

Abteilung „Energieeffizienz und Raumklima“ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

## **Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung für die Beratungspraxis**

Abschlussbericht gefördert unter dem Az. 30734-25 von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Jan de Boer, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dipl.-Inf. Eike Budde, Dipl.-Ing. Simon Wössner, Fraunhofer Institut für Bauphysik

Dipl.-Ing. Dieter Polle, Dipl.-Ing. Daniel Witzel, Dipl.-Inf. Marco Seegers, DIAL GmbH

Dipl.-Ing. Mathias Schmidt, Prof. Mathias Wambsganß, FH-Rosenheim

Dipl.-Ing. Hans Christian Winter, Ratec erneuerbare Energien GmbH

Stuttgart, Lüdenscheid 29. Juni 2015

Dieser Bericht kann online bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter <https://www.dbu.de/> bezogen werden.

Abteilung „Energieeffizienz und Raumklima“ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

## **Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung für die Beratungspraxis**

Abschlussbericht gefördert unter dem Az. 30734-25 von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Jan de Boer, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dipl.-Inf. Eike Budde, Dipl.-Ing. Simon Wössner, Fraunhofer Institut für Bauphysik

Dipl.-Ing. Dieter Polle, Dipl.-Ing. Daniel Witzel, Dipl.-Inf. Marco Seegers, DIAL GmbH

Dipl.-Ing. Mathias Schmidt, Prof. Mathias Wambsganß, FH-Rosenheim

Dipl.-Ing. Hans Christian Winter, Ratec erneuerbare Energien GmbH

Stuttgart, Lüdenscheid 29. Juni 2015

06/02

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	30734-25	Referat	Fördersumme	257117,-€
<b>Antragstitel</b>	<b>Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung für die Beratungspraxis</b>			
<b>Stichworte</b>	Photometrie von Fassaden, Tageslichtplanung, Goniophotometer für Fassadenkomponenten, BTDF, Complex Fenestration Systems.			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>2 1/3 Jahre</b>	<b>28. November 2013</b>	<b>31. März 2015</b>	<b>eine</b>	
Zwischenberichte	Für den Berichtszeitraum: 28.11.2012 - 27.11.2013			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Nobelstraße 12 70569 Stuttgart		Tel	0711 / 970-3401
			Fax	0711 / 970-3399
			Projektleitung	Dr.-Ing. Jan de Boer
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dipl.-Inf. Eike Budde, Dipl.-Ing. Simon Wössner, Dr.-Ing. Jan de Boer, Fraunhofer Institut für Bauphysik. Dipl.-Ing. Dieter Polle, Dipl.-Ing. Daniel Witzel, Dipl.-Inf. Marco Seegers, DIAL GmbH. Dipl.-Ing. Mathias Schmidt, Prof. Mathias Wambsganß, FH-Rosenheim. Dipl.-Ing. Hans Christian Winter, Ratec erneuerbare Energien GmbH.		
<b>Kooperationspartner</b>	DIAL GmbH Fachhochschule Rosenheim Ratec GmbH			
<p><b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b></p> <p>Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Verbesserung der qualitativen und quantitativen lichttechnischen und energetischen Fassadenplanung in der breiten Beratungspraxis durch Bereitstellung geeigneter Planungswerkzeuge. Konkret werden hierfür verschiedenartige lichtdurchlässige Fassadenkomponenten und -systeme mittels (weiter) zu entwickelnder Messtechnik, Datenbanken und Lichtberechnungssoftware bewertbar gemacht. Durch das Projekt soll es konkret zu folgenden Verbesserungen des Status quo kommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verminderung von Fehlplanungen im Bereich der Lichttechnik von Fassaden.</li> <li>- Verbesserte Integration der Tages- und Kunstlichtplanung zur gesamtheitlichen (energetisch und visuell) Optimierung von Beleuchtungsanlagen.</li> <li>- Erhöhung der Planungsqualität, Komplexitätsreduktion des Bearbeitungsprozesses für Planer (vergleichbar mit heutiger Kunstlichtplanung) und damit erhebliche Verbilligung von Planungsleistungen.</li> </ul>				

- Schaffung von Transparenz und Vergleichbarkeit technischer Lösungsalternativen im Fassadenplanungsprozess durch einheitliche Systemkennzahlen und Bewertungsverfahren, offene Datenformate und Schnittstellen.
- Ermöglichung herstellerseitiger Optimierung von Produktportfolios durch verbesserte Analysemöglichkeiten.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Die Ziele des Projektes wurden durch messtechnische und softwaretechnische Arbeitsschritte erreicht:

- Zunächst wurde eine bereits existierende Messeinrichtung erweitert. Mit dieser wurden Messungen an Fassadenkomponenten durchgeführt. Hierdurch wurde eine repräsentative Auswahl von System- und Planungsdaten in Abstimmung mit Fassaden-, Dachoberlicht- und Sonnenschutzherstellern bereitgestellt.
- Diese Messdaten wurden in weiterentwickelten photometrischen Algorithmen genutzt. Hierbei kamen neben Standardmodellen für Verglasungssysteme Modelle zum Einsatz, mit denen Lichtstärkeverteilungskurven (LVKs) der relevanten Fassadensysteme (Sonnenschutz, Blendschutz-, Tageslichtsysteme, Dachoberlichter) unter den jeweiligen objektspezifischen äußeren Einstrahlbedingungen errechnet werden.
- Es wurden zwecks umfassender und einheitlicher Systembeschreibung (Messdaten und sonstige Fassadendaten) Datenformate und Schnittstellen entwickelt und dokumentiert.
- Die photometrischen Algorithmen zur Fassadenmodellierung wurden in das frei verfügbare Softwaresystem DIALux evo zur Berechnung der Lichtausbreitung in Innenräumen auf Grundlage der definierten Datenformate und Schnittstellen eingebunden. Dies ermöglicht die Berechnung der lichttechnischen Wirkung der im Vorhaben und auch zukünftig gemessenen Fassadenelemente unter Nutzung aller Leistungsmerkmale der Lichtplanungsprogramme wie grafische und numerische Ausgabefunktion und Visualisierungen.
- Auf die Planungsbedürfnisse zugeschnittene Workflows und Bedienkonzepte wurden entwickelt, dokumentiert und in die Software DIALux evo implementiert.
- Die entwickelten Messverfahren und Softwarelösungen wurden umfassend validiert.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Erweiterung Messmöglichkeiten durch Umbau Goniophotometer: Die Messanlage wurde funktional wie geplant erweitert. Eine automatisierte Positioniereinrichtung für Lamellendrehwinkel und eine Einrichtung für die Positionierung der Lamellen über der Blende wurden umgesetzt. Eine neue Baugruppe für BRDF-Messungen wurde ergänzt. Für Transmissionsmessungen wurde eine Farbleuchtdichtemesskamera integriert. Während der Umsetzung musste die Kippvorrichtung der schwerer gewordenen Messplattform konstruktiv stabiler ausgelegt werden.

Umfangreiche Sammlung lichttechnischer Kennwerte von Fassadenkomponenten: Mit der Messeinrichtung wurden mit 51 mehr als die ursprünglich geplanten 30 - 40 Systeme vermessen. Somit steht der Planerschaft eine große Auswahl an Fassadenkomponenten zur Verfügung.

Erweiterung und Verbesserung „Fassadentechnischer Algorithmus“: Die Genauigkeit und die Berechnungsgeschwindigkeit des fassadentechnischen Algorithmus konnte erheblich gesteigert werden. Es können nun farbige Komponenten berücksichtigt werden, Mehrschichtsysteme können berechnet werden. Bei bestimmten Komponenten mussten zusätzlich automatische Positionierfunktionen implementiert werden, um den richtigen Einbau der Systeme in den Rechenmodellen zu garantieren.

Berechnung der Lichtausbreitung durch komplexe Fassadenkomponenten in Gebäudestrukturen: Die Softwarekomponenten wurden wie geplant umgesetzt und in die Software integriert. Die Berechnungszeiten liegen deutlich unter denen bisher verfügbarer Programme. Die Simulation von Tageslichtlenkssystemen steht damit der Planerschaft für die tägliche Arbeit zur Verfügung. Die Darstellung von 3D-Modellen verstärkt den realistischen Eindruck der Simulation und erhöht den Wiedererkennungswert der eingesetzten Produkte.

Validierung und Plausibilisierung bestätigen erwartete Genauigkeit: Die Berechnungsfunktionalität wurde

numerisch gegen vorliegende Referenzdatensätze validiert und funktional zahlreichen Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Die Grenzen der Genauigkeit konnten den generellen messtechnischen und algorithmischen Ansätzen zugeordnet werden.

Umfassende Systembeschreibung durch neue Datenformate: Basierend auf Rohdatenformaten aus der Messanlage wurde ein neues offenes XML-basiertes Systembeschreibungsformat für Fassadenkomponenten entwickelt. XML-Dateien können einfach gelesen und geschrieben werden, so dass eine weitere Verwendung durch Dritte im Anschluss an das Projekt möglich ist. Das Format ist vom Konzept her vergleichbar mit der standardisierten Darstellung von Leuchtendaten (im sog. Eulumdat-Format). Das Format ist allerdings aufgrund der erheblich höheren Komplexität von Fassadensystemen deutlich umfangreicher.

Praxisorientierte Workflows und Bedienkonzepte: Die Anwendung und Parametrierung der neuen Berechnungsfunktionalität wurde in die Benutzerführung des Programms DIALux evo eingebunden. Ein- und Ausgaben wurden mit der Sicht von Planern abgestimmt und optimiert.

Kostenlose Bereitstellung der Funktionalität für die Planungspraxis: Die Projektergebnisse werden der Planerschaft kostenlos über das frei herunterladbare Programm DIALux evo zur Verfügung gestellt.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Projekt wurde bisher auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- de Boer, J.; Polle, D.; Schmidt, M.; Winter, H-C.: qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung für die Beratungspraxis; Tagungsband, Licht 2014, Den Haag, Niederlande (2014).
  - Bremecker, F. W.: Lightshow South West; Dallas, USA (2014).
  - Witzel, D.: DIALux Conference 2014, Lüdenscheid, Deutschland (2014).
  - Witzel, D.: DIAL informiert, Planen mit der neuen DIALux evo; Lüdenscheid, Deutschland (2015).
  - Bremecker, F. W.: CIBSE Chartered Institution of Building Services Engineers; London, UK (2015).
- Veröffentlichungen in den Fachzeitschriften „Licht“ und „Bauphysik“ sind in Vorbereitung. Dies wird ergänzt durch Informationsmaßnahmen der Projektpartner selbst (Pressemitteilungen, Newsletter, Mitteilungsblätter).

### **Fazit**

Mit dem Projekt wird die qualitative und quantitative lichttechnische und energetische Fassadenplanung in der breiten Beratungspraxis durch Bereitstellung geeigneter Planungswerkzeuge ermöglicht. Energetische und umweltrelevante Einflüsse unterschiedlicher Systemlösungen können verglichen und optimiert werden (z. B. Einsatz eines Lichtlenkglases gegenüber einer geschlossenen Jalousie). Die Vorhabensziele konnten erreicht werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

# Inhalt

<b>Verzeichnis der Bilder</b>	<b>7</b>
<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>9</b>
<b>Liste der Symbole</b>	<b>10</b>
<b>Liste der Abkürzungen</b>	<b>10</b>
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>11</b>
<b>2 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>12</b>
<b>3 Ausgangssituation, Stand der Technik</b>	<b>13</b>
3.1 Ausgangssituation	13
3.2 Stand der Technik im Bereich Fassadenmodellierung	15
3.3 Stand der Vorarbeiten beim Antragsteller	17
3.4 Zielgruppe	17
3.5 Lösungskonzept und Vernetzung der Maßnahmen	18
<b>4 Lösungsweg</b>	<b>19</b>
<b>5 Messtechnik</b>	<b>19</b>
5.1 Erweiterung Goniophotometer	20
5.1.1 Hardware	20
5.1.2 Software und Inbetriebnahme	22
5.1.3 Vermessung repräsentativer, lichtdurchlässiger Fassadenkomponenten	25
<b>6 Algorithmen</b>	<b>28</b>
6.1 Fassadentechnischer Algorithmus	28
6.2 Berechnung Lichtausbreitung in beliebigen Gebäudestrukturen	31

<b>7</b>	<b>Datenformate und Schnittstellen</b>	<b>40</b>
7.1	Datenformate	40
7.2	Schnittstellen	42
<b>8</b>	<b>Workflows und Bedienoberflächen</b>	<b>43</b>
8.1	Praxisorientierte Workflows (10)	43
8.2	Grafische Bedienoberfläche	45
8.3	Systemauswahl- und Ausgabedialoge	48
<b>9</b>	<b>Validierung, Qualitätssicherung</b>	<b>50</b>
9.1	Numerische (quantitative) Validierung	50
9.1.1	Fassadentechnischer Algorithmus	50
9.1.2	Lichtausbreitung in Gebäudestrukturen (3)	54
9.2	Qualitative (softwareergonomische) Qualitätssicherung	59
<b>10</b>	<b>Verwertungsplan</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>Fazit</b>	<b>62</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>65</b>
	<b>Anhang</b>	<b>66</b>
	A. XML-basiertes Datenformat	66
	B. Dokumentation der API	67

## Verzeichnis der Bilder

Bild 1	Darstellung der Zielsetzung des Vorhabens: Durch entsprechende Messtechnik, Datenbanken und Berechnungssoftware werden verschiedenartige lichtdurchlässige Fassadensysteme bewertbar.	13
Bild 2	Übersicht über Teilprojekte.	19
Bild 3	Prinzipschema des Goniophotometers.	20
Bild 4	Konstruktionszeichnung des erweiterten Goniophotometers.	20
Bild 5	photografische Aufnahme des Goniophotometers vor und nach dem Umbau, der neuen Positioniereinrichtung für drehbare Lamellenraffstore und der Explosionszeichnung der neu eingesetzten Leuchtdichtekamera.	21
Bild 6	Screenshots der Bedienoberfläche des Goniophotometers.	23
Bild 7	gerichtet hemisphärische Transmission für ein ideales Glas (keine Probe in der Apertur) und einen lambertschen Diffusor (Plexiglas 060).	24
Bild 8	prinzipielle Darstellung der Errechnung der Raumbelichtungsverhältnisse mit Hilfe der Modellierung von Leuchten und Fassaden durch Lichtstärkeverteilungen.	28
Bild 9	Darstellung des matrizenbasierten Layermodells (aus [Kle93]).	29
Bild 10	Darstellung der differenzierten Betrachtung der Bestimmung der LVK auf Basis niedrigaufgelöster und hochaufgelöster BTDF-Daten mit der Sonne im Zenit.	30
Bild 11	Bedingung für die Berechenbarkeit eines Systems mit mehr als einem gemessenen Element.	31
Bild 12	Auswahl des Himmelsmodells, Datum und Uhrzeit.	32
Bild 13	einsammeln der Himmelsleuchtdichte und platzieren der Lichtstärkeverteilungskurve.	33
Bild 14	aufteilen der Fensterflächen.	33
Bild 15	konvergieren der Anzahl von Lichtstärkeverteilungskurven für direktes Sonnenlicht.	34
Bild 16	Identifikation der dem Außenbereich zugeordneten Flächen.	34

Bild 17	Berechnung des direkten und indirekten Tageslichts in Kombination mit Kunstlicht.	35
Bild 18	Simulation des Schattenwurfs durch direktes Sonnenlicht.	35
Bild 19	schematischer Prozessablauf.	36
Bild 20	geometrisches Lamellenmodell.	37
Bild 21	3D-Modell eines Lamellenbehangs.	38
Bild 22	Berechnung des Tageslichts mit Lamellenstellung 0°.	38
Bild 23	Berechnung Tageslicht mit Lamellenstellung 30°.	39
Bild 24	Berechnungsparameter und lichttechnische Ergebnisse.	40
Bild 25	Struktur der Datenbeschreibung.	41
Bild 26	Zusammenhang zwischen Datenformaten, Schnittstellen und Lichtplanungsprogrammen.	42
Bild 27	Ort und Ausrichtung eines Gebäudes.	44
Bild 28	Definition und Auswahl der Lichtszenen.	45
Bild 29	Ausgabebaum.	45
Bild 30	grafische Benutzeroberfläche zur Schichtenkonfiguration.	46
Bild 31	Konfiguration der Parameter für einen Lamellenbehang.	46
Bild 32	Ausgabe Tageslichtlenksysteme.	47
Bild 33	Produktdatenblatt.	48
Bild 34	Prototyp eines elektronischen Kataloges.	49
Bild 35	Daten Management Tool für Hersteller von Systemen zur Parametrierung von Pugins.	50
Bild 36	Lochblende und Diffusor: Gegenüberstellung der Modellierung einer Lochblende (gemessen als Lochblende ohne System im Goniophotometer) und einer analytisch erzeugten LVK.	52
Bild 37	Gegenüberstellung der Winkelabweichungen zwischen theoretischen und rea-	53

len Werten bei der Durchstrahlung einer Lochblende.

Bild 38	Vergleich des implementierten Layermodells gegenüber den in [Kle93] angegebenen Referenzwerten.	54
Bild 39	Vergleich des implementierten Layermodells gegenüber den in [Kle93] angegebenen Referenzwerten.	55
Bild 40	Gegenüberstellung der Visualisierungen und Falschfarbendarstellungen der Lichtausbreitung in einem südorientierten Raum am 21. März, 12:00 Uhr in Abhängigkeit des Anstellwinkels einer Jalousie. Die Bilder sind in einer Seitansicht dargestellt.	57
Bild 41	Gegenüberstellung der Lichtausbreitung im Raum am 21. März von 10:00 bis 14:00 Uhr in 2 h Schritten. Die Bilder sind in einer Aufsicht dargestellt.	58
Bild 42	Gegenüberstellung des falsch (linkes Bild) und richtig (rechtes Bild) orientierten Mikrorasters für Dachoberlichter. Die Bilder sind in einer Aufsicht dargestellt.	59
Bild 43	Ausschnitt einer XML-Systembeschreibungdatei.	66
Bild 44	Schnittstelle.	67
Bild 45	<b>Berechnungsparameter.</b>	68
Bild 46	Klassenmodell für das Fassadensystem.	69
Bild 47	Außenleuchtdichtevertelung.	70
Bild 48	Ergebnisse.	71

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	beispielhafte Übersicht der ca.-Messzeiten unterschiedlicher Proben.	24
Tabelle 2	ausgewählte Messergebnisse unterschiedlicher Probentypen.	26
Tabelle 3	aufgezeichnete Farbkanäle eine gefärbten Acrylglases	27
Tabelle 4	mittlere relative Abweichung gegenüber den CIE-Testfällen auf gegebenen Berechnungspunkten. Ergebnisse ohne Fassadensysteme (Klarglas).	55
Tabelle 5	mittlere relative Abweichung gegenüber den CIE-Testfällen auf gegebenen Berechnungspunkten. Ergebnisse mit Fassadensystemen.	56

## Liste der Symbole

c	circadiane Wirkfunktion
d	Abstand
l	Lichtstärkeverteilung
V	Hellempfindlichkeitskurve, menschliches Auges bei Tageslicht
X,Y,Z	CIE-Farb-Normsystem, Tristimuluskoordinaten

### Griechische Symbole

$\gamma$	Höhenwinkel
$\lambda$	Wellenlänge
$\tau$	Transmissionsgrad

### Indices

a	Aussen
diff	diffus
dir	direkt
ger_hem	gerichtet, hemisphärisch
i	Innen

## Liste der Abkürzungen

API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Model
BRDF	Bidirectional Reflection Distribution Function
BRTDF	Bidirectional Transmission and Reflection Distr. Function
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
DDLS	DIALux-Daylight-System
EnEV	Energieeinsparverordnung
IEA	International Energy Agency
IFC	Industry Foundation Class
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
ODLS	Open DayLight System
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
XML	Extensible Markup Language

# 1 Zusammenfassung

Die wesentliche regenerative Energiequelle zur Senkung der Energieverbräuche für Beleuchtung stellt das Tageslicht dar. Im Gebäudebereich, der in Deutschland für ca. 40 % des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich zeichnet, kann die Beleuchtung bei Nichtwohnbauten ohne Weiteres 30 % des Primärenergiebedarfs von Gebäuden ausmachen. Der Fassadentechnik kommt hierbei hinsichtlich einer gesamtenergetisch effizienten und biologisch wirksamen Lichtversorgung von Innenräumen eine maßgebliche Bedeutung zu. Gut geplante Fassaden ermöglichen es, in dahinter liegenden Raumbereichen wie Büros zu etwa 80 % der Zeit ohne Kunstlicht auszukommen und damit den Beleuchtungsenergiebedarf und auch den Leuchtmiteleinsatz signifikant zu senken. Darüber hinaus wirkt das Tageslicht unmittelbar biologisch auf den Menschen, z. B. bei der Steuerung des circadianen Rhythmus über Melatoninsuppression.

Im Bereich der Lichttechnik von Fassaden herrschte allerdings bis dato Planungsunsicherheit. Es fehlten Fassadensystemdaten und geeignete Beratungssoftware. Dies führte zu planerischen Fehlentscheidungen. Potentiale der Fassadentechnik wurden nicht genutzt.

Das Projekt setzte hier an. Für die Planerschaft wurden kostenfreie, einfache - aber umfassende - Berechnungs- und damit Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten für die objektbezogene Fassadenplanung entwickelt. Die drei unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte Messtechnik, Numerik und bedienungsfreundliche Software wurden hierzu in einem neuartigen Planungsprozess für Fassaden integriert.

Konkret lagen die Projektschwerpunkte in der Erhebung von Systemdaten, der Entwicklung von Berechnungsalgorithmen inklusive offener Datenstrukturen und Integration derselben in die frei verfügbare Lichtplanungssoftware DIALux evo mit einer sehr großen weltweiten Verbreitung, der Modellierung und Implementation planungspraktischer Workflows, der Entwicklung von Datenbankkomponenten und Datenmanagementtools sowie der Validierung und Qualitätssicherung.

Im Markt wird durch das Projekt Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fassadenlösungen geschaffen. Dadurch, dass Hersteller Ihre Produkte besser verstehen lernen, ist zu erwarten, dass weitere Innovationen in der Fassadentechnik durch das Projekt angestoßen werden. Im Planungsmarkt kann es somit zu einer wahrnehmbaren Differenzierung unterschiedlicher planerischer Lösungen und Qualitäten kommen. Besonders im Lichte der Energiewende kann das mittels einer innovativen tageslichttechnischen Fassadenplanung erschließbare Effi-

zientzpotential als ein signifikanter Baustein für ein nachhaltiges Energiekonzept und eine signifikante Entlastung der Umwelt genutzt werden.

