

Jahresbericht 2004

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

Autor und Koautoren	Iris Mack, Peter Oelhafen, Georges Reber, Andriy Romanyuk, Roland Steiner
beauftragte Institution	Institut für Physik der Universität Basel
Adresse	Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel
E-mail, Internetadresse	061-267 37 13, peter.oelhafen@unibas.ch http://www.unibas.ch/phys-esca/
BFE Vertrags-Nummer	100'761
Dauer des Projekts	Januar 2004 – bis Dezember 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Simulationen: Implementierung und Test des dynamischen Simulationsprogramms *CAPSOL* zur Abklärung von Energie- und Komfortfragen mit Gläsern in realistischen Situationen. Die Validierung erfolgte anhand Modellsystemen in den Normen, anhand eines realen Objektes (Schulhaus Donnerbaum) sowie mit Hilfe einfacher Bilanzmodelle. Damit haben wir erste Parameteruntersuchungen an Gläsern und deren winkelabhängigen solaren Transmission durchgeführt, auch unter Variation anderer Gebäude-Modellparameter.

Messapparaturen: Mit dem neuen Spektrometer wurde eine sehr gute Reproduzierbarkeit der winkelabhängigen Transmissionsmessungen erreicht. Der Messbereich konnte mit zusätzlichen Lichtquellen bis auf 280 nm nach unten erweitert werden. Für die Reflexionsmessungen wurde ein Referenzspiegel eingeführt, der nun bei uns charakterisiert werden kann. Vorversuche für ein mobiles Messsystem verliefen positiv. Innerhalb der winkelabhängigen Transmissionsmessungen wurde auch der Verlauf des allgemeinen Farbwiedergabeindex untersucht. **Neue Beschichtungen:** Mit dem Modellsystem Indiumoxid dotiert mit Silber wurden erste Versuche gemacht. Die Transmission dieser Schichten zeigte Ansätze der gewünschten Eigenschaften erst nach dem Tempern, bei dem eine Reduktion des Silbers erfolgt.

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

1.1 Beschreibung der Methodik und des Vorgehens

Zur Beurteilung der Sonnenschutzgläser hinsichtlich ihres Einsparpotentials und Raumkomfortes wurden dynamische Simulationen mit dem Programm *CAPSOL* [1] durchgeführt. *CAPSOL* ist ein validiertes multizonales Programm, das zahlreiche Möglichkeiten der Modellierung bietet. Die Berücksichtigung der winkelabhängigen Transmission $\tau_e(\Theta)$ ist auf Programmebene möglich.

Somit können unsere Messdaten – nach dem Aufbereitungsschritt einer spektralen Integration gemäss *EN 410* [2] – direkt eingegeben werden, wie dies in Figur 1.1 illustriert ist. Darin werden zwei unserer **Spektralmessungen** verglichen, die in unserer Untersuchung eines konkreten Objektes (Schulhaus Donnerbaum, Kapitel 1.2) herangezogen wurden:

Blau: Eingebaute Zweifach-Isolierverglasung aus dem Jahre 1991

Magenta: Sanierungsvariante, enthaltend ein modernes Sonnenschutzglas mit Folie

Deutlich sichtbar ist in diesem Vergleich die stark verbesserte Selektivität (Abschneiden im solaren Infrarot), die wir bei einigen Produkten neuerer Bauart feststellen konnten.

Um eine hohe Aussagekraft der dynamischen Rechnungen zu gewährleisten, wurde eine **Validierung** auf drei Ebenen durchgeführt:

- **Simulation eines konkreten Objektes**, bei dem wir Raumtemperaturen und Klimadaten ermittelt haben und so die Gebäudecharakteristik und die wesentlichen Einflussparameter bestimmen konnten (Kapitel 1.2).
- **Simulation von Modellräumen** gemäss der Untersuchung in [3]. Hier geht es darum, die Modellannahmen soweit in Übereinstimmung zu bringen, dass ausgehend von den wichtigen Basisfällen Vergleichbarkeit der Resultate gewährleistet ist (Kapitel 1.3).
- **Überprüfung mit einfachen Bilanzmodellen** zur Untersuchung einzelner Einflussparameter in ihrer Grössenordnung zur Kontrolle der dynamischen Simulation (Kapitel 1.4).

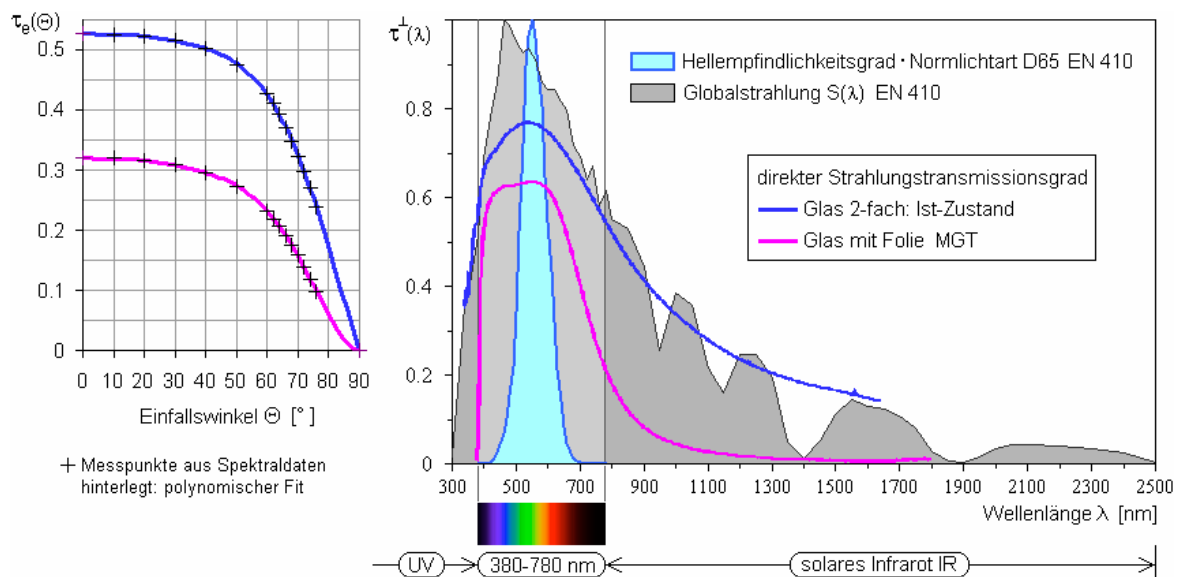


Fig. 1.1: Gemessener spektraler Strahlungstransmissionsgrad $\tau^l(\lambda)$ für senkrechten Einfallswinkel. Zur Bilanzierung in der Gebäudesimulation wird $\tau(\lambda)$ über das Spektrum $S(\lambda)$ integriert. Dies wird für mehrere Winkel innerhalb $[0, 90^\circ]$ durchgeführt und so der winkelabhängige solare Transmissionsgrad $\tau_e(\Theta)$ generiert (links oben) für die dynamischen Simulationen.

