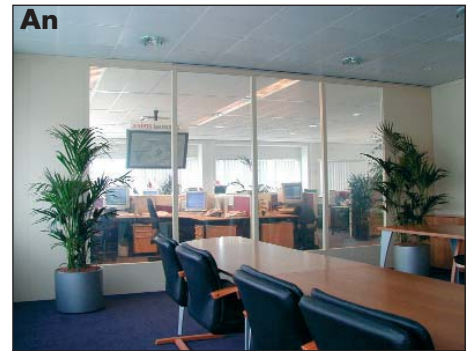
Fassaden mit kombinierter Verglasung

Aufgrund der komplexen Anforderungen bzgl. Energieeintrag und Komfort ist es in vielen Fällen günstig, die hinsichtlich Tageslichtnutzung und Kühllastreduktion optimierte Fassade in mehrere Funktionsbereiche zu unterteilen. In den Fenstern mit Außenbezug können künftig schaltbare Verglasungen mit zusätzlichem inneren Blendschutz verwendet werden, während der Oberlichtbereich zur Verbesserung der Tageslichtnutzung bei geschaltetem Hauptfenster

genutzt wird. Wegen ihrer Streuwirkung sind thermotrope Verglasungen für Oberlichter, Dächer und Solarfassaden prädestiniert, sofern keine Durchsicht erforderlich ist. Alternativ werden für thermotrope Systeme auch teilflächig belegte oder teilflächig schaltende Varianten untersucht.

Schaltbarer Sichtkontakt und Projektionssysteme

Auch im Gebäudeinneren kann man mit schaltbarer Verglasung gestalten oder den Einblick in bestimmte Raumbereiche bei Bedarf unterbinden. Anforderungen wie Sichtkontakt oder Privatsphäre stehen im Vordergrund. Mit Verglasungen, die von transparent zu streuend schaltbar sind, können diese gegenläufigen Anforderungen je nach Situation bedient werden ⁸. Zudem eignen sich solche Verglasungen auch als zuschaltbare Projektionsflächen. Der Betrieb solcher Verglasungen kann aber mit einem Energieaufwand (z. B. Haltestrom in einem der Schaltzustände, typischerweise dem klaren Zustand) verbunden sein.



⁸ Schaltbare Verglasung ermöglicht Diskretion auf Knopfdruck
Quelle: Saint Gobain, Aachen

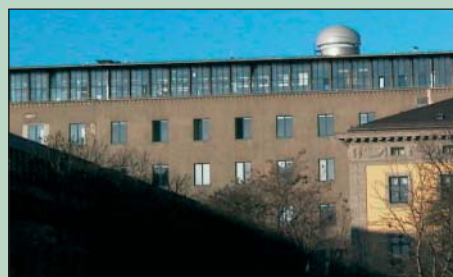
Pilotprojekt: "Laterne" der TU München

>> Thermotrope Verglasung mit thermotropen Hydrogelscheiben aus Japan

- Objekt:** "Laterne" im Obergeschoss des Hauptgebäudes der TU München
- Status:** Pilotprojekt: Sanierung im Sommer 2002 (Baujahr 1948-1954)
- Nutzung:** Büroräume
- Einsatz:** Thermotrope Wärmeschutzverglasungen in 3 Räumen im Oberlichtbereich an vertikaler Fassade, hoher Verglasungsanteil (75%, davon die Hälfte thermotrop belegt), Fassadenausrichtung nach Ost-Südost
- Ziel:** Selbsttätige Sonnenschutzmaßnahmen mit Einschränkung des Außenbezuges nur wenn thermisch erforderlich
- Kontakt:** Dipl.-Phys. Helge Hartwig, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik (Prof. Gerhard Hausladen), Fakultät für Architektur, TU München



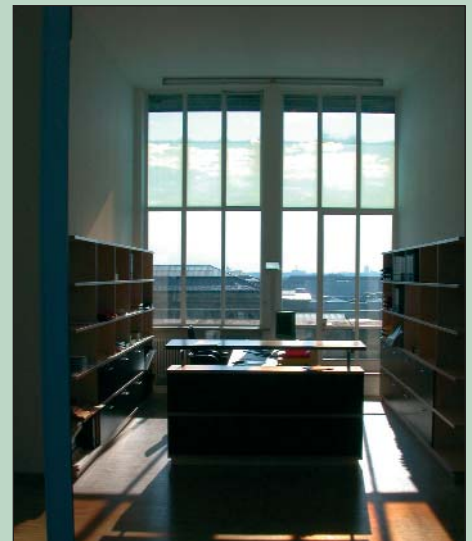
Detailansicht eines mit thermotroper Verglasung ausgestatteten Oberlichtes: a) im ungeschalteten Zustand (mittlere Scheibe: Schaltungsvorgang beginnt gerade), b) im geschalteten Zustand. Schaltung nur in den direkt bestrahlten Bereichen.



Die "Laterne" des Hauptgebäudes der TU München.



Außenansicht der Pilotfassade während der Aufbauphase. Die thermotrope Verglasung im Oberlichtbereich ist in den bestrahlten Bereichen weiß geschaltet.



Innenansicht eines Büroraumes, im Oberlichtbereich die thermotrope Verglasung: a) bei eben einsetzender Schaltung, b) im geschalteten Zustand. Die Verglasung schaltet nur in den direkt bestrahlten Bereichen. Dadurch wird das direkte Sonnenlicht in diesem Bereich effektiv reflektiert.

Technik, Typen und Systeme

Wie funktionieren schaltbare Verglasungen? Wie weit sind die verschiedenen Technologien entwickelt? Welche Effekte, Materialeigenschaften und Kennwerte werden erreicht? In welchen Bereichen können die neuen Verglasungen sinnvoll eingesetzt werden?