## 2 Einleitung und Zielsetzung

Die wesentliche regenerative Energiequelle zur Senkung der Energieverbräuche für Beleuchtung stellt das Tageslicht dar. In Europa entfallen circa 10 % des gesamten Stromverbrauchs auf den Betrieb von Beleuchtungsanlagen, weltweit etwa 19 %. Im Gebäudebereich, der in Deutschland für ca. 40 % des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich zeichnet, kann die Beleuchtung bei Nichtwohnbauten ohne Weiteres 30 % des Primärenergiebedarfs von Gebäuden ausmachen. Der Fassadentechnik kommt hierbei hinsichtlich einer gesamtenergetisch effizienten und biologisch wirksamen Lichtversorgung von Innenräumen eine maßgebliche Bedeutung zu. Gut geplante Fassaden ermöglichen es, in dahinter liegenden Raumbereichen wie Büros zu etwa 80 % der Zeit ohne Kunstlicht auszukommen und damit den Beleuchtungsenergiebedarf und auch den Leuchtmitelesatz signifikant zu senken. Darüber hinaus wirkt das Tageslicht unmittelbar biologisch auf den Menschen, z. B. bei der Steuerung des circadianen Rhythmus über Melatoninsuppression. Gerade in den Wintermonaten ist eine effektive blendfreie Dosis Tageslicht in Innenräumen von besonderer Relevanz. Übliche Kunstlichtsysteme alleine können diese Dosis nicht oder nur unter sehr hohen energetischen, umweltbelastenden und monetären Aufwendungen beisteuern und stellen keine Alternative zu dem über die Fassaden eindringenden Tageslicht dar.

Im Bereich der Lichttechnik von Fassaden herrschte allerdings bis dato Planungsunsicherheit. Es fehlten Fassadensystemdaten und geeignete Beratungssoftware. Dies führte zu planerischen Fehlentscheidungen. Potentiale der Fassadentechnik wurden nicht genutzt.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Verbesserung der qualitativen und quantitativen lichttechnischen und energetischen Fassadenplanung in der breiten Beratungspraxis durch Bereitstellung geeigneter Planungswerkzeuge. Konkret sollen, wie in Bild 1 dargestellt, hierfür verschiedenartige lichtdurchlässige Fassadenkomponenten und -systeme mittels (weiter) zu entwickelnder Messtechnik, Datenbanken und Lichtberechnungssoftware bewertbar gemacht werden. Durch das Projekt soll es konkret zu folgenden Verbesserungen des Status quo kommen:

- Verminderung von Fehlplanungen im Bereich der Lichttechnik von Fassaden.

- Verbesserte Integration der Tages- und Kunstlichtplanung zur gesamtheitlichen (energetisch und visuell) Optimierung von Beleuchtungsanlagen.
- Erhöhung der Planungsqualität, Komplexitätsreduktion des Bearbeitungsprozesses für Planer (vergleichbar mit heutiger Kunstlichtplanung) und damit erheblicher Verbilligung von Planungsleistungen.
- Schaffung von Transparenz und Vergleichbarkeit technischer Lösungsalternativen im Fassadenplanungsprozess durch einheitliche Systemkennzahlen und Bewertungsverfahren, offener Datenformate und Schnittstellen.
- Ermöglichung herstellerseitiger Optimierung von Produktportfolios durch verbesserte Analysemöglichkeiten.

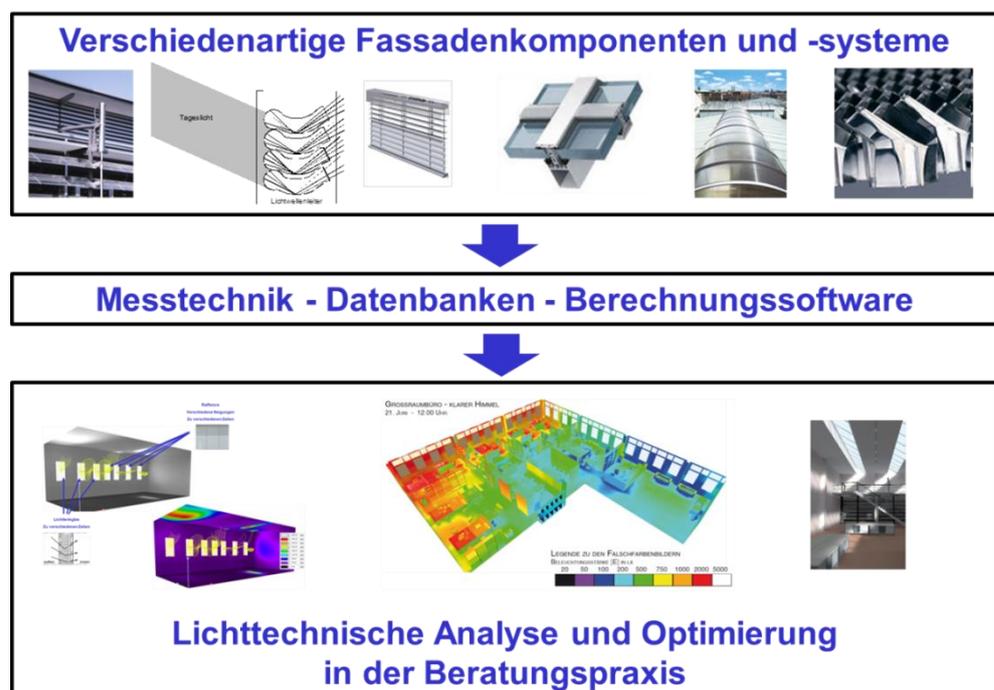


Bild 1:  
Darstellung der Zielsetzung des Vorhabens: Durch entsprechende Messtechnik, Datenbanken und Berechnungssoftware werden verschiedenartige lichtdurchlässige Fassadensysteme bewertbar.

### 3 Ausgangssituation, Stand der Technik

#### 3.1 Ausgangssituation

##### Fasadentechnik

Von Loch- bis Ganzglasfassaden in jeweils ein- oder zweischaliger Ausführung, von Lösungen für vertikale Fassaden bis zu speziellen Dachoberlichtern ist eine

große Vielfalt von Fassadenstrukturen am Markt vorzufinden. Diese werden mit unterschiedlichen Verglasungssystemen und temporären aber auch permanenten Sonnen- und Blendschutzsystemen realisiert.

Hierbei steht Planern ein großes Portfolio von Verglasungen für unterschiedliche Anforderungen bzgl. Wärme- und Sonnenschutz zur Verfügung. Der Trend geht aus Gründen des Wärmeschutzes in Richtung 3-Scheibenverglasung. Sonnenschutzgläser zeichnen sich des Weiteren heute durch eine hohe Selektivität (Verhältnis Lichttransmissionsgrad zu Gesamtenergiedurchlassgrad) aus. Im Bereich funktionaler Gläser stehen electrochrome Gläser nun vor einem breiteren Markteintritt.

Eine große Produktvielfalt ist ebenfalls im Bereich des Sonnen- und / oder Blendschutzes bei vertikalen Fassaden anzutreffen. An Bildschirmarbeitsplätzen dominieren mit ca. 2/3 Marktanteil Jalousiesysteme, die sich in Material, Geometrie, Einbauart und Betriebsart (z. B. Cut-off, spezielle Lichtlenkfunktion) allerdings erheblich unterscheiden. Daneben kommen diverse textile und folienbasierte Systeme zum Einsatz. Spezielle Funktionsgläser, z. B. zur gezielten Lichtlenkung über die Decke in tiefe Raumbereiche, ergänzen das Portfolio.

Im Marktsegment von Dachoberlichtern werden konventionelle Lösungen wie Lichtkuppeln und Lichtbänder heute ergänzt durch innovative Lösungen, die auch eine temporäre Verschattung (und damit bessere Beherrschbarkeit passiver Solareinträge im Sommer) ermöglichen. Auch hier finden spezielle Lichtlenkgläser, wie miniaturisierte Sheds, Eingang in Bauvorhaben.

In Summe werden jährlich in Deutschland 21,8 km<sup>2</sup> Verglasung in 13 Mio. Fenstereinheiten und mehr als 1 Mio. m<sup>2</sup> Dachoberlichter zur Belichtung von Gebäuden projektiert. Ein Großteil dieser Fläche wird mit Sonnen- und Blendschutzsystemen ausgestattet.

Zukünftig ist technologisch im Bereich des Sonnenschutzes eine Funktionsintegration mit Gläsern zu erwarten. Lösungen wie nanostrukturierte Spiegelelemente zur Lichtlenkung auf Scheiben versprechen deutlich geringere Störanfälligkeit gegenüber den heute üblichen Mechaniken in der Fassade. Sie bieten vor allem eine Lösung für das Problem eines effektiven Sonnenschutzes bei windlastanfälligen Hochhausbauten.

#### Planungspraxis

Mit neuen Nachweisverfahren und Regularien wie der DIN V 18599 und der EnEV wurde Tageslicht mittlerweile zu einer genähert bezifferbaren und planbaren Substitutionsquelle für Kunstlicht. Im Rahmen der Vorbereitung der EnEV 2012/2013 wird eine verschärfte Tageslichtnutzung bei gleichzeitig hohen An-

forderungen an den Sonnenschutz diskutiert (lichtlenkende Sonnenschutzsysteme). EnEV und DIN V 18599 fordern und fördern generell die Integration von Tageslicht und Kunstlicht über das Lichtmanagement. Diese Vorgehensweise kommt in der frühen Planungsphase zur Erstellung von Energienachweisen nach EnEV zur Anwendung. Detaillierte Fachplanungen – bei der es z. B. um die Auswahl konkreter Sonnenschutzsysteme inkl. gesamtheitlicher Optimierung geht - können sie jedoch nicht ersetzen.

In diesem Bereich herrscht in der Planungspraxis großer Nachholbedarf. So werden etwa 80 % der Beleuchtungsanlagen nach ZVEI-Angaben nicht gemäß dem Stand der Technik geplant. Sowohl in der Kunstlicht- als auch in der Tageslichttechnik kommt es zu erheblichen Fehlplanungen. Vorhandene Effizienzpotentiale bleiben ungenutzt. Gründe im Fassadenbereich sind u. a. nicht vorhandene oder ungeeignete Planungswerkzeuge (Software) und fehlende System- und Komponentenkenneiwerte.

### 3.2 Stand der Technik im Bereich Fassadenmodellierung

Der Stand der Technik wird im Folgenden für die projektrelevanten Bereiche Messtechnik, Datenbanken und -formate und Lichtberechnungssoftware dargestellt.

- Messtechnik: Photometrisch komplexe Fassadenkomponenten wie Funktionsgläser z. B. zur Lichtlenkung, Sonnen- und Blendschutzsysteme können nicht wie normale Verglasungen über einfache funktionale Zusammenhänge (z. B. Fresnelgleichungen) beschrieben werden. Sie sind statt dessen messdatenbasiert zu modellieren. Hierbei wird auf die räumliche Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten, sogenannte Bidirectional Transmission and Reflection Distribution Functions (BRTDF) – 4 dimensionale Datenfelder – zurückgegriffen. Da zahlreiche Fassadenkomponenten nicht farbneutral sind, ist der Leuchtdichtekoeffizient des Weiteren abhängig von der Wellenlänge aufzuzeichnen. Zur Erfassung der Datensätze sind sogenannte Goniophotometer entwickelt worden. Keine der bekannten Anlagen ist jedoch heute in der Lage, die vollständigen für die Simulationsverfahren erforderlichen Datenmengen aufzuzeichnen. Somit besteht ein Bedarf, neue Messeinrichtungen zu entwickeln bzw. bestehende Anlagen zu erweitern und Datensätze (Photometrie aber auch relevante konstruktive Daten) marktrelevanter Fassadenkomponenten systematisch zu erfassen.
- Datenbanken und -formate: Im Gegensatz zu zahlreichen Verglasungsdatenbanken existiert zur Beschreibung der Photometrie komplexer Fassadenkomponenten wie Sonnenschutzsysteme lediglich ein Rohdatenformat, das auch nur in Teilen genutzt wird. Die Entwicklung eines

übergeordneten umfassenden Datenformates, das Messdaten, geometrische Informationen, Informationen zur Fassadensteuerung und allgemeine Produktinformationen enthält, steht aus. Ansätze wie bei Leuchten (*eulumat*-Format) fehlen. Detaillierte lichttechnische Fassadenmodelle sind in allgemeinen Gebäudemodellen wie den Industry Foundation Classes (IFC) und den Ansätzen im Bereich von Building Information Models (BIM) nicht berücksichtigt. Durch den Mangel an einheitlichen zwischen Messlaboratorien abgestimmten Datenformaten wird die systematische Erfassung und der Austausch lichttechnischer Fassadendaten stark erschwert. Dies wirkt sich innovationshemmend aus.

- Lichtberechnungssoftware: Im Bereich der Algorithmen für die Lichttechnik von Fassaden sind für Forschungs- und Entwicklungszwecke u. a. vom Antragsteller auf Basis des Radiance-Programmsystems (siehe Kapitel 3.3 und Kapitel 4) Algorithmen zur Berechnung des Lichtdurchganges durch komplexe Fassadensysteme entwickelt worden. Diese werden allerdings technisch erst in Teilen der Vielzahl verfügbarer Fassadenkomponenten und vor allem Fassadenkomponentenkombinationen gerecht und erfüllen nur in Teilen die Anforderungen, die an eine breite Nutzung in der Praxis gestellt werden. Sie sind des Weiteren aufwendig zu parametrieren und rechenzeitintensiv.

Lichtberechnungsprogrammsysteme für den Haupteinsatzzweck der Tageslichtberechnung wie Radiance, in welche die o. g. verfügbaren Fassadenalgorithmen bisher eingebunden wurden, sind aufgrund Ihrer hohen Bedienkomplexität für die Planungspraxis ungeeignet. Generell bedienungsfreundliche, auf die Workflows der Planerschaft abgestimmte, etablierte Planungswerkzeuge sind dagegen im Bereich der Kunstlichttechnik zu finden. Diese sind für die Endkunden frei verfügbar und einfach anwendbar. In Teilen weisen sie bereits heute einfache Tageslichtberechnungsfunktionalität, wie Bestimmung des Tageslichtquotienten in Raumsituationen mit konventionellen Verglasungssystemen, auf.

Zusammenfassend gibt es für die breite Planungspraxis bisher keinen einfachen, softwareunterstützten Workflow, um Fassaden objektbezogen zu planen. Aus der Analyse des Standes der Technik erscheint es zielführend, Kunstlichtplanungsprogramme um umfassende tageslichttechnische Modellierungs- und Bewertungstechnik zu erweitern. Derart ließen sich im Sinne einer integralen lichttechnischen Herangehensweise kunstlichttechnische und tageslichttechnische Fragestellungen zugleich optimieren. Des Weiteren stünde unmittelbar ein sehr guter Marktzugang für die neuartigen fassadentechnischen Planungsleistungen zur Verfügung.

### 3.3 Stand der Vorarbeiten beim Antragsteller

Die Antragsteller waren maßgeblich an bereits erfolgten Arbeiten in diesem Themenfeld beteiligt. Sowohl grundlegende Mess- als auch Berechnungsverfahren sind in mehreren Vorlaufprojekten der Antragsteller entwickelt und validiert worden. Diese stehen bei Projektstart somit zur Verfügung. Im Einzelnen sind dies:

- Messtechnik: Entwicklung und Betrieb eines Goniophotometers für Fassadenkomponenten [Boe10]. Hierbei Nutzung des IEA-Rohdatenformats [Ayd99] zur Aufzeichnung und Darstellung der photometrischen Daten (BTDF: Streuindikatrix des Leuchtdichtekoeffizienten) [And06].
- Berechnungssoftware: prototypischer Algorithmus [Boe06] zur Verrechnung von gemessenen BTDF-Daten zu LVKs zur Nutzung in dem F&E-Programmsystem Radiance. Langjährig entwickeltes und gepflegtes Lichtplanungsprogramm DIALux evo mit momentaner Schwerpunktsetzung im Bereich der künstlichen Beleuchtung [DIAL].

Darüber hinaus haben die Projektpartner FhG-IBP, FH-Rosenheim und Ratec GmbH umfassende Produkt- und Projekterfahrung im lichttechnischen Bereich der Fassadentechnik und Fassadenplanung in zahlreichen Forschungs- und Bauprojekten sammeln können.

### 3.4 Zielgruppe

Die Ergebnisse des Projektes sind im Wesentlichen für drei Zielgruppen relevant. Die Hauptzielgruppe stellen Gebäudeplaner dar. Darüber hinaus kommen die Projektergebnisse (und bereits die Projektbegleitung) sowohl der Fassadenindustrie als auch Herstellern lichttechnischer Software zu Gute. Die zu berücksichtigenden Anforderungen und Bedarfe stellen sich wie folgt dar.

Gebäudeplaner (Lichtplanung, Klimaengineering, TGA-Planung, Architektur, Energieberatung)

- Verlässliche, zeitlich und wirtschaftlich effiziente Licht- und Fassadenplanung mittels marktgängiger und auch innovativer Fassadenkomponenten.
- Integration der Planung von Fassaden in den bestehenden Planungsprozess.
- Einfache Gewährleistung der Aktualität der System- und Planungsdaten mittels z. B. Web-Update Funktionen.

### Fassadenindustrie

- Bereitstellung hochwertiger Planungsdaten.
- Forcierung eigener Produktoptimierungen auf Grundlage der zukünftig möglichen Systembewertung.

### Softwarehersteller

- Erweiterung der Funktionsumfänge der Programme: a) „Integrale Lichtplanung: Tageslicht, Kunstlicht, Lichtmanagement“; b) „Licht und Energie“.

## **3.5 Lösungskonzept und Vernetzung der Maßnahmen**

Die Ziele des Projektes sollen durch messtechnische und softwaretechnische Arbeiten erreicht werden. Eine Ausdetaillierung des Lösungsweges in einzelne Arbeitspakete ist Kapitel 4 „Lösungsweg“ zu entnehmen. Das generelle Lösungskonzept ist folgendes:

- Zunächst werden Messungen an Fassadenkomponenten an einer existierenden, in Teilen zu erweiternden Messeinrichtung durchgeführt. Hierdurch Bereitstellung einer repräsentativen Auswahl von System- und Planungsdaten in Abstimmung mit Fassaden-, Dachoberlicht- und Sonnenschutzherstellern.
- Diese Messdaten werden in (weiter) zu entwickelnden photometrischen Algorithmen genutzt. Hierbei werden neben Standardmodellen für Verglasungssysteme Modelle zum Einsatz kommen, mit denen Lichtstärkeverteilungskurven (LVKs) der relevanten Fassadensysteme (Sonnenschutz, Blendschutz-, Tageslichtsysteme, Dachoberlichter) unter den jeweiligen objektspezifischen äußeren Einstrahlbedingungen errechnet werden.
- Es werden zwecks umfassender und einheitlicher Systembeschreibung (Messdaten und sonstige Fassadendaten) Datenformate und Schnittstellen entwickelt und dokumentiert.
- Die photometrischen Algorithmen zur Fassadenmodellierung werden in das frei verfügbare Softwaresystem DIALux evo zur Berechnung der Lichtausbreitung in Innenräumen auf Grundlage der definierten Datenformate und Schnittstellen eingebunden. Dies ermöglicht die Berechnung der lichttechnischen Wirkung der im Vorhaben und auch zukünftig gemessenen Fassadenelemente unter Nutzung aller Leistungsmerkmale der Lichtplanungsprogramme wie grafische und numerische Ausgabefunktion und Visualisierungen.

- Auf die Planungsbedürfnisse zugeschnittene Workflows und Bedienkonzepte werden entwickelt, dokumentiert und in die Software DIALux evo implementiert.
- Die entwickelten Messverfahren und Softwarelösungen werden umfassend validiert.

## 4 Lösungsweg

Das beantragte Projekt wurde in der in Bild 2 dargestellten Teilprojektstruktur bearbeitet. Die Ergebnisse der jeweiligen Teilprojekte werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

5. Messtechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erweiterung Goniophotometer</li> <li>• Vermessung repräsentativer, lichtdurchlässiger Fassadenkomponenten</li> </ul>
6. Algorithmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fassadentechnischer Algorithmus</li> <li>• Lichtausbreitung in Gebäudestrukturen</li> </ul>
7. Datenformate und Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formate</li> <li>• Schnittstellen</li> </ul>
8. Workflows und Bedienoberflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praxisorientierte Workflows</li> <li>• Grafische Bedienoberfläche</li> <li>• Systemauswahl - und Ausgabedialoge</li> </ul>
9. Validierung, Qualitätssicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Intermodell Comparison"</li> <li>• Vergleich mit Referenzdatensätzen</li> <li>• Plausibilisierungen</li> </ul>

Bild 2:  
Übersicht über Teilprojekte.

## 5 Messtechnik

In diesem Arbeitspaket wurde eine umfangreiche, planungspraktisch relevante Sammlung an Systemdatensätzen erstellt. Um vollständig, effizient und kostengünstig messen zu können, war zunächst die Erweiterung eines am Fraunhofer IBP bestehenden Messverfahrens inklusive bestehender Messeinrichtung erforderlich. Danach wurden 51 Proben marktrepräsentativer Systeme vermessen.

## 5.1 Erweiterung Goniophotometer

### 5.1.1 Hardware

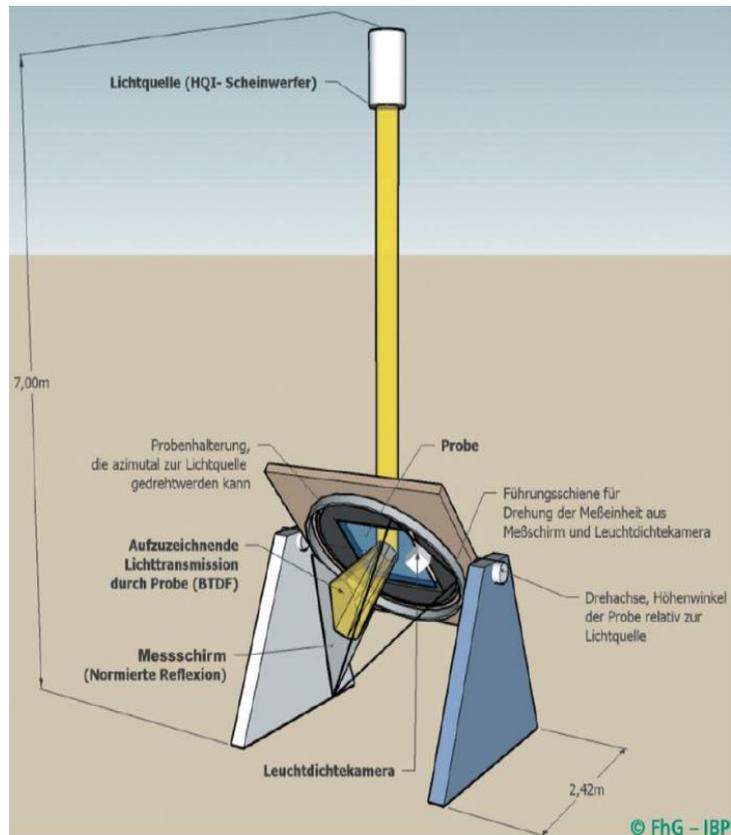


Bild 3:  
Prinzipschema des Goniophotometers.

