

## 2. Wechselwirkung von Strahlung mit Glas und Glasbeschichtungen

### 2.1 Die Eigenschaften von Floatglas

Floatglas wird aus 60% Quarzsand, 19% Soda, 15% Dolomit (Kalk) und 6% weiteren Rohstoffen hergestellt. Es besitzt eine Material-Rohdichte von  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . Das E-Modul entspricht mit einem Wert von  $70000 \text{ N/mm}^2$  in etwa dem von Aluminium. Die Druckfestigkeit beträgt  $700\text{-}900 \text{ N/mm}^2$ . Die Biegefestigkeit liegt bei ca.  $30 \text{ N/mm}^2$ , kann aber durch Vorspannen auf ca.  $50 \text{ N/mm}^2$  erhöht werden. Eine Drahtnetzeinlage verringert entgegen einer weit verbreiteten Meinung die Biegefestigkeit, d.h. diese Gläser brechen unter Flächenbelastung früher. Erweichung tritt beim Floatglas ab Temperaturen von ca.  $600^\circ\text{C}$  auf.

#### 2.1.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient : k-Wert

Der k-Wert definiert die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit durch die Prüffläche von  $1 \text{ m}^2$  hindurchgeht, wenn der Temperaturunterschied der die Prüffläche umgebenden Luft ein Kelvin beträgt. Der Wärmestrom aus einem Gebäude durch ein Doppelfenster erfolgt auf folgende Weise: Die Energie wird durch die Raumluft und langwellige Raumstrahlung an die innere Scheibe abgegeben. Diese erwärmt sich und tauscht über Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion Energie mit der äußeren Scheibe aus. Bei einer konventionellen Isolierverglasung erfolgt die Erwärmung der äußeren Scheibe zu ca.  $2/3$  durch langwellige Infrarotstrahlung und zu ca.  $1/3$  durch Wärmeleitung und Konvektion. In Tab. 1 sind die k-Werte einiger Gläser aufgeführt.

Typ	$k_v \text{ (W/m}^2\text{k)}$
Einfachglas	5,8
Isolierglas	3,0
Warmglas	1,3
Warmglas/Dreifachglas	0,8

Tab. 1: k-Werte einiger Gläser

#### 2.1.2 Gesamtdurchlassgrad g

Der g-Wert gibt an, wie viel Energie der auftreffenden Sonnenstrahlung ins Rauminnere gelangt. Er setzt sich zusammen aus einem direkten Anteil aufgrund von Transmission und ei-

nem indirekten Anteil der dadurch entsteht, dass sich das Glas durch Absorption selbst erwärmt und dann seinerseits wieder Wärme nach innen und außen abführt (vgl. Abb. 1).

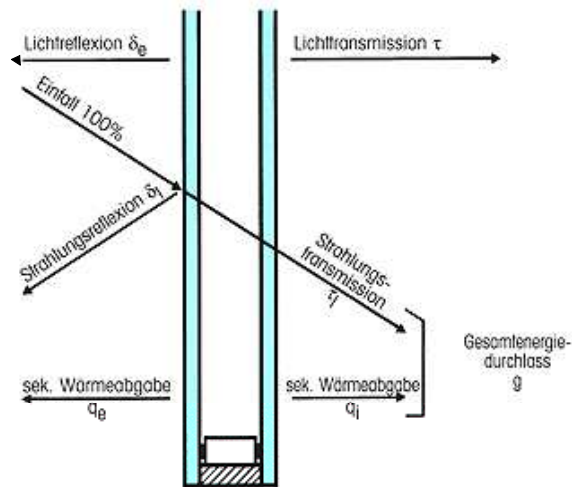


Abb. 1: Beiträge zum g-Wert

### 2.1.3 Optische Eigenschaft von Fensterglas

Abb. 2 und 3 zeigen das typische Sonnenspektrum bzw. Transmission von Fensterglas.

