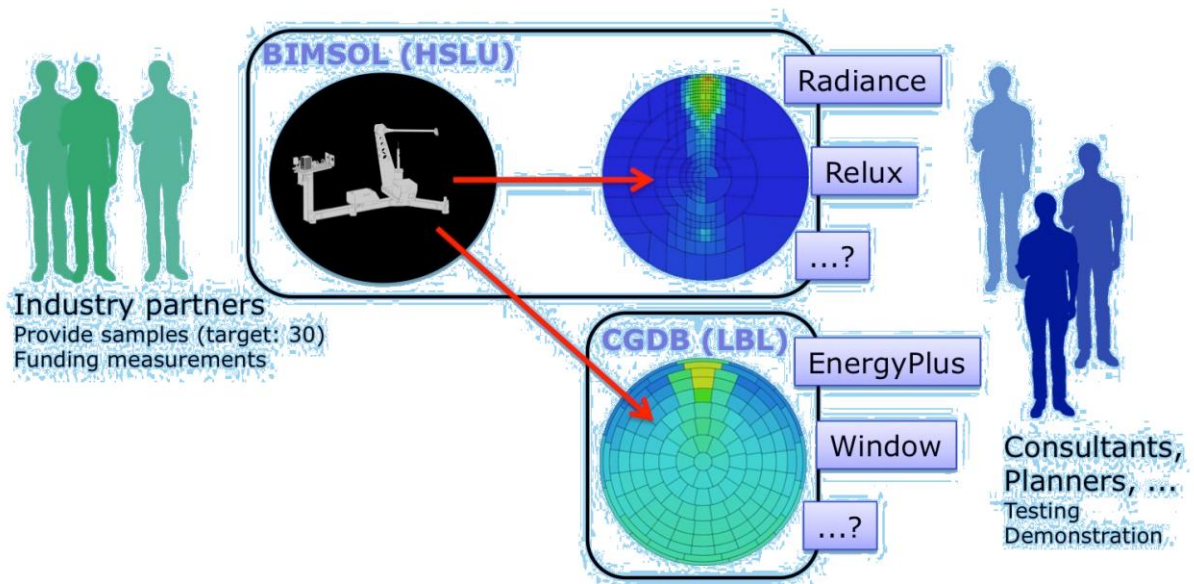




Jahresbericht 2017

# High Resolution Complex Glazing Library

## BIMSOL





Lucerne University of  
Applied Sciences and Arts

# HOCHSCHULE LUZERN

FH Zentralschweiz

In Kooperation mit:



**Datum:** Oktober 2017

**Ort:** Horw

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm „Gebäude und Städte“  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer/in:**

Hochschule Luzern Technik & Architektur  
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

**Autor/in:**

Lars O. Grobe, Hochschule Luzern Technik & Architektur, [larsoliver.grobe@hslu.ch](mailto:larsoliver.grobe@hslu.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmleitung:** Rolf Moser, [rolf.moser@enerconom.ch](mailto:rolf.moser@enerconom.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501427-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

BIMSOL wird Planer bei der Anwendung von Sonnen- und Blendschutzsystemen (SBS) mit einer 15 Produkte umfassenden Modellbibliothek unterstützen. Messdatenbasierte Modelle mit hoher Richtungsauflösung sollen die Gerichtetheit und Selektivität der Systeme genau beschreiben. Niedrig aufgelöste Modelle sollen in die Complex Glazing Database übernommen werden.

Die Erweiterung des Goniophotometers (GP) wurde in Betrieb genommen. Eine Methode zur rechnerischen Kombination der Streueigenschaften planparalleler Verglasungsebenen wurde entwickelt und in einem Fachartikel publiziert [1]. Der Einfluss von Messparametern, Interpolation und Datenreduzierung auf die Genauigkeit datenbasierter Modelle wurde untersucht und publiziert [2]. Für vier Proben wurden datenbasierte Modelle erzeugt und in einem neu eingerichteten Blog verfügbar gemacht [3]. Die im Vorjahr begonnene Charakterisierung einer neuartigen, retroreflektierenden Beschichtung für Sonnenschutzsysteme wurde mit einem eigens entwickelten Messaufbau abgeschlossen. Methode und Ergebnisse wurden in einem Manuskript zusammengefasst, das derzeit zur Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *Energy and Buildings* begutachtet wird [4]. Ein Workshop zur Modellierung einer Prismenverglasung wurde zur Schulung von Fachplanern ausgerichtet. Die laufenden Arbeiten konnten im Rahmen von Vorträgen auf einem Workshop und einer Konferenz an ein Fachpublikum vermittelt werden [5-6].

Die Auftragnehmerin ist am SCCER Future Energy Efficient Buildings & Districts, Task „Efficient integrated day- and electric lighting modeling“ beteiligt. Ein Gesuch für eine Projektförderung wurde im Oktober beim Schweizerischen Nationalfonds eingereicht, um im Anschluss an das Projekt BIMSOL die Forschung im Bereich Tageslicht mit einem Fokus auf Blendung fortzusetzen.

## Referenzen

[1] LO Grobe. Computational combination of the optical properties of fenestration layers at high directional resolution. *Buildings*, 7, 22 (2016).  
doi:10.3390/buildings7010022

[2] LO Grobe, S Wittkopf, ZT Kazanasmaz. High-resolution data-driven models of daylight redirection components. *Journal of Façade Design and Engineering*, 5, 87-100 (2017).  
doi:10.7480/jfde.2017.2.1743.

[3] <https://blog.hslu.ch/solarcontrol/>

[4] LO Grobe. Characterization and data-driven modeling of a retro-reflective coating in Radiance. *Energy and Buildings* (under review).

[5] LO Grobe. BSDF characterizing components of high-performance building envelopes. Vortrag *Workshop IEA SHC Task Definition Phase Integrated solutions for daylight and electric lighting*. Stuttgart, Deutschland (2016).

[6] LO Grobe, S Wittkopf, ZT Kazanasmaz. High-resolution data-driven models of daylight redirecting components. In Tagungsband *ICBEST Istanbul: Interdisciplinary Perspectives for future building envelopes*, Istanbul, Türkei (2017).  
ISBN: 978-975561479-3



## Anhang

### Anlage A

Artikel: LO Grobe. Computational combination of the optical properties of fenestration layers at high directional resolution. *Buildings*, 7, 22 (2016).

doi:10.3390/buildings7010022

### Anlage B

Artikel: LO Grobe, S Wittkopf, ZT Kazanasmaz. High-resolution data-driven models of daylight redirection components. *Journal of Façade Design and Engineering*, 5, 87-100 (2017).

doi:10.7480/jfde.2017.2.1743.

### Anlage C

Tagungsbeitrag: LO Grobe, S Wittkopf, ZT Kazanasmaz. High-resolution data-driven models of daylight redirecting components. In Tagungsband *ICBEST Istanbul: Interdisciplinary Perspectives for future building envelopes*, Istanbul, Türkei (2017).

ISBN: 978-975561479-3

### Anlage D

Präsentation: LO Grobe, S Wittkopf, ZT Kazanasmaz. High-resolution data-driven models of daylight redirecting components. *ICBEST Istanbul: Interdisciplinary Perspectives for future building envelopes*, Technische Universität Istanbul, Istanbul, Türkei (2017).



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
Referenzen .....	3
Anhang .....	4
Inhaltsverzeichnis .....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	6
1. Projektziele .....	7
2. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse .....	8
2.1. Ausbau Messapparatur .....	8
2.2. Messung und Modellierung von SBS .....	9
2.3. Rechnerische Kombination von BSDF .....	10
2.3.1. Abbildung von Richtungen in Matrizen .....	10
2.3.2. Exemplarische Anwendung des Verfahrens .....	11
2.3.3. Auswirkungen der hohen Auflösung auf Simulationsergebnisse .....	12
2.4. Vermessung und Modellierung von Oberflächenbeschichtungen .....	13
2.4.1. Anwendungsbereich der Beschichtungen und Proben .....	13
2.4.2. Grenzen der Messung und Modellierung im Vorberichtszeitraum .....	14
2.4.3. Entwicklung eines Aufbaus zur direkten Messung von Retroreflexion .....	14
2.5. Wirkung der Beschichtung auf die Innenraumbeleuchtung .....	17
3. Auswirkung von Mess- und Modellparametern .....	19
3.1. Auswahl zweier exemplarischer Proben .....	19
3.2. Messung und Modellierung der Streueigenschaften .....	20
3.3. Vergleich von Messdaten und Modellen beider SBS .....	21
4. Nationale Zusammenarbeit .....	25
5. Internationale Zusammenarbeit .....	25
6. Bewertung 2017 und Ausblick 2018 .....	25
Anlage A	26
Anlage B	27
Anlage C	28
Anlage D	29
Anlage E	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Anlage F	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>



## Abkürzungsverzeichnis

BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function
CGDB	Complex Glazing Database
DA	Daylight Autonomy: $300 \text{ lm/m}^2 < E_h < 2000 \text{ lm/m}^2$
DGI	Daylight Glare Index
DGP	Daylight Glare Probability
DSF	Differential Scattering Function, entspricht $\text{BSDF} \times \cos(\theta_s)$
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
EURAC	European Academy of Bozen
$E_h, E_v$	Horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke
GP	Goniophotometer
GA	Global Accordance
IEA	International Energy Agency
LA	Local Accordance
LBL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LESO-PB	Solar Energy and Buildings Physics Laboratory der EPFL
NIR	Nah-Infrarot ca. 1000 nm – 2500 nm
SBS	Sonnen- und Blendschutzsysteme
SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
VIS	Visible Light, sichtbarer Wellenlängenbereich ca. 350 nm – 780 nm



# 1. Projektziele

Eine herstellernerneutrale Bibliothek hochaufgelöster Modelle soll die optimierte Planung und Auslegung von SONNEN- UND BLENDSCHUTZSYSTEMEN (SBS) in hocheffizienten Gebäuden ermöglichen. Sonnenschutzsysteme gewinnen zunehmend an Bedeutung, um sommerliche Überhitzung und Spitzen im Energiebedarf für die Kühlung von hochgedämmten Gebäuden zu vermeiden. Ein wirksamer Blendschutz ist Voraussetzung für die natürliche Beleuchtung von Gebäuden. Diese ist eine wesentliche Bedingung für die Reduzierung des Energiebedarfs für elektrische Beleuchtung und eine hohe Aufenthaltsqualität. Für den Energiebedarf für elektrische Beleuchtung wird ein Einsparpotential von 15% konstatiert, das sich darüber hinaus auf den Energiebedarf zur Kühlung auswirkt [1]. Der wirksame Einsatz von SBS ist somit eine unverzichtbare Voraussetzung für die Umsetzung der Effizienzziele CH.

Das Fehlen von vorab verfügbaren Daten und der mit Messungen und Modellierung im Einzelfall verbundene Aufwand führen dazu, dass Planungsentscheidungen oft auf Grundlage von Annäherungen getroffen werden. Vorteile von hochoptimierten Produkten wie Lichtlenkungssystemen und selektiven Verglasungen werden von Annäherungen jedoch nicht erfasst. Mit der HIGH RESOLUTION COMPLEX GLAZING LIBRARY (BIMSOL) wollen wir die Lücke schliessen zwischen in gängiger Simulationssoftware bereits implementierten Methoden, und dem Mangel an optischen Kenndaten zum Zeitpunkt von Planungsentscheidungen. Mit BIMSOL wollen wir Simulationsmodelle von mindestens 15 SBS herstellerübergreifend Planern frühzeitig zur Verfügung stellen. Die Bibliothek aus Messdaten und Simulationsmodellen soll frei über das Internet verfügbar sein.

