

Jahresbericht 2006, 6. Dezember 2006

# Rationelle Energienutzung in Gebäuden

## Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz

Autoren	Iris Mack, Peter Oelhafen, Andriy Romanyuk, Roland Steiner
Beauftragte Institution	Institut für Physik der Universität Basel
Adresse	Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel – Tel. 061-267 37 13
E-Mail, Internetadresse	<a href="mailto:peter.oelhafen@unibas.ch">peter.oelhafen@unibas.ch</a> <a href="http://pages.unibas.ch/phys-esca">http://pages.unibas.ch/phys-esca</a> <a href="http://www.glassdbase.unibas.ch">http://www.glassdbase.unibas.ch</a>
BFE Vertrags-Nummer	100761
Dauer des Projekts	vom 01. Januar 2004 – bis 15. Dezember 2006 (Projekt wird verlängert)

### ZUSAMMENFASSUNG

**Neue Beschichtungen:** Das entwickelte Schichtsystem, welches im letzten Jahresbericht vorgestellt wurde, haben wir in ersten Varianten experimentell realisiert. Hierfür wurden die Grenzflächen zwischen den Silber- und den Oxidfilmen untersucht und optimiert. Wird Silber auf ein Oxid abgeschieden, so wächst es in Inseln, die ab einer gewissen Menge einen durchgehenden Film bilden. Durch Vorbehandlung des Substrates kann eine frühere Schichtbildung erreicht werden. Die hergestellten Mehrschichtsysteme kommen der gewünschten Idealtransmission schon sehr nahe. Aber es müssen noch experimentelle Schwierigkeiten, wie z.B. die unbefriedigende Struktur der gewachsenen Schichten, behoben werden. **Strukturierte Gläser:** In der Architektur werden strukturierte Gläser immer wichtiger. Deswegen ist eine Charakterisierung bezüglich energetischer Gesichtspunkte, wie z.B. dem g-Wert, wichtig. **Demonstrationsaufbau:** Es wurde ein Demonstrationsaufbau entwickelt, um den Unterschied bei verschiedenen Sonnenschutzfenstern durch die Sinneswahrnehmungen, sehen und fühlen, zu veranschaulichen.



## **Inhalt**

<b>Projektziele</b>	<b>4</b>
<b>Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse</b>	<b>5</b>
<b>1. Neue Beschichtungen – Experimentelle Realisation</b>	<b>5</b>
1.1 Optimierung der Grenzfläche Siliziumdioxid – Silber	5
1.2 Optimierung der Grenzfläche Silber – Titandioxid	7
1.3 Realisation der idealen Transmission	8
1.4 Ausblick	9
<b>2. Optische Eigenschaften von strukturierten Glasscheiben</b>	<b>10</b>
<b>3. Demonstrationsaufbau</b>	<b>12</b>
<b>Bewertung 2006 und Ausblick 2007</b>	<b>13</b>
<b>Zusammenarbeit</b>	<b>13</b>
<b>Referenzen</b>	<b>14</b>

## Projektziele

Die sommerliche Überhitzung von Gebäuden ist in den letzten Jahren zu einem Problem geworden. Dabei spielen die heutigen architektonischen Trends mit großflächig verglasten Fassaden sowie der Klimawandel mit seinen extremer werdenden Wetterlagen und steigenden Durchschnittstemperaturen eine zentrale Rolle.

Durch die Entwicklung neuer Beschichtungen für den sommerlichen Wärmeschutz soll zur Lösung dieses Problems ein Beitrag geleistet werden. Neue Beschichtungen für transparente und transluzente Teile der Gebäudehülle werden entwickelt, welche die solare Strahlungsbelastung von Innenräumen bei gleicher Helligkeit gegenüber den heutigen Beschichtungen markant reduzieren.

Der neue Ansatz besteht aus einer spektralen Transmissionsfunktion, welche das Verhältnis des Strahlungstransmissionsgrades  $\tau_e$  zum Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$  minimiert. Dadurch kann die Wärmebelastung durch die Sonnenstrahlung gegenüber den besten aktuellen Sonnenschutzgläsern um ein Drittel gesenkt werden. Die in diesem Projekt neu entwickelten Sonnenschutzgläser (M-Gläser) sollen sich bezüglich Farbneutralität und Helligkeit nicht von den aktuellen Produkten unterscheiden. Bei der Entwicklung wird darauf geachtet, dass die Materialwahl und die vorgesehenen Produktionsverfahren mit den heute verwendeten Herstellungsprozessen kompatibel sind.

# Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

## 1. Neue Beschichtungen – Experimentelle Realisation

Die hier zu realisierende ideale Transmission  $\tau_{\text{ideal}}$  [1] wurde entwickelt, um den Energieeintrag bei Sonnenschutzfenstern um 1/3 zu verringern. Dafür wurde der Quotient  $\tau_e/\tau_v$ , des solaren Transmissionsgrads  $\tau_e$  und des Lichttransmissionsgrads  $\tau_v$ , minimiert. Als eine weitere Bedingung wurde eine Farbneutralität des transmittierten Lichtes angesetzt.

