

Jahresbericht 2007, 17. Dezember 2007

Rationelle Energienutzung in Gebäuden

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

Autoren	Iris Mack, Peter Oelhafen, Georges Reber, Andriy Romanyuk, Roland Steiner
beauftragte Institution	Departement Physik der Universität Basel
Adresse	Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel – Tel. 061-267 37 13
E-mail, Internetadresse	peter.oelhafen@unibas.ch http://pages.unibas.ch/phys-esca http://www.glassdbase.unibas.ch
BFE Vertrags-Nummer	100761
Dauer des Projekts	01. Januar 2004 – 30. Juni 2008

ZUSAMMENFASSUNG

Neue Beschichtungen: Wir berichten über die Verwendung von Zinn als Benetzungsmittel für das Silberwachstum auf SiO_2 . Wir konnten beobachten, dass mit vorangehend aufgetragenen Submonoschichten aus Zinn eine frühere Koaleszenz des Films und eine Bildung glatterer Silberschichten bei Raumtemperatur erzielt werden können. Ferner erweiterten wir das Substratmaterial, wozu eine neue Einrichtung zur ZnO-Deposition aufgebaut wurde.

Die im letzten Jahresbericht vorgestellten Schichtsysteme zur Realisierung der idealen Transmission τ_{\min} wurden für Beschichtungen unter industriellen Bedingungen weiter entwickelt. Hierzu wurde als Erstes der Einfluss von verschiedenen Parametern während der Beschichtung untersucht. Als zweites wurden die Schichtsysteme durch erneute Simulationen optimiert und an Bedingungen, die für eine industrielle Produktion wichtig sind, angepasst. Ein erstes Experiment auf einer 90×60 cm grossen Glasscheibe hat gezeigt, dass eine industrielle Umsetzung möglich ist, aber auch dass noch viele Eigenschaften optimiert und verbessert werden müssen.

Messapparaturen: Die Messapparatur zur winkelabhängigen Bestimmung der optischen Eigenschaften von Isoliergläsern wurde an präzise modellierbaren Messproben getestet und eine so gute Übereinstimmung gefunden, dass umgekehrt damit die Festlegung von optischen Parametern möglich ist. Neben der Überprüfung der Messmethode ist jetzt weiter eine Möglichkeit geschaffen worden, die Messgenauigkeit jederzeit zu kalibrieren. Die Messapparatur zur Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe wurde erfolgreich angewandt auf ein System mit drei Komponenten. Die in diesem Kontext erfolgten Untersuchungen zur Wirksamkeit von Innenstoren zeigten auf, wie die spektrale Abstimmung der Komponenten aufeinander zur Wirkung kommt, aber auch der Grad der Hinterlüftung der Innenstore.

Inhalt

Projektziele	4
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	5
1. Neue Beschichtungen	5
1.1 Verbesserung der optischen Eigenschaften dünner Silberschichten für Sonnenschutzgläser	5
1.2 Schichtoptimierung, Silber auf Zinkoxid	8
2. Weiterentwicklung der Beschichtung für Sonnenschutzgläser zur Optimierung für die industrielle Herstellung	9
2.1 Optimierung der einzelnen Schichten	9
2.2 Simulationen	11
Referenzen zum Kapitel 1 und Kapitel 2	14
3. Messanlage, Datenauswertung	15
3.1 Eine Untersuchung von Innenstoren auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes <i>Erweiterung des Messverfahrens auf ein zusammengesetztes System N=3</i>	15
3.2 Winkelabhängige Messungen an Stapeln von Floatgläsern und ihre Modellierung mit monolithischem Substrat-Modell zur Überprüfung der Messmethode und der zeitlichen Stabilität der Messung <i>Experimentelle Bestimmung der optischen Konstanten n und k von Floatglas als Modellparameter</i>	21
Referenzen zum Kapitel 3	27
Bewertung 2007 und Ausblick 2008	28
Nationale und Internationale Zusammenarbeit	29
Öffentlichkeitsarbeit	29

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 zu diesem Problem 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.

Die anvisierte Optimierung basiert auf einer besser angepassten spektralen Transmission bei bleibendem Durchlass an sichtbarem Licht. Zwei Strategien werden parallel bearbeitet: die Verbesserung von bestehenden Sonnenschutzgläsern und die Entwicklung eines neuen Schichtsystems, welches einer Idealtransmission nahe kommt. Der Einfluss dieser Beschichtungen auf den Energiehaushalt von Gebäuden wird mit einem dynamischen Modell simuliert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. Neue Beschichtungen

1.1 Verbesserung der optischen Eigenschaften dünner Silberschichten für Sonnenschutzgläser

Verfasser des Kapitels: Andriy Romanyuk

Mehrfachschichten aus alternierenden metallischen und oxydischen Einzelschichten spielen bei Beschichtungen für Sonnen- und Wärmeschutzgläser eine zentrale Rolle. Als Metallschicht kommt heute vorwiegend Silber zum Einsatz. Dabei werden das hohe Reflexionsvermögen im Infrarotbereich sowie das hohe Transmissionsvermögen von Ag-Schichten ausgenutzt. Beschichtungen von aktuellen Sonnenschutzgläsern, die aus Schichtpaketen mit rund 10 Einzelschichten bestehen, besitzen in der Regel zwei Silberschichten.

Bei der Abscheidung sehr dünner Silberschichten auf einer Oxydunterlage bildet sich jedoch anfänglich keine kontinuierliche Schicht, da die Ag-Atome Cluster bilden, die bis zu einer kritischen Schichtdicke voneinander isoliert sind (Inselwachstum). In der vorliegenden Anwendung ist das ein unerwünschter Effekt [1, 2], so dass man mit unterschiedlichen Massnahmen versucht, in einem möglichst frühen Stadium, eine kontinuierliche, glatte Ag-Schicht zu erhalten. Zu diesen Massnahmen gehören z.B. die Ionenstrahl unterstützte Abscheidung [3], die Abscheidung aus einem hochenergetischen Fluss aus einem Metallplasma [4, 5], das Oberflächenengineering durch Ionenstrahlen [6, 7] oder die Verwendung von Benetzungsmitteln (*surfactants*) [8, 9].

Das Benetzungsmittel ist eine Zwischenschicht, die dünner als eine monoatomare Schicht ist und das schichtweise Wachstum begünstigt. Die Mechanismen, die dabei wirksam sind, bestehen in einer Reduktion der Oberflächenmobilität der deponierten Ag-Atome und/oder der Reduktion der Interlayer-Diffusion, die das 2D Wachstum begünstigen [10, 11].

Im Folgenden berichten wir über die Wirksamkeit von Zinn (Sn) als *surfactant* für die Abscheidung von Nanometer dicken Ag-Schichten auf Siliziumdioxid.

Figur 1.1 zeigt die Oberflächentopographie, aufgenommen mit dem Raster-Kraft-Mikroskop (AFM), von 4 nm dicken Ag-Schichten bei der direkten Deposition auf SiO_2 (Figur 1.1a) und der Verwendung einer 0.5 Monolagen dicken Sn Zwischenschicht (Figur 1.1b).

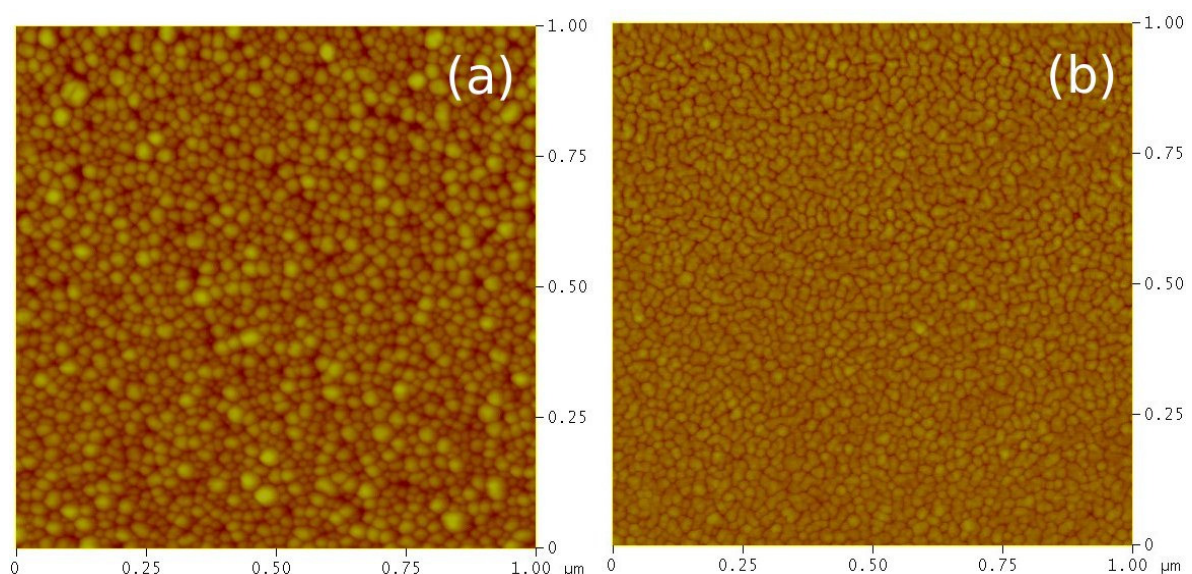


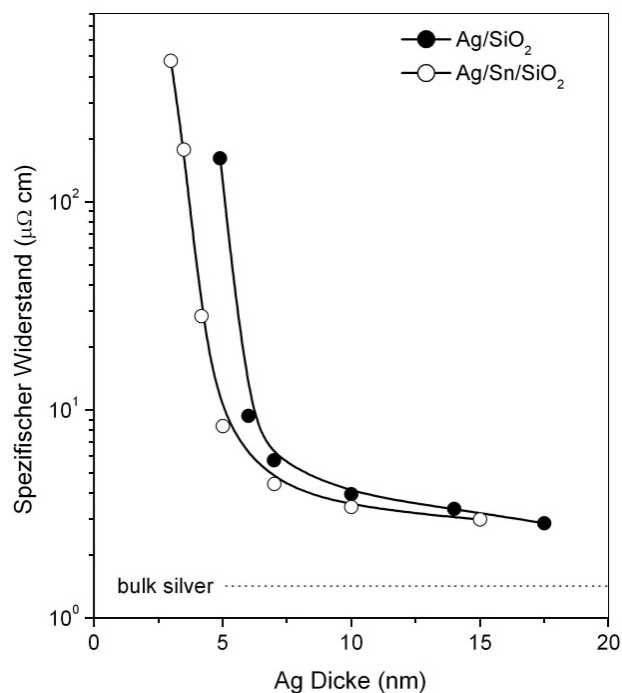
Fig. 1.1: AFM Bilder der Ag-Oberflächen bei direkter Abscheidung auf SiO_2 (a) sowie der Verwendung mit einer Sn-Zwischenschicht (b).

Bei der Abscheidung ohne Sn-Zwischenschicht, zeigt die Oberfläche Cluster, die annähernd kugelförmig sind und eine breite Grössenverteilung aufweisen. Bei der Abscheidung mit Sn als Zwischenschicht zeigen sich Cluster mit unregelmässiger Form, was auf ein frühes Zusammenwachsen von benachbarten Cluster hindeutet. Dieser Effekt führt auch zu einer kleineren Oberflächenrauigkeit. Diese beträgt in Figur 1.1a 1.56 nm und in Figur 1.1b 0.89 nm.

Die Verwendung eines *surfactants* bewirkt die Reduktion der Oberflächenrauigkeit und hat damit auch Auswirkungen auf den elektrischen Widerstand und die optischen Eigenschaften der Ag-Schicht. Der Schichtwiderstand, dargestellt in Figur 1.2 wird in unserem Experiment mit einer vier-Punkt-Messung *in-situ* – unmittelbar nach der Schichtabscheidung – gemessen. Figur 1.2 zeigt, dass die kritische Schichtdicke, ab der die Schicht durchgehend ist (die sog. Perkolationsschwelle), bei direkter Deposition auf SiO_2 bei etwa 5 nm liegt (ausgefüllte Kreise) und im Fall der Deposition auf die Sn-Zwischenschicht (offene Kreise) auf etwa 3 nm reduziert wird. Zudem ist der Widerstand in diesem Fall über den ganzen Bereich der Ag-Schichtdicke kleiner als im Fall ohne *surfactant*.

Fig. 1.2:

Spezifischer elektrischer Widerstand der Silberschicht in Funktion der Schichtdicke für den Fall der direkten Deposition auf Glas (schwarze Punkte) und der Verwendung des Sn-*surfactants* (offene Punkte).



Figur 1.3 zeigt das spektrale optische Transmissionsvermögen bei den Depositionen von Ag auf Glas mit und ohne *surfactant* (blaue und rote Kurve). Der Vergleich mit einer berechneten Transmissionskurve, die das ideale Verhalten der Ag-Schicht auf Glas repräsentiert (gestrichelte Kurve), zeigt, dass der Fall der Abscheidung mit *surfactant* deutlich näher bei der idealen Kurve liegt, was zu einer kleineren Transmission im Infrarotbereich und einer höheren Transmission im sichtbaren Bereich führt.

Das Beispiel zeigt deutlich, wie die Anwendung einer *surfactant* Zwischenschicht eine deutliche Erniedrigung der Perkolationschwelle bewirken kann und die Rauigkeit der Metallschicht reduziert wird. Dies führt dann zu einer Verbesserung der optischen und elektrischen Eigenschaften. Diese Prozesse sind verknüpft mit einer günstigeren Form und einer früheren Agglomeration der Ag-Cluster beim Schichtwachstum auf der *surfactant*-Schicht.