Je nach Art der Aktivierung der optischen Schaltung oder nach deren Aufbau unterscheidet man folgende schaltbare Schichten:

■ **Elektrochrome Schichten:**

Schaltung in Form einer Abdunklung (Blaufärbung) durch einen elektrischen Strom, stromloser Endzustand

■ **Gaschrome oder hydrochrome Schichten:**

Schaltung in Form einer Abdunklung (Blaufärbung) durch Kontakt mit einem Gas

■ **Photochrome Schichten:**

Schaltung in Form einer Abdunklung durch Bestrahlung

■ **Photoelektrochrome Schichten:**

durch Sonnenstrahlung aktivierte elektrochrome Schaltung

■ **Thermochrome oder**

thermotrope Schichten:

Schaltung in Form eines Farbwechsels oder einer weißen Eintrübung bei Überschreiten einer bestimmten Schwellentemperatur

■ **Polymer-Dispersed Liquid Crystal**

(PDLC) - Systeme:

Schaltung in Form eines Aufklarens durch

Orientierung von lichtstreuenden Flüssigkristallen bei Anlegen einer elektrischen Spannung, Stromverbrauch für klaren Zustand

■ **Suspended-Particle-Devices (SPD):**

Schaltung in Form eines Aufklarens durch Orientierung optisch anisotroper absorbierender Teilchen bei Anlegen einer Spannung

■ **Schaltbare Spiegel auf Metallhydridbasis:**

Übergang von metallischem Spiegel zu transparentem Halbleiter durch Kontakt mit einem Gas

Elektrochrome Verglasungen

Funktionsprinzip: In elektrochromen Schichten lassen sich mit der Aufnahme oder der Abgabe von Ladungsträgern die optischen Eigenschaften verändern. Wird eine Spannung angelegt und fließt elektrischer Strom, so findet der erwünschte Ladungsträgertransfer statt und die Schicht ändert ihre Durchlässigkeit für Sonnenlicht. Einige Metalloxide zeigen solche Farbwechsel, Wolframoxid z. B. erreicht eine intensive

Blaufärbung. Die Transmission wird durch eine erhöhte Absorption langwelliger sichtbarer und nah-infraroter Strahlung reduziert. Dies kann hohe Schicht- oder Glastemperaturen bewirken, was bei dem Design von Verglasungseinheiten für Gebäude zu berücksichtigen ist.

Technik: In elektrochromen Verglasungen befindet sich die aktive Schicht in einem Verbund (10), der von zwei mit transparenten Elektroden beschichteten Gläsern eingerahmt wird. Durch eine externe Stromversorgung werden bei Bedarf Ladungsträger in die Schicht transportiert, wobei ein Flüssig- oder Polymer-Elektrolyt den Stromfluss gewährleistet. Es existieren auch Systeme mit Festkörpern als Ionenleiter, die als Schichtverbund auf Glas aufgebracht sind.

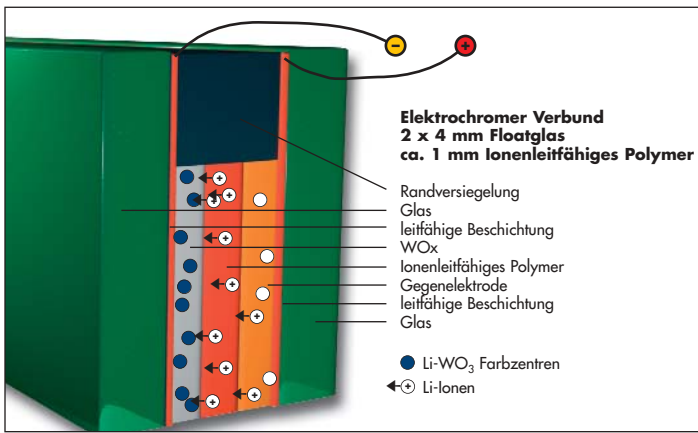
Derzeit können Scheiben bis zu einer Größe von 1,2 x 2 m² realisiert werden. Der elektrochrome Verbund kann in eine Wärmeschutzverglasung integriert werden (11). Die elektrische Ansteuerung erfolgt mit einem Steuergerät, dessen Leistungsaufnahme (pro Verglasungseinheit der genannten Größe) in der derzeitigen Entwicklungsstufe 2 W im Ruhezustand und 18 W während des Schaltvorganges beträgt. Der Energieeintrag lässt sich bedarfsgerecht regeln, denn das Steuergerät kann raumweise von Hand bedient oder auch mit der Gebäudeleittechnik verbunden werden.

Wirkung und Kennwerte: Die Transmission lässt sich stufenlos verändern, die Durchsicht bleibt dabei immer erhalten. Elektrochrome Verglasungen können also in allen

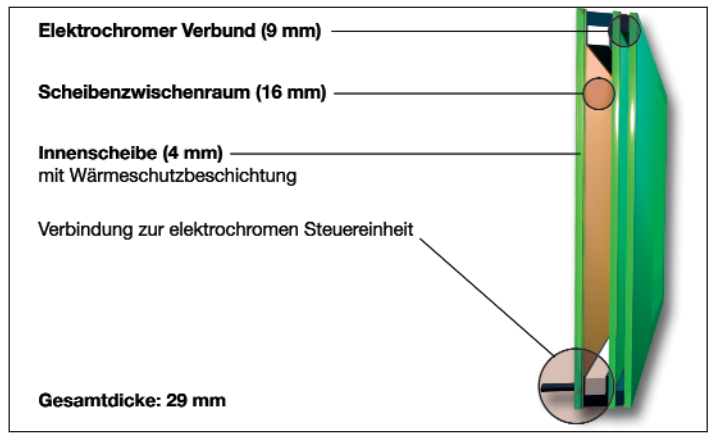
Verschiedene schaltbare Schichten und Verglasungen im Überblick

	Durchsicht		Farbe		Schalthub / Potenzial		Entwicklungsstatus	spezifische Vorteile	spezifische Nachteile
	hell	dunkel	hell	dunkel	Sichtbar (Licht)	Solar (Energie)			
Elektrochrom	ja	ja	nein/gering	ja (blau)	hoch	hoch	Pilotproduktion	Durchsicht bleibt erhalten	Schaltung durch Absorption, Blendungsgefahr
Gaschrom	ja	ja	nein/gering	ja (blau)	hoch	hoch	Pilotproduktion	Durchsicht bleibt erhalten	Schaltung durch Absorption, Blendungsgefahr
Photochrom	ja	ja	nein/gering	ja (grau, braun)	hoch	hoch	Produkte (keine Verglasungen!)	Durchsicht bleibt erhalten, hoher Schalthub	Schaltung durch Absorption, Blendungsgefahr, stark temperaturabhängige Schaltgeschwindigkeit
Photoelektrochrom	ja	ja	nein/gering	ja (blau)	mittel	mittel	Labormuster	Durchsicht bleibt erhalten	Geringe Transmission im hellen Zustand, Blendungsgefahr, Umsetzbarkeit noch nicht absehbar
Thermochrom	ja	ja	ja	ja	gering	gering	Labormuster	schaltet selbsttätig	Geringe Transmission im hellen Zustand, geringer Schalthub, Blendungsgefahr
Thermotrop	ja/bedingt	nein	nein (weiss)	ja	hoch	hoch	Prototypen	Schaltung selbsttätig, vorw. durch Reflexion	Durchsicht bleibt nicht erhalten; Gießharze: leichte Trübung auch im hellen Zustand
PDLC	ja/bedingt	nein	nein	ja (weiss)	kein	kein	Produkt	Sichtschutzprodukt, frei erhältlich	Keine Sonnenschutzfunktion, leichte Trübung auch im hellen Zustand
SPD	ja/bedingt	ja/bedingt	nein/gering	ja (blau, schwarz)	hoch	hoch	Prototypen	Durchsicht bleibt weitgehend erhalten	Leichte Trübung auch im hellen Zustand, Blendungsgefahr
HYSWIM (Schaltbare Spiegel)	ja	nein	nein/gering	nein/gering	hoch	hoch	Labormuster	Schaltung durch Reflexion	Blendungsgefahr in Reflexion, Umsetzbarkeit noch nicht absehbar

