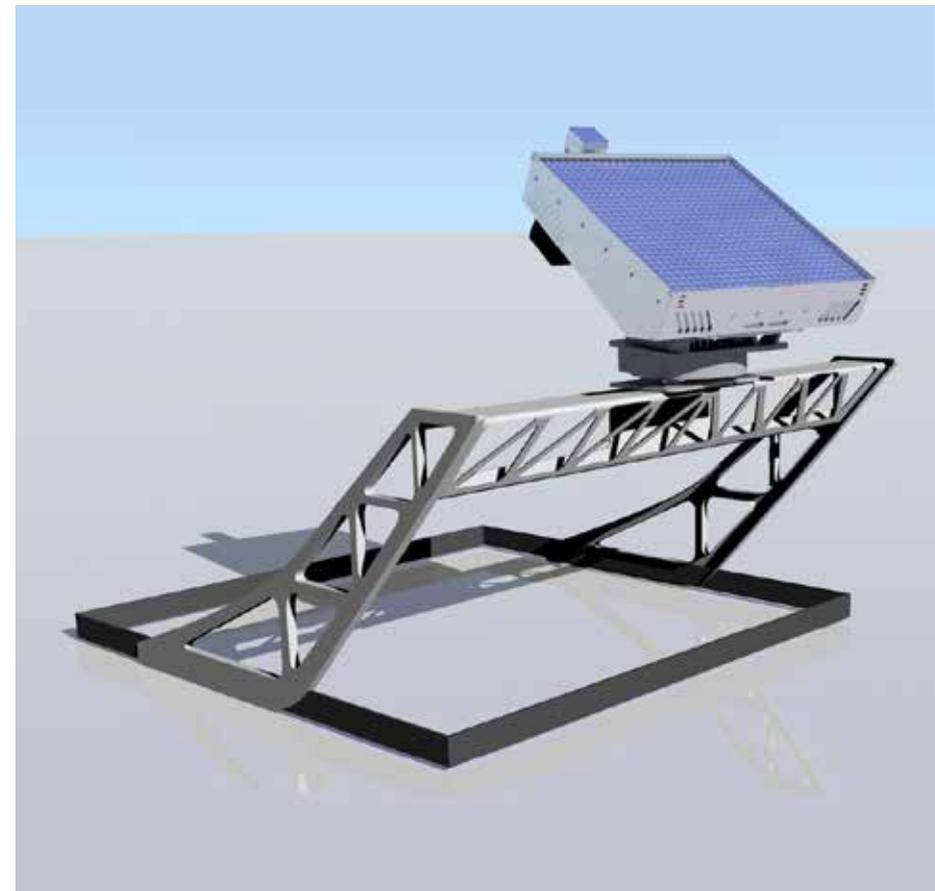


Fakultät Architektur

SOLLEKTOR und Lichtkuppel – Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach

Roland Krippner (Projektleitung)



Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner
(Antragsteller, Projektleitung)
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Fakultät Architektur
Bahnhofstraße 90, 90402 Nürnberg
Telefon: 0911 / 5880-2133, Telefax: 0911 / 5880-6100
roland.krippner@th-nuernberg.de
<http://www.th-nuernberg.de/ar/>
Bearbeiter: (B.A.) Thomas Berghofer, (B.A.) Marcel Neberich
Mitarbeit: (B.A.) Verena Schmidt

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Bearbeiter

Kooperations-Partner

Die Bearbeiter bedanken sich bei der
STAEDTLER Stiftung Nürnberg und ihrem
Vorsitzenden Herrn Dieter Schoch
für Förderung und finanzielle Unterstützung
der Projektarbeiten

Prof. Dr.-Ing. Friedo Mosler
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Fakultät Bauingenieurwesen
Kesslerplatz 12, 90489 Nürnberg
Telefon: 0911 / 5880-1220, Telefax: 0911 / 5880-5164
friedo.mosler@th-nuernberg.de
<http://www.th-nuernberg.de/bi/>

Prof. Dr.-Ing. Hans Poisel
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
POF Application Center
Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg
Telefon: 0911 / 5880-1189, Telefax: 0911 / 5880-5070
hans.poisel@th-nuernberg.de
<http://www.pofac.de/de>
Mitarbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Martin Bloos

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Stephan
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
ieg - Institut für Energie und Gebäude
Kesslerplatz 12, 90489 Nürnberg
Telefon: 0911 / 5880-1290, Telefax: 0911 / 5880-5854
wolfram.stephan@th-nuernberg.de
<http://www.ieg.th-nuernberg.de>
Mitarbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz

Inhalt

1	Ziele des Vorhabens	3	SOLLEKTOR und Lichtkuppel
1.1	Ausgangslage	3	
1.2	Projektziele	3	Inhalt
2	Stand der Wissenschaft und Technik	4	
2.1	Sollektor	5	
2.2	Lichtkuppeln	6	
2.3	Sollektor und Lichtkuppel	8	
3	Vorarbeiten	9	
3.1	KV- Gebäude	9	
3.2	Modell 1:10	10	
3.3	Morphologische Übersicht	10	
4	Tageslichtstudien	15	
4.1	Messung mit Kunstlicht	17	
4.2	Simulationsberechnungen Bestand (KV-Gebäude)	22	
4.3	Kunstlichtuntersuchungen	25	
4.4	Simulationsberechnungen	26	
4.5	Tageslichtuntersuchungen	33	
4.6	Verschattungszeit	39	
4.7	Vergleich	40	
5	Konstruktions- und Prototypenplanung	42	
5.1	Formstudien	42	
5.2	Prototypenbau	46	
6	Zusammenfassung und Ausblick	48	
7	Anhang	49	
7.1	Literaturverzeichnis	49	
7.2	(Poster-)Präsentationen	50	
7.3	Abbildungsverzeichnis	50	
7.4	Datenblätter	51	