1.2 Validierung der Simulation an einem realen Objekt: Schulhaus Donnerbaum

Die sommerliche Überhitzungsproblematik haben wir an einem konkreten Objekt studiert: Das Schulhaus Donnerbaum in Muttenz neigt in seinen südorientierten Klassenzimmern während sommerlichen Hitzeperioden zu unangenehmen Raumtemperaturen, dies in beiden Geschossen, EG und OG. Die Ursachen wurden im hohen Fensteranteil gesehen und in einer unzureichenden Beschattungsmöglichkeit. Weiter wurde vermutet, dass im vorgelagerten Hof auf der Südseite die unzureichende Zirkulation und Verschattung eine ungünstige Randbedingung darstellt.

In der sommerlichen Periode Mitte Juli bis Mitte August haben wir Temperaturmessungen in typischen Räumen durchgeführt, aus denen folgende **Einflussparameter** eruiert werden konnten:

- Dacheinfluss auf Klassenzimmer durch Vergleich EG und OG
- Hofeinfluss Klassenzimmer durch Vergleich EG und OG
- Storeneinfluss durch Vergleich Storen offen – Storen zu auf beiden Geschossen
- Mikroklima Hof durch Vergleich Hoftemperatur – Temperatur naher Wetterstation Bäumlhof, jedoch letztere ohne Hofeinfluss
- Einfluss von freier Nachtlüftung
- Beleuchtungssituation durch Lux-Messungen in den Klassenzimmern
- Analoge Untersuchungen in den Erschliessungsräumen Korridore und Eingangshallen

Durch Simulation mit CAPSOL konnten die **Modellparameter** (aktive Speichermasse, verallgemeinerter Gewinn- und Verlustfaktor) einerseits eingegrenzt werden, andererseits ihrer Relevanz für das Raumklima bestimmt werden. Das Gebäude derart charakterisiert, können an diesem Objekt nun zuverlässige **Parameterstudien für den Sanierungsfall** gemacht werden.

Die Figur 1.2 zeigt die **Raumtemperatur eines Klassenzimmers** im OG (Storen offen). Dargestellt sind Messung und Simulation des Ist-Zustandes und weiter der Vergleich der beiden Gläser, deren Transmissionsgrad in der Figur 1.1 dargestellt ist.

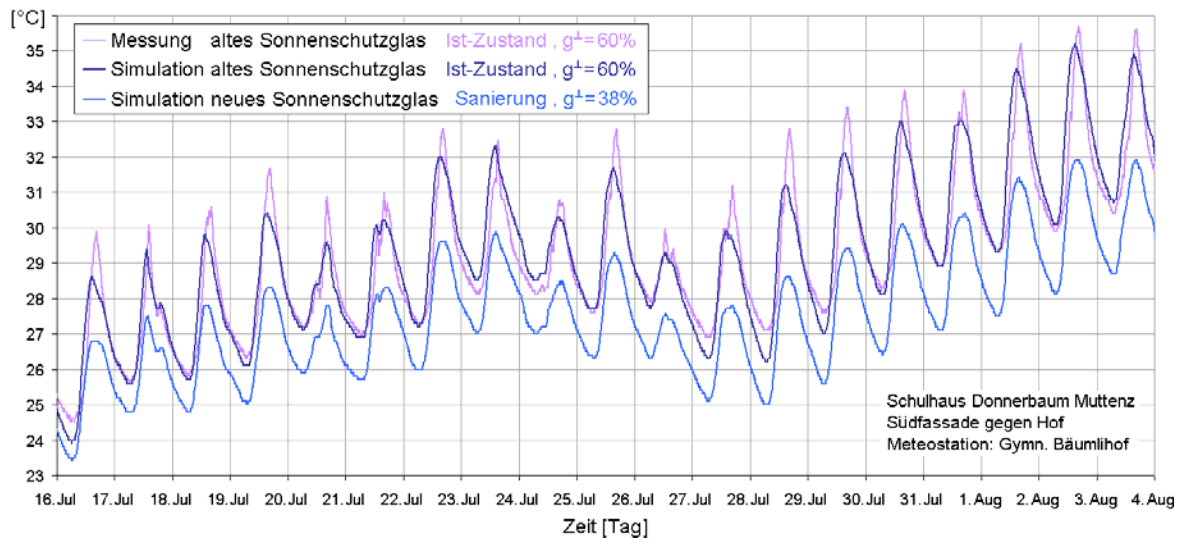


Fig. 1.2: Vergleich von gemessener Raumtemperatur – mit CAPSOL simulierter Raumtemperatur eines Klassenzimmers im Ist-Zustand. Darunter simuliert eine Sanierungsvariante.

Für die beiden Simulationen wurde der gemessene winkelabhängige Transmissionsgrad $\tau_e(\theta)$ gemäss Figur 1.1 eingesetzt. Die Sanierungsvariante besitzt eine etwas tiefere visuelle Transmission ($\tau_{vis}^\perp = 62\%$ gegenüber 76%), jedoch bei gleicher Gesamtverschattung immer noch einen deutlich tieferen solaren Eintrag.

Die Simulation zeigt, dass die Modellierung innerhalb des Fehlerbereichs der Randbedingungen die Verhältnisse treffend beschreibt: Die Globalstrahlung wurde zwar nicht vor Ort gemessen und musste rechnerisch separiert werden in Diffus- und Direktstrahlung, dennoch konnte bezüglich der Randbedingung der Aussentemperatur der Hofeinfluss eingegrenzt werden.

Die Modellierung des Sanierungsfalles ergibt eine Reduktion der Raumtemperatur um $\Delta T = 3$ K nach dem Einschwingvorgang (Mittelwert $\langle \Delta T \rangle = 2$ K).

1.3 Validierung der Simulation an einem Musterraum aus der SIA D 0176

Bei Gebäuden mit hohem Glasanteil bedürfen die Energieflüsse durch die Gebäudehülle einer erhöhten Aufmerksamkeit: Einerseits sind Glasflächen mit ihrer Transparenz Gewinnflächen, andererseits ist der Wärmetransport gegenüber dem Dämmstandard von opaken Wänden höher. Durch die jahreszeitlich starken Schwankungen des solaren Angebotes und der Aussentemperaturen muss diesen Energieflüssen in adaptiver Weise begegnet werden aus Gründen des Komfortes und des Energieverbrauches. Sobald von Energie gesprochen wird, kommt zudem auch die Tageslichtnutzung ins Spiel.

Die ganze Dynamik und die Wechselwirkung aller Gebäudekomponenten untereinander, inklusive der Systeme, die regelnd eingreifen (Verschattung, Nachtlüftung, Raumkonditionierung), machen eine dynamische Simulation notwendig, um in einem zweiten Schritt zu den wesentlichen Grundregeln und Auslegungsverfahren zu gelangen.

Deshalb haben wir unsere Simulationen ausgerichtet auf typische Fälle, an denen diese Zusammenhänge überprüft werden können. Die Figur 1.3 zeigt eine solche Simulation eines typischen Büroraumes aus der SIA Dokumentation D 0176 [3] mit den dortigen Vorgaben. Die Parameterstudien in dieser Dokumentation (Nachtlüftung, interne Wärmelasten, g-Wert, Sonnenschutz, Schaltpunkt Storensteuerung) dienten uns als typische Basisfälle mit Hilfe derer das Rechenprozedere von CAPSOL [1] überprüft werden konnte. Es ging hier um die Vergleichbarkeit der Rechenresultate als Ausgangspunkt für weitere Parameterstudien. Wobei unser Grundthema sein wird, wie weit der Anwendungsbereich der Gläser erweitert werden kann, wenn man dem physikalischen Verbesserungspotential hinsichtlich der Selektivität der Gläser näher kommt.

