

Innovationen für die Verglasung von Gebäuden

von Volker Wittwer

Überblick

Bei der Entwicklung neuer Verglasungen spielen zwei Gesichtspunkte eine hervorragende Rolle. Zum einen ist man an Fenstern mit sehr geringen Wärmeverlusten interessiert. Zum anderen soll aber auch die solare Einstrahlung während der Heizperiode zu thermischen Gewinnen beitragen. Die Vielfalt der einsetzbaren Beschichtungen und Fenstersysteme ermöglicht eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere um Überhitzungsprobleme im Sommer auszuschließen, ist man an Verglasungen interessiert, die die Einstrahlung selber, d. h. ohne mechanische Zusätze, regeln. Tatsächlich führen hierfür verschiedene Ansätze zu Neuentwicklungen.

There are two main aspects in the development of new glazing. On the one hand, windows with extremely low thermal conductivity are wanted. On the other hand, solar irradiation should contribute to thermal gains during the heating season. A large number of different coatings and window systems is suited for many different applications. In particular for the prevention of overheating in the summer, there is a huge interest in glazing regulating the irradiation itself without additional mechanical devices. Indeed, innovations have sprung missing several of these ideas.

1. Einleitung

Fenster hatten im Laufe der Entwicklung eine Vielzahl von Anforderungen zu erfüllen. Die wichtigste Aufgabe war zunächst der Witterungsschutz, d.h. die Menschen in ihren Häusern vor Kälte und Nässe zu schützen. Gleichzeitig dienten Fenster jedoch schon immer dazu, den Blickkontakt nach außen und die Beleuchtung des Hauses durch das Tageslicht zu ermöglichen. Neu hinzugekommen sind Lichtleit- und Lichtlenkasspekte, Regelung des Strahlenflusses und hybride Effekte, wie sie bei Doppelfassaden genutzt werden. Der energetische Aspekt, daß mit dem sichtbaren Licht auch die gesamte Solarstrahlung in das Haus einfällt, im Gebäude in Wärme umgewandelt wird und auf Grund der speziellen spektralen Eigenschaften des Glases nur noch in geringem Umfang an die Umgebung abgegeben wird, war zunächst nur ein ungewollter und wahrscheinlich auch nicht verstandener Nebeneffekt, der

im Winter maßgeblich zur Heizung eines Raumes beitrug, andererseits im Sommer häufig zur Überhitzung führte.

2. Grundbegriffe

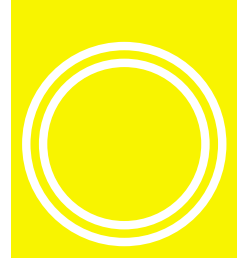
Die Sonneneinstrahlung besteht aus drei wichtigen Teilbereichen :

- Kurzwellige UV-Strahlung mit einem energetischen Anteil von nur 5 % aber wesentlichen physiologischen Auswirkungen auf Pflanzen und Menschen.
- Sichtbares Licht (370 bis 780 nm) mit einem energetischen Anteil von etwa 50 %.
- Nahes Infrarotlicht (780 bis 2500 nm bzw. 0,78 bis 2,5 μm) mit einem energetischen Anteil von etwa 45 %.

Zusätzlich gibt es die sogenannte „Wärmestrahlung“, die bei Raumtemperaturen spektral im mittleren Infrarotbereich von 5 bis 50 μm liegt und sich so von der Infrarotstrahlung der Sonne unterscheidet.

Wichtigste Kenngröße für die thermische Charakterisierung eines Fensters ist der Wärmeverlustkoeffizient oder k-Wert gemessen in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, der angibt, wieviel Wärme pro Quadratmeter Fensterfläche in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur durch ein Fenster verloren geht.