Wie im letzten Jahresbericht [2] beschrieben, wurde durch theoretische Überlegungen und Simulationen eine geeignete Schichtfolge entwickelt, die zur Zeit experimentell umgesetzt wird. Für die Produktion von optischen Filtern und Sonnenschutzfenstern werden meist Mehrschichtsysteme aus Metall- und Metalloxidschichten verwendet [3]. Auf Grund seiner hohen Transmission im Sichtbaren und seinem hohem Reflexionsvermögen im Infraroten wird Silber in der Form dünnster Filme für die metallischen Schichten solcher Schichtsysteme verwendet. Das Mehrschichtsystem, das realisiert werden soll, besteht aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Silber (Ag). Eine Verwendung von anderen Materialien wie Magnesiumfluorid ( $\text{MgF}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sowie Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) wäre möglich, wurde aber bisher nur durch Simulationen untersucht. Die hier aufgeführten Materialien wurden gewählt, weil sie in der Glasindustrie bereits verwendet werden. Für die experimentelle Umsetzung des Mehrschichtsystems wurden als erstes die wichtigsten Grenzflächen mittels Photoelektronenspektroskopie (XPS) und anderen Methoden untersucht und optimiert.

### 1.1 Optimierung der Grenzfläche Siliziumdioxid – Silber

Silber auf dielektrischen Schichten wächst nicht als durchgängiger Film, sondern in Form von Inseln. Dies ist der Fall, weil die Bindungsenergie zwischen Silberatomen deutlich grösser als die zwischen Ag und einem Dielektrikum ist. So bilden sich während der Abscheidung erst Inseln, die bei genügender Dicke zu einem Film zusammenwachsen. Die Morphologie der wachsenden Silberschichten und deren optischen Eigenschaften stehen in direkter Verbindung mit der elektrischen Leitfähigkeit dieser Schichten. Die Leitfähigkeit hängt wiederum von der Dicke und der Struktur der Schicht ab. Die Struktur der abgeschiedenen Schichten hängt von dem Herstellungsverfahren und den Produktionsparametern ab. Diese beeinflussen die Nukleationsdichte der Silberinseln und können deshalb zu einem früheren Zusammenwachsen der Inseln führen. Das Ziel unserer Untersuchungen war, möglichst homogene und durchgehende Silberschichten herzustellen.



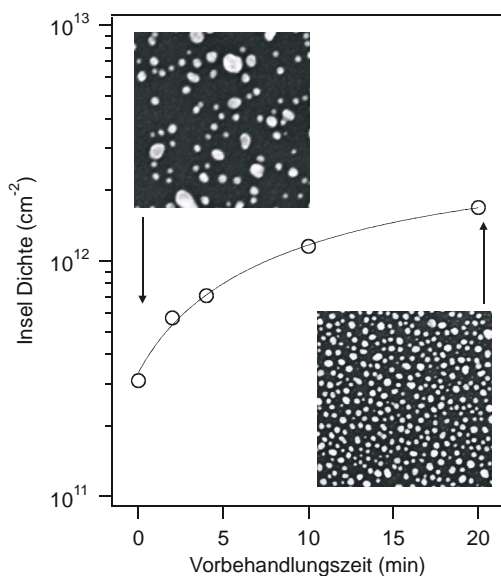
**Fig. 1.1:** Messkopf für die in-situ Messung des spezifischen Widerstandes von dünnen Filmen, die im Vakuum hergestellt wurden.

**Vorbehandlung durch Ionenbeschuss:** Es ist bekannt, dass Ionenbeschuss während der Abscheidung (Ion Beam Assisted Deposition) die Filmhaftung und sowohl die optischen als auch die mechanischen Eigenschaften der Filme verbessert. Wir haben den Einfluss eines niederenergetischen Ionenbeschusses in einem Plasma auf die Grenzfläche zwischen Ag und  $\text{SiO}_2$  sowie Ag und Glas untersucht. Im Anschluss an die Plasmabehandlung wurde stufenweise Ag auf diese Substrate durch Magnetronspattering abgeschieden, und das Wachstum mittels Photoelektronenspektroskopie (XPS), Rasterelektronenspektroskopie (REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM) und einer in-situ Messung des spezifischen

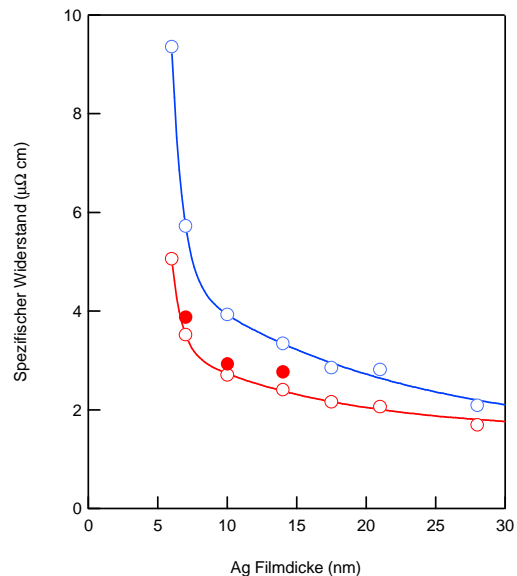
Widerstands (s. Abbildung 1.1), die speziell für unsere Anwendungen angepasst wurde, während der verschiedenen Wachstumsphasen, untersucht.