9 Qualitativer Vergleich der verschiedenen schaltbaren Schichten und Verglasungen



10 Schichtaufbau einer elektrochromen Verglasung
 Quelle: FLABEG



11 Aufbau einer elektrochromen Wärmeschutzverglasung. Die Verbundscheibe bildet zusammen mit einer niedrigemittierend beschichteten Glasscheibe und einem edelgasgefüllten Scheibenzwischenraum (hier: 16 mm) die Wärmeschutzverglasung.
 Quelle: FLABEG

Fassadenbereichen eingesetzt werden – bei direktem Sonnenlicht gibt es allerdings keinen sicheren Blendschutz, eine mögliche Blendung wird nur stark reduziert. Die Anforderungen an den Sonnenschutz dagegen werden voll erfüllt. So reduziert eine geschaltete elektrochrome Verglasung mit einem U-Wert von 1,1 W/(m² K) die sichtbare Transmission von 0,50 zu 0,15 bei einer g-Wert-Schaltung von 0,36 zu 0,12.

Status: Wolframoxid konnte als bislang einziges Material für großflächige Verglasungen eingesetzt und zur Produktreife gebracht werden. Zur Zeit werden in Deutschland elektrochrome Verglasungen an ausgewählten Pilotfassaden getestet (siehe Pilotprojekt S. 8). Eine Markteinführung ist nicht vor Sommer 2004 zu erwarten. Auch im Ausland werden elektrochrome Scheiben entwickelt (Japan, USA). Für Kfz-Anwendungen sind hier kleinflächige Produkte erhältlich, während für die Architektur noch kein Produkt am Markt verfügbar ist.

Einsatz: Elektrochrome Verglasungen können sowohl an vertikalen wie auch geneigten Fassaden eingesetzt werden, also insbesondere auch in horizontalen Dachverglasungen. Die Blendungsgefahr durch direktes Sonnenlicht muss auch im abgedunkelten

Zustand berücksichtigt werden. Als Vorteil erweist sich die stufenlose Helligkeitsregelung: Sie ermöglicht eine bedarfsorientierte Steuerung von Licht- und Energieeintrag durch den Nutzer oder die Gebäudeleittechnik. Weitere Anwendungen liegen im Automobil-, Bahn- und Flugzeugsektor.

Gaschrome (Hydrochrome) Verglasungen

Funktionsprinzip: Auch bei gaschromen Verglasungen besteht die optisch schaltbare Schicht aus Wolframoxid. Sie zeigen damit die charakteristisch tiefblaue Färbung im abgedunkelten Zustand – die Durchsicht bleibt wiederum erhalten (14). Die Einfärbung erfolgt aber nicht durch einen elektrischen Strom, sondern durch eine Einlagerung von Wasserstoffgas (12). Der Wasserstoff wird zunächst durch eine Katalysatorschicht verfügbar gemacht und kann dann in die poröse Wolframoxidschicht eindringen. Die Transmission der gaschromen Verglasung kann durch die Wasserstoffkonzentration im Gasspalt einer Verbundscheibe verändert werden. Entfärbt wird durch Überströmen der aktiven Schicht mit Sauerstoff.

Technik: Den Schichtaufbau zeigt (13). Für das Design gaschromer Wärmeschutzverglasungen und in der Anwendung sind hier wiederum die potenziell hohen Temperaturen im abgedunkelten Zustand zu berücksichtigen.

Für den Aufbau einer Wärmeschutzverglasung kann der gaschrome Zwei-Scheiben-Glasverbund mit einer niedrig emittierend beschichteten Glasscheibe kombiniert werden. Die Wasserstoff- und Sauerstoffgasversorgung kann als geschlossenes System – samt Recycling des Endproduktes Wasser – vollständig in die Fassadeneinheit integriert werden.

Die Elektronik steuert die erforderliche Gaskonzentration entsprechend den Anforderungen der Nutzer oder der Gebäudeleittechnik. Je nach Gasversorgungssystem können Verglasungsflächen von bis zu 10 m² geschaltet werden.

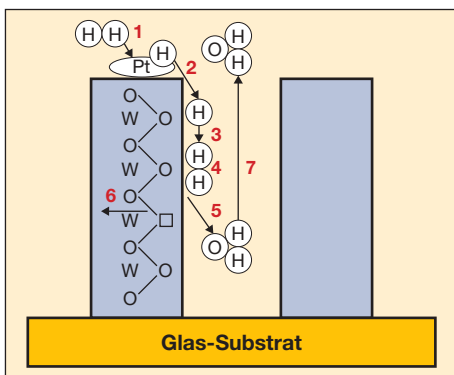
Wirkung und Kennwerte: Eine gaschrome Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1,0 W/(m²K) erreicht eine Schaltung der Lichttransmission von 0,60 zu 0,15 und des g-Wertes von 0,50 zu 0,15.

Status: Bislang wurden Scheiben bis zur Größe 1,5 x 1,8 m² realisiert. Im Sommer 2002 wurde eine erste Pilotfassade beim Hersteller mit gaschromen Verglasungen ausgestattet und wird nun getestet. Eine Markteinführung ist laut Hersteller erst ab Mitte 2003 zu erwarten.