Für die Lichtdurchlässigkeit gibt es je nach Anwendung verschiedene Kennzahlen. Bei Beleuchtungssystemen in Bürogebäuden spielt vor allem der Transmissionsgrad für sichtbares Licht eine wichtige Rolle. Soll möglichst viel Sonnenenergie durch die Fenster in ein Gebäude eindringen, dann muß der Transmissionsgrad für sichtbares und nahes Infrarot-Licht möglichst hoch sein. Ferner wird bei manchen Anwendungen der Unterschied zwischen direktem und indirektem Licht in der Definition der Lichtdurchlässigkeit mitberücksichtigt. In der Praxis verwendet man seit einiger Zeit meistens den hemisphärischen Gesamtenergiedurchlaßgrad, den sogenannten g-Wert. Es handelt sich dabei um den Transmissionsgrad für Sonnenlicht und den sekundären Wärmefluß, der auf Grund von Absorptionen vor Fenstern



entsteht und zusätzliche thermische Gewinne ermöglicht.

Auch beim k-Wert gibt es seit einiger Zeit eine Modifikation, nämlich den effektiven k-Wert, der die solaren Gewinne während der Heizperiode mitberücksichtigt. Laut Wärmeschutzverordnung '95 wird er folgendermaßen berechnet :

$$k_{\text{eff}} = k - g \times S.$$

Die Größe S ist klima- und orientierungsabhängig und liegt in Tabellen vor.

3. Bewertungen

Bewertungen eines Fensters für eine bestimmte Anwendung müssen letztendlich die Eigenschaften des gesamten Gebäudes mitberücksichtigen. So ermöglicht ein konventionelles Isolierglasfenster mit Südorientierung und großem g-Wert hohe solare Gewinne während des Tages, verursacht aber andererseits große thermische Verluste während der Nacht. Eine neue Wärmeschutzverglasung mit geringerem k-Wert und kleinerem g-Wert läßt hingegen nur weniger solare Gewinne während des Tages zu, vermindert aber den Wärmeverlust während der Nacht. Für die Bewertung des energetischen und thermischen Komforts sind die thermischen Gesamteigenschaften des Gebäudes von ausschlaggebender Bedeutung. Das Problem der energetischen Optimierung ist damit eng mit dem Problem der Überhitzung verbunden, das heißt der Frage, wieviel Solarenergie darf und kann ich in das Gebäude hereinlassen, ohne daß dies Übertemperaturen verursacht.

Auf dem heutigen Markt befindet sich eine Vielzahl von Verglasungssystemen für Fenster mit recht unterschiedlichen Kenndaten. [Abbildung 1](#) zeigt eine typische Auswahl. Aufgetragen ist hier der k-Wert der Fenster gegen deren g-Wert. Man erkennt sehr schön die Entwicklung der Verglasungen von thermisch schlechten Fenstern zu immer besser isolierenden Fenstern. Erreicht wird dies durch selektive Beschichtungen der Gläser und durch die Befüllung der Scheibenzwischenräume mit Edelgasen. Der derzeit beste k-Wert von 0,4 W/m²K wird