SBS wie selektive Verglasungen und Storen oder Lichtlenkungssysteme zeichnen sich die Richtungsabhängigkeit der Transmission aus. Selektivität beschreibt das Blockieren oder Durchlassen von Licht in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung, um z.B. direktes Sonnenlicht auszublenden. Gerichtetheit ist die Abhängigkeit der Transmission von der Ausgangsrichtung und erlaubt die optimierte Verteilung des Tageslichts im Innenraum. Die Abhängigkeit der Transmission von Ein- und Ausgangsrichtungen wird durch die BIDIRECTIONAL SCATTERING DISTRIBUTION FUNCTION (BSDF) zusammengefasst. Kennzahlen wie direkte und diffuse Transmission oder auch grob richtungsaufgelöste BSDF-Daten, wie in der COMPLEX GLAZING DATABASE (CGDB, ca. 10° Auflösung), bilden das Verhalten von SBS nur ungenügend ab. Die hohe Auflösung von BIMSOL (ca. 1.4°) soll Selektivität und Gerichtetheit adäquat abbilden, um Prognosen zu Tageslichtverfügbarkeit, Blendung und solaren Gewinnen von optimierten SBS zu ermöglichen.

BIMSOL soll unmittelbar mit verfügbaren Planungswerkzeugen eingesetzt werden können. Die Kompatibilität mit der Lichtsimulationssoftware RADIANCE, die in Planungswerkzeugen wie Ecotect, OPENSTUDIO, ESP-R integriert ist, und die Aufnahme ausgewählter Modelle in die v.a. in der Schweiz verbreitete Software RELUX soll die Anwendung von Projektergebnissen in der Tageslichtsimulation ohne vorherige Anpassung von Software ermöglichen. In Zusammenarbeit mit dem KOOPERATIONSPARTNER LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY (LBL) soll von jedem in BIMSOL aufgenommenen SBS eine niedriger aufgelöste Variante in die CGDB [2] aufgenommen werden. Hiermit stehen die Modelle in einer Vielzahl von Planungswerkzeugen, wie z.B. der Gebäudesimulationssoftware ENERGYPLUS sowie mit der von LBL entwickelten Umgebung zur Modellierung von Verglasungen (WINDOW, THERM), zur Verfügung.

Die Kooperation mit Planern, Softwareentwicklern und Herstellern, sowie die Verwendung offener Formate und Softwareschnittstellen ermöglichen den direkten Transfer in die Anwendung und den Test der Praxistauglichkeit der Projektergebnisse. Die Anwendbarkeit soll mit den beteiligten Fachplanern anhand laufender Projekte erprobt werden. Mindestens eine Veröffentlichung in einer internationalen Fachzeitschrift und eine Konferenzteilnahme sind geplant.

[1] Aiulfi et al. Erhebung Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern. BFE (2010)

[2] Complex Glazing Database. <https://windows.lbl.gov/software/CGDB/> (aufgerufen März 2016)

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

### 2.1. Ausbau Messapparatur

Die Messapparatur wurde um eine Probenhalterung erweitert. Diese erlaubt es, über die Steuersoftware Proben in den Strahlengang zu fahren und auszurichten. Der manuelle Aufwand zur Messung wird somit reduziert.

Die Messung der BSDF in einem abtastenden GONIOPHOTOMETER (GP) beruht auf der mechanischen Ausrichtung von Probe, Detektor und Lichtquelle zueinander (Abb. 1). Das bei der Auftragnehmerin eingesetzte GP implementiert die Ausrichtung des Detektors zur Probe mittels eines Roboterarms, an dessen Ende ein mit Detektoren für unterschiedliche Wellenlängenbereiche ausgestatteter Messkopf um den Probenmittelpunkt schnell rotiert. Hierüber wird die Ausfallsrichtung in einer kontinuierlichen Bewegung variiert, während der Detektor in regelmäßigen Intervallen das gestreute Licht aufzeichnet. Die Richtung zur Lichtquelle wird, bei feststehendem Beleuchtungsapparat, durch Rotation der Probe um zwei Achsen eingestellt. Im bisher verwendeten Aufbau geschah nur die Einstellung des Höhenwinkels zur Lichtquelle  $\theta_i$ , automatisch, während die des Azimutwinkels  $\phi_i$  jeweils manuell vorgenommen werden musste. Die manuelle Einstellung führte bei der Erzeugung von datenbasierten Modellen zu einem hohen Arbeitsaufwand, da diese Modelle eine hohe Zahl Messungen unterschiedlicher Einfallsrichtungen voraussetzen.

Die Erweiterung des Messaufbaus erlaubt die Programmierung von drei weiteren Parametern:

- Azimutwinkel (in der Probenfläche) zur Lichtquelle  $\phi_i$ ,
- Wechsel zwischen zwei Proben, um einen ununterbrochenen Messbetrieb über längere Zeiträume und somit Messungen auch über Nacht zu ermöglichen, und
- das Entfernen der Probe aus dem optischen Pfad, um die Intensität und das Profil der Beleuchtung bei Messungen über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und Instabilitäten zu erkennen.

Die neue Halterung wurde vom Hersteller des GP, PAB Advanced Technologies Ltd, neu entwickelt und im Dezember 2016 installiert (Abb. 2).

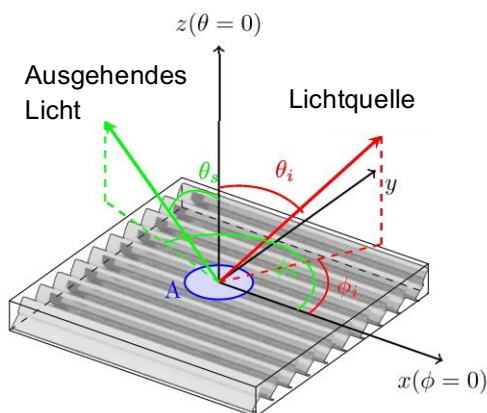


Abb. 1 (links): Die BSDF ist abhängig von der Richtung zur Lichtquelle (rot,  $\theta_i$ ,  $\phi_i$ ) und der ausgehenden Richtung (grün,  $\theta_s$ ,  $\phi_s$ ) des reflektierten oder transmittierten Lichts. Abb. 2 (rechts): Die neue Probenhalterung mit installierter Probe eines Sonnenschutzelements.





## 2.2. Messung und Modellierung von SBS

Im Berichtszeitraum wurden die Messungen und Modellierungen folgender SBS durchgeführt und zum Teil auf der Website <https://blog.hslu.ch/solarcontrol/> zum Download zur Verfügung gestellt.

#	SBS	Messung	Modell	Website
001	Spiegelnde Beschichtung für Lamellen <sup>1</sup>	X	X	
002	Retroreflektierende Beschichtung	X	X	
003	Mikroraster 33°	X	X	X
004	Mikroraster 45°	X	X	X
005	Prismenglas 60° / 30°	X	X	X
006	Combisol	X	X	X
007	Prismenglas-Modul	X	X	
008	- <sup>2</sup>			
009	Strahlteiler für Retroreflexionsmessung	X		
010	Diffuse weisse Beschichtung für Lamellen	X		
011	Prismenglas 28°	X		
012	Prismenglas 36°	X		
013	Prismenglas 45°	X		
014	Prismenglas 54°	X		
015	Okalux Kapilux T	X		
016	- <sup>2</sup>			
017	Thermolux Vlies	X		
018				
019				
020				
021				
022				
023				
024				
025				

Tab. 1: Bisher gemessene, modellierte und über die Website verfügbare SBS.

<sup>1</sup> Fortsetzung aus Arbeiten im Vorberichtszeitraum

<sup>2</sup> Testmessungen

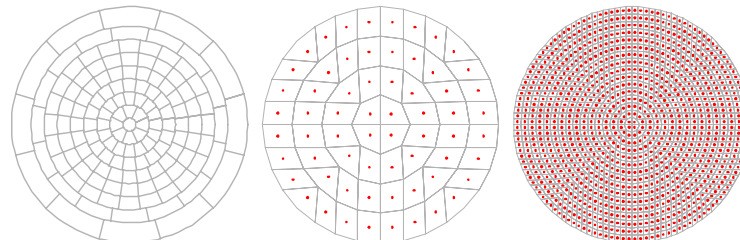


## 2.3. Rechnerische Kombination von BSDF

SBS werden mit transparenten oder streuenden Fassadenebenen zu Verglasungen kombiniert. Aufgrund des mit der Messung bzw. Berechnung der Eigenschaften der Ebenen verbundenen Aufwands ist sinnvoll, diese einzeln zu vermessen oder zu simulieren und in Bibliotheken für die wiederholte Verwendung abzulegen. Ein schnelles numerisches Verfahren zur rechnerischen Kombination der Modelle paralleler Fassadenebenen wurde für die hohe Richtungsauflösung der High Resolution Complex Glazing Library (BIMSOL) erweitert und exemplarisch an SBS getestet. Eine ausführliche Beschreibung wurde im Artikel „Computational combination of the optical properties of fenestration layers at high directional resolution“ veröffentlicht (Anlage A).

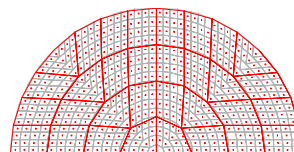
### 2.3.1. Abbildung von Richtungen in Matrizen

Die etablierten Methoden zur rechnerischen Kombination optischer Eigenschaften von Fassadenebenen bilden die vier Komponenten der Streuung, vor- und rückwärts gerichtete Transmission und Reflexion, jeweils als quadratische Matrizen ab. Voraussetzung hierfür ist die Zuordnung von Richtungen zu den Zellen der Matrize. Ein weit verbreiteter Ansatz beruht auf der Unterteilung der Hemisphäre in 145 Regionen nach Klems (Abb. 3 links). Diese kommt z.B. in der CGDB wie auch den daran angebotenen Berechnungswerkzeugen zum Einsatz, begrenzt jedoch von vornherein die Richtungsauflösung der verwendeten und erzeugten Modelle. Durch Verwendung eines parametrisierbaren Algorithmus, der Richtungen wählbaren Unterteilungen eines Quadrates zuordnet (Abb. 3 mitte, rechts), wird vorgeschlagen, um die BSDF-Komponenten mit wählbarer Auflösung in Matrizen zu überführen.



**Abb. 3: Unterteilung der Halbkugel in Regionen, die die Zuordnung von Richtungen zu den Zellen von Matrizen zur Abbildung von BSDF-Komponenten erlauben. Links die in der CGDB verwendete Aufteilung nach Klems. Mitte und rechts: Aufteilung mit Algorithmus nach Shirley-Chiu bei wählbarer Auflösung.**

Die wählbare Unterteilung erlaubt es, die Auflösung des Modells an die optischen Eigenschaften sowie die Anforderungen der Simulation anzupassen. So können stark streuende Ebenen, wie z.B. ein im Volumen streuendes Milchglas, mit einer niedrigen Auflösung wiedergegeben werden, während die scharf abgezeichneten Reflexions- und Transmissionsverteilungen durch ein System aus Spiegellamellen nur mit einer hohen Richtungsauflösung erhalten bleiben. Ist die Zielauflösung geringer als die der enthaltenen BSDF, wird ein Mittelwert der enthaltenen Regionen gebildet (Abb. 4).