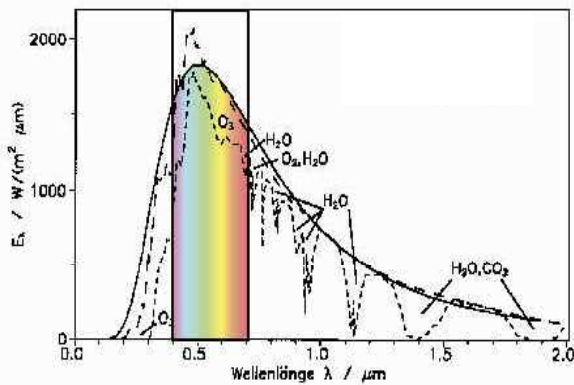


Abb. 2: Sonnenspektrum; nach Planck und in verschiedenen Höhen gemessen

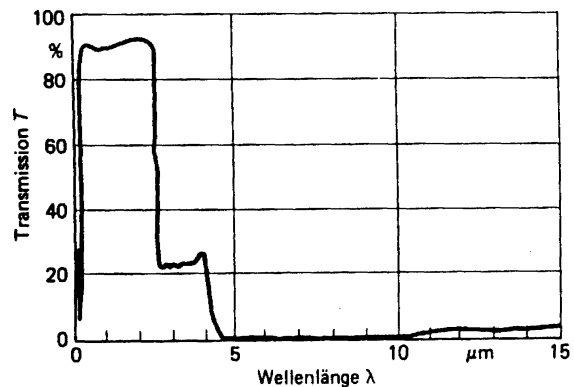


Abb. 3: Transmission von Fensterglas in Abhängigkeit von der Wellenlänge [1]

98% der Energie der Sonnenstrahlung fallen in einen Wellenlängenbereich zwischen 0,2 und 2,5  $\mu m$  und damit, mit Ausnahme des UV-Anteils, genau in den Bereich maximaler Transmission der unbeschichteten Glasscheibe. Fast der gleiche prozentuale Anteil der nach außen gerichteten Raumstrahlung, deren Wellenlängen aufgrund der üblichen Raumtemperatur zwi-

schen 3 und 30  $\mu\text{m}$  liegen, gelangt aber wegen der geringen Transmission des Glases in diesem Bereich nicht wieder nach außen. Das Glas wird so zur Energiefalle (vgl. auch Abb. 4).

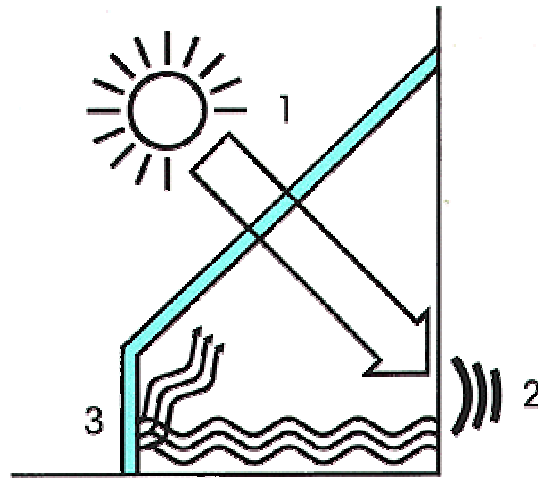


Abb. 4: Glas als Energiefalle (Prinzip der passiven Solarenergienutzung):  
1) Transmission; 2) Aufheizung; 3) ungenügende Wärmeabgabe nach außen aufgrund der Undurchlässigkeit von Glas für langwellige Infrarotstrahlung

Die so erzielten solaren Energiegewinne werden durch Einführung des äquivalenten k-Wertes mitberücksichtigt. Mit dem  $k_F$ -Wert (Glas und Rahmen), dem Strahlungsenergiegewinnkoeffizienten  $S_F$  und dem Gesamtenergiekoeffizienten  $g$  ergibt er sich zu:

$$k_{F,eq} = k_F - g \cdot S_F \quad \text{Gln. 1}$$

Der Strahlungsgewinnkoeffizient muss die Himmelsrichtung berücksichtigen. Für Nordorientierung beträgt  $S_F$  0.95, für Südorientierung 2.40, für Ost- und Westorientierung 1.65 [2]. In Tabelle 2 sind die  $k_{F,eq}$ -Werte für einige Fenster mit unterschiedlichen Rahmen und Verglasungen aufgeführt.

