



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# RATIONELLE ENERGIE-NUTZUNG IN GEBÄUDEN

## NEUE OPTISCHE BESCHICHTUNGEN FÜR TRANSPARENTE GEBÄUDETEILE IM HINBLICK AUF EINEN VERBESSERTEN SOMMERLICHEN WÄRMESCHUTZ

### Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Peter Oelhafen, Departement Physik der Universität Basel**

Klingelbergstrasse 82, [peter.oelhafen@unibas.ch](mailto:peter.oelhafen@unibas.ch)

<http://pages.unibas.ch/phys-esca>

<http://www.glassdbase.unibas.ch>

**Iris Mack, Departement Physik der Universität Basel**

Klingelbergstrasse 82, [iris.mack@unibas.ch](mailto:iris.mack@unibas.ch)

**Georges Reber, Departement Physik der Universität Basel**

Klingelbergstrasse 82, [georges.reber@unibas.ch](mailto:georges.reber@unibas.ch)

**Andriy Romanyuk, Departement Physik der Universität Basel**

Klingelbergstrasse 82, [andriy.romanyuk@unibas.ch](mailto:andriy.romanyuk@unibas.ch)

**Roland Steiner, Departement Physik der Universität Basel**

Klingelbergstrasse 82, [roland.steiner@unibas.ch](mailto:roland.steiner@unibas.ch)

## **Impressum**

Datum: 25. November 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Projektnummer: 100761

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
Abstract .....	2
1. Ziel der Arbeit.....	3
2. Ergebnisse .....	4
2.1 Brenet – Status-Seminar 2008 .....	4
2.2 Neue Beschichtungen .....	10
2.3 Entwicklung einer Beschichtung für Sonnenschutzgläser mit idealer Transmission.....	12
2.4 Messanlage, Datenauswertung.....	14
2.4.1 Auswahl und Einsatz der Messprobe als Standard .....	14
2.4.2 Optische Charakterisierung der Konstituenten Grauglas und Floatglas mit dem CARY .....	15
2.4.2.1 Transmissionsgrad und Reflexionsgrad.....	15
2.4.2.2 Optische Konstanten $n$ und $k$ .....	16
2.4.3 Optisches Experiment Bestimmung der winkelabhängigen optischen Grössen des ganzen Glaselementes .....	18
2.4.3.1 Berechnung aus den gemessenen Eigenschaften der Einzelkomponenten (Methode mit $n$ und $k$ aus der CARY-Messung) .....	18
2.4.3.2 Winkelabhängige Messung des ganzen Elementes mit dem ZEISS-Spektrometer.....	19
2.4.3.3 Vergleich der beiden Methoden.....	20
2.4.4 Thermisches Experiment Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe $q_i$ und des $g$ -Wertes ..	20
2.4.4.1 Rechnerisch aus den Daten der Einzelkomponenten (CARY-Daten) .....	20
2.4.4.2 Aus dem thermischen Experiment und den solaroptischen Messwerten optischen Messdaten des ganzen Elementes (ZEISS-Daten).....	20
2.4.4.3 Vergleich der beiden Methoden.....	21
3. Diskussion und Schlussfolgerungen .....	22
Symbolverzeichnis .....	23
Referenzen .....	24
Anhang .....	26

## Zusammenfassung

**Neue Beschichtungen:** Die in den Mehrschichtsystemen verwendeten dünnen Silberschichten werden bei einer darauf folgenden Abscheidung von Metalloxiden oxidiert. Um dies zu verhindern, wurde der Einfluss einer dünnen Titanschuttschicht untersucht. Mit dieser Schutzschicht kann eine Oxidation von Silber verhindert werden. Des Weiteren hat diese Titanschicht keinen Einfluss auf die optischen Eigenschaften des gesamten Systems, weil sie selber während der nachfolgenden Abscheidung vollständig oxidiert wird.

**Sonnenschutzbeschichtungen:** Es konnte gezeigt werden, dass mit handelsüblichen Materialien und Methoden neue Mehrschichtsysteme entwickelt werden können, die eine Transmission haben, die der theoretischen, optimalen Transmission von Professor Oelhafen sehr ähnlich ist. Diese Mehrschichtsysteme bewirken eine Reduktion der solaren Einstrahlung von 17% bis 29% gegenüber handelsüblichen Sonnenschutzfenstern.

**Messapparaturen:** Nachdem im Jahresbericht 2007 gezeigt wurde, dass sich Stapel von Floatgläsern mit der Fresnel-Theorie präzise modellieren lassen, wurde die Idee, so eine Kalibriermöglichkeit für unsere Messapparaturen zu schaffen, weiterverfolgt. So wurde ein 2-fach-Glas (Float-/ Grauglas) nach Zerlegung optisch in  $n$  und  $k$  vollständig charakterisiert und das winkelabhängige Verhalten als Komposition berechnet. Der Vergleich mit der direkten winkelabhängigen Messung ergab weitgehende Übereinstimmung, sodass jetzt eine abgesicherte Kontrollmöglichkeit zur Verfügung steht. Die selbe Idee der Gegenüberstellung zweier unabhängiger Messmethoden wurde auch auf die Messapparatur zur Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe angewandt. Die thermische Bestimmung am ganzen Element gibt auch hier das rechnerische, aufgrund Materialkenntnis ermittelte Resultat ausgezeichnet wieder.

## Abstract

**New Coatings:** The thin silver layers used in multilayer systems are oxidised during the deposition of the following metal oxide layer. To avoid this the influence of a thin titanium protection layer was investigated. With this protection layer the oxidation of the silver layer can be avoided. Furthermore this titanium layer has no influence on the optical properties of the whole system as it is completely oxidised during the following deposition.

**Sun protection coatings:** It was possible to show that new multilayer systems with standard materials and methods can be developed which have a transmittance that is very similar to the theoretical, optimal transmittance of Professor Oelhafen. With these multilayer coatings the solar radiation can be reduced between 17% to 29% compared to commercial sun protection windows.

**Measuring apparatus:** In the annual report of 2007 we have shown that a stack of float glasses can be simulated precisely by the Fresnel-Theory. Based on these simulations, the idea of using this method for calibrating our measuring apparatus was born. For this a twofold glass (float / grey glass) was fully characterised by determining its optical components  $n$  and  $k$ . With this the angle dependent behaviour of the composite could be determined. Comparing the results with direct angle dependent measurements showed good agreement. Like this we have a possibility to test our measuring apparatus. This idea to compare two independent measuring methods was also applied for the measuring apparatus to determine the secondary internal heat transfer factor. The thermally determined results of the whole element are also very similar to the values determined by simulation using the material constants.

## 1. Ziel der Arbeit

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.

## **2. Ergebnisse**

### **2.1 Brenet – Status-Seminar 2008**

Über die Arbeiten und Ergebnisse dieses BfE-Projektes wurde am Brenet – Status-Seminar 2008 „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“ berichtet. Der Beitrag aus dem Tagungsband ist unten eingefügt, da er die Ergebnisse zusammenfassend beschreibt.

## **Neue optische Beschichtungen für Sonnenschutzgläser und transparente Gebäudeteile**

Peter Oelhafen, Iris Mack, Georges Reber, Andriy Romanyuk und Roland Steiner,

Departement Physik, Universität Basel

### **Zusammenfassung**

Die Überhitzung von Gebäuden als Folge extensiver Sonneneinstrahlung hat sich in den letzten zwei Dekaden zu einem Problem entwickelt, das noch nicht befriedigend gelöst ist. Die Ursachen des Problems liegen einerseits im architektonischen Trend eines markant höheren Glasanteils der Gebäudehülle und andererseits im Klimawandel. Obschon verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Sonneneinstrahlung bestens bekannt sind, kommt einer Verglasung mit Sonnenschutzfenstern eine wesentliche Bedeutung zu.

Im vorliegenden Projekt werden kommerzielle Sonnenschutzgläser systematisch spektral-optisch, winkelabhängig und thermisch untersucht. Ein theoretisches Modell der Optimierung der Leistungsfähigkeit hat gezeigt, dass im Vergleich zu den aktuellen Sonnenschutzgläsern die solar-thermische Belastung des Innenraums um einen Drittel, bei gleichem Lichttransmissionsgrad, reduziert werden kann. Erreicht wird dieser Effekt über eine konsequente Begrenzung der spektralen, M-förmigen optischen Transmission auf das sichtbare Licht ('M-Glas'). Die Machbarkeit des neuen Glases wurde im Labormassstab und bereits in ersten Versuchen auf industriellen Beschichtungsanlagen der Firma Glas Trösch demonstriert und das M-Glas steht kurz vor der Markteinführung.

### **Abstract**

During the last two decades overheating of buildings due to extensive solar radiation has become a problem that is not yet solved satisfactorily. The reasons for this problem are on one hand the architectural trend towards fully glazed building façades and on the other hand the change of climate we are facing. Although many measures to reduce the solar thermal load are well known, the relevance of sun protection glasses has even increased.

In the course of the present project, commercial sun protection glasses were investigated optically, wavelength and angular dependently as well as thermally. A theoretical model on the optimization of the performance has shown that the solar-heat load can be reduced by one-third as compared to commercial sun protection glasses with equal light transmittance. This effect is obtained by consequently limiting the spectral M-shaped transmittance to the visible light ('M-glass'). The feasibility of the new glasses has been demonstrated on laboratory scale and in first experiments on industrial coating facilities of the Glas Trösch AG. Presently, the M-glass stands at the edge of the market launch.

## I. Ausgangslage

Der Ausgangspunkt des vorliegenden Themas ist ein Problem, das in den neunziger Jahren intensiv aufgetreten ist und uns bis heute beschäftigt: Die Überhitzung von Gebäuden durch extensive Sonneneinstrahlung. Das Problem wird in erster Linie durch die veränderten architektonischen Tendenzen in der Form einer Erhöhung des transparenten Anteils der Oberfläche der Gebäudehülle verursacht und durch die Änderung unseres Klimas verstärkt. Die Figuren 1 und 2 zeigen wie unterschiedlich mit der Verwendung von Glas an Gebäuden umgegangen wird.



**Figur 1:** Bank für Internationalen Zahlungsausgleich in Basel



**Figur 2:** Messe Basel

Verschiedene bauliche Massnahmen stehen zur Verfügung um das Problem der Überhitzung zu lösen oder mindestens zu entschärfen: Die Wahl eines angepassten Flächenanteils der transparenten Gebäudehülle, Verwendung von (variablen) Verschattungen, schaltbare Sonnenschutzgläser, Lüftung und Klimatisierung. Die Möglichkeit der Klimatisierung ist keine nachhaltige Lösung, Verschattungen stellen oft ein technisches und/oder architektonisches Problem dar und bei den schaltbaren

Sonnenschutzgläsern gibt es bis heute kein Produkt, das breit eingesetzt werden könnte.

Der vorliegende Beitrag soll zeigen, dass Sonnenschutzgläser einen wesentlichen Beitrag zum Überhitzungsproblem liefern können. Wir konzentrieren uns hier auf die Situation, wie man sie in grossen Gebäuden mit einem hohen Verglasungsanteil antrifft. Man verzichtet im Winter bei der energetischen Auslegung des Gebäudes auf einen solaren Gewinn und man möchte die solarthermische Last während des ganzen Jahres, für einen vorgegebenen Lichttransmissionsgrad (oder Helligkeit des Glases), minimal machen.