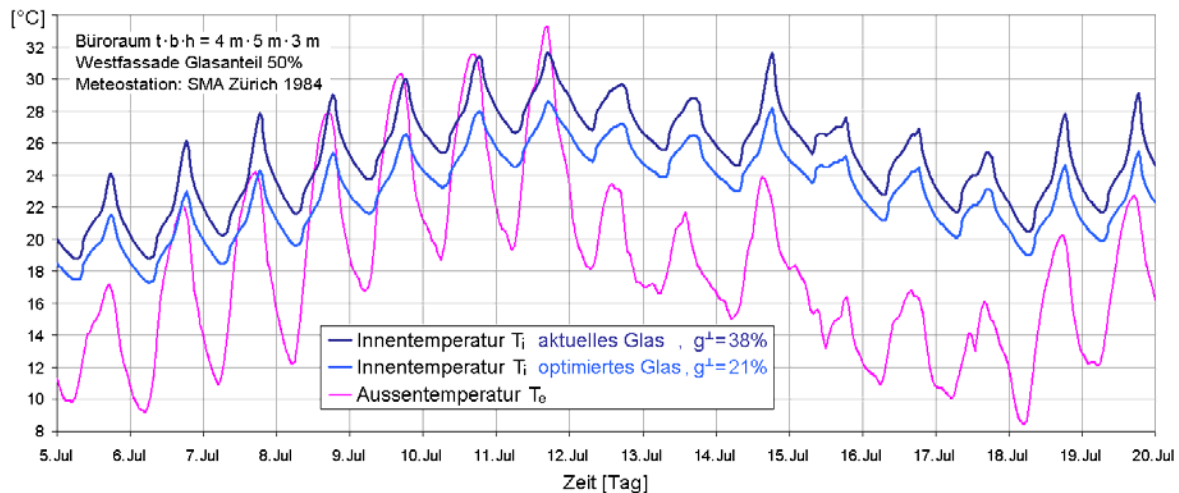


Fig. 1.3: Simulierte Raumtemperatur eines frei schwingenden Büroraumes gemäss der Dokumentation SIA D 0176 [3] während einer Hitzeperiode. Der Glasanteil der Fassade beträgt 50%, welche zu dieser Jahreszeit die heikle Westorientierung aufweist. Unterstützend wirkt eine Nachtlüftung, hingegen wird im Beispiel auf Aussenstoren verzichtet. Verglichen werden:

- Sonnenschutzglas nach heutigem Stand der Technik mit $g^+=38\%$ und visueller Transparenz $\tau_{vis} = 62\%$ (Beispiel aus Figur 1.1).
- Hypothetisches Glas gleicher visueller Transparenz jedoch herabgesetzter solarer Transmission resultierend in einem g^+ -Wert von 21% . Ein solches Glas läge gerade auf der Grenze, auf der eine farbneutrale Schicht gerade noch möglich ist [4].

Das Beispiel behandelt einen Grenzfall zum Thema, ob mit **Gläsern erhöhter Selektivität** neue **Einsatzbereiche erschlossen** werden. Hier die Frage, ob auf den Einsatz von Storen verzichtet werden könnte. Das Glas besitzt einen U-Wert von $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$, sodass der reduzierte solare Gewinn im Winter je nach interner Bürolast in ausreichendem Mass kompensiert wird und eine insgesamt günstige Jahresenergiebilanz (Wärme, Kälte, Beleuchtung) heraussehen könnte.

1.4 Überprüfung mit einfachen Bilanzmodellen

Zwischen den dynamischen Simulationen und den hier geschilderten Abschätzverfahren, die wir zur Anwendung bringen, herrscht eine wechselseitige Ergänzung:

Die Anhebung der **mittleren Raumtemperatur** gegenüber der mittleren Aussentemperatur kann schon mit einer stationären Bilanzgleichung abgeschätzt werden, wenn die mittlere Wärmelast über eine ausreichend lange Zeit bekannt ist. Rasch mit der Tagesperiode ändernde Wärmelasten werden durch die thermische Trägheit abgedämpft; die resultierenden **täglichen Temperaturschwankungen** erscheinen der mittleren Raumtemperatur überlagert und können ebenfalls abgeschätzt werden unter Kenntnis der speicherwirksamen Bauteilmasse. Somit sind die auftretenden Temperaturen eines Raumes innerhalb eines Zeitabschnittes mit einheitlichem Klima (Monat) ein Vergleichswert, mit der die Plausibilität einer Simulation überprüft werden kann.

Auch im Fall einer einsetzenden **langdauernden sommerlichen Hitzeperiode** ist eine Abschätzung möglich: Die speicherwirksame Bauwerksmasse wirkt als relevante thermische Entlastung während des Aufheizvorganges. Als Beurteilungskriterium kann etwa die Erhöhung der Raumlufttemperatur nach 5 Tagen herangezogen werden. Solche Betrachtungen haben Eingang in das Normenwesen gefunden, beispielsweise für einfache Nachweisverfahren des sommerlichen Wärmeschutzes [5][6].

Innerhalb solcher Betrachtungen geht jeweils eine zeitlich gemittelte Wärmelast in die Raumbilanz ein. Der g -Wert von Gläsern geht linear ein in die äussere Wärmelast. Somit sind auf dieser Ebene die Temperaturerhöhung eines Raumes und die beschriebenen dynamischen Effekte bezüglich des Temperaturverhaltens einfach zu ermitteln. Innerhalb kurzer Zeit kann so eine effiziente Ab-

stimmung der Parameter gefunden werden und wenn nötig ergänzend mit einer numerischen dynamischen Simulation verfeinert werden.

Selektive Gläser verringern die Wärmelast zunächst über den tieferen g-Wert. In den Produktspezifikationen wird meist der **g-Wert bei senkrechtem Einfall** angegeben und in den einfachen Nachweisverfahren der schräge Einfall pauschal mit einem Faktor 0.9 berücksichtigt. Der Effekt der Winkelabhängigkeit des g-Wertes auf die Wärmelast lässt sich jedoch präziser quantifizieren: Mittelt man den g-Wert über einen Zeitabschnitt eines Monats, so zeigt sich eine jahreszeitliche Variabilität. Diese ergibt sich aus dem jeweiligen Sonnenstand in Bezug auf die Orientierung der Glasfläche. Es ist sinnvoll, den g-Wert pro Monat und Wand-Orientierung anzugeben. In der Südrichtung etwa ergibt sich eine erwünschte **Winkelselektivität**, indem im Sommer infolge des hohen Sonnenstandes der g-Wert etwas reduziert erscheint gegenüber einem Wintermonat. Weiter hängt die Winkelselektivität von den Anteilen direkter und diffuser Globalstrahlung ab, weshalb der g-Wert auch pro Klimazone (alpin, Mittelland etc.) angegeben werden sollte.