In Abbildung 1.2 ist die Inseldichte von Ag über die Zeit der Plasmabehandlung des  $\text{SiO}_2$  aufgetragen. Die abgeschiedene Silbermenge entspricht 3ML (Monolagen). Die Einlagen ( $300 \times 300 \text{ nm}^2$ ) in Abbildung 1.2 zeigen die Veränderung der Inselgrösse durch die Behandlung des Substrates. Bei gleicher abgeschiedener Silbermenge kann durch die Plasmavorbereitung die Dichte der Inseln erhöht und die Durchschnittsgrösse der Inseln verkleinert werden, was ein homogenes Filmwachstum bedeutet. Das veränderte Wachstumsverhalten von Silber auf den plasmabehandelten Substraten lässt sich durch eine höhere Konzentration von Fehlstellen an der Oberfläche deuten, die durch den niederenergetischer Beschuss mit Argonionen entstanden sind.

Der spezifische Widerstand als Funktion der Schichtdicke des Silberfilms ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Für die Fälle, unbehandeltes und plasmabehandeltes Siliziumdioxidsubstrat und behandeltes Glassubstrat, ist der spezifische Widerstand sehr von der Schichtdicke abhängig. Im Fall der Plasmabehandlung sind die Widerstandswerte für alle Schichtdicken geringer als ohne Be-



**Fig. 1.2:** Inseldichte von Silber aufgetragen über die Zeit in der eine Plasmabehandlung des Siliziumdioxids des Substrates erfolgte, bei einer 3ML dicken Silberbeschichtung. Einlagen: REM (Rasterelektronenmikroskopie) Aufnahmen von 3ML Silber auf unbehandeltem (oben links) und 20 Minuten plasmabehandeltem Substrat (unten rechts). Bildgrösse ist  $300 \times 300 \text{ nm}^2$ .



**Fig. 1.3:** Spezifischer Widerstand abhängig von der Dicke des Silberfilms abgeschieden auf ein unbehandeltes (blau) Siliziumdioxidsubstrat und eines, das 20 Minuten mit Plasma behandelt wurde (rote Kreise). Zum Vergleich wurden Silberfilme auf ein plasmabehandeltes Glas abgeschieden (rote Punkte).

handlung. Der Wert von  $1,6 \mu\Omega \text{ cm}$  des massiven Silbers wird für behandelte Siliziumdioxidsubstrate bei geringeren Dicken, von ungefähr 30nm, erreicht. Durch die Plasmabehandlung des Substrates werden bei dem Wachstum von Silberfilmen auf Oxidschichten folgende Dinge beobachtet: Die entstehenden Silberinseln vereinigen sich früher zu einem durchgehenden Film. Die geringeren Widerstandswerte nach der Plasmabehandlung lassen sich durch die geringere Oberflächenrauigkeit der abgeschiedenen Silberfilme und dadurch, dass die Schichten aus grösseren Kristallen bestehen, erklären.

Eine weitere Möglichkeit, kompaktere Silberfilme zu erhalten, ist die Erhöhung der kinetischen Energie der Silberatome während der Abscheidung, wodurch vorzugsweise Sauerstoffatome aus der darunter liegenden Oxidschicht herausgeschlagen werden und als Nukleationskeime dienen können. Eine weitere Eigenschaft dieser Methode ist, dass Silber tiefer in die Oxidschicht eindringt

und so eine Mischschicht entsteht. Auch mit diesem Verfahren kann eine frühere Filmbildung und eine bessere Haftung des Silberfilmes erreicht werden.