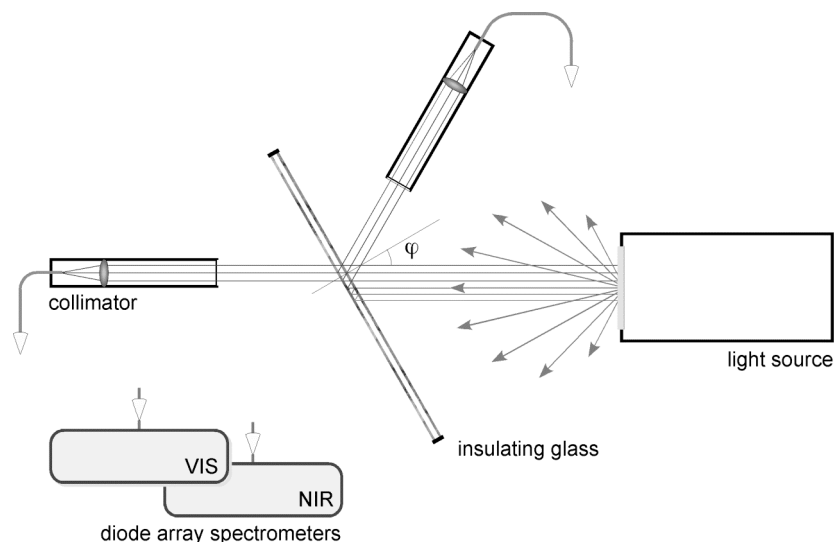
Um ein eventuelles Verbesserungspotential bestimmen zu können, wurde die Leistungsfähigkeit der aktuellen, auf dem Markt erhältlichen, Sonnenschutzgläser von uns untersucht.

## II. Vorgehen

Zu den Leistungsdaten der Sonnenschutzgläser gehören die folgenden Grössen, die für eine korrekte Berechnung der Energiebilanz eines Gebäudes in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels  $\varphi$  der Sonnenstrahlung bekannt sein müssen:

$g$	g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad)
$\tau_e$	solarer Transmissionsgrad
$\tau_v$	Lichttransmissionsgrad
$\rho_e$	solarer Reflexionsgrad
$\rho_v$	Lichtreflexionsgrad
$\alpha_e$	solarer Absorptionsgrad
$q_i$	sekundäre Wärmeabgabe nach innen

Da diese Daten für kommerzielle Isoliergläser im besten Fall für senkrechte Einstrahlung bekannt sind, haben wir uns dazu entschlossen, ein Messlabor für die Bestimmung obiger Parameter durch spektral-optische Messungen in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels aufzubauen. Diese Infrastruktur ist seit mehreren Jahren in Betrieb. Durch Messungen an Referenz-Isoliergläsern konnten



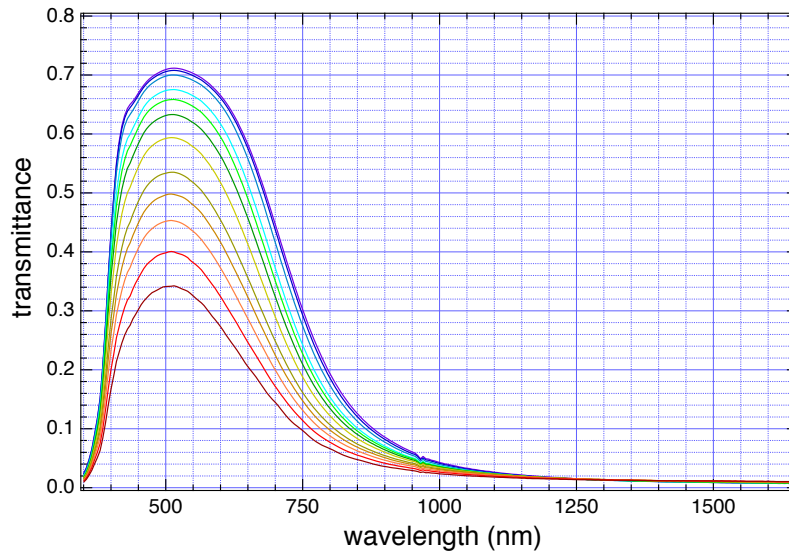
**Figur 3:** Spektral-optischer Aufbau zur Messung der Transmission und der Reflexion von ganzen Isoliergläsern. Der Empfänger-Kollimator definiert die Richtung des transmittierten Lichts (Kollimatorstellung links in der Figur) bzw. des reflektierten Lichts (Kollimatorstellung oben in der Figur). Die detaillierte Funktionsweise der Apparatur ist in der Referenz [2] beschrieben.

wir zeigen, dass unsere Messapparaturen Daten liefern, die mit der Bestimmung nach der Euronorm EN 410 in Übereinstimmung sind [1]. Figur 3 zeigt den Messaufbau der spektral-optischen Messapparatur. Figur 4 zeigt als typisches Beispiel den spektralen Verlauf der optischen Transmission bei 12 verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts eines guten kommerziellen Sonnenschutzfensters.

Zur Bestimmung des winkelabhängigen g-Werts verwenden wir einen Sonnensimulator. Die



Messapparaturen sind ausführlich beschrieben in den Referenzen [2] und [3].



**Figur 4:** Spektren des transmittierten Lichts im Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 350 bis 1650 nm eines Sonnenschutz-Isolierglases mit  $\tau_v = 0.68$  und  $\tau_e = 0.34$  gemessen bei 12 verschiedenen Lichteinfallswinkeln  $\varphi = 0, 15, 30, 45, 50, 55, 60, 65, 67.5, 70, 72.5, 75^\circ$ . Die oberste Kurve (violett) entspricht  $0^\circ$ , die unterste Kurve (dunkelrot)  $75^\circ$ .

### III. Resultate

#### Daten aktueller Isoliergläser

Die gemessenen Daten von kommerziellen Isoliergläsern werden laufend in einer Internet Datenbank publiziert und stehen so Bauherren und Architekten zur Beurteilung von Sonnenschutzgläsern zur Verfügung. Der Aufbau der Datenbank (<http://www.glassdbase.unibas.ch/>) sowie deren Inhalt und die gemessenen Parameter sind in der Referenz [4] erklärt.

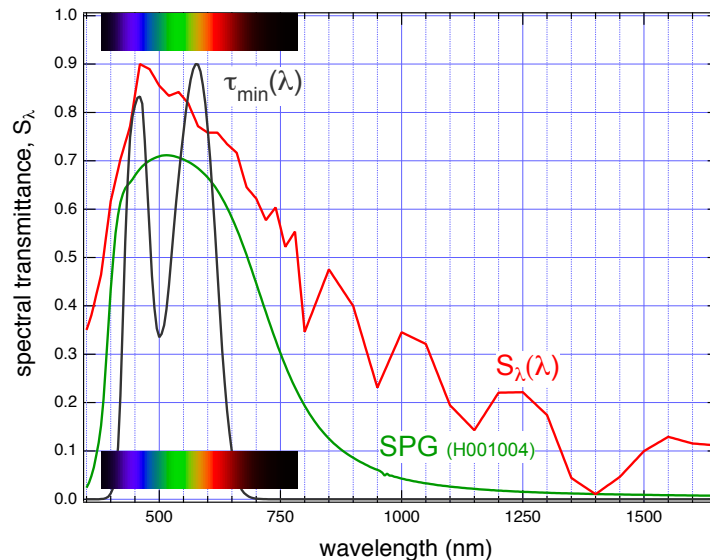
Für die Beurteilung der solar-thermischen Last durch die (senkrechte) Sonneneinstrahlung durch ein Isolierglas sind die Grössen  $\tau_e$ ,  $\tau_v$  und  $g$  von Bedeutung. Der Quotient  $\tau_e/\tau_v$  beschreibt den Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  normiert auf den Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$ . Ein anderer Quotient ist die Selektivitätskennzahl, die durch das Verhältnis  $\tau_v/g$  definiert ist. Der  $g$ -Wert ist definiert als die Summe aus dem Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  und der sekundären Wärmeabgabe  $q_i$  nach innen.

Beim Vergleich der Grösse  $\tau_e/\tau_v$  einer grossen Zahl von Sonnenschutzgläsern fällt auf, dass bis auf wenige Ausnahmen alle einen Quotienten von  $\tau_e/\tau_v \geq 0.5$  aufweisen unabhängig von dem Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$ .

#### Theoretische Grenze des Quotienten $\tau_e/\tau_v$

Es stellt sich die Frage, ob der  $\tau_e/\tau_v$  Wert von Sonnenschutzgläsern nicht unter die Grenze von 0.5 reduziert werden kann und ob allenfalls eine theoretische untere Grenze existiert. Als Basis für eine theoretische Betrachtung dienen zwangsläufig die Definitionen der in Abschnitt 2 definierten Parameter gemäss der Norm EN 410, die auch die notwendigen physikalischen und physiologischen Funktionen beinhaltet wie die Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$ , die Normspektralwertanteile  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  (nach CIE 1931), die relative spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung  $S_\lambda$  und die Normlichtart  $D_{65}(\lambda)$  für weisses Licht.

Auf dieser Basis kann tatsächlich eine spektrale Transmissionsfunktion  $\tau_{\min}$  bestimmt werden, welche die Grösse  $\tau_e/\tau_v$  minimal werden lässt (siehe Referenzen [5], sowie Solar Energy 2007 [6]). Wichtig ist dabei die Nebenbedingung, dass die Transmissionsfunktion  $\tau_{\min}$  so beschaffen ist, dass das transmittierte weisse Normlicht nach der Transmission zwar abgeschwächt aber immer noch weiss erscheint, was einem optischen Graufilter entspricht. Die neue Transmissionsfunktion  $\tau_{\min}(\lambda)$ , wie sie sich aus der Theorie ergibt, ist in Figur 5 zusammen mit einer Transmissionsfunktion eines typischen Sonnenschutzglases (H001004) und der spektralen Normverteilung der Sonnenstrahlung  $S_\lambda(\lambda)$  verglichen. Die horizontalen Farbbalken zeigen die Farben des sichtbaren Lichts in Abhängigkeit der Wellenlänge.



**Figur 5:** Spektraler Verlauf der Transmission eines typischen Sonnenschutzglases (H001004) im Vergleich mit der neuen Transmissionsfunktion  $\tau_{\min}(\lambda)$ .  $S_{\lambda}(\lambda)$  stellt die spektrale Normverteilung der Sonnenstrahlung dar.

Figur 5 zeigt deutlich, dass die spektrale Transmission  $\tau_{\min}$  die Strahlung gegenüber dem Sonnenschutzglas (H001004) im rot-infraroten (650 bis 1500 nm) und violett/blauen Bereich (um 400 nm) deutlich konsequenter abschwächt. Damit reduziert man bei der Transmission den Anteil der Strahlung (und damit die Grösse  $\tau_e$ ), der nichts zur Helligkeit (oder zu der Grösse  $\tau_v$ ) des Glases beiträgt. Das Minimum in der  $\tau_{\min}$  Kurve bei  $\lambda = 500$  nm ist eine Folge der geforderten Farbneutralität der Transmissionsfunktion und der M-förmige Verlauf von  $\tau_{\min}$  ergibt sich somit direkt aus der Theorie.

Mit dem oben angedeuteten Verfahren kann somit auf der Basis der verwendeten normierten Funktionen ( $V(\lambda)$ ,  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ ,  $S_{\lambda}$  und  $D_{65}(\lambda)$ ) eine theoretische Grenze für den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  für die  $\tau_{\min}$  Funktion angegeben werden:  $\tau_e/\tau_v = 0.334$ . Die Reduktion der solaren Einstrahlung gegenüber einem (guten) aktuellen Sonnenschutzglas beträgt somit 33% oder anders ausgedrückt, die aktuellen Sonnenschutzgläser liegen bezüglich der solar-thermischen Belastung 50% über der theoretischen Grenze.