1 Ziele des Vorhabens

1.1 Ausgangslage

Die Nutzung von Tageslicht in Gebäuden stellt im Kontext der Forderung nach Energieeffizienz und Ressourcenschonung beim Bauen eine wichtige Planungsstrategie dar. Dies betrifft gleichermaßen die Verbesserung des visuellen Komforts am Arbeitsplatz und im Wohnraum. Bisher standen vor allem Verwaltungsbauten mit hochverglasten Fassadenflächen im Blickpunkt des Interesses. Aber auch im der Bereich der Gewerbe- und Industriebauten bestehen enorme Energieeinspar- und Tageslicht-Verbesserungspotentiale. Seit Jahrzehnten sind verstärkt Anstrengungen zur Erhöhung der Tageslichtnutzung festzustellen, was in einer Vielzahl an Weiter- und Neuentwicklungen von Tageslichtsystemen sich widerspiegelt. Ein solch innovatives und mehrfach ausgezeichnetes System ist der an der Technischen Hochschule Nürnberg, Anwendungszentrum für Polymere Optische Fasern (POF-AC) entwickelte Sollektor.

Bei den räumlich tiefen Ausstellungs- und Gewerbehallen stellt die Tageslichtnutzung über das Dach mit (Ober-)Lichtkuppeln eine weitverbreitete Standardlösung dar. Die meist kleinformatischen Lichtkuppeln (60 x 60 cm / 100 x 100 cm) sind in vielen Querschnittsformen und unterschiedlicher Materialausführung (Stahl, Aluminium, glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder PVC) erhältlich. Allerdings ist festzustellen, dass die Qualitäten der Tageslichtgewinnung angesichts der meist starren und rigiden Anordnung meist nicht optimal ausgeschöpft werden. Darüber hinaus stellt heute gerade bei Oberlichtern (mit teils mehrschichtigen und mehrschaligen Aufbau zur Verbesserung des Wärmeschutzes) die Vermeidung von Überhitzung und Blendung für eine gute Raumkonditionierung eine wichtige Anforderung dar.

Angesichts des enormen Potentials an vorhandenen Flachdächern – es existiert eine Vielzahl von Gewerbe- und Industriebauten, Messe- und Ausstellungshallen, deren Dächer für Belichtung und Belüftung Lichtkuppeln aufweisen – verspricht eine derartige Systemkombination eine enorme qualitative und quantitative Ausweitung des Einsatzspektrums des Sollektors.

1.2 Projektziele

In dem Projekt sollen Synergien und Korrelationen von Sollektor und Lichtkuppel untersucht und Anforderungen der baulichen Integration beispielhaft aufgezeigt werden, u.a.:

- Funktional: Optimierung der Tageslichtausbeute, Vermeidung von Überhitzung und Blendung unter Beibehaltung von Öffnungsmöglichkeiten (Lüftung, Brandschutz)
- Konstruktiv: Koppelung / Adaption am Aufsatzkranz, Lichtleiterdurchführung
- Gestalterisch: Schlankheit der Unterkonstruktion, Design der Fügung

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Ziele des Vorhabens

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Tageslicht ist für das menschliche Wohlbefinden von eminenter Bedeutung, das haben mannigfache Untersuchungen gezeigt und hat mittlerweile schon allgemeingültigen Charakter. Das Licht im tages- und jahreszeitlichen Rhythmus ist wichtiger Informationsträger, unter anderem für das Zeitgefühl, es beeinflusst positiv Stimmungslage und Leistungsfähigkeit und nicht zuletzt die Gesundheit des Menschen. Im Vergleich zum Kunstlicht wird Tageslicht "in der Regel als schöner und angenehmer empfunden"¹, zudem gilt gerade der Wechsel und die Dynamik des Tageslichts als stimulierend. Es zeigt sich, dass selbst 'störende' Effekte, wie Blendung durch Sonnenlicht, als weniger belastend empfunden werden.

Dagegen gilt das Fehlen von Tageslicht, mit der Folge von Mangel an UV-Strahlung und konstanten Kunstlicht-Beleuchtungsstärken als „zweithäufigste Ursache“ für das Sick Building Syndrom (SBS). Die Weltgesundheitsorganisation hat bereits 1983 in Studien belegt, dass der Mangel von Tageslicht dafür ein häufiger Grund ist, was sich durch Kopfschmerzen, Ermüdung und Augenbeschwerden äußert. In einer Befragung zur „Arbeitszufriedenheit und Gesundheitszustand von Berufstätigen 2005-2006“ durch die GBI-Genios Deutsche Wirtschaftsdatenbank GmbH gaben 57 % der Befragten an, dass sie mit der Beleuchtungsqualität am Arbeitsplatz unzufrieden sind. Die mangelnde Versorgung des menschlichen Körpers mit Tageslicht kann zu Winter- oder Lichtmangeldepression führen. Grund dafür ist nicht nur die geringere Solarstrahlung im Winter, sondern auch die Arbeitszeit in Räumen mit schlechter Tageslichtversorgung.²