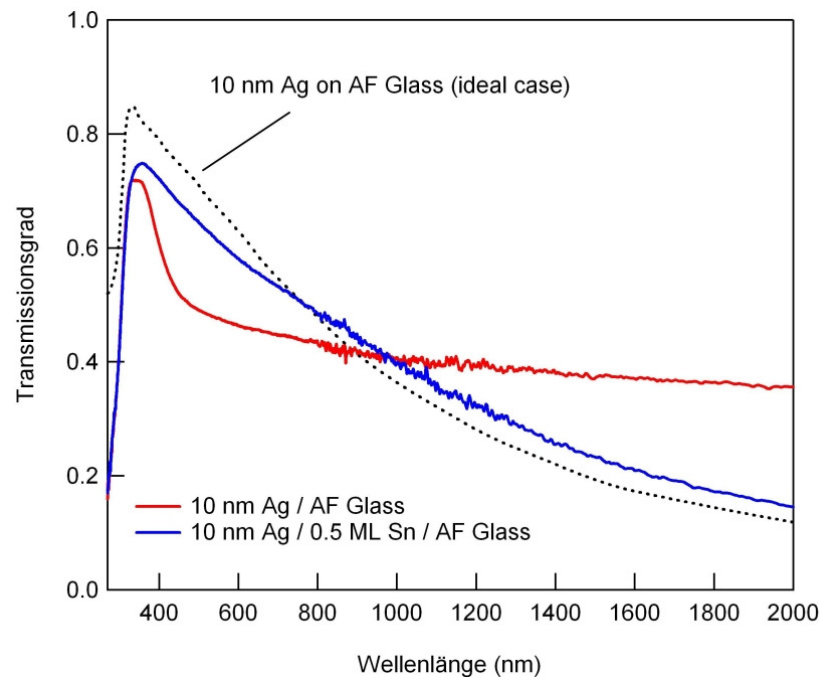


Fig. 1.3: Spektrale optische Transmission von Silberschichten auf Glas mit Sn-*surfactant* (blaue Kurve) und direkte Deposition auf Glas (rote Kurve). Die gestrichelte Kurve zeigt die berechnete Transmission, wie man sie für ideale Ag-Schichten erwarten würde.

1.2 Schichtoptimierung, Silber auf Zinkoxid

Verfasser des Kapitels: Roland Steiner

Silber wird in der Glasbeschichtung am häufigsten als metallische Reflektionsschicht verwendet, zur Erreichung der gewünschten Interferenzeffekte. Es hat sich gezeigt, dass mit nur 2 Reflektionsschichten die gewünschten optischen Eigenschaften der neuen Sonnenschutzgläser nur ungenügend erreicht werden können. Um mit 3 Reflektionsschichten ähnlich hohe Transmissionswerte zu erreichen, müssen die Metallfilme tendenziell dünner ausgeführt werden. (Die Figur 1.4 zeigt ein solches Mehrfachschichtsystem). Da Silber bei der Abscheidung zur Inselbildung neigt, muss die Nukleation und das Wachstum dünnerer Schichten untersucht und optimiert werden.

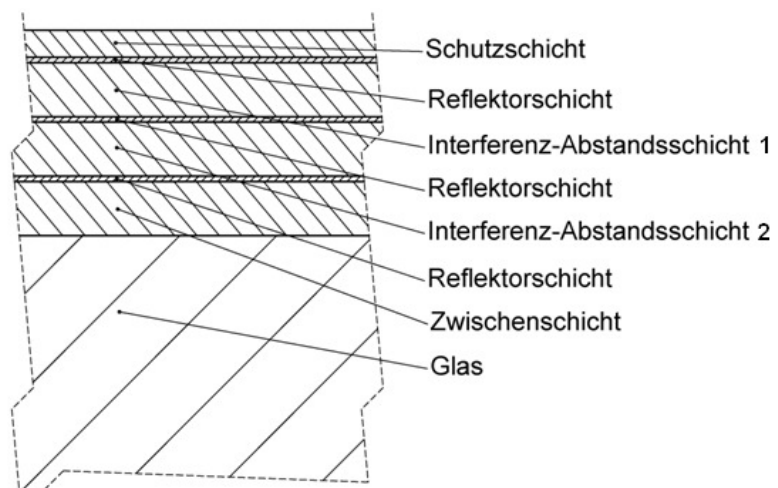


Fig. 1.4: Einfaches Modell einer 3-fach Interferenzschicht zur Erreichung eines optimalen Sonnenschutzes.

Die Interferenz-Abstandsschichten (dielektrische Schichten) werden industriell häufig aus Zinkoxid (ZnO) hergestellt. ZnO soll sich günstig auf das Schichtwachstum von Silber auswirken [12]. Allerdings hat Zn einen relativ hohen Dampfdruck, so dass es Analysegeräte im Ultrahochvakuum (UHV) beschädigen kann. Eine solche „Vergiftung“ ist meist nur schwer wieder rückgängig zu machen. Deshalb mussten wir eine spezielle Versuchsapparatur zur Untersuchung dieses Schichtsystems aufbauen.

Beschreibung der Zn-Beschichtungskammer

Die Kammer ist in UHV-Technik gefertigt, hat einen Durchmesser von ca. 200 mm und eine Höhe von 270 mm. Sie ist in eine Beschichtungs- und eine Mess-Ebene mittels einer Blende mit zentralem Loch geteilt. Der Probenhalter wird durch das Loch zwischen den beiden Ebenen hin und her bewegt. Der Probenhalter kann Wassergekühlt werden und ist für den RF-Betrieb elektrisch isoliert und abgeschirmt. Die Probengröße beträgt 10×10 mm. Oberhalb der Probe ist ein Schwingquarz zur Bestimmung der Depositionsrates angebracht (siehe Figur 1.5). Sowohl Probe als auch Schwingquarz können mit einer Magnetdurchführung abgedeckt werden (Shutter). Für die Beschichtungen können bis zu 3 Mini-Magnetrons an der Beschichtungskammer montiert werden. Es hat auch Platz für andere Beschichtungsquellen. Weiter gibt es eine Sauerstoffmesssonde zur Partialdruckregelung beim reaktiven Sputtern mit Sauerstoff und Argon.

Auf der Messebene befindet sich ein Messkopf für die Bestimmung des Schichtwiderstandes. Der Messkopf mit 4-Messstiften wird mit einem Magnetmanipulator im Vakuum vorsichtig an die Probe gedrückt und der Schichtwiderstand bestimmt.

Es wurden erste Versuchsreihen durchgeführt, wobei der Unterschied zwischen mit Plasma behandeltem und unbehandeltem ZnO untersucht wurde (in Projektarbeit „Schweizer Jugend forscht“ [12]). Es konnten eindeutige Trends ermittelt werden. Allerdings stellte sich heraus, dass unser ZnO eine ca. doppelt so hohe Rauigkeit aufweist als das von der Glasindustrie hergestellte. Eine raue Oberfläche bewirkt unkontrolliertes Wachstum mit Inselbildung. Deshalb sind die von uns erhaltenen schichtdickenabhängigen Schichtwiderstandswerte nur bedingt für Vergleiche mit anderen Verbesserungsmethoden geeignet – vergleiche dazu Kapitel 1.1: Verbesserung der optischen Eigenschaften dünner Silberschichten für Sonnenschutzgläser.

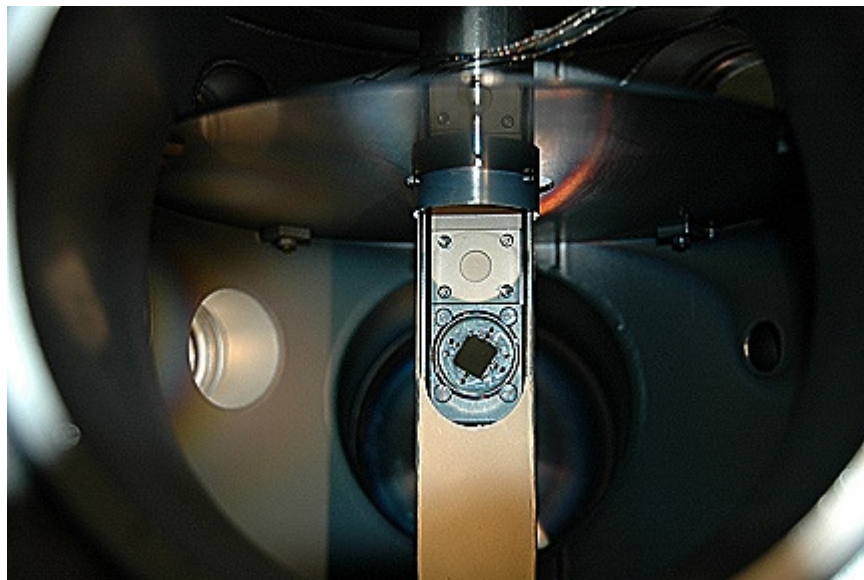


Fig. 1.5: Blick in die Beschichtungsebene im Innern der Kammer. Isolierter und geschirmter Probenhalter mit Probe (unten) und Schwingquarz (oben).

Somit stellt sich nun zuerst die Aufgabe, die ZnO-Abscheidung zu optimieren und besser zu verstehen. Die nächsten Schritte dieses Teilprojekts werden demnächst in Zusammenarbeit mit unserem Industriepartner in Angriff genommen.

2. Weiterentwicklung der Beschichtung für Sonnenschutzgläser zur Optimierung für die industrielle Herstellung

Verfasserin des Kapitels: Iris Mack

2.1 Optimierung der einzelnen Schichten

Die im letzten Jahresbericht [13] dargestellten Schichtsysteme wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM) untersucht. Die Messungen zeigten, dass die Oberfläche der Titandioxid-Schichten sehr rau sind, und dass die Schichten ein säulenartiges Wachstum aufweisen. Bei einem solchen Wachstum kann Sauerstoff aus der Atmosphäre durch die Schicht diffundieren. Dies kann zu einer Oxidation der darunter liegenden Silberschichten führen. Dadurch werden die optischen Eigenschaften der Silberschichten verändert, und somit ändert sich das optische Verhalten des gesamten Schichtsystems.

Um dieses Problem in Griff zubekommen, wurde der Einfluss einiger wichtiger Parameter bei der Herstellung auf die Eigenschaften von Titandioxid-Schichten untersucht. Hierzu wurde bei der Titandioxid-Abscheidung der Druck in der Beschichtungskammer, das Mischungsverhältnis der verwendeten Gase (Argon und Sauerstoff), die verwendete Pulsfrequenz des Magnetrons und die Temperatur der Substrate variiert. Die Schichten wurden mittels eines Magnetrons im gepulsten Betriebsmodus von einem reinen Titantarget in einer Sauerstoff-Argon-Atmosphäre abgeschieden.

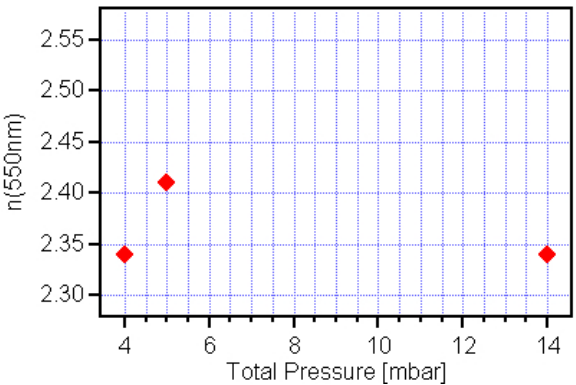


Fig. 2.1: Brechungsindex von Titandioxid in Abhängigkeit vom gesamten Druck in der Beschichtungskammer.

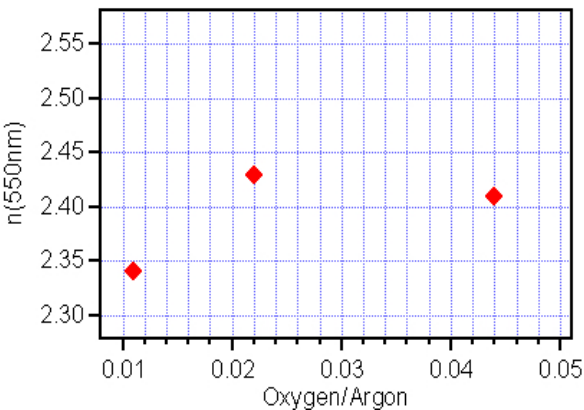


Fig 2.2: Brechungsindex von Titandioxid in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis von Sauerstoff und Argon in der Beschichtungskammer.

Als erstes wurde der Einfluss des Gesamtdruckes während der Abscheidung untersucht. Es wurden drei Proben bei unterschiedlichem Gesamtdruck, aber gleichem Mischungsverhältnis von Sauerstoff und Argon ($O/Ar=0.044$) abgeschieden. Im Anschluss wurden die Proben mittels Ellipsometrie und SEM vermessen. Den Brechungsindex der Schichten erhält man, durch Anfitten eines Modellsystems an die gemessenen Daten. Die unterschiedlichen Ergebnisse für den realen Brechungsindex sind in Abbildung 2.1 gezeigt. Aus den Messungen wird deutlich, dass die Struktur und damit die optischen Eigenschaften von Titandioxid vom Gesamtdruck während der Beschichtung abhängen. Durch Photoelektronenspektroskopie Messungen (XPS) konnte gezeigt werden, dass es sich bei allen drei Proben um reines Titandioxid handelt. Die SEM-Messungen bestätigten die Annahmen, dass das säulenartige Wachstum bei $5 \cdot 10^{-3}$ mbar deutlich geringer und der Abstand zwischen den einzelnen Säulen sehr viel kleiner war.

Als zweiter Parameter wurde der Einfluss des Gasmischungsverhältnisses zwischen Argon und Sauerstoff untersucht. Hierzu wurde das Partialdruckverhältnis von Sauerstoff zu Argon bei konstantem Gesamtdruck variiert. Der Brechungsindex n dieser Schichten ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

XPS Messungen (s. Abbildung 2.3) ergaben, dass beim kleinsten Mischungsverhält-

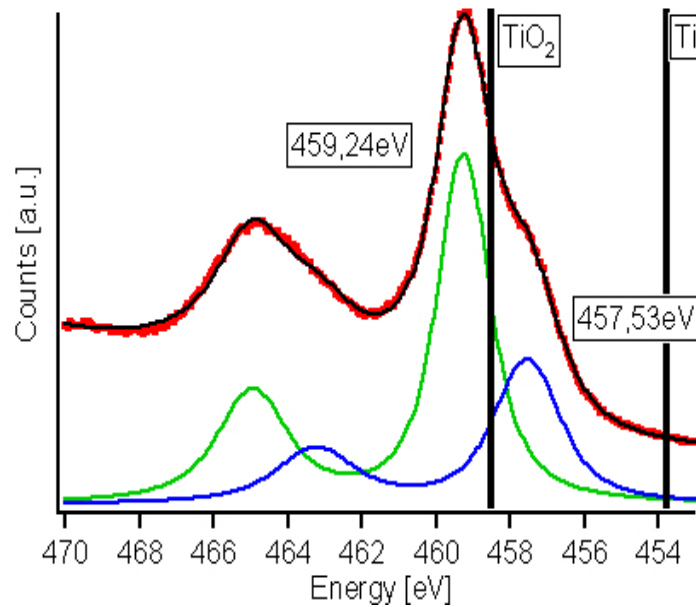


Fig. 2.3: XPS-Spektrum der Ti2p-Linie bei einem Gasmischungsverhältnis von Sauerstoff zu Argon gleich 0.011. Der Peak bei 459.24eV entspricht TiO₂ und der bei 457.53eV gehört zu Ti₂O₃.

nis von Sauerstoff zu Argon ($O/Ar=0.011$) kein reines Titandioxid TiO₂ mehr vorliegt, sondern die Schicht teilweise aus Ti₂O₃ besteht. Damit lässt sich auch erklären, warum der Brechungsindex sich so extrem ändert.