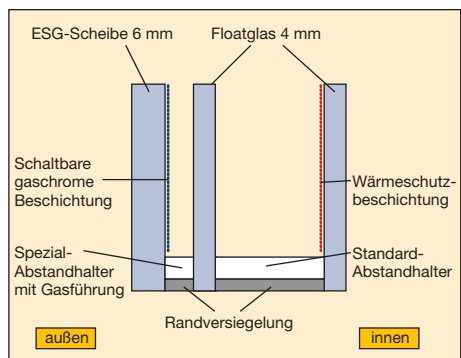
Einsatz: wie elektrochrome Verglasungen

Photochrome Systeme

Funktionsprinzip: Photochrome Gläser oder Kunststoffscheiben finden sich z. B. in selbsttönenden Sonnenbrillen. Unter Sonneneinstrahlung dunkeln diese Gläser in den Farben grau oder braun ein, bleiben jedoch durchsichtig. Dieser Effekt wird durch UV-Licht oder kurzwelliges sichtbares Licht hervorgerufen, es kommt zu – reversiblen – Übergängen der im Glas eingelagerten Silberhalogenide bzw. der auf den Kunststoffscheiben aufgetragenen organischen Schichten. In einer speziellen Weiterentwicklung (15) wurde das färbende Wolframoxid einer elektrochromen Schicht mit dem Wirkungsmechanismus einer elektrochemischen (z. B. farbstoffsensibilisierten) Solarzelle kombiniert. Derartige Funktionsschichten zeigen auch photochromes Verhalten, wobei allein sichtbares Licht für die Funktion aus-



10 Mechanismus der Einfärbung poröser Wolframoxidschichten durch Wasserstoffgas. 1: H₂ wird katalytisch aufgespalten, 2-5: Wasserstoffatome erzeugen eine Sauerstoff-Fehlstelle im WO₃ und färben die Schicht. Der entstehende Wasserdampf H₂O entweicht. Beim Entfärben in Sauerstoff wird entsprechend O₂ katalytisch aufgespalten.
 Quelle: Fraunhofer ISE



10 Aufbau einer gaschromen Wärmeschutzverglasung.
 Quelle: Interpane E&B mbH



14 Gaschrome Verglasung in verschiedenen Schaltzuständen. Jeweils rechtes Element: unbeschichtete Standardverglasung. Element links oben: gaschrome Verglasung im gefärbten Zustand. Element links unten: gaschrome Verglasung; (a) gebleicht, (b) teilweise eingefärbt, (c) stark eingefärbt. Quelle: Fraunhofer ISE / Interpane E&B mbH

reicht. Hauptvorteil gegenüber elektrochromen oder photoelektrochromen Systemen ist der deutlich einfachere Schichtaufbau. Das Erscheinungsbild ist vergleichbar mit den photoelektrochromen Systemen, wobei die leichte Gelbfärbung im hellen Zustand sogar geringer ist als in **17** (links).

Wirkung und Kennwerte: Die erzielbare Transmissionsreduktion ist erheblich, die sichtbare Transmission einer Einfachscheibe auf Silberhalogenidbasis schaltet von 0,91 zu 0,25 – hierbei erhöht sich Absorption entsprechend.

Status: Verschiedene Umstände verhindern bislang den Einsatz großformatiger Gläser in der Architektur: starke Temperaturabhängigkeit der Ein- bzw. Entfärbung, mangelnde Langzeitstabilität, hoher Absorptionsgrad im abgedunkelten Zustand und hohe Preise.

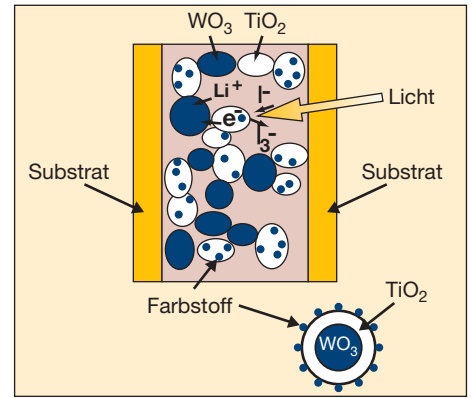
Status der Neuentwicklung: kleinflächige Prototypen.

Einsatz: Photochrome Systeme schalten vollkommen selbsttätig – dies vereinfacht die Systemtechnik, ist jedoch gänzlich unflexibel. Auch sind photochrome Systeme nur

bedingt als Sonnenschutzsysteme geeignet, da sie auch bei hoher Einstrahlung im Winter schalten. Naheliegender ist dagegen deren Einsatz als Blendschutz. Um jedoch den strengen Blendschutzkriterien zu genügen, muss eventuell der Abdunklungseffekt durch Kombination mit anderen Mechanismen oder Systemen noch verstärkt werden.

Photoelektrochrome Schichten

Funktionsprinzip: In photoelektrochromen Schichten (**16**) werden ebenfalls die Wirkungsmechanismen einer elektrochromen Schicht und einer elektrochemischen Solarzelle kombiniert. Der Ladungstransfer erfolgt über transparente, elektrisch leitende Schichten auf Glassubstraten. Über einen externen Stromkreis wird die Schicht geschaltet: Ist der externe Stromkreis geöffnet, so färbt sich die Schicht unter Bestrahlung. Die Blaufärbung des Wolframoxid bleibt erhalten, solange der Schalter geöffnet bleibt. Wird der externe Stromkreis später geschlossen, so entfärbt sich die Schicht. Es wird zur Schaltung also keine externe Strom- bzw.



16 Funktionsprinzip einer neuartigen photochromen Schicht. Nach dem Prinzip einer farbstoffsensibilisierten Solarzelle werden bei Lichteinfall freie Ladungen erzeugt, die das Wolframoxid blau einfärben. Quelle: Fraunhofer ISE

Spannungsversorgung benötigt. Zudem ist die Einfärbezeit flächenunabhängig und nicht – wie bei elektrochromen Systemen – durch die begrenzte Leitfähigkeit der transparenten Elektroden eingeschränkt. Vorteilhaft im Winter: Ein unerwünschtes Abdunkeln der Verglasung kann durch Schließen des Stromkreises unterbunden werden.

Wirkung und Kennwerte: Im Labormaßstab kann die solare Transmission von 0,47 auf 0,05 oder von 0,40 auf 0,007 geschaltet werden (s. a. **17**). Ein effektiver Sonnenschutz wäre also möglich.

Status: Es wird derzeit daran gearbeitet, photoelektrochrome Schichten großformatig zu realisieren und deren Langzeitstabilität zu verbessern. Marktverfügbare Verglasungsprodukte sind mittelfristig noch nicht zu erwarten.