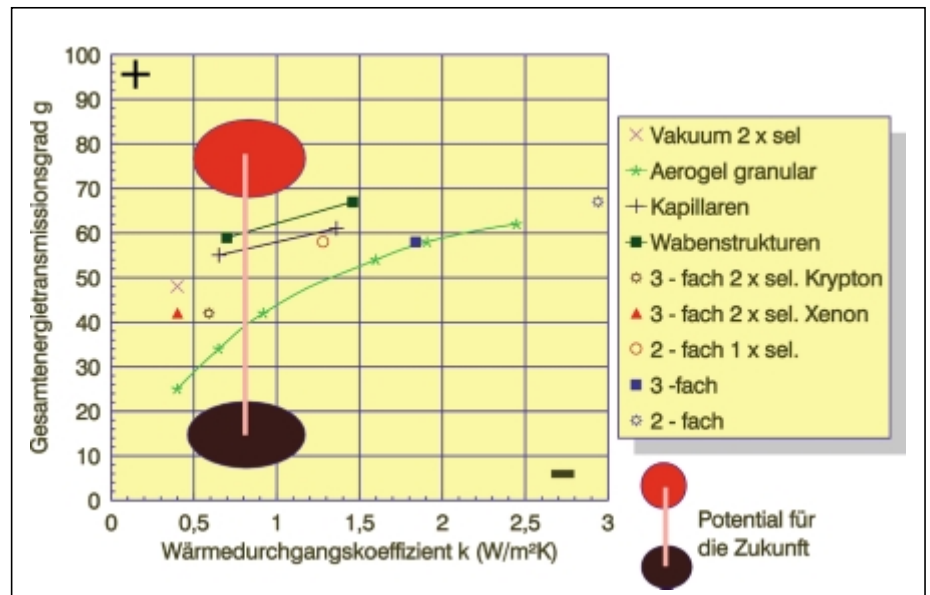


Abbildung 1: Charakteristische Verglasungskenndaten. Wärmedurchgangskoeffizient k (W/m²K) und hemisphärischer Gesamtenergietransmissionsgrad g heutiger und künftiger Verglasung

von einer 3-fach Verglasung mit zwei selektiven Schichten und einer Xenonfüllung erreicht. Dieser Wert gilt jedoch nur für das Zentrum der Verglasung. Betrachtet man das gesamte Fenster, dann liegt der k-Wert, begründet durch die relativ hohe Wärmeleitung des Randverbundes und des Rahmens, deutlich höher. Obwohl diese Problematik heute vor allem in der Forschung bekannt ist, wird sie von der Industrie nicht ernst genug genommen. Auch gibt es leider keine gesetzlichen Vorschriften, die bessere Rahmen vorschreiben.

Eine zweite Tatsache, die man in [Abbildung 1](#) sehr schön erkennt, ist die Schwierigkeit, daß mit einer Verbesserung des k-Wertes im allgemeinen eine Abnahme des g-Wertes einhergeht. Die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Beschichtungen lassen die Optimierung der beiden Kenndaten leider nur begrenzt zu.

Ebenfalls eingetragen sind die Kenndaten zweier transparenter Wärmedämmsysteme auf der Basis von Waben- und Kapillarstrukturen. Diese Systeme eignen sich besonders für Verglasungsanwendungen, bei denen keine direkte Durchsicht notwendig ist und hohe solare Gewinne erwünscht sind. Sie sind also interessant für die transparente Wärmedämmung an Gebäuden und hocheffiziente Sonnenkollektoren.

[Abbildung 2](#) zeigt die nach Wärmeschutzverordnung '95 berechneten Energiebilanzen verschiedener Verglasungen für eine Heizperiode an. Diese Daten geben nur eine grobe Richtgröße. In der Praxis müssen detailliertere Berechnungen unter Berücksichtigung des gesamten Gebäudes durchgeführt werden. Nicht berücksichtigt sind auch die Probleme der Überhitzung, die bei hocheffizienten Fenstern im Sommerhalbjahr auftreten.

4. Ziele

Die in [Abbildung 1](#) eingezeichneten Ellipsen kennzeichnen die angestrebten Ziele für die Fenster von morgen. Die Verglasung soll möglichst geringe k-Werte und gleichzeitig hohe g-Werte aufweisen. Zusätzlich sollten Regelungsmöglichkeiten für den Licht- und Energiedurchlaß integriert sein, um für angenehme Temperatur- und Lichtverhältnisse im Gebäude zu sorgen, insbesondere um eine Überhitzung zu vermeiden. In einigen Fällen ist auch die Integration von lichtleitenden Materialien in das Fenster erstrebenswert. Dies kann vor allem bei Bürogebäuden dazu beitragen, die Räume besser auszuleuchten und die Kosten für die künstliche Beleuchtung zu verringern. Die untere Ellipse gibt die Zielvorstellungen an, die man durch den Einsatz schaltbarer Schichten zu erreichen hofft [2].

