

Jahresbericht 2002, 9. Dezember 2002

# Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung

## A. Schichten und Schichtsysteme für solare Energiesysteme

### B1. Untersuchung der optischen Eigenschaften von Fenstern

### B2. Thermische Verluste durch Wärmebrücken an Gebäuden

Autor und Koautoren	Jamila Boudaden, Shui-Ching Ho, Dieter Kohler, Peter Oelhafen, Georges Reber, Roland Steiner, Ivan Videnovic
beauftragte Institution	Institut für Physik der Universität Basel
Adresse	Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel
Telefon, E-mail, Internetadresse	061-267 37 13, peter.oelhafen@unibas.ch <a href="http://monet.unibas.ch/oelhafen/">http://monet.unibas.ch/oelhafen/</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	37088
Dauer des Projekts (von – bis)	von März 1999 – bis März 2003

**Zusammenfassung:** Im Berichtsjahr wurde die Abscheidung von Schichtsystemen für die Anwendung von farbigen Abdeckgläsern von Sonnenkollektoren fortgesetzt. Dazu wurde sowohl die kontrollierte Abscheidung von dielektrischen Filmen als auch deren optische Charakterisierung weiterentwickelt. Vielschichtsysteme auf der Basis von fünf Titan- und Siliziumoxidschichten konnten erfolgreich kontrolliert auf Glas - und zu Analysezwecken auf Siliziumscheiben - abgeschieden werden. Auf der Seite der optischen Charakterisierung dieser Schichten mit spektroskopischer Ellipsometrie wurde auch die theoretische Seite der Auswertung weiterentwickelt. Es wurde ein Modell realisiert, das die Anpassung der optischen Konstanten  $n$  und  $k$  punktweise (bei einzelnen Wellenlängen) an die ellipsometrischen Messgrößen  $\Psi$  und  $\Delta$  erlaubt. Erste Tests sind bereits erfolgreich verlaufen.

Die Infrastruktur für die Schichtabscheidung wurde durch ein selbst konstruiertes und gebautes Magnetron mit zwei konzentrischen Targets ergänzt. Diese Quelle erlaubt die simultane Abscheidung von zwei Materialien, wobei das Konzentrationsverhältnis über die elektrische Ansteuerung eingestellt werden kann. Erste Tests haben gezeigt, dass gegenüber den bisher verwendeten Magnetrons, dank einer verbesserten Kühlung, die doppelte Sputterrate erreicht werden kann.

Eine neu gebaute optische Apparatur erlaubt uns, eine detaillierte spektrale und winkelabhängige Charakterisierung von Komponenten von Gebäudefenstern (Gläser, Beschichtungen, Folien, u.s.w.) und ganzen Fenstern. Diese Apparatur konnte in den letzten Tagen erfolgreich getestet werden. Die Zielsetzung dieses Projekts ist die genaue Bestimmung der optischen Eigenschaften der heute eingesetzten Fenster, um das Potential der Energieeinsparung durch besser optimierte Transmissions- und Reflexionseigenschaften abzuklären. Zudem sollen die Daten für die dynamische thermische Modellierung von Gebäuden eingesetzt werden. Der sommerliche Wärmeschutz ist dabei von besonderem Interesse.

## Inhalt

### A. Schichten und Schichtsysteme für solare Energiesysteme

1. Projektziele
  2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse
    - 2.1 Ellipsometrische Untersuchungen an Schichten
    - 2.2 Beschichtungen für Abdeckgläser von thermischen Sonnenkollektoren
    - 2.3 Charakterisierung der Nanostruktur von Komposit-Materialien
      - 2.3.1 Ausgangslage und Zielsetzung
      - 2.3.2 Messungen und ihre Deutung
      - 2.3.3 Inbetriebnahme und Charakterisierung des neuen Magnetrons
- Publikationen und Vorträge im Jahr 2002

### B. Bauphysik: Energie

#### B1. Untersuchung der optischen Eigenschaften von Fenstern

1. Projektziel
  - 1.1 Erweiterung der messtechnischen Möglichkeiten auf ganze Elemente
  - 1.2 Anforderungen an die Messapparatur
2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse
  - 2.1 Messprinzip
  - 2.2 Inbetriebnahme der Messapparatur und erste Testmessungen
    - 2.2.1 Wellenlängenabhängige T-Messungen bei verschiedenen Winkeln
    - 2.2.2 Winkelabhängige Transmission geprüft am Modell
3. Literaturverzeichnis

#### B2. Themische Verluste durch Wärmebrücken in Gebäuden

Zusammenfassung

1. Projektziel
2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse
3. Literaturverzeichnis

#### Nationale Zusammenarbeit

#### Internationale Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen

#### Bewertung 2002 und Ausblick 2003

## A. Schichten und Schichtsysteme für solare Energiesysteme

### 1. Projektziele

- **Optische Optimierung von Schichtsystemen anhand von optischen Materialdaten**
  - Bestimmung optischer Konstanten von Beschichtungsmaterialien auf Basis der Ellipsometrie
  - Bestimmung der optischen Konstanten der relevanten Beschichtungsmaterialien
  - Simulation von Mehrfachbeschichtungen auf Metall- und Glassubstraten
  - Optimierung Sonnenkollektorbeschichtungen
  - Optimierung Fensterbeschichtungen
- **Abscheidung und Untersuchung der Eigenschaften von Nanokompositschichten**
  - neue Depositionsmethoden durch Bogenentladungen und Magnetrons mit zwei Targets
  - Untersuchungen zur Nanostruktur von Kompositmaterialien
- **Funktionale Beschichtungen für thermische Sonnenkollektoren**

### 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

#### 2.1 Ellipsometrische Untersuchungen an Schichten

Die Ellipsometrie liefert als Messgrößen die Parameter  $\Psi$  und  $\Delta$ , die im wesentlichen wellenlängenabhängig die Drehung der Polarisationssebene und die Phasenverschiebung von Licht beschreiben, das an einer Probe reflektiert wird. Letztlich will man aber die optischen Konstanten  $n$  und  $k$  der Probe bestimmen, was selbst bei einer einfachen Schicht auf einem Substrat nicht trivial ist. Die erforderlichen Anpassungen der Parameter hat nach unserer Erfahrung mit der uns zur Verfügung stehenden kommerziellen Software zu keinen befriedigenden Resultaten geführt. Wir haben deshalb ein Programm entwickelt, das uns die Anpassung der optischen Konstanten punktweise (bei diskreten Wellenlängen) an die ellipsometrischen Parameter in Schritten von 0.01 erlaubt. Erste Tests an den Systemen Luft-Goldschicht-Silizium und Luft-Titanoxid-Silizium konnten erfolgreich durchgeführt werden. Wir hoffen mit diesem neuen Programm die optischen Konstanten von Einzelschichten zuverlässig bestimmen zu können, um dann damit Vielschichtsysteme modellieren zu können. Die neuen Erkenntnisse wurden bereits bei der Charakterisierung von dielektrischen Schichten erfolgreich angewendet (s. nachfolgenden Abschnitt 2.2).

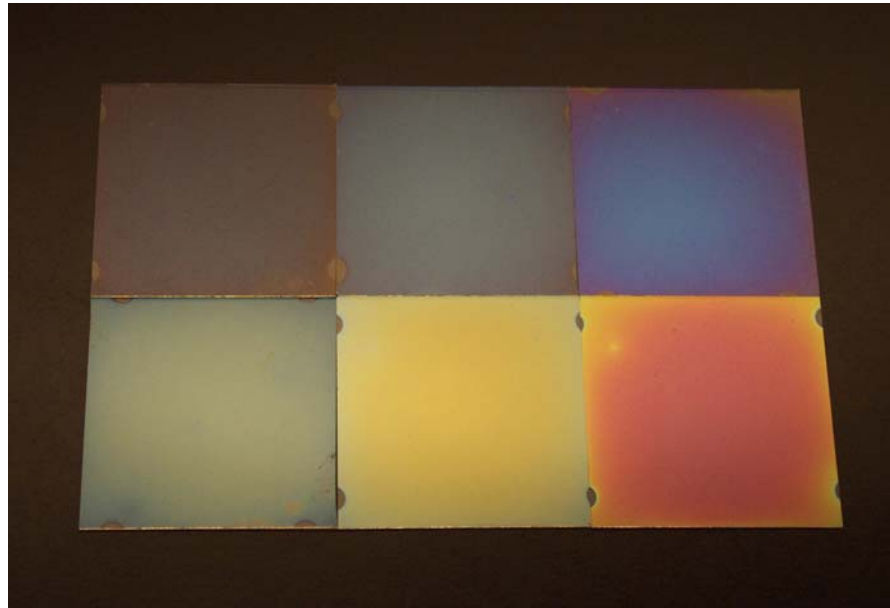
#### 2.2 Beschichtungen für Abdeckgläser von thermischen Sonnenkollektoren

(In Zusammenarbeit mit Prof. J.-L. Scartezzini und Dr. A. Schüler, LESO/EPFL)

In diesem Projekt werden farbige Beschichtungen für Abdeckgläser von Sonnenkollektoren entwickelt. Neben einem ästhetisch ansprechenden Aussehen sollen diese Gläser schliesslich eine hohe Transparenz von über 90% aufweisen. Das bedeutet, dass das reflektierte Licht mit hoher Effizienz farblich erscheinen soll. Das kann beispielsweise mit Interferenzschichten erzielt werden, die in einem schmalen Wellenlängenbereich das Licht reflektieren und praktisch keine Absorption besitzen.