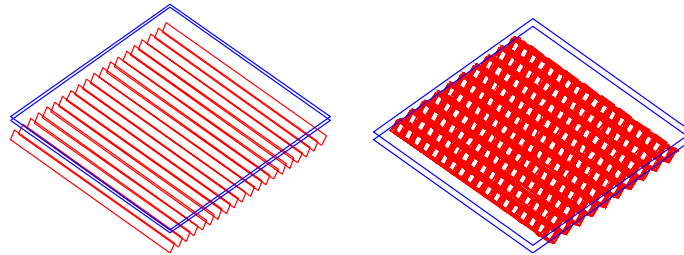


**Abb. 4: Um eine hoch aufgelöste BSDF (graue Linien) einem niedrig aufgelösten Modell (rote Linien) hinzuzufügen, wird ein Mittelwert der enthaltenen Datenpunkte (rote Punkte) gebildet.**

Diese erweiterte Darstellung erlaubt die effiziente rechnerische Kombination auch von hochauflösten Modellen, wie sie mit BIMSOL zur Verfügung stehen. Es werden immer zwei BSDF miteinander kombiniert, die Modellierung von Verglasungen mit mehr als zwei Ebenen erfolgt durch das aufeinanderfolgende Hinzufügen von BSDF.

### 2.3.2. Exemplarische Anwendung des Verfahrens

Die Methode wurde exemplarisch anhand zweier SBS getestet. CFS1 besteht aus flachen Spiegellamellen, die mit einer Doppelverglasung kombiniert werden (Abb. 5 links). CFS2 ist ein in eine Dreifachverglasung eingebettetes spiegelndes Mikroraster (rechts).



**Abb. 5: Links CFS1, Lamellen vor Doppelverglasung. Rechts CFS2, Mikroraster in Dreifachverglasung.**

Datenbasierte BSDF-Modelle der einzelnen Ebenen sowie der gesamten Verglasungen wurden mit dem in RADIANCE enthaltenen Programm genBSDF berechnet. Die BSDF der Verglasungen wurde darüber hinaus mit dem neuen Verfahren durch Kombination der Ebeneigenschaften berechnet.

Die resultierende BSDF des Verglasungssystems wurde mit der mit genBSDF berechneten verglichen. Hierbei kamen die beiden Metriken Global Accordance (GA) und Local Accordance (LA) zum Einsatz. Um den Effekt von Rauschen und Abweichungen in der Instrumentsignatur zwischen Messung und Berechnung zu minimieren, wurde die Auflösung der BSDF vor der Anwendung von  $2^7 \times 2^7$  Richtungen pro Hemisphäre auf  $2^5 \times 2^5$  reduziert.

GA fasst die Abweichung von zwei BSDF (oder DSF) für eine Einfallrichtung und alle Ausgangsrichtungen zusammen. Dieses erlaubt eine quantitative Beschreibung der Übereinstimmung (Tab. 2). Niedrige Übereinstimmungen treten nur für Einfallrichtungen  $\theta_i, \phi_i = 65^\circ, 90^\circ$  und  $50^\circ, 90^\circ$  auf, unter denen die Transmission weitgehend blockiert ist und daher auch niedrige Abweichungen ein hohes Gewicht bekommen.

SBS	$65^\circ, 90^\circ$	$50^\circ, 90^\circ$	$45^\circ, 90^\circ$	$25^\circ, 90^\circ$	$45^\circ, 45^\circ$
CFS1	00.010	88.943	97.864	98.938	97.760
CFS2	67.677	95.410	97.992	96.361	98.738

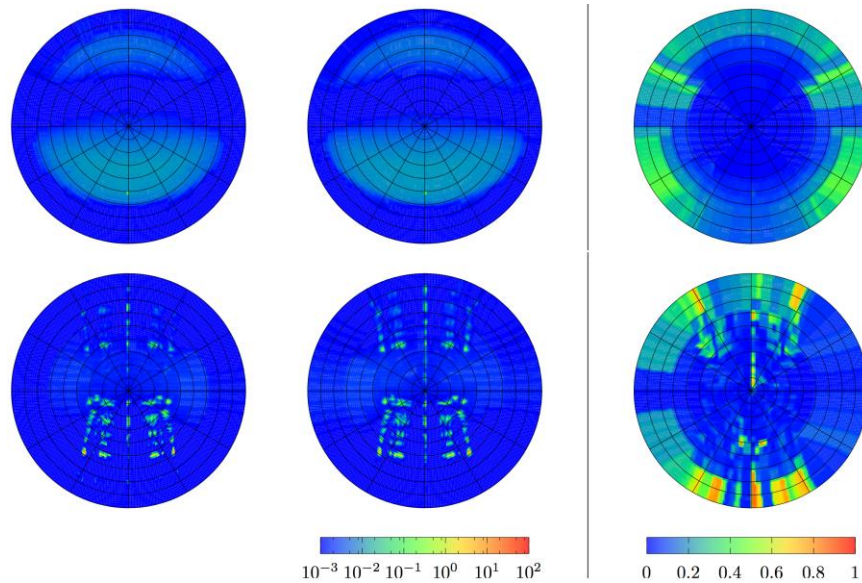
**Tab. 2: Global Accordance der mit genBSDF und durch Kombination von Ebeneigenschaften berechneten BSDF der beiden Verglasungssysteme für fünf exemplarische Einfallrichtungen  $\theta_i, \phi_i$ .**

LA beschreibt die Übereinstimmung für jedes Paar aus Einfall- und Ausgangsrichtungen, und erlaubt es, ggf. auftretende Abweichungen zu lokalisieren. Abb. 6 zeigt die über die Ausfallrichtungen aufgelöste Übereinstimmung der mit genBSDF und durch die erweiterte Kombination von Ebeneigenschaften erzeugten DSF beider Systeme für eine exemplarische Einfallrichtung.

Die Berechnung der kombinierten BSDF als Matrizen ist schneller als die über das in genBSDF implementierte Raytracing. Für die hohe Auflösungen ergibt sich eine Beschleunigung bis zu einem Faktor von ca. 40 (Tab. 3).

SBS	$2^4 \times 2^4$	$2^5 \times 2^5$	$2^6 \times 2^6$	$2^7 \times 2^7$	genBSDF
CFS1	0.26 h	0.26 h	0.39 h	7.09 h	289 h
CFS2	0.26 h	0.26 h	0.40 h	7.07 h	1981 h

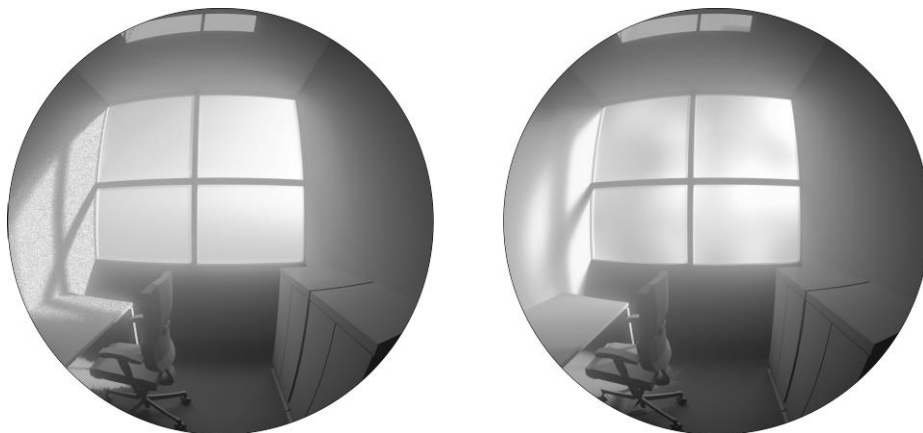
**Tab. 3: Berechnungszeiten der matrizenbasierten Methode bei Auflösungen von  $2^4 \times 2^4$  bis  $2^7 \times 2^7$  Richtungen pro Hemisphäre und der ray-tracing Implementierung genBSDF mit hoher Auflösung.**



**Abb. 6: BSDF des Gesamtsystems CFS1 (oben) und CFS2 (unten) unter Einfallrichtung  $\theta_i, \phi_i = 50^\circ, 90^\circ$ . Links: mit genBSDF berechnet. Mitte: durch Kombination der Ebenen-BSDF berechnet. Rechts: LA der mit den unterschiedlichen Verfahrenen berechneten BSDF.**

### 2.3.3. Auswirkungen der hohen Auflösung auf Simulationsergebnisse

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse einer Lichtsimulation, die mit einem mit der entwickelten Methode erstellten, hoch aufgelöstem Modell von CFS1 (links) sowie dem in der CGDB implementierten, niedrigen Richtungsauflösung (rechts) berechnet wurden. Der sich scharf abzeichnende Schattenwurf, der die Leuchtdichteverteilung im Blickfeld eines Betrachters am gezeigten Arbeitsplatz bestimmt, verschwimmt durch die niedrige Auflösung. Diese war mit bisherigen Methoden Voraussetzung, um mit Bibliotheken der optischen Eigenschaften von Verglasungsebenen zu arbeiten. Mit der Anwendbarkeit der matrixbasierten Kombination von Ebenen-BSDF können dagegen die Details der Leuchtdichteverteilung auch in der Untersuchung von Varianten, die Möglichkeiten zur schnellen Zusammenstellung von Verglasungssystemen voraussetzen, erhalten werden.



**Abb. 7: Mit RADIANCE berechnete Leuchtdichteverteilung an einem mit CFS1 ausgestatteten Fensters unter direkter Sonneneinstrahlung. Das SBS wurde durch Kombination der optischen Ebeneigenschaften mit hoher (links) bzw. niedriger (rechts) Auflösung modelliert.**



## 2.4. Vermessung und Modellierung von Oberflächenbeschichtungen

Die im vorangegangenen Berichtszeitraum mit den Projektpartnern EUROPEAN ACADEMY OF BOZEN (EURAC) und der Firma PELLINI SPA begonnenen Arbeiten wurden fortgesetzt. Die Ergebnisse im Manuskript „Characterization and data-driven modeling of a retro-reflective coating in Radiance“ dokumentiert, das sich derzeit in der Begutachtung befindet.

### 2.4.1. Anwendungsbereich der Beschichtungen und Proben

SBS, die aus Lamellen aufgebaut sind, deren Kippwinkel gezielt z.B. zur Ausblendung von direktem Sonnenlicht gesteuert werden kann, können eine Vielzahl möglicher Konfigurationen aufweisen. Um nicht für jede dieser fast unbegrenzten Konfigurationen eine Messung der BSDF durchführen zu müssen, kann letztere rechnerisch auf Grundlage einer genauen Beschreibung von Geometrie und Oberflächeneigenschaften ermittelt werden. Um die Reflexionseigenschaften von zwei beschichteten Lamellen zu bestimmen, wurden bereits im Vorberichtszeitraum erste Messungen an zwei Proben mit innovativen Beschichtungen durchgeführt (Abb. 8).