	Verglasung		Fenster		äquivalenter k-Wert $k_{F,eq}$		
	$k_V$ ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	$g$ (%)	RMG	$k_F$ ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Süd ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Ost/West ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Nord ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
<b>Einfachglas</b>	5,8	85		5,2	3,2	3,8	4,4
<b>Isolierglas</b>	3,0	76	1	2,6	0,8	1,3	1,9
			2.1	2,9	1,1	1,6	2,2
			2.2	3,1	1,3	1,8	2,4
			2.3	3,3*	1,5	2,0	2,6
<b>Warmglas</b>	1,3	62	1	1,4	-0,1	0,4	0,8
			2.1	1,7	0,2	0,7	1,1
			2.2	1,9	0,4	0,9	1,3
			2.3	2,1	0,6	1,1	1,5
<b>Warmglas/ Dreifachglas</b>	0,8	51	1	1,0	-0,2	0,2	0,5
			2.1	1,2	0,0	0,4	0,7
			2.2	1,4	0,2	0,6	0,9
			2.3	1,6	0,4	0,8	1,1

Tab. 2: Äquivalente k-Werte für Fenster mit unterschiedlichen Rahmen und Verglasungen (RMG: Rahmenmaterialgruppe)

Je niedriger der k-Wert einer Verglasung, desto besser ist die Scheibe in ihrer Energiebilanz. Bei Fenstern in Holz- bzw. Kunststoffrahmenbauweise mit Warmglas in Südlage kann der äquivalente k-Wert sogar negativ werden, d.h. es werden Energiegewinne erzielt.

## 2.2 Anwendungen von dünnen Schichten in der Optik

### 2.2.1. Grundgleichung

Unter Berücksichtigung aller wesentlichen Prozesse die beim Durchgang eines Lichtstrahls durch Materie stattfinden, lässt sich die Energiegleichung:

$$A+T+S+R=1 \quad \text{Gln. 2}$$

angeben. Hierbei ist A die Absorption, T die Transmission, S die Streuung und R die Reflexion. Unter Annahme absorptionsfreier Prozesse und Vernachlässigung von Streuprozessen können mit Hilfe der Fresnelschen Gleichungen die Amplitudenvektoren r und t berechnet werden, wenn der Polarisationszustand der einfallenden Welle bekannt ist. Zur Vereinfachung wird im folgenden nur der Fall des senkrechten Einfalls diskutiert. Hierfür ergibt sich:

$$r = \frac{n_{k-1} - n_k}{n_{k-1} + n_k} \quad \text{Gln. 3}$$

$$t = \frac{2n_k}{n_{k-1} + n_k} \quad \text{Gln. 4}$$

$n_{k-1}$ : Brechungsindex der Umgebung

$n_k$  : Brechungsindex des Festkörpers

Für die Transmission folgt unter Vernachlässigung von Absorption und Streuung mit  $T+R=1$ :

$$T = \frac{n_{k-1}}{n_k} t^2 = \frac{4n_{k-1}n_k}{(n_{k-1} + n_k)^2} \quad \text{Gln. 5}$$

Für Glas ( $n=1.5$ ) an Luft ( $n=1$ ) ergibt sich damit 96% Transmission.

## 2.2.2 Einfluss einer reflexmindernden Schicht - Entspiegelung

Erstmals entdeckte Josef von Fraunhofer an alten Linsen eine korrosionsbedingte Erhöhung der Transmission. Diese ist auf die verminderte Brechzahl in den oberen Glasschichten zurückzuführen. Denis Taylor nutzte diese Erkenntnis und meldete 1904 ein entsprechendes Patent an, wobei seine Idee einer künstlichen Korrosion durch Säureeinwirkung den entscheidenden Nachteil aufwies, dass die Oberflächen der behandelten Gläser porös wurden. Erstmals gelang es A. Smakula (Fa. Zeiss) 1935 durch das Aufbringen einer zusätzlichen Schicht eine Entspiegelung bei gleichzeitig guter Haltbarkeit zu erreichen. Man betrachte drei Medien: Das Substrat (Brechzahl  $n_2$ ), eine planparallele, isotrope Schicht (Brechzahl  $n_1$ ) der Dicke  $d_1$  und ein weiteres, angrenzendes Medium (Brechzahl  $n_0$ ). Alle drei Systeme seien absorptionsfrei und die Dicke  $d_1$  sei von einer Dimension vergleichbar mit der eingestrahnten Lichtwellenlänge. Aufgrund von Mehrfachreflexionen an den beiden Grenzschichten ergibt sich:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad \text{Gln. 6}$$

$$t = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad \text{Gln. 7}$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \varphi_1 \quad \text{Gln. 8}$$