Erste Beschichtungen, die aus Schichtfolgen unterschiedlicher Dicke von Titan- und Siliziumoxid bestehen, wurden auf Glas (für optische Untersuchungen) und auf Silizium (für die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung mit Photoelektronenspektroskopie, PES) abgeschieden. Abscheidungen aus nur einer Schicht (Titan- und Siliziumoxid) wurden zudem mit Ellipsometrie untersucht. Die Abscheidungen wurden durch reaktives Sputtern von reinem Titan und reinem Silizium mit einem Argon-Sauerstoff-Prozessgasgemisch gemacht. Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mit PES wurde *in-situ* durchgeführt. Die Schichtdeposition wurde *während* der Abscheidung mit Reflektometrie überwacht, was bei der verwendeten Laserwellenlänge neben den optischen Konstanten auch noch die Schichtdicke liefert.

Fig.1 zeigt sechs Proben, die aus bis zu fünf Schichten aus Titan- und Siliziumoxid bestehen. Diese weisen solare Transmissiongrade zwischen 82 und 92% auf.



**Fig. 1:** Sechs Proben mit Interferenzbeschichtungen aus Titan- und Siliziumoxid hergestellt durch reaktives Sputtern auf Glassubstraten.

### Zur Methode der Schicht-Deposition

Unser Ziel ist die Herstellung von farbigen Deckgläsern auf der Basis der optischen Interferenz mit Anwendung bei thermischen Sonnenkollektoren durch Deposition eines dünnen Mehrschichtsystemes auf deren Oberfläche. Das Glas soll ein schmales Band des sichtbaren Lichtes reflektieren unter Transmission des ganzen übrigen solaren Spektrums, letzteres zur Minimierung des Energieverlustes.

Um dieses Ziel zu erreichen, entschieden wir uns zur Verwendung von dielektrischen Schichten. Die Simulation zeigte, dass ein Stapel von  $\lambda/4$ -Schichten mit alternierend hohem bzw. tiefem Brechindex zu einem Maximum des Reflexionsvermögens nahe bei 100% führen würde bei gleichzeitig vernachlässigbarem Verlust des transmittierter solarer Strahlung.

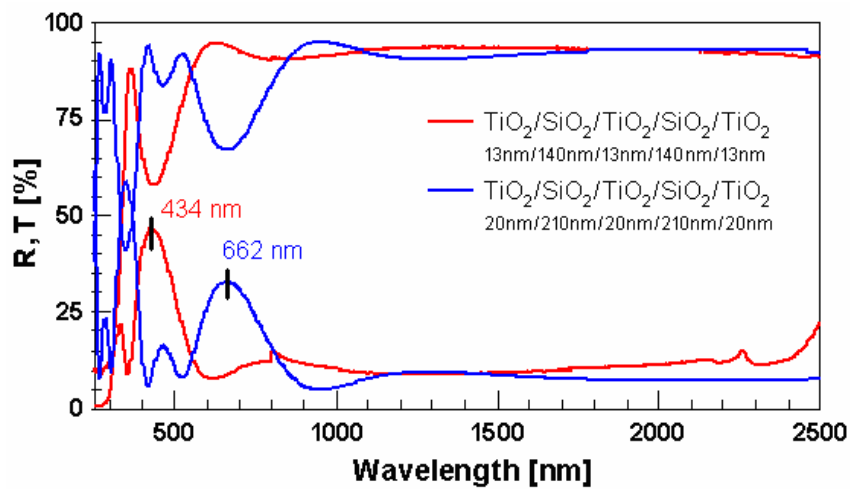
Wir untersuchten die Deposition an zwei unterschiedlichen Systemen:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  sowie  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  unter Anwendung der Technik des Sputterns mit einem Magnetron.

#### a.) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -Mehrschichtsysteme

Die Mehrfach-Schichtsysteme wurden innerhalb einer HV-Depositionskammer durch Magnetron-Sputtern deponiert in einer reaktiven Gasmischung aus Argon und Sauerstoff. Die Charakterisierung mittels XPS wurde Schritt für Schritt für jede Schicht durchgeführt, indem die Probe von der Depositionskammer direkt zur Analyse kammer transferiert wurde, also unter Aufrechterhaltung des Vakuums. Die resultierenden Schichten erwiesen sich als stöchiometrisch. Es wurde keine Kontamination ermittelt, insbesondere kein Kohlenstoff-Signal beobachtet. Die Wachstumsrate der  $\text{TiO}_2$ - und  $\text{SiO}_2$ -Schichten auf Substraten der Abmessung  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  wurden in-situ mit der Technik der Laser-Reflektometrie überwacht. Die mit dem AFM (Atomic Force Microscopy) bestimmte Oberflächenrauigkeit lag bei beiden Schichttypen unterhalb einem Nanometer. Die spektroskopische Ellipsometrie diente zur Ermittlung der optischen Konstanten der einzelnen dielektrischen Schichten. Durch Anpassung der ellipsometrischen Funktionen  $\Psi$  und  $\Delta$  bei gleichzeitiger Annahme einer Cauchy-Schicht können  $n$ ,  $k$  sowie die Dicke  $d$  des  $\text{SiO}_2$  mit einem minimalen Fehler bestimmt werden. Die Schichtdicken, wie sie mit den unterschiedlichen Methoden der Laser-Reflektometrie, der Ellipsometrie und der Rückstreu-Raster-Elektronenmikroskopie gemessen wurden, zeigen gute Übereinstimmung. Reflexions- und Transmissionsmessungen (siehe Fig. 2) der auf ein Glas-Substrat von  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  deponierten dielektrischen Mono-Schichten  $\text{SiO}_2$  und  $\text{TiO}_2$  bestätigten deren Transparenz.

Die Lage des Reflexionsmaximums der Systeme  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2//\text{Glas}$  sowie  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2//\text{Glas}$  stimmen überein mit den simulierten Resultaten. Wir konnten zeigen, dass es möglich ist, den Reflexions-Peak durch Ändern der Schichtdicke gezielt zu anderen

Wellenlängen zu schieben unter Änderung der Schichtdicken. Dieses Ergebnis zeigt, dass keine Durchmischung zwischen den TiO<sub>2</sub>- und SiO<sub>2</sub>-Schichten auftrat. Folglich kann der Übergang zwischen TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> als abrupt betrachtet werden.



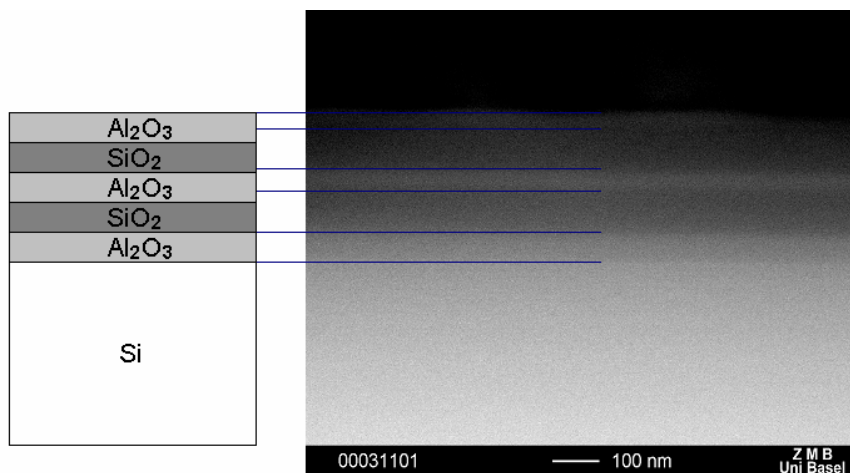
**Fig. 2:** Reflexions- und Transmissionskurven von TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-Mehrschichtsystemen auf Glas für unterschiedliche Schichtdicken.

**b.) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-Mehrschichtsysteme**

Auch hier zeigte die Messung der Zusammensetzung, dass die einzelnen Schichten stöchiometrisch sind und dass die Abscheidung kontaminationsfrei erfolgt. Wiederum wurden die Wachstumsraten der of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und der SiO<sub>2</sub>-Schichten in-situ mittels Laser-Reflektometrie kontrolliert.

Die spektralen optischen Konstanten und die Dicke beider dielektrischen Schichten wurden einfach bestimmt durch Anpassung der ellipsometrischen Messungen an das Cauchy-Modell bzw. ein Modell, das die Leerzonen berücksichtigt. Die mit den beiden angegebenen Verfahren ermittelten Schichtdicken stimmen überein. Reflexions- und Transmissionsmessungen der auf Glas-Substrat von 4x4 cm<sup>2</sup> deponierten dielektrischen Mono-Schichten SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> bestätigten deren Transparenz.

Die Lage des Reflexionsmaximums der Vielschichtsysteme Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//Glas unterscheidet sich von derjenigen durch die Simulation ermittelten Lage. Die Raster-Elektronenmikroskopie zeigt, dass die Dicke des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> geringer war als erwartet (siehe Fig. 3). Dieses Resultat deutet auf das Vorhandensein einer Übergangsschicht zwischen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> hin, was noch näher untersucht werden muss.



**Fig. 3:** TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-Mehrfachschichtsystem auf einem Siliziumsubstrat. Links gewünschtes, rechts im Rasterelektronenmikroskop beobachtetes Profil.

## Ausblick

Die nächsten Untersuchungen zielen auf die Charakterisierung der Grenzschicht zwischen  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ab, um die gewünschten Dicken der einzelnen Schichten zuverlässig einstellen zu können. Damit wird es uns möglich sein, die Breite der Reflexionsmaxima in Fig. 1, die für die Farbgebung verantwortlich sind, wesentlich reduzieren zu können. Dieser Schritt ist vor allem auch im Hinblick auf eine Reduktion der Energieverluste erforderlich.