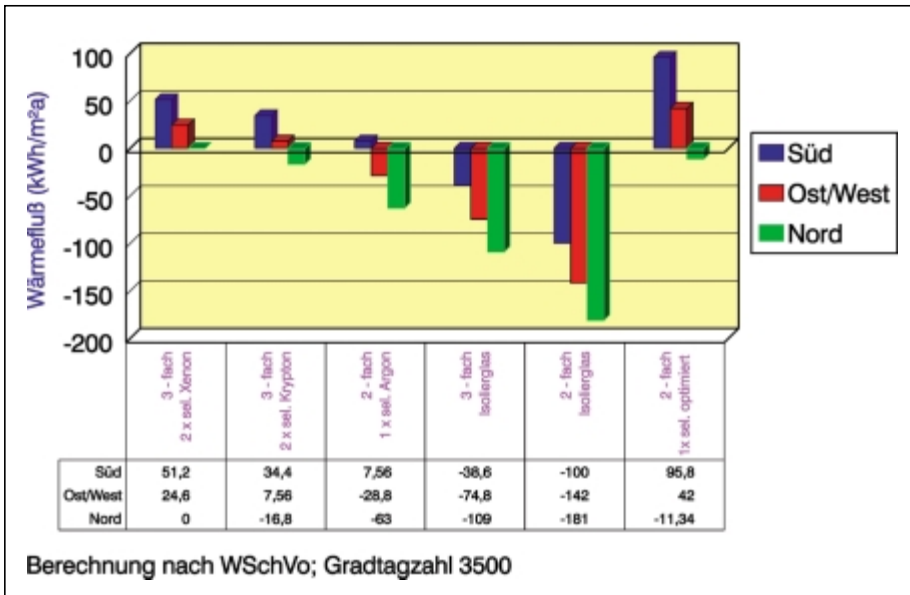


Abbildung 2: Jahresenergiebilanz, verschiedener Verglasungen für eine Heizperiode und für verschiedene Himmelsrichtungen

5. Innovationen

Auf der Glastec '96 wurde eine Reihe von Innovationen gezeigt, die diesen Zielen wesentlich näher kommen. Erwähnt sei hier eine Entwicklung aus Australien und Japan. Das Problem der Wärmeleitung durch Gase wird dadurch umgangen, daß eine Zweifachverglasung unter Einschluß eines Vakuums dauerhaft miteinander verbunden wird. Sogenannte Spacer dienen dazu, den Druck der Atmosphäre aufzunehmen. Die technischen Schwierigkeiten liegen derzeit bei der Verfügbarkeit geeigneter Glaslotprozesse. Der geplante Einsatzbereich in Japan liegt beim Ersatz von Einfachverglasungen, da diese Vakuumverglasungen sich aufgrund ihrer geringen Dicke von unter 10 mm besonders dazu eignen. Die k-Werte dieser Fenster liegen heute bei $2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hier gibt es noch große Verbesserungspotentiale.

Man unterscheidet zwei Arten von selektiven Beschichtungen:

- Hardcoatings auf der Basis von SnO_2 mit hohem Transmissionsgrad und relativ hohen k-Werten aufgrund von Emissionen im Bereich der Wärmestrahlung.
- Softcoatings auf der Basis von Silber mit geringer solarer Transmission, jedoch extrem guten k-Werten wegen geringer Emissionen im Bereich der Wärmestrahlung.

In beiden Fällen lassen sich durch Optimierung der Schichtsysteme noch deutliche physikalische Verbesserungen erzielen. Die mit neuentwickelten Beschichtungstechnologien hergestellten Materialien lassen sich noch wesentlich verbessern. Gute k-Werte und gleichzeitig hohe solare Transmissionsgrade sind kein prinzipieller Widerspruch, jedoch bedarf es hier noch großer Anstrengungen im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Die neuesten Entwicklungen im Bereich der Oberflächenstrukturierung von Gläsern führen zu deutlichen Verbesserungen der physikalischen Fenstereigenschaften. Dabei handelt es sich unter anderem um Verglasungen mit einer erhöhten Transmission ohne die vielfach unerwünschten Reflexionseigenschaften großer Glasfassaden. Auch im Bereich der durchsichtigen Abdeckungen, wie zum Beispiel für Bilder, Fernseher oder Computer, sind diese Neuentwicklungen von Interesse. Nach deren Umsetzung in eine massenproduktionsfähige Technologie lassen sich so breitbandige Antireflexschichten auf Gläsern durch Tauch- und Prägeverfahren kostengünstig herstellen.