- BIMSOL001 ist eine mit einem Interferenzfilter beschichtete Aluminiumoberfläche. Der Filter erhöht den Reflexionsgrad im kurzwelligen, sichtbaren Spektrum überproportional zum solaren Spektrum. Aufgrund des Herstellungsprozesses und nach Augenschein ist das Reflexionsverhalten anisotrop.
- BIMSOL002 ist eine Beschichtung auf der Grundlage einer retro-reflektierenden Mikrostruktur. Retro-reflektion ermöglicht die Reduzierung solarer Gewinne auch bei weitgehend geöffnetem Anstellwinkel, so dass der Sichtbezug nach aussen nicht unterbrochen wird. Darüber hinaus sollen Blendungseffekte durch Reflektion an der von Innen sichtbaren Unterseite der Lamellen vermieden werden. Die Beschichtung befindet sich derzeit in der Entwicklung und soll, im Gegensatz zu bereits erhältlichen Produkten, Retro-Reflektion ohne komplexe Profile erreichen.

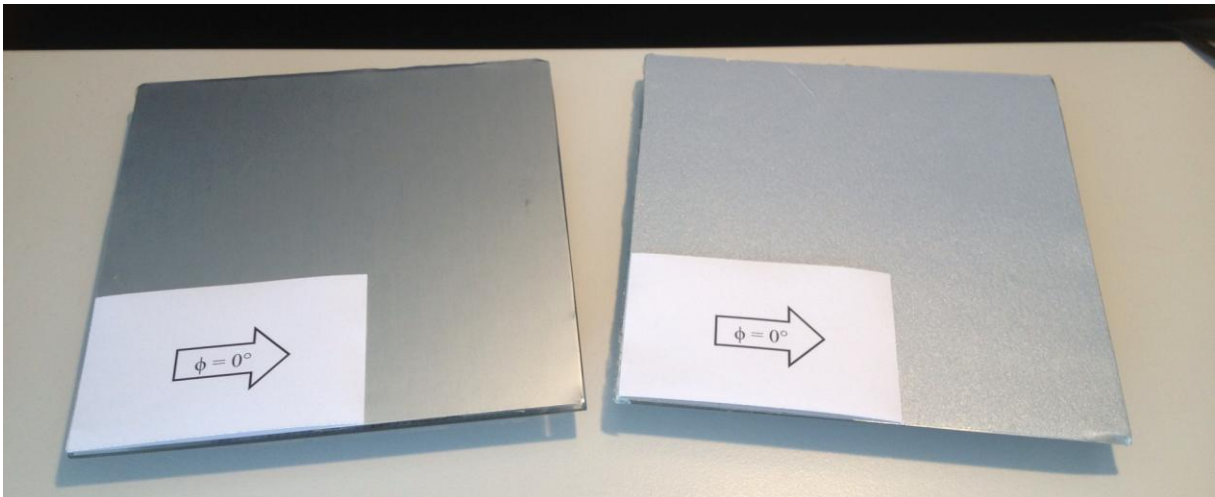
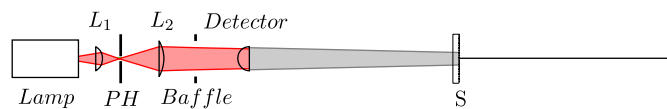


Abb. 8: BIMSOL001, Aluminiumoberfläche mit erhöhtem Reflektionsgrad (links) und BIMSOL002, Prototyp einer retro-reflektierenden Mikrostruktur (rechts).

## 2.4.2. Grenzen der Messung und Modellierung im Vorberichtszeitraum

Die Reflexionseigenschaften von BIMSOL001 wurde am GP im Vorberichtszeitraum bereits vermessen und ein datenbasiertes Reflexionsmodell in RADIANCE erzeugt. Da die Proben in Bezug auf Tageslichtverfügbarkeit und Blendung, nicht auf solare Einträge bewertet werden sollten, wurde die Messung photometrisch im sichtbaren Spektrum (VIS) unter Verwendung eines Detektors mit  $v(\lambda)$ -Filter durchgeführt. Für BIMSOL002 war eine direkte Messung nicht möglich, da der die Messung von Retroreflexion im Goniophotometer (Einfallrichtung=Ausgangsrichtung) zu einer Verschattung der Probe durch den Detektor führt (Abb. 9).



**Abb. 9:** Da im Falle von Retroreflexion Einfall- und Ausgangsrichtung identisch sind, verschattet der Detektor im unmodifizierten Goniophotometer die Probe. Eine Messung des Peaks ist unmöglich.

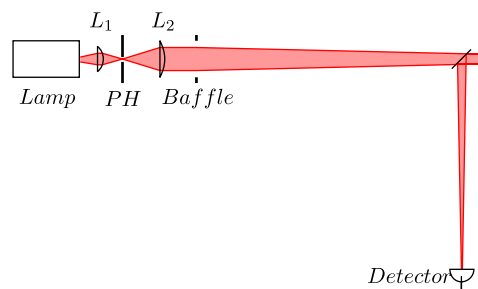
Die BSDF wurde daher anhand der bekannten Geometrie der Mikrostruktur rechnerisch bestimmt. Die messdaten- und simulationsbasierten Modelle, sowie die Ergebnisse einer exemplarischen Anwendung in einem Raummodell, wurden im Vorbericht erläutert.

Die ersten Ergebnisse zum Einsatz von retroreflektierenden Oberflächen in SBS sind vielversprechend. Solare Gewinne können, um sommerliche Überhitzung zu vermeiden, mit der Technik trotz weitgehend flachen Anstellwinkeln der Lamellen effektiv reduziert werden. Sommerlicher Wärmeschutz muss somit die Blickbeziehung in den Aussenraum nicht unterbrechen. Aufgrund der rechnerisch ermittelten Streueigenschaften wird eine stark gerichtete Reflexion nach aussen erwartet, die Blendung durch nach innen gestreutes Licht wirksam begrenzen kann. Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse erscheint jedoch unbedingt notwendig, da sich bereits geringe Abweichungen der retroreflektierenden Mikrostruktur von der angenommenen Geometrie auf den Wärmeschutz ebenso wie auf die Blendungsbegrenzung erheblich auswirken können.

## 2.4.3. Entwicklung eines Aufbaus zur direkten Messung von Retroreflexion

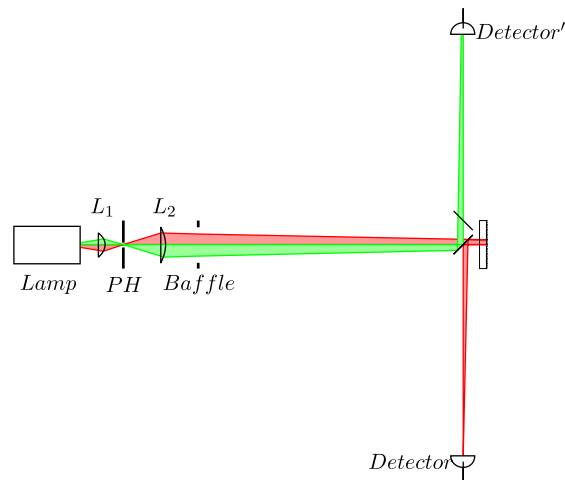
Die Notwendigkeit einer direkten Messung von Retroreflexion motivierte die Neuentwicklung einer Erweiterung des Goniophotometers. Entscheidende Vorteile des bestehenden Aufbaus, wie die Unabhängigkeit von Kalibrierungen und Referenzproben, die konfigurierbare Richtungsauflösung und der hohe Dynamikumfang sollten erhalten bleiben.

Ein bekannter Ansatz beruht auf einem Strahlteiler, der reflektiertes Licht um  $90^\circ$  umleitet und somit das Problem der Verschattung umgeht (Abb. 10). Die Eigenschaften des Strahlteilers in Abhängigkeit von Wellenlänge und Richtung müssen vorab bekannt sein.



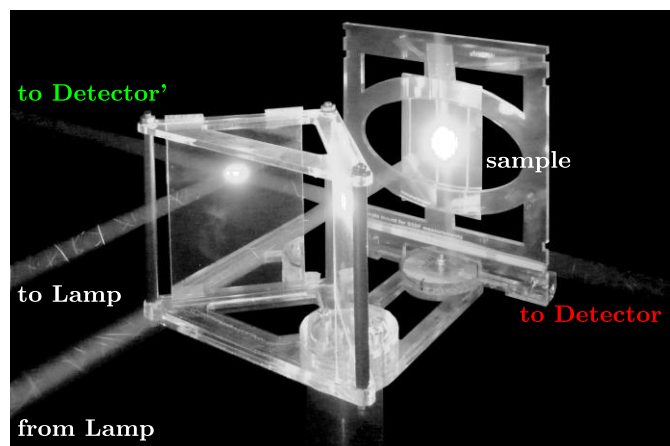
**Abb. 10:** Das Einfügen eines Strahlteilers zwischen Lichtquelle und Probe fügt zur Umlenkung des retroreflektierten Lichts, das so ohne Verschattung durch den Detektor gemessen werden kann.

Die entwickelte Kombination von zwei Strahlteilern ermöglicht die direkte Messung der Retroreflexion im Bereich um die Einfallrichtung und nutzt die freie Konfigurierbarkeit der Detektorposition im bestehenden Goniophotometer aus (Abb. 11). Für Proben, deren Reflexionsspektren jeweils innerhalb der sichtbaren (VIS) und nah-infraroten (NIR) Wellenlängenbereichs flach sind, kann die Messung ohne genaue Kenntnis und Korrektur der wellenlängenabhängigen Eigenschaften des Strahlteilers im gesamten solaren Spektrum erfolgen. Diese Voraussetzung ist bei Techniken zur Tageslichtnutzung typischerweise gegeben, da sonst die Farbwiedergabe stark beeinträchtigt wäre. Starke Unterschiede zwischen der Reflexion in VIS und NIR, die bei optimierten Produkten zu erwarten sind, beeinträchtigen hingegen die Zuverlässigkeit des Verfahrens nicht.



**Abb. 11:** Der neu entwickelte Aufbau verwendet zwei identische Strahlteiler. An Position Detector' kann die Beleuchtung, an Position Detector die Streuung charakterisiert werden. Der Einfluss der Strahlteiler auf beide Messungen ist identisch und muss daher nicht bekannt sein.

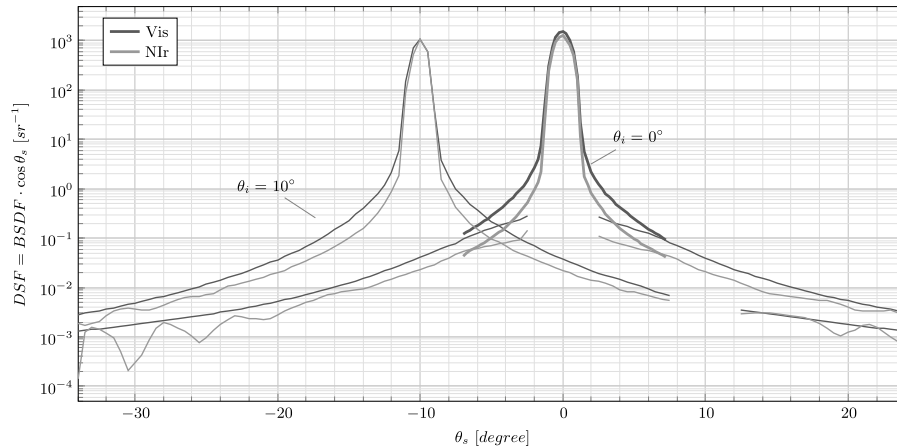
Ein Prototyp dieses Aufbaus (Abb. 12) wurde so hergestellt, dass er sich ohne grössere Eingriffe in das Instrument integrieren bzw. jederzeit entfernen lässt. Da der Prototyp nicht elektrisch mit dem Instrument verbunden ist, müssen die Einfallrichtungen derzeit manuell eingestellt werden. Der Prototyp kann Proben bis zu 150mm x 150mm aufnehmen.