$r_1, r_2, t_1, t_2$  : Fresnelkoeffizienten

$\lambda$  : Wellenlänge

$\varphi_1$  : Einfallswinkel

Da der Nenner in Gln. 6 nicht gegen Unendlich streben kann, erfolgt eine Reflexionsminderung nur dann, wenn gilt:

$$r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1} = 0 \quad \text{Gln. 9}$$

Aus der Bedingung, dass sowohl Imaginär- als auch Realteil verschwinden müssen, folgt:

$$r_1 + r_2 \cos 2\delta_1 = 0 \quad r_2 \sin 2\delta_1 = 0 \quad \text{Gln. 10}$$

Diese Gleichungen sind erfüllt wenn gilt :

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \text{Gln. 11}$$

Nimmt die Größe  $2\delta_1$  geradzahlige Vielfache von  $\pi$  an, so ist  $\cos(2\delta_1)$  stets +1 und aus Gln. 11 folgt die praktisch bedeutungslose Bedingung  $n_0 = n_2$ .

Für ungeradzahlige Vielfache von  $\pi$  ergibt sich :

$$n_1^2 = n_0 n_2 \quad \text{Gln. 12}$$

$$\delta_1 = (2m-1) \frac{\pi}{2} \quad \text{Gln. 13}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Absolute Reflexionsfreiheit erfordert die simultane Erfüllung von Gln. 12 und Gln. 13. Eine Erniedrigung der Reflexion ergibt sich nur für  $n_1 < n_2$ . Abb. 5 zeigt die Reflexion an absorptionsfreien Einzelschichten mit Brechzahlen  $n_1$  auf Glassubstraten ( $n_2=1,52$ ).

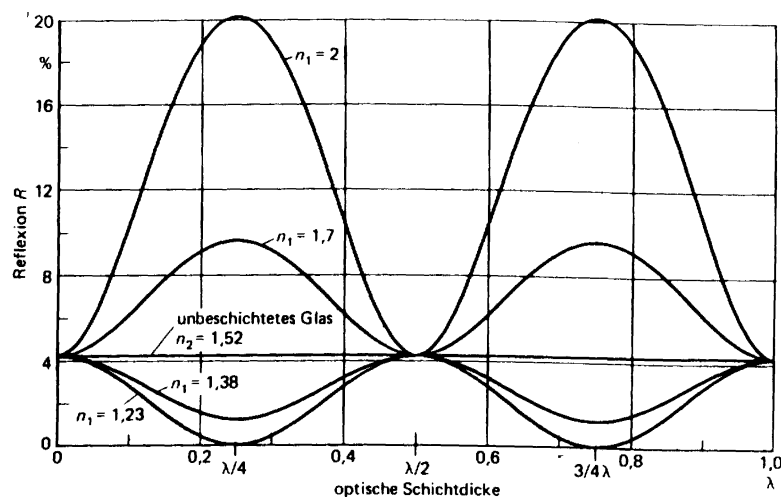


Abb. 5: Reflexion an absorptionsfreien Einzelschichten mit verschiedenen Brechzahlen  $n_1$  auf Glassubstraten mit Brechzahl  $n_2=1,52$  [1]

### 2.2.3 Doppelschichten

Die im vorangegangenen Kapitel diskutierte Bedingung  $n_1 < n_2$ , die das Auftreten von Reflexionsminima erst gestattet, zeigt gleichzeitig eines der größten Probleme beim Einsatz von Einzelschichten auf. Legt man Glas mit einem Brechungsindex von 1,52 und eine Anwendung an Luft ( $n=1$ ) zugrunde, so verlangt dies nach Gln.12 als notwendige Bedingung für das Auftreten eines Reflexionsminimums eine Beschichtung mit Material, welches einen Brechungsindex von  $n=1,23$  besitzt. Dies ist vor allem problematisch im Hinblick auf das heute zur Verfügung stehende Beschichtungsmaterial, welches neben den entsprechenden optischen Eigenschaften zusätzlich noch beständig gegen Umwelteinflüsse und mechanische Beanspruchung sein muss.