Ferner zeigen Untersuchungen, dass normgerechte Arbeitsplatzbedingungen (zum Beispiel 500 lx) als störend empfunden werden, während zehnfache Mengen im Freien für Menschen durchaus wohltuend wirken können.³

Beim Tageslichtangebot (Globalstrahlung) sind zwei verschiedenen Arten der solaren Einstrahlung zu unterscheiden:

- Direkte Strahlung, wolkenloser Himmel, sehr energiereich, lässt sich gut lenken und konzentrieren
- Diffuse Strahlung, bedeckter Himmel, entsteht durch Streuung oder Reflexion von direkter Strahlung; wird als angenehm empfunden, gut geeignet zur Tageslichtversorgung von Gebäuden

In Mitteleuropa beträgt in den Tagesstunden der Anteil des direkten Sonnenlichts etwa 40 % und ist der Himmel zu etwa 60 % bedeckt. Die Einschätzungen schwanken, so wird der Anteil der Diffusstrahlung häufig sogar als größer 60 % beziffert, während sich in Quellen auch Werte von 55 % finden.⁴ Darüber hinaus verändert sich die Verteilung über das Jahr. Für Konzepte einer optimierten Tageslichtnutzung wird unabhängig von den prozentualen Werten die Berücksichtigung und Auslegung auf Diffuse Strahlung empfohlen.

Die gezielte Nutzung von Tageslicht ist ein zentrales Merkmal von Architektur, denn erst durch Licht werden die Räume für den Menschen erlebbar; dabei wird die bewusste Raumwahrnehmung von allen Sinnen beeinflusst. Der vermehrte Einsatz von Kunstlicht insbesondere seit den 1960er Jahren,

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Stand der Wissenschaft und Technik

1 Dietrich, 2005, S. 16

2 Vgl. Cornelius, 3/2006, S. 86ff.

3 Vgl. Friederici/Wand, 2005, S. 9

4 Vgl. Dietrich, 2005, S. 19

man diskutierte bei der Planung grösserer Verwaltungsbauten tatsächlich (durchaus auch kritisch) den "totalen Leistungsraum", fensterlose Arbeitsräume ohne Aussenbezug, künstlich beleuchtet und belüftet,⁵ führte indessen nicht zu den gewünschten positiven Wirkungen; im Gegenteil, die Nutzer klagten über vermindertes Wohlbefinden, die Produktivität nahm ab, und vor allem erhöhte sich signifikant der Energieverbrauch. Mit der Zunahme an Tageslicht wird der visuelle Komfort am Arbeitsplatz gesteigert und Strom für die Beleuchtung und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen eingespart. Gerade bei Verwaltungsbauten, aber auch bei Gewerbe und Industrie, besteht diesbezüglich ein enormes Einsparpotential.

Daher sind bereits seit den 1990er Jahren verstärkt Anstrengungen zur Erhöhung der Tageslichtnutzung in öffentlichen Arbeits- wie auch privaten Wohnbereichen festzustellen, was sich ebenfalls in Weiter- und Neuentwicklung von Tageslichtsystemen widerspiegelt.⁶

Beim Einsatz von Tageslichtsystemen wird nahezu das gesamte Lichtspektrum, das durch die Erdatmosphäre auf die Erdoberfläche trifft, in das Gebäude geleitet. Veränderungen des Tageslichtspektrums bzw. der Farbtemperatur des Lichts je nach Uhrzeit und Einstrahlwinkel der Sonne, ist auch vom Nutzer im Raum wahrnehmbar. Die Helligkeit des Tageslichts hängt stark von geografischen Standort, Wetterlage, Tages- und Jahreszeit ab. In Mitteleuropa können die meisten Räume von etwa 8 bis 17 Uhr mit natürlichem Licht versorgt werden.

⁵ Vgl. Kücker, 1976, S. 67ff.

⁶ Verwiesen sei zum Beispiel auf die zahlreichen Pionierarbeiten von Christian Bartenbach, der 1976 den Vorläufer von "Bartenbach LichtLabor" in der Nähe von Innsbruck gründete. <http://www.bartenbach.com> <10.07.2013>

Bei größeren Raumtiefen reicht jedoch das durch seitliche Wandöffnungen einfallende Tageslicht meist nicht aus. Um das Tageslicht bedarfsgerecht in den Raum zu lenken, ist der Einsatz von Tageslichtsystemen erforderlich oder bei eingeschossigen Bauten Öffnungen im (Flach-)Dach. Dabei ist es wünschenswert Synergieeffekte zwischen Tageslichtnutzung, Sonnenschutz, Blendschutz, Lichtlenkung zu erzielen. Auch besteht eine große Herausforderung darin, solche Systeme und Einbauten architektonisch verträglich in die Gebäudehülle zu integrieren.

Trotz aller Optimierungsschritte im Bereich der Tageslichttechnik erfordert die visuelle Behaglichkeit beim Arbeiten und Wohnen eine gut aufeinander abgestimmte Kombination von Tages- und Kunstlicht, sind Konzepte gefragt, in denen auch der Einsatz von Tageslicht und Kunstlicht zu Synergien führt.⁷ Es sind jedoch Innenräume mit einer weitgehenden Ausnutzung des Tageslichtspektrums, die auf den Menschen positiv wirken und das Wohlbefinden fördern.