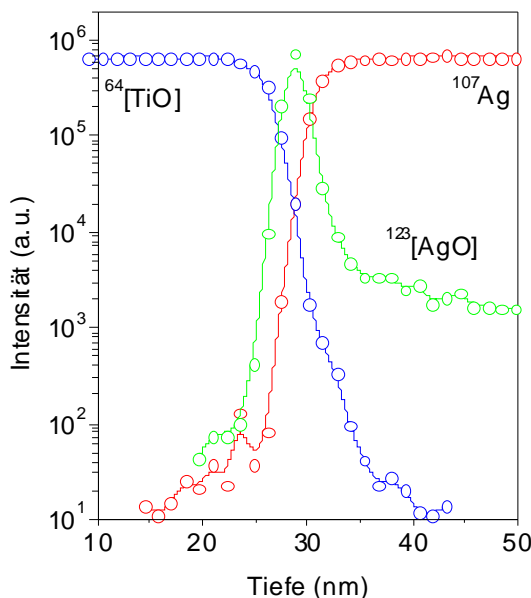
Durch eine metallische Verbindungsschicht zwischen dem Silber- und dem Oxidfilm könnte das Inselartige Wachstum von Silber verhindert werden. Hierzu wurden bei uns Versuche mit Wolfram durchgeführt. Es zeigte sich, dass Silber wie erwartet auf solchen Filmen schneller einen durchgehenden Film bildet. Fügt man diese Verbindungsschicht allerdings in die Simulationen ein, so konnte bis jetzt kein Schichtsystem gefunden werden, dass den Anforderungen der idealen Transmission gerecht wird.

## 1.2 Optimierung der Grenzfläche Silber – Titandioxid

In dem von uns entwickelten Mehrschichtsystem folgt auf eine Silberschicht eine Schicht aus Titandioxid. Bezüglich der Herstellung von Oxidschichten auf Silber ist bisher wenig bekannt. Wird eine Oxidschicht auf ein Metallsubstrat durch reaktives Magnetronspütern abgeschieden, so ist die Metalloberfläche einem Niedertemperaturplasma ausgesetzt, welches sehr reaktive Sauerstoffatome, Ionen und Radikale enthält. Dass sich unter diesen Bedingungen eine Zwischenschicht entwickelt, die sich in den physikalischen Eigenschaften von den massiven Schichten unterscheidet, ist naheliegend. Struktur und Zusammensetzung dieser Zwischenschicht sind für Anwendungen, wie optische Filter aus dünnen Schichten oder wie im Bereich der Glasbeschichtung, von grosser Bedeutung.

Für unsere Untersuchungen wurden  $\text{TiO}_2$ -Schichten auf Ag durch rf-Sputtering eines Titantargets in einem Gasgemisch aus Argon und Sauerstoff hergestellt. Dieses Herstellungsverfahren wird auch häufig in der Industrie verwendet. Diese Schichtsysteme wurden mittels Photoelektronenspektroskopie (XPS und UPS) und Flugzeit-Sekundärionenmassenspektroskopie (TOF-SIMS)

untersucht. Beide Untersuchungsmethoden zeigen, dass sich eine Schicht mit einem hohen Silberoxidanteil bildet. In Abbildung 1.4 ist das SIMS-Profil eines Silber-Titandioxid-Schichtsystems zu sehen, welches deutlich macht, dass im Grenzbereich zwischen Ag und  $\text{TiO}_2$  ein hoher Silberoxidanteil gemessen wird.



**Fig. 1.4:** SIMS-Profil einer Grenzschicht, wenn Titanoxid durch reaktives Sputtern direkt auf Silber abgeschieden wird.

einer eingeführten Stoppschicht umgangen. Das Konzept der Stoppschicht besteht darin, zuerst eine dünne, rein metallische Titanschicht mittels Magnetronspütern abzuscheiden. Die Aufgabe dieser Zwischenschicht, die bei der nachfolgenden Abscheidung des Titandioxids selbst oxidiert wird,

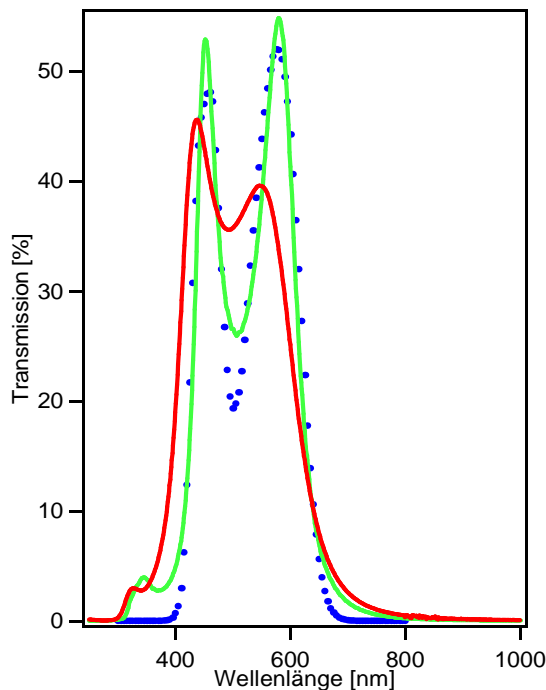
Das Entstehen dieser Oxidschicht durch die Oxidation der Silberschicht, ist für das optische Verhalten der Dünnschichtsysteme wichtig, da Silberschichten im Bereich von 10nm verwendet werden. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, wächst Silber nicht als durchgehende Schicht, sondern bildet Inseln die durch dünne „Brücken“ verbunden sind. Durch die Oxidation während der darauf folgenden Abscheidung werden die leitenden Brücken oxidiert und leiten somit nicht mehr. Die so entstandenen isolierten Silberinseln besitzen ein anderes optisches Verhalten, als verknüpfte Inseln.