Dieses Problem kann durch die Verwendung von Doppelschichtsystemen gelöst werden. Der mathematische Formalismus entspricht im wesentlichen einer wiederholten Anwendung von

Gln. 6. Aus messtechnischen Gründen bevorzugt man bei den Lösungen der Gleichungssysteme Schichtdicken, die ein Vielfaches von  $\lambda/4$  betragen. Als wichtigste Bedingungen für Reflexionsminima ergeben sich:

$$n_1^2 n_3 = n_2^2 n_0 \quad \text{Gln. 14}$$

$$\delta = (2m - 1) \frac{\pi}{2} \quad \text{Gln. 15}$$

$$n_0 \neq n_3$$

$n_0, n_1, n_2, n_3$  : Brechungsindizes von Luft, Schicht 1, Schicht 2, Substrat

Abb. 6 zeigt den typischen Verlauf für eine Bezugswellenlänge von 500 nm. Erfordert eine Anwendung ein Maximum an Reflexminderung über den gesamten Bereich des sichtbaren Spektrums, so sind Schichtmaterialien mit möglichst kleinen Brechungsindizes zu bevorzugen.

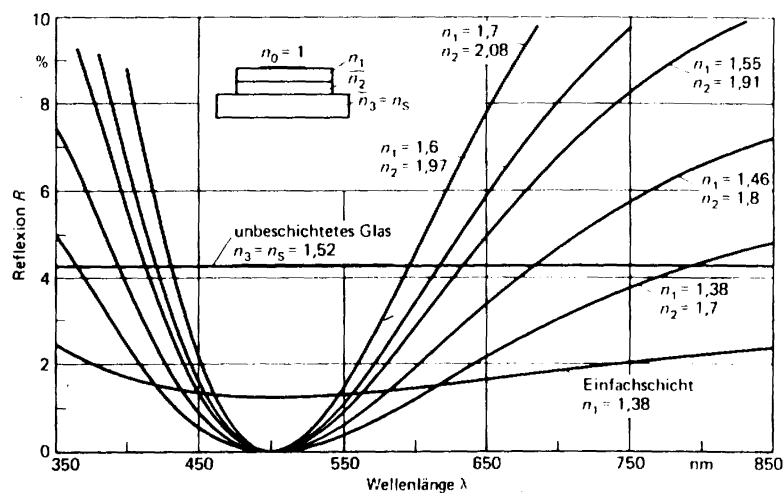


Abb. 6: Abhängigkeit der Reflexion einer  $\lambda/2$ - $\lambda/2$  Doppelschicht mit verschiedenen Brechzahlen und einer  $\text{MgF}_2$ -Einfachschicht von der Wellenlänge  $\lambda$  [1]

## 2.2.4 Dreifachschichten

Um eine noch stärkere Reflexionsminderung über einen größeren Wellenlängenbereich zu erhalten, kann man Dreifachschichten heranziehen. Wählt man z.B. eine Schichtdickenkombination  $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$  so ergibt sich:

$$n_1^2 n_4 = n_3^2 n_0 \quad \text{Gln. 16}$$

$n_0, n_1, n_3, n_4$ : Brechungsindizes von Luft, Schicht 1, Schicht 3, Substrat

Die genauen Berechnungen, die zu diesem Ergebnis führen, sollen hier im Detail nicht vorgestellt werden. Wie man aus Gln. 16 abliest, hat der Brechungsindex  $n_2$  der mittleren  $\lambda/2$ -Schicht keinen Einfluss auf die Amplitudenbedingung und die Lage der Reflexionsnullstelle. Seine Auswahl hat allerdings entscheidenden Einfluss auf die Reflexionsminderung der Wellenlängen um die Nullstelle. Durch geschickte Wahl von  $n_2$  und Manipulation der Dickenkombination (Vgl. Abb. 8) lässt sich somit eine breitbandige Antireflexschicht realisieren.