2.1 Sollektor

Der am Anwendungszentrum für Polymere Optische Fasern (POF-AC) der Technischen Hochschule Nürnberg entwickelte Sollektor (Abb. 1) ist ein System zur Beleuchtung von Räumen mit Sonnenlicht, bei dem der Ort der Lichtaufnahme von der Stelle der Lichtabgabe räumlich entkoppelt ist. (Abb. 2) Die Optik des Sollektors, Reihen von ‚Faserbündeln‘ die der direkten Solarstrahlung zweiachsig, das heißt dem Sonnenverlauf und -höhenwinkel nachgeführt werden müssen, sammelt Licht, das über polymere Lichtwellenleiter in das Gebäudeinnere geleitet wird. Das Licht entspricht

⁷ Vgl. Friederici/Wand, 2005, S. 9



Abb. 1 Sollektor-Version LCA 284 (2011), Teststand auf dem THN-Gebäude WE



Abb. 2 Prinzip der entkoppelten Lichtsamm- lung und -verteilung durch Einsatz des Sollektors

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Stand der Wissenschaft und Technik

weitgehend dem sichtbaren Anteil des Sonnenlichts, da durch das verwendete Material die Anteile von UV- und Infrarotstrahlung nicht in den Raum geleitet werden.

Die raumumschließenden Oberflächen sehen somit farblich wie unter Sonnenlicht aus. Im Vergleich zu Kunstlicht, bietet dies zum Beispiel in Museen den Vorteil, dass Exponate in ihrer tatsächlichen Farbigkeit erscheinen oder in Modegeschäften sich die Beleuchtung mit Hilfe eines Sollektors positiv auf das Kaufverhalten auswirken kann. Infrarotstrahlung ist der Anteil des Sonnenlichts, der zur Erwärmung eines Raumes führt. Daher muss, besonders im Sommer, eine Öffnungsfläche abgeschattet oder der Raum gekühlt werden. Durch den Sollektor wird keine Wärmestrahlung in Gebäude geleitet. Damit wird der Aufwand zur Gebäudeklimatisierung reduziert. Mit dem Sollektor kann abhängig von der Übertragungslänge ein bis zu 50-fach größerer Wirkungsgrad erreicht werden als bei Verwendung von Photovoltaik-Modulen.

Zur Installation des Sollektors auf dem Dach eines Gebäudes wird ein für den jeweiligen Dachtyp geeignetes Montagesystem, wie es auch bei solartechnischen Anlagen zum Einsatz kommt, verwendet. Die seit 2013 auf dem Markt verfügbare Sollektor-Version LCA 251 wird mit dem „LC-MA“-Adapter auf das Montagegestell geschraubt. Aufgrund der Sonnennachführung benötigt der Sollektor einen freien Durchmesser von 78 cm auf dem Gebäude.⁸

Ein Sollektor verfügt über 8 Lichtleiter („LC - solarlight guides“) aus Polymer-Fasern die in einem Bündel von > 50 mm Durchmesser, das auch Spannungsversorgung und Steuerleitung beinhaltet, in das Gebäudeinnere verlegt werden.

⁸ Vgl. SOLLEKTOR® LCA 251, 2013, S. 3

Technische Daten

- Länge x Breite x Höhe: 60 x 60 x 18 cm³
- Gewicht: 25 kg
- Lichtsammelnde Fläche: 0,25 m²
- Max. Lichtübertragungslänge: 40 m
- Übertragender Spektralbereich 350 nm - 780 nm (sichtbares Licht)
- 8 Lichtleiter (Durchmesser): 12 mm
- Dachdurchführung (Durchmesser): 70 mm

Seit der Präsentation des ersten Prototypen (2009) hat sich das Erscheinungsbild und die Apparatechnik mehrfach gewandelt. Neben Maßnahmen zur Kompaktheit führt die Weiterentwicklung vom Ansatz mit vier ‚balkenförmigen‘ Lamellen, die jeweils synchron angesteuert werden, zu einer durchgehenden Lichtsammelrfläche beim aktuellen Modell. (Abb. 3) Gleichwohl weisen auch Vorgänger-Varianten interessante Untersuchungsaspekte auf, weil bisher die inhärenten Potentiale keineswegs erschöpft untersucht wurden.

2.2 Lichtkuppeln

Bei transparenten beziehungsweise transluzenten Bauteilen im Dachbereich unterscheidet die DIN V 18599-4 (Dezember 2011) zwischen Lichtkuppeln, Lichtbänder und Shed-dächer. Lichtkuppeln haben gemäß DIN EN 1873 (August 2014) eine lichte Breite (bzw. Durchmesser) von maximal 2,50 m und eine Öffnungslänge von max. 3,00 m. Alle anderen Öffnungen in Dachflächen – mit Ausnahme der Dachflächenfenster – werden als „Glasdächer“ definiert.