Dieses Problem wird bei den in 1.3 beschriebenen Mehrschichtsystemen mit

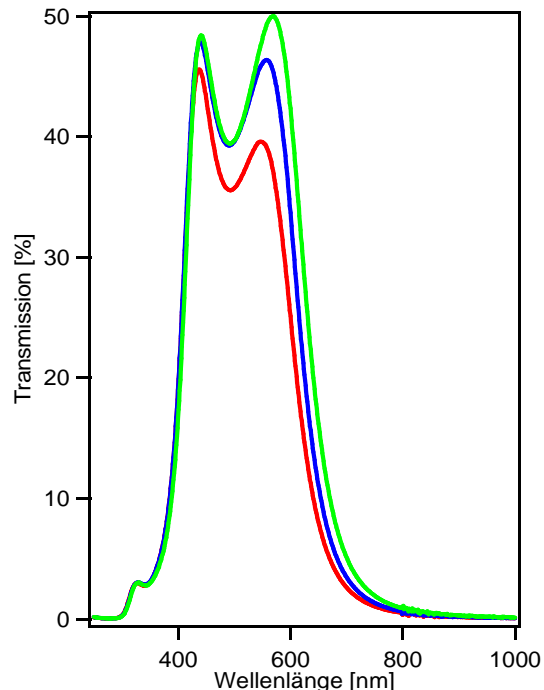
ist der Schutz der darunter liegenden Silberschicht. So kann der für die Optik wichtige Übergang Metall-Metalloxid ohne Zwischenschicht hergestellt werden.

### 1.3 Realisation der idealen Transmission

Die optischen Konstanten der einzelnen Schichten können abhängig vom Herstellungsprozess variieren. Um diese Variationen im entwickelten Mehrschichtdesign berücksichtigen zu können, wurden die optischen Konstanten der einzelnen Schichten, unter den Bedingungen unserer Präparationskammer, bestimmt. Hierzu wurden in unserer Anlage Schichten mit definierter Dicke abgeschieden und mittels Ellipsometrie vermessen. Aus den Ellipsometrieparametern  $\psi$  und  $\Delta$  können die optischen Konstanten durch das Bestimmen einer Fit-Kurve ermittelt werden. Diese optischen Konstanten wurden dann in TFCalc<sup>TM</sup> [4] eingelesen, um die Schichtdicken der idealen Transmission anzupassen. Unter Berücksichtigung der oben diskutierten Optimierungen für die Grenzflächen mittels Magnetronsputtering wurde das so bestimmte Schichtsystem auf Glas-Plättchen (4cm x 4cm) abgeschieden. Nach der Abscheidung wurde die Vakuumkammer belüftet und die Probe an Luft bezüglich ihrer optischen Eigenschaften Transmission, totale und diffuse Reflexion vermessen.



**Fig. 1.5:** Vergleich zwischen der optimalen Transmission (blaue Punkte), der durch Simulationen erhaltenen Transmission (grün) und der gemessenen Transmission (rot) an einer Probe, die bei uns im Labor hergestellt wurde.



**Fig. 1.6:** Alterungseffekt der Probe bei Lagerung an Luft bei Raumtemperatur. In rot ist die gemessene Transmission direkt nach der Abscheidung im Vakuum. Die Transmission wurde nach zwölf Tagen (blau) und nach 19 Wochen (grün) erneut gemessen.