Weiter wurde der Einfluss der Pulsfrequenz, mit dem das Magnetron während der Abscheidung betrieben wird, untersucht. Die Pulsfrequenz gibt an, wie oft das Target durch einen positiven Spannungsimpuls kurzzeitig umgepolt wird. Dies ist wichtig, da sich sonst das Target bei einem Betrieb in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre auflädt und die Abscheidung zusammenbricht.

Die Messwerte in Abbildung 2.4 zeigen deutlich, dass auch dieser Parameter einen Einfluss auf die Struktur und auf das optische Verhalten der Schicht hat. Die Pulsfrequenz beeinflusst die Rate, mit der die Abscheidung erfolgt, und diese nimmt mit zunehmender Pulsfrequenz ebenfalls zu. Bei einer geringeren Beschichtungsrate haben die auf dem Substrat ankommenden Moleküle mehr Zeit, um sich mittels Oberflächenmobilität zu großen Clustern zu formieren. Können sich große Cluster bilden, so kann sich dadurch eine kontinuierliche und glatte Schicht ausbilden. Ist die Pulsfrequenz zu niedrig, wie im Fall von 50 kHz, kommt es zu Aufladungen des Targets und damit zu Überschlügen und einer unkontrollierten Abscheidung.

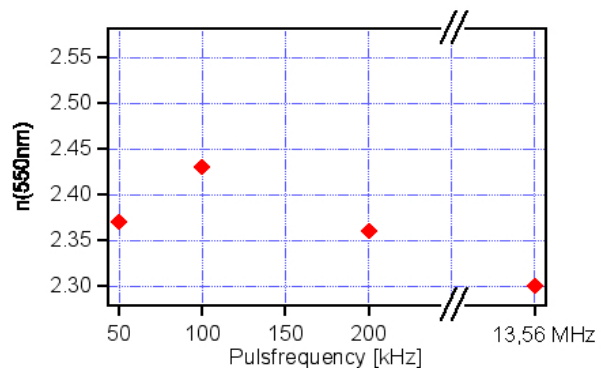


Fig. 2.4: Brechungsindex von Titandioxid in Abhängigkeit der verwendeten Pulsfrequenz, die am Titan-target angelegt wird.

Als Letztes wurde der Einfluss der Substrattemperatur auf das Schichtwachstum und die optischen Konstanten untersucht. Der Brechungsindex für eine Substrattemperatur von 200 °C und Zimmertemperatur sind in der Abbildung 2.5 dargestellt. Hier zeigt sich, dass sowohl Schichtwachstum als auch der Brechungsindex bei der höheren Temperatur besser ist. Dies ist mit der

Tatsache, dass bei einer höheren Oberflächentemperatur auch die Oberflächenmobilität höher ist, zu erklären. Damit wäre es empfehlenswert die Titandioxidschichten bei einer erhöhten Temperatur abzuscheiden. Doch werden die darunter liegenden Silberschichten natürlich bei einer höheren Temperatur auch leichter und schneller oxidiert, so dass diese Methode, bessere Titandioxidschichten zu erzeugen, im Zusammenhang mit der Beschichtung von Sonnenschutzfenstern keinen Einsatz finden wird.

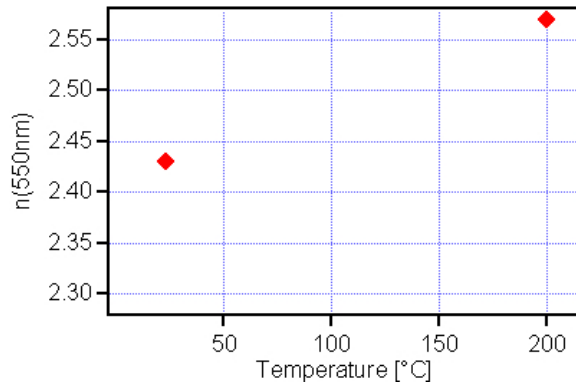


Fig. 2.5: Brechungsindex von Titandioxid in Abhängigkeit der Temperatur des Substrates.

Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Abstimmung der Parameter Gesamtdruck, Gasmischungsverhältnis, Pulsfrequenz und Substrattemperatur für die Erzeugung von optischen Schichten von großer Bedeutung ist.

2.2 Simulationen

Am Institut für Physik wurden, wie im letzten Jahresbericht [13] bereits beschrieben, Mehrschichtsysteme hergestellt, welcher die Bedingungen der idealen Transmission τ_{\min} [15] fast erfüllten. Daraufhin wurden erneut Simulationen, zur Vorbereitung für Beschichtungen auf der Entwicklungsanlage der Firma Glas Trösch in Bützberg, durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden die Anforderungen an eine Beschichtung für Glasfassaden nochmals im Detail in Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung der Firma Glas Trösch besprochen und als Ziele und Bedingungen formuliert:

1. Die Anzahl der Schichten sollte kleiner oder gleich neun Schichten sein.
2. Das Verhältnis aus dem direktem Strahlungstransmissionsgrad τ_e und dem Lichttransmissionsgrad τ_v soll ungefähr ein Drittel betragen: $\tau_e/\tau_v=1/3$
3. Die Reflexionsfarbe soll keine rote Komponente enthalten: $a \leq 0$
4. Der Farbton des reflektierten Lichtes soll unabhängig vom Einfallswinkel des Lichtes sein. Als Farbton wird Blau bevorzugt.
5. Die Farbkoordinaten für das transmittierte Licht bei einem Einfallswinkel von 0° soll möglichst farbneutral sein. Die Grenzen wurden hier für a und b des CIE Lab-Koordinatensystems auf ± 5 für beide gesetzt.
6. Der Lichttransmissionsgrad τ_v soll größer als 0,5 sein.
7. Die Transmission, soll auch bei nicht senkrechter Betrachtung, kein Gelb enthalten.
8. Die Gesamtdicke des Schichtaufbaus soll kleiner als 200nm sein.

Die Simulationen wurden mit dem Programm TFCalc durchgeführt. Dort ist es möglich, Ziele und Bedingungen, die ein simuliertes Schichtsystem erfüllen soll, als „targets“ zu formulieren. Es wurden zwei Arten von Targets verwendet. Es wurde, wie bereits in vorherigen Simulationen, die ideale Transmissionskurve [15] als eine Sorte von Targets verwendet. Als zweite Sorte wurden Farbkoordinaten für verschiedene Einfallswinkel definiert. Eine Schwierigkeit bei der Definition der Targets ist, eine geeignete Gewichtung der einzelnen Targets zu finden. Werden alle gleich gewichtet, so werden die Farbtargts durch ihre geringere Zahl zu wenig berücksichtigt.

Mit diesen Bedingungen und einigen vorgegebenen Schichtaufbauten, wurden ungefähr 70 verschiedene Schichtmodelle gefunden, die mehr oder weniger die Vorgaben erfüllten. Um die Zahl der Schichtmodelle zu reduzieren wurde dann besonders Gewicht auf folgende Beurteilungskriterien gelegt.

- Verhältnis aus direktem Strahlungstransmissionsgrad τ_e und Lichttransmissionsgrad τ_v :
 $\tau_e/\tau_v=1/3$

- Farbstabilität: $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$ soll möglichst klein sein. Bei der Bestimmung werden die Farbwerte bei einem Einfallswinkel von 0° und 45° verwendet [14].
- Kein Gelb in der Transmission: $b_T(0^\circ) < 5$
- Kein zu intensives Grün in der Reflexion: $a_R(0^\circ) > -10$
- Reflexion im Blauen: $b_R(0^\circ) < 0$

Vergleicht man die Ergebnisse der Simulationen nach Anwendung der Beurteilungskriterien, die in der Tabelle 2.1 dargestellt sind, so zeigt sich, dass die Schichtaufbauten entweder das Verhältnis von τ_e und τ_v oder die Farbstabilität bis zu großen Einfallswinkeln optimal wieder geben.

Simulation	τ_e/τ_v	$\Delta E(45^\circ)$	Bemerkung
A1	0.337	14.8	Auswahl nach geringstem τ_e/τ_v - Verhältnis
A2	0.338	11	
A3	0.338	11.2	
B1	0.37	4.8	Auswahl nach hoher Farbstabilität (ΔE möglichst klein)
B2	0.376	4.9	
B3	0.384	6	
C1	0.336	7.5	Kompromiss aus τ_e/τ_v - Verhältnis und Farbstabilität
C2	0.369	7.5	

Tab 2.1: Ergebnisse der Simulationen

Die Simulationen C1 und C2 zeigen, dass es aber auch Schichtsysteme gibt, die beide Kriterien erfüllen, wenn auch beide nicht optimal.

Als zweites Selektionsverfahren wurde eine andere Beurteilungsmethode bei den selben 70 Schichtaufbauten angewendet. Bei dieser mehr farbenorientierten Methode wurden die letzten drei, der oben angegebenen Kriterien verwendet und die Schichtaufbauten wurden nach dem b-Farbwert der Transmission sortiert. Alle Schichtaufbauten, welche die Bedingung von $b_T(0^\circ) < 5$ erfüllten, wurden übernommen. Die so übrig gebliebenen Schichtaufbauten wurden dann erneut sortiert, diesmal nach dem a-Farbwert der Reflexion. Alle Schichtaufbauten, die das Kriterium $a_R(0^\circ) > -10$ nicht erfüllten wurden gestrichen. Dann wurde ein drittes Mal sortiert. Der b-Farbwert der Reflexion wurde dafür verwendet, und die Schichten mit $b_R(0^\circ) < 0$ wurden aussortiert. Die so gefundenen Schichtsysteme lagen bei niedrigen τ_e/τ_v - Verhältnissen von 0.335 bis 0.361. Die Farbstabilitätswerte ΔE lagen im Bereich von 11.2 und 18.3, was sehr hoch ist. Dies ist zu erwarten, wenn nur die Farbwerte für einen Einfallswinkel von 0° bei der Auswahl berücksichtigt werden.

Aus den durch beide Methoden ausgewählten Schichtaufbauten wurden zwei exemplarisch ausgewählt (Tabelle 2.2). Dabei wurden zwei verschiedene Schichtaufbauten gewählt, die sich durch ihren Schichtaufbau und die verwendeten Materialien unterscheiden. Der eine Schichtaufbau war einer, der in der Industrie als Grundgerüst verwendet wird, und der andere ist der, der bei den ersten Experimenten am Institut für Physik gewählt worden war.

Schichtaufbau	τ_e/τ_v	ΔE	$b_T(0^\circ)$	$a_R(0^\circ)$	$b_R(0^\circ)$
Physik (B1)	0.370	4.8	6.04	-19.5	2.58
Industrie	0.352	13.3	-2.6	-10.4	-2.1

Tab 2.2: Zwei exemplarisch ausgewählte Schichten

In Abbildung 2.5 ist die gemessene winkelhabhängige Transmission einer ersten Beschichtung, mit dem in der Tabelle 2.2 als „Industrie“ bezeichnetem Schichtaufbau, dargestellt, die auf der Versuchsanlage der Firma Glas Trösch hergestellt wurde. Die optischen Daten, wie der Lichttrans-

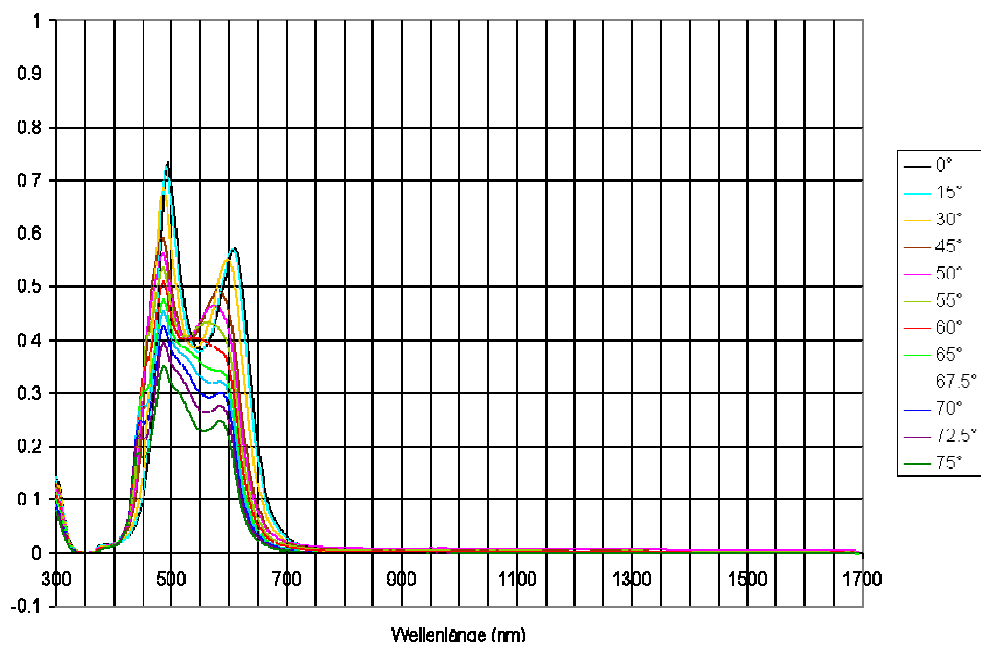


Fig. 2.6: Transmission bei verschiedenen Einfallswinkeln der ersten Beschichtung bei Glas Trösch.

missionsgrad $\tau_v = 0.451$ entsprechen noch nicht den Zielwerten der idealen Transmission. Auch die Farbwerte liegen noch außerhalb der Toleranzgrenzen. Für das Verhältnis des direkten Strahlungstransmissionsgrade τ_e und dem Lichttransmissionsgrad τ_v ergibt sich bei einem Einfallswinkel von 0° der Wert 0.339, was dem idealem Wert von 0.334 [15] sehr nahe kommt. Die Farbwerte erfüllen aber die Anforderung eines neutralen Lichtes in der Transmission noch nicht. Das transmittierte Licht ist stark gelb-grün und geht dann zu einem grün-blau bei zunehmendem Einfallswinkel über. Die Farbkordinaten in Abhängigkeit vom Einfallswinkel sind in der Abbildung 2.7 für Transmission, Reflexion innen und außen dargestellt. In diesem Diagramm sind die Werte a und b des CIE-Lab-Farbraumes für einen fixen L-Wert dargestellt. Die gefüllten Kreise entsprechen der Transmission, die gefüllten Dreiecke der Reflexion an der Glasscheibe und die leeren Dreiecke der Reflexion direkt an der Schichtoberfläche. Der kleinste Einfallswinkel entspricht der violetten Markierung und endet mit der roten Markierung für den größten Einfallswinkel. Aus dieser Darstellung wird auch deutlich, dass die Reflexionsfarbe im Roten liegt, was aus architektonischer Sicht unerwünscht ist.