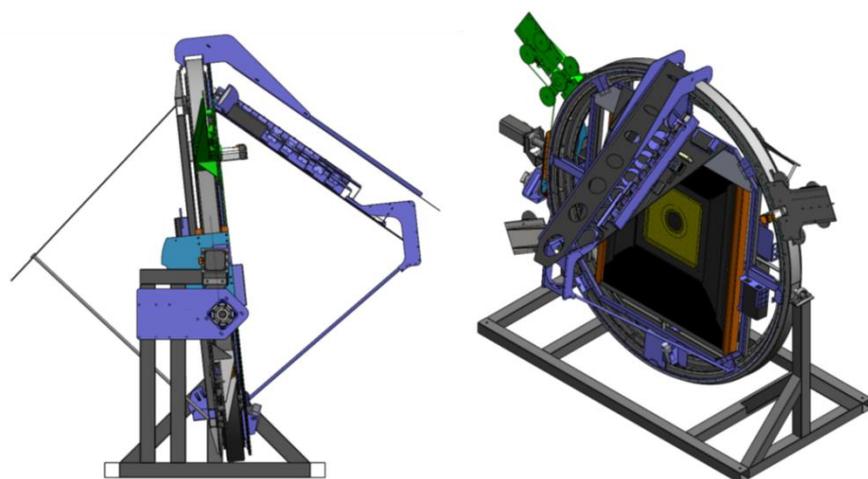


Bild 4:  
Konstruktionszeichnung des erweiterten Goniophotometers.

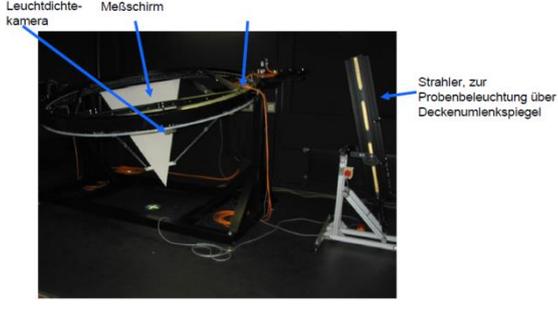
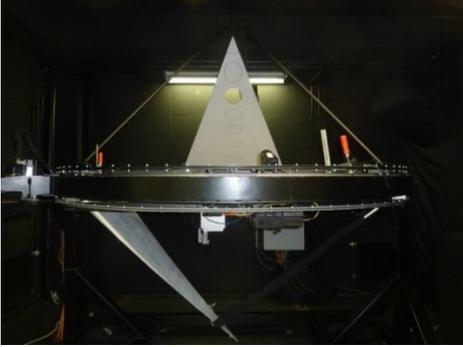
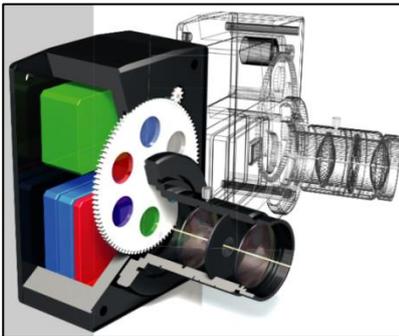
<p align="center"><b>Goniophotometer vor dem Umbau</b></p>	<p align="center"><b>Goniophotometer nach dem Umbau mit neuen Schirm zur Messung der Reflexion</b></p>
	
<p align="center"><b>Positioniereinrichtung für drehbare Lamellenraffstore</b></p>	<p align="center"><b>Leuchtdichtekamera</b></p>
	

Bild 5: fotografische Aufnahme des Goniophotometers vor und nach dem Umbau, der neuen Positioniereinrichtung für drehbare Lamellenraffstore und der Explosionszeichnung der neu eingesetzten Leuchtdichtekamera.

Das am Fraunhofer IBP bestehende Goniophotometer [Boe10] wurde mit den im Folgenden aufgeführten Funktionen und Anpassungen erweitert.

Erweiterung um Messung der Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)

Die Messanlage wurde zwecks Vermessung richtungsaufgelöster Reflexionskennwerte (BRDF) von Systemen und Systemoberflächen erweitert. Somit kann die Messeinrichtung Proben sowohl bzgl. der Lichttransmission als auch bzgl. der Lichtreflexion vermessen. In der Lichtsimulation wird damit die Interreflexionsberechnung zwischen Fassadenkomponenten und auch in den Raummodellen (Rückreflexion des Lichts von der Fassade in den Raum) ermöglicht. Dies ist z. B. bei heutigen Bauweisen wie Ganzglasfassaden relevant.

### Farbliche Probenvermessung

Die bisher nur monochromatisch aufzeichnende Messeinrichtung wurde mit einem neuen Leuchtdichtekamerasystem für die Transmissionsmessungen um ortsauflösende Farbmess technik und  $c(\lambda)$  (circadiane Wirkungskurve) Gewichtung der Spektren erweitert. Somit können z. B. auch farbige Verglasungs- und Sonnenschutzsysteme in Ihrer spektralen Wirkung evaluiert werden. Dies ist z.B. in der architektonischen Bewertung der Fassadengestalt von Bedeutung. Des Weiteren können Effekte in der Raumbelichtung wie „Colourbleeding“ (Farbverfälschung des einfallenden Tageslichts) durch die Fassade dargestellt und analysiert werden. Durch die  $c(\lambda)$  gewichtete Messung können Fassadensysteme besser in ihrer Wirkung auf den circadianen Rhythmus des Menschen in Gebäude bewertet werden. Die Farbmess technik steht für die Transmissionsmessung zur Verfügung. Die Reflexionsmessungen werden mit der bisherigen Leuchtdichtemesskamera rein  $V(\lambda)$  gewichtet aufgezeichnet.

### Positioniereinrichtung der Proben über der Apertur des Goniophotometers

Um aufwendige Umrüstvorgänge bei unterschiedlichen Winkelstellungen der Lamellen von Raffstoren zu vermeiden, wurde eine Positioniereinrichtung entwickelt (Bild 5 unten links). Diese ermöglicht das vollautomatische Drehen der eingespannten Lamellen. Die Winkelpositioniereinrichtung wurde derart konstruiert, dass die gesamte Einheit über der Blende auf einem Schlittensystem verfahren und anschließend vermessen werden kann. Das Verfahren kann bei Lamellen mit größerer Ortsperiode (z.B. Lamellenabstand 8 cm) erforderlich werden.

### Stromversorgung und Datenübertragung

Ein kabelgebundener Betrieb (Stromversorgung und Datenübertragung für die Kamerasysteme und die Positioniereinrichtung) war durch die Erweiterung der Messmöglichkeiten (BRDFs) nicht länger möglich. Es wurde somit auf eine jeweils lokale batteriegestützte Versorgung der elektrischen Einheiten auf den Messplatten umgestellt. Die Datenübertragung erfolgt durch mehrere Funkstrecken.

## **5.1.2 Software und Inbetriebnahme**

Die Ansteuerungssoftware wurde um folgende Punkte ergänzt:

- Ansteuerung zusätzlicher Achsen für BRDF-Messung und die Positionierung der Lamellen von Behängen (Lamellenwinkel),
- Ansteuerung des Mehrkanalkamerasystem ( $V(\lambda)$ ,  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$ ,  $c(\lambda)$ ),
- Anpassung der Kalibrierung (Kameraverzerrung etc.),

- Fahrwegsoptimierung zur Reduktion der Meßzeiten,
- Anpassung der Visualisierungssoftware (vgl. Bild 6).

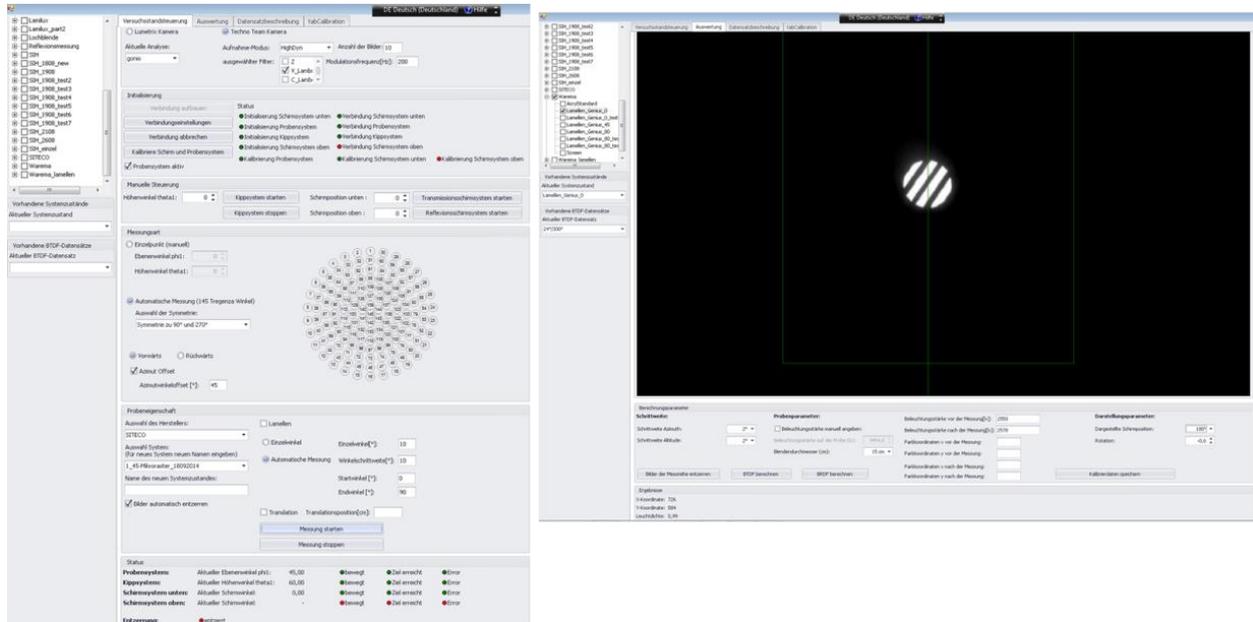


Bild 6:  
Screenshots der Bedienoberfläche des Goniophotometers.

Die Anlage wurde für verschiedene Fälle getestet und validiert. Bild 7 zeigt exemplarisch die winkelabhängige, gerichtete hemisphärische Transmission  $\tau_{D65}$  für die Grenzfälle „ideales Glas“, d.h. der offenen Apertur ohne Probe, und „lambertscher Diffusor“ (Plexiglas 060). Für das ideale Glas (offene Apertur) stellt sich die Lichttransmission nahezu konstant bei 1 ein. Das diffuse Plexiglas folgt genähert dem Verhalten einer ideal streuenden, lambertschen Transmission. Tabelle 1 gibt die ca. Messzeiten für unterschiedliche Proben typen an.

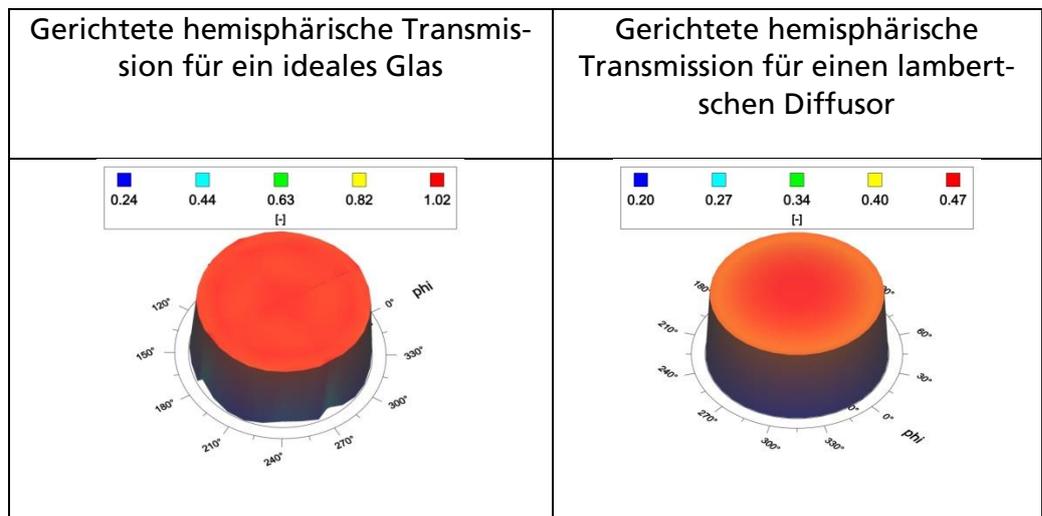


Bild 7:  
gerichtet hemisphärische Transmission für ein ideales Glas (keine Probe in der Apertur) und einen lambertschen Diffusor (Plexiglas 060).

Tabelle 1:  
beispielhafte Übersicht der ca.-Messzeiten unterschiedlicher Proben.

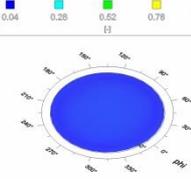
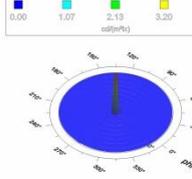
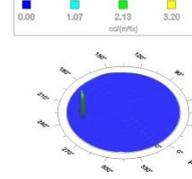
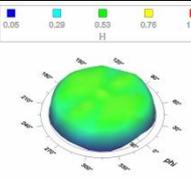
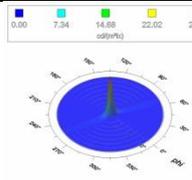
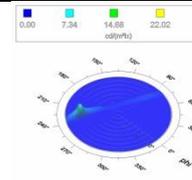
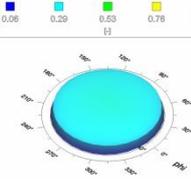
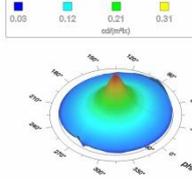
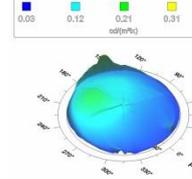
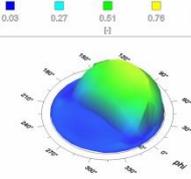
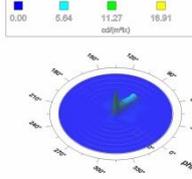
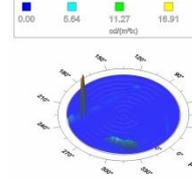
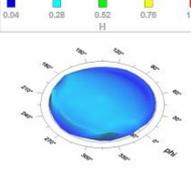
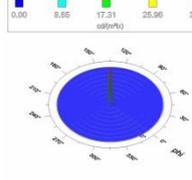
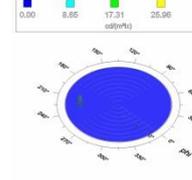
Probentyp		Symmetrie	Meßzeit BTDF		Meßzeit BRDF
Klasse	Beispiel(e)		$V(\lambda)$ oder $c(\lambda)$	$X(\lambda), Y(\lambda),$ $Z(\lambda)$	$V(\lambda)$
			[h]	[h]	[h]
Statische Probe	Klarglas	Nur senkrechte Einstrahlung	0,05	0,2	0,05
	Diffuses Glas / Acrylglas	Rotations-symmetrisch	0,5	1,3	0,75
	Stegmehrfachplatten, perforierte Bleche, Textilien mit vertikal und horizontal gleicher Webstruktur	Viertelraum-symmetrisch	2,0	4,0	2,2
	Microsonnenschutzraster, Textilien mit vertikal und horizontal ungleicher Web-Struktur, Tageslichtrolläden, Lamellenraffstore (eine Stellung)	Halbraum-symmetrisch	3,5	6,0	4,0
	Textilien mit unsymmetrischer Web-Struktur	Keine	6,8	15	7,8
Variable Probe	Jalousien in 5 °-Schritten, von horizontal bis geschlossen	Halbraum-symmetrisch	56,7	117,5	64

### 5.1.3 Vermessung repräsentativer, lichtdurchlässiger Fassadenkomponenten

Mit der erweiterten Messeinrichtung wurden 51 marktrepräsentative Sonnenschutz-, Blendschutz-, Tageslichtsysteme und auch speziellen Verglasungskomponenten wie z. B. für den Dachoberlichtbau vermessen. Für die Lamellensysteme wurden jeweils verschiedene Winkelstellungen in 5 °-Schritten vermessen.

Tabelle 2 ist eine Übersicht repräsentativer Proben mit zugehörigen Messergebnissen zu entnehmen. Dargestellt sind jeweils die gerichtete hemisphärische Transmission und BTDF-Daten für ausgewählte Einstrahlwinkel. Bei dem gefärbten Acrylglas in Tabelle 3 sind die drei Farbkanäle angegeben. Ergänzend sind jeweils der diffuse Lichttransmissionsgrad und der gerichtet hemisphärische Lichttransmissionsgrad angegeben.

Tabelle 2:  
ausgewählte Messergebnisse unterschiedlicher Probenarten.

Probenart	Bild	$\tau_{diff}$	$\tau_{ger\_hem}$ senkrechte Einstrahlung	$\tau_{ger\_hem}$ für 145 Einstrahlwinkel nach Tregenza	BTDF für Einstrahlung $\varphi = 0^\circ; \vartheta = 0^\circ$	BTDF für Einstrahlung $\varphi = 45^\circ; \vartheta = 48^\circ$
Textiler Sonnenschutz		0,06	0,07			
Stegmehrfachplatte, klar		0,49	0,61			
Stegmehrfachplatte, opal (diffus)		0,29	0,36			
Sonnenschutzraster für Dachoberlichter		0,28	0,45			
Tageslichtrolläden, transparent		0,17	0,2			

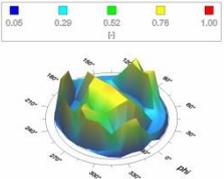
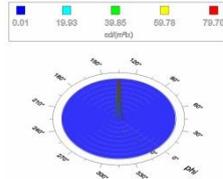
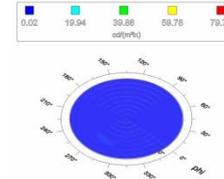
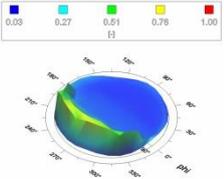
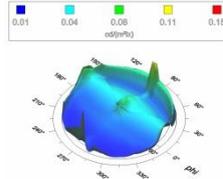
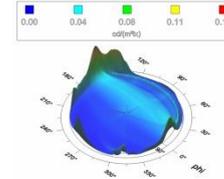
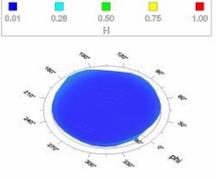
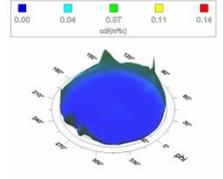
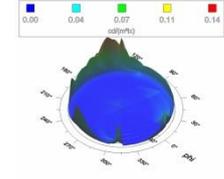
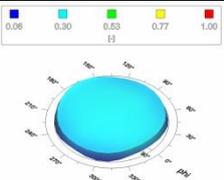
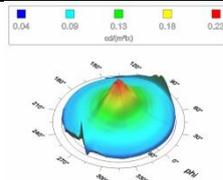
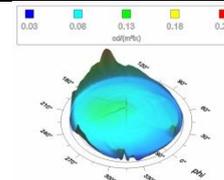
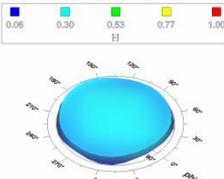
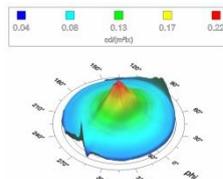
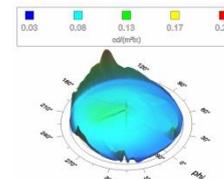
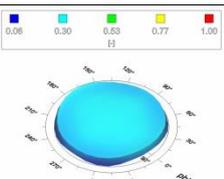
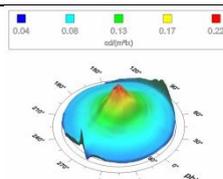
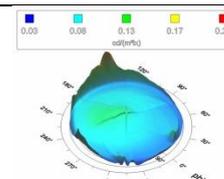
Lamellenraffstore für Lamellenwinkel 0°		0,43	0,84			
Lamellenraffstore für Lamellenwinkel 45°		0,19	0,08			
Lamellenraffstore geschlossen		0,03	0,01			

Tabelle 3:  
aufgezeichnete Farbkanäle eines gefärbten Acrylglases

Gefärbtes Acrylglaselement						
V( $\lambda$ )		0,26	0,31			
X( $\lambda$ )		0,23	0,28			
Z( $\lambda$ )		0,24	0,28			

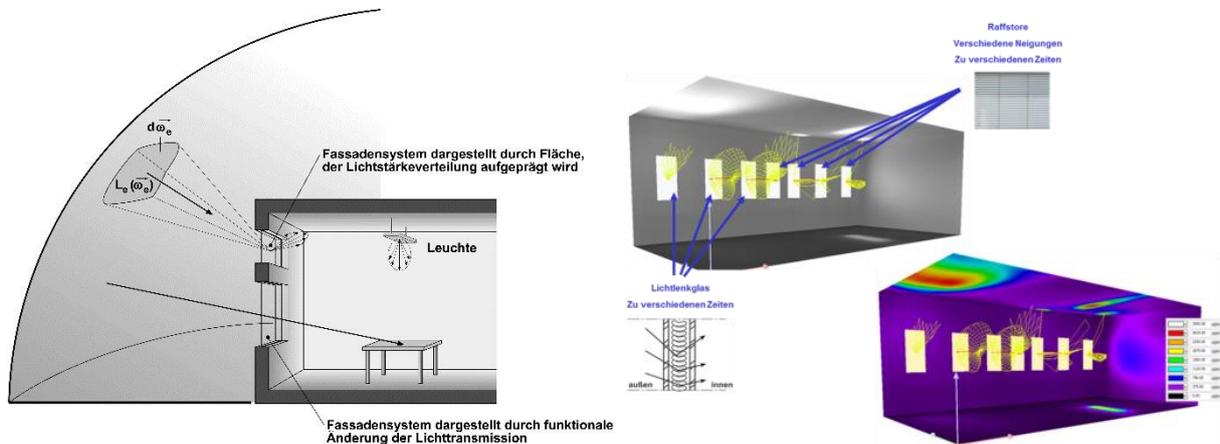


Bild 8:  
prinzipielle Darstellung der Errechnung der Raumbelichtungsverhältnisse mit Hilfe der Modellierung von Leuchten und Fassaden durch Lichtstärkeverteilungen.

## 6 Algorithmen

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Bereitstellung der erforderlichen Algorithmen zur Berechnung der Lichtausbreitung von außen durch die Fassadensysteme ins Gebäudeinnere. Zum einen kommt ein Fassadentechnischer Algorithmus zum Einsatz, der die Lichtstärkeverteilung (LVK) eines Fassadensystems unter den objektspezifischen speziellen Einstrahlbedingungen ermittelt. Zum anderen wird ein existierender Rechenkern zur Berechnung der Lichtausbreitung in beliebigen Gebäudestrukturen um die erforderlichen Funktionen sowohl für die Nutzung der o. g. LVKs als auch zur fotorealistischen Darstellung der Fassadensysteme erweitert. Der Ansatz ist in Bild 8 illustriert.