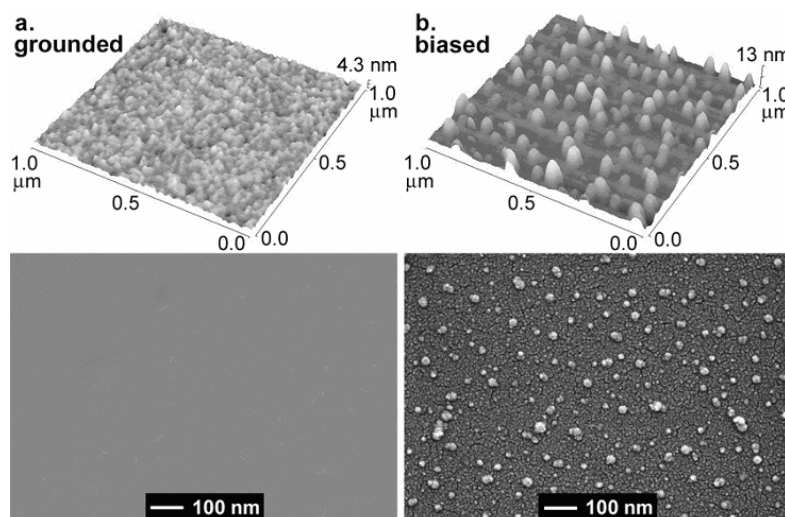
## 2.3 Charakterisierung der Nanostruktur von Komposit-Materialien

### 2.3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Studie der oberflächennahen Struktur und der Anordnung von Edelmetall-Nanoclustern (Au, Ag) in einer Matrix aus amorphen, wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten (*a*-C:H) wurde fortgesetzt. Das Ziel dieser Studie ist es, aufzudecken, ob die obersten Metallcluster vollständig in die *a*-C:H-Matrix eingetaucht sind oder ob sie mindestens teilweise der Umgebung nackt ausgesetzt sind. Die Anordnung der Cluster im Bereich der Oberfläche ist beispielsweise relevant im Hinblick auf die chemische Stabilität der Schichten oder ihrer chemischen Wechselwirkung mit der Umgebung. Es ist deshalb wichtig, die Anordnung der Cluster in der oberflächennahen Umgebung zu kennen und darüber hinaus die Möglichkeit ihrer Kontrolle während dem Wachstumsprozess zu erforschen.

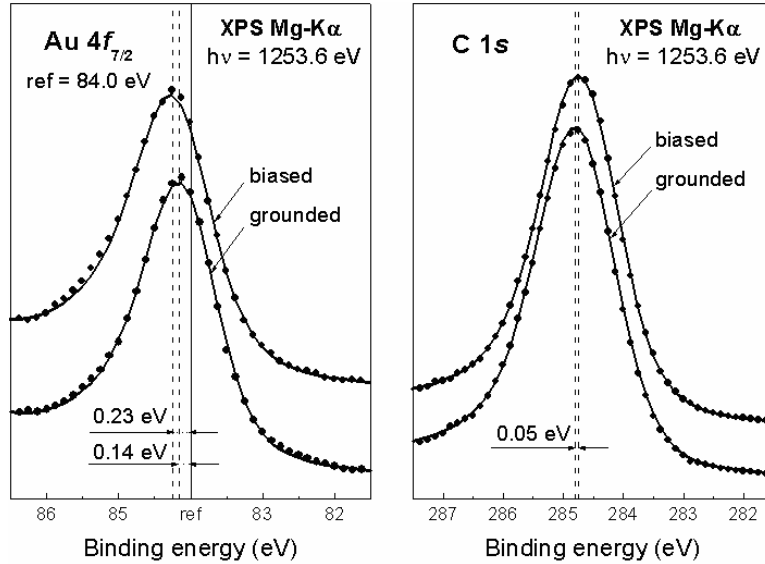
### 2.3.2 Messungen und ihre Deutung

Die *a*-C:H/Au- und *a*-C:H/Ag-Schichten werden erzeugt durch simultanes Magnetron-Sputtern eines Edelmetall-Targets und einer plasmagestützten CVD (Chemical Vapor Deposition) Abscheidung von *a*-C:H. Als Prozessgas dient ein Argon-Methan-Gemisch. Die Proben werden untersucht durch *in situ* PES (Photoelektronen-Spektroskopie) und *ex-situ* durch AFM (Atomic Force Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscopy) und GISAXS (Grazing Incidence Small Angle X-ray Scattering). Zusätzlich wurden zur Oberflächencharakterisierung Adsorptionsexperimente mit Thiophen ( $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ ) gemacht, einem organischen Molekül, welches auf Au und *a*-C:H völlig unterschiedliche Adsorptionseigenschaften hat. Die Messungen lieferten ein konsistentes Bild über die Anordnung der Cluster an der Oberfläche und es zeigte sich, dass je nach den gewählten Abscheidparametern diese entweder mit einer dünnen *a*-C:H-Schicht abgedeckt oder nackt sind. Die nackten Oberflächencluster erhält man dann, wenn das Substrat nicht geerdet wird (Fall 'grounded' in Fig. 4 und 5) sondern mit einer negativen elektrischen Spannung vorgespannt wird (Fall 'biased').



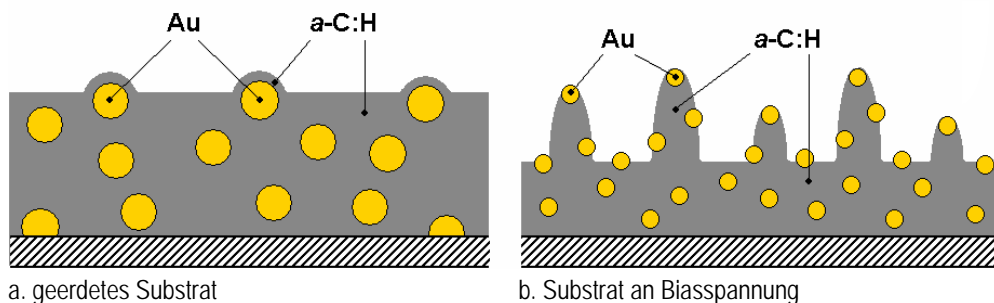
**Fig. 4:**  
 AFM- und SEM-Bilder von *a*-C:H/Au-Proben:  
 a. geerdete Proben  
 b. Proben an Biasspannung

Andere strukturelle und morphologische Unterschiede in der Oberflächenregion infolge des Anlegens von Biasspannung an das Substrat wurden ebenfalls studiert. Im Fall von *a*-C:H/Au zeigen solche Proben im Vergleich zu den geerdeten Proben eine grössere Oberflächenrauigkeit, welche mit der Modifikation der *a*-C:H-Matrix zusammenhängt. Wie durch PES gezeigt werden konnte, widerspiegelt sich diese Modifikation auch in der atomaren Struktur als erhöhtes Verhältnis von  $sp^2/sp^3$ -koordiniertem Kohlenstoff in der *a*-C:H-Matrix.



**Fig. 5:**  
XPS-Resultate von geerdeten Proben und solchen an Biasspannung:  
Links  $Au\ 4f_{7/2}$  und rechts  $C\ 1s$  Rumpf-Niveaus, die den Blick frei geben auf kleinere und/oder partiell freigelegte Gold-Cluster an der Probenoberfläche im Falle mit Biasspannung.

Die in Fig. 6 dargestellte Oberflächenmodelle erklären alle experimentellen Resultate. Falls Gold durch Silber ersetzt wird, ergeben sich Unterschiede, die durch die erhöhte Beweglichkeit der Ag-Atome in der *a*-C:H-Matrix erklärt werden können. Diese Experimente werden demnächst abgeschlossen.



**Fig. 6:** Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Modells der Oberflächenregion.

### 2.3.3 Inbetriebnahme und Charakterisierung des neuen Magnetrons mit zwei Targets

Das im letzten Jahresbericht 2001 erwähnte Magnetron mit zwei Targets wurde im Berichtsjahr gebaut und getestet (siehe Fig. 7). Dabei wurde das innere Target mit Silber bestückt und das äussere mit Aluminium. Typische Betriebsdaten waren 40 Watt Hochfrequenzleistung für das innere und 200-450 Watt Gleichspannungsleistung für das äussere Target. Es wurden Sputterraten von 4,4 Å/s für das kleine und 16,5 Å/s für das grosse Target erreicht, was in etwa den Erwartungen entspricht. Die Überlagerung der beiden Magnetfelder bewirkt, dass die Effizienz des kleinen Target auf Kosten des grossen etwas erhöht wird. Die Kühlung wurde beim vorliegenden Magnetron gegenüber früheren Konstruktionen optimiert, sodass es mindestens mit der doppelten Sputterleistung (Sputterrate) betrieben werden kann. Die Kühlung wurde mit Temperaturindikatoren überprüft. Ein weiterer Vorteil der geringen Erwärmung ist die Reduktion der Verunreinigung in den deponierten Schichten. Dies dürfte vor allem beim Sputtern im UHV eine Rolle spielen.