#### Praktische Realisierung des optischen Filters $\tau_{\min}$

Für die Umsetzung in die Praxis stellt sich die Frage, ob die Transmissionsfunktion  $\tau_{\min}$  mit den heute verwendeten Methoden zur Herstellung der Beschichtungen für Gebäudeglas realisiert werden kann. Bereits 2006 konnte an der Uni Basel gezeigt werden, dass die M-förmige Transmissionskurve durch ein Mehrschichtsystem sowohl von der Technik für die Schichtabscheidung wie auch von den notwendigen Materialien her industriell machbar ist [7, 8]. Im vergangenen Jahr konnten dann in einer Zusammenarbeit zwischen der Universität Basel und der Glas Trösch AG, Bützberg erste M-Glas Beschichtungen in einer industriellen Laboranlage hergestellt werden. Diese ersten Laborproben besitzen Lichttransmissionen  $\tau_v$  zwischen 0.4 und 0.6. Diese hohe Lichttransmission war eine Nebenbedingung, nachdem die Nachfrage nach solchen Sonnenschutzfenstern relative hoch ist. Das transmittierte Licht ist bei diesen Beschichtungen und den daraus erhaltenen Isoliergläsern über weite Winkelbereiche farbneutral, d.h. das weisse einfallende Licht wird nur durch die Beschichtung abgeschwächt und ändert seine Farbe nicht. Die hohe Reflexion dieser Beschichtungen führt zu einer geringen Absorption, und somit nur zu einem kleinen sekundärem Wärmeabgabegrad  $q_i$  nach innen. Aus energetischer Sicht sind diese ersten Muster ein Gewinn im Vergleich zu den Sonnenschutzfenstern auf dem Markt, da der Quotient  $\tau_e/\tau_v$  Werte zwischen 0.340 und 0.398 aufweist, und so deutlich unter der 0.5 Marke der kommerziellen Sonnenschutzfenster liegen. Durch diese neuen Sonnenschutzfenster kann also eine Reduktion der solaren Einstrahlung von 17% bis 29% erreicht werden. Diese Reduktion kann das Problem der Überhitzung bei Gebäuden mit hohem, transparentem Anteil in der Gebäudehülle verringern.

## IV. Ausblick

Das Potenzial des M-Glases zur Reduktion der solaren Einstrahlung und damit der Steigerung des Komforts und der Reduktion des Energieverbrauchs von Klimaanlage ist bei einer globalen

Betrachtung riesig. Was die kommerzielle Entwicklung anbelangt lässt sich zur Zeit nur schwer eine genaue Prognose machen. Die Voraussetzungen für einen Erfolg des M-Glases können jedoch positiv gewertet werden: (1) Die physikalische Verbesserung des M-Glases gegenüber den aktuellen Sonnenschutzgläsern ist markant, (2) die industrielle Herstellung mit der bereits zur Verfügung stehenden Infrastruktur wurde gezeigt, (3) nach einer angemessenen Einführungsperiode der industriellen Fertigung dürfte das Produkt preislich auf dem selben Niveau wie die heutigen Sonnenschutzgläser liegen und (4) wie die Firma Glas Trösch gezeigt hat, kann das M-Glas in einer breiten Palette von Farbnuancen von eher dezenten bis hin zu mehr gesättigten Farben hergestellt werden, was die architektonische Akzeptanz des neuen Produkts sichert.

## V. Literatur/Referenzen

- [1] Abschlussbericht 2008 zu BFE Projekt, in Vorbereitung
- [2] 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
- [3] 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
- [4] P. Oelhafen, R. Steiner, G. Reber, A. Romanyuk, B. Heimann, M. Steinacher and P. Juchli, *Database for Optical and Thermal Properties of Insulating Glasses*, CISBAT 2005, Proceedings, EPFL 2005, p. 43
- [5] P. Oelhafen, *Optimal Spectral Transmittance of Sun Protection Glasses*, CISBAT 2005, Proceedings, EPFL 2005, p. 37
- [6] P. Oelhafen, *Optimized spectral transmittance of sun protection glasses*, Solar Energy 81 (2007), p. 1191
- [7] Jahresbericht 2006 zu BFE Projekt
- [8] I. Mack, *Development of Innovative Coatings for Sun Protection Glasses Based on the Theory of the Optimal Spectral Transmittance*, Inauguraldissertation

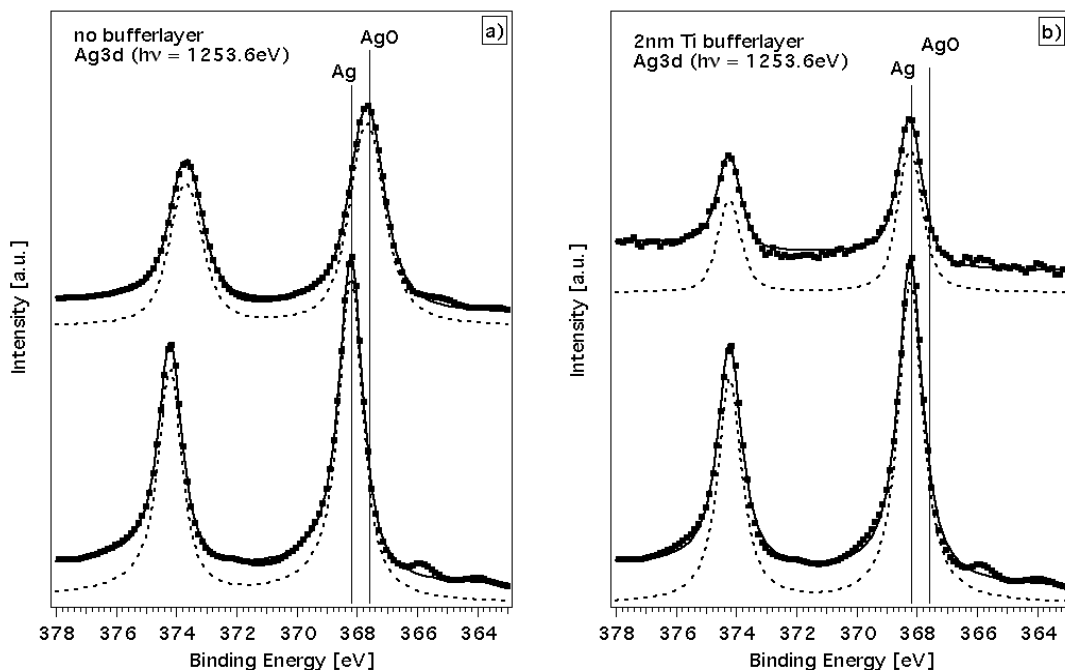
## 2.2 Neue Beschichtungen

### Metalloxid auf dünnen Silberschichten

Verfasserin des Kapitels: Iris Mack

In Mehrschichtsystemen, wie sie in optischen Filtern, Infrarotspiegeln und Sonnenschutzfenstern zum Einsatz kommen, sind die Metallschichten, die meist aus Silber bestehen, häufig zwischen Metalloxidschichten eingebettet. Im Fall der, in den letzten Jahresberichten beschriebenen, Mehrschichtsysteme folgt auf eine Silberschicht eine Schicht aus Zinkoxid oder Titandioxid [1]. Um stöchiometrische Metalloxidschichten mit optimalen optischen Eigenschaften zu erhalten, müssen Metalloxide mittels reaktivem Sputtern von metallischen oder suboxidischen Targets in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre abgeschieden werden [2]. In der Anfangsphase der Abscheidung, bis sich eine durchgehende Schicht gebildet hat, ist die darunter liegende Silberschicht dem sauerstoffhaltigen Gasgemisch ausgesetzt. Silber ist ein leicht zu oxidierendes Metall, besonders wenn es frisch abgeschieden wurde [3, 4, 5, 6, 7]. Wird Silber oxidiert, ändern sich die Eigenschaften der Schicht. Im Konkreten heißt das, der reale Brechungsindex  $n$  nimmt zu, während der Absorptionskoeffizient  $k$  abnimmt, wenn Silber oxidiert wird [8, 9, 10]. Dies bedeutet, die Reflexion im infraroten Wellenlängenbereich wird reduziert und somit geht eine wichtige Eigenschaft, die für Sonnenschutzfenster benötigt wird, verloren [5].

Die Oxidation von Silber während der Abscheidung der darauf folgenden Metalloxidschicht ist ein Phänomen, das bereits intensiv in der Fachliteratur behandelt wurde. Es wurden auch verschiedene Methoden beschrieben, die eine Oxidation verhindern können [3, 5, 6, 11]. Ziel dieses Projektes war, eine Möglichkeit zu finden, die möglichst geringen Einfluss auf die optischen Eigenschaften des gesamten Mehrschichtsystems hat. In diesem Zusammenhang entstand die Idee, eine möglichst dünne Titanschicht als Schutzschicht zu verwenden, die während der darauf folgenden Titandioxid-Abscheidung komplett oxidiert wird, und so keinen Einfluss auf die optischen Eigenschaften des gesamten Mehrschichtsystems hat.



**Abbildung 2.1:** XPS-Messungen des 3d-Niveaus von Silber. Die unteren Kurven entsprechen frisch abgeschiedenem Silber. Für die obere Kurve in a) wurden 5 nm Titandioxid direkt auf die darunter liegende Silberschicht abgeschieden, was zu einer Oxidation der Silberschicht führt. Im Fall b) wurden erst 2 nm reines Titan abgeschieden, bevor mit der Titandioxidabscheidung begonnen wurde. In diesem Fall wird das Silber nicht oxidiert.

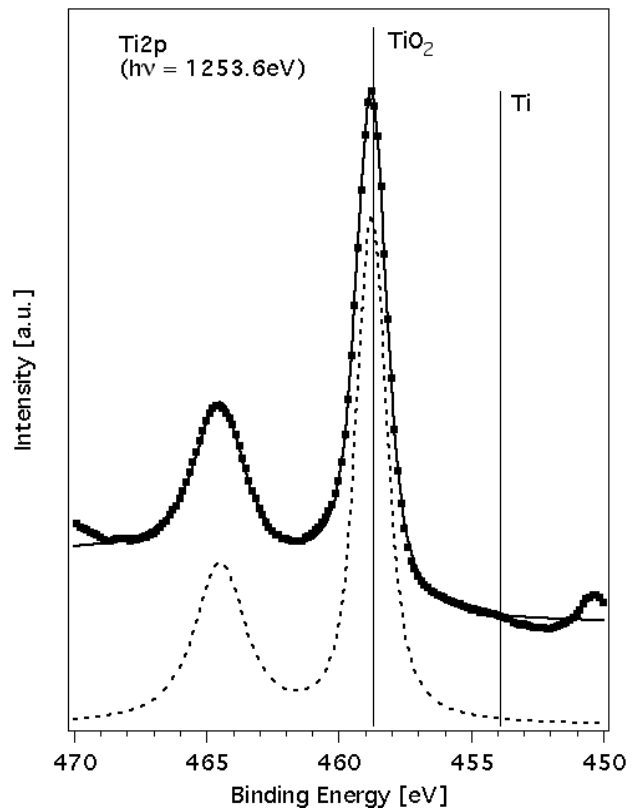
Zur Überprüfung dieser Methode wurden Silberschichten auf sauberen Siliziumsubstraten abgeschieden und mittels XPS (Photoelektronenspektroskopie) untersucht. Die unteren Kurven der Abbildung 2.1 zeigen die Spektren des 3d-Rumpfniveaus (core-level) der abgeschiedenen Silberschichten (15 nm bzw. 23 nm). Die Bindungsenergie von 368,2 eV entspricht dem Literaturwert des  $3d_{5/2}$ -Niveaus von Silber. Um den Einfluss einer dünnen Titanschicht zu untersuchen, wurden ca. 5 nm Titandioxid entweder direkt oder nach der Abscheidung einer 2 nm dicken Titanschicht auf

das Silber reaktiv abgeschieden. Die oberen Kurven der Abbildung 2.1 zeigen die  $3d$ -Rumpfniveaus nach der Titandioxid-Abscheidung. In Abbildung 2.1 a) lässt sich erkennen, dass sich der chemische Zustand des Silbers durch die direkte reaktive Abscheidung von Titandioxid verändert hat. Das  $3d$ -Doublett wurde zu kleineren Bindungsenergien verschoben. Die neue Position des  $3d_{5/2}$ -Niveaus ist jetzt bei 367,6 eV, die Verschiebung beträgt folglich 0,6 eV. Diese Bindungsenergie entspricht dem Literaturwert von Silberoxid (AgO).