### 6.1 Fassadentechnischer Algorithmus

Die Arbeiten bauen auf einem prototypisch vorliegenden Algorithmus [Boe06] des Fraunhofer-Instituts auf. Dieser wurde hinsichtlich des lichttechnischen Modells erweitert und die Recheneffizienz wurde verbessert. Eine Application Programming Interface (API) wurde entwickelt (vgl. hierzu auch Kapitel 7).

#### Erweiterung des lichttechnischen Modells

Fassaden werden größtenteils objektbezogen entworfen und gebaut. Hierbei kommt es in der Baupraxis zumeist zu Kombinationen von Standardverglasungs- und Standardsonnenschutzkomponenten. So werden z. B. in variierenden geometrischen Konstellationen Standardraffstores mit unterschiedlichen

Verglasungssystemen kombiniert. Damit wird die Fassade planerisch möglichst optimal an die gegebene Situation angepasst.

Alle denkbaren Kombinationen aus üblichen Sonnenschutzlösungen und Verglasungen messtechnisch (vgl. Kapitel 5) zu erfassen, ist indes nicht realistisch. Vor diesem Hintergrund ist es die Zielsetzung dieses Arbeitspaketes, das existierende lichttechnische Modell derart anzupassen, dass aus einer begrenzten Zahl von Messungen komplexer Komponentenphotometrien auf eine breite Zahl von Systemkombinationen mit Verglasungen geschlossen werden kann. Die photometrisch komplexen Proben können damit unabhängig vom Glas gemessen werden und werden erst rechnerisch mit unterschiedlichen Gläsern kombiniert.

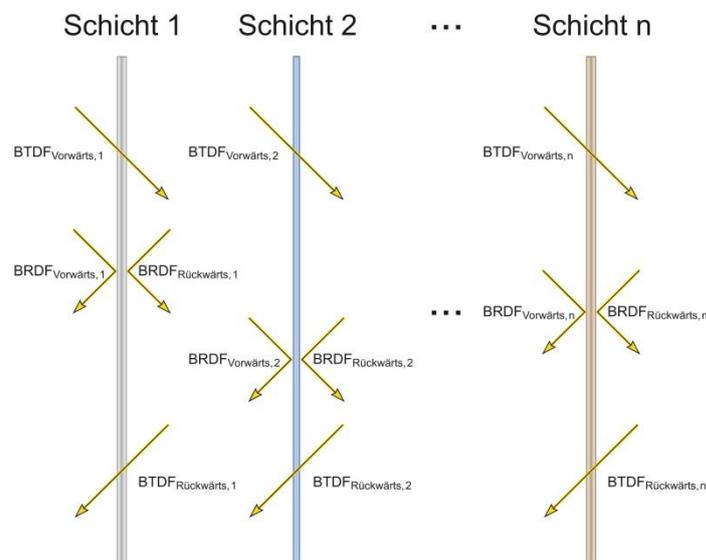


Bild 9:  
Darstellung des matrizenbasierten Layermodells (aus [Kle93]).

Hierzu wurde ein in Bild 9 illustriertes matrizenbasiertes Modell implementiert [Kle93]. Es ermöglicht die Bestimmung der vorwärts- und rückwärtsgerichteten richtungsaufgelösten Lichttransmission unter Berücksichtigung interner Reflexionen zwischen den unterschiedlichen Systemschichten (Layern).

Der Ansatz wurde derart erweitert, dass eine differenzierte Betrachtung von Anteilen für diffuse Einstrahlung (Himmelsleuchtdichten), basierend auf gefilterten niedrigaufgelösten BTDF-Daten [DeB06], und dem Anteil der direkten Einstrahlung durch die Sonne, basierend auf hochaufgelösten BTDF-Daten, ermöglicht wird. Bild 10 illustriert den Effekt am Beispiel der BTDF einer idealen Verglasung (Lichttransmission 100 %) in einem Dachoberlicht.

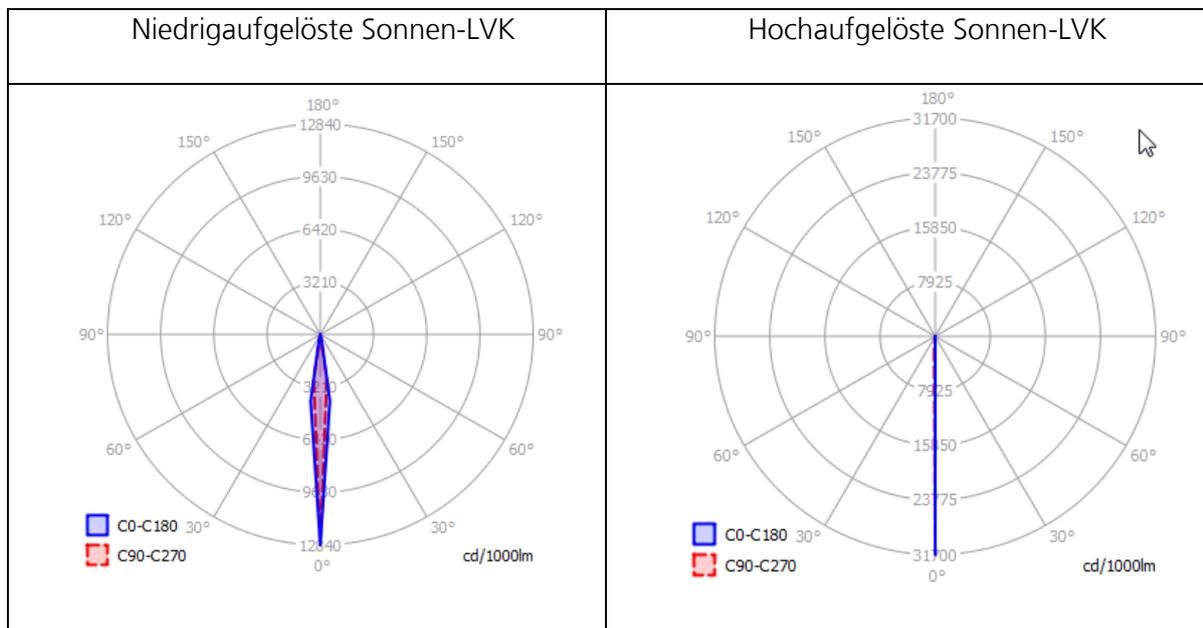
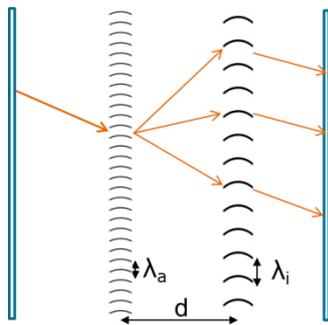


Bild 10: Darstellung der differenzierten Betrachtung der Bestimmung der LVK auf Basis niedrigaufgelöster und hochaufgelöster BTDF-Daten mit der Sonne im Zenit.

Das Layermodell basiert auf der Verrechnung von Komponenten (Layerelemente), die durch insgesamt 4 Streuindikatoren ( $BTDF_{\text{Vorwärts}}$ ,  $BTDF_{\text{Rückwärts}}$ ,  $BRDF_{\text{Vorwärts}}$ ,  $BRDF_{\text{Rückwärts}}$ ) beschrieben werden. Für die Hauptanwendung der Ermittlung des Lichtdurchgangs durch Fassaden repräsentiert die  $BTDF_{\text{Vorwärts}}$  in Vorwärtsrichtung den dominierenden Lichtstromanteil und ist für die Berechnung zwingend erforderlich. Die anderen BRTDFs haben einen geringeren Anteil am Gesamtlichtstrom. Aus Kostengründen können diese nicht immer gemessen werden. Für diesen Fall wurden daher ergänzende analytische Funktionen implementiert. Es stehen sowohl jeweils lambertsche (ideale diffuse), ideal gerichtete (spiegelnde) und winkelabhängig gerichtete Modelle für  $BTDF_{\text{Rückwärts}}$ ,  $BRDF_{\text{Vorwärts}}$  und  $BRDF_{\text{Rückwärts}}$  zur Verfügung. Diese können damit mit gemessenen oder abgeschätzten Einzahlkennwerten der diffusen oder gemessenen Lichttransmission / -reflexion abgeschätzt werden.

Das matrixbasierte Modell basiert auf der Annahme, dass über die Fläche von Komponenten die gleiche richtungsaufgelöste Abstrahlcharakteristik gilt („verschmiertes“ Modell). Gewisse Verhältnisse von Komponentenperiodizität und Abstand zweier Komponenten in Layerverbänden können vor diesem Hintergrund zu fehlerhaften Berechnungen führen und werden daher ausgeschlossen. Es wurde eine Abfrage basierend auf folgendem in Bild 11 dargestellten Zusammenhang implementiert:



$\lambda_a$  Periodizität des äußeren Layers  
 $\lambda_i$  Periodizität des inneren Layers  
 $d$  Abstand zwischen den Mittel-ebenen der beiden Schichten jeweils in [mm]

Randbedingung für die Berechenbarkeit des Systems:

$$\lambda_i \leq \frac{d}{m \cdot \lambda_a}, \text{ mit}$$

$$m = \begin{cases} \frac{1}{40} & \text{für } \lambda_a \leq k\lambda_i \\ \frac{1}{160} & \text{für } \lambda_a > k\lambda_i \end{cases}$$

$$k = \frac{1}{3}$$

Bild 11:  
Bedingung für die Berechenbarkeit eines Systems mit mehr als einem gemessenen Element.

Praxisgebräuchliche Systemkombinationen sind hiervon nicht betroffen, d. h. die Funktionalität dient im Wesentlichen der Eingabesicherheit.

### Effizienzsteigerung und Erhöhung der Genauigkeit des Algorithmus

Damit die Berechnung ohne wesentliche Zeitverzögerung in der Software erfolgen kann, wurden verschiedene Optimierungen vorgenommen:

- Bei den vermessenen Proben überwiegt die Halb- und Viertelraumsymmetrie. Die hierdurch möglichen Rechenzeitverbesserungen wurden in den Berechnungsalgorithmen ausgenutzt.
- Weitere Optimierungen wurden bezüglich der Abtastung der BRTDF vorgenommen. Die gefilterten Daten werden bereits direkt nach der Messung nach dem Tregenza-Schema abgetastet, so dass eine bisher notwendige Triangulation während der Berechnung wegfällt. Die verwendete Delaunay-Triangulation und der bisher vorhandene prototypische Code wurden hinsichtlich Geschwindigkeit und Speicherverbrauch optimiert.

Die Genauigkeit des Algorithmus wurde dahingehend erhöht, dass bei der Abtastung der Hemisphäre nicht mehr auf kreisrunde Patches um die Tregenza-Richtungen zurückgegriffen wurde, sondern auf exakt aneinandergrenzende Raumwinkelbereiche.

## 6.2 Berechnung Lichtausbreitung in beliebigen Gebäudestrukturen

Der Rechenkern des frei für Planer verfügbaren Lichtplanungsprogramms DIA-Lux evo führt die eigentliche Berechnung der Raumbeleuchtungsverhältnisse durch. Analog der Berechnung von Leuchten mit Hilfe von Lichtstärkeverteilungskurven sollen die photometrischen Daten von Fassaden in Form von Licht-

stärkeverteilungen - vorherberechnet durch den fassadentechnischen Algorithmus – berücksichtigt werden.

### Tageslichttechnische Infrastruktur

Im ersten Schritt wurden die tageslichttechnischen Infrastrukturen in der Software implementiert. Der Anwender hat so die Möglichkeit, Ort und Nordausrichtung des geplanten Projekts festzulegen. Damit unterschiedliche Tageslichtsituationen miteinander verglichen werden können, wurden Datum und Uhrzeit in Lichtszenen integriert.

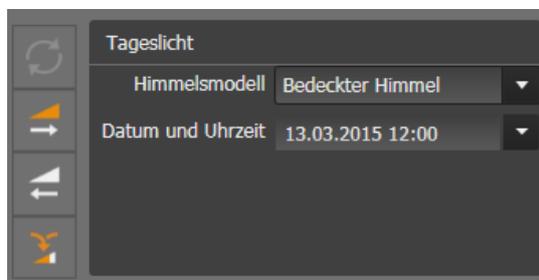


Bild 12:  
Auswahl des Himmelsmodells, Datum und Uhrzeit.

### Tageslichtberechnung für Klarglas

Im zweiten Schritt wurde die Tageslichtberechnung ohne lichtlenkende Systeme integriert, da nicht immer in allen Gebäudeöffnungen lichtlenkende Systeme verwendet werden und dynamische Systeme unter Umständen nur Teile der Fenster- und Oberlichtflächen abdecken. Das Verfahren zur Berechnung solcher Flächen entspricht der später integrierten Methode für Tageslichtlenksysteme: Die Flächen sammeln Licht von sichtbaren Teilflächen des Himmels ein, vgl. Bild 13. Auf die Innenseite der Flächen wird eine Lichtstärkeverteilungskurve platziert, die von dem bereits verwendeten Rechenkern für die Lichtberechnung genutzt wird.

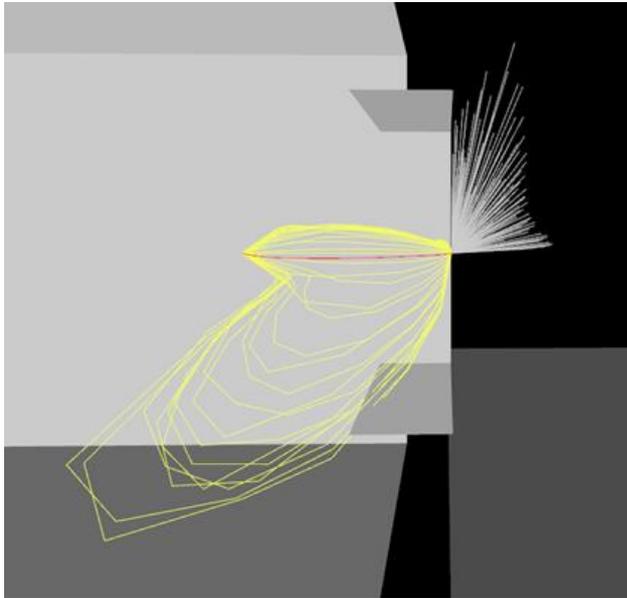


Bild 13:  
einsammeln der Himmelsleuchtdichte und platzieren der Lichtstärkeverteilungskurve.

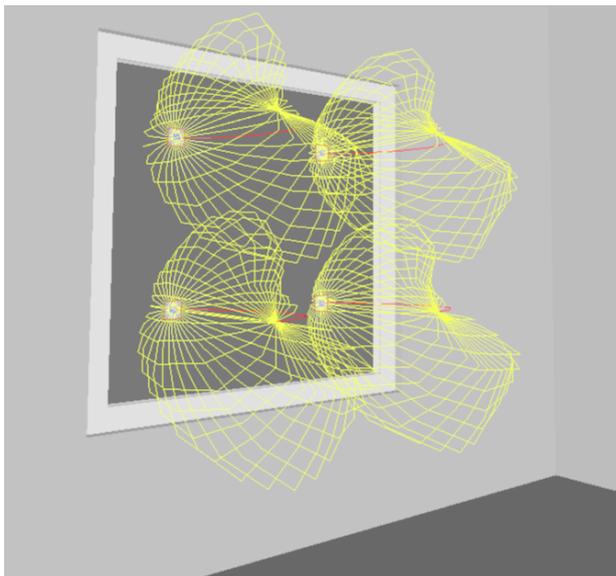


Bild 14:  
aufteilen der Fensterflächen.

Dabei wurde festgestellt, dass die tageslichtrelevanten Flächen in Teilflächen unterteilt werden müssen, da es andernfalls zu großen Abweichungen gegenüber den zu erwartenden Ergebnissen führt. Die Berechnung von direktem Sonnenlicht ist zwar prinzipiell möglich, aber eine derart feine Unterteilung der tageslichtrelevanten Flächen erfordert, dass die daraus resultierenden Berechnungszeiten nicht akzeptabel sind, vgl. Bild 15. Stattdessen wurde ein weiteres Berechnungsverfahren implementiert, welches den direkten Sonnenlichtanteil

getrennt vom diffusen Tageslichtanteil mit Hilfe von Strahlenberechnung ermittelt.

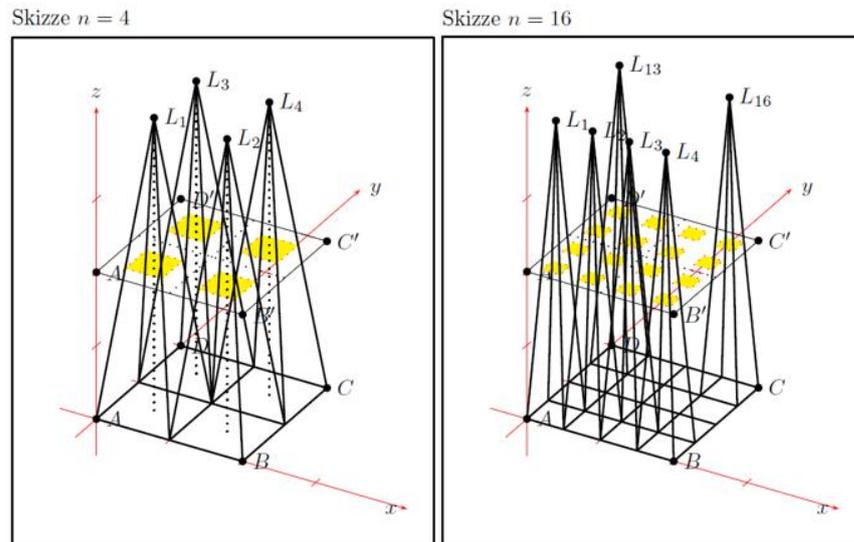


Bild 15:  
konvergieren der Anzahl von Lichtstärkeverteilungskurven für direktes Sonnenlicht.

Das angestrebte Verfahren ist nur zur Berechnung von Tageslicht in Innenräumen geeignet. Deshalb war es nötig, dem Außenbereich zugehörige Flächen zu identifizieren und getrennt zu behandeln. Dazu konnten die in Innenbereichen bereits existierenden Bereiche mit Nutzungsprofilen benutzt werden. Flächen, die keine solchen Bereiche berühren, konnten dem Außenraum zugeordnet werden.



Bild 16:  
Identifikation der dem Außenbereich zugeordneten Flächen.

Damit lagen alle Funktionen vor, die für eine Berechnung des direkten und indirekten Tageslichts ohne lichtlenkende Systeme benötigt werden, vgl. Bild 17 und Bild 18. Diese ist bereits in der Software DIALux evo 4.0 integriert und im Markt eingeführt.

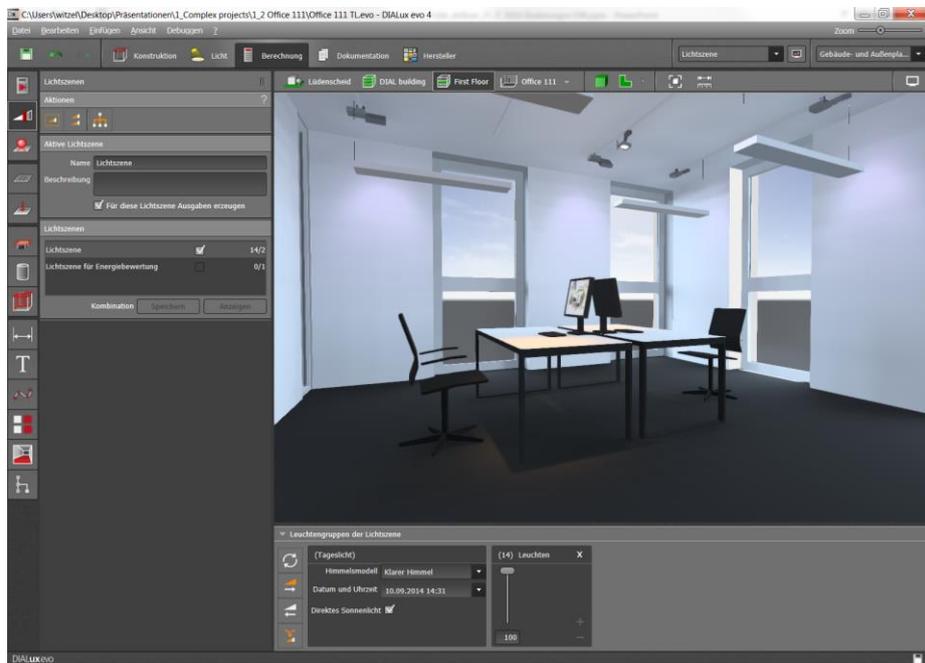


Bild 17:  
Berechnung des direkten und indirekten Tageslichts in Kombination mit Kunstlicht.

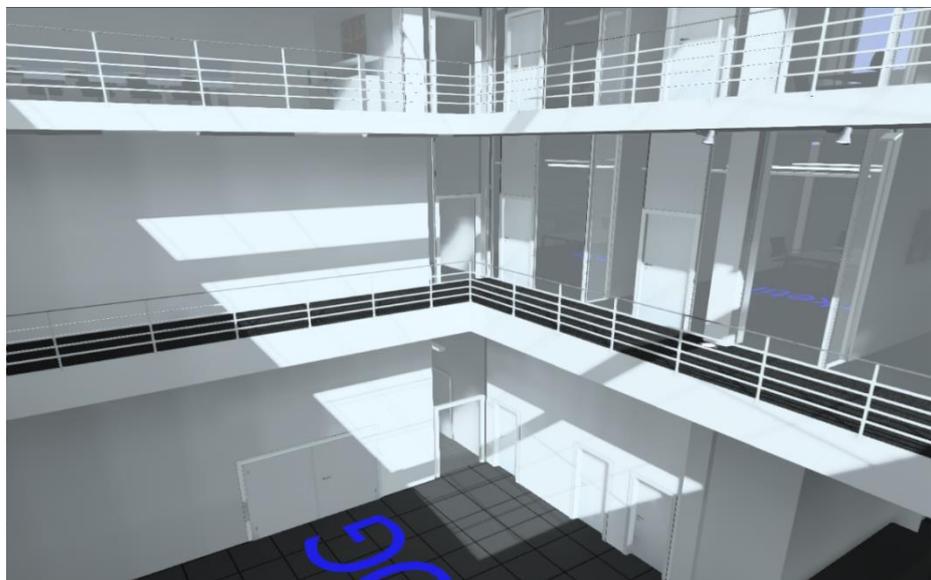


Bild 18:  
Simulation des Schattenwurfs durch direktes Sonnenlicht.

### Integration von Tageslichtlenkssystemen

Im nächsten Schritt wurden lichtlenkende Systeme als eigenständige Objekte in die Software integriert. Der Prozess sieht vor, dass die gemessenen Daten auf-

bereitete und direkt über ein eigenes Dateiformat oder über einen vom Hersteller der Fassadenelemente mit Zusatzinformationen angereicherten Produktkatalog an DIALux evo übergeben werden können. In der Software werden die Produkte an Gebäudeöffnungen platziert und gegebenenfalls konfiguriert, z. B. über individuelle Lamellenstellungen. Diese Informationen werden zusammen mit den aus Ort, Ausrichtung und Datum ermittelten Himmelsleuchtdichten unter Berücksichtigung der notwendigen Aufteilung der Fenster- und Oberlichtflächen dem fassadentechnischen Algorithmus übergeben. Die dort ermittelten Lichtstärkeverteilungskurven werden auf der Innenseite der Flächen platziert und zur eigentlichen Berechnung des Tageslichts herangezogen.