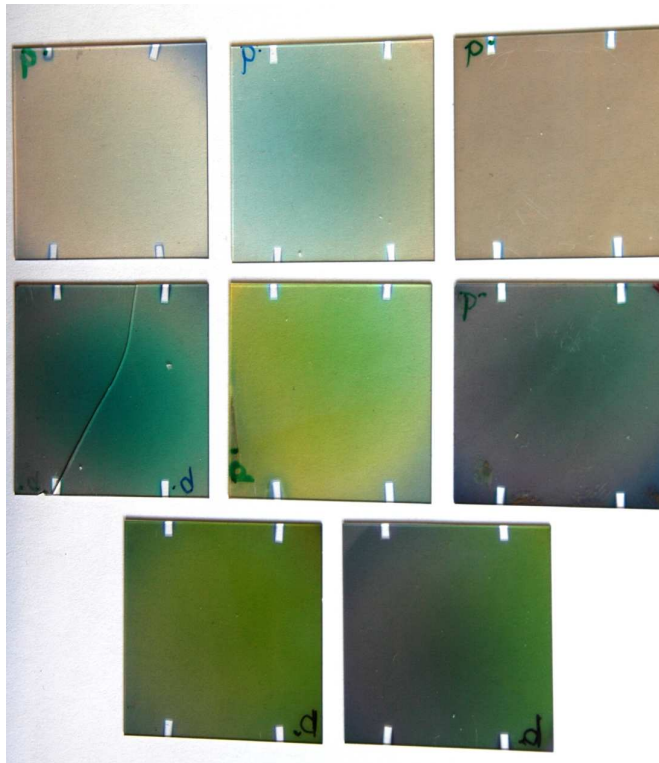
In Figur 1.5 ist die gemessene Transmission (rot) mit der simulierten (grün) sowie der idealen Transmission (blaue Punkte) dargestellt. Im Bereich der infraroten Strahlung ( $\lambda > 700\text{nm}$ ) erfüllt die gemessene Transmission die Bedingungen der idealen Transmission sehr gut. Es ist eine Verschiebung der ganzen Transmissionskurve zu kleineren Wellenlängen zu erkennen. Diese Verschiebung erklärt, warum das transmittierte Licht nicht farbneutral ist, sondern einen Blaustich aufweist. Eine weitere Abweichung zwischen gemessener und simulierter Transmission ist in Fig. 1.5 deutlich zu erkennen: die beiden Maxima haben nicht das gewünschte Verhältnis zu einander.



Die gleiche Probe wurde an Luft bei Raumtemperatur gelagert und nach 12 Tagen und nach 19 Wochen erneut vermessen. Die erhaltenen Transmissionen sind in Figur 1.6 dargestellt. Die Veränderungen des Mehrschichtsystems erfolgt in den ersten Tagen, danach wird die Alterung zwar fortgesetzt, aber die Änderungen der Lichttransmission sind deutlich geringer. Die Veränderungen sind bei größeren Wellenlängen deutlicher ausgebildet.

Mögliche Gründe für diese beobachteten Veränderungen könnte eine Oxidation der Silberschichten sein, da die verwendete Titandioxid-Abschlussschicht sehr säulenartig wächst, und so Sauerstoff und Wasser aus der Umgebung zu den empfindlichen Silberschichten gelangen kann.

In Abbildung 1.7 werden eine Reihe der erzeugten Schichtsysteme, so wie einige Vorversuche gezeigt.



**Fig. 1.7:** Glasproben, die in unserer Anlage hergestellt wurden. Die erste Reihe zeigt Vorexperimente, in denen nur Teile des berechneten Schichtsystems abgeschieden wurden. In der zweiten und dritten Reihe sind Beispiele des gesamten Schichtsystems gezeigt.

#### 1.4 Ausblick

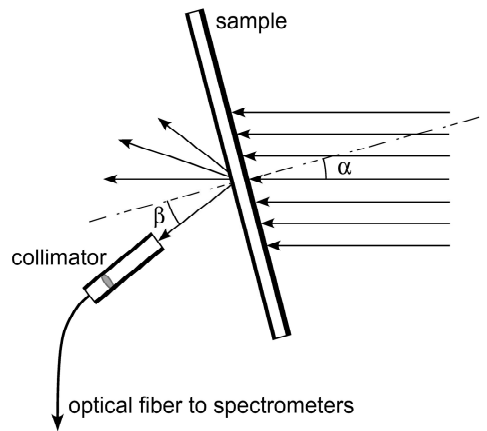
Um die Problematik der Alterung in den Griff zu bekommen, wird eine Veränderung des Schichtsystems und der einzelnen Schichten untersucht. Eine Möglichkeit ist die Optimierung der Abscheideparameter wie Druck, Zusammensetzung des verwendeten Gasgemisches und Abscheiderate um die Struktur der Schichten zu beeinflussen [5, 6]. Durch Erreichen eines amorphen Wachstums könnte die Diffusion von Sauerstoff und Wasser zu den empfindlichen Silberschichten verhindert werden. Ein alternatives Vorgehen ist das Ersetzen der Deckschicht durch eine gegebenenfalls amorphe Schicht, wie zum Beispiel Siliziumdioxid. Erste Simulationen zeigen, dass ein Schichtsystem gefunden werden kann, das eine Lichttransmission nahe der Idealtransmission hat.

Ein weiterer wichtiger Schritt wird die Untersuchung des Designs bezüglich Produktionstoleranzen sein. Hierzu werden als nächstes Simulationen in Bezug auf Schichtdickenfehler und Änderungen der optischen Konstanten durchgeführt.