Fig. 7: Ringmagnetron (Aussendurchmesser 108 mm) im frisch konditionierten Zustand.  
Die Bestückung besteht aus:

- Aluminium: Äusserer Ring mit der typischen rauhen Oberflächenstruktur
- Silber: Innere Kernzone

### Eigene Publikationen und Vorträge im Jahre 2002

- [1] I. Videnovic and P. Oelhafen, '**Photoelectron spectroscopy study of the surface structure and morphology of gold nanocluster containing amorphous hydrogenated carbon**', Spring Mee-ting of the Materials Research Society, MRS 2002, April 1 to April 5 2002, San Francisco (CA) USA.
- [2] A. Schöler, C. Roecker, J. L. Scartezzini, J. Boudaden, I. Videnovic and P. Oelhafen, '**Colored thermal solar collectors**', Inter-University Workshop 'User-Oriented Technology for Design of the Built Environment', Darmstadt, 21-22 March 2002.
- [3] I. R. Videnovic, V. Thommen, P. Oelhafen, D. Mathys, M. Düggelin, and R. Guggenheim, '**Influence of substrate bias voltage on surface morphology and nanocluster arrangement of gold containing amorphous hydrogenated carbon**', Appl. Phys. Lett. 80, 2863 (2002)
- [4] Ivan R. Videnovic, Verena Thommen, Peter Oelhafen, Daniel Mathys, Marcel Duggelin, and Richard Guggenheim: '**Influence of substrate bias voltage on surface morphology and nanocluster arrangement of gold containing amorphous hydrogenated carbon**', - Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 2863.
- [5] Ivan R. Videnovic and Peter Oelhafen: '**Photoelectron spectroscopy study of the surface structure and morphology of gold nanocluster containing amorphous hydrogenated carbon (a-C:H/Au)**', Swiss Physical Society Annual Meeting, February 28 – March 1, 2002, Lausanne, Bull. SPG/SSP **19** (2002) 33.
- [6] Ivan R. Videnovic, Verena Thommen, Daniel Mathys, Marcel Duggelin, Richard Guggenheim, Peter Oelhafen, David Babonneau, and André Naudon, '**Cluster arrangement on the surface of gold containing amorphous hydrogenated carbon (a-C:H/Au) nanocomposites**', Materials Research Society 2002 Spring Meeting, April 1 – 5, 2002, San Francisco, Abstracts, p. 356.
- [7] I. R. Videnovic, V. Thommen, and P. Oelhafen: '**Surface arrangement of gold nanoclusters embedded in amorphous hydrogenated carbon by reactive magnetron sputtering**', 16<sup>th</sup> Europhysics Conference on Atomic & Molecular Physics (ESCAMPIG) and 5<sup>th</sup> International

Conference on Reactive Plasmas (ICRP), 14-18 July 2002, Grenoble, Proceedings II (2002) p. 207-208.

- [8] Invited lecture: I. R. Videnovic and P. Oelhafen: ***Thin film deposition by magnetron plasmas: surface characterization of gold nanocluster-containing amorphous hydrogenated carbon***, 4<sup>th</sup> Yugoslav-Belarussian Symposium on Physics and Diagnostics of Laboratory & Astrophysical Plasma, Belgrade, 23-24 August 2002, Abstracts of invited lectures and posters, p. 7.
- [9] I. R. Videnovic and P. Oelhafen: ***Surface morphology of magnetron-sputtered a-C:H/Au nanocomposites: a photoelectron spectroscopy study***, 21<sup>st</sup> Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG), 26-30 August 2002, Sokobanja, Yugoslavia, Contributed Papers, p. 222-225.

## B. Bauphysik: Energie

### B1. Untersuchung der optischen Eigenschaften von Fenstern

Im Hinblick minimaler Betriebsenergie für Heizung und Kühlung

#### 1. Projektziele

##### 1.1 Erweiterung der messtechnischen Möglichkeiten auf ganze Elemente

Das Ziel der Charakterisierung ganzer Fensterelemente bezüglich ihrer optischen Eigenschaften (winkelabhängige Transmission im solaren und visuellen Bereich) und ihrer Optimierung erfolgte bisher aufbauend auf einer *meßtechnischen Ermittlung* der Eigenschaften der *Einzelkomponenten* und einer *rechnerischen Modellierung* ihres Zusammenspiels in einem System, also:

- Messung der optischen Eigenschaften von Einzelkomponenten am IfP am Beispiel der Häring-Fenster-Produkte-Serie: Folien und Glasscheiben.
- Eigene rechnerische Modelle basierend auf der Normen DIN EN 673: 2001-01 und EN 410: 1998 D wurden dahingehend erweitert, daß auch Folien mit einer Teiltransparenz im IR-Bereich rechnerisch erfaßt werden können und dienen uns zur Bestimmung der Eigenschaften ganzer Fensterelemente (neben den winkelabhängigen optischen Eigenschaften auch der U-Wert).
- Damit war es uns möglich, ausgehend von der vorhandenen Produkte-Serie, eine Konfiguration der Einzelkomponenten zu finden, die eine weitere Absenkung des U-Wertes - bei gleichzeitig guten optischen Eigenschaften - erlaubt.

Als nächster Schritt liegt es deshalb nahe, die optischen Eigenschaften ganzer Elemente metetechnisch zu ermitteln:

- Damit ist eine direkte Produktecharakterisierung möglich.
- Eine Validierung der Rechenmodelle, mit denen die Systemeigenschaften ausgehend von den Einzelkomponenten ermittelt wurden, wird ermöglicht.
- Mit der Apparatur wird es auch möglich sein, Einzelkomponenten zu vermessen. Dies stellt eine weitere Hilfe dar, geeignete physikalische Näherungsmodelle zu finden, in denen das Substrat beschichtet ist. Komponenten ohne Beschichtung lassen sich exakt rechnen (Frenel-Formeln und exponentielles Verhalten der Extinktion über die Substratdicke). Die in der Literatur etablierte Vorgehensweise für Fensterkomponenten beruht auf einer Modifikation solcher exakter Rechnungen auf beschichtete Systeme im Sinne von geeigneten Näherungen.

Deshalb wurde eine Apparatur aufgebaut, mit der Fensterkomponenten und ganze Fenster ausgemessen werden können:

##### 1.2 Anforderungen an die Messapparatur

Die optischen Eigenschaften aus der Messung der Einzelkomponenten stehen spektral- und winkelaufgelöst zur Verfügung. Solch detaillierte Kenntnis dieser Daten ist unverzichtbar zur Berechnung der optischen Eigenschaften eines Gesamtsystems. Selbst im Fall, wo nur spektral oder über den Raumwinkel gemittelte Werte eines Elementes von Interesse sind, muss zunächst jedes Frequenzband und jeder Einfallswinkel für sich betrachtet werden, **bevor** die Mittelung erfolgt.

Zur Modellierung eines Elementes im Bau ist ebenfalls detaillierte Kenntnis von Vorteil. Zur detaillierten Validierung eines Rechenmodells zur Ermittlung der Systemeigenschaften ausgehend von den bekannten Eigenschaften der Einzelkomponenten ist winkel- und spektral aufgelöste Messung sogar notwendig. Damit ergeben sich zwei wesentliche Anforderungen:

- Winkelaufgelöste und spektral aufgelöste Messung innerhalb des solaren Spektrums.
- Elementgröße angepaßt an übliche Produktionsgrößen. Dies nicht nur von der Möglichkeit, marktreife Produkte zu vermessen, sondern auch um Randeffekte zu vermeiden.

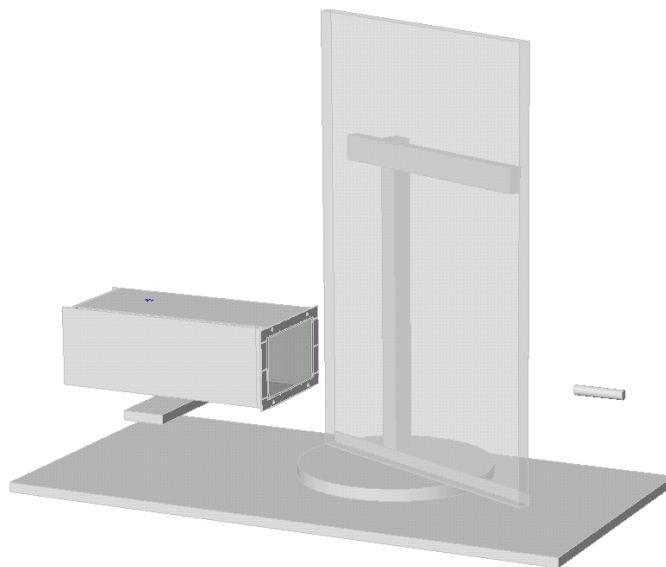
## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### 2.1 Messprinzip

Die Meßapparatur hat in der Reihenfolge des Strahlenganges die drei Komponenten (a) Strahlungsquelle, (b) Drehtisch mit Meßprobe (c) Detektor (siehe Fig.1):

- Die *Strahlungsquelle* besteht aus einer ebenen homogen leuchtenden Fläche, deren Leuchtkraftdichte bei der Kalibrierung der Meßapparatur bestimmt wird. Da Anforderungen sowohl an das Frequenzspektrum, als auch die Richtungscharakteristik bestehen, beinhaltet die Problemstellung auch die Eigenschaften der Lichtquelle und anschließende Erzeugung eines geeigneten Strahlungsfeldes.
- Der *Drehtisch für die Meßproben* muß Elemente üblicher Produktgröße aufnehmen können und definierte Drehungen gegenüber der Ebene der Strahlungsquelle erlauben. Bei hohen Einfallswinkeln soll noch keine Eigenverschattung auftreten. Es sind Messungen bis etwa zu Einfallswinkeln  $\leq 80^\circ$  vorgesehen.
- Der *Detektor* ist wellenlängensensibel und besitzt eine abbildende Optik folgender Art: Die optische Achse steht senkrecht auf der Leuchtebene (Quelle), ist dort in einem engen Bereich richtungs-sensitiv und bildet damit von der einer richtungserhaltenden Meßprobe nur Strahlen der Leuchtebene ab, die von derselben senkrecht abgestrahlt werden.