Pilotprojekt: Sächsische Landesbibliothek in Dresden

>> Elektrochrome Verglasung

Status: Pilotprojekt: Neubau (Herbst 2002 noch im Bau)

Nutzung: zentraler Lesesaal

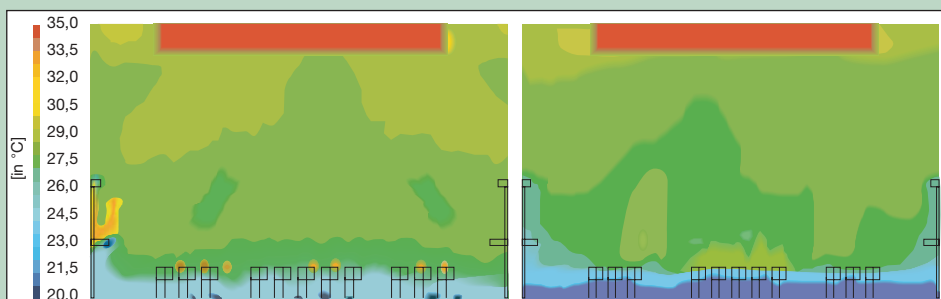
Einsatz: Elektrochrome Verglasungen als begehbare horizontale Überkopfverglasung, angeordnet in Bändern im Dach über dem zentralen Lesesaal der Bibliothek

Ziel: Sonnenschutzmaßnahme, Vermeidung thermisch unkomfortabler Situationen bei möglichst hoher Tageslichtnutzung.

Kontakt: Sächsische Landesbibliothek Dresden. Architekt: ARGE SLUB Dresden, E. Krainer. Verglasungen: FLABEG GmbH & Co KG, Fürth



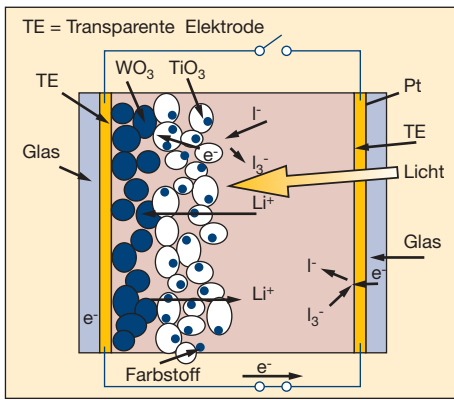
Das Dach über dem zentralen Lesesaal der sächsischen Landesbibliothek Dresden, ausgeführt als begehbare Überkopfverglasung.



Thermische Gebäudesimulation: Temperaturverteilung im Lesesaal ohne (links) und mit (rechts) elektrochromer Verglasung.



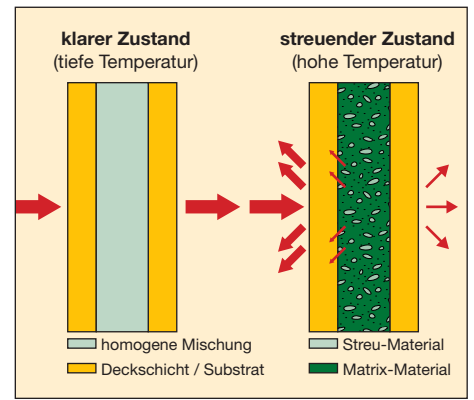
Ein Band mit elektrochromen Verglasungen im ungeschalteten Zustand.



16 Funktionsprinzip einer photoelektrochromen Schicht. Eine elektrochrom einfärbende Wolframschicht ist mit einer farbstoffsensibilisierten Solarzelle zu einem System kombiniert. Wird unter Bestrahlung der Stromkreis geöffnet, so färbt die Schicht ein (obere Hälfte). Wird der Stromkreis geschlossen, so entfärbt sich die Schicht, auch unter Bestrahlung (unten).
Quelle: Fraunhofer ISE



17 Photoelektrochromer Prototyp im Labormaßstab. Links der klare, rechts der abgedunkelte Zustand.
Quelle: Fraunhofer ISE



18 Schalprinzip einer phasenseparierenden thermotropen Schicht. Bei Schichten auf Gießharz-Basis sind die Domänen aus Streu-Material (wie im Bild rechts) dauerhaft vorhanden und der Brechungsindex des Materials ändert sich sprunghaft mit der Temperatur.
Quelle: Fraunhofer ISE

Thermochrome Schichten

Funktionsprinzip: Thermochrome Schichten wechseln ihre Farbe, wenn ihre Temperatur einen bestimmten Wert übersteigt. Vanadiumoxid ist das Material, dem das größte Potenzial zugemessen wird. In dünnen Schichten aufgetragen geht Vanadiumoxid bei etwa 68°C von dem metallischen in den Halbleiter-Zustand über. Zugleich ändern sich die optischen Eigenschaften signifikant. Dies wirkt sich am stärksten auf den infraroten Spektralbereich aus, während sich die Transmission für sichtbares Licht nur wenig ändert. Unterhalb etwa 500 nm absorbieren die Schichten stark bei entsprechend sehr geringer Transmission. Im sichtbaren Spektralbereich kann damit in beiden Schaltzuständen insgesamt wenig Licht die Schicht durchdringen.

Status: Derzeit wird an Schichten mit geringeren Schalttemperaturen und günstigeren Schalteigenschaften gearbeitet. Produkte für die Anwendung in Gebäudeverglasungen sind aber derzeit nicht absehbar, eine Eignung als schaltbare Sonnenschutzverglasung ist umstritten.

Thermotrope Verglasungen

Funktionsprinzip: Thermotrope Schichten sind für die Sonnenschutzverglasung geeignet. Sie schalten selbsttätig von einem klaren in einen stark streuenden, weiß eingetrübten Zustand. Die Lichtstreuung im geschalteten Zustand rührt von Teilchen oder Bereichen (Domänen) her, deren Brechungsindex sich von ihrer Umgebung unterscheidet. Analog zu den in der Milch fein verteilten Fetttropfchen, verursachen die Domänen in thermotropen Schichten eine starke Mehrfachstreuung und damit diffuse Transmission von Licht sowie die weiße Farbe.

Technik: Die thermotrope Schicht ist im Allgemeinen zwischen zwei Träger- bzw. Substratschichten eingebettet. Dies können z.B. zwei Glasscheiben sein, die zusammen mit der thermotropen Schicht eine Verbund-scheibe bilden. Allgemein schützen die Deck-

schichten vor schädlichen Umwelteinflüssen, bei Hydrogelen verhindern sie zudem eine Austrocknung der Schicht.

Es gibt verschiedene Materialklassen, mit denen sich ein solcher Effekt erzielen lässt. Bei einigen Systemen entstehen die lichtstreuenden Domänen durch Phasenseparation (18): Während bei tiefer Temperatur Matrix und Streumaterial homogen durchmischt und damit transparent sind, entmischen sich oberhalb der Schalttemperatur die beiden Materialien, und die Schicht trübt ein. Bei den sog. Hydrogelen bilden sich Polymerdomänen in einem wässrigen Gel, bei Polymerblends entmischen sich zwei Kunststoffe und bei Schichten auf Basis lyotroper Flüssigkristalle werden Brechungsindexdifferenz und Phasenseparation unterschiedlicher flüssigkristalliner Phasen ausgenutzt. Bei einem anderen System sind die Domänen einer thermotropen Komponente (z. B. mikroverkapselte Paraffine) dauerhaft in eine Gießharzmatrix eingebettet. Gießharzschichten können auch als freitragende Platte hergestellt werden, die sich in eine Verglasung integrieren lässt. 19 zeigt den thermotropen Schaltvorgang am Beispiel einer Verbundscheibe auf Gießharzbasis. 20 zeigt Aufnahmen in einem 1:2,5 Skalenmodell eines Büroraumes, dessen Fassade mit thermotropen Hydrogelscheiben ausgerüstet ist.