## 2. Optische Eigenschaften von strukturierten Glasscheiben

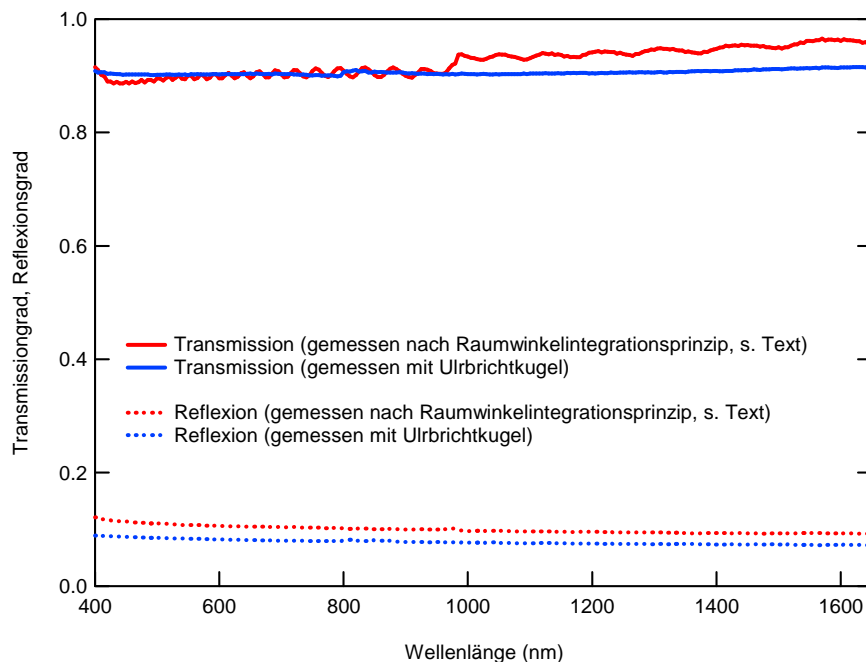
Bedruckte und andere streuende Gläser werden vermehrt großflächig in der Architektur eingesetzt. Somit besteht das Bedürfnis nach einer energetischen Charakterisierung (z.B. bezüglich des g-Werts) solcher Elemente. Auf Grund von Anfragen eines namhaften Fassadenbauers und eines Glas-künstlers klärten wir ab, ob es möglich ist, den g-Wert auch für streuende Gläser winkelabhängig zu ermitteln. Wie schon für nichtstreuende Gläser ist es mit der üblicherweise eingesetzten Ulbrichtkugel nicht möglich, alle nötigen Messdaten zu erhalten. Insbesondere kann auch die winkelabhängige Reflexion auf diese Weise nicht gemessen werden.

**Methode (Fig. 2.1):** Die Gläser werden mit einem parallelen Strahlenbündel unter den gewünschten Einfallswinkeln zwischen  $0^\circ$  und  $75^\circ$  ( $\alpha$ ) bestrahlt. Für jeden dieser Einfallswinkel muss das gestreute Licht in Transmission und Reflexion für den ganzen Halbraum gemessen werden. Unter der Annahme isotroper Streuung genügt es in der Ebene in Richtung des Winkels  $\beta$  die Lichtintensität in einzelnen Schritten zu messen. Als Referenz wird eine Spectralonprobe mit bekannter Lambertscher Streuung in Reflexion verwendet. Die einzelnen Messungen werden, gewichtet nach dem Raumwinkel, summiert, um den Betrag für den ganzen Halbraum zu erhalten.



**Fig. 2.1: Messprinzip, Anordnung zur Messung der diffusen Transmission.**

Zum Testen der Methode wurde für den Einfallswinkel von  $0^\circ$  ein beidseitig geätzter Glasdiffuser vermessen und mit der Standardmessung (Cary-Spektrometer mit Ulbrichtkugel) verglichen (Fig. 2.2).



**Fig. 2.2: Gemessener Transmissions- und Reflexionsgrad eines Glasdiffusers.**

Die Messungen stimmen recht gut untereinander überein. Der Absolutfehler beträgt ca. 2.5%. Die Abweichungen bei der Transmission im infraroten Wellenlängenbereich und bei der Reflexion über das gesamte gemessene Spektrum, kommen zur Hauptsache durch Streulicht zustande. Die Messapparatur kann bezüglich des Streulichtes noch optimiert werden.

Es konnte somit gezeigt werden, dass mit der gewählten Methode streuende Gläser spektral und winkelabhängig gemessen werden können. Allerdings ist der Messaufwand sehr gross, da pro Einfallswinkel bis zu 30 Messungen benötigt werden, die dann gewichtet aufsummiert werden müssen.

Am LESO der EPFL (Prof. Scartezzini) wurde eine Anlage zur Messung von Lichtstreuung (Bi-directional Goniophotometer) [7] besichtigt. Die Messungen sind dort grösstenteils automatisiert und es kann Streulicht vom gesamten Halbraum gemessen werden. Dies macht Vorbehalte bezüglich Isotropie der Streuung gegenstandslos. Heute wird dort die Winkelverteilung und Intensität der Streuung mit einer CCD-Kamera gemessen. Um abzuklären, ob eine solche Anlage mit vertretbarem Aufwand für einen spektralen Messbetrieb modifiziert werden kann, bedarf es einiger Testumbauten und Testmessungen, die derzeit in Planung sind.