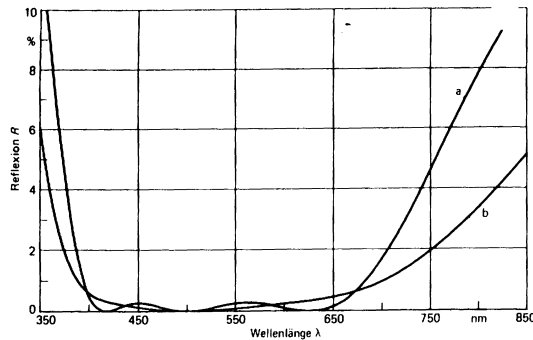


Abb. 7: Dreifachschichten unterschiedlicher Kombination: a)  $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $3/4\lambda$  b)  $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$   
 $n_0=1$ ,  $n_1=1.38$ ,  $n_2=2.1$ ,  $n_3=1.7$ ,  $n_4=1.52$  [1]

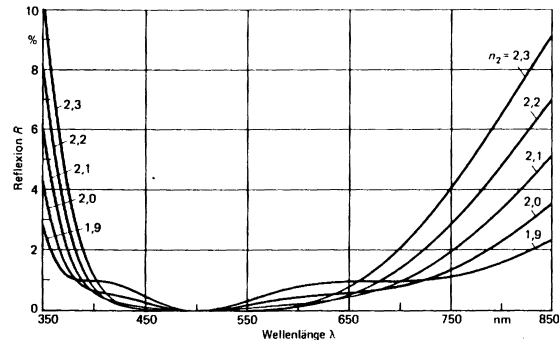


Abb. 8: Dreifachschichten  $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$  mit  $n_2$ =variabel,  $n_0=1$ ,  $n_1=1.38$ ,  $n_3=1.7$ ,  $n_4=1.52$  [1]

Schon sehr geringe Abweichungen vom Sollwert der einzelnen Schichtdicken führen allerdings zu Änderungen in der Reflexionsfarbe. Man ist daher aus kosmetischen Gründen gezwungen, die Schichtdicken möglichst exakt kontrollieren und reproduzieren zu können. Aus messtechnischen Gründen wählt man oft Kombinationen von Schichtdicken, die jeweils einem ganzzahligen Vielfachen von  $\lambda/4$  entsprechen.

### 2.2.5 Beschichtetes Glas – Wärmedämm- und Sonnenschutzschichten

Bei Doppelverglasungen erfolgt der Energieaustausch zwischen den Scheiben zu ca. 70% durch Strahlung. Durch Beschichtung einer oder beider Scheiben lassen sich die Strahlungsverluste moderner Wärmedämmscheiben auf ca. 3% reduzieren. In Fällen von intensiver Sonneneinstrahlung muss der Energieeintrag ins Rauminnere verringert werden. Dies ist durch Vergrößerung von Reflexion und Absorption möglich. Wichtig ist dabei, dass sich einerseits keine Blendwirkungen durch zu hohe Reflexion und andererseits keine zu hohen Scheibentemperaturen durch Absorption ergeben. Bei Architekturglas spielen ästhetische Aspekte, wie z.B. Farbneutralität und Farbeffekte ebenfalls eine wichtige Rolle.



## 2.3 „Smart Windows“

### 2.3.1 Phototrope Gläser

Bei phototropen Gläsern ändert sich die Lichtdurchlässigkeit während der Bestrahlung mit ultraviolettem oder kurzwelligem sichtbarem Licht (vgl. Abb. 9). Dazu sind im Glas gleichmäßig Kristallite aus einem mit Kupfer dotierten Silberhalogenid verteilt. Einfallendes ultraviolettes- oder kurzwelliges sichtbares Licht löst ein Elektron am Kupfer aus, welches vom Silberion aufgenommen wird. Die neutralisierten Silberatome lagern sich daraufhin zu Clustern zusammen, welche sichtbares Licht absorbieren und deshalb das Glas dunkel färben. Am Ende der Bestrahlung kehrt sich der Prozess um [3].