Mit zunehmender gesamter Wärmelast Q_{total} pro Tag und Energiebezugsfläche ist ein zunehmender Technisierungsgrad zur Einhaltung des thermischen Komforts im Sommer notwendig [3]. Zuerst reichen Verschattung und Nachtlüftung aus, bis ein Bedarf an Kühlenergie notwendig wird. Mit zunehmendem Technisierungsgrad scheint der Einsatz dynamischer Simulationen angebracht. Durch weitreichende Parameterstudien lassen sich umgekehrt einfach handhabbare Kriterien des jeweils zur Abführung der Wärmelast notwendigen Technisierungsgrades ermitteln.

Solche Bestrebungen nach einer einfach handbaren Methodik der nachvollziehbaren Erfassung und Beurteilung des Elektrizitätsbedarfes von Gebäuden (auch Kurzverfahren) sind derzeit aktuell [7]. Sie ergeben sich im Gefolge der EU-Richtlinie [8] mit dem Ziel einer gesamtheitlichen Betrachtung der Energieeffizienz der Gebäude (Heizung, Kühlung, Beleuchtung, Luftförderung).

Damit erscheinen uns die dynamische Simulation und die Abschätzverfahren als sich gegenseitig ergänzende Verfahren zum Design der Glas-Eigenschaften. Letztere greifen ja in zweifacher Hinsicht direkt in den Energiehaushalt ein – über den solaren Gewinn und die Tageslichtnutzung.

2. Messanlage und Datenauswertung

2.1 Ausbau der Messapparatur

Das **Ziel des Ausbaus der Messapparatur** ist die **winkelabhängige Messung** der spektralen Transmission und Reflexion.

- Wellenlängenbereich: 340 – 2300 nm
- Einstrahlwinkelbereich: 0° – 75°

Aus diesen Daten ergibt sich direkt auch die Absorption. Es ist geplant, mit einem Zusatzexperiment auch noch den winkelabhängigen g-Wert zu ermitteln. Der **aktuelle Stand** hierzu ist:

Spektrometer

Für die spektralen Messungen stehen zurzeit zwei Spektrometersysteme zur Verfügung.

1. Gittermonochromator 200 – 1800 nm
2. Monochromatoren mit CCD-Array 215 – 1700 nm

Mit dem CCD-Array kann ein vollständiges Spektrum innerhalb von Sekunden aufgenommen werden. Somit verkürzt sich die Zeit zwischen Referenzmessung und Messung dramatisch. Auf diese Weise erreichen wir nun eine Reproduzierbarkeit besser 3 ‰.

Vergleiche zwischen den beiden Spektrometern ergaben im Messresultat der Transmission einen Unterschied von bis zu 1% Punkt. Dieser Fehler kommt vor allem durch Nichtlinearitäten der Spektrometerdetektoren zustande. Zurzeit arbeiten wir an Nachkalibrierungen.

Lichtquelle

Kurzfristige Intensitätsschwankungen konnten durch geeignete Regelung vermindert werden. Langfristige Schwankungen spielen dank der kurzen Messzeit keine Rolle mehr.

Zur Erweiterung des Messbereiches im UV-Bereich wurde die Lichtquelle mit zwei zusätzlichen hochfrequenten UV-Leuchtstoffröhren bestückt. Dies ermöglicht nun standardmässige Messungen bis 340 nm und bei Bedarf auch bis ca. 280 nm (Fig. 2.1 und Fig. 2.2).

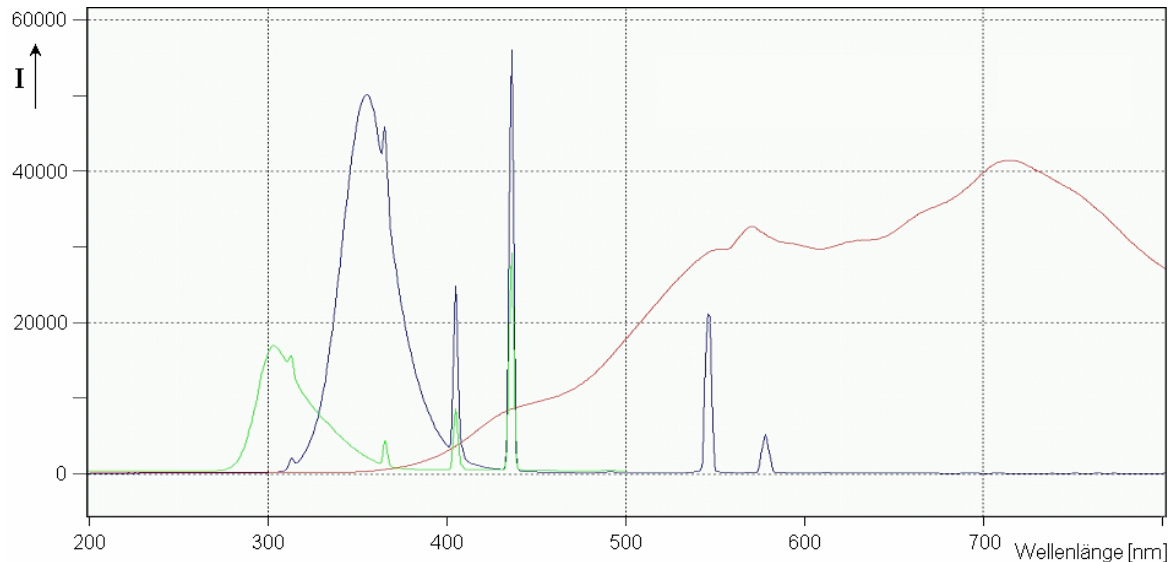


Fig. 2.1: Gemessene **Intensität I** (willkürliche Einheiten) der verschiedenen Lichtquellen:

- Blau:** Quarzhalogen-Lämpchen
- Rot:** UV-Leuchtstoffröhre mit Maximum bei 355 nm
- Grün:** UV-Leuchtstoffröhre mit Maximum bei 303 nm

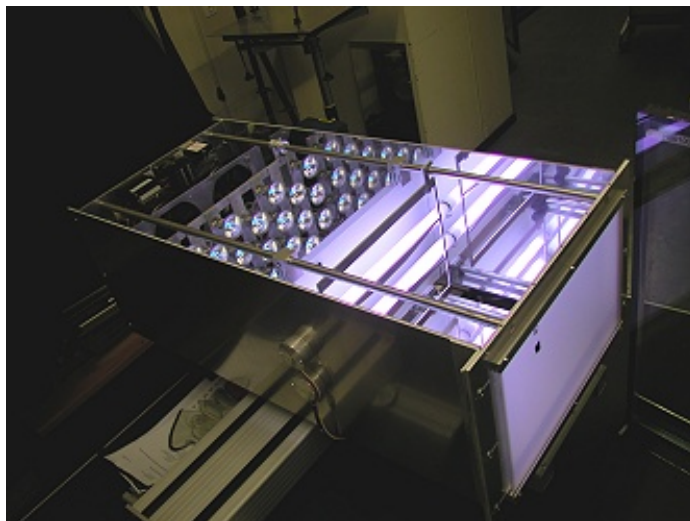


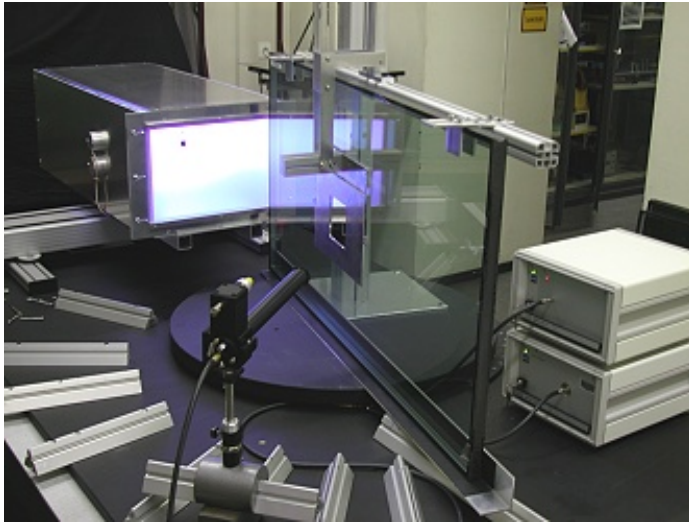
Fig. 2.2:
Offener Kasten mit Lichtquelle zur Erzeugung des homogenen Lichtfeldes.