**Abb. 12:** Ein Prototyp des in Abb. 6 beschriebenen Aufbaus wurde aus Acrylglas hergestellt und erlaubt die Messung von Proben bis zu 150mm x 150mm bei manueller Einstellung der Einfallrichtung.

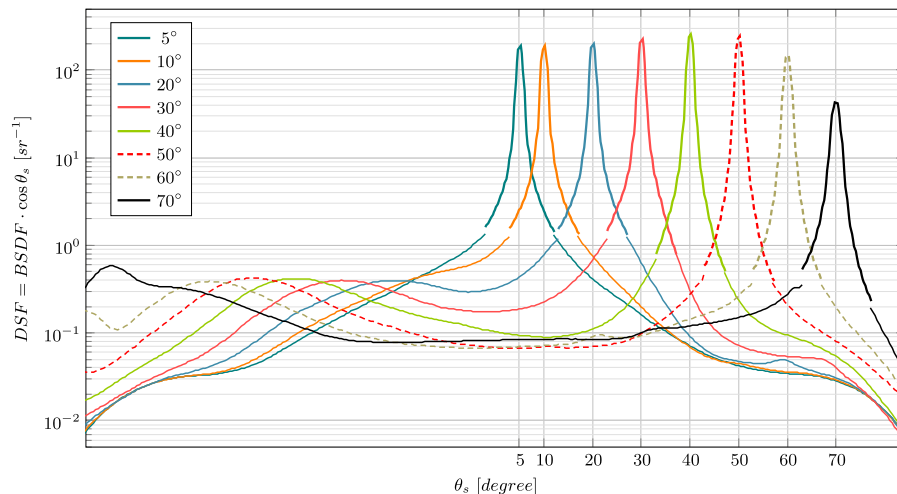
Zur Validierung des Ansatzes wurden zwei Messungen am Standardaufbau mit Messungen eines Oberflächenspiegels am erweiterten Aufbau verglichen (Abb. 13). Alle Messungen erfolgten sowohl in VIS als auch in NIR. Der Vergleich des ohne Strahlteiler unter einem Lichteinfall von 10° gemessenen

Peaks mit dem retroreflektierten, durch den Strahlteiler gemessenen Peak zeigt, dass keine nennenswerte Aufweitung durch Streuung am Strahlteiler erfolgt und die Richtungsauflösung somit nicht beeinträchtigt wird. Die Überlagerung der ohne Strahlteiler messbaren Reflexion in Richtungen nahe zur Einfallrichtung, mit der durch den Strahlteiler gemessenen Reflexion zu beiden Seiten des Peaks ergab eine gute Übereinstimmung, die sich durch einen fast ansatzlosen Übergang der unter einem Lichteinfall von  $0^\circ$  gemessenen Verteilungen bei  $+8^\circ$  zeigt.



**Abb. 13:** Die Übereinstimmung der Form der unter  $10^\circ$  ohne, und unter  $0^\circ$  mit Verwendung von Strahlteilern gemessenen DSF weist auf keinen signifikanten Einfluss der Erweiterung auf die Richtungsauflösung hin. Der fast ansatzlose Übergang der mit (dicke Linien) und ohne (dünne Linien) gemessenen Verteilungen unter  $0^\circ$  bei  $+8^\circ$  bestätigt, dass der Einfluss der Strahlteiler auf die Amplitude durch den gewählten Ansatz vollständig ausgeglichen wird.

Die Reflexionseigenschaften der Beschichtung BIMSOL002 wurden für Einfallswinkel zwischen  $5^\circ$  und  $70^\circ$  bestimmt. Die Messung um den retroreflektierten Peak erfolgte mit Hilfe der Strahlteiler, während alle anderen Ausgangsrichtungen am unveränderten Goniophotometer erfasst wurden (Abb. 14).



**Abb. 14:** Kombination der mit und ohne Strahlteiler gemessenen DSF von BIMSOL002 in VIS.

Auf Grundlage der gemessenen DSF wurden hochaufgelöste, daten-basierte Reflexionsmodelle zur Verwendung in RADIANCE erstellt. Abb. 15 zeigt exemplarisch die Überlagerung von Modell und Messdaten für Einfallrichtungen  $30^\circ$  und  $60^\circ$ , sowie die interpolierte DSF für  $45^\circ$ .



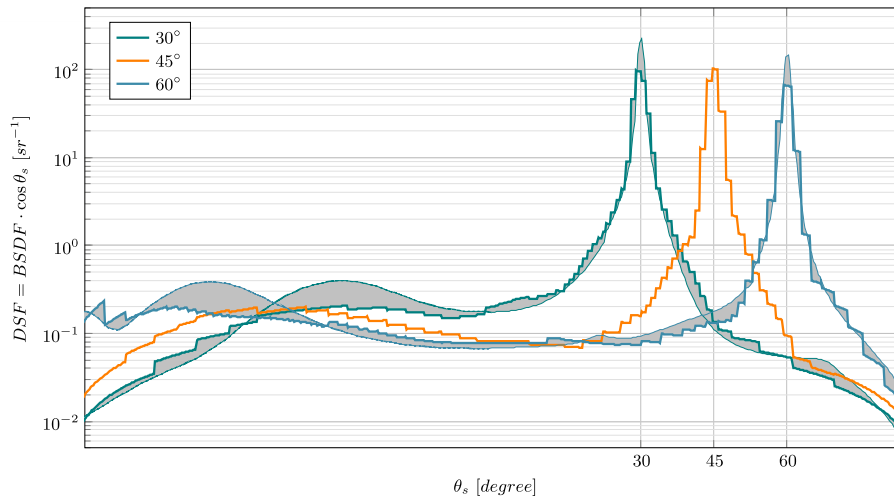


Abb. 15: DSF für 3 exemplarische Einfallrichtungen aus datenbasiertem Modell (dicke Linie) und Messung (dünne Linie) in VIS.

## 2.5. Wirkung der Beschichtung auf die Innenraumbeleuchtung

Die Wirkung der Beschichtung von BIMSOL002 wurde im Vergleich mit spiegelnden und ideal diffusen Reflexionseigenschaften untersucht. Beschreibungen der Reflexionseigenschaften wurden hierzu in der Simulation mit einem ebenen, horizontal gestellten Lamellenprofil kombiniert und in ein exemplarisches Raummodell eingesetzt. Die Sonne steht im betrachteten Fall im Süden, der Höhenwinkel beträgt 50°. Die Beleuchtungsstärke  $E$  auf den raumbegrenzenden Oberflächen, sowie die Leuchtdichten im Blickfeld eines der Fassade zugewandten Betrachters wurden mit RADIANCE berechnet. Auf Grundlage der Leuchtdichten wurde die Blendung durch Tageslicht anhand DAYLIGHT GLARE PROBABILITY (DGP) und DAYLIGHT GLARE INDEX (DGI) bewertet.

Die retroreflektierende Beschichtung reduziert die Beleuchtungsstärke im auf den Flächen des Innenraums erheblich (Abb.16, A). Sowohl die spiegelnde Reflexion des Sonnenlichts an die Decke (B), als auch die diffuse Streuung v.a. an die angrenzenden Wandflächen (C) entfällt weitgehend. Hierdurch wird auch bei horizontaler Lamellenstellung eine effiziente Abschattung erreicht.

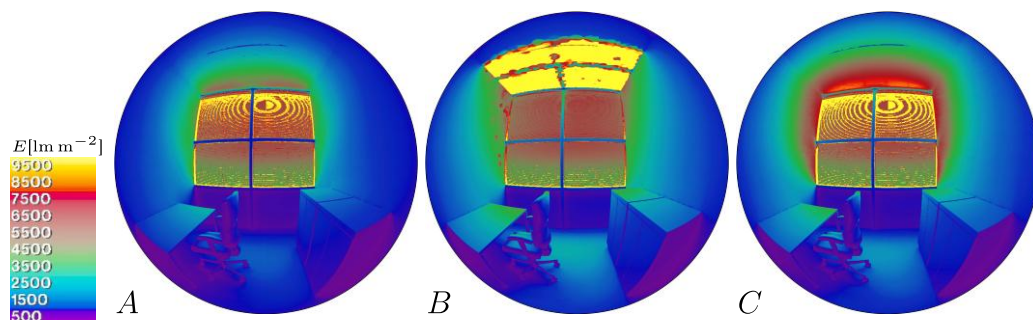


Abb. 16: Beleuchtungsstärke auf den raumbegrenzenden Flächen eines nach Süden orientierten Einzelbüros. A: Retroreflektierend (BIMSOL002). B: Spiegelnd. C: Diffuse reflektierend.

Die Leuchtdichteverteilung (Abb. 17) auf den diffusen Flächen steht in einem direkten Verhältnis zur Beleuchtungsstärke. Spiegelnde Flächen wie z.B. die Abdeckung einer im Blickfeld gelegenen Deckenleuchte führen im Falle der Spiegellamellen eine Abbildung der Sonne mit lokal sehr hohen Leuchtdichten (B).

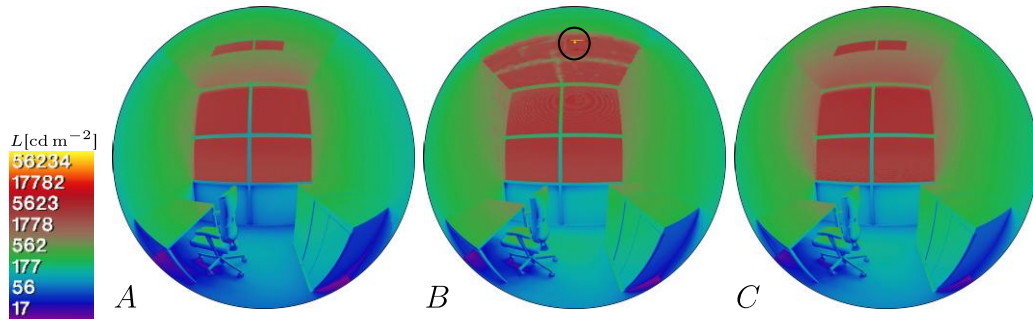


Abb. 17: Leuchtdichteverteilungen bei unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Lamellen.

Die unterschiedlichen Verteilungen der Beleuchtungsstärke im Blickfeld stellen potentielle Blendungsquellen dar (Abb. 18), die sich in den Blendungsbewertungen anhand der gewählten Metriken auswirken (Tab. 4). Spiegelnde Lamellen (B) führen in der untersuchten Form (flaches Profil, horizontale Stellung) zu inakzeptablen Werten sowohl auf Grundlage von DGI als auch DGP. Diffuse und retroreflektierende Lamellen erreichen akzeptable Werte. DGI bewertet die diffusen Lamellen minimal besser, während DGP das retroreflektierende System bevorzugt. Die unterschiedlichen Ergebnisse auf Grundlage von DGI und DGP sind u.a. mit den verwendeten Annahmen zur Adaptivität sowie der Berücksichtigung der vertikalen Beleuchtungsstärke in der DGP-Metrik zu erklären.