Bei Elementen, deren transmittierte Strahlung keinen gestreuten Anteil enthält, wird mit dieser Konfiguration der *direkt-direkte Transmissionsgrad* bestimmt. Grundsätzlich handelt es sich um eine Apparatur, die die Ausmessung solcher Elemente auch zum Ziel hat.



Konstruktion: Roland Steiner

**Fig. 1:** Messapparatur zur Bestimmung der winkelabhängigen und spektralen Eigenschaften ganzer Fensterelemente.

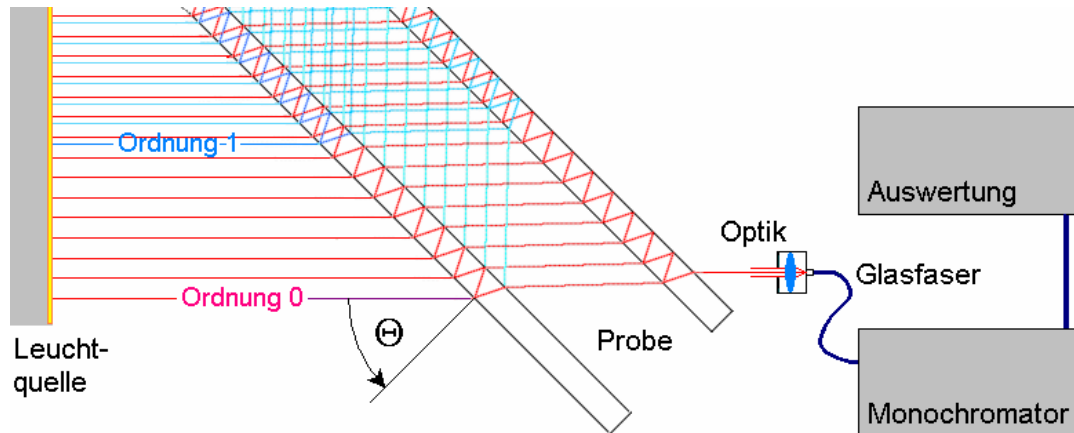
Die Apparatur besteht dem Strahlengang folgend aus den drei Komponenten:

- Leuchtquelle bestehend aus einer homogen leuchtenden Fläche mit bekanntem Abstrahlverhalten (spektral- und winkelaufgelöst).
- Drehtisch mit Messprobe
- Richtungs-sensibler Sensor, bestehend aus abbildender Optik, Fiber und Monochromator

Geht man von richtungserhaltenden Proben aus, so bleibt von der Sicht des Strahlenganges her noch eine wesentliche Betrachtung, die für die Nutzbarkeit und Auslegung der Apparatur von Belang ist:

Zunächst erfährt der direkte Strahl bei nicht senkrechtem Einfall eine seitliche Versetzung durch Brechung in den Glasscheiben. Dieser Effekt ist bei den üblichen Glasdicken gering, bei Folien erst recht. Größer ist der Effekt für die Bilder höherer Ordnung, die durch Reflexion innerhalb des Fensters (z.B. an den beiden Glasscheiben) entstehen. Die Leuchtfläche muß groß genug sein,

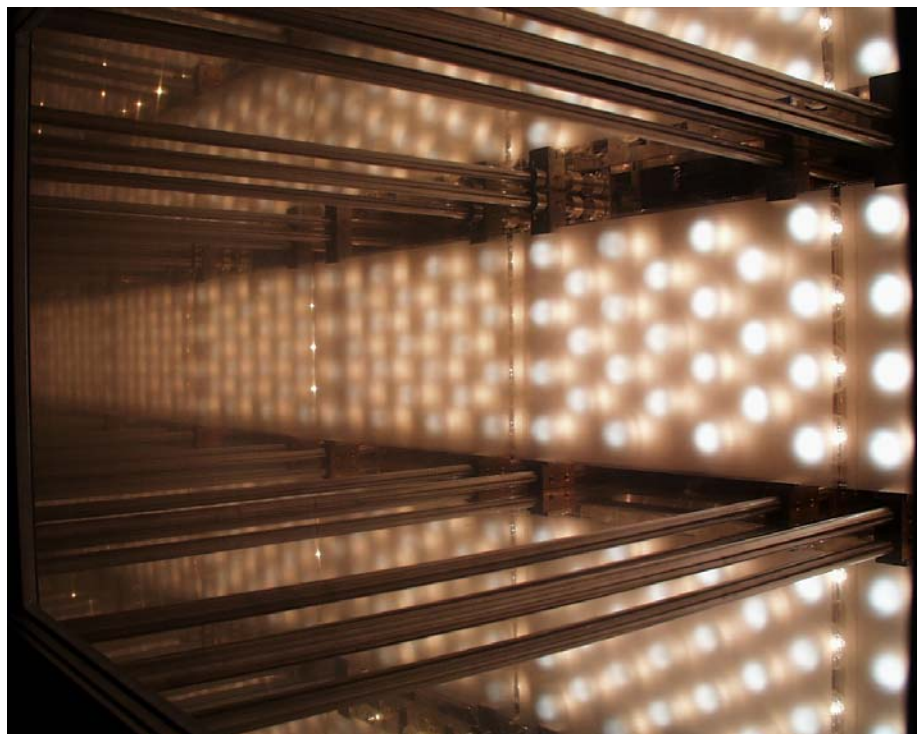
daß für den Detektor solche Strahlgänge ebenfalls noch im Blickfeld liegen. Eine Abschätzung zeigt, daß neben dem direkten Strahl (0. Ordnung) Strahlgänge 1. Ordnung einen geringen Beitrag liefern können, daß aber schon solche 2. Ordnung, sicher aber 3. Ordnung vernachlässigbar sind, selbst in ihrer Summation, da sie im wesentlichen einer rasch abklingenden geometrischen Reihe folgen (siehe Fig. 2):



**Fig. 2:** Schema der Messapparatur mit Leuchtquelle, Probe, Monochromator und Auswertung.

- Die Optik mit Richtungssensitivität in Richtung Lot auf die Leuchtquelle.
- Eingezeichnet Strahl mit Ordnung 0 sowie derjenige Ordnung 1 infolge Glasabstand. Die feineren Unter-Ordnungen kommen von der Reflexion innerhalb der Scheiben.

Für die Messung entscheidend ist die homogene Ausleuchtung der Leuchtquelle über die gesamte Breite, was durch seitliche Spiegel im Leuchtkasten erreicht wird (siehe Fig. 3):

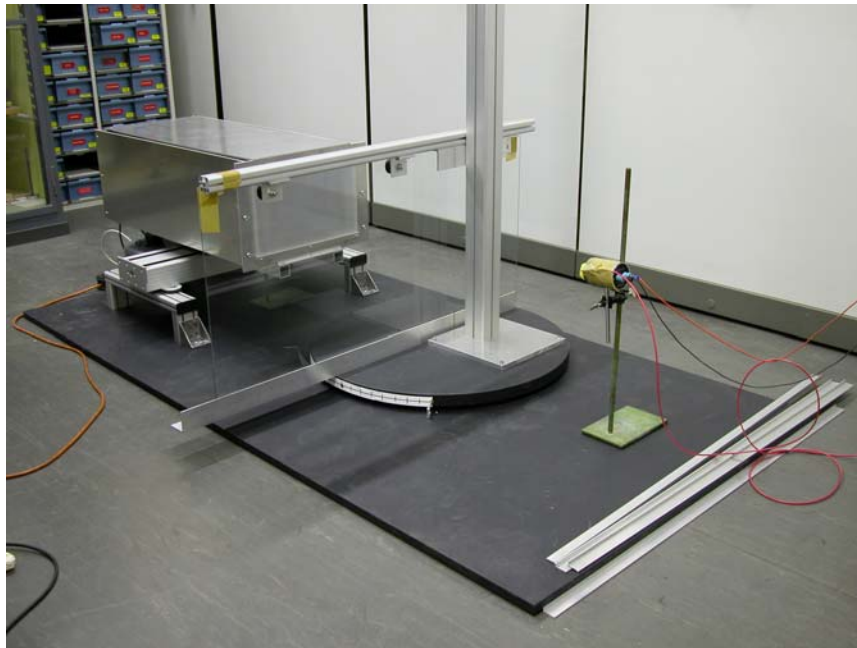


**Fig. 3:** Blick in den Leuchtkasten nach Entfernung der Deckscheibe. Die Leuchtkörper rechts spiegeln sich an den Seitenwänden, durch welche unendliche Fortsetzung die erforderliche homogene Ausleuchtung gewährleistet wird.

## 2.2 Inbetriebnahme der Messapparatur und erste Testmessungen

Ende Jahr konnte die Messapparatur im Sinne einer Verifikation des Messprinzips anhand von Proben mit bekannten Literaturwerten in Betrieb genommen werden. Dabei wurden mögliche Fehlerquellen wie Streulicht, Schwankungen der Stromversorgung für die Leuchtquelle etc. eingegrenzt und wo notwendig eliminiert.