Wird hingegen erst eine 2 nm dicke Titanschicht abgeschieden und dann während der Abscheidung der Sauerstoffgehalt des Gasgemisches erhöht, so erfolgt keine Verschiebung des  $3d$ -Doubletts von Silber, wie in Abbildung 2.1 b) zu sehen ist. Daraus folgt, durch die Einführung der dünnen Titanschutzschicht kann die Oxidation des darunter liegenden Silbers verhindert werden.

Neben dem Schutz der Silberschicht ist es natürlich wichtig, dass die Titanschutzschicht während der anschließenden Titandioxidabscheidung vollständig oxidiert wird, und so eine reine Titandioxidschicht entsteht, die für die optischen Eigenschaften des Mehrschichtsystems wichtig ist. Um den chemischen Zustand der Titanschicht zu bestimmen, wurde das  $2p$ -Rumpfniveau von Titan untersucht. Das Spektrum in Abbildung 2.2 zeigt, dass das  $2p$ -Niveau keinen Beitrag im Bereich von 453,9 eV besitzt, der zu reinem Titan gehören würde. Die Position des  $2p_{3/2}$ -Niveaus entspricht dem Literaturwert von Titandioxid. Somit konnte gezeigt werden, dass die Titanschutzschicht vollständig oxidiert wurde und so keinen optischen Einfluss auf den Schichtübergang zwischen Silber und Titandioxid hat.

Die hier exemplarisch dargestellte Untersuchung zeigt, das Silber durch die Einführung einer metallischen Zwischenschicht geschützt werden kann und dass diese Zwischenschicht durch anschließende Oxidation keinen Einfluss auf die optischen Eigenschaften des gesamten Mehrschichtsystems hat.



**Abbildung 2.2:** XPS-Messungen des  $2p$ -Niveaus von Titan, nachdem 2 nm Titan und anschließend 5 nm Titandioxide reaktiv abgeschieden wurden.

## 2.3 Entwicklung einer Beschichtung für Sonnenschutzgläser mit idealer Transmission

Verfasserin des Kapitels: Iris Mack

Sonnenschutz und Überhitzung von Gebäuden ist ein Thema, das nicht nur in den Medien und der Politik viel diskutiert wird, sondern das uns alle betrifft. Um hierzu einen Beitrag zu leisten, wurde in diesem Projekt ein neuartiges Mehrschichtsystem für Sonnenschutzfenster entwickelt. Ausgangspunkt für die Entwicklung war die von Herrn Oelhafen entwickelte, theoretische, optimale Transmission, die den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  aus solarem Transmissionsgrad  $\tau_e$  und Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$  minimal werden lässt [12]. Als Nebenbedingung wurde die Farbneutralität des transmittierten Lichtes berücksichtigt. Untersuchungen an kommerziellen Gläsern haben gezeigt, dass dieser Quotient bei etwas 0,5 liegt. Für die theoretische optimale Transmission beträgt der Quotient nur 0,33. Gläser mit einer solchen Transmission würden also eine Energieersparnis von 30% im Vergleich zu guten kommerziellen Gläsern aufweisen.

Die Entwicklung erfolgte in verschiedenen Phasen, die im Detail in den Jahresberichten dieses Projekts beschrieben sind. So wurde in der ersten Phase versucht, die optischen Eigenschaften von Silber und Indiumdioxid ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) zu kombinieren, indem eine Mischschicht aus beiden Stoffen hergestellt werden sollte. Dies erwies sich als nicht durchführbar, da Indiumoxid reaktiv abgeschieden werden muss, und so Silber wenn es gleichzeitig abgeschieden wird auch oxidiert, und dann seine metallischen Eigenschaften verliert. Nachdem dieser Ansatz scheiterte, wurde auf das klassische Prinzip der Interferenz in Mehrschichtsystemen zurückgegriffen, dass bereits in der Glasindustrie erfolgreich verwendet wird.

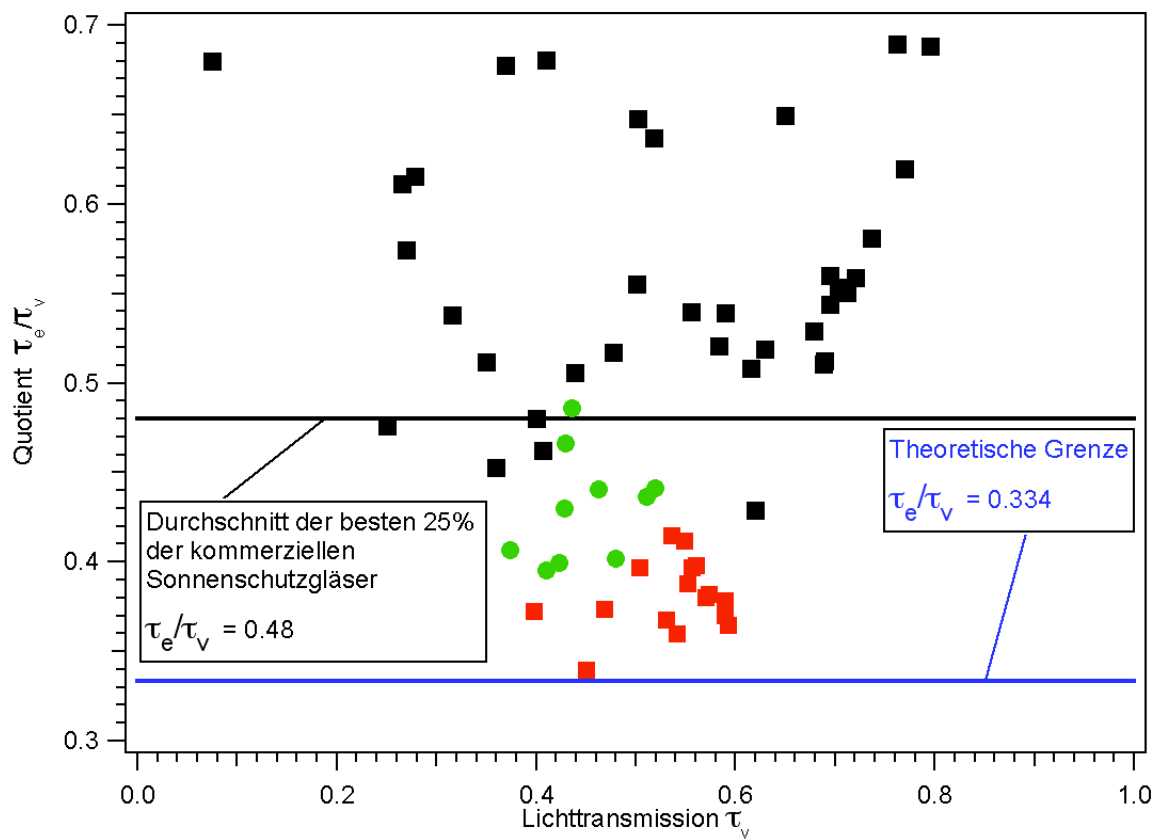
Das für die Realisation verwendete Mehrschichtsystem besteht aus einer Kombination von einzelnen Bandpässen. Wie der Begriff Bandpass schon andeutet, haben solche Filtersysteme einen Wellenlängenbereich, den sie transmittieren, während der Rest reflektiert wird. Im Allgemeinen besteht ein solches Filter aus zwei Schichten, die eine hohe Reflexion haben, meistens metallisch und einer dielektrischen Schicht, die als Abstandshalter dient. Die verwendeten Mehrschichtsysteme bestehen aus 9 Einzelschichten, davon sind 3 Schichten aus Silber und die restlichen 6 aus Metalloxiden.

Die so gewonnenen Schichtsysteme wurden in der nächsten Phase mittels Simulationen optimiert, um die nötigen Schichtdicken für eine Abscheidung zu bestimmen. Bei den Simulationen ist es wichtig reale optische Konstanten für die einzelnen Schichten zu verwenden, weil diese durch die darunter liegenden Schichten leicht beeinflusst werden. Deswegen wurden in diesem Zusammenhang erst die Abscheidung der einzelnen Schichten optimiert und deren optische Konstanten bestimmt. Im Anschluss wurden einzelne Schichtfolgen aus dem Mehrschichtsystem untersucht und optimiert. Hierbei zeigte sich, dass die anfälligsten Schichten die metallischen Silberschichten sind. Deswegen wurden mehrere Studien zur Optimierung durchgeführt. So wurde eine Plasmabehandlung durchgeführt, die eine frühere Nukleation bewirkt und so zu dünneren homogenen Silberschichten führt, wenn Silber auf Siliziumdioxid abgeschieden wird [13]. Um eine Oxidation der Silberschichten während der reaktiven Abscheidung der darauf folgenden Titandioxidschicht zu verhindern wurde eine dünne Titanschicht eingeführt, wie in Kapitel 2.1 dieses Jahresberichtes beschrieben [14].

Erste Beschichtungen auf der Laboranlage der Universität Basel konnten zeigen, dass die ideale Transmission mittels eines 9 Schichtsystems, das drei metallische Schichten enthält, realisiert werden kann. Nach der ersten Realisation wurde das Schichtsystem nochmals mittels Simulationen an die Randbedingungen für eine Realisation im Rahmen einer Zusammenarbeit der Glas Trösch AG und der Universität Basel angepasst. Auch hier zeigte sich, dass weitere Anpassungen nötig sind, um die Nebenbedingungen wie winkelunabhängige Farbneutralität des transmittierten Lichtes und eine winkelstabile Farbe des reflektierten Lichtes zu erreichen. In dieser Zusammenarbeit wurden mehrere Beschichtungen hergestellt, die wie in Abbildung 3.1 zu erkennen, einen kleineren Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  aufweisen als kommerzielle Sonnenschutzgläser [15].

Die hier dargestellten Mehrschichtsysteme, müssen aber noch weiteren Anpassung unterzogen werden. Damit daraus industriell Sonnenschutzgläser hergestellt werden können, muss ein Mehrschichtsystem einige Randbedingungen, wie Kratzfestigkeit und Härtebarkeit durch Erhitzen aufweisen. Des Weiteren muss nachgewiesen werden, dass solche Schichten nicht altern.

Mit den hier präsentierten Sonnenschutzgläsern kann also eine Reduktion der solaren Einstrahlung von 17% bis 29% erreicht werden, wodurch die Überhitzung bei Gebäuden mit hohem transparentem Anteil an der Gebäudehülle verringert werden kann.



**Abbildung 3.1:** Vergleich zwischen kommerziellen Sonnenschutzfenstern und den neu entwickelten Beschichtungen. Die schwarzen Punkte gehören zu kommerziellen Sonnenschutzfenstern. Die grünen Punkte sind neue Beschichtungen, die nur 2 Silberschichten enthalten, während die in rot dargestellten Werte zu Mehrschichtsystemen gehören, die 3 Silberschichten enthalten.

## 2.4 Messanlage, Datenauswertung

### Messprobe als Standard zur Qualitätskontrolle

#### *Solaroptische Charakterisierung eines 2-fach-Glases*

Verfasser des Kapitels: Georges Reber

##### 2.4.1 AUSWAHL UND EINSATZ DER MESSPROBE ALS STANDARD

Für die beiden Messapparaturen zur Messung ganzer Glaselemente soll ein Prüfling zur Verfügung stehen, mit dem die Genauigkeit der Experimente jederzeit überprüft werden kann. Es handelt sich um die beiden folgenden Messapparaturen:

- Messapparatur zur winkelabhängigen Bestimmung der optischen Eigenschaften [16], hier kurz **optisches Experiment** (ZEISS) genannt.
- Messapparatur zur Messung des g-Wertes [17], hier kurz **thermisches Experiment** genannt.