Diese erste Messung zeigt, dass noch viele weitere Anpassungen der einzelnen Schichtdicken nötig sein werden, bis die ideale Transmission und auch die anderen Bedingungen erfüllt sind. Dies war zu erwarten, nachdem das optische Verhalten einer Schicht immer durch die darunter liegenden Schichten beeinflusst wird. Dies ist der Fall, nach dem die Oberfläche stark von der Dicke der Schicht abhängt, und das Wachstum der folgenden Schicht wiederum von dieser Oberfläche.

Des Weiteren ist die Bestimmung der Rate mit der die Beschichtung erfolgt bei dünnen Schichten immer fehleranfällig, so dass dort ebenfalls große Abweichungen zu den berechneten Werten zu erwarten sind.

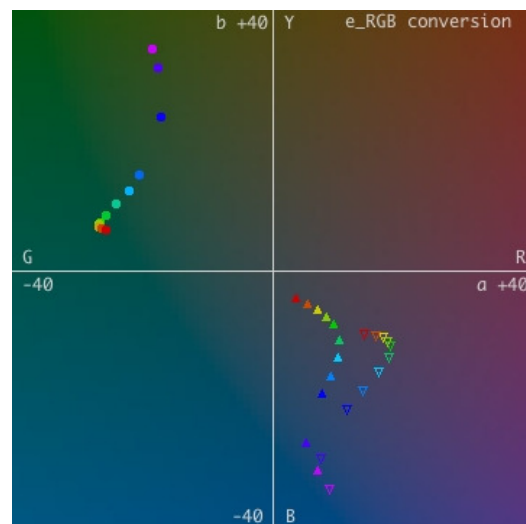


Fig. 2.7: CIE-Lab-Farbraum des transmittierten und reflektierten Lichtes in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.

Referenzen zum Kapitel 1

- [1] D.J. Bergman and D. Stroud: **Physical properties of macroscopically inhomogeneous media**, *Solid State Phys.* 46: 14, 1992
- [2] A.K. Sarychev and V.M. Shalaev: **Electromagnetic field fluctuations and optical nonlinearities in metal-dielectric composites**, *Phys. Rep.* 335: 275, 2000
- [3] L. Pranevichus and S. Tamulevichus: **The physical properties of thin Ag films formed under the simultaneous ion implantation in the substrate**, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 209: 179, 1983

Dieses Verfahren wurde auch von uns angewendet und ist beschrieben in unserem letzten Jahresbericht 2006:
- [4] I. Mack, P. Oelhafen, A. Romanyuk, R. Steiner, **Jahresbericht 2006 – Programm Rationelle Energienutzung in Gebäuden im Auftrag des Bundesamts für Energie, BfE-Projekt Nr. 100761** (2006)
- [5] A. Romanyuk, R. Steiner, V. Thommen, P. Oelhafen, D. Mathys: **Bias-stimulated nucleation of silver prepared by pulsed arc deposition on silicon oxide**, *J. Appl. Phys.* 100: 074904, 2006
- [6] M. Marinov: **Effect of ion bombardement on the initial stages of thin film growth**, *Thin Solid Films* 46: 267, 1977
- [7] A. Romanyuk, R. Steiner, I. Mack, P. Oelhafen, D. Mathys: **Growth of thin silver films on silicon oxide pretreated by low temperature argon plasma**, *Surf. Sci.* 601: 1026, 2007
- [8] G. Rosenfeld, R. Servaty, C. Teichert, B. Poelsema, G. Comsa: **Layer-by-layer growth of Ag on Ag(111) induced by enhanced nucleation: a model study for surfactant-mediated growth**, *Phys. Rev. Lett.* 71: 895, 1993
- [9] L.H.A. van der Vegt, W.J. Huisman, P.B. Howes, E. Vlieg: **The effect of Sb on the nucleation and growth of Ag on Ag(100)**, *Surf. Sci.* 330: 101, 1995
- [10] M. Jiang, Y.-J. Zhao, P.-L. Cao: **Surfactant-mediated layer-by-layer homoepitaxial growth of Cu/In/Cu(100) and Ag/Sb/Ag(111) systems: a theoretical study**, *Phys. Rev. B*, 57: 10054, 1998
- [11] L. Gomez and J. Ferron: **Surfactant effect in heteroepitaxial growth: the Pb-Co/Cu(111) case**, *Phys. Rev. B*, 64: 033409, 2001
- [12] M. Arbab: **The base layer effect on the d.c. conductivity and structure of direct current magnetron sputtered thin films of silver**, *Thin Solid Films* 381: 15, 2001

Projektarbeit im Rahmen von „Schweizer Jugend forscht“

Referenzen zum Kapitel 2

- [13] I. Mack, P. Oelhafen, A. Romanyuk, R. Steiner, **Neue Beschichtungen – Experimentelle Realisation** – Jahresbericht 2006 – Materialien für nachhaltige Technologien in der Energiewandlung und Energieeinsparung – BfE-Projekt Nr. 100761, p. 5-9
- [14] W. Thöni, St. Rögels, Europäische Patentanmeldung **EP 1 424 315 A1**, Patentblatt 2004/23
- [15] P. Oelhafen, **Optimal spectral transmittance of sun protection glasses**, *CISBAT 2005 Proceedings, Lausanne* (2005), p. 37-42

3. Messanlage, Datenauswertung

Verfasser des Kapitels: Georges Reber

3.1 Eine Untersuchung von Innenstoren auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes

Erweiterung des Messverfahrens auf ein zusammengesetztes System $N=3$

Ausgangslage, Messverfahren mit sich ergänzenden solaroptischen und thermischen Messungen an einem zusammengesetzten Element

Zur Bestimmung des solaren Eintrages von Verglasungskonfigurationen dienen uns zwei Messapparaturen, die wir hier im Rahmen des Solarprojektes aufgebaut haben:

- Meßapparatur zur Bestimmung der spektralen und winkelabhängigen optischen Eigenschaften von Isoliergläsern (zur Messmethode siehe [1] oder Jahresbericht 2004 [5]).
- Meßapparatur zur Bestimmung des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrades aus optischen und thermischen Messdaten (zur Messmethode siehe [2] oder Jahresbericht 2005 [6]).

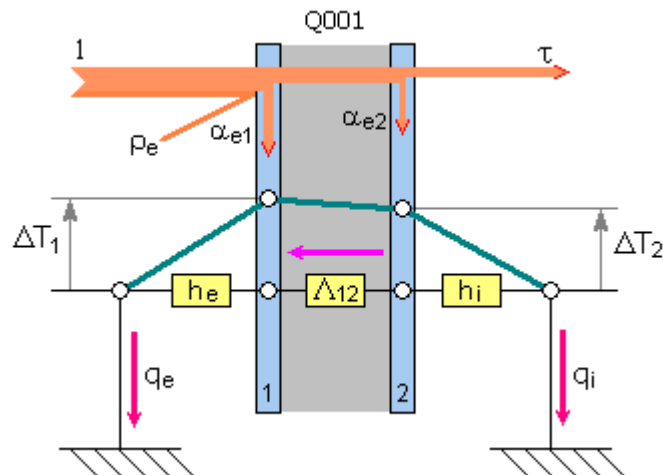
Diese beiden Messapparaturen in ergänzender Weise eingesetzt, liefern den solaren Eintrag unzerlegter Elemente. In [2] wurde diese Vorgehensweise gezeigt an einer Zweifachverglasung (siehe Figur 3.1).

Eine grundlegende Frage beim Mess-Verfahren zur Ermittlung des solaren Eintrages bei unzerlegten Elementen ist diejenige, an die Einzelabsorptionen α_{ei} der Verglasungsbestandteile zu kommen, wie sie in der Setkonfiguration herrschen. Diese Absorptionsgrade sind rein solaroptische Einzahlgrößen und unabhängig von der Temperatur. Die Bestimmung der Norm-Wärmeabgabe q_i bzw. q_e reduziert sich darauf, die Randbedingungen des Experimentes zu ersetzen durch diejenigen, die in den Normen [10] und [11] vorgeschrieben sind und zwar im thermischen Netzwerk, das die vorliegende Konfiguration beschreibt. Zur Bestimmung der α_{ei} ($i = 1, \dots, N$) im Set stehen grundsätzlich zwei Verfahren/Methoden zur Verfügung, die wir im Fall $N=3$ nutzen:

- **Verfahren 1:** Die zerlegende Methode besteht darin, dass man das Element in seine Komponenten zerlegt und sie einzeln solaroptisch charakterisiert etwa nach Methode [1]. Nachträglich berechnet man die Einzelabsorptionen α_{ei} ($i = 1, \dots, N$) im Set gemäss EN410 [10], was bei nicht-grauen Medien bandweise zwischen 300 nm und 2500 nm erfolgen muss mit einem Algorithmus, der die Mehrfachreflexionen korrekt berücksichtigt. Anschliessend muss über alle Bänder des solaren Spektrums $S(\lambda)$ summiert werden.
- **Verfahren 2:** Man geht aus von einer Konfiguration, in der zusammengesetzte Elemente vorkommen und verschafft sich die noch fehlende Information über thermische Messungen: Die Temperaturerhöhungen der einzelnen Komponenten in der Konfiguration unter einer solaren Lampe, liefern vermöge der bekannten Wärmedurchgangswiderstände die dort absorbierten Leistungen. Bei bekannter Gesamtabsorption α_e – etwa aus [1] – folgen daraus die Einzelabsorptionen α_{ei} , wie sie im Set geherrscht haben müssen [2].

Fig. 3.1:

Die Oberflächentemperaturen der äusseren Glasscheiben erwärmen sich unter der solaren Quelle um ΔT_1 bzw. ΔT_2 gegenüber der Umgebung, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Aus dieser Temperaturerhöhung zur Umgebungstemperatur (Erde) lassen sich die Wärmeabgaben nach innen und aussen q_i bzw. q_e bestimmen. Die Aufteilung dieser beiden Flüsse ist genau die Information, die noch benötigt wird zur Bestimmung des totalen Gewinnfaktors g , nachdem τ und die Gesamtabsorption α bekannt sind aus der optischen Messung.



Erweiterung des Messverfahrens auf komplexere Systeme am Beispiel einer 2-fach-Verglasung mit innenliegender hinterlüfteter Store (N=3)

Wir gehen von einer unzerlegten Isolierverglasung **Q001** aus und untersuchen die Wirkung von reflektierenden Innenstoren. Bei dem nur teilweise zerlegten System kommen beide Verfahren 1 und 2 (siehe oben) unter der weitest damit möglichen Einschränkung der freien Parameter zur Anwendung. Hohe Einschränkung ist notwendig, da wir zwischen Verglasung und Store eine Hinterlüftung zulassen (siehe Fig. 3.2), deren Einfluss wir zusätzlich untersuchen. Es handelt sich nun um ein Set von drei Komponenten in Serie mit dem Zusatz zweier thermisch getriebener Senken:

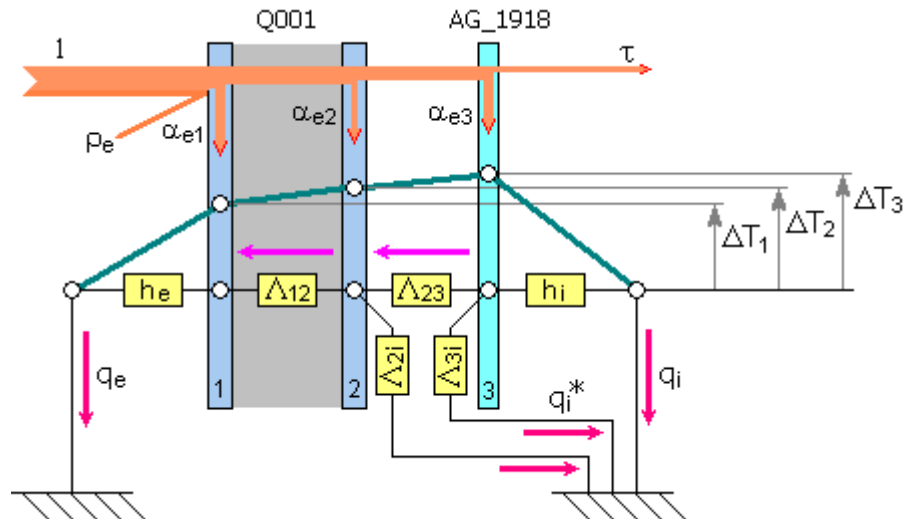


Fig. 3.2: Meßkonfiguration erhöhter Komplexität gegenüber dem in Figur 3.1 dargestellten Fall: Zunächst wird das zusammengesetzte Isolierglas **Q001** ergänzt mit einer Innenstore **AG_1918** zu einem System von drei Komponenten (N=3). Weiter wird der Zwischenraum zwischen Innenglas und Store hinterlüftet ausgeführt, sodaß von dort her ein zusätzlicher sekundärer Wärmeübergang q_i^* an den Innenraum stattfindet, zusätzlich also zu dem wie üblich eingeführten q_i am Rand. Der zusätzliche Beitrag q_i^* wird durch die zwei eingezeichneten konvektiven Widerstände Λ_{2i} und Λ_{3i} modelliert.