Als Messprobe diente Floatglas 4 mm der Sorte Clear und zwar sowohl in der Anordnung als Einfachscheibe, als auch als Doppelglas. Damit konnte neben der Wellenlängen-Sensitivität, die sich aus Leuchtquelle und Monochromator ergibt, auch die Geometrie der Optik mit ihren Mehrfachreflexionen überprüft werden. Die Fig. 4 zeigt die Apparatur im ersten Testaufbau mit Einfachglas als Probe:



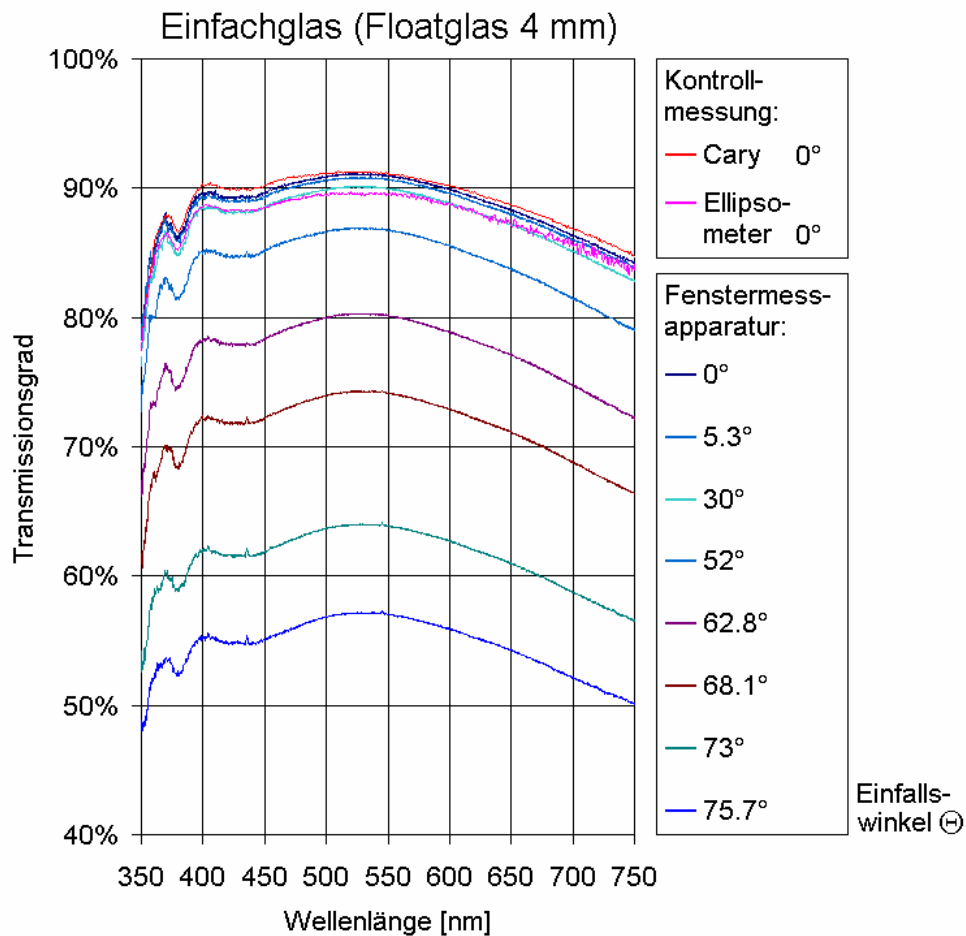
**Fig. 4:** Bild der Messapparatur mit Glasprobe auf Drehteller. Der Leuchtkasten im Hintergrund. Der Sensor im Vordergrund bestehend aus abbildender Optik, Fiber und Monochromator diente zu Testzwecken. Er soll in der endgültigen Version ersetzt werden durch eine Konfiguration, mit der ein grösserer Wellenlängenbereich erfasst werden kann.

### 2.2.1 Wellenlängenabhängige Transmissionsmessungen bei verschiedenen Winkeln

Unser Monochromator, der uns zum Test zur Verfügung stand, besitzt unter Berücksichtigung des Einflusses der Streuscheiben und der Sammellinse einen Messbereich zwischen 350 und 750 nm. Mit dem bestellten Monochromator soll dieser Messbereich insbesondere in den langwelligen Bereich erweitert werden, um den relevanten Bereich der normierten Globalstrahlung [6] zu erfassen.

Die Fig. 5 zeigt unsere Messung eines Einfachglases unter verschiedenen Winkeln. Zudem wurden zur Kontrolle Referenzmessungen mit dem Cary sowie mit dem Ellipsometer gemacht. Die Kontrollmessungen zeigen in eindeutiger Weise das korrekte Arbeiten des Messgerätes als ganzes:

Der wellenlängenabhängige Verlauf zeigt das typische Verhalten von Floatglas, wie er in den Literaturdaten [7, 8] angegeben wird.



**Fig. 5:** Messung des Transmissionsvermögens eines Floatglases (Clear 4 mm):

- mit Fenstermessapparatur für acht verschiedene Winkel [Grad]
- mit Cary und Ellipsometer für senkrechten Einfall ( $\Theta = 0^\circ$ )

Die Kontrollmessungen bei senkrechtem Einfall ( $\Theta = 0^\circ$ ) zeigen zunächst das korrekte Arbeiten der Fenstermessapparatur. Die Abweichungen liegen im Rahmen der probengegebenen Unsicherheiten der Referenzmessungen selber.

### 2.2.2 Winkelabhängige Transmission geprüft am Modell

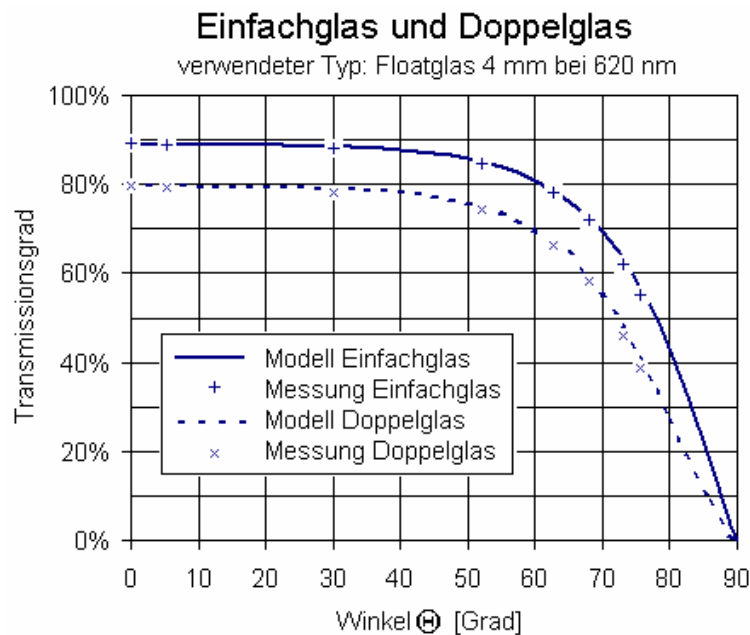
Nachdem die Messungen unter senkrechtem Einfall korrekte Ergebnisse liefern, wurde die winkelabhängige Transmission bei festen Wellenlängen überprüft.

Die Transmission durch unbeschichtetes Glas kann exakt beschrieben werden mit den Fresnelformeln (Brechung und Reflexion an der Oberfläche) und eine Beer'sche Extinktion des Strahles im Glas selber. Modellparameter sind die optischen Größen  $n$  und  $k$ . Der Brechindex  $n$  von Glas ist nur schwach von der Wellenlänge abhängig und praktisch unabhängig von der Tönung des Glases [7]. Somit bleibt als freier Parameter des Modelles der Absorptionskoeffizient  $k$ .

Betrachtet man nun das winkelabhängige Verhalten des Transmissionsvermögens, so zeigt sich, dass Messung und Modell unter Wahl von  $k$  über den gesamten Winkelbereich in gute Übereinstimmung gebracht werden können. Die Methode liefert Werte für  $k$ , wie man sie für Floatglas erwartet. Die Fig. 6 zeigt dies bei der Wellenlänge von 620 nm zunächst für ein Einfachglas. Weiter zeigt sich (ebenfalls in Fig. 6) die Übereinstimmung auch für ein Doppelglas: Und zwar wurde mit Hilfe von  $n$  und  $k$  aus der Einfachglasmessung das Verhalten des

Zweifachglases mit demselben auf zwei Gläser erweiterten Modell berechnet und anschliessend mit der Messung verglichen.

Damit konnte nun auch verifiziert werden, dass auch unter beliebigen Winkeln beim gewählten Messkonzept keine wesentliche systematische Fehler auftreten.



**Fig. 6:** Transmissionsmessung aus der Fig. 3 nun ausgewertet bei fester Wellenlänge 620 nm für die verschiedenen Einfallswinkel  $\Theta$ :

- Einfachglas Messung sowie Modell aufgetragen für  $n = 1.522$  (Literaturwert [7]) und  $k = 3,93 \cdot 10^{-7}$  (durch Anpassung ermittelt).
- Doppelglas Messung sowie Modell mit  $n$  und  $k$ , wie sie für das Einfachglas verwendet wurden.