Die wichtigsten Anforderungen lauten:

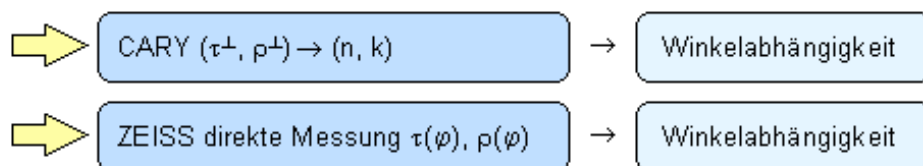
- Einfache Modellierbarkeit mit einem Minimum an physikalischen Modellparametern. Damit geht Charakterisierbarkeit der Konstituenten durch wenige Messungen einher.  
Das Material muss darum auch eine Dicke weit oberhalb der Wellenlänge der Lichtquelle aufweisen. Auch Beschichtungen sind – von diesem Kriterium der einfachen, zudem genauen Modellierbarkeit herkommend – ausgeschlossen.
- Komponenten optisch winkeltreu zur einfachen Berechnung des ganzen Set. Aus demselben Grund auch optisch inaktiv (Polarisationsrichtungen werden nicht gedreht).
- Wertebereich Reflexionsgrad  $\rho$  bzw. Transmissionsgrad  $\tau$  in einem Bereich, wo eine hohe relative Messgenauigkeit möglich ist.
- Zeitlich stabiles Material, d.h. stabile Materialparameter.

Diese Anforderungen lassen sich erfüllen, wenn die Konstituenten der Messprobe aus monolithischem Substrat in Plattenform ohne Beschichtung bestehen. Wir haben ein 2-fach-Glas, bestehend aus einem Grauglas (4 mm) und einem Floatglas (6 mm), gewählt.

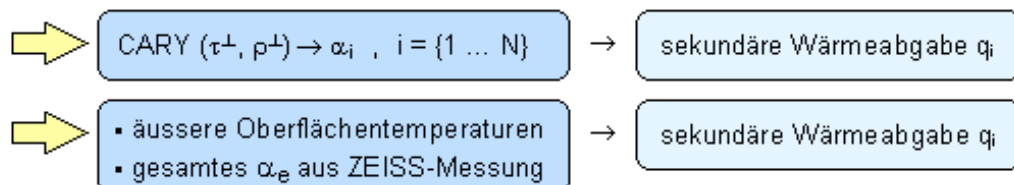
Grundsätzlich wird die Genauigkeit der beiden Messapparaturen so getestet, dass ihnen die unabhängige Messmethode mit dem **CARY**-Spektrometer gegenübergestellt wird. Mit diesem werden die Konstituenten (Grauglas, Floatglas) optisch vollständig charakterisiert und anschliessend die Eigenschaften des gesamten Elementes rechnerisch gemäss EN410 [20] und EN673 [21] ermittelt.

Bei beiden Experimenten wird anschliessend die Übereinstimmung geprüft, s. Schema in **Abbildung 4.1**:

##### • Optisches Experiment



##### • Thermisches Experiment



**Abb. 4.1:** Mit dem CARY-Spektrometer wird das zerlegte 2-fach-Glas optisch vollständig charakterisiert und anschliessend werden die Eigenschaften des gesamten Elementes rechnerisch ermittelt. Die beiden Messmethoden, die je damit überprüft werden sollen, sind demgegenüber zerstörungsfrei.



## 2.4.2 OPTISCHE CHARAKTERISIERUNG DER KONSTITUENTEN

### GRAUGLAS UND FLOATGLAS MIT DEM CARY

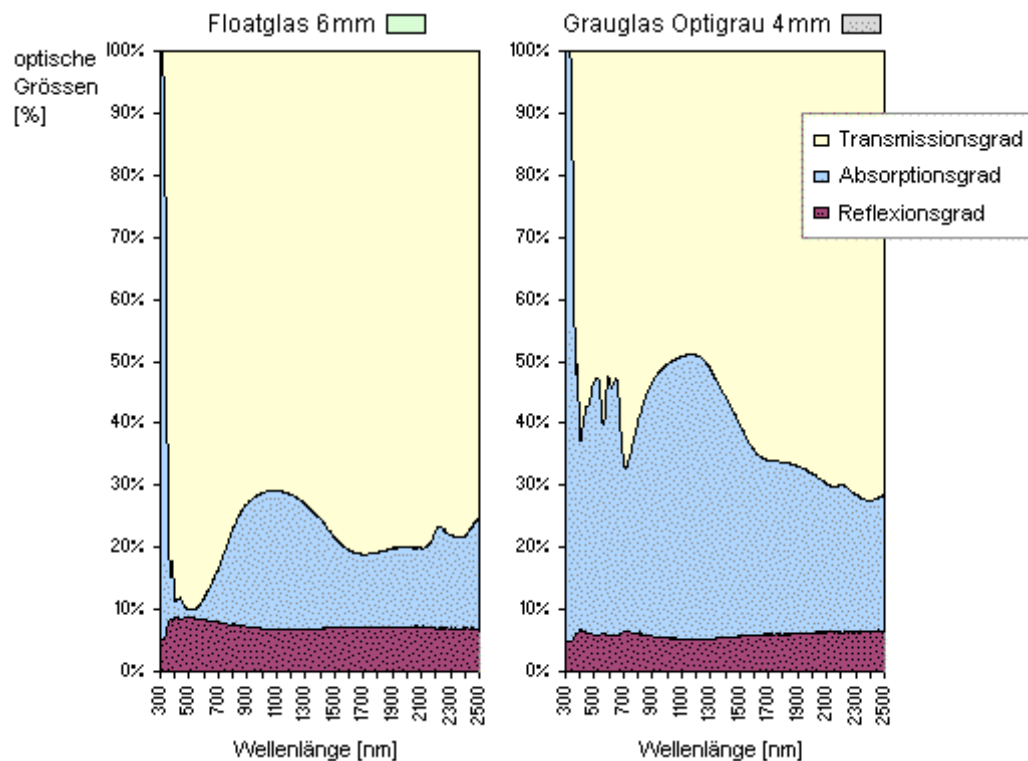
#### 2.4.2.1 Transmissionsgrad und Reflexionsgrad

Unser Prüfling besteht aus zwei unbeschichteten monolithischen Gläsern, jedoch von je unterschiedlicher Qualität:

Grauglas Optigrau , Dicke  $d = 4\text{ mm}$

Floatglas , Dicke  $d = 6\text{ mm}$

Mit dem CARY-Spektrometer werden der Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  und der Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  zwischen  $\lambda = 300$  und  $2500\text{ nm}$  vermessen und zwar für senkrechten Einfallswinkel  $\varphi = 0^\circ$ . In der **Abbildung 4.2** sind diese Messungen an den zwei Messproben aufgetragen:



**Abb. 4.2:** Mit dem CARY-Spektrometer gemessener Transmissionsgrad  $\tau$ , Reflexionsgrad  $\rho$  sowie Absorptionsgrad  $\alpha = 1 - \tau - \rho$  in gestapelter Darstellung.

Mit dieser Messung sind die optischen Eigenschaften von planparallelen Scheiben dieses Materials im gemessenen Wellenlängenbereich vollständig charakterisiert. Es werden sich je die optischen Konstanten ( $n$ ,  $k$ ) extrahieren und sich somit das winkelabhängige Verhalten beschreiben lassen. Zudem wird es möglich sein, die beiden Komponenten im Verbund zu beschreiben.

In der **Tabelle 1** werden zunächst noch die mit der Globalstrahlung  $S_\lambda$  gewichteten solaren Werte für senkrechten Einfallswinkel (EN 410 [20]) angegeben:

	Floatglas (6 mm)			Grauglas (4 mm)			
$\tau_e, \rho_e, \alpha_e$	0.807	0.078	0.115	0.556	0.059	0.385	Solar
$\tau_v, \rho_v, \alpha_v$	0.892	0.085	0.023	0.554	0.060	0.387	Visuell

**Tab. 1:** Transmissionsgrad, Reflexionsgrad und Absorptionsgrad, die man erhält durch Gewichtung der Spektren in **Abbildung 4.2** mit der spektralen Verteilung der Sonnenstrahlung  $S_\lambda$  gemäss EN 410 [20].

### 2.4.2.2 Optische Konstanten n und k

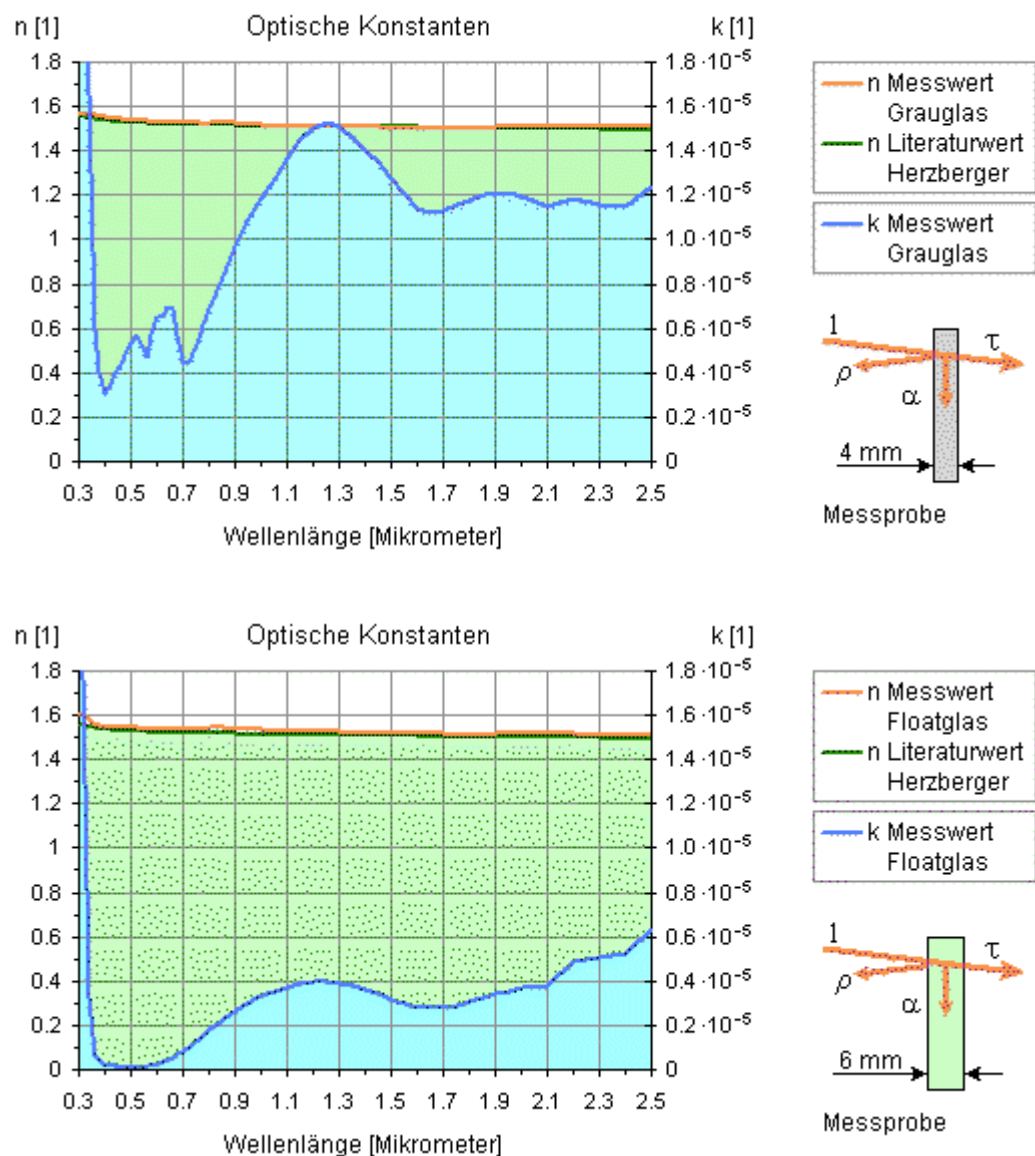
Ein unbeschichtetes Substrat ist symmetrisch und daher vollständig charakterisiert durch die zwei unabhängig gemessenen Grössen  $\tau$  und  $\rho$  [18]. Die beiden **optischen Konstanten** erhält man aus:

$$(1) \quad n = \frac{1 + \sqrt{R_s}}{1 - \sqrt{R_s}}, \quad k = \frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \cdot \ln t_s,$$

worin sich die internen optischen Eigenschaften Transmissionsgrad  $t_s$  und Grenzflächenreflexion  $R_s = 1 - T_s$  ausdrücken lassen durch die extern gemessenen optischen Eigenschaften  $\tau$  und  $\rho$ :

$$(2) \quad t_s = \frac{\rho - R_s}{R_s \cdot \tau}, \quad R_s = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot (2 - \rho) \cdot \rho}}{2 \cdot (2 - \rho)}, \quad \beta = \tau^2 - \rho^2 + 2 \cdot \rho + 1.$$