### 3. Demonstrationsaufbau

Um den Sonnenschutz für Besucher anschaulich und fühlbar zu machen, wurde ein spezieller Aufbau realisiert.



Der Demonstrationsaufbau besteht aus drei verschiedenen Gläsern, die der Betrachter miteinander vergleichen kann. Sie werden von hinten mit drei identischen 500 W Halogenstrahlern beschienen. Es soll unter den Gesichtspunkten Transmission im sichtbaren und im infraroten Bereich herausgefunden werden, welches das beste Sonnenschutzfenster ist. Die durch das Glas transmittierte Strahlung ist bei den schlechten Sonnenschutzgläsern direkt mit der Haut fühlbar und kann auch an vorgesetzten Kupfer-Absorberblechen qualitativ durch Temperaturmessung bestimmt werden.

**Fig. 3.1: Sonnenschutz-Demostand mit drei Halogenstrahlern und vorgesetzten Absorberblechen.**

$\tau_v/\tau_e$  Werte [%] der Gläser von oben nach unten:  
36/31, 50/25, 79/88

## Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Es konnte gezeigt werden, dass die ideale Transmission nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch realisierbar ist. Für die Realisierung wurde die Abscheidung von Silber auf Siliziumdioxid und von Titandioxid auf Silber untersucht und optimiert. Um ein glattes Wachstum von Ag auf  $\text{SiO}_2$  zu erreichen, wurde eine Plasmabehandlung der Siliziumdioxidschicht verwendet. Wird Titandioxid auf Silber abgeschieden, so ist, bis sich eine geschlossene  $\text{TiO}_2$ -Schicht gebildet hat, die Silberschicht einem sehr reaktivem Sauerstoffplasma ausgesetzt, welches das Silber oxidiert. Es wurde eine Stoppschicht aus reinem Titan eingeführt, um die Oxidation von Silber zu verhindern. Durch die darauf folgende Titandioxidabscheidung wird die Stoppschicht oxidiert, das Silber jedoch nicht. Erste Mehrschichtsysteme zeigten, dass die gewünschte Form der idealen Transmission erreicht werden kann. Die Abscheidung bei unserer Schichtherstellung muss bezüglich der Dicken einzelner Schichten und ihrer Morphologie aber noch weiter optimiert werden, um eine bessere Farbneutralität verbunden mit sehr geringen Alterungseffekten zu erreichen.

## Nationale Zusammenarbeit

- Glas Trösch, Bützberg
- Schweizerische Bundesbahnen SBB
- Stadler Rail AG, Bussang
- LESO - EPFL, Lausanne

## Internationale Zusammenarbeit

- IHP Microelectronics, Frankfurt an der Oder, D  
SIMS-Schichtanalyse
- FLACHGLAS Wernberg GmbH, Wernberg-Köblitz, D

## Referenzen

### Veröffentlichungen zum Projekt „*Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerliche Wärmeschutz*“ selber

- A. Romanyuk et al. ***Bias-stimulated nucleation of silver prepared by pulsed arc deposition on silicon oxide***, Journal of Applied Physics Vol. 100 (2006) 074904.
- A. Romanyuk, R. Steiner, I. Mack, P. Oelhafen, D. Mathys, ***Growth of thin silver films on silicon oxide pretreated by low temperature argon plasma***, Manuscript accepted for publication in Surface Science.
- A. Romanyuk et al. ***Formation and electronic structure of TiO<sub>2</sub> - Ag interface***, Manuscript to be submitted in Solar Energy Materials and Solar Cells.

## Kapitel 1: Neue Beschichtungen

- [1] P. Oelhafen, ***Optimal spectral transmittance of sun protection glasses***, CISBAT 2005 Proceedings, Lausanne (2005).
- [2] I. Mack, P. Oelhafen, Georges Reber, A. Romanyuk, R. Steiner ***Jahresbericht 2005 – „Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerliche Wärmeschutz“ – Programm Rationelle Energienutzung in Gebäuden im Auftrag des Bundesamts für Energie BfE*** (2005).
- [3] H.A. Macleod, ***Thin Optical Filters*** (Macmillan, New York, 1986).
- [4] TFCalc™: ***Thin Film Design Software for Windows V3.5.8***, Software Spectra, Inc. 2004.
- [5] P.Barquinha, L. Pereira, H. Águas, E. Fortunato, R. Martins, ***Influence of the deposition conditions on the properties of titanium oxide produced by r.f. magnetron sputtering***, Mat. Sci. in Semicond. Proc. 7 (2004) 243.
- [6] D.W. Hoffman, ***Perspective on stresses in magnetron-sputtered thin films***, J. Vac. Sci. Technol. A 12(4) (1994) 953.

## Kapitel 2: Optische Eigenschaften von strukturierten Glasscheiben

- [7] A Report of IEA SHCP TASK 21 / ECBCS ANNEX29 September 1999