### 3. Literaturverzeichnis

- [1] **Window Optics**, M. Rubin, K. von Rottkay, R. Powles  
LBNL preprint 39911 to be published in Solar Energy
- [2] **Models for the Angle-Dependent Optical Properties of Coated Glazing Materials**, M. Rubin, R. Powles, K. von Rottkay, LBNL-40709, Solar Energy 1999
- [3] **Infrared Properties of Polyethylene Terephthalate Films**, M. Rubin, Solar Energy Materials 6 (1982) 375-380
- [4] **Calculating Heat Transfer through Windows**, M. Rubin, K. von Rottkay, R. Powles  
Energy Research, Vol. 6, 341-349 (1982)
- [5] **Bestimmung des Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Wert), Berechnungsverfahren**, DIN EN 673: 2001-01
- [6] **Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrössen von Verglasungen**, EN 410: 1998 D
- [7] **Optical properties of soda lime silica glasses**, M. Rubin, Solar Energy Materials 12 (1985) 275-288
- [8] **Experimental and theoretical studies on the energy balance of windows**, R. Furler,  
Dissertation Zürich 1988

## B2. Themische Verluste durch Wärmebrücken in Gebäuden

### Zusammenfassung

Mit der Methode der finiten Elemente wurden 3D-Rechnungen durchgeführt an einer Serie von Wärmebrücken für typische Anschlussbereiche von Platten im Gebäudebereich. Mit solchen Berechnungen lässt sich eine gewisse Systematik aufdecken, die zustande kommt durch das Wechselspiel diverser Geometrieigenschaften und ergibt so Hinweise zur einer möglichst wärmebrückenfreien Konstruktionsweise.

### 1. Projektziel

#### Äusserer Rahmen

Der laufend verbesserte Dämmstandard erhöht die Bedeutung der Wärmebrücken, was auch in den überarbeiteten Normen Eingang findet, so etwa aktuell beim überarbeiteten **Nachweis des Heizenergiebedarfes SIA380/1** (EN832), wo seit dem 01. Jan. 2001 Wärmebrücken zwingend Eingang finden.

Als geplante **Vollzugshilfen** sind hierzu folgende Kataloge in Bearbeitung:

- Neuauflage Bauteilkatalog Sanierung (Oktober 2001)
- Neuauflage Bauteilkatalog Neubau (Ende 2001)
- Erstauflage **Wärmebrückenatlas** (Ende 2002)

Zwar gab es bisher in der Schweiz Wärmebrückenkataloge (siehe Literaturverzeichnis), doch hat sich für diese eine Überarbeitung und Aktualisierung aufgedrängt. Zum einen stehen heute verbesserte 3D-Programme finiter Elemente zur Verfügung. Weiter hat sich im Zuge der Vereinheitlichung des Normenwesens in Europa ein der Problemstellung und heutigen Bauweise besser angepasste Behandlungsweise ergeben, darunter etwa auch neue Rechen-Randbedingungen (siehe zu letzterem neue SIA180).

Es ist bekannt, dass zahlreiche herkömmliche Wärmebrückenberechnungen in 2 Dimensionen erfolgt sind und 3D-Rechnungen nur begleitend als Stützwerte herangezogen wurden, um die Resultate bezüglich ihrer Genauigkeit einzugrenzen und allenfalls empirische Korrekturen an den 2D-Rechnungen durchzuführen. Daraus ergibt sich aus heutiger Sicht die Fragestellung, ob Wärmebrücken mit vertretbarem Aufwand in 3 Dimensionen gerechnet werden können, weil die 2D-Rechnungen die Verhältnisse in vielen Fällen unzureichend wiedergeben.

#### In dieser Arbeit

In den vorgängigen Arbeiten ging es um Untersuchungen von „Bewehrungselemente zum Anschluss von Kragplatten“:

- Messung der Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Stähle (siehe Jahresbericht 2000).
- Berechnung der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  in Funktion der Geometrie, d.h. der Dämmstärke und des Achsabstandes der Bewehrungselemente und ferner der Plattendicke unter Verwendung der gemessenen Materialwerte für die Stähle.  
Diese Berechnungen wurden in 3 Dimensionen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Geometrieabhängigkeit von  $\Psi$  erfasst werden kann durch ein Modell, das die wesentlichen Beiträge superponiert und ihre gegenseitige Wechselwirkung als Störterm („Überlapp“) berücksichtigt. Es zeigte sich weiter, dass die einzelnen Beiträge durch einfache konfigurationsabhängige Skalengesetze erfasst werden können (siehe Jahresbericht 2001).

Die erwähnten Arbeiten bilden unsere Grundlage für eine nahtlose Fortsetzung: Im Berichtsjahr 2002 wurden nun eine Reihe neuer Konfigurationen (siehe Fig. 1) solcher Bewehrungselemente in 3D berechnet, aus denen eine gewisse Systematik der Wärmetransportbeiträge und ihrer Wechselwirkung untereinander sichtbar wird.

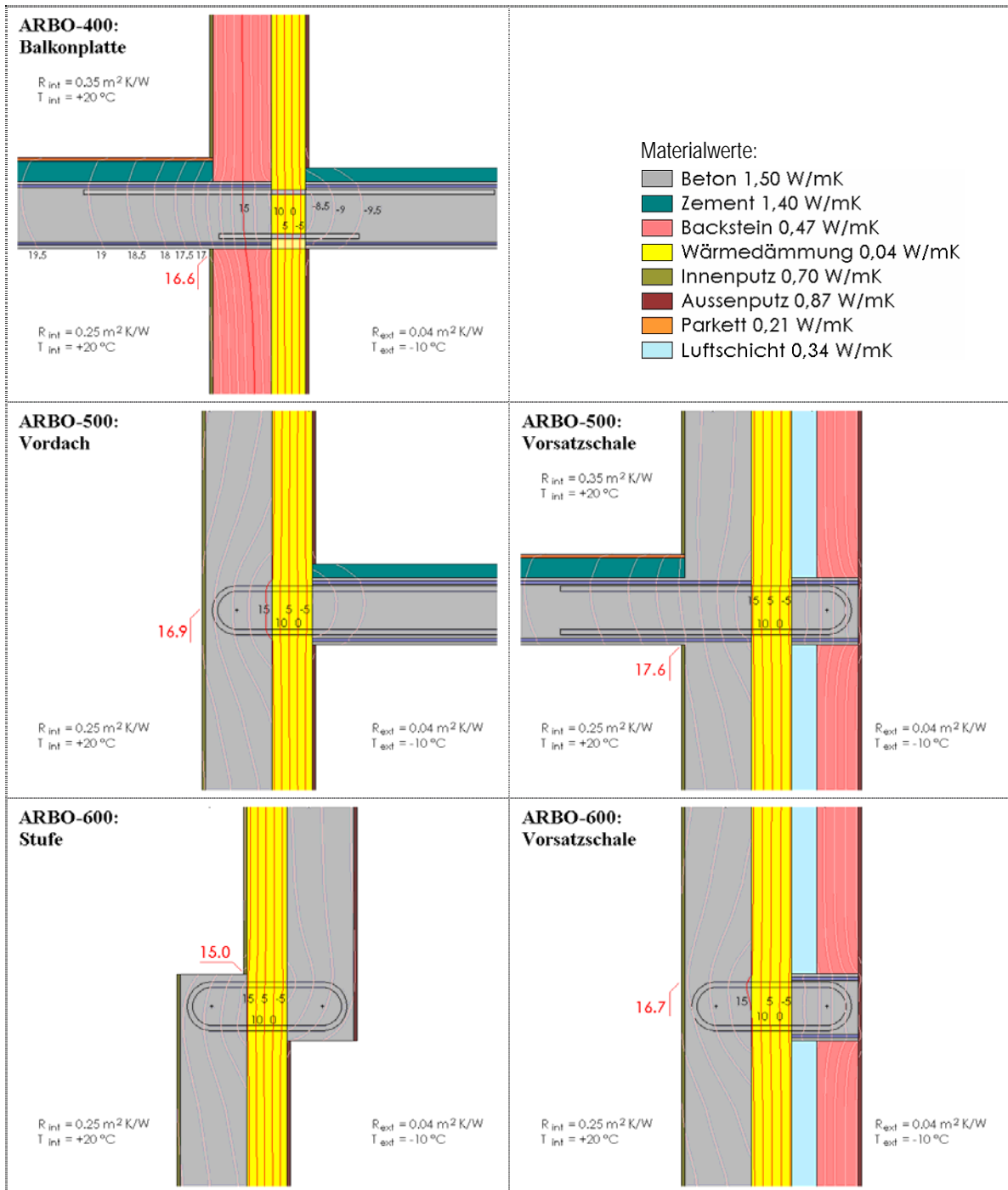


Fig. 1: Drei Typen von Bewehrungselementen: Gerade Stäbe (oben), U-förmige (mitte) und geschlossene ovale (unten). Sie wirken als Wärmebrücken, da sie die Dämmschicht durchdringen, erlauben aber gerade eine Unterberechnung der Betonkonstruktion.

Ausgehend vom Fall ARBO-400 wurden nun gebogene Bewehrungselemente gerechnet, die zum Einsatz kommen bei mangelndem Platzbedarf: ARBO-500 mit einem Bogen und ARBO-600 mit zwei Bögen.