In der **Abbildung 4.3** ist für die beiden Glassorten Grauglas und Floatglas das Resultat des mit den Formeln (1) bis (2) skizzierten Vorgehens dargestellt:

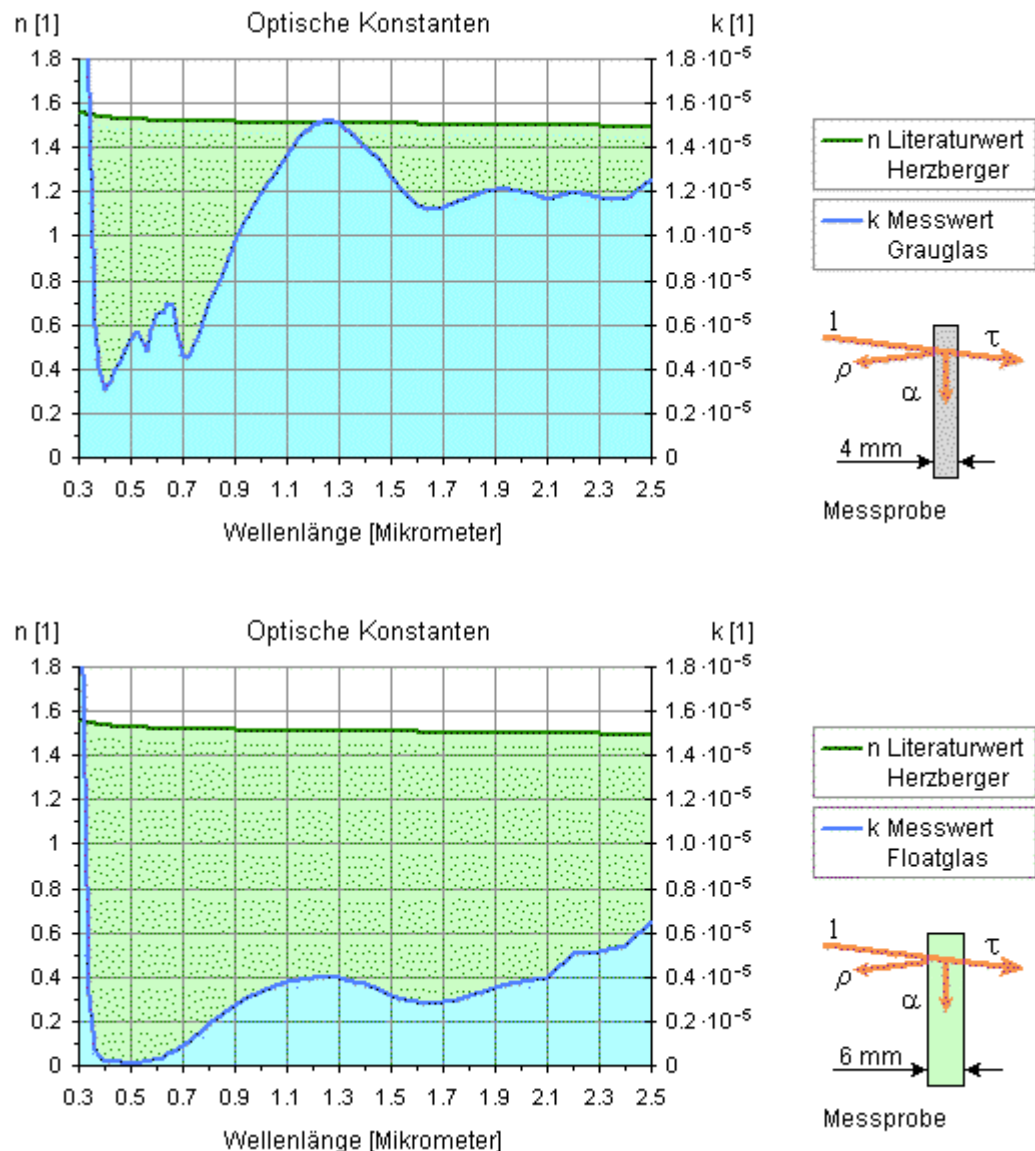


**Abb. 4.3:** Aus dem gemessenen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  und Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  ermittelte optische Konstanten  $n(\lambda)$  und  $k(\lambda)$  für Grauglas (oben) und Floatglas (unten). Der Brechindex von Kronglas ist in der Literatur gut dokumentiert [19], hängt höchstens schwach von der Glassorte ab und ist in der Figur ebenfalls dargestellt.

Wenn der Brechindex  $n$  als bekannt vorausgesetzt wird, reicht die Messung des Transmissionsgrades  $\tau$  allein aus, um die verbleibende optische Konstante  $k$  festzulegen.\*

Das Resultat dieses Vorgehens ist in der **Abbildung 4.4** dargestellt, wo nur noch die optische Konstante  $k$  und zwar aus der Messung des Transmissionsgrades  $\tau$  allein extrahiert wird.

Der Vergleich der **Abbildung 4.3** und **4.4** zeigt zunächst, dass die mit zwei Freiheitsgraden arbeitende Auswertung den Literaturwert des Brechindex  $n$  innerhalb 2% wiedergibt. Bei der Auswertungsmethode mit einem Freiheitsgrad führt so die Vorgabe des Brechindex  $n$  auch für die optische Konstante  $k$  zu einer Übereinstimmung der beiden Vorgehensweisen innerhalb weniger Prozente.



**Abb. 4.4:** Aus dem gemessenen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  ermittelte optische Konstante  $k(\lambda)$ . Der Auswertung wurde hinsichtlich des Brechindex  $n(\lambda)$  der in der Literatur dokumentierte Verlauf gemäss Herzberger\*\* [19] zugrundegelegt. Dieser Brechindex ist ebenfalls dargestellt. Der Vergleich mit **Abbildung 4.3** zeigt, dass das dortige Verfahren zweier Freiheitsgrade eine hohe Sensitivität besitzt, beide optischen Konstanten  $n$  und  $k$  festzulegen.

\* Die Grenzflächenreflexion ist dann durch  $R_s = (n-1)^2/(n+1)^2$  festgelegt und Gegenstand der Messung ist so nur noch die Abschwächung infolge Dämpfung im Substrat, beschrieben durch den Extinktionskoeffizienten  $k$ .

\*\* Berechnung des Brechindex  $n$  für Kronglas nach Herzberger im NUV-NIR Bereich (0.31 - 4.6 Mikrometer):

$$n(\lambda) = 1.5130 - 0.003169 \cdot \lambda^2 + 0.003962 / \lambda^2, \quad \lambda \text{ in [Mikrometer]}$$

## 2.4.3 OPTISCHES EXPERIMENT

### BESTIMMUNG DER WINKELABHÄNGIGEN OPTISCHEN GRÖSSEN DES GANZEN GLASELEMENTES

#### 2.4.3.1 Berechnung aus den gemessenen Eigenschaften der Einzelkomponenten (Methode mit $n$ und $k$ aus der CARY-Messung)

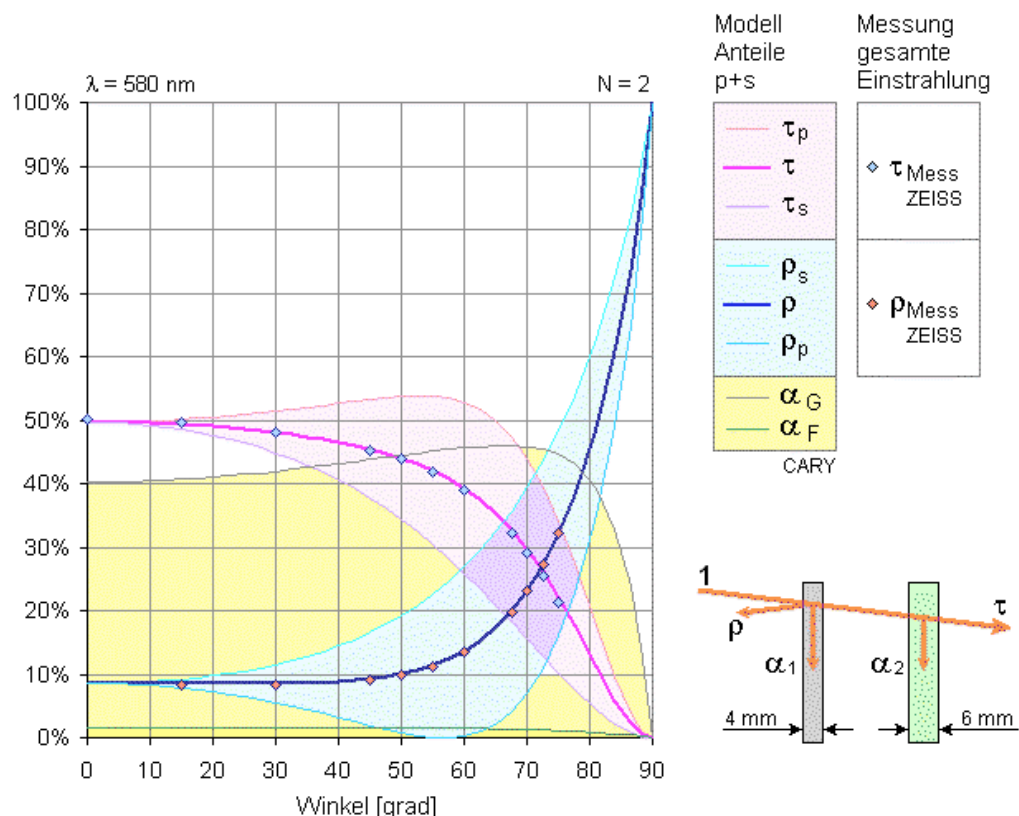
Die optischen Eigenschaften einer Probe aus einem monolithischen Substrat schwacher Absorption werden vollständig beschrieben durch die zwei Materialparameter  $n$  und  $k$  [18]:

Der Realteil des Brechindex  $n$  einerseits beschreibt die Grenzflächenreflexion  $R_s$  bzw.  $T_s = 1 - R_s$  über die **Fresnel-Formeln**, die in zwei Polarisationsrichtungen formuliert sind.

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.

Nicht nur bei den Einzelkomponenten Grauglas und Floatglas müssen die Mehrfachreflexionen berücksichtigt werden, sondern auch bei ihrer Einbettung zu einem 2-fach-Glas. Die Rechnung erfolgt zudem für alle Wellenlängen – die EN410 [20] gibt 56 Intervalle vor – und beide Haupt-Polarisationsrichtungen. Erst am Schluss der Berechnungen erfolgen die Gewichtungen: Für solare Grössen wird über die Wellenlänge gemäss der Globalstrahlung  $S_\lambda$  gewichtet und schliesslich werden die beiden Polarisationsrichtungen gemäss der Polarisation der Quelle gewichtet.

Die ausgezogenen Linien in **Abbildung 4.5** und **Abbildung 4.6** zeigen das Resultat der geschilderten Vorgehensweise. In **Tabelle 2** sind die numerischen Werte für senkrechten Einfallswinkel angegeben.



