

Jahresbericht 2005

# 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 Institut für 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 vom 01. Januar 2004 – bis 15. Dezember 2006

## ZUSAMMENFASSUNG

**Simulationen:** Anhand eines realen Sanierungsobjektes (Schulhaus Donnerbaum) konnten, nach einer messtechnischen Erhebung des Ist-Zustandes und deren Modellierung, nun unterschiedliche Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes simuliert werden. Es zeigt sich, dass im konkreten Fall ein Sonnenschutzglas hoher Selektivität die beste Alternative darstellt, dies auch aus einer integralen Sichtweise, d.h. innerhalb eines Gesamtkonzeptes weiterer Massnahmen.

**Messapparaturen:** Die Messapparatur zur winkelabhängigen Bestimmung der optischen Eigenarten von Isoliergläsern hat sich im Einsatz zur routinemässigen Datenerfassung bewährt. Eine neue Messapparatur zur Bestimmung der sekundären Wärmeabgabe und des winkelabhängigen g-Wertes wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Damit können die Isoliergläser bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes und des Farbeindruckes umfassend charakterisiert werden. Eine webgestützte Datenbank mit raschem Zugriff auf alle diese Daten wurde in Betrieb genommen.

**Neue Beschichtungen:** In rechnerischen Simulationen konnten Schichtfolgen gefunden werden, die unsere vorgegebene Idealtransmission mit einer Selektivität von  $\tau_e/\tau_v = 0.33$  erreichen. Wird eine hohe Lichttransmission benötigt, kann dies entweder zulasten des Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  erfolgen, oder die Schichtanzahl muss erhöht werden.



## Inhalt

<b>Projektziele</b>	4
<b>Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse</b>	5
<b>1. Simulationen</b>	5
<b>Potential Sonnenschutzglas an einem praktischen Beispiel: Glasersatz mit Sonnenschutzglas oder flexible Verschattung? Wirksamkeit in Kombination mit verschiedenen Nachtlüftungs-Regimen</b>	
1.1 Objekt: Sanierung eines Klassenzimmers	5
1.2 Vorgehen: Simulation von Massnahmen mit dem validierten Modell	5
1.3 Simulation von Massnahmen zur Vermeidung des Eintrages	6
1.4 Simulation in Kombination mit Nachtlüftungs-Regimes Beurteilung aus der Sicht eines Gesamtkonzeptes	7
<b>2. Messanlage, Datenauswertung und Präsentation in Datenbank</b>	9
2.1 Winkelabhängiger solarer Gewinn von Isoliergläsern aus optischen und thermischen Messdaten – neue Messapparatur	9
2.2 Spektrale und winkelabhängige Bestimmung der optischen Eigenschaften von Isoliergläsern – routinemässige Datenerfassung	10
2.3 Erfahrungen mit den Messapparaturen und Messungen	11
2.4 Datenbank für optische und thermische Eigenschaften von Isoliergläsern	12
<b>3. Neue Beschichtungen – zur Realisation der Idealtransmission <math>\tau_{ideal}</math></b>	13
3.1 Optimales spektrales Transmissionsvermögen von Sonnenschutzgläsern	13
3.2 Stand der Glasindustrie	13
3.3 Theorie: Interferenz und Bandpass durch geeignete Schichtfolgen	13
3.4 Simulationen zur Realisierung von $\tau_{ideal}$	14
3.5 Experimentelle Umsetzung	16
<b>Bewertung 2005 und Ausblick 2006</b>	17
<b>Nationale und Internationale Zusammenarbeit</b>	18
<b>Öffentlichkeitsarbeit</b>	18
<b>Referenzen</b>	19

## 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. Simulationen

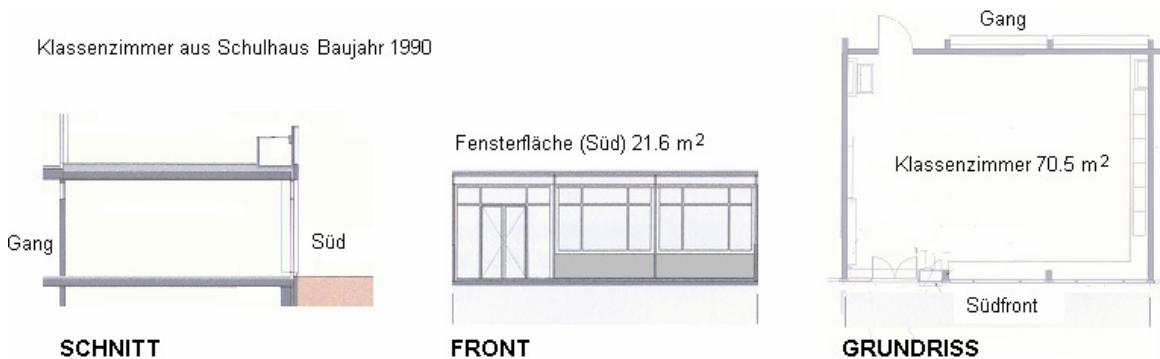
**Potential Sonnenschutzglas an einem praktischen Beispiel:  
Glasersatz mit Sonnenschutzglas oder flexible Verschattung?  
Wirksamkeit in Kombination mit verschiedenen Nachtlüftungs-Varianten**

#### 1.1 Objekt: Sanierung eines Klassenzimmers

Wie der obige Untertitel andeuten soll, wird hier die Frage behandelt, ob auf die heutige Glasarchitektur durch verbesserte Sonnenschutzgläser reagiert werden kann und soll. Bei einer Bauweise mit hohem Glasanteil entstehen hohe Energieflüsse an der Gebäudehülle (sommerliche und winterliche!), die es im Griff zu behalten gilt.

Wir behandeln hier den wichtigen Fall einer **Sanierung**, eines bestehenden Gebäudes also mit dem Problem der sommerlichen Überhitzung. Bei einer **Sanierung** ist – im Gegensatz zu einem **Neubau** – ein Konzeptrahmen schon vorgegeben. Konkret lautet die **Aufgabenstellung** somit, welches die effizientesten Sanierungsmassnahmen sind, mit welchen aus einer integralen Sichtweise reagiert und eingegriffen werden kann in ein bestehendes System.

Bei dem untersuchten Objekt handelt es sich um ein **Schulhaus**, bei dem sich die Nutzer über die sommerliche Überhitzung beklagten, insbesondere in den **Klassenzimmern**. Ein solches Klassenzimmer stellt unseren Modellraum dar. In Figur 1.1 sind die Grunddaten dieses Klassenzimmers dargestellt. Das Schulhaus enthält insgesamt 12 Klassenzimmer dieses Typs:



**Fig. 1.1:** Klassenzimmer, für das durch eine Messkampagne im Sommer 2004 und anschliessende dynamische Simulation die Modellparameter bestimmt wurden, so dass nun Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes in ihrer Wirksamkeit untersucht werden können.

#### 1.2 Vorgehen: Simulation von Massnahmen mit dem validierten Modell

Bei diesem Schulhaus haben wir im Sommer 2004 die Raumtemperaturen und die äusseren klimatischen Bedingungen während einer längeren sommerlichen Hitzephase gemessen. Die anschliessende dynamische Simulation mit dem Programm **CAPSOL** [7] gibt das Verhalten der Klassenzimmer nach **Anpassung der Modellparameter** gut wieder [5], sodass wir nun in der Lage sind, die Wirkung verschiedener Massnahmen mit dem Programm zu untersuchen.

Die erfasste Klimaepisode startet am 13. Juli mit einer hochsommerlichen einstrahlungsreichen Hitzeperiode. Das Gebäude befindet sich an diesem Startpunkt nach einer längeren Schlechtwetterphase vorkonditioniert auf einem Niveau komfortabler Raumtemperatur. Das Aufschaukeln der Temperatur kann somit jetzt beobachtet werden und zwar später sogar noch ein zweites mal, da um den 25. Juli herum ein Einbruch der Einstrahlung erfolgt, dem wieder Hochsommerwetter folgt bis zum 4. August, welcher das Ende des betrachteten Intervall es darstellt.