Für den Aufbau einer Wärmeschutzverglasung kann die thermotrope Verbundscheibe mit einer niedrig emittierend beschichteten Glasscheibe kombiniert werden. Die Schalttemperatur kann bei allen Systemen durch chemische Modifikationen bei der Herstellung eingestellt werden.

Wirkung und Kennwerte: Bei phasenseparierenden thermotropen Schichten in Verbundglasscheiben ändert sich die solare Transmission etwa von 0,69 auf 0,09 und die Lichttransmission von etwa 0,88 auf

0,19. Für thermotrope Wärmeschutzverglasungen auf Polymerblend-Basis wurden g-Wert-Schaltungen bei senkrechtem Lichteinfall von 0,48 auf 0,15 und bei Einfall unter 60° von 0,35 auf 0,16 berichtet. Hydrogel-Systeme zeigen etwas höhere Schalthebe. Verbundscheiben auf Gießharzbasis reduzieren die solare Transmission etwa von 0,65 auf 0,40 und die Lichttransmission von etwa 0,80 auf 0,40. Durch die Vielzahl von Ansätzen und verschiedenen Systemprototypen variieren die Kenndaten thermotroper Verglasungen beträchtlich, was bei der Diskussion jeweils zu berücksichtigen ist. Die Spannweite spiegelt sich in den Werten, die in 6 und 9 aufgeführt sind.

Status: Im Sommer 2002 wurden erste Pilotfassaden mit thermotropen Verglasungen ausgerüstet. Termine für eine Markteinführung thermotroper Verglasungen stehen zwar noch nicht fest, sind aber für 2003 denkbar.

Einsatz: Aufgrund fehlender Durchsicht im geschalteten Zustand eignen sich thermotrope Schichten besonders für den Einsatz im Oberlichtbereich oder für eine Integration in dauerhaft lichtstreuenden Verglasungen wie z. B. TWD. Die in 20 (a-d) gezeigte Anordnung mit Hydrogel-Verbundscheiben wurde lediglich gewählt, um den Schalteffekt zu verdeutlichen.

Aus dem selben Grund bieten sich thermotrope Schichten auch für teilflächige Lösungen an, bei denen unbelegte oder ungeschaltete Bereiche die Durchsicht erhalten (20 (e-h)). Auch werden seit einiger Zeit thermotrope Scheiben als Lamellen oder Kombinationen von thermotropen Scheiben mit Siebdruckscheiben untersucht, bei denen sich die Schattenwürfe der Siebdruckmuster



19 Schaltvorgang einer thermotropen Verbundscheibe auf Gießharzbasis. Die Scheibe geht vom klaren Zustand (links) in ein Zwischenstadium (Mitte) und nach insgesamt 10 bis 60 Minuten in den (fast) vollständig geschaltete Zustand (rechts).
Quelle: Okalux GmbH



20 a-d: Schaltvorgang einer mit thermotropen Hydrogel-Verbundscheiben ausgestatteten Bürofassade als 1:2,5-Skalenmodell. Um den Vorgang zu verdeutlichen wurde die gesamte Fassade thermotrop belegt, was in der Anwendung kaum sinnvoll ist.
e-h: Andere Anordnungen: nur teillächige Belegung klar (e) und geschaltet (f) und als auskragendes Element klar (g) und geschaltet (h)
Quelle: H. Hartwig, TU München / Thermotrope Gläser: Affinity Co. Ltd., Japan

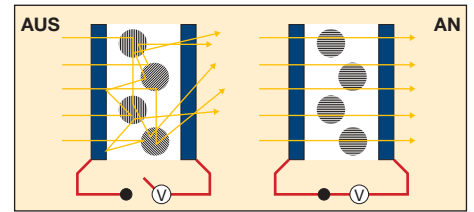
als ungeschaltete Bereiche mit Teildurchsicht auf der thermotropen Scheibe abbilden. Auf diese Weise gibt es viele Gestaltungsmöglichkeiten mit thermotropen Schichten. In den Übergangsjahreszeiten besteht die Gefahr, dass die thermotrope Verglasung trotz Wärmebedarf schaltet oder umgekehrt auch bei Überhitzungsgefahr zu lange transparent bleibt. Prinzipiell könnten thermotrope Schichten aktiv geschaltet werden, z. B. mit einer elektrischen Direktheizung – aus energetischen Gründen ist dies aber nicht sinnvoll.

PDLC-Verglasungen

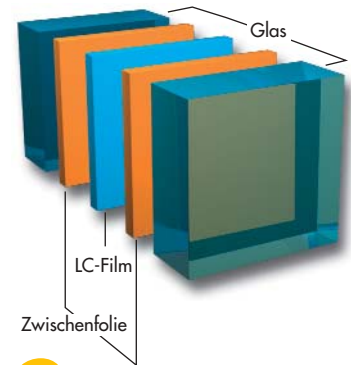
Funktionsprinzip: Wie bei thermotropen Schichten beruht auch die Eintrübung von Polymer-Dispersed Liquid Crystal (PDLC)-Schichten auf der Lichtstreuung an Teilchen, deren Brechungsindex sich von ihrer Umgebung unterscheidet. Die in PDLC-Schichten fein verteilten Flüssigkristalldomänen besit-

zen einen richtungsabhängigen (anisotropen) Brechungsindex. Ohne angelegte Spannung sind die Flüssigkristalle willkürlich orientiert und Licht wird gestreut. Wird eine elektrische Spannung angelegt (und damit ein elektrisches Feld erzeugt), so richten sich die Flüssigkristalle einheitlich aus und die Schicht wird klar, weil der Brechungsindex der Umgebung an den der orientierten Flüssigkristalle angepasst ist (**21**). Sehr hohe Transparenz wird allerdings nur senkrecht zur Schicht erzielt. Bei schrägem Lichteinfall oder schrägem Blickwinkel ist eine leichte Streuung zu beobachten.