**Abb. 4.5:** Konfiguration Grauglas-Floatglas: Berechnetes winkelh abhängiges Verhalten der optischen Grössen  $\tau$ ,  $\rho$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  bei einer Wellenlänge von 580 nm, wie es sich aus den Fresnel-Formeln und den optischen Konstanten  $n$  und  $k$  ergibt (ausgezogene Linien). Ebenfalls eingetragen sind die Messpunkte (+) aus der direkten winkelh abhängigen Messung (ZEISS) von  $\tau$  und  $\rho$ . Für die solaroptischen Werte werden solche wellenlängenabhängigen Datensätze über das solare Spektrum  $S_\lambda$  gewichtet gemäss EN410 [20] und aufsummiert (siehe Abbildung 4.5).

Grauglas-Floatglas			Floatglas-Grauglas		
$\tau_e = 0.458$	$\rho_e = 0.084$		$\tau_e = 0.458$	$\rho_e = 0.117$	
$\alpha_{e1} = 0.401$	$\alpha_{e2} = 0.058$	$\alpha_e = 0.459$	$\alpha_{e1} = 0.120$	$\alpha_{e2} = 0.305$	$\alpha_e = 0.425$
$\tau_v = 0.497$	$\rho_v = 0.086$	(visuell)	$\tau_v = 0.497$	$\rho_v = 0.132$	(visuell)

**Tab. 2:** Solaroptische Grössen bei senkrechtem Einfallswinkel  $0^\circ$ . Der Transmissionsgrad  $\tau_e$  geht direkt in den g-Wert ein. Die Einzelabsorptionen liefern bei bekannten Wärmetransporteigenschaften die Information, wieviel Energie als sekundäre Wärmeabgabe nach innen fliesst. Die Berechnung samt Berücksichtigung der Materialwerte erfolgt gemäss EN410 [20].

#### 2.4.3.2 Winkelabhängige Messung des ganzen Elementes mit dem ZEISS-Spektrometer

Mit der Versuchsanordnung [16] werden die optischen Grössen direkt und bei festen Winkeln vermessen. In **Abbildung 4.5** und **4.6** sind diese Messwerte (+) aufgetragen und werden der rechnerischen Methode (s. Abschnitt 3.1) gegenübergestellt. In **Tabelle 3** sind die numerischen Werte für senkrechten Einfallswinkel angegeben.

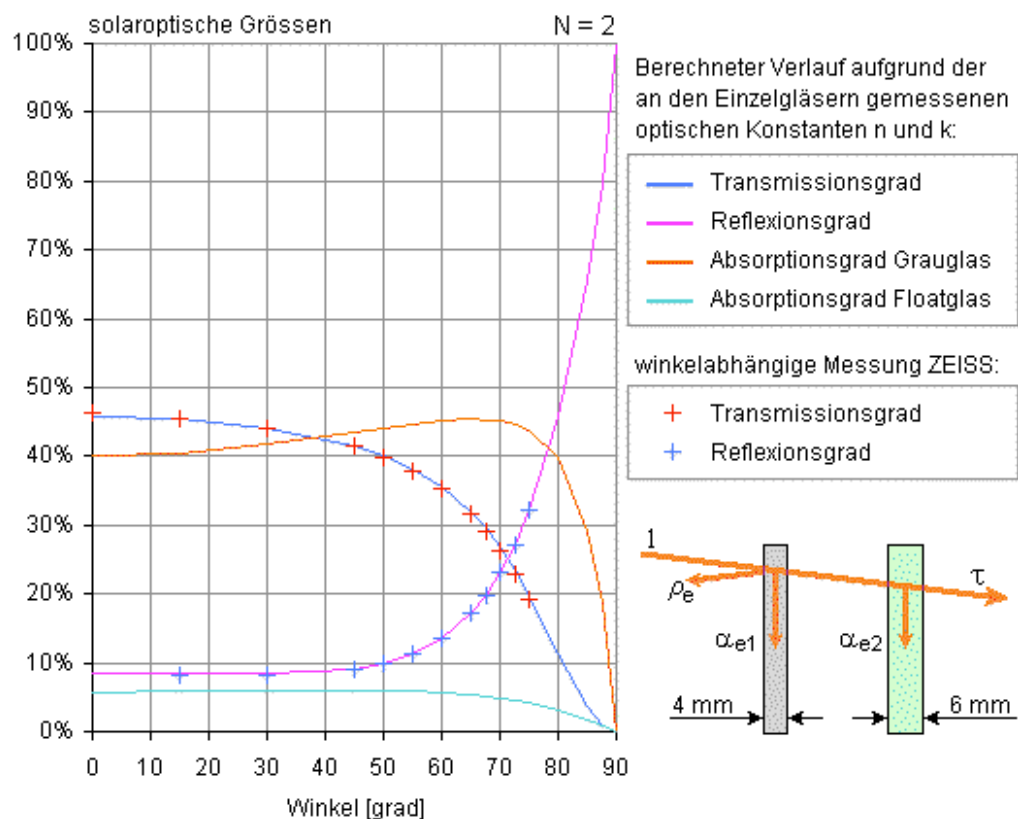
##### Grauglas-Floatglas

$\tau_e = 0.462$     $\rho_e = 0.083$     $\alpha_e = 0.455$   
 $\tau_v = 0.499$     $\rho_v = 0.084$    (visuell)

##### Floatglas-Grauglas

$\tau_e = 0.462$     $\rho_e = 0.117$     $\alpha_e = 0.421$   
 $\tau_v = 0.499$     $\rho_v = 0.132$    (visuell)

**Tab. 3:** Solaroptische Grössen bei senkrechtem Einfallswinkel  $0^\circ$ . Der Transmissionsgrad  $\tau_e$  geht direkt in den g-Wert ein. Die Gesamtabsorption liefert als Teilinformation, wie viel Energie das Element über sekundäre Wärmeabgabe abgibt. Die Zusatzinformation, wieviel davon nach innen fliesst, liefert das thermische Experiment [17].



**Abb. 4.6:** Konfiguration Grauglas-Floatglas: Berechnetes winkelabhängiges Verhalten der solaroptischen Grössen  $\tau$ ,  $\rho$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , wie es sich aus den Fresnelformeln und den optischen Konstanten  $n$  und  $k$  ergibt (ausgezogene Linien). Ebenfalls eingetragen die Messpunkte (+) aus der direkten winkelabhängigen Messung von  $\tau$  und  $\rho$ . In beiden Methoden wurde von wellenlängenabhängigen Datensätzen ausgegangen und gemäss EN410 [20] über das solare Spektrum  $S_\lambda$  gewichtet.

### 2.4.3.3 Vergleich der beiden Methoden

Die Übereinstimmung der beiden unabhängigen Methoden liegt im Prozentbereich. Die Modellierung auf der Basis der mit dem CARY gewonnenen optischen Konstanten ( $n$ ,  $k$ ) für die beiden Konstituenten Grauglas und Floatglas gibt das Resultat der direkten Messung mit dem ZEISS-Spektrometer präzise wieder. Somit bewährt sich die Messprobe zunächst als Standard für das optische Experiment.

Nun wird die Eignung desselben Elementes als Standard im thermischen Experiment dargelegt. In diesem Experiment interessieren nur noch die solaren Werte der optischen Grössen, wie sie etwa in **Abbildung 4.6** dargestellt sind.

## 2.4.4 THERMISCHES EXPERIMENT BESTIMMUNG DER SEKUNDÄREN WÄRMEABGABE $Q_i$ UND DES G-WERTES

### 2.4.4.1 Rechnerisch aus den Daten der Einzelkomponenten (CARY-Daten)

Die Berechnung ausgehend von den Einzelkomponenten samt Berücksichtigung der Materialwerte erfolgt gemäss EN 410 [20] und EN 673 [21]. Das Resultat ist in **Tabelle 4** dargestellt:

	Grauglas-Floatglas	Floatglas-Grauglas
	$g\text{-Wert} = \tau_e + q_i = 0.458 + 0.089 = 0.547$	$g\text{-Wert} = \tau_e + q_i = 0.458 + 0.204 = 0.662$
<b>Tab. 4:</b>	Solaroptische Werte aus dem optischen Experiment (Rechnung aus $n$ , $k$ von CARY-Messung).	

Die Berechnung wird in Kenntnis der Materialwerte  $n$  und  $k$  winkelabhängig durchgeführt und ergibt den in **Abbildung 4.7** grün dargestellten Verlauf der sekundären Wärmeabgabe  $q_i$  (untere Reihe) bzw. des  $g$ -Wert (obere Reihe).

### 2.4.4.2 Aus dem thermischen Experiment und den solaroptischen Messwerten optischen Messdaten des ganzen Elementes (ZEISS-Daten)

Der Transmissionsgrad  $\tau_e$  wird hier der zerstörungsfreien Messung mit dem **Zeiss-Spektrometer** entnommen. Ebenso wird der dort ermittelte Gesamtabsorptionsgrad  $\alpha_e$  als einzuhaltende Randbedingung verwendet.

Der Gesamtabsorptionsgrad liefert eine Teilinformation, wie viel Energie das Element über sekundäre Wärmeabgabe abgibt. Die notwendige Zusatzinformation, wie viel davon als Wärmeabgabe nach innen  $q_i$  fließt, liefert das thermische Experiment gemäss [17]. Das Resultat lautet ist in **Tabelle 5** dargestellt:

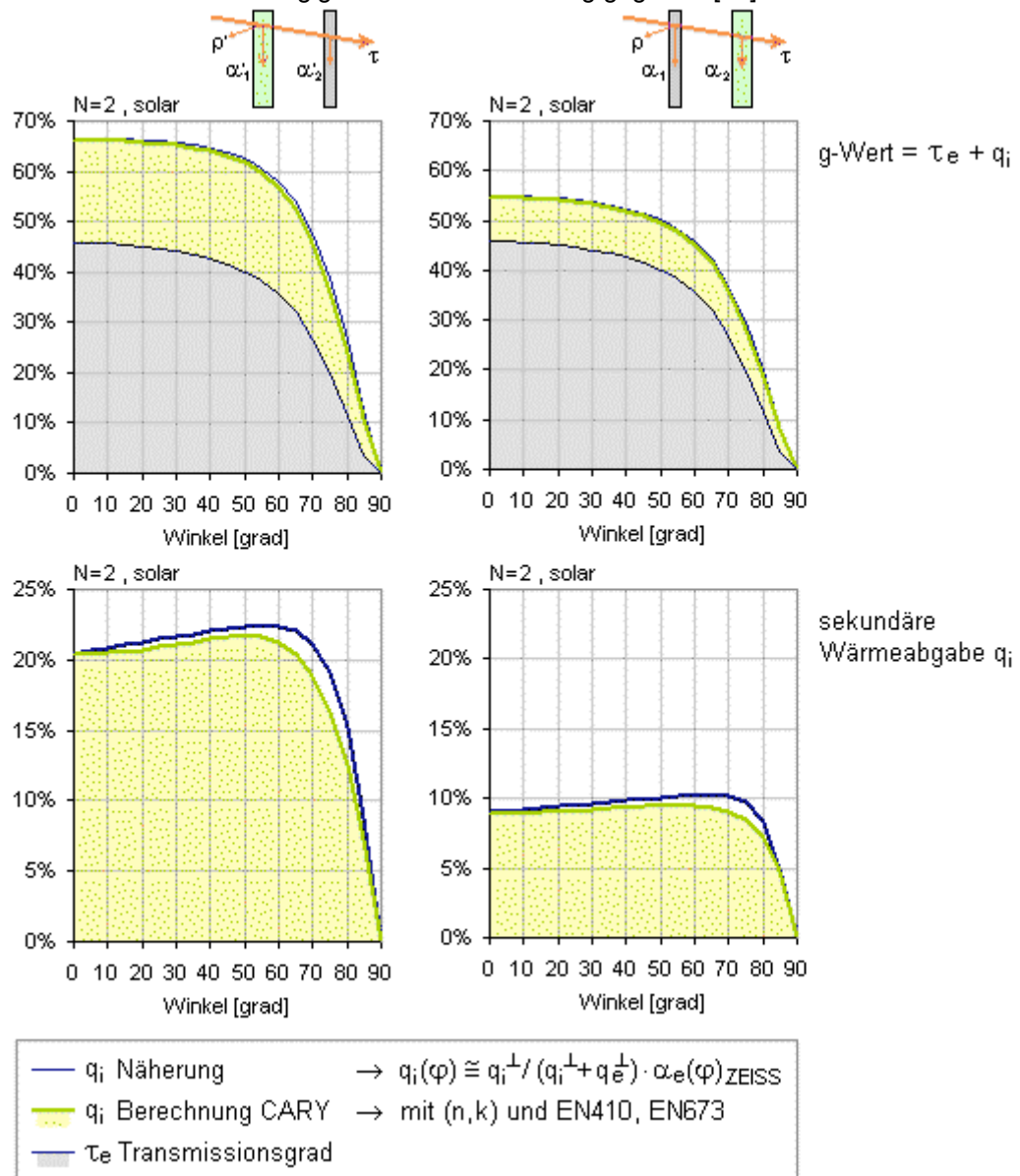
	Grauglas-Floatglas	Floatglas-Grauglas
	$g\text{-Wert} = \tau_e + q_i = 0.462 + 0.090 = 0.552$	$g\text{-Wert} = \tau_e + q_i = 0.462 + 0.204 = 0.666$
<b>Tab. 5:</b>	Solaroptische Werte aus dem thermischen Experiment.	