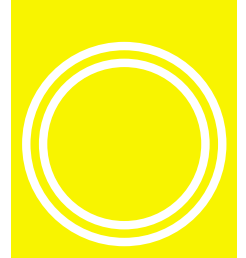
Sehr wichtig für die Zukunft sind Verglasungen, die die Sonneneinstrahlung selbst, d.h. ohne mechanische Zusatzeinrichtungen, regeln. Je weniger die Fenster Wärmeverluste zulassen und je besser sie die solare Wärme

im Winter einfangen, desto höher wird die Gefahr der Überhitzung im Sommer. Die heute eingesetzten meist mechanischen Systeme wie Rollos oder Lamellen haben zwar gute Schalteigenschaften, sind aber bezüglich ihrer Langzeitstabilität anfällig und häufig auch sehr teuer. Intelligente statische Systeme, thermooptische, elektrooptische oder photochrome Systeme bieten eine Anzahl von neuen Ansätzen, sind aber bisher nur beschränkt oder als Prototypen auf dem Markt. In Anhang 1 und 2 sind zwei dieser Varianten dargestellt, die durch ihre einfache Herstellung und ihr hohes Schaltvermögen faszinieren. Im ersten Fall handelt es sich um thermotrope Schichten, die ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur verändern und so zwischen hoher Transmission und Reflexion umschalten. Im zweiten Fall handelt es sich um eine neue Variante der elektrochromen Schichtsysteme, bei denen das treibende elektrische Feld durch eine katalytische Gasreaktion auf der Oberfläche ersetzt wird. Diese Systeme variieren zwischen hoher Transmission und starker Absorption. Beide Systeme sind derzeit nur als Prototypen vorhanden. Deren Massenproduktion könnte jedoch in einigen Jahren den Verglasungsmarkt revolutionieren.

Eine weitere Innovation für Fenster, die in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die Ausstattung mit Lichtlenk- und Lichtleiteigenschaften. Besonders interessant ist die Abschattung für bestimmte Einstrahlungswinkel der Sonne, u. a. um Überhitzungen im Sommer zu vermeiden. Ferner lohnt es sich, das Sonnen- und Himmelslicht weiter in die Räume hineinzulenken, um somit das Tageslicht u. a. in Büroräumen besser zu nutzen. Hierfür wurden Systeme mit holographischen Schichten, metallisch reflektierenden Oberflächen und totalreflektierenden Strukturen entwickelt. Diese Systeme faszinieren aufgrund ihrer hohen Teiltransparenz und ihrer sehr geringen Absorption, derentwegen sie keinerlei Probleme mit dem Aufwärmen im Sommer haben.

6. Ausblick

Weitere große Fortschritte sind bei den Neuentwicklungen für Verglasun-



gen zu erwarten. Neue Beschichtungstechnologien und der Einsatz neuer Materialien werden die Kenndaten deutlich verbessern und somit die Einsatzmöglichkeiten von Glas im Fassadenbereich erweitern. Die Fassade der Zukunft wird als Vollglasfassade oder als Hybridsystem in Kombination mit massiven Baustoffen, thermischen Kollektoren oder integrierten Photovoltaikmodulen variabel und intelligent sein und in jedem Fall einen multifunktionalen Charakter haben, der ein geeignetes ökonomisches, ökologisches und biologisches Umfeld für seine Bewohner bietet.

Dank

Bei nachfolgenden Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) möchte ich mich besonders für ihre Unterstützung bedanken: Wolfgang Graf, Peter Nitz und Andreas Georg. Die Forschungsarbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und mehrere Industriepartner unterstützt. Besonders erwähnt seien hier die Firmen BASF und Interpane.

Anhang 1 Thermotrope Schichten

Fenster und Fassaden, die bei niedrigen Temperaturen Sonnenlicht und damit Wärme durchlassen, bei höheren Temperaturen aber reflektieren, werden derzeit am Fraunhofer ISE entwickelt. Grundlage hierfür sind sogenannte thermotrope Schichten, die in Form eines dünnen Films zwischen Folien oder Gläsern aufgebracht werden. Sie sollen vor allem im Sommer vor Überhitzung schützen, ohne daß dafür aufwendige Rollos oder andere Abschattungseinrichtungen inklusive der dazugehörigen Regelung installiert werden müßten. Thermotrope Verschattungen werden im Rahmen eines Industrieverbundprojektes mit den Firmen BASF AG, Interpane E&B mbH und StoAG zur Marktreife entwickelt [3].