### 1.3 Simulation von Massnahmen zur Vermeidung des Eintrages: Glasersatz und flexible Verschattung

#### Glasersatz

Es wurde zunächst die Temperaturabsenkung gegenüber dem Ist-Zustand (Heglas) simuliert, die zustande kommt unter Einsatz von zwei Sonnenschutzgläsern, die mit einer Selektivität um  $\tau_e/\tau_v = 0.5$  herum dem aktuell besten Stand kommerziell erhältlicher Gläser entsprechen (Tabelle 1.1):

Glasname	Typ	$g_{\perp}$	$\tau_{e\perp}$	$\tau_{v\perp}$	U-Wert
Heglas (Ist-Zustand)	2-fach 1990	61%	53%	76%	1.6 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Pilkington h001004	2-fach aktuell	39%	35%	69%	1.1 W/(m <sup>2</sup> ·K)
MGT	3fach (Heat-Mirror)	38%	32%	62%	0.7 W/(m <sup>2</sup> ·K)

Tab. 1.1: In die Simulation eingesetzte Glastypen.

In der Figur 1.2 sind die resultierenden mittleren Raumtemperaturen in der Präsenzzeit von 10:00-16:00 während der betrachteten Hitzephase angegeben. In blau die Absenkung gegenüber dem Ist-Zustand. Der Temperaturhub erfolgt ausgehend von der gemessenen Umgebungstemperatur (Hoftemperatur), deren Mittelwert in dieser Phase bei 23.8°C lag:

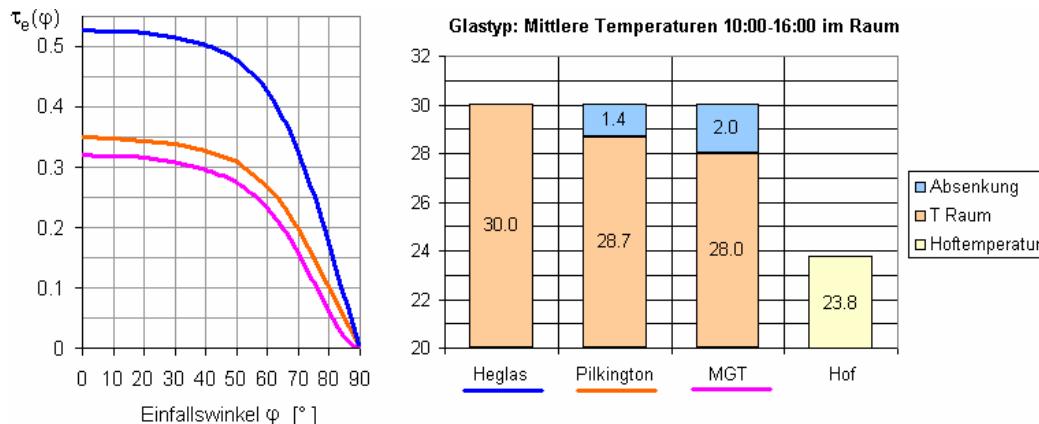


Fig. 1.2: Links: Solarer winkelabhängiger Transmissionsgrad der betrachteten Gläser, der als Input für die dynamischen Simulationen dient. Beim Transmissionsgrad handelt es sich um Messungen, die am Institut für Physik durchgeführt wurden und auf unserer Glasdatenbank [6] eingesehen werden können. Rechts: Einfluss der Transmissionsgrade auf die mittlere Raumtemperatur in einem Klassenzimmer während der sommerlichen Hitzephase (Absenkung 1.4° bzw. 2.0°).

#### Storensteuerung

Als Alternative zum Glasersatz wurden unter Beibehaltung des alten Glases (Heglas) folgende drei Storen-Regimes in Tabelle 1.2 simuliert – ausgehend von der Stellung "Storen offen" [8]:

Storen-Regime	Schaltpunkt ab dem geschlossen	$g_{\perp}$ in offener Stellung	$g_{\perp}$ in geschl. Stellung	Temperatur-Absenkung
offen	$\infty$ W/m <sup>2</sup>	61%	–	0°
gesteuert	250 W/m <sup>2</sup>	61%	20%	1.8°
gesteuert	150 W/m <sup>2</sup>	61%	20%	2.4°
geschlossen	0 W/m <sup>2</sup>	–	20%	3.0°

Tab. 1.2: In der Simulation betrachtete Storenregimes. Beim Schaltpunkt handelt es sich um die auf die Südfront auftreffende Globalstrahlung in [W/m<sup>2</sup>], die mindestens erreicht werden müssen, damit die Storen geschlossen werden. Die angegebene Temperaturabsenkung ist - wie in Figur 1.2 - jene in der Aufenthaltszeit von 10:00-16:00, deren Ausgangswert 30.0°C beträgt.

Nur die beiden geschalteten Regimes stellen Alternativen zum Glasersatz dar, jedoch wurde die Variante mit Schaltpunkt 150 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung auf die südliche Fensterebene verworfen, da die Storen dann zu 84 % der Zeit geschlossen wären. Bei einem Schaltpunkt von 250 W/m<sup>2</sup> sind sie immer noch während 61 % der Zeit geschlossen.

### **Vergleich: Glasersatz oder Storensteuerung**

Zentrales Resultat an diesem Sanierungsobjekt ist, dass mit der praktikablen Storensteuerung (250 W/m<sup>2</sup>) die Absenkung der Raumtemperatur von 1.8° schwächer ausfällt als mit dem Glasersatz mit MGT. Dass weiter die Storensteuerung während 61 % der Aufenthaltszeit die Storen senkt, was die Tageslichtnutzung vermindern würde und den Betrieb von Kunstlicht nötig macht, da sie ja das ganze Spektrum während dieser Zeit ausblenden. Demgegenüber hat man infolge der hohen Selektivität des Sonnenschutzglases MGT einen hohen Pegel an visuellem Licht bei gleichzeitig hohem Sonnenschutz.

Die Storen bleiben auch unter den MGT-Gläsern ein flexibles Element, das vom Nutzer etwa aufgrund der Blendeffekte eingestellt werden kann. Während ein Regime mit Storensteuerung entweder vom Nutzerverhalten her schwer praktikabel ist, oder die Autonomie des Nutzers reduziert.

Weiter erreicht man bei einem Glasersatz mit MGT unter zusätzlichem Einsatz der Storen eine weitere Temperaturabsenkung, während bei dem ausschliesslich Storen-Regime (250 W/m<sup>2</sup>) mit dem alten Glas keine weitere Absenkung mehr möglich ist.

### *Zielkonflikt reduzierter solarer Gewinn im Winter*

Es konnte weiter gezeigt werden, dass der verminderte solare Gewinn der MGT-Gläser nicht zu einem erhöhten Heizbedarf führt, da der tiefe U-Wert den Wärmeverlust sogar soweit absenkt, dass bis zu 20% **Heizenergie gespart** werden. Somit können sich die Zusatzkosten für hochwertige Gläser insbesondere angesichts steigender Energiepreise amortisieren ohne den Zusatznutzen sommerlichen Wärmeschutzes überhaupt anzurechnen.

### *Zielkonflikt Tageslichtnutzung*

Bei Wahl einer Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux würde bei **offener** Stellung der Storen der Kunstlichtbedarf mit MGT nur leicht erhöht – aufgrund der leicht geringeren visuellen Transparenz. In der Praxis aber müssen bei dem alten Glas die Storen viel restriktiver gesenkt werden, was dort den Kunstlichtbedarf wieder erhöht: Im Sommer, damit überhaupt eine Absenkung der Raumtemperaturen stattfindet, aber auch im Winter bei tiefem Sonnenstand gegen Blendeffekte.

## **1.4 Simulation in Kombination mit Nachtlüftungs-Regimes Beurteilung aus der Sicht eines Gesamtkonzeptes**

### **Gesamtkonzept mit freier Nachtlüftung**

Somit ist bei diesem Objekt mit dem hohen Glasanteil gegen Süden der Einsatz eines hochwertigen Sonnenschutzglases eine sinnvolle **Sanierungsmassnahme**, gegenüber einem restriktiven Storenbetrieb mit dem alten Glas. Dies kann auch empfohlen werden, da es sich beim Glasersatz um eine absehbar fällige Sanierung handelt. Allein deren Zusatzkosten gegenüber einem Austausch mit einem herkömmlichen Glas wären anzurechnen und zu vergleichen mit dem kostenintensiven Sanierungsschritt etwa einer mechanische Lüftung.

Auch die Zielkonflikte Heizbedarf im Winter und Tageslichtnutzung fallen bei diesem Sanierungsobjekt zugunsten des Einsatzes eines hochwertigen Sonnenschutzglases aus.

Grundsätzlich kommt eine mechanische Lüftung oder gar eine Klimatisierung bei diesem Objekt mit unerheblichen internen Wärmelasten vom Eingriff ins Architekturkonzept, Kosten, Energieverbrauch, brandschutztechnischen Massnahmen etc. her nicht in Frage.