Neu hinzu gekommen sind auch die beiden Fälle in der rechten Spalte mit dem zweischaligem Aufbau.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Modellansatz für Wärmebrücken

Bewährt hat sich der Modellansatz mit seiner Unterteilung in drei Beiträge indem zunächst einfache Skaliergesetze gelten hinsichtlich der Geometrieparameter der Dämmstärke  $e$  und des Achsabstandes  $a$  der Bewehrungselemente. (Mit Achsabstand ist der Rasterabstand gemeint, in dem die Bewehrungselemente eingebaut werden). Weiter wird damit eine Extrapolation auf weitere Fälle innerhalb aber auch ausserhalb der berechneten Stützwerte möglich:

- Konstanter Beitrag  $A$  der Grundmatrix, der nur von der Dämmstärke  $e$  abhängt.
- Punktzuschlag  $B/a$  der Bewehrungselemente selber, wobei die Grösse  $B$  wiederum nur von der Dämmstärke abhängt. Damit kommt zum Ausdruck, dass ein Punktzuschlag in erster Ordnung gemäss seiner eingesetzten Anzahl pro Laufmeter wirksam wird.
- Überlapp-Term, der wirksam wird, wenn die Punktstörungen in kleinen Achsabständen (deutlich unterhalb  $a = 1\text{ m}$ ) auftreten. Die Störungen können dann nicht mehr als isoliert betrachtet werden, sie überlappen sich. Der Überlapp führt dazu, dass die Punktstörungen geringfügig weniger stark wirksam werden, als eine einfache Superposition von einzelnen isolierten Punktzuschlägen. Der Korrekturterm ist abhängig von  $a$  und  $e$ .

### Systematik in den Resultaten der 3D-Rechnungen

Die drei Konfigurationen in der linken Spalte von Fig. 1 können schon rein äusserlich als verwandt betrachtet werden: Sie weisen nur eine Schale auf. Die Verwandtschaft zeigt sich aber auch im Einfluss der Geometrieparameter Achsabstand  $a$  und Dämmstärke  $e$  auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (siehe Fig. 2).

Zunächst die einschaligen Fälle: Ausgehend von Fall ARBO-400 liegt bei ARBO-500 etwas tiefer weil die fehlende Bodenplatte innen die Wechselwirkung über die Wärmebrücke des Bewehrungselementes reduziert. Beim einschaligen Fall ARBO-600 tritt diese Exposition durch die innere Stufe wieder verstärkt auf, ausserdem schafft der Seitenwechsel der Schalung eine relativ direkten Durchgang zwischen Innen- und Aussenraum.

Eine weitere Verwandtschaft der drei linken Fälle zeigt sich in der Reaktion auf eine Vergrösserung des Achsabstandes  $a$ . Sie ist stärker wirksam im Hinblick auf eine Reduktion von  $\Psi$ . Dies zeigt, dass beim einschaligen Aufbau die Bewehrungselemente im Bereich der Dämmung schwächer abgeschirmt sind und daher stärker wirksam sind: Eine Vergrösserung des Achsabstandes beseitigt also einen höheren Verlustbeitrag.

Umgekehrt reagieren die beiden zweischaligen Konfigurationen rechts in Fig. 1 und 2 etwas stärker auf erhöhte Dämmung. Innerhalb dieser beiden zweischaligen Fälle führt die Abwesenheit der inneren Platte bei ARBO-600 zu einer schwächeren Kopplung Innen-Aussenraum, liegt so etwas tiefer bei ARBO-500.

### Übertragbarkeit der berechneten Fälle auf andere Konfigurationen

Die oben dargestellten Fälle zeigen die Resultate für eine Plattendicke  $h = 200\text{ mm}$  und eine zugehörige Bogenlänge  $b = 180\text{ mm}$ .

Bei einer Änderung der Plattendicke  $h$  innerhalb 160-260 mm sowie der zugehörigen Variation der Bogenlänge  $b$  innerhalb 140-480 mm liegen die Variationen von  $\Psi$  bei den Konstruktionsvarianten typischerweise innerhalb  $\pm 0.01\text{ W/mK}$ .

Die obigen zweischaligen Berechnungen beruhen auf der Materialwahl Beton als innerer und Backstein als äusserer Schale (Variante: Beton-Backstein).

Es hat sich gezeigt, dass für sämtliche anderen Kombinationsmöglichkeiten der Schalen, d.h. Backstein-Beton, Backstein-Backstein und Beton-Beton  $\Psi$  typischerweise eine Abweichung vom oben dargestellten Fall innerhalb von  $\pm 1\%$  besitzen. Deshalb ist eine Anwendung der gerechneten Werte  $\Psi$  auch auf die angegebenen anderen Schalenkombinationen aus Beton bzw. Backstein möglich.

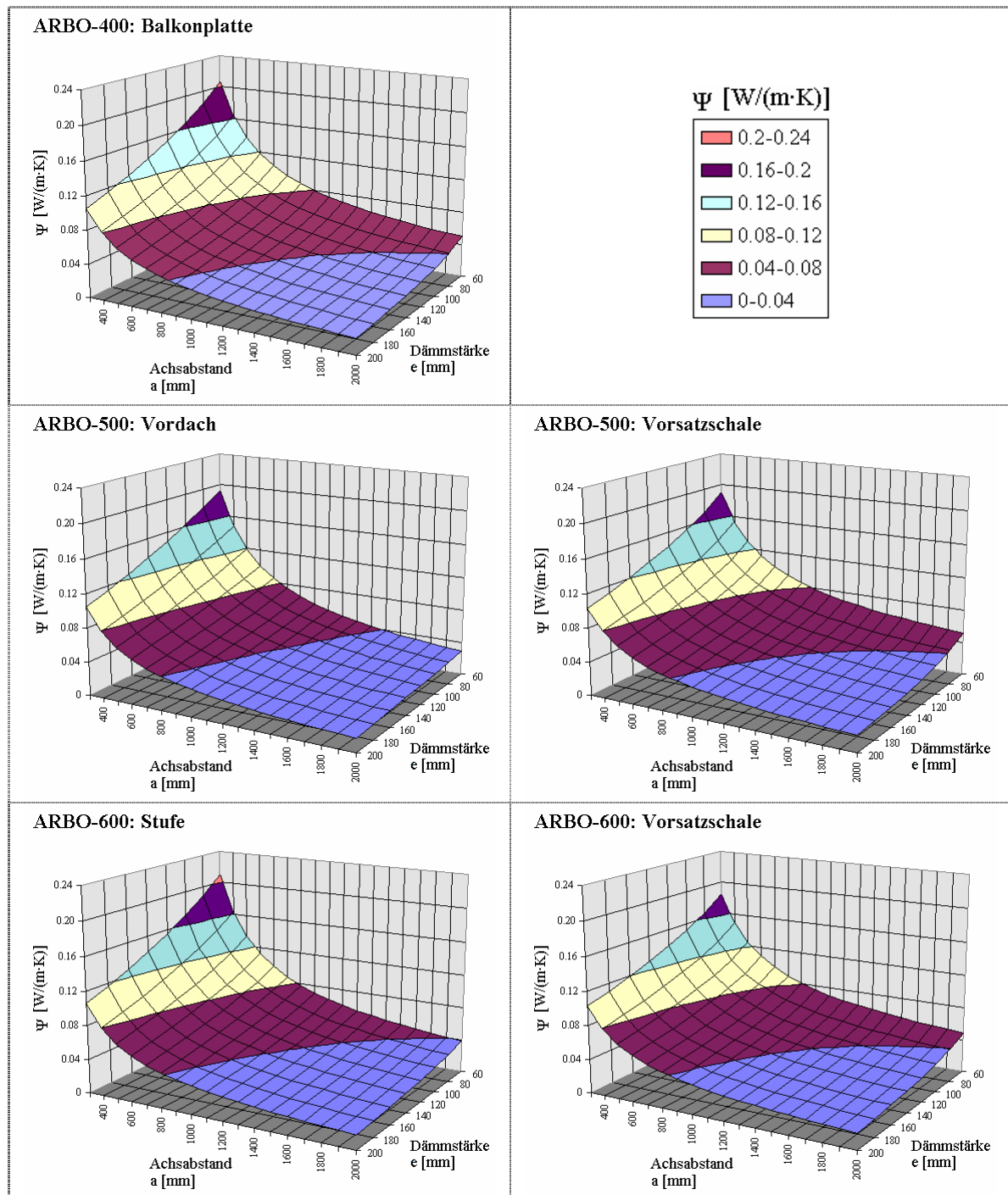


Fig. 2: Verlauf des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  der in Fig. 3.1 dargestellten Fälle in Funktion des Achsabstandes  $a$  und der Dämmstärke  $e$ , wie er sich aus einer 3D-Rechnung (mit der Methode der finiten Elemente) ergibt.

Ausgehend vom Fall ARBO-400 wurden nun gebogene Bewehrungselemente gerechnet, die zum Einsatz kommen bei mangelndem Platzbedarf: ARBO-500 mit einem Bogen und ARBO-600 mit zwei Bögen.

Neu hinzu gekommen sind auch die beiden Fälle in der rechten Spalte mit dem zweischaligem Aufbau.

### Zusammenarbeit mit Firmen

- *Häring*, Pratteln
  - *Aschwanden*, Lyss
- 

### 3. Literaturverzeichnis

- **Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau**, SIA180 Ausgabe 1999
- **Thermische Energie im Hochbau**, SIA380/1 Ausgabe 2001
- **Wärmebrückenatlas 2 – verbesserte Neubaudetails**, SIA-Nr. 078 1992
- **Wärmebrücken im Hochbau Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient – Vereinfachtes Verfahren und Anhaltswerte**, SN EN ISO 14683: 1999 SIA 180.077
- **Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren**, SN EN ISO 10211-1: 1995 SIA 180.075
- **Wärmebrücken im Hochbau – Berechnung der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Teil 2: Linienförmige Wärmebrücken**, prEN ISO 10211-2: 1999 SIA 180.076 Schlussentwurf 1999
- Beim BfE ist ein **Wärmebrückenatlas** in Bearbeitung, der als Vollzugshilfe für die SIA380/1 Ausgabe 2001 erscheinen soll (Ende 2002).