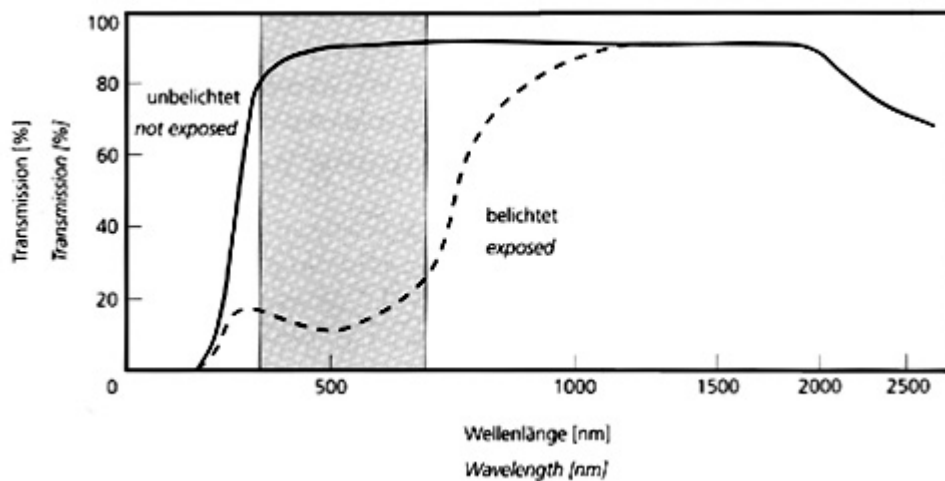
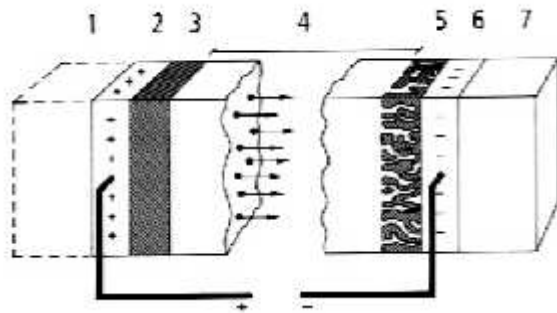


Abb. 9 : Transmission von belichtetem und unbelichtetem phototropen Glas [4]

### 2.3.2 Elektrochrome Schichten

Elektrochrome Materialien ändern beim Anlegen einer äußeren Spannung ihre optischen Eigenschaften. Die Änderung erfolgt durch Ein- bzw. Auslagerung von Ionen. Dies können beispielsweise Wasserstoffionen oder Ionen der Alkalimetalle sein, die in Übergangsmetalloxide eingelagert werden. Die Kristallstruktur der Metalloxide bleibt bei dieser sogenannten Interkalation unverändert. Durch die Interkalation ändert sich die Oxidationsstufe der Übergangsmetalloxide und mit ihr die Bandstruktur, was wiederum eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und der optischen Eigenschaften zur Folge hat. Da die Schichten einige Zeit aufgeladen bleiben, muss die Stromzufuhr nur während des Schaltprozesses aufrechterhalten bleiben. Als sehr vielversprechend gilt das elektrochrome Wolframoxid  $\text{WO}_3$ . Abb. 10 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Zelle.



- 1 – Glasscheibe
- 2 – Transparente Elektrode
- 3 – Ionenspeicher
- 4 – Ionenleiter
- 5 – Elektrochromes Material
- 6 – Transparente Elektrode
- 7 – Glasscheibe

Abb. 10: Schematischer Aufbau einer elektrochromen Zelle

Problematisch ist der relativ komplexe Aufbau der Zellen, die hohen Kosten der durchsichtigen Elektroden und deren relativ geringe Leitfähigkeit, die die Schaltgeschwindigkeit und Größe der Zellen limitieren [5].