Von links nach rechts:

Elektronik, Ventilatoren, Quarzhalogen-Lämpchenfeld, zwei Diffusorplatten, zwei UV-Leuchtstoffröhren, Blenden zum Ausgleich der Intensitätsunterschiede der UV-Leuchtstoffröhren, Lichtaustritt durch Diffusor.

Neuer Referenzspiegel

Für die Messung der winkelabhängigen Reflexion (Fig. 2.3) benutzen wir einen Aluminiumspiegel als Referenz. Es wurde ein spezieller Spiegelhalter gebaut. Dieser wird bei Bedarf vor das zu messende Fenster gehängt. Die Aufhängung ist so konstruiert, dass die Rückseite der Spiegelplatte sich perfekt an das Fenster anschmiegt. Die Spiegeldicke von 3 mm bewirkt nur einen geringen Versatz des Strahlenganges. Die Ausrichtung wird mit einem Laser kontrolliert.



*Fig. 2.3:
Reflexionsmessung mit
Referenzspiegel.*

Der mit einer SiO_2 -Schutzschicht versehene Referenzspiegel wurde mittels Ellipsometrie bei uns charakterisiert. Die daraus erhaltenen spektralen und winkelabhängigen Reflexionsdaten konnten auf unserer Fenstermessapparatur selbst sehr gut bestätigt werden.

Mobile Messungen

Zurzeit entwickeln wir ein vereinfachtes System für die senkrechte Messung an Fenstern, die fest in Gebäuden eingebaut sind. Bei unbeweglichen Fenstern ist die Referenzmessung besonders schwierig. Wir sind gespannt, ob es auch für diesen Fall gelingen wird, mit der notwendigen Genauigkeit zu messen. Wir könnten dann ohne grossen Aufwand nachträglich Fenster identifizieren und qualifizieren, Qualitätsunterschiede feststellen, Alterungserscheinungen aufspüren und untersuchen usw.

2.2 Optische Daten kommerzieller Gläser

Die Bestimmung optischer Daten und aller daraus berechneten relevanten Parameter kommerzieller Gläser liefert ein detailliertes Bild der physikalischen Eigenschaften der Produkte. Dazu gehören Parameter, die normalerweise in Produktdokumentationen nicht angegeben werden, wie beispielsweise:

- (1) die Winkelabhängigkeit der Transmissionsgrössen τ_e , τ_v , $\tau(\lambda)$
- (2) die Winkelabhängigkeit der Reflexionsgrössen ρ_v , ρ_e , $\rho(\lambda)$
- (3) die Farbe des durch das Glas transmittierten Tageslichts (repräsentiert durch die Normlichtart D65) und die Winkelabhängigkeit des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a .

Gerade die Bedeutung der Winkelabhängigkeit vieler Parameter hat sich bei unseren Untersuchungen an kommerziellen Gläsern deutlich gezeigt. Die nachfolgenden Betrachtungen sollen dies am Beispiel der Farbe des transmittierten Lichts und des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a eines kommerziellen Sonnenschutzglases illustrieren.

Tabelle 2.1:
Vergleich Herstellerangaben und Messungen am IfP, Glas: M001005 (interne Bezeichnung)

	Herstellerangaben (Stand 28.4.2004)	Im Vergleich dazu unsere Messungen
Lichttransmissionsgrad τ_v	40%	39.5%
direkter Strahlungstransmissionsgrad τ_e	18% ($\tau_e/\tau_v = 0.45$)	18.3% ($\tau_e/\tau_v = 0.463$)
Gesamtenergiedurchlassgrad nach DIN EN 410	22%	—
allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a	88%	87.8%

Für diese Parameter haben unsere Messungen eine gute Übereinstimmung mit Herstellerdaten gezeigt. Dieses Glas besitzt also bei senkrechter Lichttransmission ein Verhältnis τ_e/τ_v von 0.45, was im Vergleich mit anderen Produkten einen sehr guten Sonnenschutz darstellt. Schaut man sich allerdings die Farbverhältnisse dieses Glases etwas näher an, wird klar, auf welche Kosten das τ_e/τ_v Verhältnis erreicht wird.

Tabelle 2.2: RGB Farbkoordinaten

Winkel	R	G	B
0	154.70	173.29	162.85
10	154.14	173.11	162.69
20	152.72	172.69	162.77
30	150.11	171.94	162.35
40	145.93	170.83	160.42
50	138.90	168.85	155.76
60	125.69	163.43	145.60
62	121.96	161.42	142.56
64	117.80	158.92	139.12
66	112.82	155.84	135.04
68	107.47	152.04	130.53
70	101.46	147.34	125.34

Farbe des transmittierten Normlichts D65

Unsere spektralen Transmissionsmessungen werden routinemässig bezüglich der Farbe des transmittierten Lichts in allen gängigen Farbkoordinaten analysiert.

Für die RGB Farbkoordinaten erhalten wir in Abhängigkeit des Transmissionswinkels nebenstehende Werte:

Die 12 Farbwerte sind in Figur 2.4 dargestellt. Deutlich sichtbar ist die Grünverschiebung bei grossen Lichteinfallswinkeln.

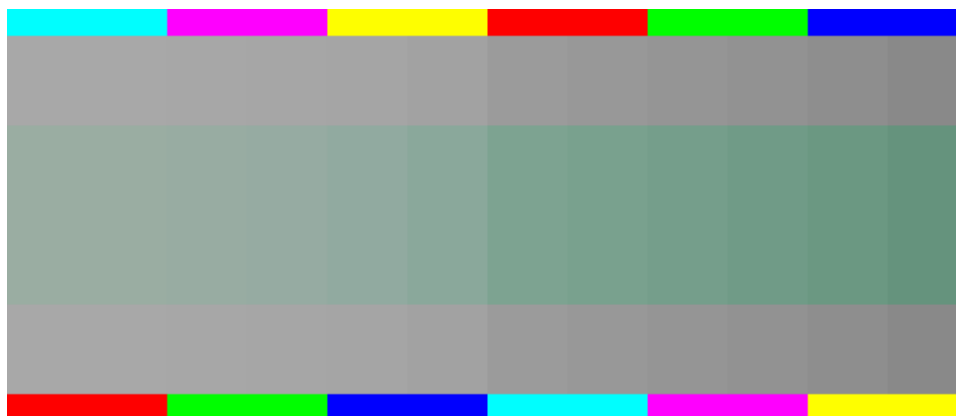


Fig. 2.4*: Farbe des transmittierten Lichts des Glases M001005 in Abhängigkeit des Transmissionswinkels. Links 0°, rechts 70°. Die Farben des transmittierten Lichts, dargestellt im inneren Bereich der Figur, sind umgeben von entsprechenden Farben in neutralem Grau gleicher Helligkeit wie diejenige des transmittierten Lichts. Die Farbbalkenzeilen oben und unten stellen reines rot, grün, blau im RGB-Farbraum bzw. cyan, magenta, yellow im CMY-Raum dar.