Die Frage der Vermeidung des Eintrages ist im Sinne der rationellen Energienutzung immer prioritär. Doch gehört das Thema der Beseitigung eines allenfalls noch bestehenden Überschusses an solarem Eintrag – beispielsweise mit einer Nachtlüftung – unwiederruflich zu einem Gesamtkonzept. Auf diese Frage der Nachtlüftungsregimes wird im nächsten Abschnitt eingegangen:

## Sonnenschutz kombiniert mit Lüftung

Im Sinne der Vermeidung des solaren Eintrages zeigt sich bei diesem Sanierungsobjekt der Glasersatz mit einem hochwertigen Sonnenschutzglas überlegen. Nur besteht vom hohen Glasanteil mit Südausrichtung her weiterhin eine Gefahr der sommerlichen Überhitzung.

Die Gewährleistung einer Nachtlüftung, um den solaren Eintrag durch Auskühlung des Gebäudes loszuwerden, ist der nächste Schritt, der ohne Zusatzenergie erfolgen kann. Ausgehend von einer Luftwechselrate Tag / Nacht von  $n = 1 \text{ h}^{-1}$  wurden drei Nachtlüftungsraten von  $n = 2, 4$  und  $6 \text{ h}^{-1}$  simuliert. Die zugehörigen Absenkungen betragen  $0.8^\circ, 1.9^\circ$  und  $2.4^\circ$ . Eine Luftwechselrate von  $n = 6 \text{ h}^{-1}$  könnte nur durch eine mechanische Lüftungsunterstützung erfolgen, ausserdem tritt ein Sättigungseffekt auf, da die Lüftung am besten gegen ein hohes  $\Delta T$  arbeitet. Die Massnahme eines Sonnenschutzglases macht eine mechanische Lüftung aber weiterhin obsolet.

Die folgende Figur 1.3 zeigt die Wirkung der Einzelmassnahmen zunächst einzeln betrachtet und weiter wenn man sie mit einer Nachtlüftung  $n = 4 \text{ h}^{-1}$  kombiniert. Es handelt sich um mittlere Tagestemperaturen während der Aufenthaltszeit 10:00-16:00. Die Figur 1.4 stellt beispielhaft eine zeitaufgelöste Simulation dar, aus der sowohl die Tagesschwankungen, als auch der generelle Temperaturanstieg während der sommerlichen Hitzephase über eine Woche sichtbar sind:

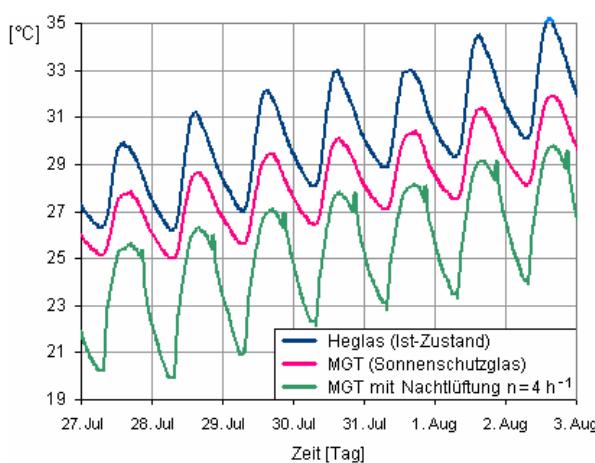
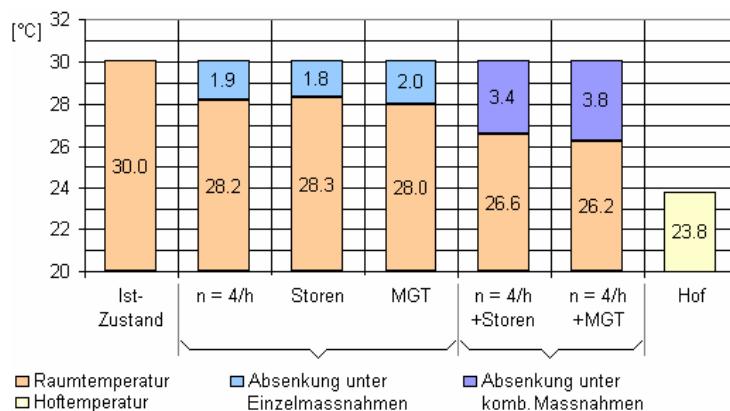
**Fig. 1.3:**

Mittlere Raumtemperaturen während einer Aufenthaltszeit von 10:00-16:00:

Gezeigt der Effekt von Sonnenschutzglas und Storensteuerung zur Verminde rung des Eintrages, sowie derjenige der Nachtlüftung.

Zunächst als Einzelmaßnahmen und anschliessend in ihrer Kombination.

Beim Sonnenschutzglas MGT kann der Eintrag mittels Storen nochmals vermindert werden.



**Fig. 1.4:**

Anstieg der Raumtemperatur im Klassenzimmer während einer sommerlichen Hitzephase.

Das Sonnenschutzglas für sich zeigt sowohl eine Reduktion der Tagestemperatur als auch der Tagesschwankungen. Beides zurückzuführen auf den geringeren solaren Eintrag.

Kommt die Nachtlüftung hinzu, so wird die Temperatur im Raum nochmals abgesenkt. Die Erhöhung der Amplitude kommt daher, dass der Raum nachts stärker an die kühlere Nachtluft gekoppelt wird.

Der Nutzer verspürt davon die Spitzen der grünen Kurve von 10:00-16:00, während der die ausgekühlte Baustuktur das Raumklima verbessert.

Zusammenfassend zeigt sich im vorliegenden Sanierungsfall eines Schulhauses, dass sich der Einsatz eines hochwertigen selektiven Sonnenschutzglases überlegen zeigt gegenüber einer Lösung, die sich bei der Verringerung des solaren Eintrages ausschliesslich auf eine flexible Abschattung abstützt. Sie verringert den solaren Eintrag sogar in einem Massen, dass zur weiteren Reduktion der Raumtemperaturen man mit einer freien Nachtlüftung auskommt, eine mechanische Lüftungsunterstützung somit hinfällig wird.

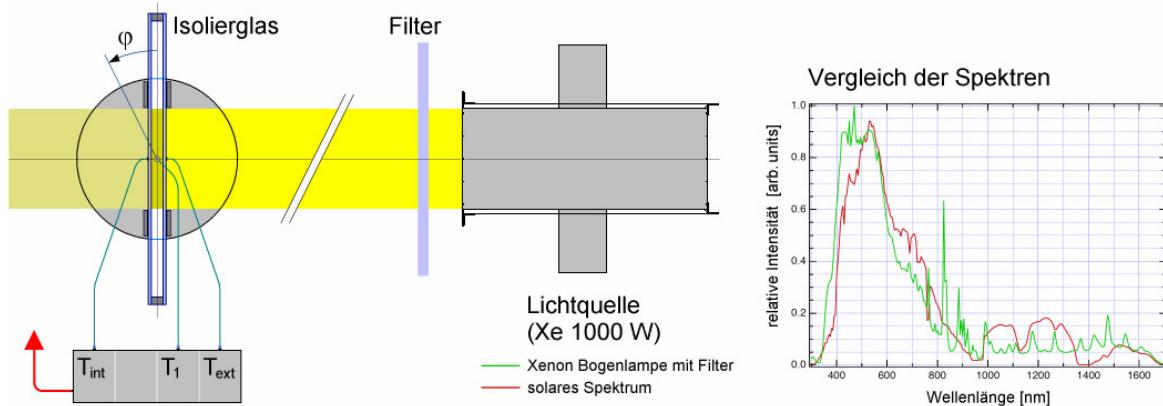
## 2. Messanlage, Datenauswertung und Präsentation in Datenbank

### 2.1 Winkelabhängiger solarer Gewinn von Isoliergläsern aus optischen und thermischen Messdaten – neue Messapparatur

Die winkelabhängigen optischen Messungen des solaren Transmissions- und Reflexionsgrades wurden im letzten Jahresbericht 2004 [5] sowie in [1] ausführlich beschrieben. Die nachfolgend beschriebene Apparatur ermöglicht zusammen mit den optischen Messungen die Bestimmung des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrades  $g(\phi)$ :