Thermotrope Schichten bestehen aus einer Mischung von zwei Komponenten mit unterschiedlichem Brechungsindex. Diese sind bei tiefen Temperaturen molekular miteinander vermischt, so daß die Schicht homogen

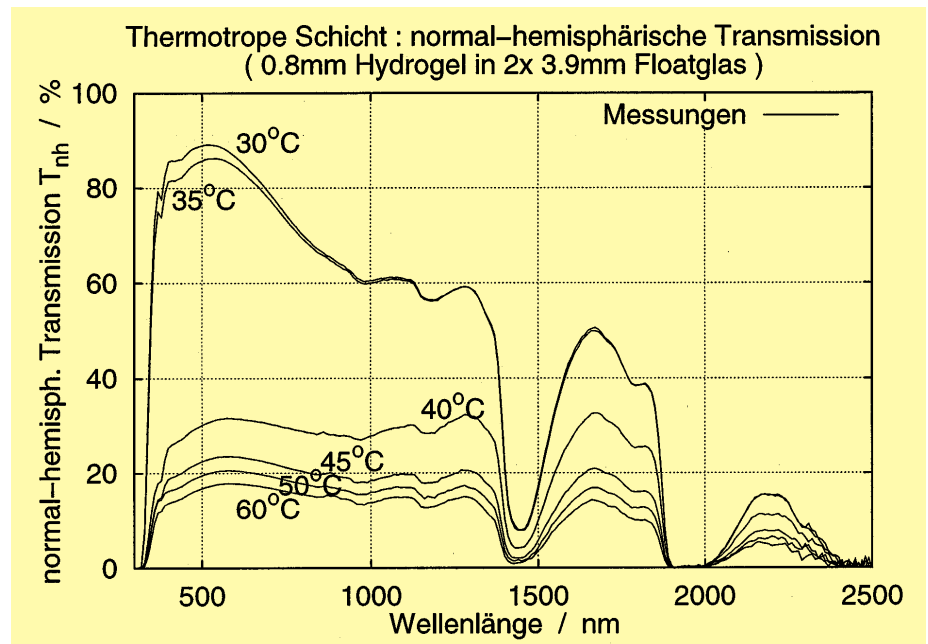
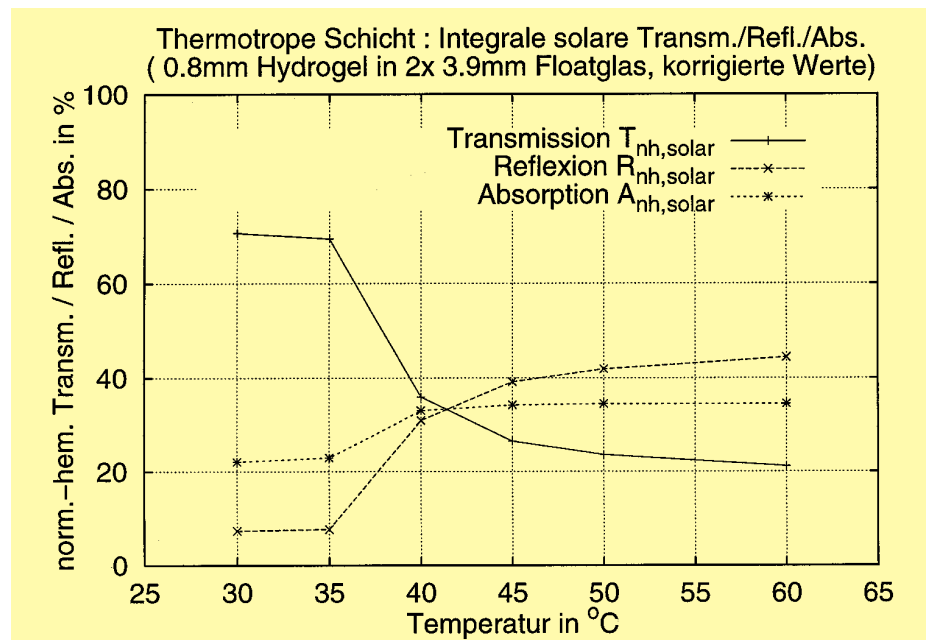