Die Figur 2.5 zeigt die Spur der Farbkoordinaten in der ab-Ebene des CIE-Lab Farbraums. Die Farbverschiebung mit zunehmendem Transmissionswinkel ist hier besonders deutlich sichtbar.

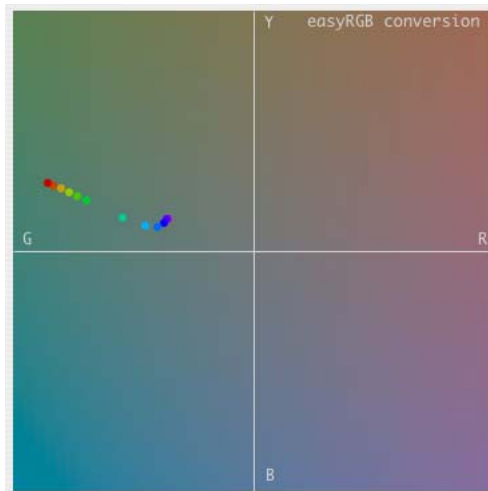


Fig. 2.5*:

Spur der ab Farbkoordinaten in der ab -Ebene des CIE-Lab Farbraums. Die Spur beginnt rechts bei einem Winkel von 0° (violetter Punkt, $a = -8.52$, $b = 3.15$) und endet links bei 70° (roter Punkt, $a = -20.51$, $b = 6.69$). Die Helligkeit der Farbdarstellung in der ab -Ebene wurde auf $L = 50$ gesetzt.

Farbverschiebungen bei den Testfarben zur Berechnung von R_a

Die Farbwiedergabe von 8 Testfarben (definiert in EN 410 [2]) wird durch das einfallende Licht nach der Transmission durch ein Glas beeinträchtigt.

Diese Farbverschiebungen werden mit dem allgemeinen Farbwiedergabe-Index R_a beschrieben. Ein Wert $R_a = 100\%$ entspricht perfekter, farbtreuer Wiedergabe, je kleiner R_a ist, desto grösser sind die Farbabweichungen.

Winkel	R_a
0	87.79
10	87.53
20	86.76
30	85.40
40	83.37
50	80.45
60	76.28
62	75.36
64	74.33
66	73.21
68	72.09
70	70.96

Tabelle 2.3:

Für obiges Beispiel ergeben sich nebenstehende Werte für R_a in Funktion des Einfallswinkels des Lichts.

* Druckerbedingt können sich Abweichungen in Farbe und Kontrast ergeben. Die direkte Betrachtung des pdf-Files auf einem Bildschirm wird empfohlen.

Auch diese Daten zeigen deutlich die Bedeutung der winkelabhängigen Messungen, da R_a bei grossen Winkeln signifikant abnimmt. Allerdings ist die Grösse R_a nur eine sehr unvollständige Beschreibung der Qualität der Farbwiedergabe. Sehr viel aussagekräftiger ist die direkte Darstellung der Testfarben bei Beleuchtung mit D65 Normlicht, einerseits durch das Glas und andererseits ohne Glas. Nachfolgende Figuren zeigen diese Farbverschiebungen der Testfarben bei direkter Beleuchtung mit D65 Normlicht (Fig. 2.6) und nach der Transmission durch das Glas bei 0° (Fig. 2.7) und 70° (Fig. 2.8).



Fig. 2.6*:

Testfarben nach EN 410 beschrieben durch spektrale Remissionsgrade $\beta(\lambda)$ beleuchtet mit Normlicht D65.

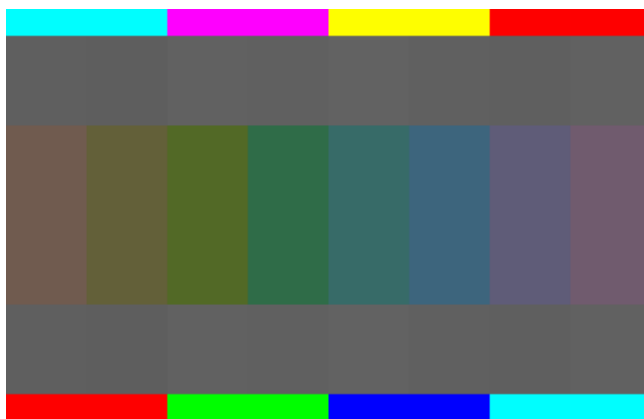


Fig. 2.7*:

Testfarben nach EN 410 beleuchtet mit Normlicht D65 nach Transmission durch Glas M001005 unter senkrechtem Lichteinfall.

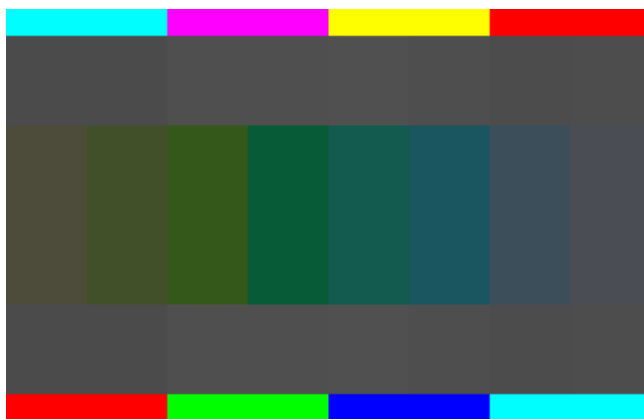


Fig. 2.8*:

Testfarben nach EN 410 beleuchtet mit Normlicht D65 nach Transmission durch Glas M001005 unter einem Winkel von 70°. Man beachte das Fehlen des Rotanteils bei der Testfarbe 8 (ganz rechts), der auch bei einer helleren Darstellung nicht erkennbar wird (siehe auch Fig. 2.9, die das Fehlen des Rotanteils der Testfarben 1, 7, 8 bestätigt).

* Druckerbedingt können sich Abweichungen in Farbe und Kontrast ergeben. Die direkte Betrachtung des pdf-Files auf einem Bildschirm wird empfohlen.

Eine noch aussagekräftigere Darstellung der Farbverschiebungen erhält man wiederum mit Hilfe der ab Farbebene im CIE-Lab Farbraum. Die Figur 2.9 zeigt die 8 Testfarben bei direkter D65 Beleuchtung und bei einer Beleuchtung durch das Glas M001005 bei einem Transmissionswinkel von 0° und 70°. Diese Darstellung zeigt deutlich, dass bei einem Transmissionswinkel von 70° die Rotanteile der Testfarben 1 (violetttes Symbol), sowie 7 (gelb-rotes Symbol) und 8 (rotes Symbol) völlig unterdrückt werden.