#### Messung der sekundären Wärmeabgaben

Mit der Apparatur [2] werden in einer thermischen Messung die sekundären Wärmeabgaben  $q_i(\phi)$  bzw.  $q_e(\phi)$  unter Einstrahlung einer solaren Strahlungsquelle bestimmt, wie in Figur 2.1 dargestellt:

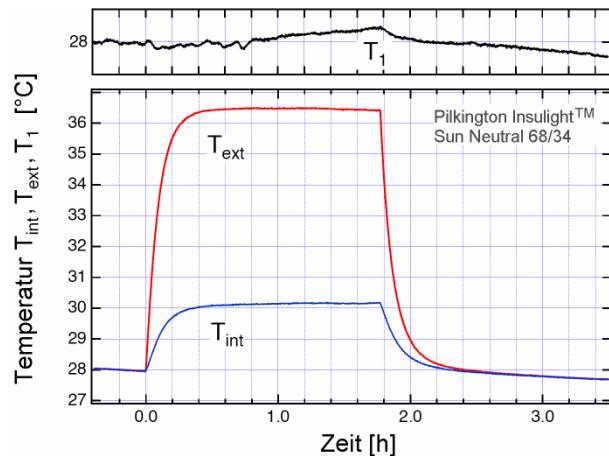


**Fig. 2.1:** Messapparatur mit deren Hilfe der totale solare Gewinnfaktors  $g(\phi)$  bestimmt wird: Das Isolierglas wird hierzu mit einer Strahlungsquelle nahe des solaren Spektrums beschienen, unter der es sich erwärmt gemäss der Absorptionen seiner Komponenten. Im Gleichgewichtszustand werden jetzt über eine Temperaturmessung der Scheibenoberflächen  $T_{int}$  bzw.  $T_{ext}$  und jene der Umgebung  $T_1$  die Wärmeabgaben nach innen und aussen  $q_i$  bzw.  $q_e$  bestimmt.

Im stationären Gleichgewicht werden die Oberflächentemperaturen  $T_{int}$  und  $T_{ext}$  des Isolierglases sowie die Umgebungstemperatur  $T_1$  gemessen (Figur 2.2). Aus den Temperaturdifferenzen zu  $T_1$  werden die Wärmeabgaben  $q_i$  und  $q_e$  nach innen bzw. aussen bestimmt. Hierfür werden die Wärmeübergangswiderstände aus der Theorie der Wärmetransportmechanismen berechnet.

**Fig. 2.2:**

Die Oberflächentemperaturen  $T_{int}$  und  $T_{ext}$  der äusseren Glasscheiben erwärmen sich unter der solaren Quelle, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Aus dem Temperatursprung zur Umgebungstemperatur  $T_1$  lassen sich nun 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  $\tau(\phi)$  und die Gesamtabsoption  $\alpha(\phi)$  bekannt sind aus der optischen Messung.



Damit ist die Aufteilung der absorbierten Strahlung  $\alpha$  nach innen bzw. aussen unter den Randbedingungen des Experimentes bestimmt. Aus unseren optischen Messungen ist andererseits  $\alpha(\phi)$  bekannt, somit die sekundären Wärmeabgaben  $q_i$  und  $q_e$  auch absolut festgelegt.

### Auswertung des $g(\varphi)$ -Experimentes

Die Umrechnung der sekundären Wärmeabgaben auf Normbedingungen ist dargestellt in [2] für den Fall von Isoliergläsern mit zwei Scheiben, woran bereits erfolgreiche Tests des Verfahrens durchgeführt wurden.

Aus dem Wärmegleichgewicht, das sich in dem Netzwerk lauter bekannter Wärmewiderstände einstellt und den oben bestimmten Wärmeabgaben  $q_i$  und  $q_e$  wird festgelegt, wie sich die totale Absorption  $\alpha(0)$  auf die beiden Glasscheiben verteilt. Diese Information der Einzelabsorptionen reicht aus, wie ebenfalls in [2] gezeigt, die sekundären Wärmeabgaben für jede andere Randbedingung auszurechnen, so auch jene unter Normbedingungen  $q_{IN}$  bzw  $q_{eN}$ .

Das Experiment wird bei senkrechtem Einfallswinkel  $\varphi = 0^\circ$  durchgeführt und somit liefert das Experiment das Verhältnis  $q_{IN}(0) / \alpha(0)$  zunächst nur bei diesem Winkel. Für andere Winkel wird die Näherung gemacht:

$$q_{IN}(\varphi) = q_{IN}(0) / \alpha(0) \cdot \alpha(\varphi)$$

Die Näherung dieses Ausdruckes besteht darin, dass angenommen wird, dass die Gesamtabsorption  $\alpha$  sich bei allen Einfallswinkeln gleich aufteilt auf die Einzelabsorptionen der Scheiben. Damit erhält man für den totalen Gesamtenergiendurchlassgrad:

$$g(\varphi) = \tau(\varphi) + q_{IN}(\varphi)$$

Die oben beschriebene Näherung für  $q_{IN}(\varphi)$  wirkt sich in zweifacher Hinsicht schwach aus: Zunächst ist die Näherung üblicherweise gut bei Winkeln zwischen  $0^\circ < \varphi < 60^\circ$ , wo der Haupteintrag der solaren Strahlung überhaupt stattfindet, weiter ist der Anteil von  $q_{IN}$  am gesamten  $g$ -Wert an sich gering.

### Ausblick

Die Umrechnung der gemessenen sekundären Wärmeabgaben auf Normbedingungen  $q_{IN}$  bzw.  $q_{eN}$  führt im Fall von zwei Scheiben über die Kenntnis der beiden Absorptionen  $\alpha_{e1}$  und  $\alpha_{e2}$ . Bei Isoliergläsern mit mehr als zwei Scheiben können zwar die Einzelabsorptionen nicht bestimmt werden, ohne das Glas zu zerlegen, doch kann gezeigt werden, dass ihre Kenntnis zur Umrechnung auf Normbedingungen nicht erforderlich ist. Notwendig ist einzig eine Messung unter bekannten Randbedingungen sowie Kenntnis von globalen Eigenschaften des Isolierglases, d.h. des totalen Wärmewiderstandes  $1/\Lambda$  und der Gesamtabsorption  $\alpha$ . Damit ist nicht nur der Weg einer zerstörungsfreien Messung erschlossen, sondern es ergeben sich daraus jetzt interessante Möglichkeiten zur theoretischen Erörterung und Konzeption der Schichtfolgen.

## 2.2 Spektrale und winkelabhängige Bestimmung der optischen Eigenschaften von Isoliergläsern – routinemässige Datenerfassung

### Messapparatur und Messungen

Die Reflexionsmessung, deren Aufbau beschrieben wurde im Jahresbericht 2004 [5], steht hier nun zusätzlich zur routinemässigen Messung zur Verfügung und hat sich bewährt. Eine vollständige optische Charakterisierung der Isoliergläser und rasche Datenauswertung ist jetzt möglich [1].

So hat sich die Anlage bei einer Messkampagne von Gläsern der Schweizerischen Bundesbahnen SBB, aber auch für weitere Gläser, die im Gebäudebereich eingesetzt werden, bewährt. (siehe dazu das folgende Kapitel 2.3).

### Ausblick

Nachdem wir auch in der Lage sind, den totalen Gesamtenergiendurchlassgrad  $g(\varphi)$  zu messen (s. Kapitel 2.1), wurde eine Internet-Datenbank [6] aufgeschalten. Weitere Isoliergläser sollen vermessen werden, um die Datenbank zu erweitern (siehe dazu das Kapitel 2.4).

## 2.3 Erfahrungen mit den Messapparaturen und Messungen von Isoliergläsern

### BfE-Projekt Evaluation von Isoliergläsern NPZ Forza Charakterisierung von Isoliergläsern der Flotte Schweizerische Bundesbahnen SBB

Als Ausgangspunkt einer bevorstehenden Evaluation haben wir Isoliergläser, wie sie gegenwärtig bei den Zügen der SBB zum Einsatz kommen, optisch und teilweise auch thermisch charakterisiert. Die neun in Tabelle 2.1 aufgeführten Gläser wurden charakterisiert.