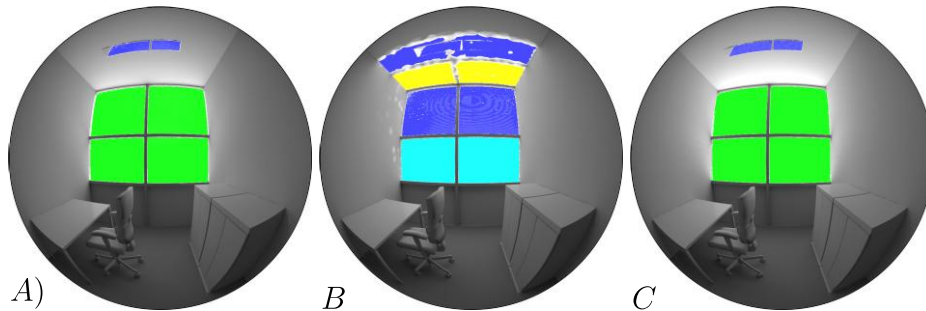


Abb. 18: Zusammenhängende Bereiche hoher Leuchtdichte werden in der Blendungsbewertung als potentielle Blendungsquellen berücksichtigt.

	SBS	DGP	DGI	$E_v$
A)	Retroreflektor BIMSOL002	0.329	22.961	2234 lx
B)	Spiegelnd	0.896	29.323	8779 lx
C)	Ideal-diffus	0.352	22.304	2706 lx

Tab. 4: Effekt der retroreflektierenden Beschichtung auf Blendung durch Tageslicht im Vergleich zu ideal spiegelnden bzw. diffusen Lamellen.

### 3. Auswirkung von Mess- und Modellparametern

Die datenbasierte Modellierung von SBS beruht auf einer Abfolge von Messung und Messdatenverarbeitung. Die Auswirkungen der in den einzelnen Schritten verwendeten Methoden sowie der gewählten Parameter auf die Modelle wurde untersucht, um die zu erwartende Genauigkeit und den Rahmen der Anwendbarkeit zu bestimmen. Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Tagungsbeitrag bzw. Artikel „High-resolution data-driven models of daylight redirection components“ (Anlagen B, C, D).

#### 3.1. Auswahl zweier exemplarischer Proben

Zwei SBS wurden aufgrund ihrer grundlegenden Verschiedenartigkeit für die Untersuchung ausgewählt. DRC1 (Abb. 19 links) kombiniert eine prismatische Mikrostruktur mit einer streuenden Platte, die auf der Innenseite einer Verglasung angebracht sind. Ziel ist nicht die Reduzierung, sondern ausschliesslich die Umlenkung einfallenden Sonnenlichts zur Decke, um die Verfügbarkeit von Tageslicht auch in tiefen Räumen zu erhöhen. Das System zeichnet sich dementsprechend durch eine geringe Selektivität für unterschiedliche Einfallrichtungen aus, transmittiertes Licht wird um eine bzw. zwei Haupt-Ausgangsrichtungen aufgeweitet. DRC2 (Abb. 19 rechts) ist ein Raster aus gekippten Konzentratoren, das in den Zwischenraum einer Überkopf-Mehrfachverglasung eingelegt wird. Die Geometrie schliesst einfallendes Sonnenlicht vollständig aus, und verteilt das diffuse Himmelslicht gleichmässig im Innenraum. Primäres Ziel ist die Minimierung von solaren Gewinnen und Blendung bei grossflächigen Verglasungen, die eine grosszügige Beleuchtung von Räumen mit ausschliesslich diffusem Tageslicht erlauben. Die Selektivität ist durch die Geometrie klar vorgegeben, deren spiegelnde und regelmässige Oberflächen zu einer komplexen Verteilung des über mehrfache Reflexionen transmittierten Lichts führen. Ein Teil des diffusen Lichts wird direkt durch die gekippten Öffnungen durchgelassen.

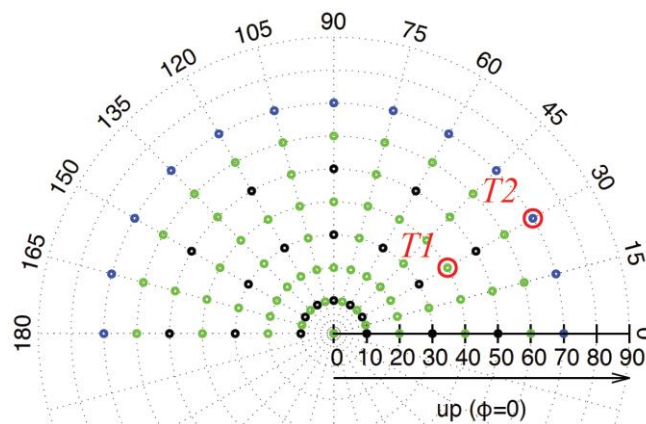


Abb. 19: Muster von DRC1 (links, deutlich sichtbar die Umlenkung des Sonnenlichts) und DRC2 (rechts).

## 3.2. Messung und Modellierung der Streueigenschaften

Die Messung am Goniophotometer erfolgt mit einer asymmetrischen Auflösung. Für eine geringe Anzahl von Ausfallsrichtungen werden die Verteilungen des von einer Probe gestreuten Lichts mit einer ausgangsseitig hohen Auflösung abgetastet. Der Grund für diese Asymmetrie liegt in der Annahme, dass SBS zum Teil komplexe Lichtverteilungen bewirken, die bei einer niedrigen Ausgangsauflösung unzureichend wiedergegeben würden. Peaks, die oft einen Grossteil der transmittierten Energie darstellen, würden evtl. nicht erfasst. Andererseits ist zu beobachten, dass auch komplexe ausgangsseitige Verteilungen sich bei Variieren der Einfallrichtung nur graduell verändern. Die Anzahl der Datenpunkte für eine Einfallrichtung liegt im Bereich von mehreren Hunderttausend, während typischerweise zwischen 18 und 290 regelmässig verteilten Einfallrichtungen erfasst werden.

Für die Untersuchung wurden drei Gruppen von Einfallrichtungen definiert. Die erste, Coarse (blau in Abb. 20), ist auf Richtungen bis zu  $50^\circ$  zur Oberflächennormale begrenzt und löst diese in groben Schritten von  $20^\circ \times 30^\circ$  auf. Die zweite Gruppe, Refined (grün), erhöht die Auflösung auf  $10^\circ \times 15^\circ$ . Schliesslich ergänzt die Gruppe High (blau) Richtungen mit einem Winkel von  $70^\circ$  zur Oberflächennormale. Schliesslich werden zwei Testrichtungen T1 und T2 definiert, die in Refined und High enthalten sind.



**Abb. 20: Eingangsrichtungen der drei Gruppen Coarse (schwarz), Refined (grün) und high (blau) sowie Testrichtungen T1 und T2.**

Die Streueigenschaften im VIS Spektrum wurden für beide Proben und die in Coarse, Refined und High enthaltenen Einfallrichtungen am Goniophotometer vermessen. Aus den Messdaten wurden für jede der beiden Proben drei datenbasierte Transmissionsmodelle erzeugt. M1 enthält die Daten aus Coarse, M2 die aus Coarse und Refined, und M3 die Messdaten aus allen Einfallrichtungen Coarse, Refined und High.

Die Modellgenerierung erfolgte mit den in RADIANCE enthaltenen Werkzeugen pabopto2bsdf und bsdf2tree. pabopto2bsdf bildet die gemessenen Verteilungen zu jeder Einfallrichtung mit einem Satz Gauss'scher Basisfunktionen ab und ordnet die Messdaten für benachbarte Einfallrichtungen in einem Dreiecksgitter an. bsdf2tree erzeugt aus den Basisfunktionen ein diskretes Modell mit vorgegebener Auflösung, dessen vier Dimensionen den beiden Winkelpaaren für Einfall- und Ausgangsrichtungen entspricht. Da die Modellauflösung in der Regel weit höher als die Auflösung der gemessenen Einfallrichtungen ist, wird ein Interpolationsalgorithmus angewendet, der Prinzipien des Massetransports beruht und die „Bewegung“ von z.B. Peaks in Abhängigkeit von der Einfallrichtung wiedergibt. Schliesslich erfolgt eine Datenreduzierung, die benachbarte Zellen in Abhängigkeit von der lokalen Varianz der BSDF zusammenfasst und den Tensor in eine mehrdimensionale Baumstruktur, den Tensor-Tree, überführt.



M1 und M2 beschreiben folglich den Bereich  $\theta_i \leq 60^\circ$  durch Interpolation, wobei die Stützpunkte in M2 enger liegen. Für Richtungen mit  $\theta_i \leq 60^\circ$  müssen M1 und M2 extrapolieren, während M3 bis zu  $\theta_i = 70^\circ$  noch zwischen gemessenen Datensätzen interpoliert.

### 3.3. Vergleich von Messdaten und Modellen beider SBS

Die gemessenen Verteilungen für die Einfallsrichtungen T1 und T1 sind in Abb. 21 (DRC1) und Abb. 22 (DRC2) als Projektion der DSF dargestellt. Die Einfallsrichtungen sind mit einem roten Kreis markiert. Zu erkennen ist die vertikale ( $\phi=0$ ), durch den Diffusor weiche Aufweitung des einfallenden Lichts durch die lineare Prismenstruktur von DRC1. DRC2 führt zu mehreren Peaks und linearen Strukturen, die durch direkte Transmission sowie Reflektion an den ebenen und gewölbten Spiegelflächen hervorgehoben werden.

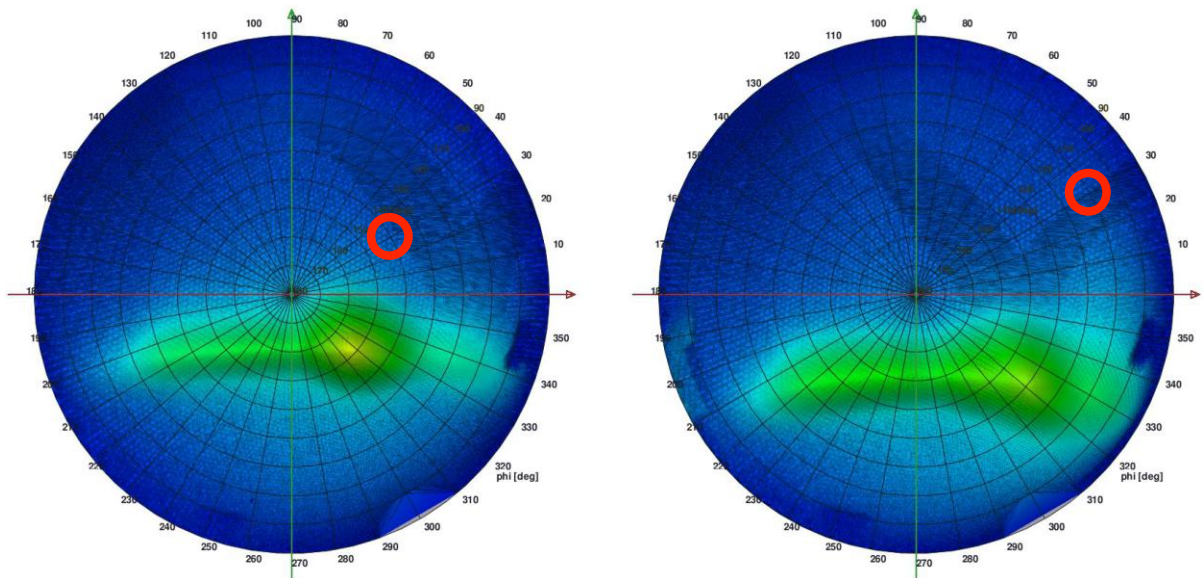


Abb. 21: Gemessene Transmission durch DRC1 unter Einfallsrichtungen T1 (links), T2 (rechts).