Für den Einbau von Lichtkuppeln bieten Flachdächer die besten Voraussetzungen, da die bedarfsgerechte Anordnung eine gute Tageslichtversorgung ermöglicht. (Abb. 4+5) Lichtkuppeln sammeln das natürliche Licht



Abb. 3 Sollektor-Version LCA 251 (2013), Anordnung auf einem Flachdach

auch bei relativ kleinen Öffnungen im Dach effektiv und sorgen bei entsprechender Positionierung für eine gleichmäßige Ausleuchtung und mit gleichmäßig verteilten Lichtkuppeln lassen sich Innenräume auch bei bedecktem Himmel flächig ausleuchten, vereinzelt angeordnet sind auch punktgenaue und gezielte Belichtungen möglich. Durch den Einsatz von Lichtkuppeln kann auch in tiefen Räumen ein ausreichender Tageslichtquotient in Raummitte erreicht werden. Welche Anordnung oder Form gewählt wird, hängt meist von der Nutzung des Gebäudes und dem jeweiligen Tageslichtbedarf ab. Die einfallende Tageslichtmenge wird von der Öffnungsgröße, der Anzahl der angeordneten Elemente, Schachtgeometrie und -tiefe sowie der Lichtdurchlässigkeit des eingesetzten Materials bestimmt. Lichtkuppeln sind deshalb sowohl im Industrie- als auch Gewerbebau zu einem Standardbauteil geworden.

Lichtkuppeln gibt es in starren und öffnenbaren Varianten. Zusatzausstattungen ermöglichen neben der Tageslichtnutzung verschiedene Möglichkeiten zur Be- und Entlüftung sowie die Funktion eines Rauchabzuges. Mit entsprechenden Steuerungen lassen sich auch die gesetzlichen Anforderungen des Brandschutzes erfüllen.⁹

Lichtkuppeln sind in ein- oder mehrschaligen Varianten am Markt verfügbar. Einschalige Elemente kommen vor allem bei Freiflächenüberdachungen zum Einsatz. In beheizten Gebäuden scheidet die Verwendung aufgrund der schlechten Wärmedämmeigenschaften aus; dort stellt gegenwärtig die doppelschalige Lichtkuppel den Regelfall dar. Bestehen erhöhte Anforderungen an den Wärmeschutz, kommen drei- oder sogar vierschalige Elemente zum Einsatz.

Ein Vorteil beim Einsatz von Lichtkuppeln ist eine von der Raumtiefe unabhängige, gleichmäßige Tageslichtnutzung. Dadurch erhalten Innenräume natürliches Licht, die aufgrund ihrer Lage im Grundriss normalerweise nicht belichtet werden können. Desweiteren besteht nur selten die Wahrscheinlichkeit der Verschattung durch Bäume oder Gebäude, wie es häufig bei Wandöffnungen der Fall ist. Das Zenitlicht weist außerdem eine mehr als dreifach höhere Lichtmenge auf, als es bei seitlich angeordneten Wandöffnungen der Fall ist. Tiefstehende Solarstrahlung fällt – je nach Materialität und Lichttransmission – wesentlich blendfreier ein, als bei einer seitlichen Öffnung.

Das Erscheinungsbild der Gebäude wird durch Oberlichter ästhetisch nicht zwingend verändert, sodass die Form des Elementes prinzipiell frei wählbar ist. Allerdings wird das

Dach auch als fünfte Fassade bezeichnet und gerade die großflächigen Flachdächer stellen durchaus von Hochpunkten betrachtet einen Einsehbereich dar, mit gestalterischen Anforderungen an Anordnung und Proportionen von Dacheinbauten.

Nachteile ergeben sich aus der Positionierung von Lichtkuppeln. Ohne Galerien oder andere Öffnungen in den Geschossdecken lässt sich jeweils nur das oberste Geschoss belichten. Als Nachteil kann auch eine fehlende unmittelbare Sichtverbindung nach Außen empfunden werden, da beim Oberlicht nur ein Innen-Außen-Bezug über das Dach möglich ist. Bei hoch stehender Sonne sind durch das steil einfallende Zenitlicht Blendwirkungen oder störende Reflexe auf Computerbildschirmen zu erwarten. Ferner sind auch bei Oberlichtern Maßnahmen zum Sonnenschutz in der Sommerzeit unentbehrlich, insbesondere wenn es sich um großflächige Dachöffnungen handelt.

Dabei führen Maßnahmen zur Vermeidung von überschüssigen solaren Gewinnen zu einer geringeren Transparenz bei der Abdeckung mit der Folge abgeminderter Tageslichtausbeute insbesondere bei Diffuser Strahlung.

2.3 Sollektor und Lichtkuppel

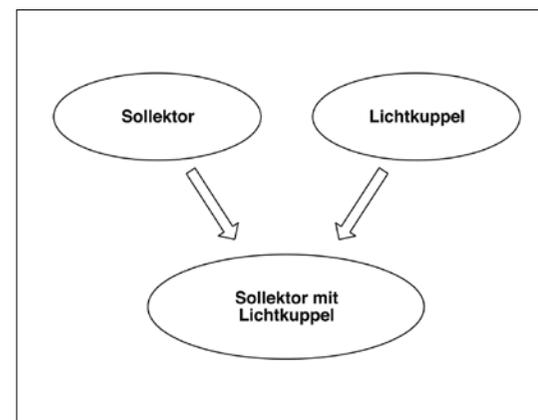
Hier setzt das Konzept der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel an. (Abb. 6) Der Ansatz zielt auf Synergieeffekte durch die Nutzung der jeweils positiven Eigenschaften