IfIP ID#	Wagentyp
D007	NPZ (vor 2006) 2005
D010	EW 4 (unbeschichtet) 2005
D001	EW 4 2003
D014	EW 4 2005
D003	Eurocity 2003
D002	Unterdeck IC-2000 2003
D009	Unterdeck IC 2000 2005
D004	GTW Seetal 2005
D012	Flirt (NRF) 2005

**Tab. 2.1**  
Charakterisierte neun Isoliergläser der SBB Flotte  
(Wagentyp von SBB erhalten)

Es wurden die **optischen** und **thermischen Eigenschaften** aus einem umfassenden Anforderungskatalog an diese Isoliergläser bestimmt, mit der einzigen Ausnahme des U-Werts [10]. Auch hier geht es um den sommerlichen Wärmeschutz bei gleichzeitig guter Ausleuchtung der Wagen und letztlich die Kühlenergie, die durch eine solche selektive Transmission reduziert werden kann.

Es kamen also sowohl die Apparatur zur Bestimmung der optischen Eigenschaften zum Einsatz, als auch jene zur Bestimmung des Gesamtenergiедurchlassgrades g-Wert.

Zuhanden der SBB wurde ein Zwischenbericht unserer Untersuchungen erstellt.

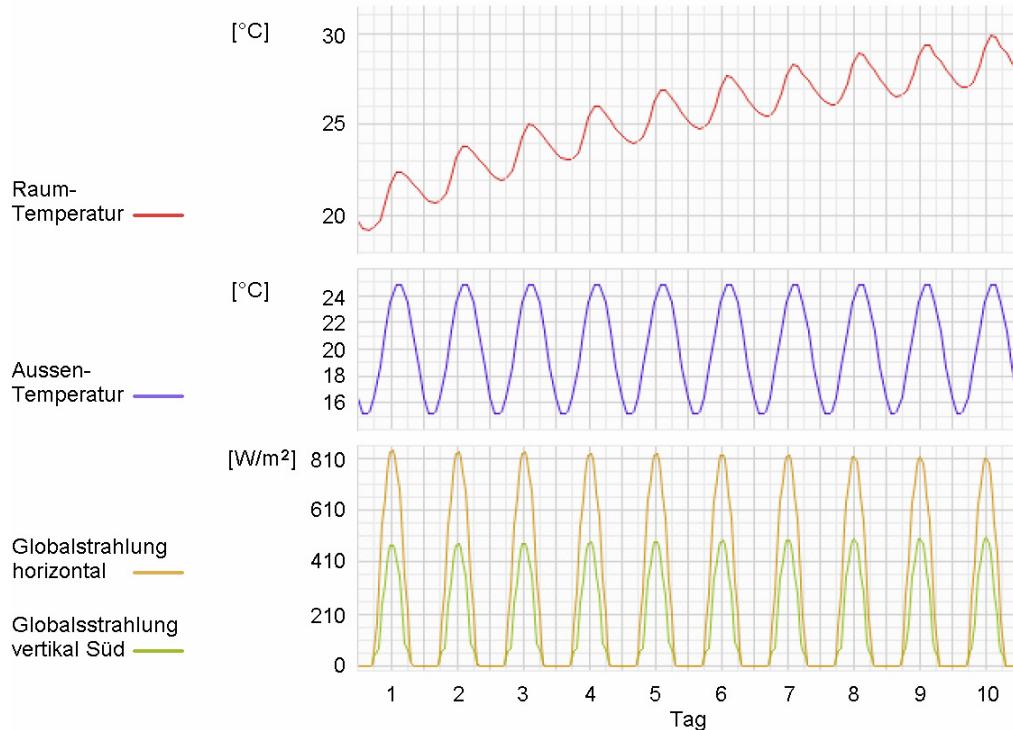
## 2.4 Datenbank für optische und thermische Eigenschaften von Isoliergläsern

Es wurde eine Internet-gestützte Datenbank <http://www.glassdbase.unibas.ch> [6][3], enthaltend die optischen und thermischen Eigenschaften von Isoliergläsern, eingerichtet und aufgeschaltet. Zentrales Ziel dieses Projektes ist es, einen direkten und schnellen Zugriff auf alle relevanten Daten, eingeschlossen dynamischer Temperatursimulationen, von kommerziellen Isoliergläsern zu erhalten, um so eine genaue Evaluation durchzuführen zu können.

Alle Daten basieren auf Messungen an ganzen Einheiten von Isoliergläsern und enthalten eine vollständige Charakterisierung der winkelabhängigen optischen Eigenschaften (spektraler Transmissionsgrad, Reflexionsgrad und Absorptionsgrad) zusammen mit dem winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrad.

Die Datenbank schliesst eine vollständige Information über die Farbeigenschaften für transmittiertes und reflektiertes Tageslicht ein, sowie auch Eigenschaften der Farbwiedergabe unter Testfarben, wie sie in EN 410 [9] definiert sind.

Weiter wird ein Quervergleich der verschiedenen Isoliergläser hinsichtlich ihrem solaren Gewinn durch eine dynamische Temperatursimulation ermöglicht an einem Standardraum unter einer definierten sommerlichen Klimaepisode (siehe Figur 2.3):



**Fig. 2.3:** Temperatursimulation eines Standardraumes über eine sommerliche Klimaepisode von zehn Tagen. Sie erlaubt einen Quervergleich der Isoliergläser hinsichtlich ihrer Wärmeschutzwirkung unter realitätsnahen Bedingungen, abrufbar unter <http://www.glassdbase.unibas.ch> [6][3].

Grundlage ist die vorgängige winkelabhängige Charakterisierung mit unseren Messapparaturen. Diese Messdaten sind ebenfalls auf der Datenbank abrufbar, etwa für Simulationen an einem konkreten Objekt. Zusammen mit den Farbeigenschaften bilden diese Informationen eine umfassende Grundlage zur Evaluation von Isoliergläsern angepasst auf ein solches reales Projekt.

### 3. Neue Beschichtungen – zur Realisation der Idealtransmission $\tau_{\text{ideal}}$

#### 3.1 Optimales spektrales Transmissionsvermögen von Sonnenschutzgläsern

Um den Sonnenschutz zu erhöhen, wurde eine theoretisch ideale Transmission  $\tau_{\text{ideal}}$  berechnet, so dass der Quotient  $\tau_e/\tau_v$ , dem solarem Transmissionsgrad  $\tau_e$  und dem Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$ , minimal wird [4]. Als Nebenbedingung wurde dabei die Farbneutralität des transmittierten Lichtes berücksichtigt. Während bei den besten kommerziell erhältlichen Gläsern dieses Verhältnis  $\tau_e/\tau_v$  etwa bei 0.5 liegt, beträgt dieser Quotient bei der gefundenen Idealtransmission noch  $\tau_e/\tau_v = 0.33$ .

Dieser geringe solare Eintrag bezogen auf das Nutzlicht ( $\tau_e/\tau_v = 0.33$ ) bei gleichzeitig hoher Farbneutralität soll durch ein Mehrschichtsystem mit möglichst wenigen Schichten realisiert werden.

#### 3.2 Stand der Glasindustrie

Bei industriell gefertigten Sonnenschutzgläsern sind eine oder meist sogar beide Glasscheiben mit einem Mehrschichtensystem beschichtet. Diese Schichtsysteme bestehen aus 10-15 Schichten, für das eine Kombination aus Metallen und Metalloxiden verwendet wird. Für die Metallschichten wird meist Silber (Ag) verwendet, da es im sichtbaren Wellenlängenbereich bei den verwendeten Schichtdicken transparent ist und Infrarotstrahlung gut reflektiert [11,12]. Bei den Metalloxiden werden unter anderem Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sowie Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) verwendet. Durch die Kombination von Metallen und Metalloxiden erhält man eine breite Varianz an optischen Eigenschaften.