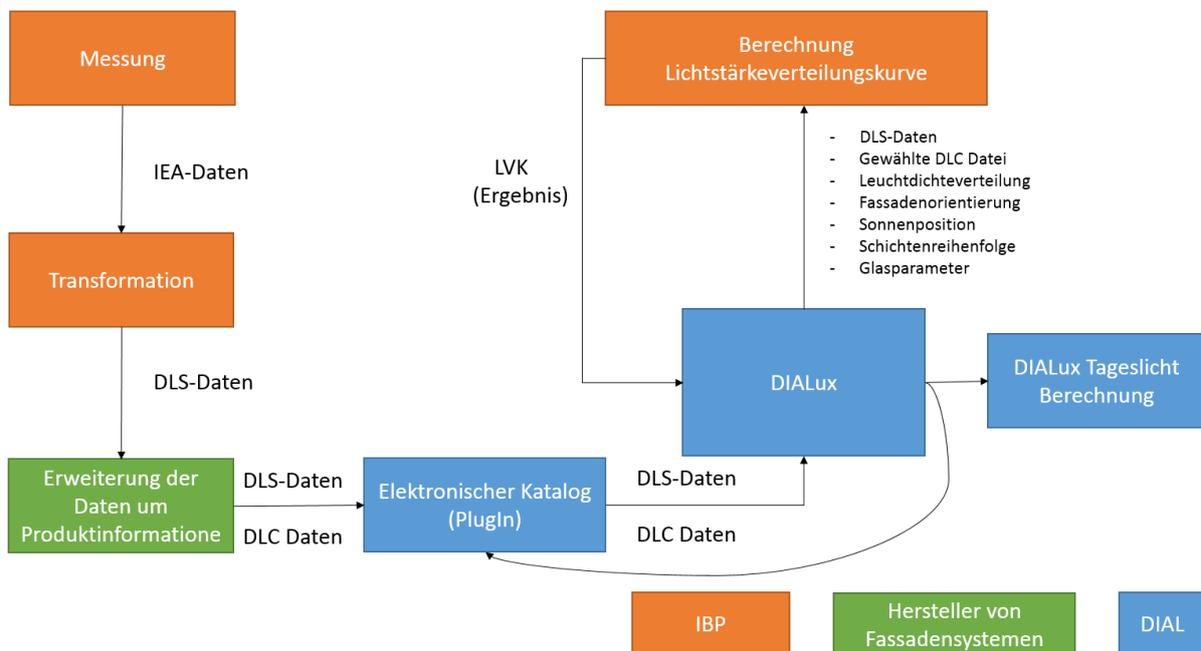


Bild 19:  
schematischer Prozessablauf.

Für die ansprechende Visualisierung von Fassadenkomponenten wurden prototypische 3D-Modelle der Lichtlenksysteme für die Visualisierung mit eingebunden. Sie dienen gleichzeitig der Kontrolle des ausgewählten Verfahrenszustands.

- Lamellenbehang: Lamellenbehänge werden als vertikale Reihe von horizontal extrudierten gleichseitigen Dreiecksprofilen modelliert, vgl. Bild 20.

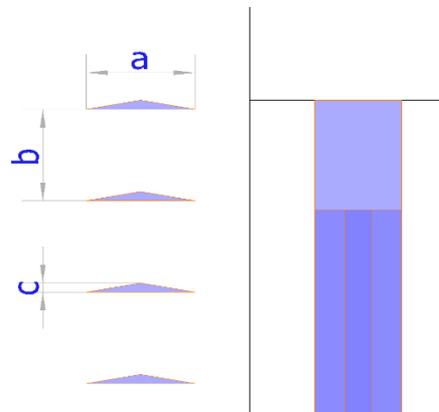


Bild 20:  
geometrisches Lamellenmodell.

Das Material von Ober- und Unterseite der Lamellen wird im DDLS-Format vom Hersteller angegeben, beim ODLS-Format ist es in DIALux evo auf ein diffuses graues Material mit 60 % Reflexionsgrad festgelegt.

- Stoffbehang: Stoffbehänge werden als einfacher Quader modelliert.

Das Material von Innen- und Außenseite wird im DDLS-Format vom Hersteller angegeben, beim ODLS-Format ist es in DIALux evo auf ein diffuses graues Material mit 60% Reflexionsgrad festgelegt.

- Folie und Lichtlenkglas: Da Folien und Lichtlenkgläser direkt auf die Fensterscheiben montiert werden, wird für sie keine eigene Geometrie angelegt. Stattdessen wird für die Visualisierung das Material der betreffenden Fensterscheiben überschrieben. Im DDLS-Format wird das Material vom Hersteller angegeben, beim ODLS-Format wird in DIALux evo für Folien ein fest vorgegebenes Material mit 50 % Transparenz und für Lichtlenkglas eins mit 80 % Transparenz verwendet.

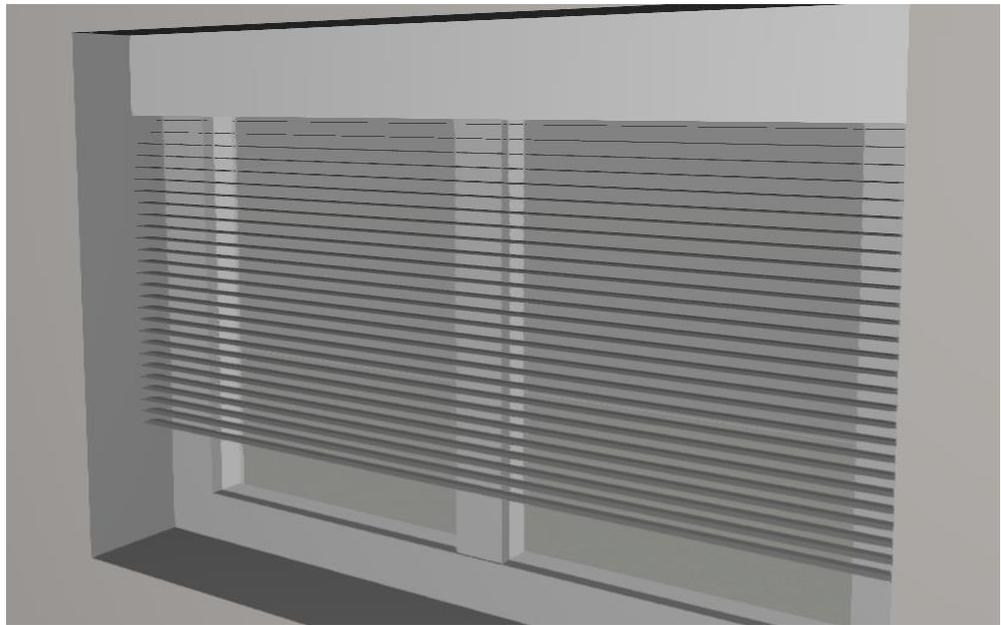


Bild 21:  
3D-Modell eines Lamellenbehangs.

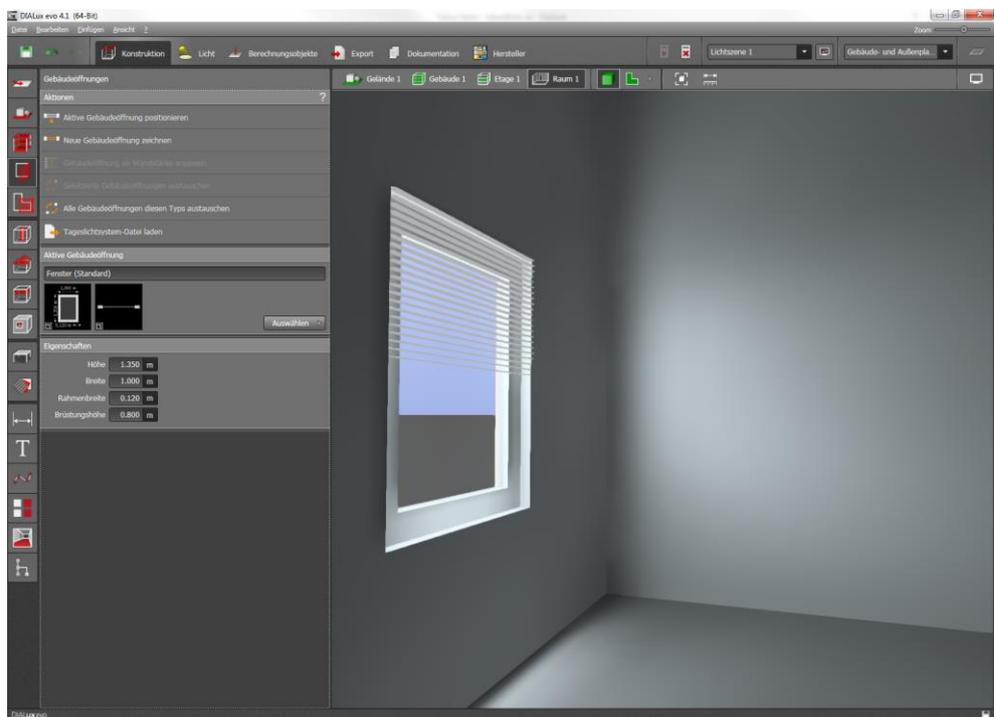


Bild 22:  
Berechnung des Tageslichts mit Lamellenstellung 0°.

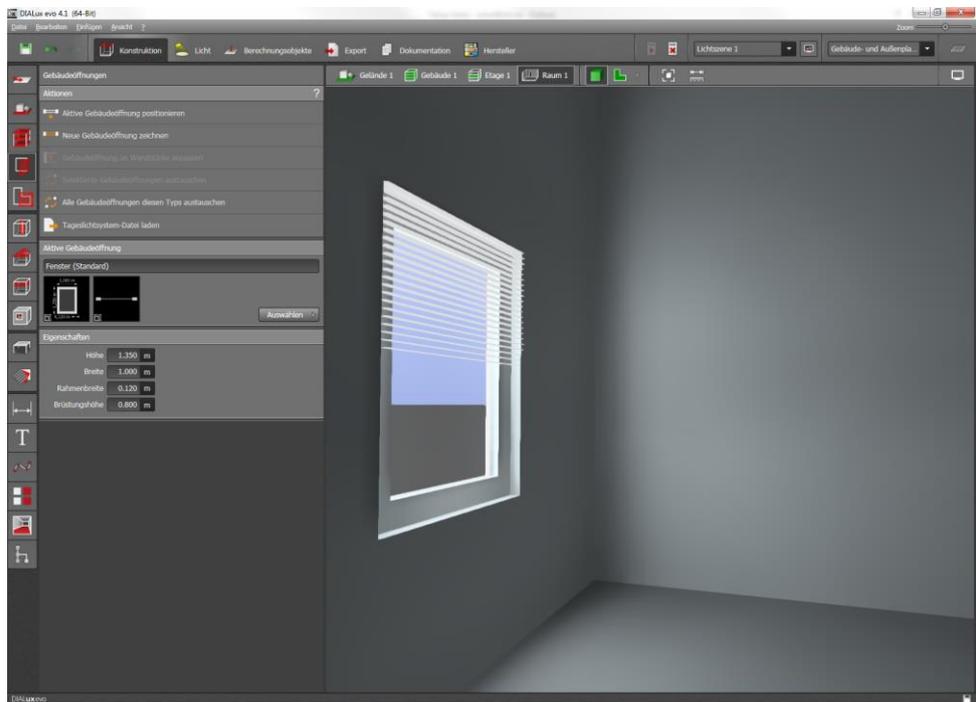
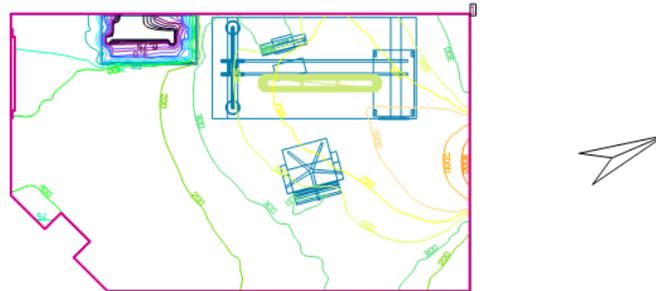


Bild 23:  
Berechnung Tageslicht mit Lamellenstellung 30°.

Nach der Berechnung werden alle lichttechnisch relevanten Informationen zur Lichtszene gemeinsam mit den Berechnungsparametern und einer Szeneskizze ausgegeben, vgl. Bild 24.

## Büro / Raumzusammenfassung



Raumhöhe: 3.200 m, Höhe der Nutzebene: 0.800 m, Randzone: 0.000 m  
Reflexionsgrade: Decke 70.0%, Wände 74.4%, Boden 26.5%, Wartungsfaktor: nach EN12464

Ort: Lüdenscheid (0.00° N 0.00° O)  
Himmelsmodell: Bedeckter Himmel  
Datum und Uhrzeit: 23.02.2015 12:00 (Mitteleuropäische Zeit)  
Zenit-Leuchtdichte: 8157 cd/m<sup>2</sup>

Nutzebene						
Fläche	Ergebnis	Mittel (Soll)	Min	Max	Min/Mittel	Min/Max
1 Nutzebene 6	Senkrechte Beleuchtungsstärke [lx]	435 (500)	0.00	3490	0.000	0.000

Tageslicht						
Tageslichtquotienten-Nutzfläche 6	Tageslichtquotient	0.89	0.28	2.06	/	/
	Rotation: X:0.0°, Y:0.0°, Z:0.0°					

Bild 24:  
Berechnungsparameter und lichttechnische Ergebnisse.

## 7 Datenformate und Schnittstellen

### 7.1 Datenformate

Zur Beschreibung der photometrischen und energiebezogenen Eigenschaften von tageslichttechnischen Fassadensystemen wurde ein neues, auf XML basierendes Datenbeschreibungsformat entwickelt. Mit dem Datenformat können neben den rein physikalischen Eigenschaften auch die zugehörigen Messdaten beschrieben werden. Darüber hinaus können für Simulationsberechnungen notwendige Einbau- und Steuerungsrelevante Parameter angegeben werden. Dies können z. B. für spezielle Sonnenschutzraster bestimmte Einbaulagen sein, damit diese in der Anwendung direkt richtig positioniert werden. Ebenso können Steuerkennlinien (z. B. Cut-off-Steuerung bei Lamellenraffstoren) berücksichtigt werden.

Im Einzelnen umfasst das Datenformat

- grundlegende Systeminformationen wie Hersteller, Bezeichnung des Systems, Datum der Messung, etc.
- Berücksichtigung allgemeiner Systeminformationen wie typische geometrische Abmessungen.

- Beschreibung der gemessenen Kennwerte. Diese können in verschiedenen Ausprägungen (Transmission / Reflexion), monochromatisch oder spektral abgelegt werden.
- Erweiterung um Beschreibung des Reflexions- und Transmissionsverhaltens, sofern diese Werte nicht gemessen vorliegen.
- Beschreibung von Regelungs- und Steuerungskennlinien beweglicher Sonnenschutzeinrichtungen.
- Beschreibung für die Berechnung des Transmissionsverhaltens für energetische Betrachtungen.

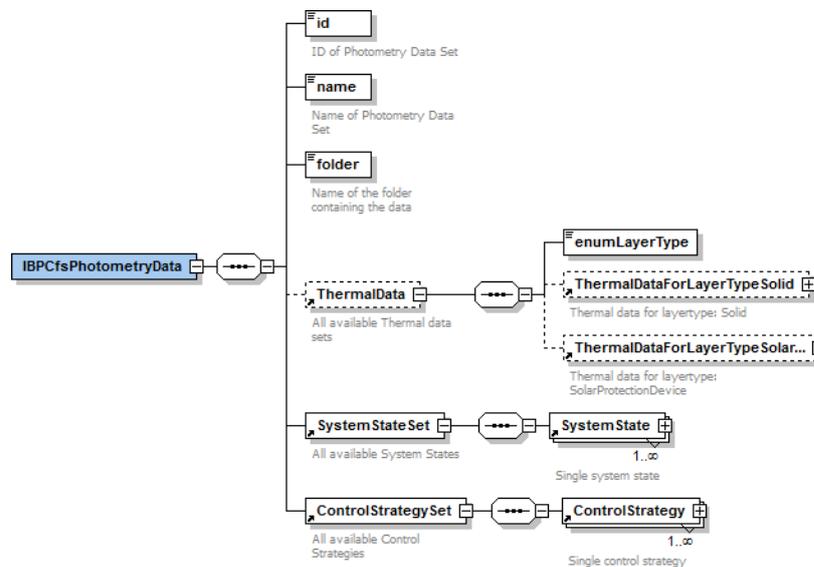


Bild 25:  
Struktur der Datenbeschreibung.

Das Datenformat wird als IbpCfsPhotometryData bezeichnet und mit der Dateierweiterung \*.icpd abgelegt. Das dazugehörige Schema ist verfügbar unter:

<http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/waermetechnik/lichttechnik/Software-Entwicklung.html>

Das Format kann als Analogie zu dem für Leuchten genutzten eulumat-Format verstanden werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurde mit dem ODLS-Format (Open DayLight System) eine offene Datenschnittstelle geschaffen, die lediglich die für die lichttechnische Berechnung notwendigen Daten und einige grundlegende Beschreibungen beinhaltet. Diese ODLS-Datei enthält als ZIP-Datei neben den oben genannten Metadaten die eigentlichen Messdaten in einer vorgefilterten Darstellung.

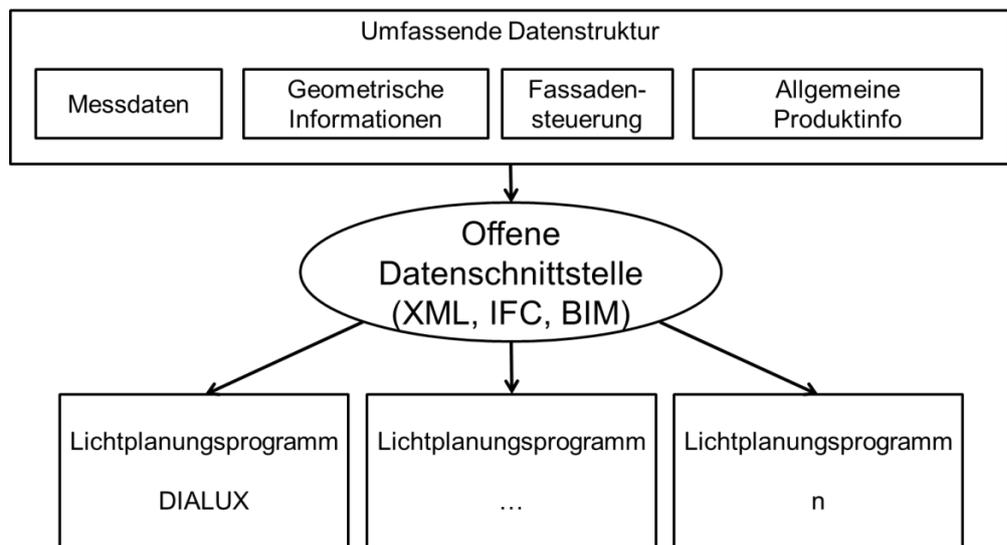


Bild 26:  
Zusammenhang zwischen Datenformaten, Schnittstellen und Lichtplanungsprogrammen.

Zur Anbindung von Herstellerkatalogen wird ein dynamisches System eingesetzt, bei dem Herstellerinformationen und Daten zum Aufruf der elektronischen Kataloge in der Software hinterlegt sind. Bei jedem Programmstart überprüft die Software DIALux evo, ob neuere Informationen auf einem eigenen Server im Internet hinterlegt sind, so dass diese jederzeit aktualisiert werden können. Die elektronischen Kataloge sind eigenständige Programme, die der Anwender aus der Software heraus starten kann. Nach der Auswahl eines Produkts werden die lichttechnisch relevanten Daten zusammen mit geometrischen und Marketinginformationen im eigenen DDLS-Format (DIALux-Daylight-System) übergeben.

## 7.2 Schnittstellen

Die Berechnungsalgorithmen und die dazugehörigen Verwaltungsfunktionen für tageslichttechnische Systeme sind in einer API (Application Programming Interface) gekapselt. Damit können Fassadensysteme mit übergebenen Außenleuchtdichteverteilungen berechnet und als Ergebnis Lichtstärkeverteilungskurven ausgegeben werden.

Die API kann einfach in allen .Net Programmiersprachen angesteuert werden. Darüber hinaus kann auf die API über COM zugegriffen werden. Damit ist die API in allen gängigen Programmiersprachen, mit denen MS Windows Desktop Applikationen erstellt werden können, nutzbar.

Die API stellt Datenklassen zur Beschreibung der Fassadensysteme inklusive aller Schichten des Himmelsmodells und der Berechnungsparameter bereit. Es können folgende Schichttypen berechnet werden:

- gemessene Daten mit vorgegebenen Reflektions- / Rücktransmissionswerten,
- ODLS-Datei mit eingegebenen Reflektions- / Rücktransmissionswerten,
- analytische Schicht
  - o lambertscher Diffusor,
  - o Glas,
  - o Spiegel / Loch.

Die Ergebnisse werden als Ergebnisklassen ausgegeben und stellen diese externen Programmen direkt zur Nutzung bereit.

## 8 Workflows und Bedienoberflächen

Der einfachen Bedienbarkeit der Softwarelösung durch Nutzer (Lichtplaner, Energieberater, etc.) ist höchste Priorität beizumessen. Um dies zu gewährleisten, erfolgt zunächst unter Beteiligung von Planern eine Ermittlung der relevanten Workflows. Hierauf basierend wird die Bedienoberfläche konzipiert und implementiert.

### 8.1 Praxisorientierte Workflows (10)

Hauptzielgruppe des Projektes ist die Gebäudeplanerschaft. Um die Tageslichttechnik hier besser zu positionieren, ist eine Bedarfsanalyse als Grundlage der Gestaltung der Nutzerschnittstellen wesentlich. Hierbei sollen die Workflows der Planer und die erforderlichen, bereitzustellenden Informationen (z. B. Art der Ausgaben, Systemdaten) analysiert werden.

Wichtig bei der Implementation des Workflows in die Software war es, Tageslichtlenksysteme in die bekannte Planung von Kunstlicht und nicht gelenktem Tageslicht zu integrieren. Der Anwender soll mit möglichst wenig neuen Bedienelementen konfrontiert werden.

Zunächst werden Gebäudegeometrie und die Gebäudeöffnungen konstruiert (Bild 27). Ortsangaben und die Ausrichtung der Szenen können als Geländeeigenschaften festgelegt werden.