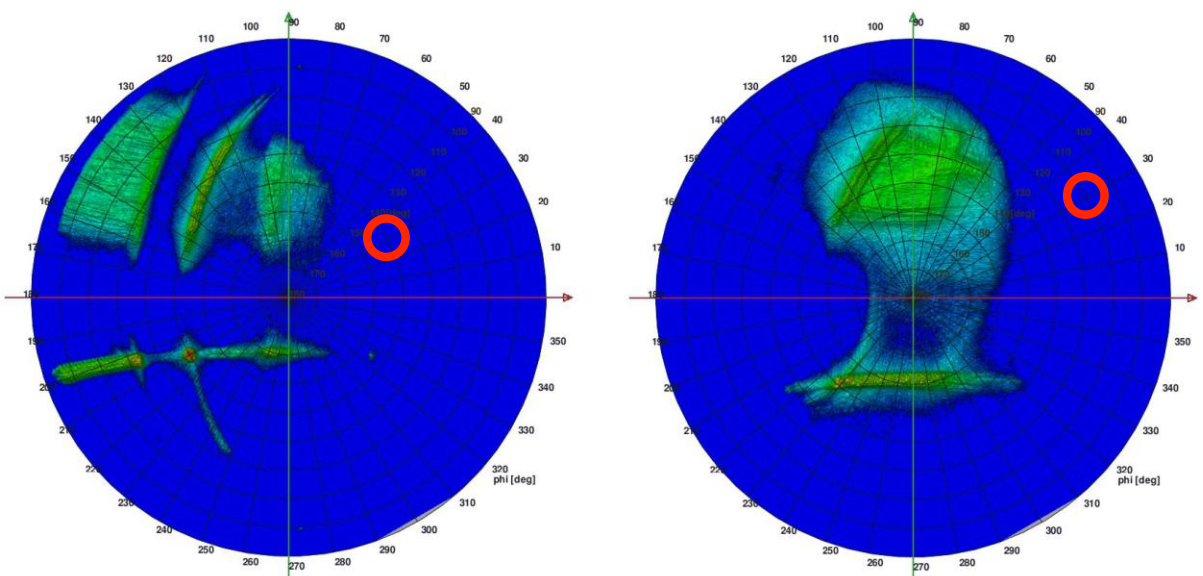


Abb. 22: Gemessene Transmission durch DRC2 unter Einfallsrichtungen T1 (links), T2 (rechts).



Die Auswirkungen der Interpolation zwischen gemessenen Einfallsrichtungen werden im Vergleich der DSF für T1 aus Modell M1, das für diese Richtung auf interpolierte Daten zurückgreifen muss, und dem Modell M2, dass unter Verwendung der Messung für Richtung T1 erstellt wurde, untersucht.

Für DRC1 (Abb. 23) unterscheiden sich die Modelle weniger als für DRC2 (Abb. 24), dessen komplexe, unregelmässige Strukturen durch die Interpolation verfremdet werden.

Die Peaks, die bei DRC1 um  $\theta_s=30^\circ$ ,  $\phi_s=330^\circ$  und bei DRC2 um  $\theta_s=40^\circ$ ,  $\phi_s=210^\circ$  liegen, werden von der Interpolation korrekt angeordnet.

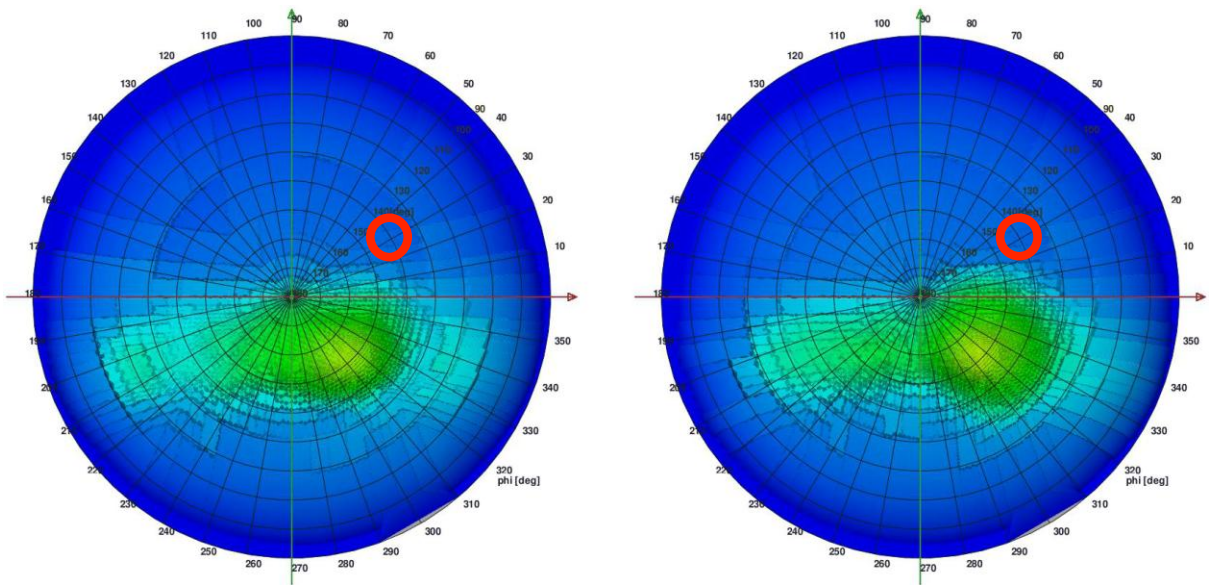


Abb. 23: DSF von DRC1 für T1 aus Interpolation (M1, links) und mit Messdaten (M2, rechts).

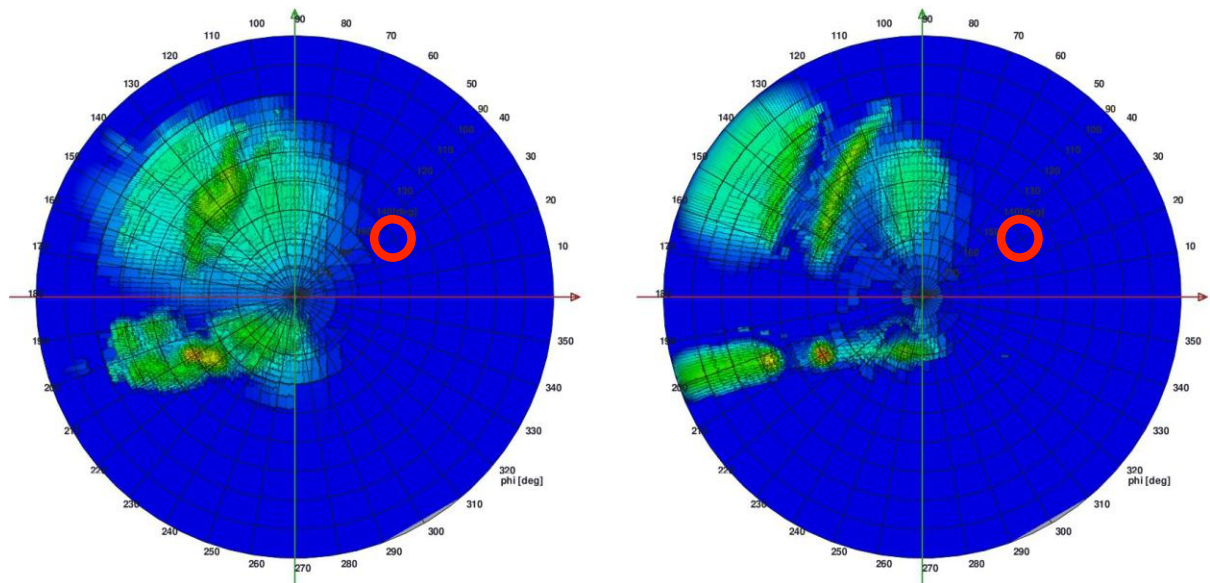


Abb. 24: DSF von DRC2 für T1 aus Interpolation (M1, links) und mit Messdaten (M2, rechts).



Eine zuverlässige Extrapolation ist mit den in RADIANCE implementierten Algorithmen nicht möglich. Dieses wird im Vergleich der DSF für T2 aus den Modellen M2 (über Extrapolation) und M3 (mit enthaltenden Messdaten für die Testrichtung) deutlich (Abb. 25, 26).

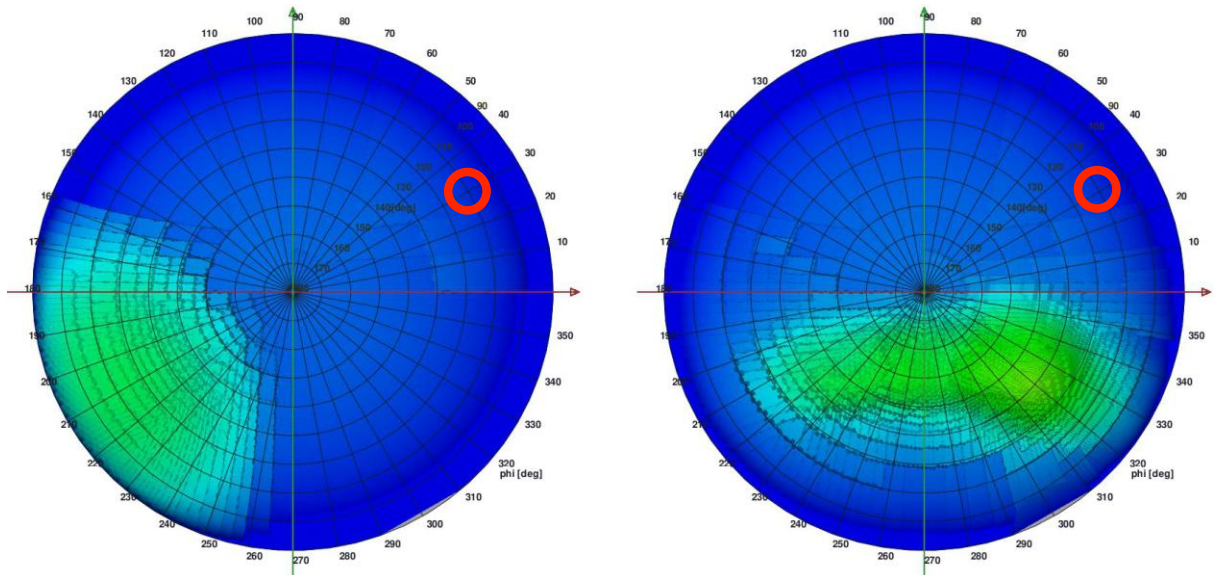


Abb. 25: Extrapolation für DRC1 aus M2 (links) und Modell mit Messdaten M3 (rechts).