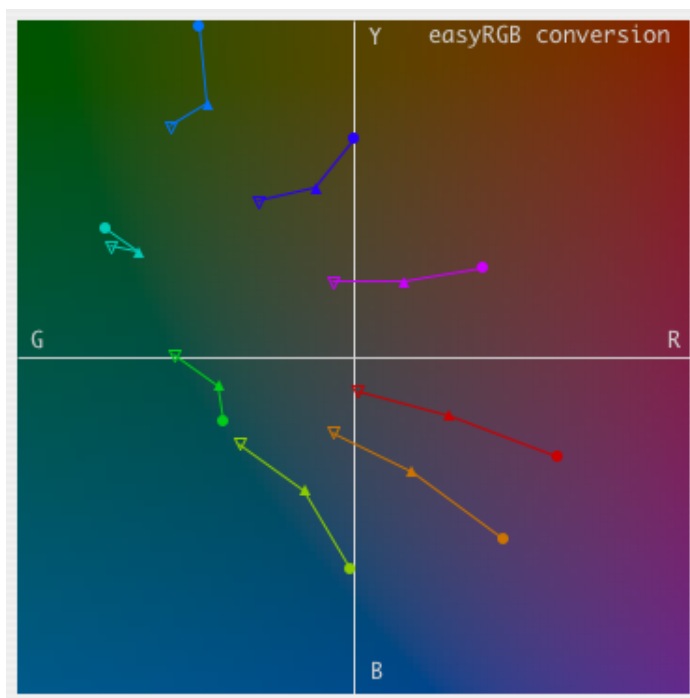


Fig. 2.9:

Darstellung der 8 Testfarben (runde Symbole) bei direkter Beleuchtung mit D65 Normlicht und der Beleuchtung durch das Glas M001005 bei senkrechter Durchstrahlung (gefüllte Dreiecke) und unter einem Winkel von 70° (leere Dreiecke) in der ab Ebene des CIE Lab Farbraums. Die Testfarbe 1 entspricht dem violetten Punkt. Im Gegenuhrzeigersinn kommt man schliesslich zur Testfarbe 8 (roter Punkt).

Die a, b-Achsen decken einen Bereich von -45 bis +45 ab. Die Helligkeit der Farbdarstellung in der ab-Ebene wurde auf $L = 30$ gesetzt

Berücksichtigt man die deutliche Abweichung von der Farbneutralität des transmittierten Lichts, sowie die kleinen R_a Werte bei grossen Einfallswinkeln, muss die Beurteilung des Verhältnisses $\tau_e/\tau_v = 0.45$ etwas differenzierter erfolgen. Falls man nämlich die Bedingungen der Farbneutralität sowie eines hohen Farbwiedergabe-Indexes grosszügig anwendet, wären noch deutlich bessere τ_e/τ_v Werte möglich. Werden die Farbbedingungen völlig ausser Acht gelassen, sind nämlich τ_e/τ_v Werte um 0.23 möglich.

3. Neue Beschichtungen

3.1 Transparente leitende Oxide

Transmissionen mit $\tau_e/\tau_v = 0.33$ und hoher Farbneutralität können durch Mehrschichtsysteme mit vielen Schichten hergestellt werden. Ein wichtiger Bestandteil dieser Schichtsysteme sind die sogenannten „heat mirrors“. Sie besitzen eine hohe Transmission im sichtbaren Bereich der Spektrums und eine hohe Reflexion bei grossen Wellenlängen. Ein heat mirror besteht normalerweise aus einer dünnen Metallschicht (Au, Ag, Cu, Al) oder einer metallischen Nitridschicht (TiN, ZrN), die in zwei Antireflexions-Schichten eingebettet wird. Um die Anzahl der verwendeten Schichten zu reduzieren, müssen die Eigenschaften der einzelnen Schichten verändert werden. Das gewählte Modellsystem basiert auf einer einzigartigen Eigenschaft der Gruppe der transparenten und leitenden Oxide. Diese haben eine breite Bandlücke (3.5–4.5 eV) [9] und sind deswegen im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich transparent, und besitzen gleichzeitig eine moderate Leitfähigkeit (10^2 – $10^5 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) [10]. Indiumoxid gehört zu dieser Gruppe und wurde als Modellsystem gewählt, da es bereits gut untersucht ist. In weiteren Untersuchungen sollen andere Oxide verwendet werden.

Das Dotieren von Indiumoxid mit anderen Stoffen kann die Leitfähigkeit deutlich erhöhen, weil in diesem Fall das Leitungsband mit Elektronen besetzt und die Bandlücke verkleinert wird. Wenn die Frequenz eines externen Feldes gleich oder kleiner als die Plasmafrequenz der Elektronen ist, können diese den elektromagnetischen Oszillationen folgen und die ankommende Strahlung wird

reflektiert. Man kann zeigen, dass die cut-off-Kante der Transmission eine Funktion der Konzentration der freien Ladungsträger im Leitungsband ist.

Als Dotierungsstoff haben wir Silber gewählt, da Silber ein guter Infrarotspiegel und ein in der Fensterindustrie häufig verwendetes Material ist. Auch hier ist Silber nur als Modellsystem gewählt worden, und es sollen weitere Dotierungsstoffe untersucht werden.

3.2 Experimentelle Methoden (Sputtering, PES)

Für die Abscheidung der Oxidschichten und ihre Dotierung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Das von uns gewählte Magnetronsputtering hat mehrere Vorteile, wie z.B. hohe Abscheidungsraten auf großen Flächen und die stöchiometrische Zusammensetzung der Filme lässt sich leicht ändern. Des Weiteren wird Magnetronsputtering bereits industriell angewendet. Die Schichten wurden bezüglich ihrer chemischen Eigenschaften mittels Photoemissionsspektroskopie (PES) untersucht. Um die für Sonnenschutzfenster wichtigen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und Absorption) zu bestimmen, wurden die Oxidschichten auf Glassubstrate abgeschieden und mit dem Cary 5 Spektrometer vermessen. Die optischen Konstanten n und k wurden durch Messungen mit einem Ellipsometer bestimmt.

3.3 Resultate

Im Folgenden sollen die erzeugten Schichten und ihre Eigenschaften kurz erläutert werden:

- **In_2O_3**

Für die Herstellung von Indiumoxidschichten wurde ein reines Indiumtarget in einer Sauerstoff-Argon-Atmosphäre gesputtert. Die erhaltenen Schichten wurden bezüglich ihrer chemischen und optischen Eigenschaften untersucht. Die erhaltene Transmission ist in Übereinstimmung mit der Literatur [11].

- **In_2O_3 dotiert mit Ag (5%)**

Das Indiumoxid wurde durch Magnetronsputtering mit Silber dotiert, indem zusätzlich zu dem Indiumtarget noch ein Silbertarget verwendet wurde. Die Targets wurden gleichzeitig durch ein Argon-Sauerstoffgemisch gesputtert. Die Anordnung wurde so gewählt, dass sich das Silbertarget im Zentrum des ringförmigen Indiumtargets befindet. Beide wurden separat durch zwei Netzteile versorgt, so dass die Zusammensetzung der Schichten variiert werden konnte.