Abb. 4 Lichtkuppeln auf dem Flachdach einer Messehalle in Stuttgart

Abb. 5 ... des THN-Gebäudes KV

Abb. 6 Sollektor und Lichtkuppel



SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Stand der Wissenschaft und Technik

⁹ Vgl. Baunetz Wissen: <http://www.baunetzwissen.de> <10.05.2012>

beider Tageslichtsysteme. Der Sollektor als innovative Neuentwicklung ist auf Direktstrahlung angewiesen, die Lichtkuppel als tradiertes Bauteil für eingeschossige, besonders tiefe Gebäude, ist optimiert für Diffusstrahlung. Eine Kombination verspricht zweierlei: Zum einen wäre zu untersuchen, inwieweit der Sollektor durch Anordnung, Konfiguration und Bauteilabmessung als Sonnenschutzsystem (in Teilbereichen) eingesetzt werden kann. Dies hätte positiv zur Folge, dass die Hüllmaterialien der Lichtkuppel (hoch-)transparent ausgeführt werden könnten, um das Diffuslicht noch besser zu nutzen. Zum anderen stellt sich die Frage, inwieweit unabhängig von einer Sonnenschutzfunktion des Sollektors das Lichtmilieu im mit Tageslicht über Lichtkuppel versorgten Innenraum verbessert werden kann.

Durch die Kombination von Sollektor und Lichtkuppel erscheinen eine Reihe neuartiger Optionen möglich, eröffnet sich eine innovative Tageslichtnutzung über das Flachdach: Mit zusätzlichem Tageslichtangebot die Schaffung vor allem von akzentuierten Wandflächen, womit ein breiteres Repertoire an Lichtstimmung ermöglicht wird. Durch das Kombinieren von Tageslicht über die Lichtkuppel mit Licht über den Sollektor – in Verbindung mit Kunstlicht – könnten auch räumlich differenzierte (Erlebnis-)Bereiche erzeugt werden.

Allerdings fehlen hierzu konzeptionelle und lichttechnische Untersuchungen hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Einschätzung dieses Potentials. Bei diesem Ansatz müssen zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten der Verortung des Sollektors (im Bereich, versetzt zur, unabhängig von der Aperturfläche der Lichtkuppel) hinsichtlich der jeweiligen tageslichttechnischen und

konstruktiven Vor- und Nachteilen untersucht werden. Dabei sind sowohl systemtechnische Besonderheiten zu berücksichtigen, als auch spezifische und allgemeine Randbedingungen von Gebäude und Baukonstruktion einzubeziehen. Nicht zuletzt stellt sich, wie bei anderen additiv integrierten Tageslichtsystemen (u.a. Heliostaten), die Aufgabe der gestalterischen Integration dieses innovativen Produkts.

Darüber hinaus ist es Ziel der Projektarbeiten auf Basis eines bauaufsichtlich zugelassenen Adapters eine Standardlösung zur Befestigung zu entwickeln. Dabei werden Ansätze verfolgt, den Sollektor mit dem Aufsatzrahmen der Lichtkuppel zu verbinden. Dies hätte den Vorteil auf Befestigungen an der Trag-schicht des Flachdaches, mit notwendigen Durchdringungen von Abdichtungsbahnen zu verzichten beziehungsweise bei einem eher kleinformatischen und damit leichten Bauteil wie dem Sollektor auf zusätzlichen Beschwe-rungen verzichten zu können. Gleichwohl ist auch bei der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel die Frage der Faserndurchführung zu klären. Hier bestehen verschiedene mögliche Ansätze: im Bereich der Dachöffnung (Lichtkuppel, Aufnahme im und Anordnung zum Aufsatzrahmen) und unabhängig davon.

Auch wenn der Verwaltungsbau (KV-Gebäude) der Technischen Hochschule Nürnberg für diese neuartige Kombination der Tageslichtnutzung als Demonstrationsprojekt eher sub-optimal ist, eröffnet gerade dieses Gebäude zusätzliche Optionen. Es fehlt bisher an der Hochschule ein sichtbarer Ort für das innovative und vielfach ausgezeichnete Tageslichtsystem Sollektor. Ferner lassen sich im Zuge der räumlichen Analysen auch Vorschläge für die tageslichttechnische Aufwertung des

Foyers und insbesondere der beiden südlich angrenzenden Räume treffen. Unabhängig davon stellt das Flachdach mit den Lichtkuppeln durchaus ein prototypisches Beispiel für die großen Dachflächen der Gewerbe- und Industriebauten dar, sowohl für Neubauplanungen als auch – zukünftig mit besonderer Bedeutung – für Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand.

In der neuartigen Kombination von Sollektor und Lichtkuppel besteht die Möglichkeit, die Tageslichtnutzung bei Gewerbe- und Industriebauten auf innovative Weise nachhaltig zu verbessern.