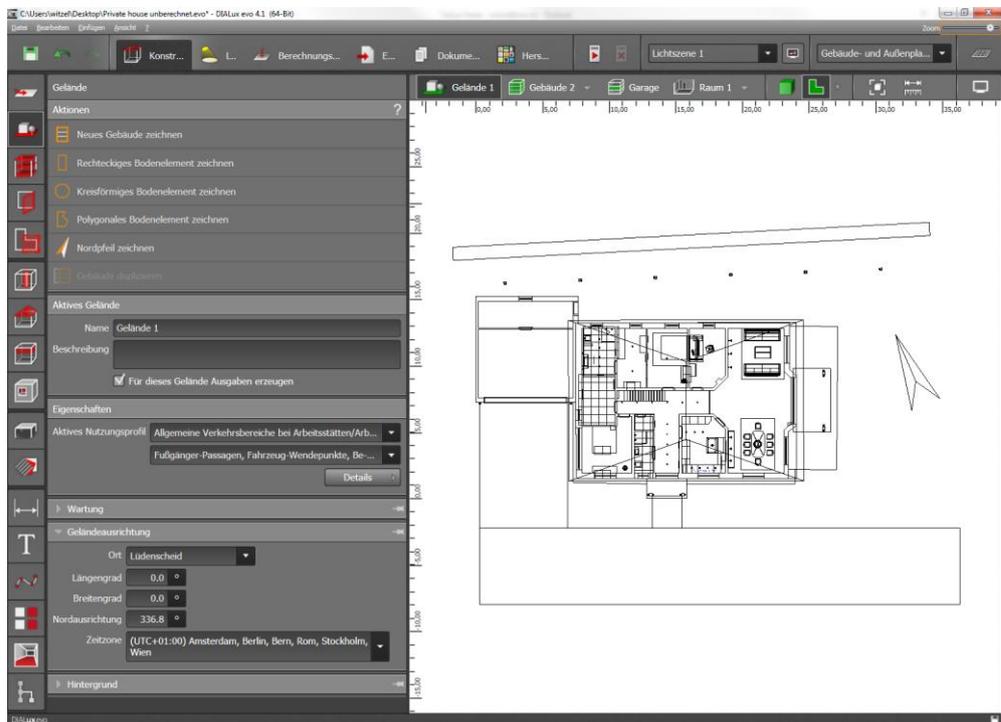


Bild 27:  
Ort und Ausrichtung eines Gebäudes.

Die Tageslichtlenksysteme werden als Eigenschaften der einzelnen Gebäudeöffnungen definiert und im gleichen Zug konfiguriert. Verkehrszustände und Regelstrategien werden, abhängig vom Produkttyp und verfügbaren Messdaten, im gleichen Arbeitsschritt festgelegt. Zuletzt wird die Tageslichtsituation mit Datum, Uhrzeit und gewähltem Himmelsmodell in einer Lichtszene festgelegt (Bild 28). Es ist möglich, mehrere Lichtszenen für die Berechnung zu definieren. Ebenso ist es möglich, Tageslichtszenen mit Kunstlicht zu kombinieren. Die neu erzeugten Ausgaben stehen im bereits bekannten Ausgabebaum zur Verfügung (Bild 29).

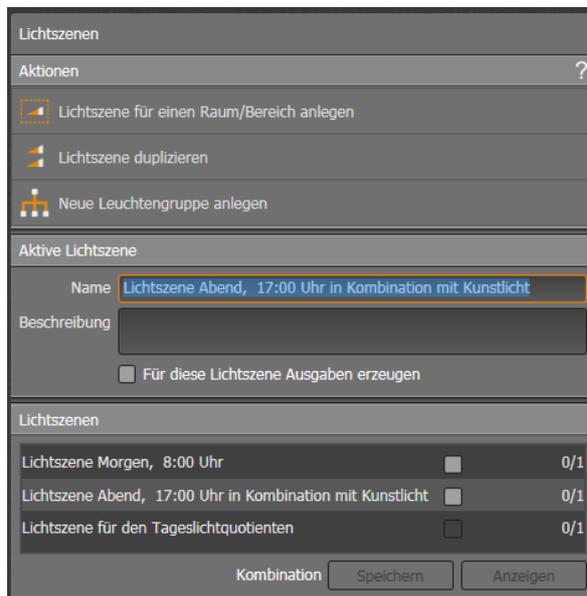


Bild 28:  
Definition und Auswahl der Lichtszenen.

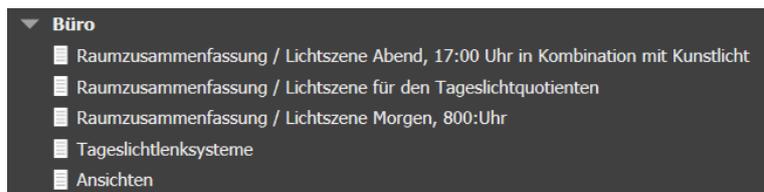


Bild 29:  
Ausgabebaum.

## 8.2 Grafische Bedienoberfläche

Basierend auf der Analyse der Workflows wurde die Bedienoberfläche konzipiert.

Eingabeseitig werden über die Bedienoberfläche Parameter wie z. B. Lage des Gebäudes, Berechnungszeitpunkte und Himmelsmodelle angegeben. Es wird ein filebasierter Import von einzelnen Fassadendatensätzen ermöglicht. Dies erlaubt den unabhängigen Import von Fassadenkomponenten und -systemen und entspricht dem üblichen Import einzelner unabhängiger Leuchten im eulumdat-Format. Des Weiteren wurden Konfigurationsdialoge entwickelt, die es z. B. einfach ermöglichen, verschiedene Fassadenkomponenten zu Fassadensystemen zu konfigurieren (z. B. Kombinationen Verglasungen mit Sonnenschutzsystemen), vgl. Bild 30.

Ausgabeseitig wird die neue Berechnungsfunktionalität in den Visualisierungen (z. B. Darstellung der LVK von Fassadenkomponenten) berücksichtigt. Des Wei-

teren werden die expliziten Tageslichtanteile der Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten in den diversen Ergebnisdarstellungen wie Isoliniengrafiken berücksichtigt. In der Software DIALux evo bestehende Hilfetexte und interaktive Modellierungsleitfäden wurden um die Fassadentechnik erweitert.

Aufgrund der unterschiedlichen Parameter der verschiedenen Produkttypen wurde für jeden ein eigenes, logisches Objekt in der Datenstruktur von DIALux evo implementiert. Damit ist es möglich, für jeden Produkttyp wie Flächenbehänge, Lamellenbehänge (Bild 31), Folien und Oberlichter eigene den individuellen Eigenschaften angepasste grafische Benutzerelemente zu erzeugen.

Neben den lichttechnischen Ergebnissen wurden neue, den Tageslichtsystemen angepasste Ausgaben erzeugt. In der Ausgabe „Tageslichtlenksysteme“ werden alle Gebäudeöffnungen zusammen mit Ihren jeweiligen Produktkonfigurationen beschrieben (Bild 32).



Bild 30:  
grafische Benutzeroberfläche zur Schichtenkonfiguration.

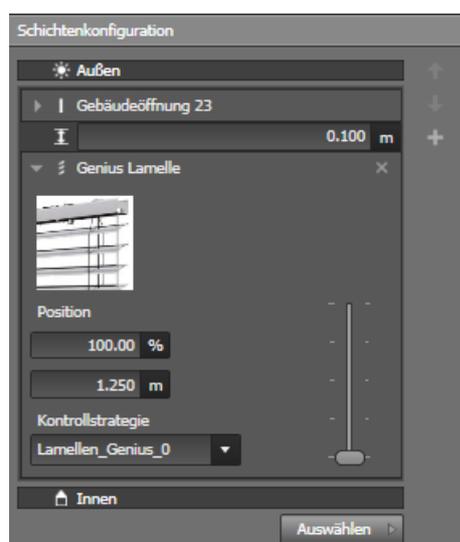


Bild 31:  
Konfiguration der Parameter für einen Lamellenbehang.

## Raum 1 / Tageslichtlenksysteme



Nr.	Fenster	Fassadenelemente	
1	1.000 m x 1.350 m	Standardglas	
		Genius Lamelle Typ: Lamellenbehang Stellung: 100.00 % Ausgewählte Regelstrategie: Lamellen_Genius_0	
2	1.000 m x 1.350 m	Standardglas	
		Genius Lamelle Typ: Lamellenbehang Stellung: 100.00 % Ausgewählte Regelstrategie: Lamellen_Genius_0	

Bild 32:  
Ausgabe Tageslichtlenksysteme.

Im Produktdatenblatt (Bild 33) sind die vom Hersteller angegebenen Produkteigenschaften aufgeführt. Zusätzlich zeigt das hemisphärische Transmissionsdiagramm das Verhalten eines Tageslichtlenksystems bei verschiedenen Einstellungen, basierend auf den gemessenen Werten.

## DIALux 4000 Genius Lamelle / Datenblatt



Die WAREMA Genius-Lamellen wurde in Verbindung mit dem Fraunhoferinstitut entwickelt um Hitzeschutz, Tageslichtnutzung, Blendschutz und Sichtverbinderung nach außen zu optimieren. In der Kombination aller vier Funktionen erzielt WAREMA Genius deutlich nachweisbare Verbesserungen gegenüber konventionellen innenliegenden Sonnenschutzsystemen. Gegenüber den klassischen Lamellen erlaubt das neue Lamellenprofil eine sehr hohe Rückreflexion des direkten Sonnenlichtes selbst bei weit geöffneter Lamelle. Das sorgt für den guten Hitzeschutz. Ein großer Öffnungswinkel kann über eine lange Tageszeit beibehalten werden. Dadurch entsteht die großzügige Versorgung mit indirektem Tageslicht und die gute Durchsicht nach außen. Der mattweiße Lack für die Lamellenoberseite wurde speziell für die WAREMA Genius Lamellen entwickelt und erzielt sehr hohe Reflexionswerte. Die Lamellenunterseite ist blendungsreduzierend lichtgrau lackiert und leitet das einfallende Sonnenlicht farbneutral in den Innenraum.

Lichtlenk-Jalousien Genius können freihängend, mit Schienen- oder Seilführungen montiert werden.

Typ: Lamellenbehang

Montageort: Innen und Außen

Minimale Breite	1.000 m
Minimale Höhe	1.500 m
Maximale Breite	2.000 m
Maximale Höhe	3.000 m
Maximale Fläche	3.00 m <sup>2</sup>
Material Lamellenoberseite	Reinweiß
Material Lamellenunterseite	Reinweiß
Verkleidungshöhe	200 mm
Lamellenabstand	40 mm
Lamellendicke	30 mm
Lamellentiefe	1 mm

## Hemisphärische Transmissionsdiagramme (statisch)

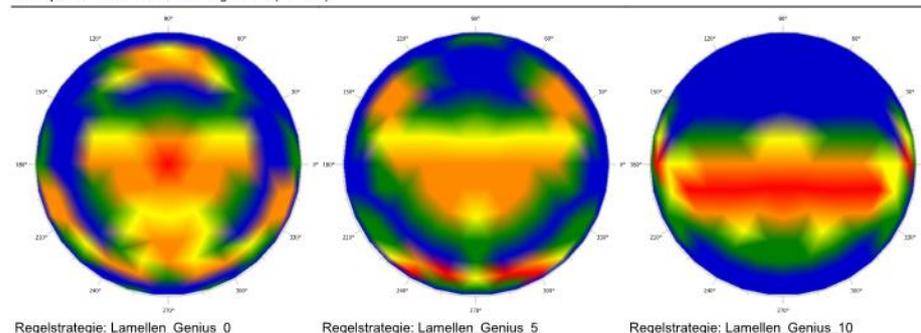


Bild 33:  
Produktdatenblatt.

### 8.3 Systemauswahl- und Ausgabedialoge

Zur Systemauswahl durch den Anwender wurden elektronische Kataloge mit geeigneten Suchfunktionen und Darstellungsmöglichkeiten entwickelt (Bild 34). Das Füllen mit geeigneten und notwendigen Daten obliegt dem Fassadenelementhersteller. Die elektronischen Kataloge binden sich nach der Installation automatisch in die Lichtberechnungssoftware DIALux evo ein, von wo aus sie geöffnet werden können. Darstellung und Layout entsprechen in den Grenzen eines Standardkataloges den Vorgaben des jeweiligen Herstellers, die Such- und Auswahlfunktionen sind fest implementiert.

Die Kataloge sind in der Lage, selbstständig im Internet neue Datenversionen zu finden und nach Rückfrage beim Anwender zu installieren.

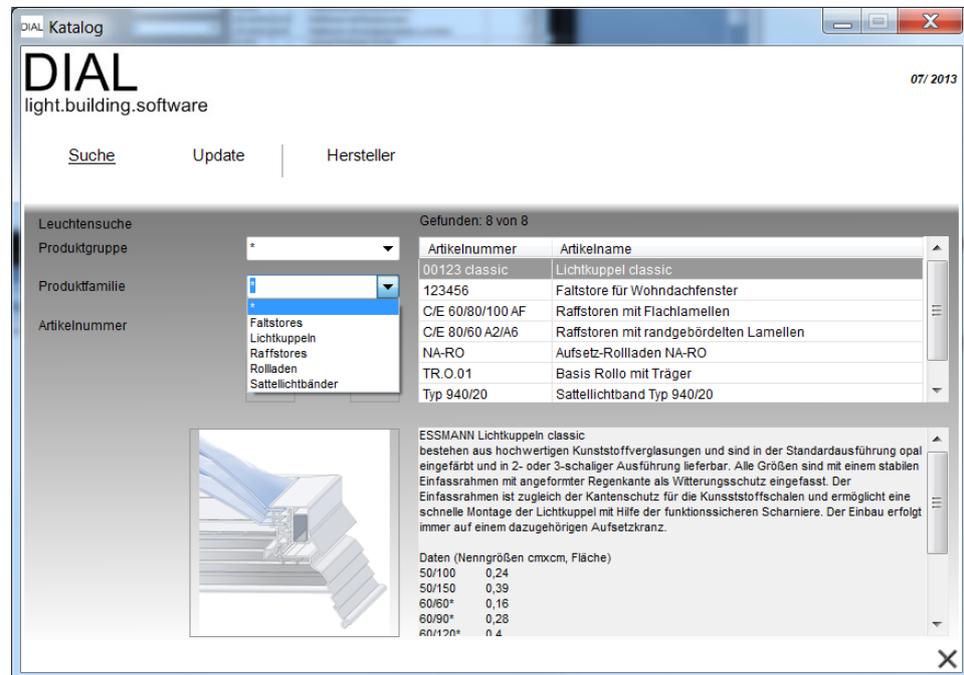


Bild 34:  
Prototyp eines elektronischen Kataloges.

Zur Eingabe der im DDLS geforderten Daten und zum Füllen der Katalogdatenbanken wurde ein eigenständiges Eingabewerkzeug geschaffen. Mit der sogenannten DMS (Data Management Software) kann der Hersteller von Fassadenelementen eigene Suchhierarchien, Produktbilder, Beschreibungstexte und Produktdaten eingeben und bearbeiten, sowie die Messdaten zuweisen und Regelstrategien verwalten. Änderungen und neuere Versionen des Datenbestands können vom Hersteller freigegeben und über das Internet den installierten Katalogen zur Verfügung gestellt werden.

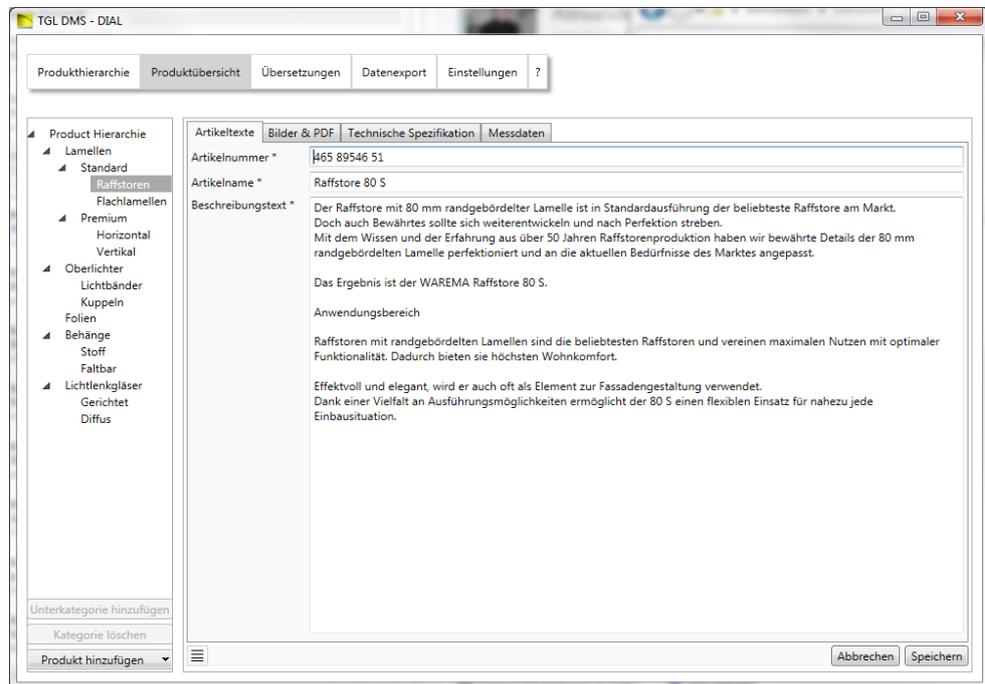


Bild 35:  
Daten Management Tool für Hersteller von Systemen zur Parametrierung von Pugins.

## 9 Validierung, Qualitätssicherung

### 9.1 Numerische (quantitative) Validierung

Die Kalibrierung und Validierung der Messanlage wurde bereits in Kapitel 5 vorgestellt. Darüber hinaus war die gesamte Berechnungsfunktionalität zu validieren. Hierbei wurde zunächst der fassadentechnische Algorithmus validiert. Abschließend wurde die Berechnung der Lichtausbreitung in Gebäudestrukturen überprüft.

Vorgehensweise: analytische Testfälle, Plausibilisierungen, Vergleich mit bereits validierten Referenzfällen -> Grenzfälle (idealer Diffusor, Glas), veröffentlichten internationalen Validierungsfällen für lichttechnische Software.

Bekannte Abweichungen werden dargestellt (aufgrund der Meßtechnik und der Numerik).

#### 9.1.1 Fassadentechnischer Algorithmus

Die durch den fassadentechnischen Algorithmus berechneten hinter der Fassade ins Rauminnere wirksamen Lichtstärkeverteilungen sind bzgl. ihres Absolutbetrages (Gesamtlichtstrom) und ihrer Abstrahlcharakteristik zu validieren. Die Berechnung kann auf Basis der direkt aus der Messanlage gewonnenen Daten

(vgl. Kapitel 5) oder aber bei Kombinationen von Fassadenkomponenten mit dem zwischengeschalteten Layermodell durchgeführt werden.

#### Grenzfallbetrachtung: idealer Diffusor und Loch in der Fassade

Zunächst wurde der Algorithmus mittels einer Grenzwertbetrachtung unter einem CIE-bedeckten Himmel validiert, dargestellt in Bild 36. Repräsentativ für diffus streuende Materialien (bzw. entsprechende photometrische Teilverteilung von Systemen) wurde ein Diffusor modelliert. Dies stellt theoretisch die Verteilung (Teilverteilung) mit dem am stärksten tieffrequenten Verhalten dar. Die vom Algorithmus errechnete Lichtstärkeverteilung basiert auf einem Datensatz eines mittels eines numerischen Goniophotometers errechneten idealen Diffusors. Die somit ermittelte, in Bild 36 dargestellte Lichtstärkeverteilung entspricht sehr genau der theoretischen Verteilung beschrieben durch:

$$I = I_0 \cos(\gamma) \text{ cd}$$

Die errechnete Lichttransmission liegt bei 99,1 % und damit fast exakt bei dem theoretischen Wert von 100 %.

Repräsentativ für den direkten Lichtdurchgang durch Fassadenelemente wird eine reine Lochblendenmessung aus dem Goniophotometer herangezogen. Dies stellt theoretisch die Verteilung (Teilverteilung) mit dem am stärksten hochfrequenten Signal dar. Die vom Algorithmus errechnete Lichtstärkeverteilung entspricht sehr genau der theoretischen Verteilung von

$$I_{1000lm} = \frac{3000}{7\pi} (1 + 2 \cos(\gamma)) \cos(\gamma) \text{ cd}$$

Die Lichttransmission wird zu 99,5 % errechnet und liegt somit wiederum fast genau bei dem theoretischen Wert von 100 %.

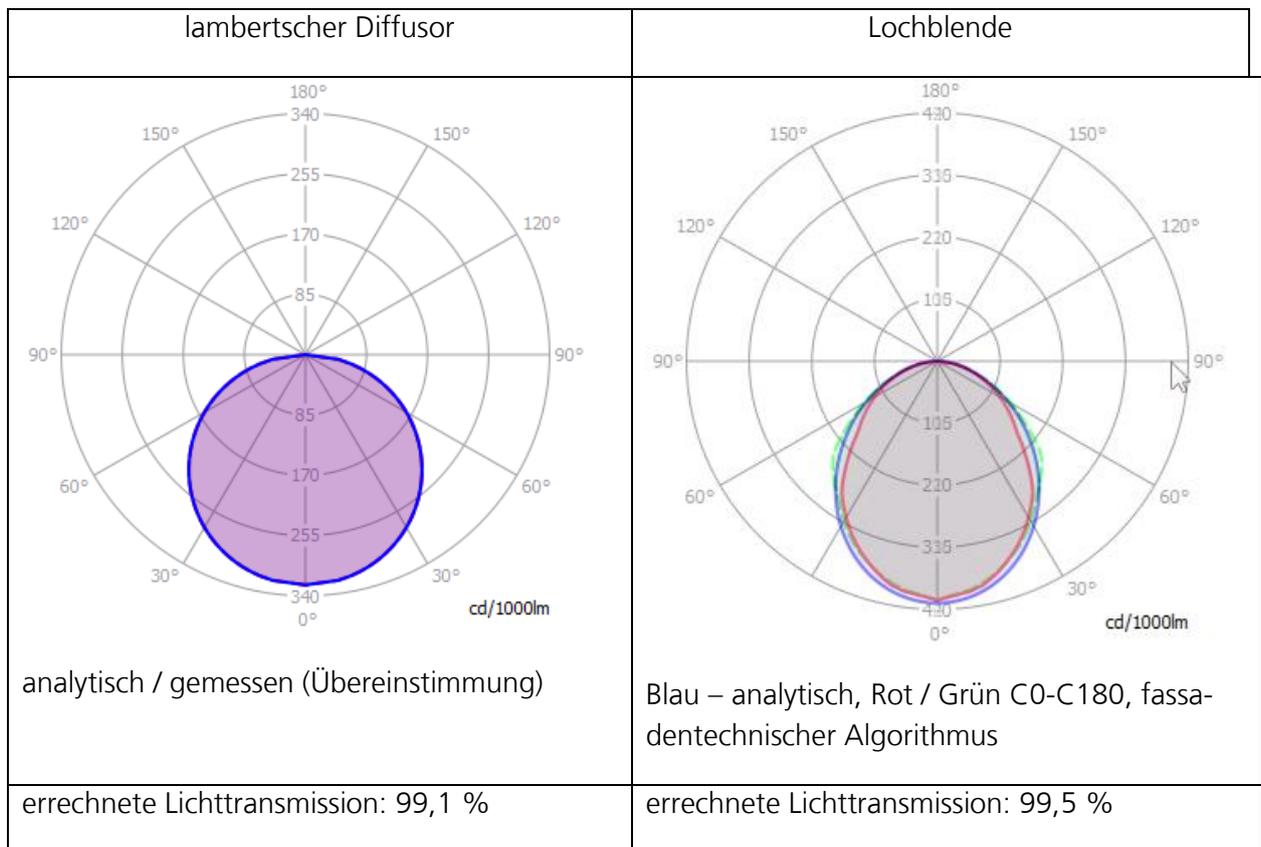


Bild 36:  
Lochblende und Diffusor: Gegenüberstellung der Modellierung einer Lochblende (gemessen als Lochblende ohne System im Goniophotometer) und einer analytisch erzeugten LVK.