Die Transmission dieser Schichten nahm im infraroten Wellenlängenbereich nicht wie erwartet ab. XPS-Messungen ergaben, dass bei diesen Schichten das Silber ebenfalls als Oxid vorliegt, und damit seine metallischen Eigenschaften verliert. Diese sind aber für die Reflektion im infraroten Wellenlängenbereich verantwortlich und somit notwendig.

- **In_2O_3 dotiert mit Ag (5%) und 350°C ($T_C: \text{AgO} < T_C: \text{In}_2\text{O}_3$)**

Zum Beheben der im vorherigen Punkt beschriebenen Probleme der Oxidation des Silbers wurden die Proben erhitzt. Es ist bekannt, dass Erhitzen einen Einfluss auf die optischen Eigenschaften von Zinn dotiertem Indiumoxid hat [12]. Hierbei wurde die Tatsache ausgenutzt, dass die kritische Temperatur T_C , bei der sich die Oxide der Dotiermetalle in ihre Bestandteile zersetzen, niedriger ist als diejenige von Indiumoxid. Wird das mit Silber dotierte Indiumoxid auf eine Temperatur von 350°C erhitzt, zerfällt das Silberoxid in Silber und Sauerstoff, während das Indium weiter als Oxid vorliegt. Betrachtet man die Transmission nach dem Erhitzen der Probe, so verliert die Transmission im Bereich der Infrarotstrahlung an Intensität, d. h. das langwellige Licht wird reflektiert.

Die Untersuchungen zur Erhitzung von mit Silber dotiertem Indium sind noch nicht abgeschlossen. Um den Einfluss des Erhitzens auf die Oxidschichten und deren optischen Eigenschaften besser

verstehen zu können, sollen systematische Untersuchungen folgen und für solare Anwendungen optimiert werden.

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
 - Schweizerische Bundesbahnen SBB

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Simulationen

Um Aussagen für **typische Büroräume** machen zu können haben wir mit dem Simulationsprogramm *CAPSOL* den Anschluss hergestellt zu den Simulationen in der Dokumentation *SIA D 0176* [3]. Und zwar geht es hier um die **Vergleichbarkeit der Rechenresultate** in typischen Basisfällen von Gebäuden mit hohem Glasanteil und von präzise definierten Typen des Technisierungsgrades für die Haustechnik als Ausgangspunkt für weitere Parameterstudien.

Die wichtigsten Einflussparameter wurden an einem **realen Objekt** (Schulhaus Donnerbaum) untersucht und so die Modellierungsschritte innerhalb der Simulation weiter überprüft. Zur Untersuchung der einzelnen Glasparameter wurde insbesondere der Schritt von der Messung der Winkelabhängigkeit hin zu deren Implementierung in die Eingabestruktur von *CAPSOL* überprüft.

Die Auswirkungen der einzelnen Modellparameter in den Simulationen haben wir zusätzlich in **einfachen Bilanzmodellen** überprüft. So werden die Effekte einzelner Glasparameter (Winkelabhängigkeit, spektrale Abhängigkeit) isoliert betrachtet und geben aussagekräftige Hinweise auf die Richtung der Glasentwicklung. Im weiteren sollen die dynamischen Rechnungen dazu dienen, die Auswirkung der Kopplung einzelner Massnahmen in einem System, in das zudem regelnd eingegriffen wird, genauer einzugrenzen.

Messapparatur

Mit der Fenstermessapparatur wurden etwa 20 verschiedene kommerzielle Fenster aus der Sparte Sonnenschutz spektral und winkelabhängig gemessen. Die Auswertungen zeigten ein Verbesserungspotential hinsichtlich Selektivität solar-visuell von mindestens 30%. Dies auch unter Berücksichtigung des Anteiles im fehlenden Messbereiches an den Rändern (UV und IR).

Mit der in Kürze möglichen Reflexionsmessungen können die Fenster optisch vollständig charakterisiert werden. Daraus ergeben sich auch wertvolle Erkenntnisse zur Farbproblematik.

Ganz allgemein hat sich gezeigt, dass die Herstellerangaben zu den Fenstern für den optimalen Einsatz oftmals nicht detailliert genug sind. Somit liegt hier ein unmittelbar nutzbares Verbesserungspotential brach, das nicht zwingend von geringer Bedeutung ist.

Schichtsysteme

Als erstes Modellsystem wurden mit Silber dotierte Indiumoxidschichten hergestellt. Diese Schichten wurden bezüglich ihrer chemischen und optischen Eigenschaften untersucht. Es zeigte sich, dass das Silber als Oxid und nicht wie gewünscht als Metall vorlag. Versuche, die Schichten zu Erhitzen, ergaben, dass die Problematik unter anderem auf diese Weise angegangen werden kann.

Mittels Simulationen von verschiedenen Schichtsystemen soll der Einfluss verschiedener Schichtmaterialien und deren Anordnung auf die optischen Eigenschaften untersucht werden. Auf diese Weise sollen verschiedene Systeme theoretisch entwickelt werden, die dann an unserer Messanlage experimentell umgesetzt werden sollen. Des weiteren sollen ihre optischen Eigenschaften untersucht und mit jenen aus der Simulation verglichen werden. Hier werden Abweichungen erwartet, da die Simulationen Effekte an den Schichtübergängen nicht berücksichtigen können.

Öffentlichkeitsarbeit

Minergie-Messe 27.-30. November 2003 in Bern

Tag der offenen Tür am Institut für Physik, Uni Nacht am 18. Juni 2004

Fernsehsendung MTW ausgestrahlt im September 2004

Referenzen

Kapitel 1: Simulationen

- [1] CAPSOL manual Version 4.0, **Computer program to calculate multizonal transient heat transfer**, Physibel Document (2002)
- [2] EN 410, **Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen**, Deutsches Institut für Normung (1998) D
- [3] 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)
- [4] LBNL Federal Technology Alert, **Spectrally selective Glazings**, DOE/EE-0173 (1998)
- [5] SIA 180, **Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau**, SIA Zürich (1999)
- [6] EnEV, **Energieeinsparverordnung**, Beuth-Verlag (2002)
- [7] IWU Forschungseinrichtung des Landes Hessen, **Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfes**, Module Klimakälte, Beleuchtung, Darmstadt (2004)
- [8] Europäische Richtlinie 2002/91/EG, **Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden**, http://www.bbr.bund.de/bauwesen/download/richtlinie2002_energie.pdf (2002)

Kapitel 3: Neue Beschichtungen

- [9] M. Bender, W. Seelig, C. Daube et al.: ***Dependence of oxygen flow on optical and electrical properties of DC-magnetron sputtered ITO films***, *Thin Solid Films* 326 (1998), Heft 10, 72.
- [10] C.H. Lee and C.S. Huang: ***Spray pyrolysis deposition for indium oxide doped with different impurities***, *Materials Science and Engineering B22* (1994), 233.
- [11] E.Baba Ali, H. El Maliki, J.C. Bernede et al.: ***In₂O₃ deposited by reactive evaporation of indium in oxygen atmosphere -- influence of post-annealing treatment on optical and electrical properties***, *Materials Chemistry and Physics* 73 (2002), 78.
- [12] A. Hultaker, K. Järrendahl, J. Lu, et al.: ***Electrical and optical properties of sputter deposited tin doped indium oxide thin films with silver additive***, *Thin Solid Films* 392 (2001), 305.