### 2.3.3 Thermotrope Beschichtungen

Thermotrope Gläser wirken über den gesamten Spektralbereich und gehen mit steigender Temperatur z.B. von einem klaren lichtdurchlässigen Zustand in einen opaken, lichtstreuenden Zustand über. Es handelt sich dabei um Zweikomponentensysteme, wie Kunststoff-Kunststoff (Polymerblend) oder Kunststoff-Wasser (Hydrogel) Kombinationen. Bei niedriger Temperatur ist die Mischung homogen und das System ist klar. Steigt dagegen die Temperatur, so verändern die Polymere ihre gestreckte Form und klumpen zu Kügelchen zusammen. Durch diese Entmischung stellt sich erhöhte Lichtstreuung und diffuse Reflexion ein. Der Vorgang ist reversibel. Die Schichten haben allerdings den Nachteil der fehlenden Durchsicht im geschalteten Zustand [5].

### 2.3.4 Gasochrome Beschichtungen

Eine interessante Weiterentwicklung und Vereinfachung des relativ komplexen elektrochromen  $\text{WO}_3$  Vielschichtsystems könnte in einer Einfärbung der Wolframoxidschicht aus der Gasphase heraus bestehen (Abb. 11). Die notwendigen Protonen werden dabei durch einen Katalysator, der  $\text{H}_2$  in  $2\text{H}$  spaltet, direkt aus der Gasphase entnommen. Die Entfärbung ist mit sauerstoffhaltigem Gas gut möglich. Die Vorteile dieser Technik gegenüber elektrochromen Systemen sind der einfachere Systemaufbau und die Tatsache, dass keine Stromzufuhr erfolgen muss [6].

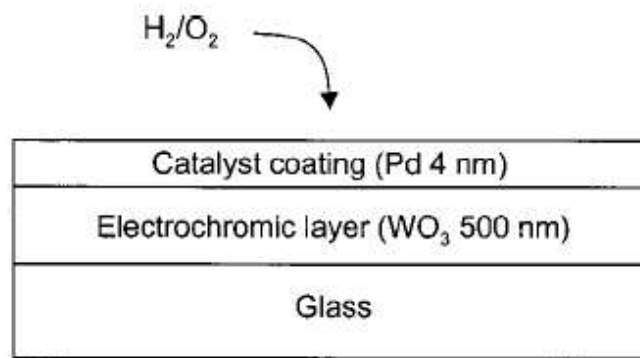


Abb. 11: schematischer Aufbau eines gasochromen Systems [6]

### 2.3.5 Thermochrome Beschichtungen

Mit Thermochromie (grch. „thermos“ warm, heiß und „chroma“ Farbe) bezeichnet man das Auftreten einer temperaturabhängigen Farbänderung eines Stoffes.

Der rote Rubin beispielsweise, ändert beim Erhitzen seine Farbe in grün. Reines Zinkoxid wechselt seine Farbe von weiß nach gelb. Weitere Vertreter der Klasse der thermochromen Materialien sind zum Beispiel das Silberiodomercurat  $Ag_2[HgI_4]$  das seine Farbe zwischen 40 und 70°C von gelb nach orangerot wechselt, oder das Quecksilber(II)-iodid, bei dem ab 127 °C eine Verfärbung von Rot nach Gelb einsetzt. Es gibt eine Reihe von Verwendungszwecken für diese Materialien. Sie finden heute vor allem in der Unterhaltungs- und Werbeindustrie ihren Einsatz. Thermometer, Kaffeetassen die sich beim Eingießen von Kaffee verfärben, Mousepads auf denen sich durch die Handwärme eine Abbildung der Hand ergibt, intelligente Verpackungen, die äußerlich durch Farbänderung signalisieren, ob das Mikrowellenessen oder die Getränke im Inneren die richtige Temperatur erreicht haben, sind nur einige Beispiele.

Neben diesen rein optisch animierenden Anwendungen kann man geeignete thermochrome Substanzen auch zur Beschichtung von Architekturglas heranziehen. Hier ist allerdings eine temperaturabhängige Verfärbung der Gläser im Sichtbaren eher unerwünscht, dagegen wünscht man sich hier eine „Verfärbung“ im infraroten Spektralbereich, sodass Wärmestrahlung je nach Schaltzustand der Scheibe durchgelassen oder abgeblockt wird. Im Idealfall schaltet die Scheibe bei Erwärmung auf ca. >25°C Innentemperatur reversibel und inhärent, ohne das Eingriffe von außen nötig sind, in den Zustand, in dem sie für Infrarotstrahlung undurchlässig ist.