Technik: Zwischen zwei leitend beschichteten Kunststofffolien befindet sich das optisch aktive Material (LC Film in **22**). In der PDLC-Verglasung ist dieser Folienverbund eingebettet zwischen zwei Glasscheiben. Für den Aufbau einer Wärmeschutzverglasung wird dieser Verbund kombiniert mit einer niedrig emittierend beschichteten Scheibe.



21 Funktionsprinzip einer PDLC-Schicht. Der anisotrope Brechungsindex ist durch die Schraffur angedeutet. Liegt keine orientierende Spannung an ("AUS"), so wird Licht gestreut und die Schicht ist weiß eingetrübt. Der Brechungsindex in Orientierungsrichtung ("AN") ist an die Umgebung angepasst und die Schicht ist weitgehend transparent.
Quelle: Saint Gobain, Aachen



22 Aufbau einer PDLC-Verglasung.
Quelle: Saint Gobain, Aachen

Wirkung und Kennwerte: Die Eintrübung von PDLC-Verglasungen bewirkt praktisch keine Änderung der Gesamt-Lichttransmission oder des g-Wertes, da lediglich zwischen gerichteter und diffuser Transmission geschaltet wird. Dies liegt am im Vergleich zu thermotropen Systemen geringeren Brechungsindexkontrast. PDLC-Verglasungen eignen sich deswegen nicht als Sonnenschutz. Sie werden als schaltbarer Sichtschutz ("Privacy Glass" – s. a. **8**) oder als zuschaltbare Projektionsfläche im Innenbereich oder an Fassaden eingesetzt.

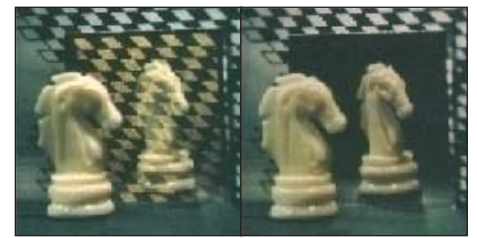
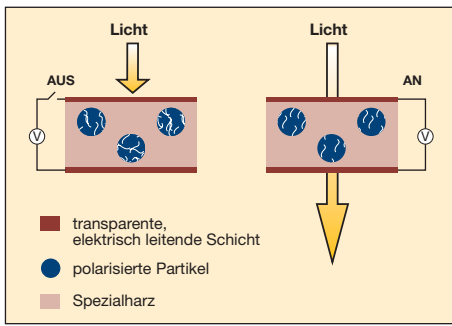
Aus energetischer Sicht ist nachteilig, dass zur Erhaltung des klaren Zustandes eine elektrische Spannung angelegt sein muss. Dabei wird laufend Strom verbraucht.

Status: (PDLC)-Verglasungen sind die derzeit einzigen schaltbaren Verglasungen, die schon in Formaten für die Architektur markverfügbar sind. Privacy Glass ist zum Endkundenpreis von ca. 1700.- €/m² erhältlich. (Stand: September 2002)

SPD-Verglasungen

Funktionsprinzip: Das Funktionsprinzip von sogenannten Suspended-Particle-Devices (SPD) ist dem der PDLC-Systeme sehr ähnlich. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass hier die ausgerichteten Teilchen in einer Richtung stark absorbieren und dadurch die Scheibe im ausgeschalteten Zustand stark abdunkelt (**24**).

Technik: Der Schichtaufbau entspricht dem einer PDLC-Verglasung (**22**), wobei jetzt anstelle des LC-Films der SPD-Film einge-



25 Kleines Muster eines durch Wasserstoffgas schaltbaren Spiegels (HYSWIM).
Quelle: Prof. R. Griessen, Vrije Univ. Amsterdam

23 Funktionsprinzip einer SPD-Verglasung. Bei Anlegen einer Spannung werden die Teilchen orientiert und die Scheibe wird transparent. Quelle: Hänglas

24 Suspended-Particle-Device (SPD)-Verglasung. Links: aus/dunkel, rechts: an/hell. Quelle: Research Frontiers Inc., N.Y.

fügt ist (23).

Wirkung und Kennwerte: Je nach Ausführung kann die solare Transmission zwischen 20 und 60%, zwischen 10 und 50% oder zwischen 0,1 und 10% geschaltet werden. Damit sind solche Systeme als Sonnenschutzverglasung geeignet.

Status: Mehrere Verglasungsunternehmen haben eine SPD-Lizenz erworben. Derzeit ist noch kein Architekturglas-Produkt marktfähig.

Schaltbare Spiegel

Funktionsprinzip: Ähnlich wie gaschrome Schichten können auch Schichten auf Metallhydridbasis durch Kontakt mit Wasserstoffgas geschaltet werden. Daher auch die englische Kurzbezeichnung "Hydrogen Switchable Mirrors (HYSWIM)". Sie zeigen bei zunehmender Wasserstoffkonzentration einen Übergang von einem metallisch spie-

gelnden Zustand mit ca. 70% Reflexion in einen transparenten Halbleiterzustand mit ca. 70% Transmission. Während die in 26 gezeigte Probe im transparenten Zustand eine Restfärbung aufweist, wurden auch schon farbneutrale Schichten demonstriert, die außerdem einen stark absorbierenden Zwischenzustand aufweisen.

Wirkung: Schaltbare Spiegel sind für eine großflächige Anwendung in Fassaden trotz ihres großen Schalthubes kritisch einzustufen, da mit der starken metallisch spiegelnden Reflexion eine starke Außenblendung verbunden ist. Daher sind vor allem Anwendungen denkbar, in denen die optische Schaltung mit einer Lichtumlenkfunktion kombiniert wird.

Status: Die Schichten werden in Grundlagenarbeiten intensiv untersucht. Eine großflächige Anwendung für Gebäudefassaden ist mittelfristig nicht zu erwarten.

Weitere Ansätze

In lichtlenkenden Verglasungen oder Scheiben mit prismatischen Elementen kann der im Jahresverlauf variierende Sonnenstand ausgenutzt werden, um einen saisonalen Sonnenschutz durch Ablenkung von direkter Strahlung zu erreichen. Allerdings besteht bei diesen Systemen ebenso wie bei elektrochromen oder gaschromen Verglasungen die Gefahr, dass zwar ein ausreichender Sonnenschutz, aber kein befriedigender Blendenschutz erreicht wird.

Neuerdings werden Systeme untersucht, in denen eine lichtlenkende Reflektorstruktur, die als Mikrostruktur in den Glasverbund integriert, mit schaltbaren Schichten kombiniert wird. Dies macht die Verglasung in der Anwendung flexibler und birgt das Potenzial, neben dem Sonnenschutz auch einen ausreichenden Blendenschutz gewährleisten zu können. Diese Arbeiten befinden sich allerdings noch im Grundlagenstadium und mit Architekturglasprodukten ist mittelfristig nicht zu rechnen.