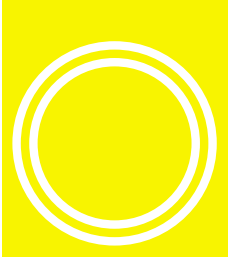
Abbildung 3: Spektrale Transmission einer thermotropen Hydrogelprobe in Abhängigkeit von der Temperatur (0,8 mm Hydrogel in 2x3,9 mm Floatglas)

Abbildung 4: Integrale Werte der Reflexion, Transmission und Absorption einer thermotropen Hydrogelprobe in Abhängigkeit von der Temperatur (0,8 mm Hydrogel in 2x3 mm Floatglas, korrigierte Werte)



und durchsichtig ist. Steigt die Temperatur der Schicht, so kommt es in einem gewissen Temperaturbereich zur Entmischung der beiden Komponenten. Das Licht wird stark gestreut und der größte Teil diffus reflektiert. Die Schicht trübt sich weiß ein. Nur ein kleiner Teil des Lichtes wird noch transmittiert. Der Prozeß ist reversibel, d.h. bei sinkender Temperatur wird die Schicht wieder klar. Thermotrope

Schichten eignen sich für Anwendungen, bei denen die fehlende Durchsicht im geschalteten Zustand nicht von Nachteil ist, wie z. B. bei Überkopfverglasungen. **Abbildung 3** zeigt die spektrale Transmission einer typischen thermotropen Hydrogel-Probe in Abhängigkeit von der Temperatur. In **Abbildung 4** sind die integralen Werte der Transmission, Reflexion und Absorption eingetragen.



Anhang 2 Katalytisch schaltende (gasochrome) Fenster

Optisch schaltende Verglasungen werden eine wichtige Rolle als Überhitzungsschutz bei der passiven Sonnenenergienutzung in Gebäuden spielen, sei es als Fenster, als Fassadenverglasung oder zusammen mit transparenter Wärmedämmung. Auch für den Fahrzeugbau sind sie von zunehmender Bedeutung. Seit über 20 Jahren werden weltweit sogenannte elektrochrome Fenster erforscht [4]. Trotz dieser intensiven Bemühungen sind sie großflächig noch nicht auf dem Markt zu finden. Auch die Langzeitstabilität bereitet immer noch Probleme. Im Prinzip sind sie nichts anderes als galvanische Zellen, die aus 5 dünnen Schichten aufgebaut sind und für die meistens Wolframbdioxid als Elektrodenmaterial verwendet wird. Am Fraunhofer ISE werden seit 3 Jahren neue Fenster entwickelt, die mit stark verdünnten H₂- und O₂-Gasen arbeiten [5]. Dazu ist nur eine Wolframbdioxidschicht, auf die sehr dünn ein Katalysator aufgebracht wird, nötig (Querschnitt siehe [Abbildung 5](#)). Neben dem blau färbenden WO₃ werden auch farbneutrale Metalloxidmischungen aus Wolfram, Titan und Molybdän verwendet. Zur Zeit werden Fenster der Größe 1,1 m x 0,6 m durch Sputtern hergestellt. Um die Schalteigenschaften zu optimieren, müssen Schichtstruktur, Gas-Konzentration und Strömungsgeschwindigkeit des Gases sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Bei geeigneter Wahl ist ein homogenes Einfärben der ganzen Fläche in Sekunden möglich. In [Abbildung 6](#) ist die Änderung der spektralen Transmission einer typischen gasochromen Probe für den ungeschalteten und einen geschalteten Zustand aufgezeigt. Durch Variation der Schichtdicke und Gaskonzentration lassen sich beinahe beliebige Transmissionsgrade einstellen.