#### 3.3 Theorie: Interferenz und Bandpass durch geeignete Schichtfolgen

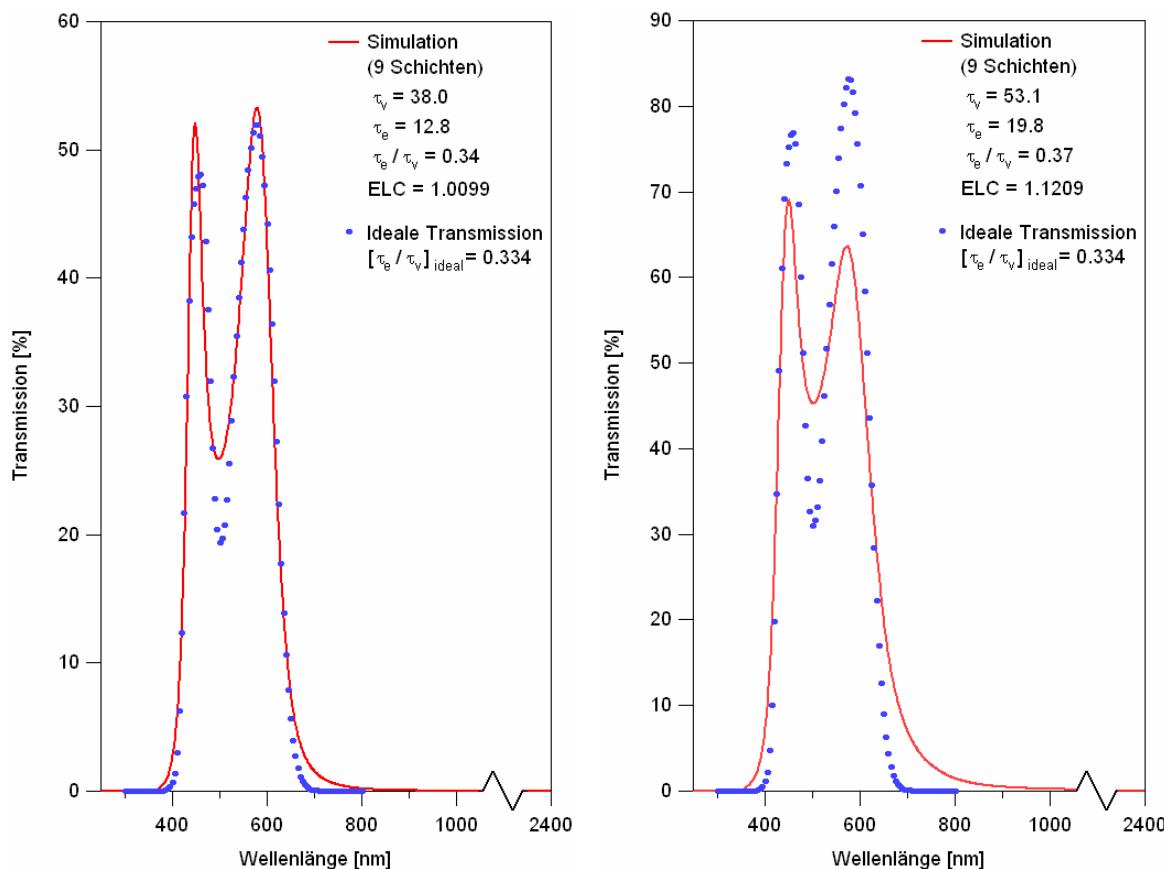
Interferenz, d.h. konstruktive und destruktive Überlagerung von Wellen einer Wellenlänge, ist in der Physik und besonders in der Optik ein viel verwendetes Prinzip. Welche Wellenlänge verstärkt bzw. abgeschwächt wird, hängt von dem Zusammenspiel der Brechungsindizes und den Dicken der einzelnen Schichten in einem Mehrschichtensystem ab. Durch geeignete Kombinationen lassen sich so einzelne Wellenlängen, aber auch ganze Wellenlängenbereiche ausschneiden [13].

Für die Entwicklung des Schichtaufbaus, zur Realisierung von  $\tau_{\text{ideal}}$ , wurde als Schichtreihenfolge eine Kombination aus einzelnen Bandpässen gewählt. Wie der Begriff Bandpass schon andeutet, werden diese in der optischen Filterindustrie verwendet, um Wellenlängenbereich zu reflektieren oder zu transmittieren [14]. Bandpassfilter funktionieren vom Prinzip wie ein Fabry-Perot Interferometer, das aus dünnen Schichten aufgebaut wird. Der Aufbau besteht aus mindestens zwei Schichtfolgen, die eine hohe Reflexion aufweisen, die wiederum durch eine, als Abstandshalter dienende Schicht getrennt werden.

### 3.4 Simulationen zur Realisierung von $\tau_{\text{ideal}}$

Das Prinzip der konstruktiven bzw. destruktiven Interferenz eines Bandpasses wurde für die Simulationen bezüglich  $\tau_{\text{ideal}}$  verwendet. Hierzu wurden dem Programm TFCalc™ [15] eine Schichtfolge aus Materialien, die in der industriellen Herstellung von Sonnenschutzgläsern bereits verwendet werden, vorgegeben. Die Dicken der einzelnen Schichten wurden dann von TFCalc solange angepasst, bis die Transmission der von  $\tau_{\text{ideal}}$  möglichst nahe kommt.

Es konnten Mehrschichtsysteme entwickelt werden, die 8-12 Schichten benötigen. Die Dicken der einzelnen Schichten hängen von der vorgegebenen Lichttransmission ab und der Kombination der verschiedenen Materialien. In Figur 3.1 ist im linken Schaubild beispielhaft eine Simulation (rote Linie) für ein Mehrschichtensystem mit einer maximalen Transmission von ca. 50% dargestellt. Der Lichttransmissionsgrad dieses Systems beträgt  $\tau_v = 0.380$ .



**Fig. 3.1:** Vorgegeben wurde hier die theoretisch ermittelte ideale Transmission  $\tau_{\text{ideal}}$  (blau) mit einem Quotienten  $\tau_e/\tau_v = 0.33$ , jedoch unterschiedlicher Höhe. Für die zugehörige Simulation (rot) wurde ein Mehrschichtensystem bestehend aus 9 Schichten vorgegeben. Es zeigt sich, dass der damit erzielbare Quotient  $\tau_e/\tau_v$  abhängt von der Höhe der Idealtransmission:

Unter Vorgabe einer Idealtransmission mit einem Maximum von ca. 50% erzielt man ein  $\tau_e/\tau_v = 0.34$  (links), liegt diese Vorgabe bei ca. 80%, erhöht sich dieser Wert auf  $\tau_e/\tau_v = 0.37$  (rechts).

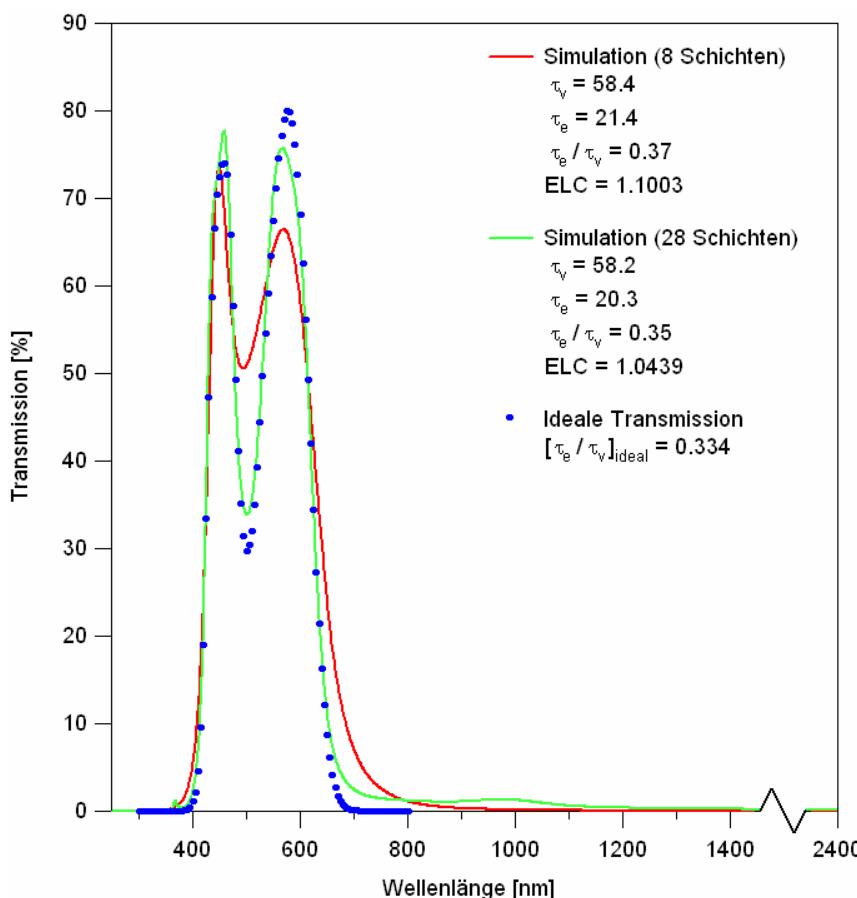
Will man bei hoher Idealtransmission einen ähnlich tiefen Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  erzielen, so muss man die Schichtzahl erhöhen. Dies wird in Fig. 3.2 illustriert.