Solaroptische Charakterisierung von Isolierglas Q001 mit Innenstore G_1918

Zunächst wird das **Isolierglas Q001** auf der optischen Apparatur zur Charakterisierung ganzer Isoliergläser spektral und winkelabhängig beidseitig gemessen [1]. Somit stehen für das Isolierglas als ganzes beidseitig die optischen Daten zur Verfügung: Der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$, der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ und der spektrale Absorptionsgrad $\alpha(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) - \rho(\lambda)$. Wichtig zur späteren Bestimmung der strahlungsphysikalischen Größen ist dabei insbesondere der Fall senkrechten Einfallswinkels $\Theta = 0^\circ$. In der Figur 3.3 ist der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ aufgetragen und weiter seine Stellung innerhalb heutiger Sonnenschutzgläser charakterisiert.

Drei reflektierende Innenstoren werden betrachtet (siehe Figur 3.4): **Innenstore G_1918** und das **Reflektorblech Aloxyd** wird mit einem Photospektrometer des Institutes im Bereich 250 nm bis 2500 nm beidseitig vermessen, wobei wegen ihrer streuenden Eigenschaften eine integrierende Kugel (Ulbrichtkugel) zum Einsatz kommt. Somit stehen auch für die Innenstoren für senkrechte Einfallrichtung die optischen Daten beidseitig zur Verfügung: Der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$, der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ und der spektrale Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$. Beim Reflexionsgrad wurde auch der Diffusanteil bestimmt. Das Spektrum der dritten Innenstore **Innenstore AG_extern** ist ein hypothetisches Spektrum, das auf Kundenwunsch rechnerisch in seiner Auswirkung auf den Sonnenschutz eingeschätzt werden sollte.

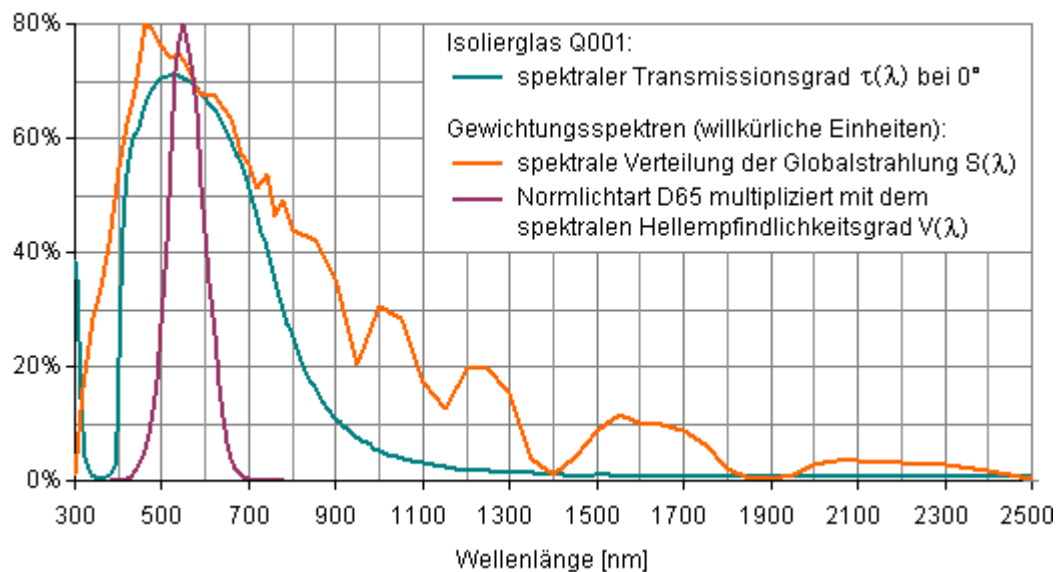


Fig. 3.3: Spektraler Transmissionsgrad des Isolierglases **Q001**. Die IR-Verspiegelung ist am Außenglas angebracht, das Innenglas ist ein Verbundsicherheitsglas Float. Anwendung der Gewichtungsspektren gemäß der Norm EN410 [10] liefert ein $\tau_e = 35.2 \%$ und ein $\tau_v = 69.0 \%$. Die sekundäre Wärmeabgabe wurde mit unserem g-Wert-Experiment nach [2] bestimmt und beträgt $q_i = 7.7\%$. Somit beträgt der Gesamtenergiedurchlaßgrad $g = 42.9 \%$. Die **Selektivität** beträgt schließlich $\tau_e/\tau_v = 0.51$. Die Form des Transmissionsspektrums zeigt, wo die Innenstore bevorzugt reflektieren muß, denn mit einer effizienten Rückreflexion wird zusätzlich auch eine ungünstige Erwärmung der Komponenten vermieden.

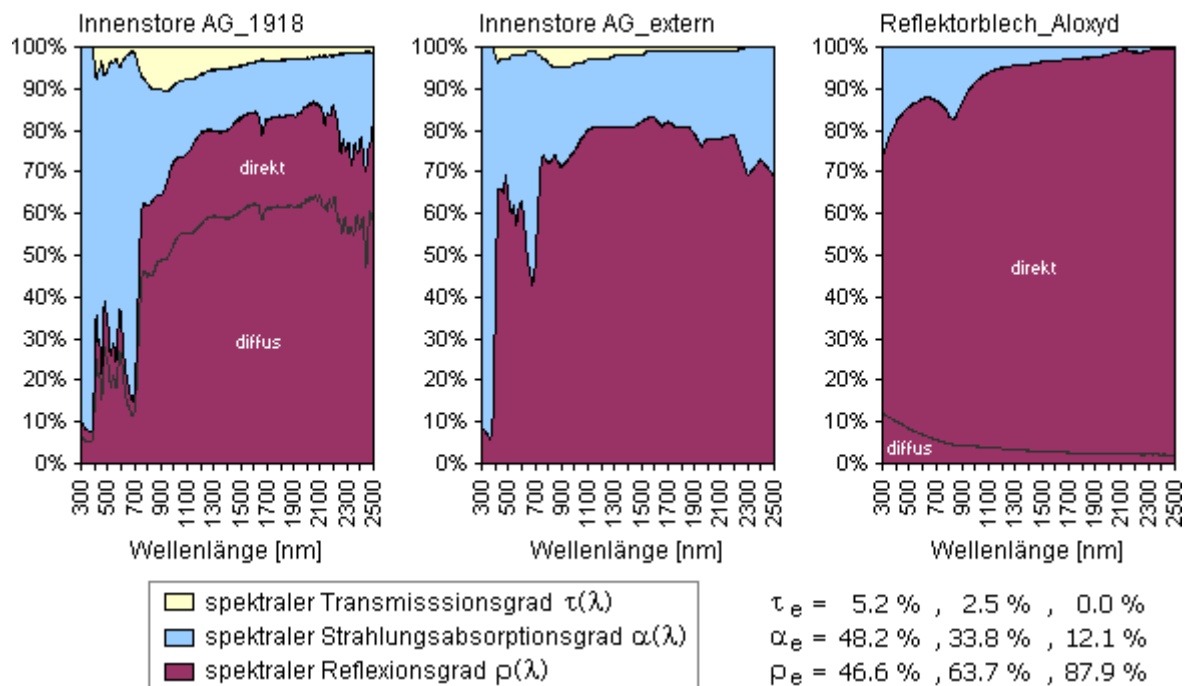


Fig. 3.4: Spektrale optische Größen dreier betrachteter reflektierender Innenstoren in Richtung der von außen auftreffenden Strahlung. Die Innenstore **G_1918** und das **Reflektorblech_Aloxyd** wurden mit einem Photospektrometer des Institutes vermessen, wobei wegen ihrer streuenden Eigenschaften eine integrierende Kugel (Ulbrichtkugel) zum Einsatz kommt. Die Innenstore **AG_extern** ist ein externes Spektrum, das auf Kundenwunsch eingesetzt wurde. Die Spektren sind geordnet nach ansteigendem solaren Reflexionsgrad und betragen $\rho_e = 46.6 \%$, 63.7% sowie 87.9% .

Zur Charakterisierung des **Isolierglases Q001 im Verbund mit den reflektierenden Innenstoren** kommt man einen ersten Schritt weiter, indem man die äusseren optischen Daten von Q001 und jene der einzelnen Zusatzkomponente formal behandelt wie ein 2-faches System und die dafür zuständigen bandweisen Faltungsregeln der EN410 [10] darauf anwendet. Dies Vorgehen liefert mathematisch korrekt folgende Grössen des Gesamtsystems: Grade der Transmission, Reflexion und Absorption τ_e , ρ_e , α_e . Weiter liefert dieses Vorgehen den Einzelabsorptionsgrad α_{e3} der Store im Verbund. Es folgt auch $(\alpha_{e1} + \alpha_{e2}) = \alpha_e - \alpha_{e3}$, wobei jetzt also nur die Summe $(\alpha_{e1} + \alpha_{e2})$ von Glas1 und Glas2 vorliegt, nicht aber ihre Aufteilung. Die solaroptischen Auswertungsschritte sind damit ausgereizt, die dadurch maximal mögliche Einschränkung der optischen Daten ist erreicht. Nun kommt also abschliessend das solar-thermische Experiment zum Zuge.

Solarthermische Vermessung des Isolierglases Q001 im Verbund mit Innenstore G_1918

Wie oben gezeigt, können die Absorptionsgrade α_e , α_{e3} und $(\alpha_{e1} + \alpha_{e2})$ des Gesamtsystems (siehe etwa Figur 3.2) aus rein solaroptischen Messungen an den Komponenten und anschliessenden spektralen Rechnungen bestimmt werden. Im thermischen Experiment messen wir unter Einstrahlung der Solarlampe die drei Temperaturerhöhungen ΔT_1 , ΔT_2 und ΔT_3 . Unter der Nebenbedingung eines bekannten Gesamtabsorptionsgrades α_e , besitzt das Gleichungssystem für das Wärmestromnetz in den drei einzelnen Absorptionsgraden α_{e1} , α_{e2} und α_{e3} eine eindeutige Lösung. (Es können drei Bilanzgleichungen an den drei Komponentenknöten formuliert werden).

Für die Bestimmung dieser Einzelabsorptionen ist also wesentlich, dass jene Wärmetransportwiderstände modelliert werden, die im Experiment tatsächlich herrschen. Bezüglich der korrekten Modellierung muss die Aufmerksamkeit speziell auf die beiden zur Beschreibung der Hinterlüftung eingeführten konvektiven Widerstände Λ_{2i} und Λ_{3i} gerichtet werden. Sie erhöhen die sekundäre Wärmeabgabe an den Innenraum gegenüber dem Fall eines geschlossenen Kastens, bei dem nur die raumseitige Storenoberfläche dazu einen Beitrag leistet.

Zu Vergleichszwecken müssen die g-Werte für Randbedingungen angegeben werden, die in den Normen EN410 und EN673 [10, 11] vorgeschrieben sind. Die Umrechnung von den Bedingungen im Experiment auf Normbedingungen erfolgt leicht: Zunächst sind die im Experiment ermittelten solaroptischen Einzahlgrossen (α_{ei} , τ_e , ρ_e) grundsätzlich unabhängig von der Temperatur. Der hingegen möglichen Temperaturabhängigkeit von Wärmewiderständen im thermischen Netzwerk wird auf iterative Weise Folge geleistet: Die Temperaturniveaus werden rechnerisch so bestimmt, dass die Bilanzen an den N Komponentenknöten aufgehen. Anschliessend werden mit diesen Temperaturen die temperaturabhängigen Wärmewiderstände korrigiert. Die korrigierten Wärmewiderstände sind die Basis für einen weiteren Iterationsschritt. Die Konvergenz erfolgt rasch.

Resultate Sonnenschutzwirkung, Praxistauglichkeit, Funktionsprinzip

Der Raum hinter einem Fenster wirkt physikalisch als ein schwarzer Kasten. Das heisst, der durch den g-Wert beschriebene Eintrag wird im Raum vollständig in Wärme umgewandelt. Mit einer innenliegenden reflektierenden Store wird dieser Eintrag unmittelbar hinter dem Glas abgefangen, bevor er im Raum wirksam werden kann.

Mit dieser Methode leiden zunächst die **visuellen Eigenschaften**: Der tiefe visuelle Transmissionsgrad τ_v unterbindet die **Tageslichtnutzung** und der hohe visuelle Reflexionsgrad ρ_v nach aussen kann **architektonisch** unerwünscht sein (siehe dazu Tabelle 3.1).

Weiter können im System auftretende **hohe Temperaturen** zu einem Problem werden, je nach Effizienz der Rückreflexion, bei der ja zugleich auch hohe Absorptionen in den Teilkomponenten vermieden werden müssen, die sich faltungsbedingt bei schlecht aufeinander abgestimmten Spektren ergeben können. Die auftretenden Temperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 25° C und einer solaren Einstrahlung von 500 W/m² sind in Tabelle 3.1 aufgetragen:

Die Figur 3.5 zeigt zunächst den Gesamtenergiedurchlassgrad g, den man mit den drei Storen erzielt. Der Betrag des Reflexionsgrades (Figur 3.4) spielt eine Rolle, aber auch die Abstimmung des spektralen Reflexionsgrades $\rho(\lambda)$ auf den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ des Isolierglases Q001 (Figur 3.3):

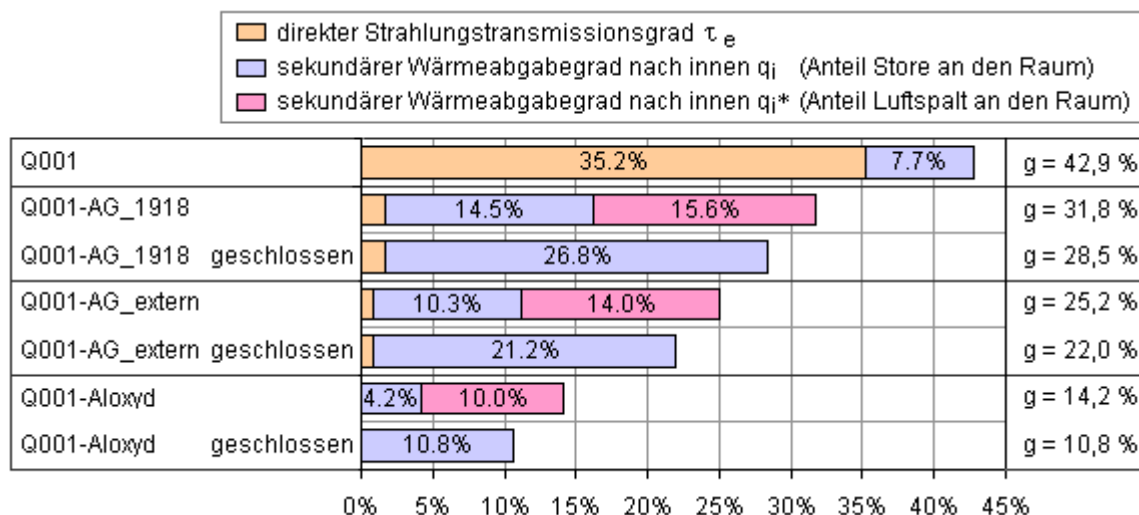


Fig. 3.5: Gesamtenergiedurchlaßgrad g , der zustande kommt, wenn das Sonnenschutzglas **Q001** aus Figur 3.3 mit den drei in Figur 3.4 dargestellten Innenstoren konfiguriert wird. Mit der Store **AG_1918** kommt der angestrebte g -Wert um 20 % bei weitem nicht zustande, weil diese Store reflektiert unzureichend im entscheidenden Bereich zwischen 300-700 nm. Die Innenstore **AG_extern** kann dies schon besser, jedoch kommt man erst in der Konfiguration des geschlossenen Kastens in die Nähe von g um 20 %. Der Fall **Aloxyd** kommt als hochwertiger Spiegel nahe an das physikalische Optimum.