Zur Bestimmung des winkelabhängigen Verhaltens wird die in [17] angegebene Approximation gemacht, wonach die sekundäre Wärmeabgabe  $q_i$  abklingen möge gemäss der gemessenen Gesamtabsorption  $\alpha_e$  – ausgehend von der bekannten Aufteilung bei einem Winkel von  $0^\circ$ . In der **Abbildung 4.7** wird diese Approximation der exakten Berechnung mittels Fresneltheorie gegenübergestellt. Die Näherung überschätzt bei mittleren Winkeln den Eintrag etwas. Vergleicht man die hemisphärischen Werte bei isotroper Einstrahlung, so findet man eine Abweichung unterhalb 1%.

### 2.4.4.3 Vergleich der beiden Methoden

Im dargelegten Versuch liegt die Übereinstimmung der beiden unabhängigen Methoden bei senkrechtem Einfallswinkel  $\varphi = 0^\circ$  bei 1%, siehe **Tabelle 4+5** sowie **Abbildung 4.7**. Das thermische Experiment hat den Vorteil, dass das Element nicht zerlegt werden muss, doch ist bei diesem die Unsicherheit höher: Es gehen Temperaturmessungen ein und weiter auch das Spektrum der solaren Quelle, welches eine Approximation an die Sonne darstellt.

Die rechnerische Methode (CARY) [20, 21] liefert die sekundäre Wärmeabgabe  $q_i$  bzw. den g-Wert für alle Einfallswinkel. Das thermische Experiment könnte wohl bei anderen Einfallswinkeln durchgeführt werden, doch würde infolge der abklingenden Absorption die Temperaturmessung kritisch einfließen. Deshalb wird hier für die Winkelabhängigkeit zu einer Näherung gegriffen [17].



**Abb. 4.7:** Getestet wurden im Experiment die beiden Methoden bei senkrechtem Einfallswinkel  $\varphi = 0^\circ$ . Dort liegt die Übereinstimmung im Versuch bei 1%. Die Berechnung ausgehend von den optischen Konstanten  $n$  und  $k$  (CARY) gibt auch die anderen Winkel wieder (grüne Kurven). Die Abweichung der Näherung (dunkelblau) bei mittleren Winkeln kann nicht dem thermischen Experiment zugeschrieben werden, weil hier ausgehend vom Messwert bei  $\varphi = 0^\circ$  eine rechnerische Näherung gemacht wird (Abklingverhalten soll ähnlich der Kurve  $\alpha_e(\varphi)$  erfolgen).



### **3. Diskussion und Schlussfolgerungen**

#### **Neue Beschichtungen**

In Mehrschichtsystemen, die im Bereich der Sonnenschutzfenster Anwendung finden, sind die Metallschichten meist in Metalloxidschichten eingebettet. Um die unerwünschte Oxidation dieser Metallschichten, hier Silber, zu vermeiden wurde der Einfluss von dünnen Schutzschichten am Beispiel Titan untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine dünne Titanschicht zwischen der Silber- und der folgenden Titandioxidschicht eine Oxidation der Silberschicht verhindern kann. Nachdem die Titanschicht aber während der nachfolgenden Abscheidung zu Titandioxid oxidiert wird, hat sie keinen Einfluss auf das optische Verhalten des ganzen Schichtsystems.

#### **Sonnenschutzbeschichtungen**

Die entwickelten Sonnenschutzschichten, die auf der Theorie zur optimalen spektralen Transmission [12] beruhen, können eine Überhitzung von Gebäuden verhindern. Diese Schichten weisen eine Reduktion der solaren Einstrahlung von 17% bis 29% gegenüber kommerziellen, derzeit auf dem Markt erhältlichen Sonnenschutzfenstern auf. Diese Sonnenschutzschichten sind Mehrschichtsysteme, die sowohl Materiale als auch Methoden verwenden, die bereits industrielle Anwendung in kommerziellen Sonnenschutzfenstern finden.

#### **Messapparaturen**

Die Messapparatur zur winkelabhängigen Bestimmung der optischen Eigenschaften von Isoliergläsern wurde getestet an einer Messprobe (2-fach-Glas, Floatglas-Grauglas), die mit etablierter Theorie mit grosser Genauigkeit modelliert werden kann, worin die Modellparameter  $n$  und  $k$  mit einer unabhängigen Messmethode bestimmt wurden. Es wurde eine ausgezeichnete Übereinstimmung gefunden, sodass jetzt ein abgesicherter Messstandard zur Verfügung steht.

Die Messapparatur zur Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe wurde ebenfalls erfolgreich angewandt auf diese Messprobe. Übereinstimmung wurde gefunden zu dem unabhängigen zerlegenden Verfahren aus rein solaroptischen Daten, bei dem keine thermische Messung erfolgt.



## Symbolverzeichnis

$g$	g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad)
$\tau$	Transmissionsgrad
$\tau_e$	solarer Transmissionsgrad
$\tau_v$	Lichttransmissionsgrad
$\rho$	Reflexionsgrad
$\rho_e$	solarer Reflexionsgrad
$\rho_v$	Lichtreflexionsgrad
$\alpha_e$	solarer Absorptionsgrad
$q_i$	sekundäre Wärmeabgabe nach innen
$\lambda$	Wellenlänge
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeitskurve
$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$	Normspektralwertanteile
$S_\lambda$	Sonnenstrahlung
$D_{65}(\lambda)$	Normlichtart
$\tau_{min}(\lambda)$	neue Transmissionsfunktion
$\varphi$	Einfallswinkel
$n$	Brechungsindex
$k$	Extinktionskoeffizient
$R_s$	Grenzflächenreflexion
$T_s$	Grenzflächentransmission
$t_s$	interner Transmissionsgrad

## Referenzen

- [1] I. Mack, P. Oelhafen, A. Romanyuk, R. Steiner, **Jahresbericht 2007 – Programm Rationelle Energienutzung in Gebäuden im Auftrag des Bundesamts für Energie, BfE-Projekt Nr. 100761** (2007)
- [2] W. Zhang, Y. Li, S. Zhu and F. Wang, *Influence of argon flow on TiO<sub>2</sub> photocatalyst film deposited by dc reactive magnetron sputtering*. **Surface and Coatings Technology**, 182: 192 - 198, 2004
- [3] A. Klöppel, B. Meyer and J. Trube, *Influence of substrate temperature and sputtering atmosphere on electrical and optical properties of double silver layer systems*. **Thin Solid Films**, 392: 311 – 314, 2001
- [4] R. J. Martin-Palma, L. Vazquez, J. M. Martinez-Duart and Malats-Riera, *Silver-based low-emissivity coatings for architectural windows: Optical and structural properties*. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 53: 55 – 66, 1998
- [5] R. J. Martin-Palma and J. M. Martinez-Duart, *Ni-Cr passivation of very thin Ag films for low-emissivity multilayer coatings*. **J. Vac. Sci. Technol. A**, 17(6): 3449 – 3451, 1999
- [6] T. Okamura, S. Fukuda, K. Koike, H. Saigou, M. Yoshikai, M. Koyama, T. Misawa and Y. Matsuzaki, *Optical filters for plasma display panels using organic dyes and sputtered multilayer coatings*. **J. Vac. Sci. Technol. A**, 19(4): 1090 – 1094, 2001
- [7] E. Kusano, J. Kawaguchi and K. Enjouji, *Thermal stability of heat-reflective films consisting of oxide-Ag-oxide deposited by dc magnetron sputtering*. **J. Vac. Sci. Technol. A**, 4(6): 2907 – 2910, 1986
- [8] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*. **Academic Press**, 1<sup>st</sup> edition, 1997
- [9] X.-Y. Gao, S.-Y. Wang, J. Li, Y.-X. Zheng, R.-J. Zhang, P. Zhou, Y.-M. Yang and L.-Y. Chen, *Study of structure and optical properties of silver oxide films by ellipsometry, XRD and XPS methods*. **Thin Solid Films**, 455 – 456: 438 – 442, 2004
- [10] J.-H. Qiu, P. Zhou, X.-Y. Gao, J.-N. Yu, S.-Y. Wang, J. Li, Y.-X. Zheng, Y.-M. Yang, Q.-H. Song and L.-Y. Chen, *Ellipsometric Study of the Optical Properties of Silver Oxide Prepared by Reactive Magnetron Sputtering*. **Journal of the Korean Physical Society**, 46: S269 - S275, 2005
- [11] P. M. Martin, D. C. Stewart, W. D. Bennett, J. D. Affinito and M. E. Gross, *Multifunctional multilayer optical coatings*. **J. Vac. Sci. Technol. A**, 15(3): 1098 – 1102, 1997
- [12] P. Oelhafen, *Optimized spectral transmittance of sun protection glasses*. **Solar Energy**, 81(9): 1191 – 1195, 2007
- [13] A. Romanyuk, R. Steiner, I. Mack, P. Oelhafen and D. Mathys, *Growth of thin silver films on silicon oxide pretreated by low temperature argon plasma*. **Surface Science**, 601: 1026 – 1030, 2007
- [14] I. Mack, R. Steiner, A. Romanyuk und P. Oelhafen, *Titanium blockerlayer to prevent oxidation of silver during deposition of multilayer coatings*. **in preperation**
- [15] I. Mack, *Development of Innovative Coatings for Sun Protection Glasses Based on the Theory of the Optimal Spectral Transmittance*, Inauguraldissertation
- [16] 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

- [17] 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
- [18] M. Rubin, K. von Rottkay, R. Powles, *Window Optics*, LBNL preprint 39911 to be published in Solar Energy
- [19] M. Rubin, *Optical properties of soda lime silica glasses*, Solar Energy Materials 12 (1985), p. 275-288
- [20] EN 410, ***Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen***, Deutsches Institut für Normung (1998) D
- [21] **EN 673**, *Bestimmung des Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Wert)*, **Deutsches Institut für Normung (2000) D**

## Anhang

### Nationale Zusammenarbeit

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

### Internationale Zusammenarbeit

- FLACHGLAS Wernberg GmbH, Wernberg-Köblitz, D

### Öffentlichkeitsarbeit

- Posterpräsentation bei der inet des NCCRs.
- Ausbau der **Internetseite zum vorliegenden Forschungsprogramm** am Institut für Physik:  
Internetseite: [www.glassdbase.unibas.ch](http://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.