Die blauen Punkte zeigen die theoretisch berechnete Transmission von  $\tau_{\text{ideal}}$ , die ein  $\tau_v$  von 0.380 besitzt. Es sind einige Abweichung zwischen der simulierten und der theoretischen Kurve erkennbar. Berechnet man für diese Kurven den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$ , so erhält man für das simulierte Mehrschichtensystem 0.34 und die theoretische Idealtransmission 0.33. Für andere maximale Transmissionen erhält man Werte zwischen 0.34 und 0.41. Als weiteres Beispiel, Figur 3.1 rechts, ist eine

Simulation (rot) mit einem Lichttransmissionsgrad von 0.531 dargestellt. Die in blau dargestellte Lichttransmission, die TFCalc, als Zielfunktion vorgegeben wurde, besitzt eine  $\tau_v$  von 0.607. Hier werden die Abweichungen zwischen der theoretisch idealen und der realisierbaren Lichttransmission noch deutlicher. Bestimmt man für dieses System, das mit derselben Schichtfolge, aber veränderten Schichtdicken angepasst wurde, den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$ , so erhält man 0.37. Wird eine höhere Lichttransmission, also mehr Tageslicht, benötigt oder erwünscht, so erfolgt dies zu lasten des Quotienten  $\tau_e/\tau_v$ . Vergleicht man aber diese Werte mit denen aus unseren Messungen an kommerziellen Isoliergläsern ermittelten, so ist immer noch ein deutlicher Gewinn an Sonnenschutz erkennbar. Für kommerzielle Isoliergläser wurden für den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  Werte grösser 0.5 bestimmt.

In Bezug auf die Farbneutralität des transmittierten Lichtes wurden die Werte der simulierten Schichtsysteme in der ab-Ebene des Lab-Systems berechnet. Für  $\tau_{ideal}$  erhält man (0;0), für die simulierten Schichtsysteme erhält man Werte nahe des Ursprungs. Die grössten bestimmten Abweichungen liegen für a bei -3 und für b bei 10. Das transmittierte Licht bekommt also einen grün-gelblichen Schimmer.

Wird sowohl eine höhere Lichttransmission, als auch ein Wert von ungefähr 0.33 für den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  erwünscht, so muss die Anzahl der Schichten erhöht werden. Für die in Figur 3.2 dargestellten Lichttransmissionen wurde ein  $\tau_v$  von 0.58 vorgegeben:



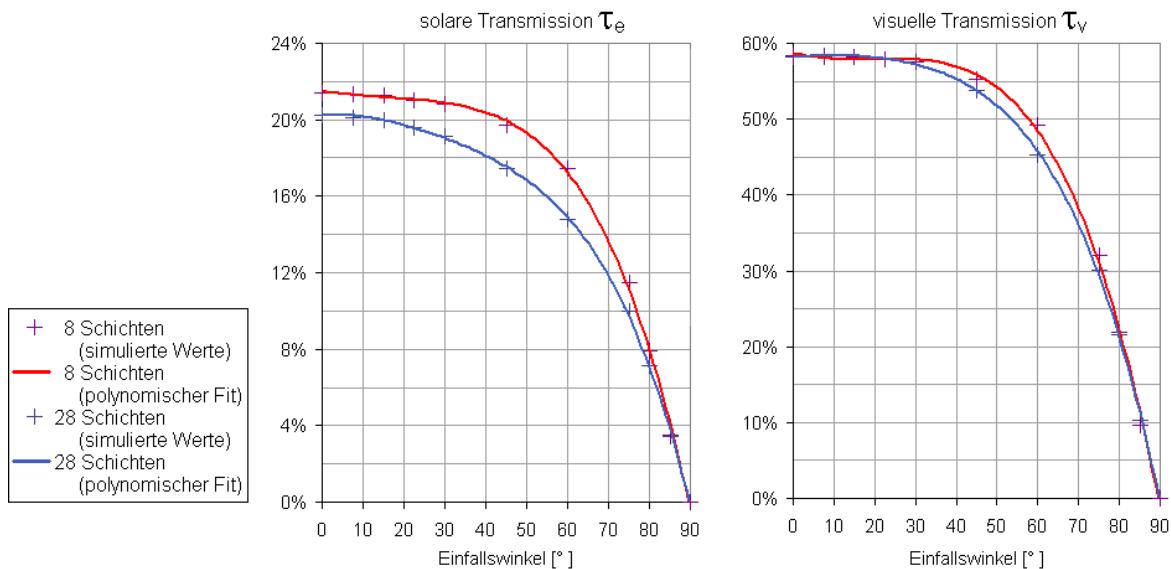
**Fig. 3.2:** Hier wurde ein Lichttransmissionsgrad  $\tau_v = 0.58$  für alle drei Kurven angestrebt. Für die theoretisch bestimmte ideale Transmission  $\tau_{ideal}$  (blau) erhält man  $\tau_v = 0.584$  mit einer maximalen Transmission bei etwa 80%. Das Resultat der Simulation mit 8 Schichten (rot) liegt bei  $\tau_v = 0.584$  und mit 28 Schichten (grün) bei  $\tau_v = 0.582$ .

Die dazugehörigen Simulationen zeigen, dass sich ein tiefer Quotient  $\tau_e/\tau_v$  nur mit einer Erhöhung der Schichtzahl erzielen lässt: Eine Schichtzahl von 8 liefert ein  $\tau_e/\tau_v = 0.37$  (rot), eine Schichtzahl von 28 ein solches von  $\tau_e/\tau_v = 0.35$  (grün).

Die effektiv erreichten Werte weichen geringfügig voneinander ab, so ergibt sich für die ideale Transmission und für die mit 8 Schichten ein  $\tau_v$  von 0.584, während für die mit 28 Schichten ein  $\tau_v = 0.582$ . Somit haben die dargestellten Kurven zwar den gleichen Lichttransmissionsgrad, betrachtet man aber den Quotienten  $\tau_e/\tau_v$ , so werden die Unterschiede, die auch schon in der Grafik deutlich werden, ersichtlich. Für das Mehrschichtsystem mit 8 Schichten bekommt man 0.37 und für die 28 Schichten 0.35.

Betrachtet man die Winkelabhängigkeit von  $\tau_v$  und  $\tau_e$ , so wird der Einfluss der Schichtzahl noch deutlicher. Die beiden Schichtsysteme sind in Figur 3.3 dargestellt und zeigen eine unterschiedliche Winkelabhängigkeit beider Größen  $\tau_e$ ,  $\tau_v$ .

Interessant ist die Winkelabhängigkeit von  $\tau_e$  nicht nur absolut gesehen (spektrale Selektivität), sondern auch von der unterschiedlichen Charakteristik des Abfallens mit dem Winkel her. Beim Schichtsystem mit 28 Schichten erfolgt dieser Abfall rascher. Die unterschiedliche Winkelcharakteristik enthält die grundsätzliche Möglichkeit, ein Glas auch auf Winkelselektivität hin zu konzipieren. Fällt etwa die Transmission bei höheren Winkeln schneller ab, so wird der Eintrag bei hohem Sonnenstand unterdrückt, was besonders bei südlicher Orientierung wirksam ist.



**Fig. 3.3:** Solarer Transmissionsgrad  $\tau_e$  und Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$  winkelabhängig aufgetragen für die beiden Schichtsysteme mit 8 bzw. 28 Schichten. Das Schichtsystem mit 28 Schichten zeigt eine rascher abfallende Winkelcharakteristik.

### 3.5 Experimentelle Umsetzung

Erste Vorversuche zur Realisierung dieser Schichtsysteme wurden durchgeführt. Schwerpunkte bei diesen Versuchen sind die Bestimmungen der optischen Konstanten der verwendeten Schichten, da diese von experimentellen Größen wie Abscheiderate, Reinheit und Struktur beeinflusst werden, und so von denen in der Simulation verwendeten abweichen können. Des weiteren werden die Übergänge zwischen den einzelnen Schichten, die in der Simulation als scharf angenommen wurden, untersucht. Für diese Vorversuche werden einzelne Schichten oder kleine Bestandteile des Mehrschichtsystems abgeschieden und mit verschiedenen Untersuchungsmethoden vermessen.