Für die Praxistauglichkeit spielt auch eine Rolle, zu welchem Preis man diese Sonnenschutzwirkung erzielt, siehe dazu Tabelle 3.1 (**Tageslichtnutzung** τ_v) und die Figur 3.6 zu den auftretenden **Temperaturen**. Ausserdem stellt sich die Frage, ob eine **Langzeitstabilität** des geforderten hohen Reflexionsvermögens der Storen überhaupt gewährleistet ist? [Randbedingungen: $T_e = T_i = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S = 500 \text{ W/m}^2$, Abstand Glas-Store: $d = 85 \text{ mm}$].

Konfiguration	τ_v	ρ_v	ρ_e	α_e	Glas 1	Glas 2	Store
Q001	69.0 %	12.6 %	29.7 %	35.1 %	31.0°	29.8°	-
Q001-AG_1918	2.8 %	61%	36.2 %	62.2 %	32.0°	33.4°	34.5°
Q001-AG_1918 geschlossen	2.8 %	61%	36.2 %	62.2 %	32.7°	45.6°	42.6°
Q001-AG_extern	1.5 %	41.4 %	40.6 %	58.5 %	32.4°	34.6°	31.8°
Q001-AG_extern geschlossen	1.5 %	41.4 %	40.6 %	58.5 %	33.1°	46.3°	38.9°
Q001-Aloxyd	0.0 %	59.4 %	49.7 %	50.3 %	32.8°	33.4°	29.0°
Q001-Aloxyd geschlossen	0.0 %	59.4 %	49.7 %	50.3 %	33.6°	45.7°	35.5°

Tab. 3.1: Visuelle Eigenschaften τ_v und ρ_v . Die Grössen ρ_e und α_e geben an, zu welchem Anteil der solare Eintrag vom Element reflektiert wird bzw. im Element absorbiert wird. Diese beiden Grössen haben direkt einen Einfluss auf die auftretenden Temperaturen, wobei diese im hinterlüfteten Fall abgesenkt werden, welche Energie aber als unerwünschter Eintrag im Raum landet. Im abgeschlossenen Fall erwärmt sich das Element soweit, bis es die absorbierte Energie los wird über eine Erhöhung des Temperaturgefälles zu seiner Umgebung, wobei der direkte konvektive Weg nach innen unterbunden ist. Die Temperaturen sind in Figur 3.6 nochmals grafisch dargestellt.

[Randbedingungen: $T_e = T_i = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S = 500 \text{ W/m}^2$, Abstand Glas-Store: $d = 85 \text{ mm}$].

Schliesslich wird in der Figur 3.6 der **Temperaturverlauf** (siehe auch Tabelle 3.1) grafisch aufgetragen, was zwei interessante Effekte deutlich macht: Eine Auffächerung bedingt durch die Hinterlüftung und eine zweite Auffächerung an den Innenstoren bedingt durch die unterschiedliche Effizienz bezüglich des Reflexionsgrades dieser Innenstoren:

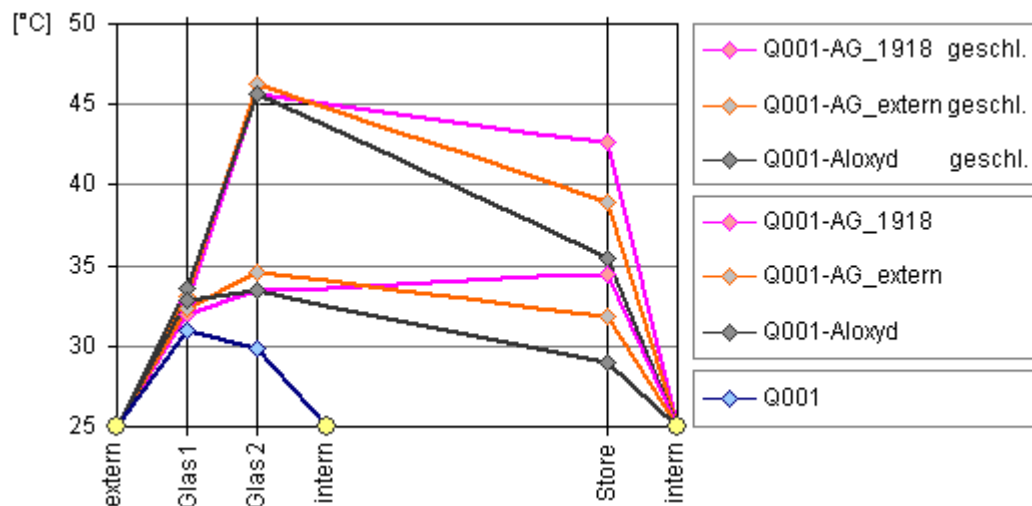


Fig. 3.6: Beim Temperaturverlauf kann man grundsätzlich unterscheiden zwischen dem Fall mit Hinterlüftung und demjenigen eines geschlossenen Kastens, bei welchem die Temperaturen nochmals deutlich erhöht werden. Eine Auffächerung der Temperaturen aufgrund der unterschiedlichen Storen findet hauptsächlich in der Store statt: Je besser die Store reflektiert, desto geringer die dortige Erwärmung. Am Glas 2 ist diese storenbedingte Auffächerung weit geringer, weil dort im Set ein ähnlicher Absorptionsgrad α_{e2} zustande kommt. Man vergleiche auch die Temperaturen des Glases Q001 in Konfiguration ohne Store. [Randbedingungen: $T_e = T_i = 25\text{ °C}$, $h_e = 23\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_i = 8\text{ W/m}^2\text{K}$, $S = 500\text{ W/m}^2$, Abstand Glas-Store: $d = 85\text{ mm}$].

Diskussion des Modelles und des Auswertungsverfahrens

Das thermische Modell (Figur 3.2) mit seinen Wärmewiderständen kann überprüft werden anhand der rein solaroptisch gewonnenen Nebenbedingungen α_e , α_{e3} und $(\alpha_{e1} + \alpha_{e2}) = \alpha_e - \alpha_{e3}$. Es ergab sich hier i.a. eine gute Übereinstimmung. Und zwar bewährt sich zur Beschreibung der Hinterlüftung zwischen Innenglas und Store auch hier das bekannte Modell für Plattenströmung $Nu = 0.55 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25}$ unter geeigneter Anpassung der kennzeichnenden geometrischen Abmessung in der Ähnlichkeitstheorie [9]. Damit wird also dieser Kurzschluss zur Raumseite hin beschrieben, dessen Beitrag der sekundären Wärmeabgabe q_i zugeschlagen werden muss.

Die erwähnten Nebenbedingungen $(\alpha_{e1} + \alpha_{e2})$ bzw. $\alpha_{e3} = \alpha_e - (\alpha_{e1} + \alpha_{e2})$ erlauben es weiter auch, eventuelle Fehlerquellen zu eruieren. Solche Fehlerquellen sind immer Verluste. Sie erfolgen aus der Strahlachse radial nach aussen, wobei hier prinzipiell möglich sind: Verluste im Aussen- bzw. Innenglas durch Wärmetransport oder Verluste durch die streuende Reflexion der reflektierenden Innenstore über divergierende Strahlungsbündel. Eine rechnerische Quantifizierung oder experimentelle Eingrenzung wäre hilfreich, das konvektive Modell noch zu verfeinern.

Um solche Fehler einzugrenzen, wurde unter verschiedenen Abständen d zwischen Glas und Store gemessen, sowie auch mit Storen unterschiedlicher spektralen Eigenschaften gemessen. Die beobachteten Effekte gehen in die erwartete Richtung. Da Verluste immer zu einer niedrigeren Gleichgewichtstemperatur einer Komponente (Glas1, Glas2 und ferner Store) führen, werden dort niedrigere Absorptionsgrade vorgetäuscht. Niedrige Absorptionsgrade in dem raumnahen Glas2 oder der Store haben eine Unterschätzung des g -Wertes zur Folge. D.h., sofern solche Fehler sich bemerkbar machen sollten, stellen die ermittelten g -Werte eine untere Schranke dar.

Ergänzende Überprüfungen mit dem zerlegenden rechnerischen "Verfahren 1", in denen gleich alle α_{ei} ($i = 1, \dots, 3$) festgelegt werden, ergaben im Rahmen der Unsicherheiten (Produkteserie, Streueffekte im Experiment) konsistente Resultate. [Bei der Store AG_extern war diese Vorgehensweise zwingend, da sie nur als Datei und nicht als Messprobe zur Verfügung stand; die zerlegte Anordnung hier: Q005 – Q008 – AG_extern].

Eine untere Schranke für den g -Wert als verlässlicher Wert kann auch durch eine Rechnung geschlossener Kammer erfolgen, wobei der oben erwähnte Kurzschluss des Storen-Zwischenraums zur Raumseite hin programmtechnisch leicht unterbunden werden kann.

3.2 Winkelabhängige Messungen an Stapeln von Floatgläsern und ihre Modellierung mit monolithischem Substrat-Modell zur Überprüfung der Messmethode und der zeitlichen Stabilität der Messung

Experimentelle Bestimmung der optischen Konstanten n und k von Floatglas als Modellparameter

Zielsetzung, Auswahl der Messprobe, Konzept Eichprobe

Diese Arbeit dient der Überprüfung unserer Meßapparatur [1] durch Vergleich der Messungen mit einer Messprobe, die präzise mit einer physikalischen Theorie beschrieben werden kann.

Folgende Auswahlkriterien waren wichtig:

- Monolithische Struktur, deren Optik sich mit bekannten physikalischen Grundgesetzen beschreiben lässt. Umfassende Modellierbarkeit bei allen Einfallswinkeln im gesamten Frequenzbereich mit einem Minimum an Modellparametern. Material und Geometrie so, dass nicht zu Näherungslösungen gegriffen werden muss, wie sie bei Streuung, Interferenzeffekten etc. rasch notwendig werden. Das Material muss so eine Dicke weit oberhalb der Wellenlänge der Lichtquelle aufweisen. Auch Beschichtungen sind – von diesem Kriterium der einfachen zudem genauen Modellierbarkeit herkommend – ausgeschlossen.
- Die minimale Zahl der Modellparameter ist bei monolithischem Material gegeben und liegt bei zwei, nämlich n und k . Die Grösse n beschreibt die Grenzflächenreflexion, die Grösse k die interne Extinktion, beide Grössen sind winkelunabhängig. An einer unzerlegten Messprobe lassen sich extern genau zwei unabhängige Messungen durchführen (Reflexion ρ und Transmission τ). Somit können mit unserer Apparatur [1] durch zwei zerstörungsfreie Messungen beide Modellparameter n und k festgelegt werden. Diese Vorgehensweise gilt bei Materialien schwacher Absorption [3].
- Zeitlich stabiles Material, das keiner Veränderung der Materialparameter unterliegt, sodass messbare Alterungseffekte ausgeschlossen werden können. Auch diese Anforderung schliesst Beschichtungen praktisch aus.
- Gebräuchliches Material, für das Literaturdaten existieren. Bei Glas ist der Brechindex $n(\lambda)$ sehr genau bekannt und zudem kaum abhängig von der Extinktion. Dies eröffnet die Möglichkeit, den fehlenden Modellparameter $k(\lambda)$ durch eine einzige Messung (vorzugsweise der Transmission T) festzulegen. Solche Einschränkungen im Parameterbereich erlauben es auch abzuschätzen, ob die Vernachlässigung von Streuung im Modell eine gute Approximation ist. Vernachlässigbare Streuung geht einher mit einem richtungserhaltenden Strahlengang. Und ein richtungserhaltendes Material ist ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium, weil es erlaubt, die Richtungssensitivität der Messmethode zu testen.
- Die Messprobe soll optisch winkeltreu, d.h. richtungserhaltend funktionieren, um auch die Winkelsensitivität der Messmethode prüfen zu können.
- Mit den monolithischen Komponenten ergibt sich eine Abfolge von planparallelen Grenzflächen, deren Abstand gross gegenüber der Wellenlänge gewählt werden soll, sodass von der Kohärenzlänge her Phasen in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden müssen. Verbleibende Interferenzeffekte lassen auf Inhomogenitäten infolge des Herstellungsprozesses schliessen.
- Die beiden Messgrössen Transmission und Reflexion sollen in einem Wertebereich liegen, in dem eine hohe relative Messgenauigkeit möglich ist. Zum einen kann ein ausreichend hohes Reflexionsvermögen im Bereich geringer Winkelsensitivität (d.h. bei steilen Einfallswinkeln nahe 0°) durch einen Stapel von monolithischen Komponenten erzielt werden, ohne auf reflektierende Beschichtungen zurückgreifen zu müssen. Zum anderen kann auch das Transmissionsvermögen durch Erhöhung der Stapelanzahl gesteuert werden unter Beibehaltung eines Materials schwacher Absorption.

Physikalisches Modell: Fresnel-Theorie angewandt auf Stapel monolithischer Platten

Die optischen Eigenschaften einer Probe aus einem monolithischen Substrat schwacher Absorption werden vollständig beschrieben durch die zwei Materialparameter n und k [3]:

Der Realteil des Brechindex n einerseits beschreibt die Grenzflächenreflexion R_s bzw. $T_s = 1 - R_s$ (siehe Figur 3.7) über die **Fresnel-Formeln**, die in zwei Polarisationsrichtungen formuliert sind. (Die Stetigkeitsbedingungen von Transversalwellen an Grenzflächen unterscheiden grundsätzlich zwischen paralleler p und senkrechter s Komponente!).