### Durchstrahlungstest: Richtungstest mittels Loch in der Fassade

In einem weiteren Test wurde geprüft, ob die einstrahlende Lichtrichtung auch abstrahlseitig richtig dargestellt wird. Hierbei wurde wiederum von dem Datensatz der Lochblende ausgegangen und die Abweichung gegenüber der theoretisch richtigen direkten Durchstrahlung überprüft. Bild 37 stellt die ermittelten Abweichungen für die gemessenen Datensätze (42 gemessene BTDF gemäß Viertelraumsymmetrie der Tregenza-Diskretisierung) dar. Die Winkelabweichungen sind mit maximal +/- 2,5 ° gering. Sie sind auf die Positioniergenauigkeit der Messanlage sowie numerische Effekte in der Abtastung der Datensätze zurückzuführen.

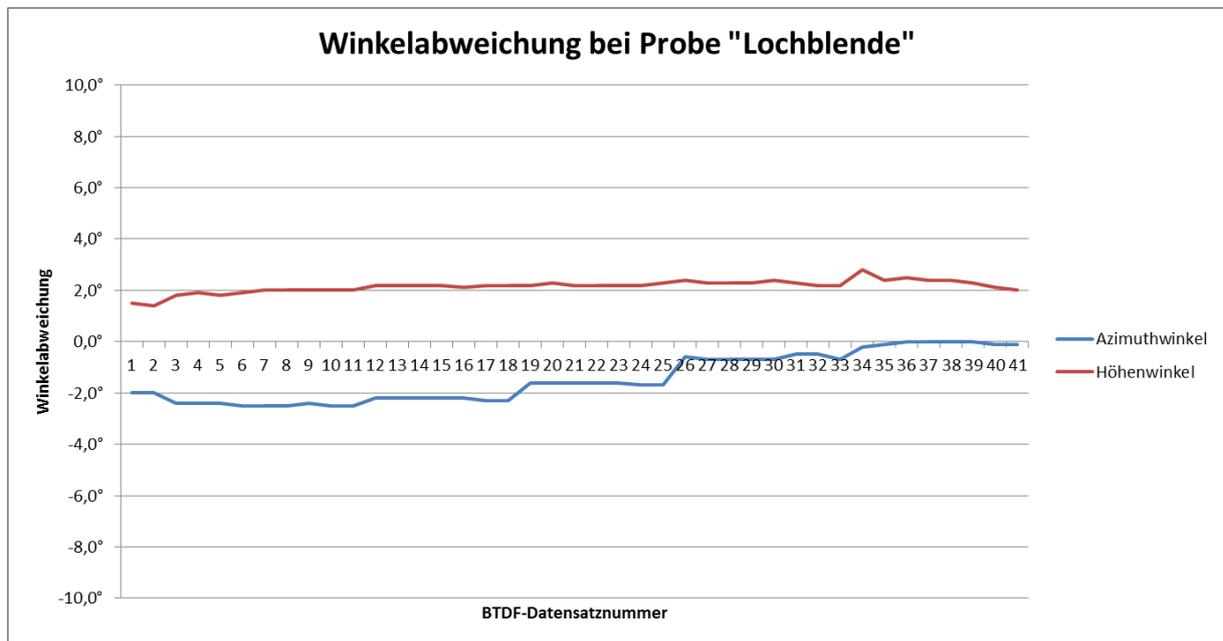


Bild 37:  
Gegenüberstellung der Winkelabweichungen zwischen theoretischen und realen Werten bei der Durchstrahlung einer Lochblende.

#### Lichttransport durch das Layermodell

Neben den zuvor genannten grundlegenden Überprüfungen wurde das Layermodell validiert. Hierzu wurde direkt mit einer in [Kle93] genannten Parametrierung verglichen, vgl. Bild 38.

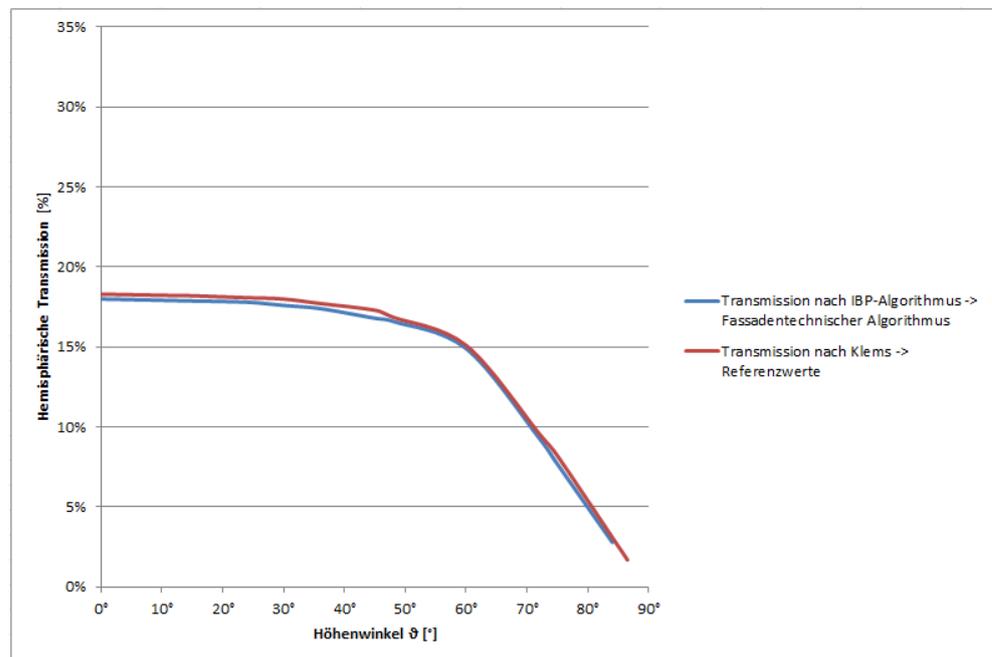


Bild 38: Vergleich des implementierten Layermodells gegenüber den in [Kle93] angegebenen Referenzwerten.

Darüber hinaus wurden die o.g. Tests (Grenzfallbetrachtung / Durchstrahlungstest) auch für vergleichbare Layermodelle durchgeführt. Diese lieferten entsprechend plausible Ergebnisse. Mittels zahlreicher Systemkombinationen aus gemessenen BTDF und analytischen Glasmodellen wurden ergänzende Plausibilitätsprüfungen durchgeführt.

### 9.1.2 Lichtausbreitung in Gebäudestrukturen (3)

Zur Validierung der Lichtausbreitung im Inneren von Gebäuden wird auf ein bereits normiertes Verfahren zurückgegriffen. Dieses ist im "CIE Report 171:2006 Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs" beschrieben. Auch, wenn es nicht direkt lichtlenkende Fassadenelemente adressiert, kann anhand der beiden Grenzfälle (Diffusor, offene Fassadenöffnung: Lochblende) sehr gut die Funktionstüchtigkeit der Implementierung geprüft werden. Die CIE 171-2006 stellt zu einfachen Testszenen mit Tageslicht Sollergebnisse bereit.

Folgende Testfälle konnten zum Test des Talisys-Verfahrens genutzt werden:

- Testfall 5.3: bedeckter Himmel mit 1m x 1m Oberlicht in einem 4m x 4m x 3m Raum, diffuser Messdatensatz als Referenzberechnung.
- Testfälle 5.9: bedeckter Himmel / klarer Himmel mit Oberlichtern in einem 4m x 4m x 3m Raum.

- Testfälle 5.11: bedeckter Himmel / klarer Himmel mit Fenstern in einem 4m x 4m x 3m Raum.

Diese Testräume wurden in DIALux evo nachgebaut, berechnet und mit den Sollwerten der CIE 171-2006 in verglichen.

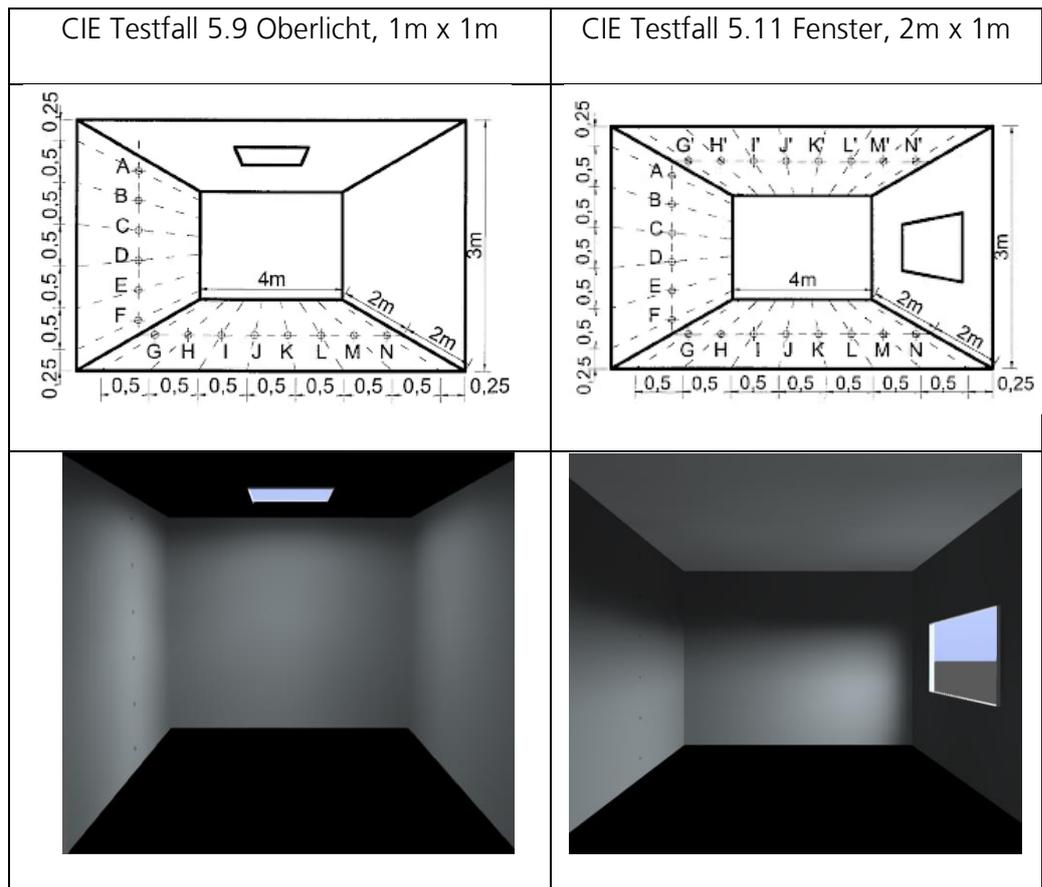


Bild 39: Vergleich des implementierten Layermodells gegenüber den in [Kle93] angegebenen Referenzwerten.

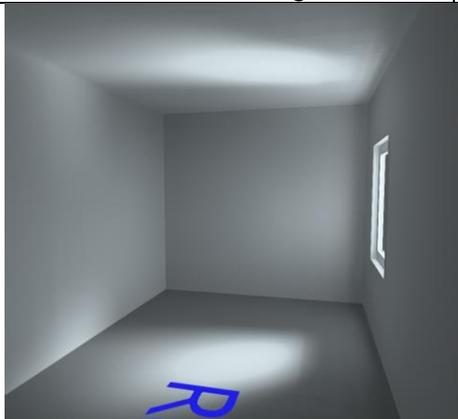
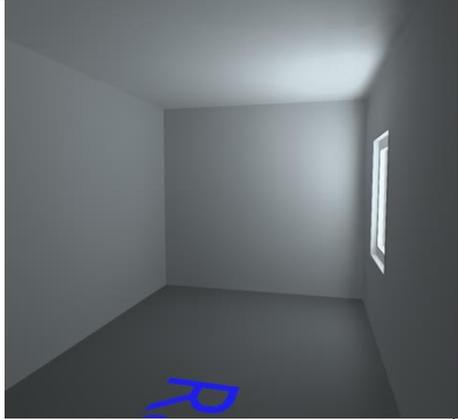
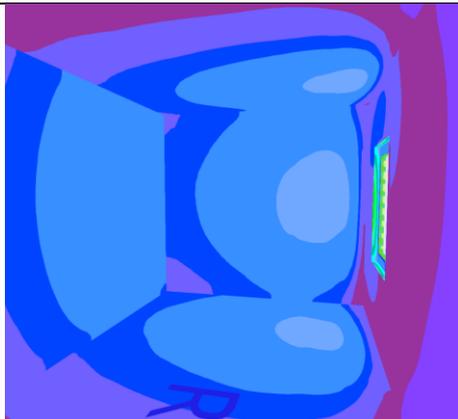
Tabelle 4: mittlere relative Abweichung gegenüber den CIE-Testfällen auf gegebenen Berechnungspunkten. Ergebnisse ohne Fassadensysteme (Klarglas).

Testfall	Abweichung [%]	
	bedeckter Himmel	klarer Himmel
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 1m x 1m	1,18	2,25
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 4m x 4m	0,93	0,88
CIE 171-2006 5.11, Fenster 2m x 1m	1,16	0,48
CIE 171-2006 5.11, Fenster 4m x 3m	1,19	0,77

Tabelle 5:  
mittlere relative Abweichung gegenüber den CIE-Testfällen auf gegebenen Berechnungspunkten.  
Ergebnisse mit Fassadensystemen.

Testfall	Abweichung [%]	
	bedeckter Himmel	klarer Himmel
CIE 171-2006 5.3, diffuser Messdatensatz, Oberlicht 1m x 1m	2,97	nicht bestimmt
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 1m x 1m	3,64	6,73
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 4m x 4m	1,13	1,29
CIE 171-2006 5.11, Fenster 2m x 1m	2,36	2,62
CIE 171-2006 5.11, Fenster 4m x 3m	1,18	0,91

Die Berechnungen konnten gemäß der Vorgaben der CIE 171- 2006 durchgeführt werden. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen und liegen innerhalb der erlaubten Fehlertoleranz.

Lamellenwinkel	Visualisierung	Falschfarbendarstellung
0° (Horizontal)		
45°		
80° (Geschlossen)		

Skala (in lx): 1.00 2.00 3.00 5.00 7.50 10.00 20.00 30.00 50.00 75.00 100.00 200.00 300.00 500.00 750.00 1000.00 2000.00 3000.00

Bild 40:  
Gegenüberstellung der Visualisierungen und Falschfarbendarstellungen der Lichtausbreitung in einem südorientierten Raum am 21. März, 12:00 Uhr in Abhängigkeit des Anstellwinkels einer Jalousie. Die Bilder sind in einer Seitensicht dargestellt.

Darüber hinaus wurden zahlreiche Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Beispielsweise ist in Bild 40 die Gegenüberstellung der Lichtausbreitung in einem südorientierten Raum am 21. März, 12:00 Uhr in Abhängigkeit des Anstellwinkels einer Jalousie gezeigt. Bild 41 enthält die Darstellung des Tagesgangs für ausgewählte Uhrzeiten für ein hochtransparentes Fassadensystem.

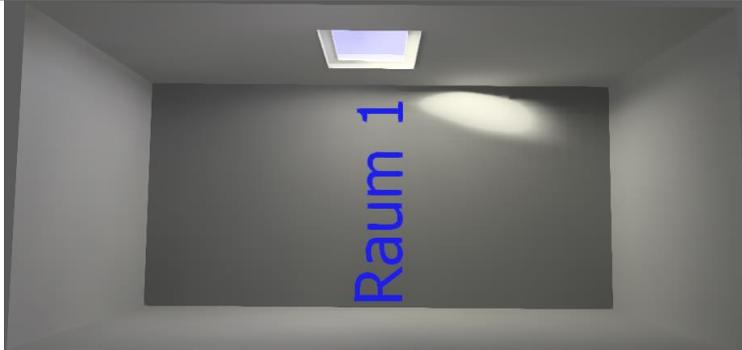
Uhrzeit	Darstellung
10:00	
12:00	
14:00	

Bild 41:  
Gegenüberstellung der Lichtausbreitung im Raum am 21. März von 10:00 bis 14:00 Uhr in 2 h Schritten. Die Bilder sind in einer Aufsicht dargestellt.

Bild 42 stellt die Beleuchtung durch ein Mikrosonnenschutzraster dar. Dies wirkt wie ein miniaturisiertes Shed. Ein automatischer Platzierungsalgorithmus

platziert es richtig (Bild 42 rechts). Fehlplanungen durch falsch orientierten Einbau (Bild 42 links ) werden vermieden.

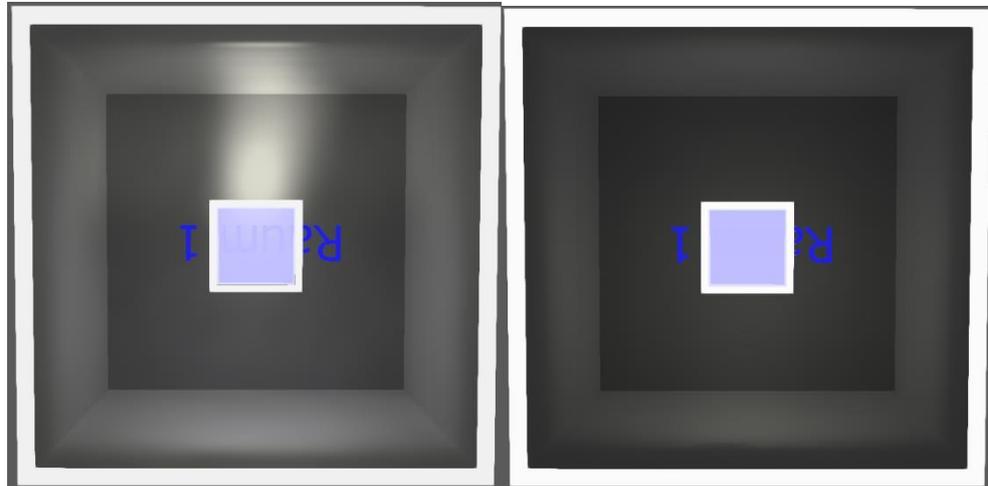


Bild 42:  
Gegenüberstellung des falsch (linkes Bild) und richtig (rechtes Bild) orientierten Mikrorasters für Dachoberlichter. Die Bilder sind in einer Aufsicht dargestellt.

## 9.2 Qualitative (softwareergonomische) Qualitätssicherung

Die neuen Softwarekomponenten wurden mit etablierten Softwarequalitätssicherungsverfahren allgemein auf Qualität geprüft. Hierbei wird speziell die Softwareergonomie durch ausgewählte potentielle spätere Anwender erprobt und wo erforderlich optimiert.

## 10 Verwertungsplan

Die Verwertung der Projektergebnisse findet auf unterschiedliche Weise durch die drei Zielgruppen des Projektes statt.

### Planer

Da die Software DIALux evo bereits in der Planungswelt eingeführt ist, können die Projektergebnisse nach Projektende durch Bereitstellung eines Updates kostenfrei in der Praxis genutzt werden. Hierbei ist von einer sehr hohen Reichweite in die Planerschaft hinein auszugehen. Die Software ist im Vergleich zu anderen gebräuchlichen Planungsprogrammen im Gebäudebereich herausragend stark etabliert. Zu den Hauptanwendergruppen gehören Ingenieurbüros, Lichtplaner und Architekten, die unmittelbar von den Projektergebnissen profitieren können. Des Weiteren wird das Programmsystem verbreitet in der Aus- und Weiterbildung eingesetzt. Durch die neuen Funktionen ist von der Gewinnung weiterer Anwender auszugehen. Die Software ist seit mehr als 15 Jahren in der

Planungswelt etabliert und wird von einer breiten Allianz von Leuchtenherstellern für die kunstlichttechnischen Planungsfragestellungen getragen. Eine kontinuierliche Programmpflege und auch Betreuung von Nutzern ist vor diesem Hintergrund gesichert. Damit ist die mittel- und langfristige Anwendung der Projektergebnisse gewährleistet.

Durch die Entwicklung einer effizienten Messtechnik und einer hierauf zurückgreifenden Messkampagne steht ein großer, repräsentativer Satz bewertbarer Fassadensysteme / -lösungen aus den Bereichen Glastechnik, Sonnen- und Blendschutz und Dachoberlichter der Planerschaft mit Projektende zur Verfügung. Über das Projektende hinaus ist von einem weiteren Anwachsen erfasster Fassadensysteme auszugehen. Dies wird auf breiter Basis Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen technischen Lösungen fördern und zu besseren geplanten und umgesetzten Lösungen führen.

#### Fassadenhersteller

Die als Drittmittelgeber die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dieses Projektes unterstützende Industrie sieht die großen Potentiale der technischen Weiterentwicklung der Planungswelt in Richtung Tageslichttechnik. Es ist zu erwarten, dass nach Projektende die Fassadenhersteller diese Planungsunterstützung weiter ausbauen werden. Da deutsche Planer auch stark international tätig sind und die Software international Verbreitung findet, kann Lösungen deutscher Hersteller mit Hilfe des Projektes damit mittelfristig auch im Export der Weg bereitet werden.

Der Fassadenindustrie stehen mit den Projektergebnissen generell neue Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Aus den dann möglichen umfassenden lichttechnischen und energetischen Bewertungen können Lösungen für Produktinnovationen (Weiter- und Neuentwicklungen) abgeleitet werden. Auf bisher übliche kostenintensive Voruntersuchungen von Prototypen in realen Räumen kann weitestgehend verzichtet werden.

#### Software-Hersteller

Durch Veröffentlichung des Datenformats wird eine zukünftige Vereinheitlichung der lichttechnischen Messungen von Fassaden angestrebt. Durch Lizenzierung des fassadentechnischen Algorithmus in Form einer API können die Berechnungsfunktionalitäten für verschiedene weitere Planungsprogramme nutzbar gemacht werden. Andere Softwareentwickler und auch Messinstitute können hiervon profitieren.