- Ausweitung der Tageslichtnutzung, sowohl hinsichtlich des Lichtspektrums als auch innenräumlich (durch die Entkoppelung von Strahlungssammlung und Tageslichteinspeisung)
- Sollektor als Sonnenschutzsystem im Bereich der Lichtkuppel
- Nutzung des Aufsatzkranzes als basale Struktur für die Lastabtragung bei der Sollektor-Integration, insbesondere im Zusammenhang von energetischen Sanierungsmaßnahmen
- Vermeidung zusätzlicher Durchdringungen der wasserführenden Schicht im (Flach-) Dachaufbau

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Stand der Wissenschaft und Technik

3 Vorarbeiten

3.1 KV- Gebäude

Der Verwaltungsbau auf dem Campus 1-Gelände der Technischen Hochschule Nürnberg (KV-Gebäude) soll beispielhaft für viele Industrie- und Gewerbebauten, auf denen zur Tageslichtversorgung Lichtkuppeln installiert sind, als Demonstrationsobjekt herangezogen werden. Im Zuge der neugegründeten Fachhochschule Nürnberg (1971) wurde das Gebäude südöstlich des Keßlerplatzes errichtet.

Im Vorfeld der Projektarbeiten wurde bereits eine Gebäudedokumentation erarbeitet. Dabei gab es eine Reihe von Schwierigkeiten. Zum einen mussten die unvollständigen Bestandspläne (letztlich waren nur die Statikpläne verfügbar, eine Baubeschreibung fehlte) aktualisiert werden, was umfangreiche ergänzenden Arbeiten des Abgleichs vor Ort erforderte, zum anderen galt es zahlreiche nachträgliche Anpassungen und Änderungen zu berücksichtigen.

Für den nördlichen Gebäudeteil (Hochschulleitung) lagen nun Bauzeichnungen (Grundrisse, Schnitte und Ansichten) im M 1:100 sowie Detailzeichnungen (M 1:25) vor, die für die Weiterbearbeitung im Bereich des Foyers und des Dachaufbaus hinsichtlich Aufbauhöhen und Schichtenfolgen sowie Materialeinsatz noch ergänzt wurden.

Für die Bewertung der vorherrschenden Tageslichtsituation im Foyer des KV-Gebäudes (Abb. 7+8) wurde für eine erste (Grob-) Einschätzung eine rechnergestützte Tageslichtsimulation mit der Software Relux¹ durchgeführt. Zur Gewährleistung der Tageslichtversorgung der zentral im Gebäude liegenden Zone 1 und Zone 2 sind vier bzw. zwei im Flachdach installierte Lichtkuppeln vorhanden.

¹ <http://www.relux.biz> <12.07.2013>



Abb. 7 Foyer KV-Gebäude (13.03.2015)

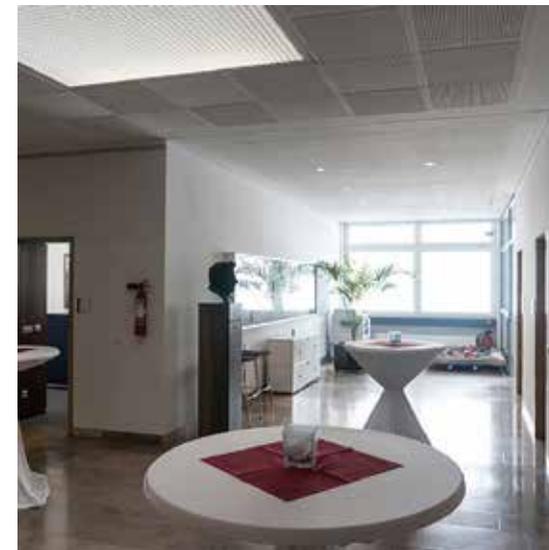


Abb. 8 Eingangszone Foyer KV-Gebäude (13.03.2015)

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Vorarbeiten

den. (Abb. 9) Die Gebäudegeometrie mit Anordnung der Lichtkuppeln und Abgrenzung der Zonen wurde in der Simulationssoftware durch den bestehenden Grundrissplan (Abb. 10, Seite 11) vorgegeben.

Bei den Untersuchungen stellt sich folgende Situation in Zone 1 dar: Das Foyer ist ein quadratischer Raum, der sich im ersten Obergeschoss des KV-Gebäudes befindet und den Vorbereich zur Hochschulleitung darstellt. Der Raum hat eine Größe von ca. 10 m x 10 m mit einer Höhe von etwa 3 m. Dieser Raum wird von vier Lichtkuppeln mit einer Größe von ca. 2 m x 2 m an der Deckenunterseite belichtet. Trotz dieser vier Lichtkuppeln wirkt das Foyer eher dunkel, was in Teilen auch auf den hohen Verschmutzungsgrad einiger Abdeckungen (Abb. 5) zurückzuführen ist. In der Zone 2 befindet sich ein direkt an das Foyer anschließender Besprechungsraum mit zwei Lichtkuppeln. Dieser hat eine Größe von etwa 5,00 m x 10,00 m und wurde nochmals durch eine Schrankkonstruktion unterteilt. Die beiden dadurch entstandenen Räume sind ebenfalls recht dunkel und benötigen selbst bei Nutzung am Tag häufig zusätzlich Kunstlicht.

3.2 Modell 1:10

Die überprüften und aktualisierten Bestandspläne dienen als Grundlage für den Bau eines Modellraums im Maßstab 1:10, für die lichttechnischen Untersuchungen der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel.