Der Extinktionskoeffizient k andererseits beschreibt die exponentiell mit der Weglänge abnehmende interne Transmission t_s über das **Beer'sche Gesetz**, wobei die Ausbreitungsrichtung im Material durch das **Snell'sche Gesetz** gegeben ist.

Für die erwähnten internen Größen gelten also die soeben erwähnten bekannten und elementaren Gesetze mit ihrer hohen Genauigkeit. Sie müssen nun noch in Beziehung gesetzt werden zu den von aussen zugänglichen Messgrößen, dem Reflexionsgrad ρ sowie dem Transmissionsgrad τ .

Fig. 3.7:

Monolithische Scheibe mit den Materialwerten n und k , eingetragen darin sind:

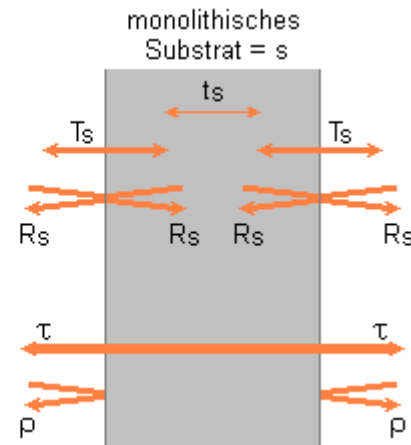
Oben die **Elementarprozesse** und zugehörigen **internen Größen**, wie sie zunächst in der physikalischen Theorie erscheinen ($R_s = 1 - T_s$ sowie t_s).

Unten sind die **externen Meßgrößen**, die einer Meßapparatur, die von aussen mißt, zugänglich sind, aufgetragen (ρ , τ).

Es gibt einen umkehrbar eindeutigen Zusammenhang zwischen den internen und externen Größen ρ und τ und damit auch zu den Materialgrößen n und k .

Interne Größen, für die insbesondere die Fresnel-Theorie zuständig ist.

Externe Größen, wie wir sie mit unserer Messapparatur [1] messen.



Dazu ist notwendig, die **Mehrfachreflexionen** korrekt zu erfassen, welche schon bei einer einfachen Platte auftreten (zwei Grenzflächen). In den Ausdrücken zur Berechnung von ρ und τ treten neben den beiden Grenzflächen (charakterisiert durch R_s bzw. $T_s = 1 - R_s$) auch die interne Transmission t_s auf. Die Ausdrücke sind recht simpel, doch erfordert noch die korrekte Erfassung der **Polarisation** besondere Aufmerksamkeit: Bei nicht senkrechter Einstrahlrichtung der Quelle unterscheiden die Fresnelformeln zwischen paralleler p und senkrechter s Komponente des einfallenden Strahlungsvektors. Es genügt aber, zwei in p bzw. s (vollständig!) getrennte Rechengänge durchzuführen, weil:

- Es gilt **Richtungserhaltung** für die p - und s -Richtung: Die beiden Hauptrichtungen behalten ihre Polarisationsrichtung beim ganzen Durchgang durch alle Komponenten bei, da bei planparallelen und zudem vom Material her isotropen und nichtchiralen Scheiben kein Übertritt stattfinden kann.
- Das **Superpositionsprinzip** erlaubt es, schon die Quelle zu zerlegen in die beiden Komponenten p und s . Bei unpolarisierter einfallender Strahlung liegen alle Richtungen isotrop vor und damit sind ihre auf die beiden Hauptrichtungen projizierten Komponenten im zeitlichen Mittel gleich gross. Die korrekte Summation im Falle unpolarisierter einfallender Strahlung berücksichtigt somit beide Wege zu je 50%.

Die Strahlung nach dem Durchgang ist selbstverständlich polarisiert und die beiden getrennten Rechenwege liefern je den Wert der beiden Polarisationsrichtungen, die beim Detektor auftreffen. Es muss aber eine Gewichtung erfolgen, welche der Polarisation der Quelle entspricht – beispielsweise im häufigen Fall unpolarisierte Quelle 50%:50%. Und nur dieses Vorgehen mit gesonderter Rechnung beider Polarisationswege liefert Übereinstimmung mit dem Experiment!

Bei der Erweiterung einer einzelnen monolithischen Scheibe ($N=1$) zu ganzen Stapeln planparalleler Scheiben können die soeben aufgeführten Regeln sinngemäss übernommen werden zur korrekten Berücksichtigung der **Polarisation**: Es reichen zwei getrennte Rechenwege über p und s aus, **aber** die beiden Hauptrichtungen müssen restlos bis zur letzten Scheibe getrennt berechnet werden, bevor aufsummiert wird gemäss der auf der Quellseite vorliegenden Polarisation.

Auf jeder der beiden Hauptrichtungen werden die Grenzflächenreflexionen durch die zuständige Fresnelformel korrekt erfasst. Es geht also noch darum, auf beiden Wegen die **Mehrfachreflexionen** vollständig zu erfassen. Dies erfolgt durch schrittweise Erweiterung der Grundkomponenten zur **Gesamtstruktur**: Es werden iterativ weiter einzelne Scheiben hinzugefügt, das jeweilige Zwischenresultat der erweiterten Struktur berechnet, bis man bei der gewünschten Scheibenzahl n angelangt ist mit τ_N und ρ_N als Endresultat [8].

Damit kann jetzt ein umkehrbar eindeutiger Zusammenhang hergestellt werden zwischen den **Materialdaten** n und k und den **externen Messgrössen** τ_N und ρ_N , wie dies vom geschilderten formalen Ablauf her in Tabelle 3.2 dargestellt ist. Experimentell wird dieser Zusammenhang belegt durch unsere Messungen in den Figuren 3.8 ($\lambda = 1000 \text{ nm}$) und Figuren 3.9 ($\lambda = 580 \text{ nm}$), wo die Messwerte von drei verschiedenen Stapel-Anordnungen $N=1$, $N=2$ und $N=5$ **simultan** mit einem einzigen Satz von n und k als Modellparameter wiedergegeben werden in Abhängigkeit des Einfallswinkels Θ .

	Externe optische Eigenschaften		Interne optische Eigenschaften	Materialdaten optische Konstanten
Reflexion	ρ_N	\longleftrightarrow	ρ	$R_s, T_s = 1 - R_s$
Transmission	τ_N	\longleftrightarrow	τ	t_s
Strukturebene	Stapel von N monolithischen Floatgläsern		einzelnes monolithisches Floatglas ($N=1$)	Monolithisches Floatglas der Dicke d
				n reeller Brechindex k Extinktionskoeffizient intrinsische Glaseigenschaft

Tab. 3.2: Die Messung der beiden unabhängigen äusseren Messgrössen τ_N und ρ_N am Stapel von N identischen planparallelen Scheiben legt die beiden Materialkonstanten n und k eindeutig fest und umgekehrt. Dies folgt aus den mathematischen Abbildungseigenschaften, die zwischen den dargestellten Strukturebenen gelten und deren folgerichtigen Verknüpfung zur Beschreibung der Gesamtstruktur. Das Schema ist ferner bei Winkeln $\Theta \neq 0^\circ$ so zu interpretieren, dass zwei getrennte Rechenwege über die Polarisationsrichtungen p und s ausgeführt werden müssen, bevor gemäss den Polarisationsanteilen der Quelle aufsummiert wird.

In der Figur 3.10 wird am Fall $N=5$ (Quelle unpolarisiert) noch gezeigt, wie stark ein unpolarisierter Strahl auf der Detektorseite aufgefächert wird in die beiden Polarisationsrichtungen s und p . Dies ereilt sowohl einen Strahl, der durch die Probe tritt (Transmissionsgrad τ_N), als auch einen solchen, der an der Probe reflektiert wird (Reflexionsgrad ρ_N). Ausgehend vom Winkel $\Theta=0^\circ$ wird die maximale Auffächerung beim so genannten Brewster-Winkel: $\Theta = \arctan \{n\} \cong \arctan \{1.53\} \cong 56.8^\circ$ erreicht.

Ebenfalls eingetragen sind in Figur 3.10 die Absorptionsgrade α_i ($i = 1, \dots, 5$) in gestapelter Form. Sie zeigen, dass die Absorption schwach ist, und somit hier die Voraussetzung für die Anwendung der Theorie in einer Form, in der die Grenzflächenreflexion nur vom Realteil von n abhängt, erfüllt ist.

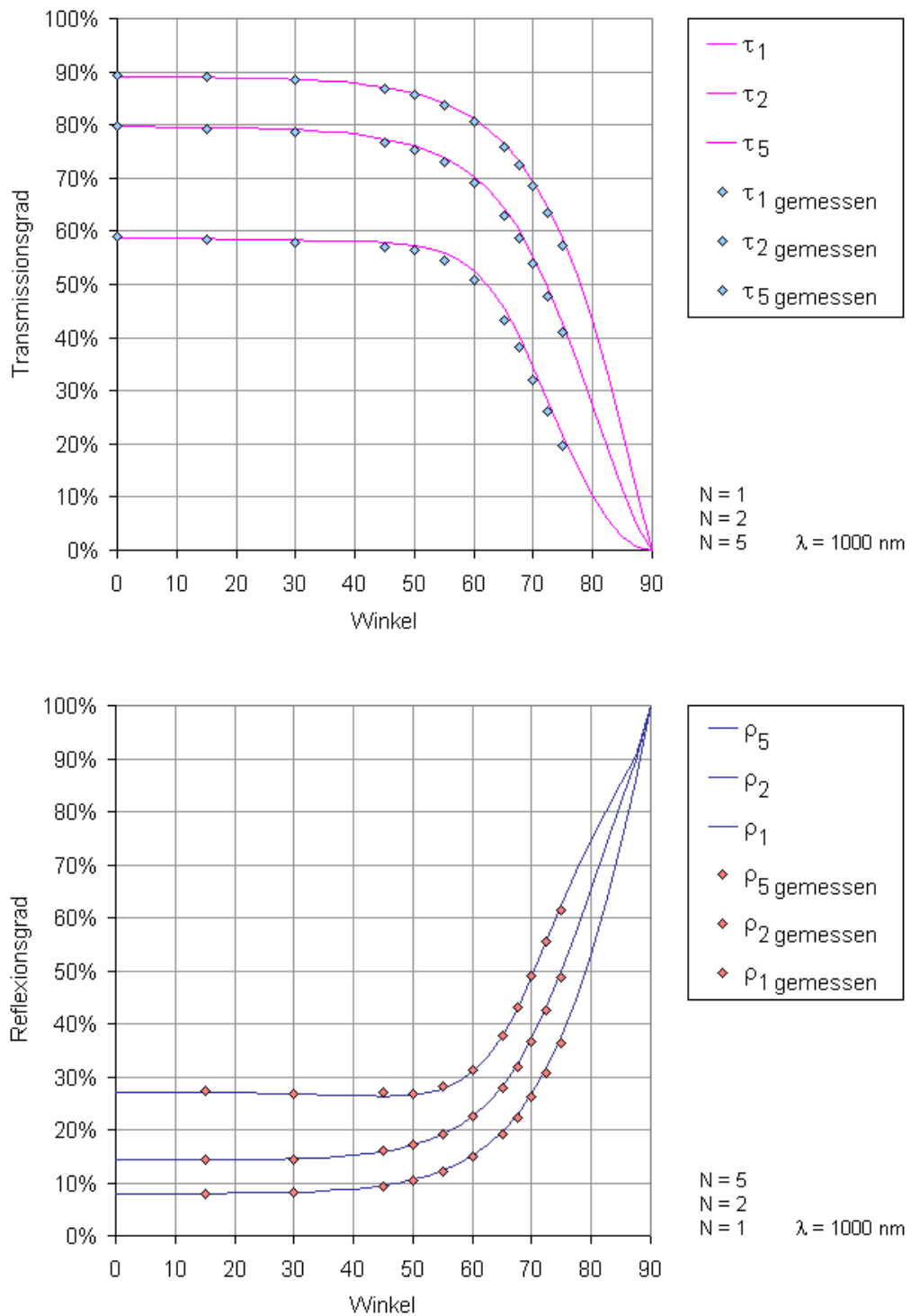


Fig. 3.8: Messung und Theorie bei einer unpolarisierten Quelle und einer Wellenlänge von 1000 nm in Abhängigkeit des Einfallswinkels. Dargestellt sind τ_N und ρ_N auf der Detektorseite für die drei Stapel identischer planparalleler Scheiben mit $N = 1, 2$ und 5. Zur simultanen Modellierung aller drei Anordnungen genügt ein einziger Satz von n und k , der bestimmt wurde durch einen quadratischen Fit an die Messungen bei 0° und 15° .

[Floatglas extraweiss, Lieferung M011-M015, Glasdicke je $d = 4 \text{ mm}$].