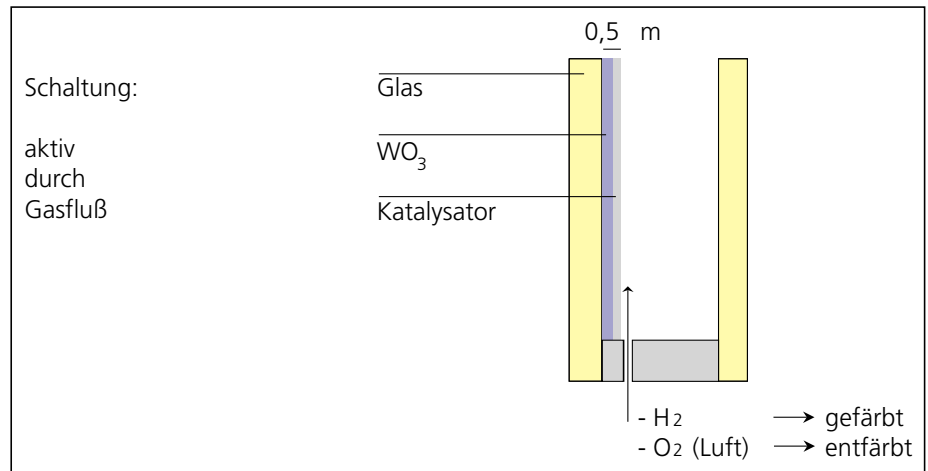
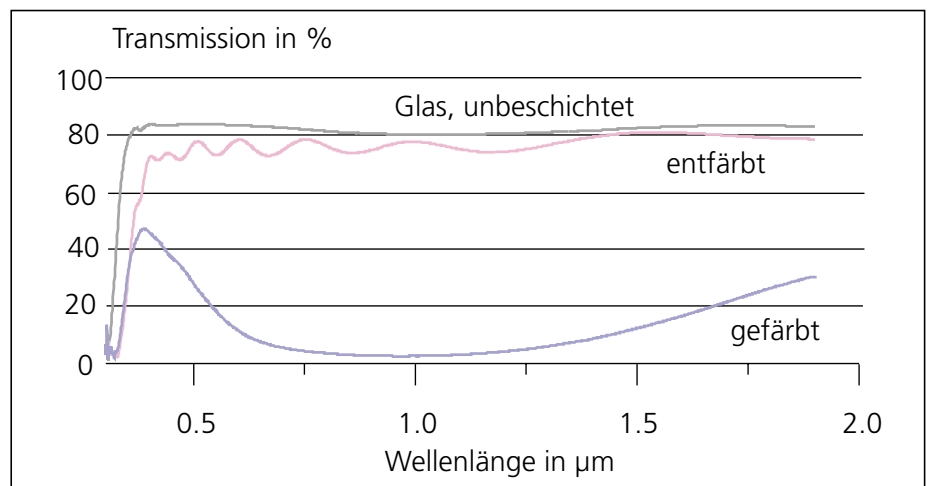


Abbildung 5: Querschnitt einer katalytisch schaltenden Verglasung

Abbildung 6: Spektrale Transmission einer ungeschalteten und einer geschalteten gasochromen Scheibe im Vergleich zu einer eisenarmen Verglasung



Literatur

- [1] A. Gombert, A. Heinzel, Ch. Zanke, B. Bläsi, V. Wittwer
„Glazings with very high solar transmittance“, Solar Energy (im Druck)
- [2] A. Georg, V. Wittwer, P. Nitz, H.-R. Wilson
„Switchable glazing with a large dynamic range in total solar energy transmittance“, Solar Energy (im Druck)
- [3] H.-R. Wilson, A. Raicu, P. Nitz
„Thermotropic Materials and Systems for Overheating Protection“, Proceedings EUROSUN 96, Freiburg (1996)
- [4] C.G. Granquist
„Handbook of Inorganic Electrochromic Materials“, Elsevier-Verlag, Amsterdam (1995)
- [5] A. Georg, D. Schweiger, D. Weisbrod, W. Graf, V. Wittwer
„Examination of the kinetics and performance of catalytically switching (gasochromic) devices“, Proceedings EROSUN 96, Freiburg (1996)