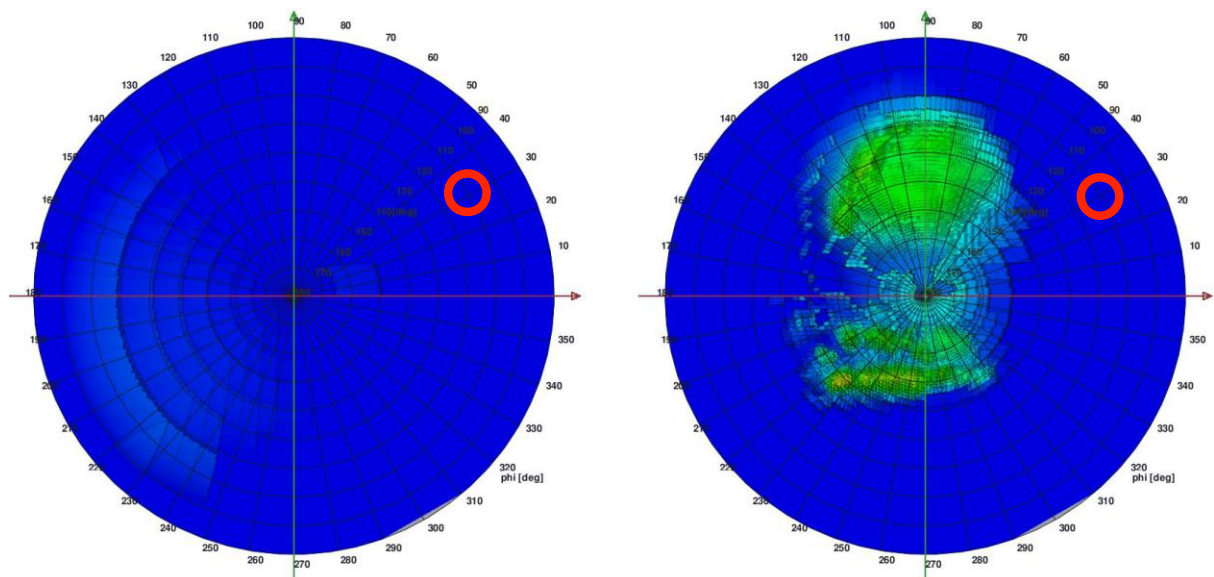


Abb. 26: Extrapolation für DRC2 aus M2 (links) und Modell mit Messdaten M3 (rechts).

Die Anwendung der datenbasierten Modelle ist somit auf den von der Messung abgedeckten Bereich von Einfallswinkeln zu beschränken. Während in der Untersuchung Einfallrichtungen bis  $\theta_i=70^\circ$  vermessen wurden, ist die durch die COMPLEX GLAZING DATABASE etablierte Verwendung einer Basissystems nach Klems, die auch BIMSOL zur Anwendung kommt, auf einen Bereich bis  $\theta_i=82.5^\circ$  beschränkt. Bei typischen SBS ist hierdurch keine signifikante Beeinträchtigung zu erwarten, da aufgrund der Stärke von Fassadensystemen, Verschattung durch opake Bauteile und die geringe Transmission durch Glas in diesem Bereich keine nennenswerten Beiträge zu Beleuchtung und solaren Gewinnen erwartet werden.



Eine einheitliche, niedrigere Richtungsauflösung zur Verringerung der Modellgröße weitet scharf abgegrenzte Spitzen in der Verteilung auf. Die in RADIANCE implementierte, lokal adaptive Datenreduzierung passt dagegen die Auflösung an die BSDF an und erhält somit Details. Abb. 27 und 28 zeigen den Effekt beider Techniken. Die adaptive Reduzierung ist umso erfolgreicher, je stärker sich Details lokal konzentrieren. So kann z.B. der direkt transmittierten Peak bei DRC2 genauer beschrieben werden, allerdings zulasten von Details im diffusen Hintergrund. Für die lichttechnische Betrachtung ist dieses zu bevorzugen, da Spitzen in der Transmission (die aufgrund der logarithmischen Darstellung in den Abbildungen zurücktreten) die Beleuchtung dominieren.

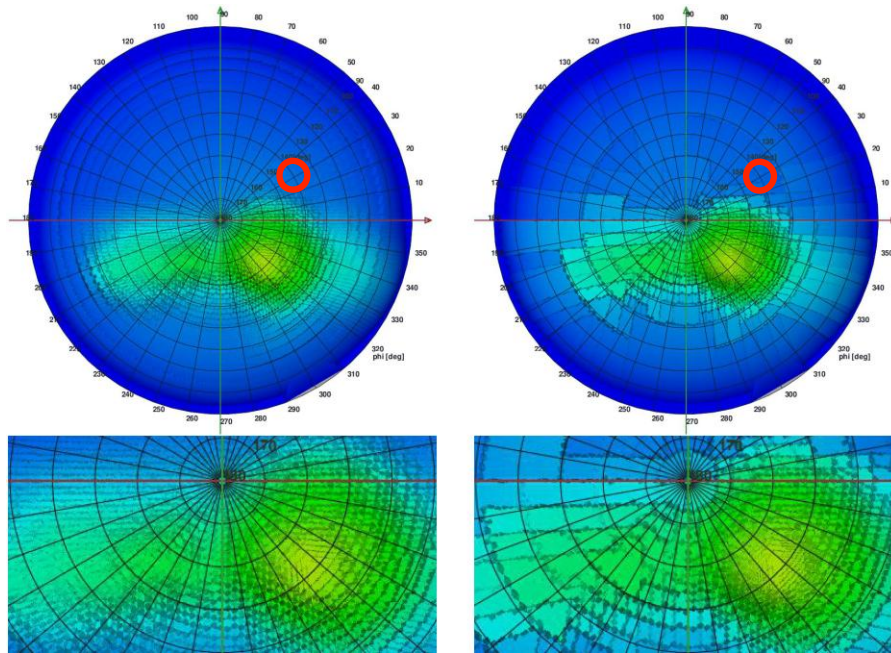


Abb. 27: Einheitliche (links) und adaptive Verringerung der Auflösung (rechts) für DRC1, T1.

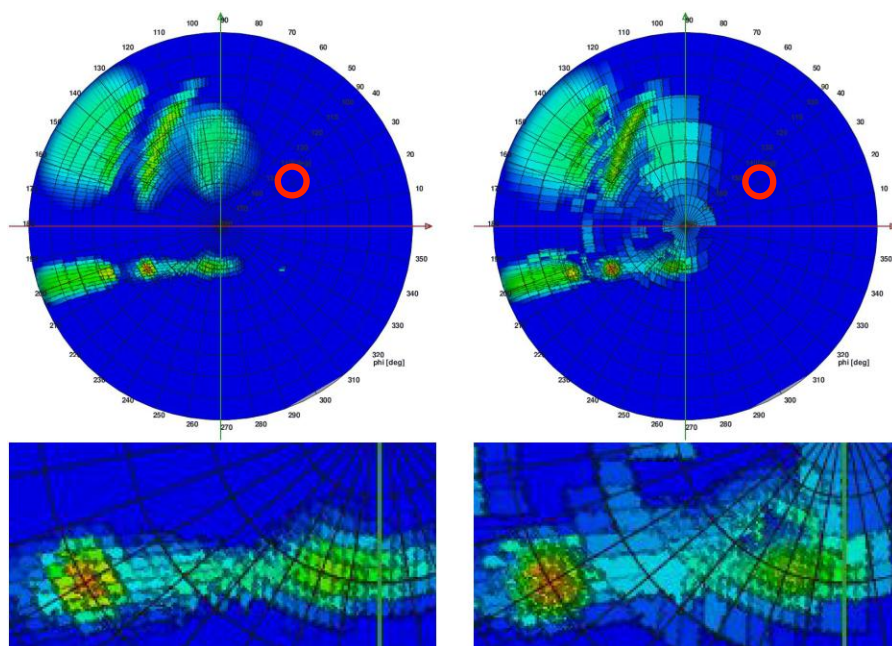


Abb. 28: Einheitliche (links) und adaptive Verringerung der Auflösung (rechts) für DRC2, T1.





## 4. Nationale Zusammenarbeit

Die Auftragnehmerin arbeitet im Rahmen der SWISS COMPETENCE CENTERS FOR ENERGY RESEARCH (SCCER) „Future Energy Efficient Buildings & Districts“, Task „Efficient integrated day- and electric lighting modeling, dessen zweite Phase am 1. Januar 2017 begonnen hat, mit dem SOLAR ENERGY AND BUILDINGS PHYSICS LABORATORY der ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL LESO-PB) im Bereich der optischen Vermessung von Fassadenkomponenten zusammen.

Für die Firma Schenker Storen AG wurden zwei neue Lamellenprofile lichttechnisch auf Grundlage von Messungen und Simulationen untersucht.

Für die systematische Charakterisierung von Prototypen eines neuartigen Lichtlenkungssystems in Zusammenarbeit mit BASF, Basel und EPFL LESO-PB, Lausanne, wurden die Vorarbeiten abgeschlossen. Die ersten Messungen an derzeit in der Fertigung befindlichen Prototypen sind noch für das laufende Jahr geplant.

## 5. Internationale Zusammenarbeit

Die Modellierung von Oberflächenbeschichtungen erfolgte mit den internationalen Partnern PELLINI und EURAC (beide Italien). Die Arbeit wurde bereits 2016 aufgenommen und konnte mit dem neu entwickelten Versuchsaufbau zur Messung der Retroreflexion erfolgreich abgeschlossen werden.

Mit der TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK GMBH wurde im Februar 2017 ein Workshop zur Lichtsimulation von SBS mit strukturierten Gläsern durchgeführt, die mit der an der HOCHSCHULE LUZERN entwickelten erweiterten RADIANCE PHOTON MAP modelliert und goniophotometrisch vermessen wurden.

Im Mai 2017 wurde die datenbasierte Modellierung zweier SBS auf der Konferenz *ICBEST Istanbul: Interdisciplinary Perspectives for future building envelopes* an der Technischen Universität Istanbul einem internationalen Publikum aus Forschung und Industrie vorgestellt werden.

Ergebnisse aus dem Projekt sollen in der Dissertation von Herrn Lars O. Grobe am IZMIR INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Türkei) veröffentlicht werden.

## 6. Bewertung 2017 und Ausblick 2018

Mit der Verfügbarkeit der automatisierten Probenhalterung konnte die Vermessung von SBS unter den von der CGDB vorgegebenen Einfallrichtungen, und darauf aufbauend die Entwicklung von datenbasierten Modellen, begonnen werden. Sowohl Hersteller als auch der Fachplaner fragen neben den direkt aus Messdaten erzeugten Modellen auch die rechnerische Erzeugung von BSDF aus gemessenen Reflexionseigenschaften mit CAD-Modellen nach.

Der Kreis der beteiligten Hersteller ist seit Projektstart durch die Erweiterung des technischen Ansatzes gewachsen, es ist absehbar, dass mehr als die geplanten 15 SBS in der Modellbibliothek erfasst werden.

Im kommenden Jahr werden die Messungen fortgesetzt. Im Vordergrund wird die Verarbeitung der Messdaten und die Aufbereitung und Verfügbarmachung der Projektergebnisse inkl. Aufnahme ausgewählter SBS in RELUX stehen.

Der Abschluss der Dissertation von Herrn Lars O. Grobe als wissenschaftliche Veröffentlichung der Projektergebnisse ist in der zweiten Jahreshälfte geplant.

Für April 2018 ist ein Vortrag zum Projekt auf der *Fachtagung Fassadenbau* im Suhr geplant.