Kenndaten von schaltbaren Schichten und Architekturverglasungen, soweit verfügbar

System	Daten liegen vor für		Transmissionsgrad*) für sichtbares Licht		Transmissionsgrad*) für Solarstrahlung		Gesamtenergie-durchlassgrad (g-Wert)	
	Schicht + Substrat(e)	Wärmeschutzverglasung	hell	dunkel	hell	dunkel	hell	dunkel
Elektrochrom FLABEG		x	0,50	0,15	0,29	0,07	0,36	0,12
Elektrochrom GESIMAT	x		0,74	0,15	0,52	0,09		
Gaschrom Interpane		x	0,60	0,15			0,50	0,15
Photochrom 1	x		0,91	0,25				
Photochrom 2	x		0,90	0,15				
Photoelektrochrom 1	x		0,64	0,10	0,47	0,05		
Photoelektrochrom 2	x		0,63	0,014	0,40	0,007		
Thermotrop Hydrogel 1	x		0,88	0,19	0,69	0,09	0,75	0,22
Thermotrop Hydrogel 2		x	0,74	0,16	0,44	0,09	0,55	0,14
Thermotrop Polymerblend 1		x	0,73	0,21	0,44	0,13	0,55	0,18
Thermotrop Polymerblend 2		x					0,48	0,15
Thermotrop Gießharz	x		0,80	0,40	0,65	0,40		
Thermochrom	x		0,33	0,30	0,33	0,23		
PDLC SGG Priva-Lite	x		0,77	0,76			0,63	0,64
PDLC SGG Priva-Lite		x	0,69	0,68			0,59	0,59
SPD Research Frontiers	x		0,60	0,20				
SPD Research Frontiers	x		0,50	0,10				
SPD Research Frontiers	x		0,10	0,01				
Schaltbare Spiegel HYSWIM	x		0,70	< 0,30				

*) hemisphärischer Transmissionsgrad für senkrechten Einfall

26 Visuell und energetisch relevante Effekte von schaltbaren Schichten und Verglasungen

Fazit

Schaltbare Verglasungen versprechen eine bedarfsgerechte Regelung des Energie- und Lichteintrages in Gebäude und eröffnen damit neue Möglichkeiten in der Architektur. Momentan sind noch keine Produkte am Markt verfügbar, die Markteinführung einiger innovativer und attraktiver Produkte ist aber in der nächsten Zeit zu erwarten.

Die thermischen Eigenschaften moderner Verglasungen erlauben in unseren Breiten einen großflächigen Einsatz von Glas in der Architektur. Während in der Vergangenheit der winterliche Wärmeschutz maßgeblich für den Energiebedarf war, tritt insbesondere im Nicht-Wohnungsbau der sommerliche Wärmeschutz zunehmend in den Vordergrund. Konkurrierende oder zeitlich variierende Anforderungen bezüglich Tageslichtversorgung, Blendschutz und thermischem Komfort können mit statischen Verglasungen nicht bedient werden. Hier besitzen schaltbare Verglasungen das Potenzial, solare Energiegewinne nutzbar zu machen, Räume bedarfsgerecht mit Tageslicht zu versorgen und gleichzeitig unkomfortable Raumtemperaturen und Blendung zu vermeiden.

Seit vielen Jahren wird daher intensiv daran gearbeitet, schaltbare Verglasungen zur Regelung des Licht- und Energieeintrags in Gebäude zur Marktreife zu bringen. Die Markteinführung einiger vielversprechender Produkte ist in den kommenden Jahren zu

erwarten. Thermotrope, elektrochrome und gaschrome Verglasungen sind als großflächige Verbundscheiben und Verglasungen verfügbar und werden an Pilot- und Demonstrationsfassaden getestet. In Studien und Simulationen wurde das Potenzial schaltbarer Verglasungen vielfach demonstriert und die Nachfrage nach flexiblen Lösungen ist groß. Die jetzt in Kürze anstehende Markteinführung dieser Systeme steht allerdings unter dem Vorbehalt, dass die noch ausstehenden Prüfungen und (Praxis-) Tests erfolgreich verlaufen.

Ob schaltbare Verglasungen großflächig zum Einsatz kommen werden, wird nicht zuletzt von den Systemkosten abhängen. Den zu erwartenden hohen Kosten für schaltbare Verglasungen stehen Einsparpotenziale bei den Betriebskosten und Komfortgewinne gegenüber. Heute können hierzu noch keine definitiven Angaben gemacht werden. Planer und Architekten müssen also noch bis zur Markteinführung warten, um dann für das konkrete Objekt zu entscheiden, ob der Einsatz schaltbarer Verglasungen lohnt.

Projektorganisation

Förderung

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 11019 Berlin

Projekträger Jülich (PTJ) des BMWi
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Hans-Georg Bertram
52425 Jülich

Projektadressen

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Dr. Peter Nitz u. a.
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

INTERPANE Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH & Co. KG
Dr. Harald Hagenström
Sohnreistr. 21, 37697 Lauenförde

Metallbau Ralf Boetker GmbH
Bernd Neubauer, Meenheit 53, 28816 Stuhr

FLABEG GmbH & Co. KG
Thomas Deinlein, Siemensstraße 3, 90766 Fürth

GESIMAT GmbH
Dr. Matthias Rottmann
Köpenicker Str. 325, 12555 Berlin

Impressum

ISSN

1610 - 8302

Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische
Information mbH,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig mit vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares. Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung des jeweils Berechtigten.

Autoren

Dr. Peter Nitz, Fraunhofer ISE, Freiburg
Prof. Andreas Wagner, ifba, TU Karlsruhe

Redaktion

Johannes Lang

Kontakt

Fragen zu diesem Themeninfo?

Wir helfen Ihnen weiter – wählen Sie die BINE Experten-Hotline:

Tel. 0228 / 923 79-44

Allgemeine Fragen?

Wünschen Sie allgemeine Informationen zum energie- und umweltgerechten Planen und Bauen? Dann wenden Sie sich bitte an die unten stehende Adresse

Ergänzende Informationen

Weitere Informationen und eine ausführliche Linkliste zum Thema sind bei BINE oder unter www.bine.info (Service/InfoPlus) abrufbar



BINE

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe
Meckenstraße 57, 53129 Bonn
Tel. 0228 / 9 23 79 0
Fax 0228 / 9 23 79 29
eMail bine@fiz-karlsruhe.de
Internet: www.bine.info