## Vorträge, Veröffentlichungen

Das Projekt wurde bisher auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- de Boer, J.; Polle, D.; Schmidt, M.; Winter, H-C.: qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung für die Beratungspraxis; Tagungsband, Licht 2014, Den Haag, Niederlande (2014).
- Bremecker, F.W.: Lightshow South West; Dallas, USA (2014).
- Witzel, D.: DIALux Conference 2014, Lüdenscheid, Deutschland (2014).
- Witzel, D.: DIAL informiert, Planen mit der neuen DIALux evo; Lüdenscheid, Deutschland (2015).
- Bremecker, F.W.: CIBSE Chartered Institution of Building Services Engineers; London, UK (2015).

Veröffentlichungen in den Fachzeitschriften Licht und Bauphysik sind in Vorbereitung. Dies wird ergänzt durch Informationsmaßnahmen der Projektpartner selbst (Pressemitteilungen, Newsletter, Mitteilungsblätter).

## 11 Fazit

Mit dem Projekt wird die qualitative und quantitative lichttechnische und energetische Fassadenplanung in der breiten Beratungspraxis durch Bereitstellung geeigneter Planungswerkzeuge ermöglicht. Energetische und umweltrelevante Einflüsse unterschiedlicher Systemlösungen können verglichen und optimiert werden (z. B. Einsatz eines Lichtlenkglases gegenüber einer geschlossenen Jalousie). Die Vorhabensziele konnten erreicht werden und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erweiterung Messmöglichkeiten durch Umbau Goniophotometer: Die Messanlage wurde funktional wie geplant erweitert. Eine automatisierte Positioniereinrichtung für Lamellendrehwinkel und eine Einrichtung für die Positionierung der Lamellen über der Blende wurden umgesetzt. Eine neue Baugruppe für BRDF Messungen wurde ergänzt. Für Transmissionsmessungen wurde eine Farbleuchtdichtemesskamera integriert. Während der Umsetzung musste die Kippvorrichtung der schwerer gewordenen Messplattform konstruktiv stabiler ausgelegt werden.
- Umfangreiche Sammlung lichttechnischer Kennwerte von Fassadenkomponenten: Mit der Messeinrichtung wurden mit 51 mehr als die ursprünglich geplanten 30-40 Systeme vermessen. Somit steht der Planerschaft eine große Auswahl an Fassadenkomponenten zur Verfügung.
- Erweiterung und Verbesserung „Fassadentechnischer Algorithmus“: Die Genauigkeit und die Berechnungsgeschwindigkeit des fassadentechnischen Algorithmus konnte erheblich gesteigert werden. Es können nun farbige Komponenten berücksichtigt werden, Mehrschichtsysteme können berechnet werden. Bei bestimmten Komponenten mussten zusätzlich automatische Positionierfunktionen implementiert werden, um den richtigen Einbau der Systeme in den Rechenmodellen zu garantieren.
- Berechnung der Lichtausbreitung durch komplexe Fassadenkomponenten in Gebäudestrukturen: Die Softwarekomponenten wurden wie geplant umgesetzt und in der Software integriert. Die Berechnungszeiten liegen deutlich unter denen bisher verfügbarer Programme. Die Simulation von Tageslichtlenksystemen steht damit der Planerschaft für die tägliche Arbeit zu Verfügung. Die Darstellung von 3D-Modellen verstärkt den realistischen Eindruck der Simulation und erhöht den Wiedererkennungswert der eingesetzten Produkte.
- Validierung und Plausibilisierung bestätigen erwartete Genauigkeit: Die Berechnungsfunktionalität wurde numerisch gegen vorliegende Referenzda-

tensätze validiert und funktional zahlreichen Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Die Grenzen der Genauigkeit konnten den generellen messtechnischen und algorithmischen Ansätzen zugeordnet werden.

- *Umfassende Systembeschreibung durch neue Datenformate:* Basierend auf Rohdatenformaten aus der Messanlage wurde ein neues offenes XML-basiertes Systembeschreibungsformat für Fassadenkomponenten entwickelt. XML-Dateien können einfach gelesen und geschrieben werden, so dass eine weitere Verwendung durch Dritte im Anschluss des Projektes möglich ist. Das Format ist vom Konzept her vergleichbar mit der standardisierten Darstellung von Leuchtendaten (im sog. Eulumdat Format). Das Format ist allerdings aufgrund der erheblich höheren Komplexität von Fassadensystemen deutlich umfangreicher.
- *Praxisorientierte Workflows und Bedienkonzepte:* Die Anwendung und Parametrierung der neuen Berechnungsfunktionalität wurde in die Benutzerführung des Programms DIALux evo eingebunden. Ein- und Ausgaben wurden mit der Sicht von Planern abgestimmt und optimiert.
- *Kostenlose Bereitstellung der Funktionalität für die Planungspraxis:* Die Projektergebnisse werden der Planerschaft kostenlos über das frei herunterladbare Programm DIALux evo zur Verfügung gestellt.

Aus den Arbeiten im Projekt und der Abstimmung mit Industrie und Praxis entstanden weitere Fragestellungen für zukünftig als notwendig erachtete Arbeiten. Es wird erwartet, dass die für die Praxis wichtige, verfügbare Anzahl von gemessenen Systemen im Rahmen gewöhnlicher Dienstleistungsarbeiten mit der Industrie wachsen wird. Konkreter weiterer Forschungsbedarf dagegen wird für folgende Themencluster gesehen:

- *Bewertbarkeit des Einflusses des Lichtmanagements auf das energetische Verhalten:* Automatisierte Berechnung des Tageslichteinfalls auf Basis der Fassadensysteme und Verrechnung gemäß Lichtmanagementstrategie mit der elektrischen Beleuchtung zu den geforderten Beleuchtungsniveaus und hieraus Ermittlung z. B. monatlicher oder jährlicher Energiebedarfswerte. Differenzierung in ein Detailverfahren (gesamte Lichtausbreitung im Raum) und ein Schnellverfahren (gezielte Punkte für die Regelung / Steuerung im Raum). Miteinbeziehung des Marktes für Lichtmanagement.

- Weitere Verbesserung der Genauigkeit der photometrischen Algorithmen und Visualisierungen:
  - Um quasi kontinuierliche Übergänge zwischen den einzelnen BTDF zu erzielen, Integration geeigneter Interpolationsmethoden (z. B. auf Basis von „Mass-Transportation-Algorithmen“).
  - Verbesserung der Visualisierung durch Raytracing durch die geometrische Strukturen, Verrechnung mit der LVK des Systems.
- Farbliche Interpolation: Sortimente von Sonnenschutzherstellern weisen häufig eine große Vielfalt der angebotenen Farben und Stoffe auf, was in einer großen Anzahl zu vermessender Proben resultiert. Entwicklung eines Modells, mit Hilfe dessen - basierend auf wenigen Messungen - große Sortimente von Behängen fester Geometrie, aber variierender Oberflächen-güte (Farben) erfasst und beschrieben werden können.
- Erweiterung der Produkttypen: Nach den bisher umgesetzten, häufig ein-gesetzten Produkttypen gibt es weitere auf dem Markt verfügbare Produkt-typen mit eigener geometrischer Beschreibung.
- Ausdehnung auf thermisches, energetisches Verhalten: Neben dem licht-technischen Verhalten spielt das energetische Verhalten von Fassaden ein zentrale Rolle in der Baupraxis. Ausdehnung der hier entwickelten Ansätze auf die Bewertung des thermisch, energetischen Verhaltens von Fassaden.

Diese Arbeiten könnten Grundlage für eine zweite Projektphase sein.

## 12 Literaturverzeichnis

- [And06] ANDERSEN, M. und DE BOER, J.: *Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems*. Energy and Buildings 38, H. 7, S. 836-848., 2006.
- [Ayd99] AYDINLI H. und KAASE H.: *Measurement of Luminous Characteristics of Daylighting Materials*. A Report of IEA SHCP TASK 21 / ECBCS ANNEX 29, Technical University of Berlin, 1999.
- [Boe06] DE BOER, J.: *Modelling Indoor Illumination by Complex Fenestration Systems Based on Bidirectional Photometric Data*. Energy and Buildings 38, H. 7, S. 849-868, 2006.
- [DeB06] DE BOER, J.: *Lichttechnisches und energetisches Verhalten von Fassaden moderner Verwaltungsbauten*. Bauphysik 28, Teil1: H.1, S. 27-44; Teil 2: H.2, S. 103-110, 2006.
- [Boe10] DE BOER, J.; PANHANS, B. und STÖSSEL, F.: *Neue lichttechnische Bewertungsmöglichkeiten von Fassadensystemen: Das IBP-Photogoniometer*. IBP-Mitteilung 499/2010.
- [DIAL] *DIALux, Lichtplanungssoftware*. Deutsches Institut für angewandte Lichttechnik GmbH, DIAL, [www.dial.de](http://www.dial.de).
- [Kle93] KLEMS, J.H.: *A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems: 1, Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation*. N. p., Web, 1993.
- [Lig06] *LIGHT'S LABOUR'S LOST, Policies for Energy-efficient Lighting*. IEA, Paris , 2006.

A 1

Anhang

## A. XML-basiertes Datenformat

Eine exemplarische Parametrierung eines Systems ist Bild 43 zu entnehmen.

XML	
Comment	IBPCfsPhotometryDataPackTool 0.9.4.0
Comment	Created: 23.04.2015
IBPCfsPhotometryData	
xmns:dt	urn:schemas-microsoft-com:datatypes
xmns:SchemaL...	http://talisis.de/schema/IBPCfsPhotometryData.xsd
xmns:xsi	http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance
id	Lochblende_Viertelraum
name	Lochblende Viertelraum
folder	Lochblende
FolderPreFixFor...	Lochblende_25082014
IsStaticSystem	true
CouldBeMounte...	false
PrecalculatedRo...	false
Manufacturer	FhG
Material	
Measurements	
Measurements...	
DateOfMeasure...	
Contact	
Periodicity	0
ThermalData	
SystemStateSet	
SystemState	
id	Lochblende
name	Lochblende
description	Lochblende
folder	Lochblende
LamellaAngle	0
Tau_Diff_f	0
Tau_Dir_f	0
Tau_Diff_b	0
Tau_Dir_b	0
Rho_Diff_f	0
Rho_Dir_f	0
Rho_Diff_b	0
Rho_Dir_b	0
BTDFData_f	
id	BTDFData_f
name	BTDFData_f
FilenameDisFile	Lochblende_Viertelrau m.dls2
TransmissionReflectionDataSet	
ControlStrategySet	
ControlStrategy	
id	Lochblende
name	Lochblende
FlagForControlA...	0
IDOfSystemStat...	Lochblende

Bild 43:  
Ausschnitt einer XML-Systembeschreibungdatei.

B 1

## B. Dokumentation der API

Die Klassen der API sind in den nachfolgenden Klassendiagrammen abgebildet.

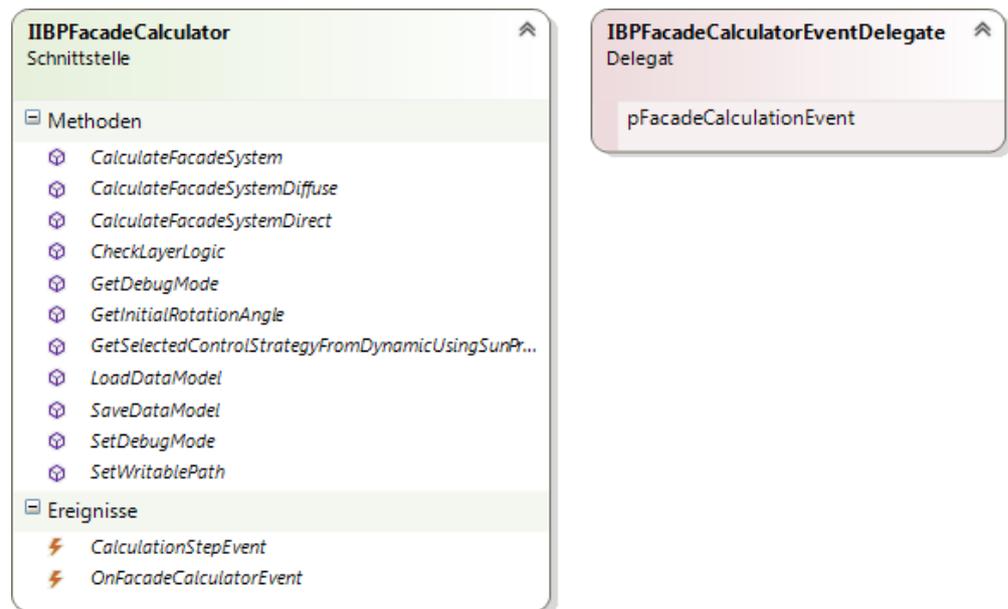


Bild 44:  
Schnittstelle.

B 2

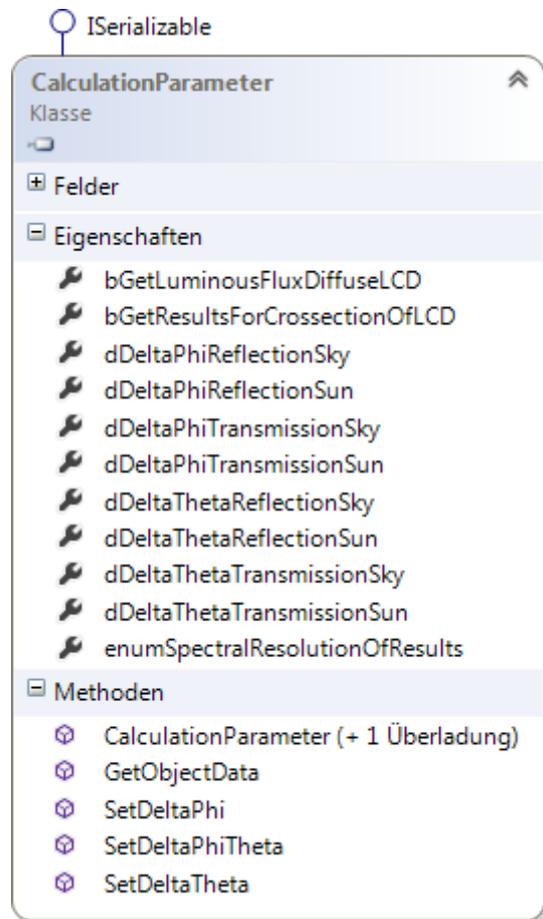


Bild 45:  
Berechnungsparameter.

B 3

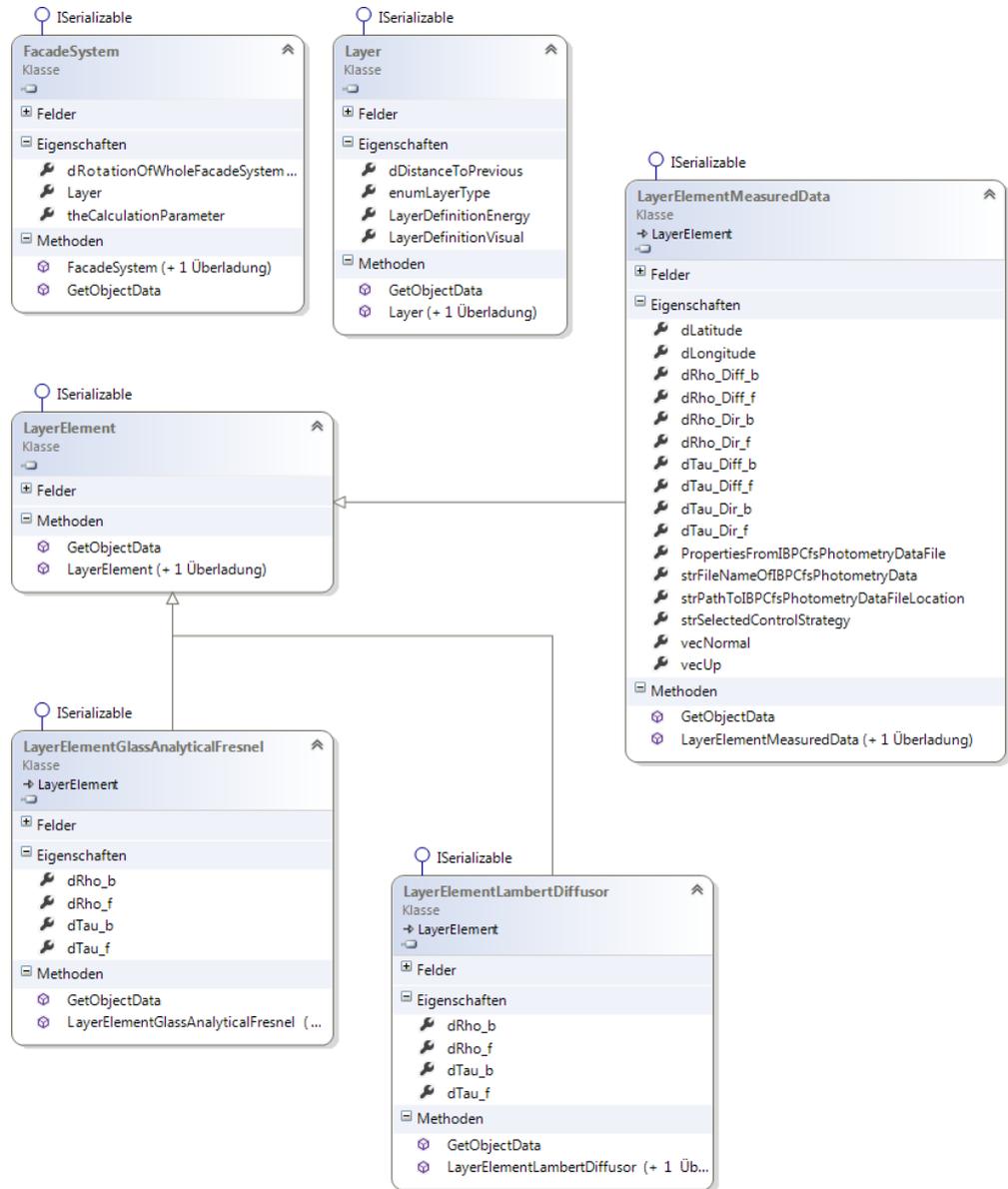


Bild 46:  
Klassenmodell für das Fassadensystem.

B 4

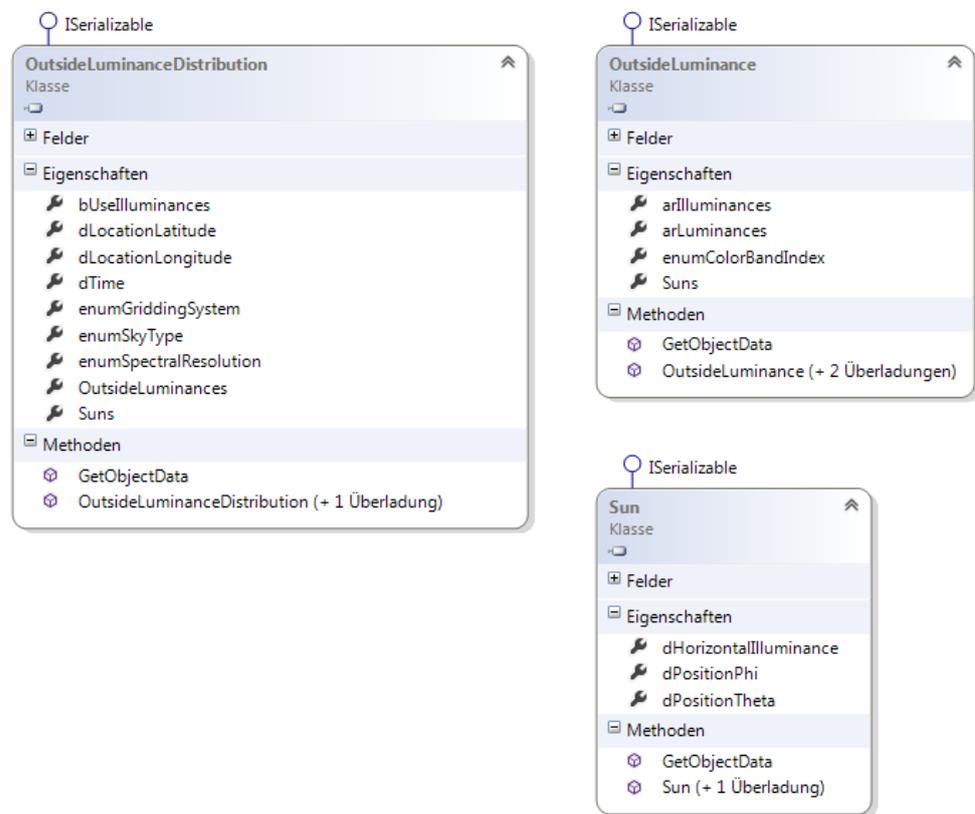


Bild 47:  
Außenleuchtdichteverteilung.

B 5

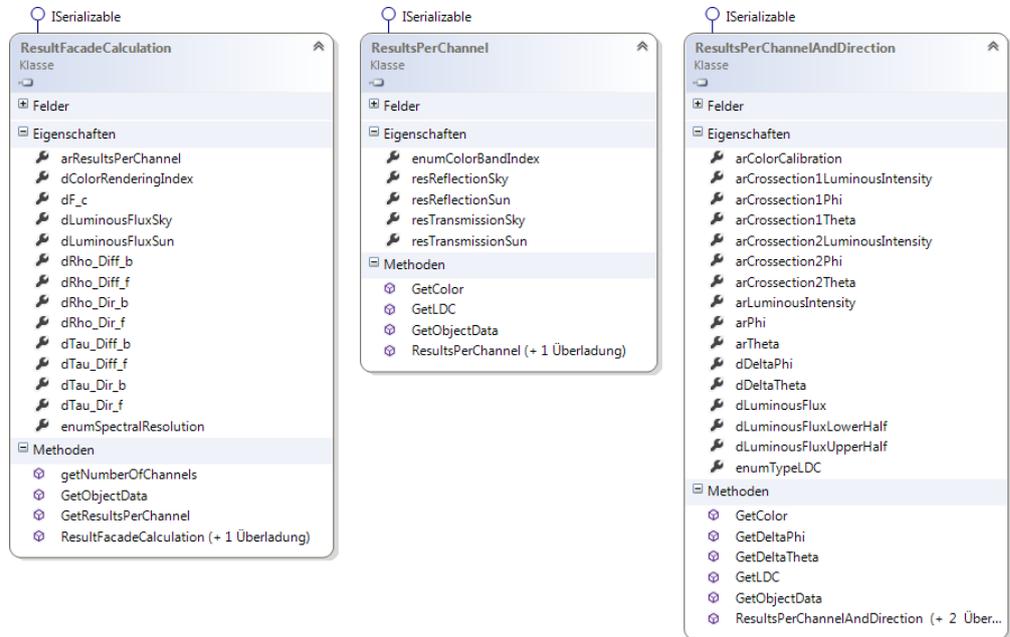


Bild 48:  
Ergebnisse.