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

### Simulationen

Anhand eines realen Sanierungsobjektes (Schulhaus Donnerbaum) konnten nach einer mess-technischen Erhebung des Ist-Zustandes und deren Modellierung nun unterschiedliche Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes simuliert werden. Simuliert wurden neben Sonnenschutzgläsern hoher Selektivität auch Konzepte mit Isoliergläsern hohen solaren Transmissionsgrades, bei dem der Sonnenschutz durch Storen, die nach der Globalstrahlung gesteuert werden, gewährleistet werden sollen. In der komplexen Entscheidungsumgebung von Architekturkonzept, Nutzerverhalten, Tageslichtnutzung, Heizenergiebedarf, Energie- und Betriebskosten konnte nun an einem konkreten Fall gezeigt werden, dass solche Sonnenschutzgläser hoher Selektivität innerhalb eines Gesamtkonzeptes die erste Wahl darstellen. Nicht nur vermindern sie den solaren Eintrag wesentlich, sondern es lassen sich energieintensive Lösungen wie mechanische Lüftung oder gar Klimatisierung vermeiden. Dabei zeigt sich die freie natürliche Nachtlüftung als ergänzende Massnahme, eine weitere sanfte Massnahme neben der Verminderung des Eintrages, indem sie die natürliche Umgebungswärme nutzt. Dieses Resultat ergibt sich auch unter der Sicht grundsätzlich möglicher Zielkonflikte wie Tageslichtnutzung und Heizenergiebedarf.

Zwar kann dieses Resultat nicht verallgemeinert werden, doch insbesondere im Fall einer Sanierung, wo das Gebäudekonzept vorgegeben ist, kann die Behaglichkeit ohne hohen Technisierungsgrad wesentlich verbessert werden mit der Folge einer rationalen Energienutzung.

Vielversprechende Glaskonzepte mit unterschiedlicher Konfiguration der Schichten sollen nun unter realen Betriebsbedingungen näher untersucht werden.

### Messapparatur

Es wurde eine neue Messapparatur zur Bestimmung des totalen solaren Gewinnfaktors  $g(\varphi)$  aufgebaut. Erfolgreich getestet wurde sie an Isoliergläsern bestehend aus zwei Elementen. Eine Erweiterung auf Isoliergläser mit mehr als zwei Elementen ist zerstörungsfrei möglich und soll an konkreten Messungen gezeigt werden.

In die Bestimmung der optischen Eigenschaften wurde die Reflexionsmessung routinemässig integriert. Damit können die Isoliergläser nun optisch vollständig charakterisiert werden. Es wurden weiter kommerzielle Gläser aus der Sparte Sonnenschutz spektral und winkelabhängig gemessen, zusätzlich auch neun Isoliergläser des Wagenparkes der Schweizerischen Bundesbahnen SBB. Die Messungen sind von praktischem Nutzen geben aber auch Hinweise auf Verbesserungspotentiale und weitere Forschung.

Für die Messdaten wurde eine webgestützte Datenbank eingerichtet, wo diese Daten abrufbar sind. Diese Datenbank soll kontinuierlich ausgebaut werden.

### Schichtsysteme

Es konnte mittels Simulationen gezeigt werden, dass für die Realisierung der idealen Lichttransmission  $\tau_{ideal}$  ein Mehrschichtsystem mit mindestens 8 Schichten benötigt wird. Ein optimale Anpassung der Lichttransmission an das ideal System mit  $\tau_e/\tau_v = 0.33$  ist mit 8 Schichten nur bei niedrigem  $\tau_v$  möglich. Höhere Lichttransmissionen können entweder zu Lasten des Quotienten  $\tau_e/\tau_v$  erreicht werden, oder durch die Verwendung von einer höheren Schichtanzahl.

Die Erkenntnisse aus den Simulationen, über Schichtfolge und Schichtdicken sollen in einem Prototypen realisiert werden. Hierzu müssen die experimentellen Grössen, wie Abscheiderate, Reinheit und Struktur der einzelnen Schichten optimiert werden. Des Weiteren werden Abweichungen zwischen der Simulation und dem realen Mehrschichtsystems erwartet, nachdem die Simulation Effekte an den Schichtübergängen nicht berücksichtigt. Mit den optischen Daten, die man durch Messungen am Prototypen erhält, soll dann ein Isolierglas, bestehend aus mindestens zwei Glasscheiben, simuliert und dann hergestellt und vermessen werden. Wird, wie in der Glasindustrie üblich, für die zweite Glasscheibe eine low-e-Scheibe verwendet, so wird man vermutlich die Schichtdicken von  $\tau_{ideal}$  nochmals anpassen müssen.

## Nationale Zusammenarbeit

- EMPA  
Heinrich Manz, TASK 22: Validierung von Simulationsprogrammen  
Optische Charakterisierung von Gläsern, Textilien, Storen und Verschattungsmaterialien, die als präzise Materialparameter dienen in den dynamischen Simulationen von TASK 22.  
Thomas Frank – Datenakquisition Gebäude, Klimadaten, Fensterdaten, etc.
- Firmenzusammenarbeit
  - Häring AG, Pratteln
  - Glas Trösch, Bützberg
  - Pilkington CH + D
- Beratung
  - Schweizerische Bundesbahnen SBB: Charakterisierung von Isoliergläsern der Wagenflotte
  - Gemeinde Muttenz: Sanierungskonzept Schulhaus Donnerbaum

## Internationale Zusammenarbeit

- IHP Microelectronics, Frankfurt an der Oder, D  
Massenspektrometrie (SIMS) auf Schichten angewandt

## Öffentlichkeitsarbeit

**CISBAT 2005 Konferenz** vom 28. September 2005 in Lausanne  
*Renewables in a changing climate – Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems*

- 4 Papers [1] [2] [3] [4] in den CISBAT 2005 Proceedings
- 2 Poster zu den Papers [1] [2]
- Vortrag Peter Oelhafen zu Paper [4]

**Einladung des Baudepartement Kanton Basel-Stadt**

am 20.10.2005 im Institut für Physik der Universität Basel

- Vortrag Peter Oelhafen über die Forschung an verbesserten Sonnenschutzgläsern in der ESCA-Gruppe des Institut für Physik
- Führung durch die Fensterlabors und Beschichtungslabor im IfP

## Referenzen

### Referenzen zum vorliegenden Projekt selber

- [1] R. Steiner, P. Oelhafen, G. Reber and A. Romanyuk: ***Experimental Determination of Spectral and Angular dependent Optical Properties***, CISBAT 2005 Proceedings, Lausanne (2005)
- [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, Lausanne (2005)
- [3] 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, Lausanne (2005)
- [4] P. Oelhafen, ***Optimal spectral transmittance of sun protection glasses***, CISBAT 2005 Proceedings, Lausanne (2005)
- [5] I. Mack, P. Oelhafen, Georges Reber, A. Romanyuk, R. Steiner ***Jahresbericht 2004 – „Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz“ – Programm Rationelle Energienutzung in Gebäuden im Auftrag des Bundesamts für Energie BfE*** (2004)
- [6] I. Mack, P. Oelhafen, Georges Reber, A. Romanyuk, R. Steiner ***Internetseite zum vorliegenden Forschungsprogramm*** am Institut für Physik: [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.

### Referenzen zum Kapitel 1: Simulationen

- [7] CAPSOL manual Version 4.0, ***Computer program to calculate multizonal transient heat transfer***, Physibel Document (2002)
- [8] Dokumentation SIA D 0176, ***Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz***, Conrad U. Brunner et al., SIA Zürich (2001)

#### Dazu auch:

- Merkblatt SIA 2021, ***Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz***, Conrad U. Brunner et al., SIA Zürich (2002)
- Vernehmlassungsexemplar ***Gebäude mit hohem Glasanteil***, SIA Zürich (2002)

### Referenzen zum Kapitel 2: Messanlage, Datenauswertung und Präsentation in Datenbank

- [9] EN 410, ***Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen***, Deutsches Institut für Normung (1998) D
- [10] EN 673, ***Bestimmung des Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Wert)***, Deutsches Institut für Normung (2000) D

### Referenzen zum Kapitel 3: Neue Beschichtungen

- [11] R.J. Martín-Palma et al.: ***Silver-based low-emissivity coatings for architectural windows: Optical and structural properties***, Solar Energy Materials and Solar Cells, 53: 55-56, 1998
- [12] J.C.C. Fan and F.J. Bachner: ***Transparent heat mirrors for solar-energy applications***, Appl. Optics, 15(4): 1012-1017, 1976
- [13] Bergmann Schaefer: ***Lehrbuch der Experimentalphysik Optik***, de Gruyter, Berlin, New York 1993
- [14] Ph.W. Baumeister: ***Optical Coating Technology***, SPIE Press Bellingham 2004
- [15] TFCalc<sup>TM</sup>: ***Thin Film Design Software for Windows V3.5.8***, Software Spectra, Inc. 2004