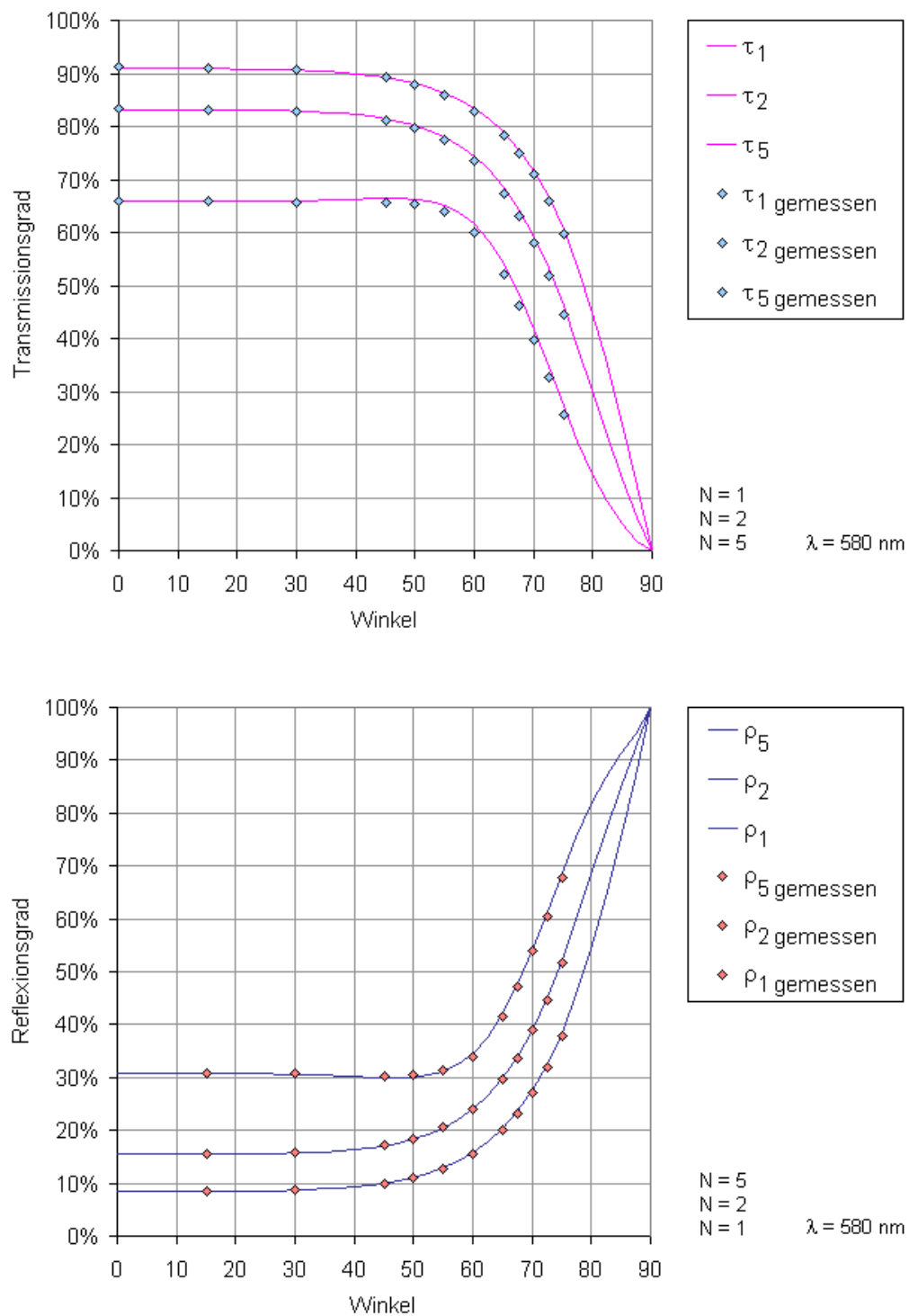


Fig. 3.9: Messung und Theorie bei einer unpolarisierten Quelle und einer Wellenlänge von 580 nm in Abhängigkeit des Einfallswinkels. Dargestellt sind τ_N und ρ_N auf der Detektorseite für die drei Stapel identischer planparalleler Scheiben mit $N = 1, 2$ und 5. Zur simultanen Modellierung aller drei Anordnungen genügt ein einziger Satz von n und k , der bestimmt wurde durch einen quadratischen Fit an die Messungen bei 0° und 15° .

[Floatglas extraweiss, Lieferung M011-M015, Glasdicke je $d = 4 \text{ mm}$].

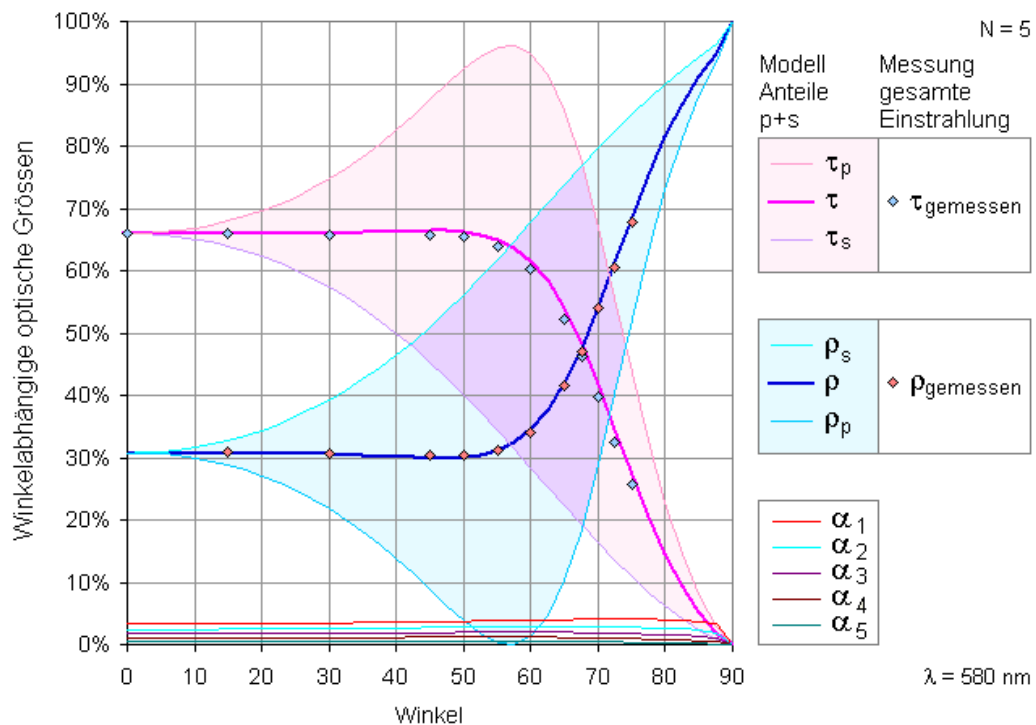


Fig. 3.10: Messung und Theorie bei einer unpolarisierten Quelle und einer Wellenlänge von 580 nm für einen Stapel von $N=5$ identischen planparallelen Scheiben.

Dargestellt sind der Transmissionsgrad τ_N und der Reflexionsgrad ρ_N auf der Detektorseite und hier speziell noch je ihre s- bzw. p-Polarisation, die wir in einem weiteren Schritt messen wollen. Die Absorptionsgrade α_i ($i = 1, \dots, 5$) sind gestapelt aufgetragen und zeigen, dass die Absorption schwach ist. Und somit ist hier die Voraussetzung für die Anwendung der Theorie in einer Form, in der die Grenzflächenreflexion nur vom Realteil von n abhängt, erfüllt.

[Floatglas extraweiss, Lieferung M011-M015, Glasdicke je $d = 4 \text{ mm}$].

Fazit und Ausblick

Das Modell ergibt eine sehr konsistente Prognose der Messwerte für das winkelabhängige Verhalten von Transmissions- und Reflexionsgrad. Unterschiedliche Stapel können simultan, d.h. mit denselben Modellparametern n und k beschrieben werden, was ein weiterer Gütetest für die hier dargestellte Vorgehensweise und schliesslich für das korrekte Arbeiten der Messapparatur darstellt. Geringfügige systematische Abweichungen, die mit dem Winkel oder der Schichtzahl skalieren, können dazu benutzt werden, Streueffekte zu eruieren, seien es solche in der Messapparatur oder solche in der Messprobe selbst.

Die durch Fit ermittelten Modellparameter n und k liegen in allen Wellenlängenbereichen im Bereich von den aus der Literatur bekannten Werten [4]. Der Wert für n lag im gesamten Messbereich 300-1700 nm etwa 0.5% über dem Wert, den diese Quelle [4] als für alle Floatgläser geltend angibt. Die Werte von k sind stark abhängig vom Glas; die gemessenen Werte können problemlos eingeordnet werden in den Wertebereich, der dort möglich ist.

Es kann hier noch erwähnt werden, dass wir dieses Vorgehen der korrekten Erfassung von Polarisation und Mehrfachreflexion schon in unserem Jahresbericht 2002 [7] angewandt haben. Es hat sich schon damals gezeigt, dass wir auf dem richtigen Weg sind bei der damaligen Messung eines Floatglases in Anordnung $N=1$ (zwei Grenzflächen) und $N=2$ (4 Grenzflächen). Es gelang schon damals die simultane Simulation mit einem einzigen Satz n und k für beide Anordnungen. In diesem Jahr haben wir die Methode konsequent verfeinert und sind bei $N=5$ (10 Grenzflächen) angelangt, welche Vorgehensweise die beschriebenen Vorteile bietet als Eichprobe zu dienen.

Referenzen zum Kapitel 3

- [1] R. Steiner, P. Oelhafen, G. Reber and A. Romanyuk, **Experimental determination of spectral and angular dependent optical properties of insulating glasses**, CISBAT 2005, Proceedings, EPFL 2005, p. 441
- [2] G. Reber, R. Steiner, P. Oelhafen and A. Romanyuk, **Angular dependent solar gain for insulating glasses from experimental optical and thermal data**, CISBAT 2005, Proceedings, EPFL 2005, p. 173
- [3] M. Rubin, K. von Rottkay, R. Powles, **Window Optics**, LBNL preprint 39911 to be published in Solar Energy
- [4] M. Rubin, **Optical properties of soda lime silica glasses**, Solar Energy Materials 12 (1985), p. 275-288
- [5] P. Oelhafen, G. Reber, R. Steiner, A. Romanyuk and I. Mack, **Messanlage und Datenauswertung – Ausbau der Messapparatur** – Jahresbericht 2004 – Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung – BfE-Projekt Nr. 100761, p. 9-14
- [6] P. Oelhafen, G. Reber, R. Steiner, A. Romanyuk and I. Mack, **Winkelabhängiger solarer Gewinn von Isoliergläsern aus optischen und thermischen Messdaten – neue Messapparatur** – Jahresbericht 2005 – Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung – BfE-Projekt Nr. 100761, p. 9-10
- [7] P. Oelhafen, G. Reber, R. Steiner et al., **Untersuchung der optischen Eigenschaften von Fenstern - Kapitel 2.2.2 Winkelabhängige Transmission geprüft am Modell**, – Jahresbericht 2002 – Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung – BfE-Projekt Nr. 37088, p. 14-15
- [8] W. Platzer, **Solare Transmission und Wärmetransportmechanismen bei transparenten Wärmedämmmaterialien**, Dissertation 1988 – Fakultät für Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, p. 37-39
- [9] W. Wagner, **Wärmeübertragung**, Vogel Fachbuch – Kamprath-Reihe, 4. überarbeitete Auflage, 1993, p. 86-89
- [10] EN 410, **Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen**, Deutsches Institut für Normung (1998) D
- [11] EN 673, **Bestimmung des Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Wert)**, Deutsches Institut für Normung (2000) D

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Neue Beschichtungen

Wir berichten über die Verwendung von Zinn als Benetzungsmittel für das Silberwachstum auf SiO_2 . Wir konnten beobachten, dass mit vorangehend aufgetragenen Submonoschichten aus Zinn eine frühere Koaleszenz des Films und eine Bildung glatterer Silberschichten erzielt werden können bei Raumtemperatur. Ferner erweiterten wir das Substratmaterial, wozu eine neue Einrichtung zur ZnO-Deposition aufgebaut wurde.

Im 2008 planen wir, unsere Studien zum Silberwachstum fortzusetzen und zwar sowohl auf im Labor gewachsenen SnO-Schichten, aber auch auf industriellen ZnO-Schichten. Die Untersuchungen werden den Effekt des Ionenbeschusses auf das Wachstum auf Silberschichten einschliessen.

Es konnte gezeigt werden, dass die optischen Konstanten durch Parameter wie Druck, Gasmischungsverhältnisse, Pulsfrequenz, mit der das Magnetron betrieben wird, und Substrattemperatur beeinflusst werden können, und dass es somit wichtig ist, dass eine Beschichtung immer bei den selben, optimalen Parametern durchgeführt wird. Des Weiteren wurden erneut Simulationen durchgeführt um Schichtsysteme zur Realisierung der idealen Transmission τ_{\min} auch im industriellen Maßstab durchführen zu können. Hierbei wurden produktspezifische Bedingungen wie die Farbe berücksichtigt. In einem erstem Versuch konnte gezeigt werden, dass eine Beschichtung mit einer Transmission, die der idealen Transmission sehr nahe kommt auf einer industriellen Anlage möglich ist.

Der erste Versuch hat weiter gezeigt, dass noch viele Veränderungen simuliert und dann umgesetzt werden müssen, damit die Farbwerte sowohl in der Transmission, wie auch in der Reflexion erreicht werden. Die auf dem Markt vorhandenen Produkte machen deutlich, dass eine Nachfrage nach verschiedenen maximal Transmissionen existiert, die sowohl größer als auch kleiner als die bis jetzt angesetzte Transmission von $\tau_v \geq 0.5$ sind. Somit müssen noch weitere Varianten dieses Schichtsystems simuliert und experimentell realisiert werden. Wenn die Schichtsysteme soweit alle optischen Anforderungen erfüllen, so müssen noch einige Stabilitäts- und Alterungstests durchgeführt werden, die zu weiteren Änderungen im Schichtdesign führen können.

Messapparaturen

Die Messapparatur zur winkelabhängigen Bestimmung der optischen Eigenschaften von Isoliergläsern wurde getestet an Messproben aus Stapeln von Floatgläsern, die mit etablierter Theorie mit grosser Genauigkeit modelliert werden können. Es wurde eine ausgezeichnete Übereinstimmung gefunden, sodass nach weiteren Kontrollmessungen zur Eingrenzung möglicher Störeffekte (Streuung) umgekehrt damit die Festlegung von optischen Parametern möglich ist. Neben der Überprüfung der Messmethode ist jetzt weiter eine Möglichkeit geschaffen worden, die Messgenauigkeit jederzeit zu kalibrieren.

Die Messapparatur zur Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe wurde erfolgreich angewandt auf ein System mit drei Komponenten ($N=3$). Überprüft wurde dies auch durch vergleichende Anwendung des dazu unabhängigen zerlegenden Verfahrens aus rein solaroptischen Daten, bei dem keine thermische Messung erfolgt. Die Untersuchungen zur Wirksamkeit von Innenstoren zeigen, wie die spektrale Abstimmung der Komponenten aufeinander zur Wirkung kommt, aber auch der Grad der Hinterlüftung der Innenstore. Für die Konvektion bei der Hinterlüftung unter Laborbedingungen kann das Modell noch verfeinert werden durch weitere unabhängige Messungen.

Nationale Zusammenarbeit

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

Internationale Zusammenarbeit

- FLACHGLAS Wernberg GmbH, Wernberg-Köblitz, D

Öffentlichkeitsarbeit

- **Projektarbeit** im Rahmen von „Schweizer Jugend forscht“
- Ausbau der **Internetseite zum vorliegenden Forschungsprogramm** am Institut für Physik:
Internetseite: www.glassdbase.unibas.ch, enthaltend: 1. Datenbank der optischen und thermischen Eigenschaften der am Institut vermessenen Isoliergläser. 2. Download von Dokumenten und Berichten über die durchgeführten Forschungsarbeiten.