Das Modell soll eine höchst mögliche Anpassungsoffenheit in Hinblick auf Zusammenbau und Demontage, den Einsatz unterschiedlicher Oberflächenmaterialien, die auch als Faktoren für die gewünschte Ausleuchtung der Räume dienen, aufweisen. (Abb. 11+12,



Abb. 9 Dachaufsicht KV-Gebäude mit den eingetragenen Zonen der Tageslichtsimulation

Seite 12) Dies gilt auch für die Ausbildung der Lichtkuppelschächte, deren Oberflächenmaterial ebenfalls ausgetauscht werden kann um unterschiedliche Reflexionseigenschaften von Materialien im Modell testen zu können.

Der Versuchsraum, gebaut aus MDF-Platten verfügt in Farbe und Gestalt über einen 'realistisch' nachgebildeten Boden, sowie austauschbare Seitenwände und zeichnet sich durch absolute Lichtdichtigkeit aus. Jedes Wand- und Deckenelement wird in einer Nut gefügt. Decken und Wände sind, unter anderem für den Transport, demontierbar. Die Decke kann zusätzlich zerlegt werden, damit in der zweiten Phase der Experimente in diesem Bauteil Lichtleitungen verzogen werden können. In einem weiteren Arbeitsschritt wird ein Lochblech aus Aluminium als abgehängte Decke hinzugefügt, die den lichtleitenden Fasern als Raster für variable wählbare Austrittspunkte dient. (Abb. 13+14, Seite 12)

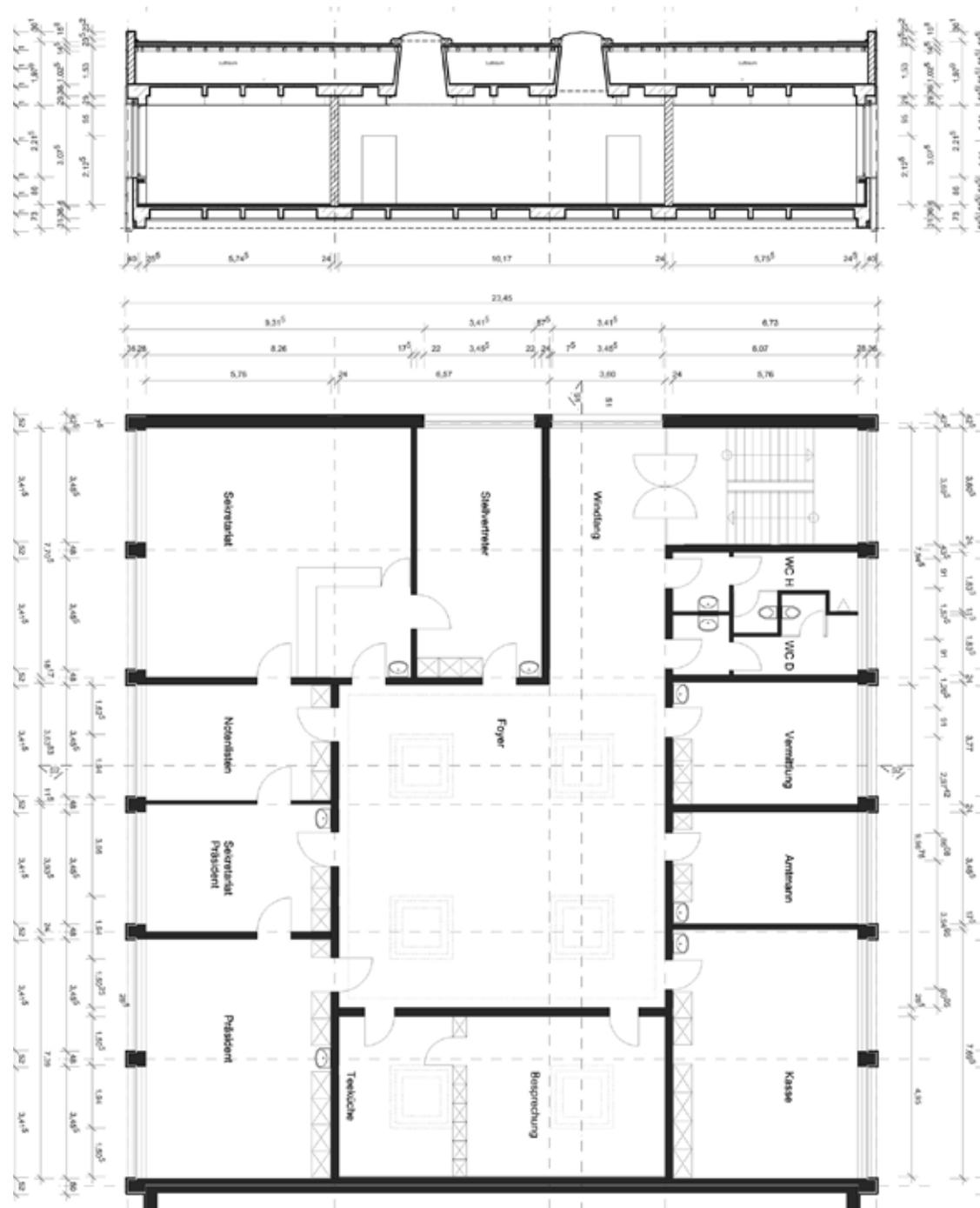
3.3 Morphologische Übersicht

Als Grundlage zur Entwicklung von Lösungsstrategien der Kombination Sollektor und Lichtkuppel wurde eine umfangreiche morphologische Übersicht erarbeitet, die möglichst zahlreich relevante Parameter beider Systeme und deren Kombination erfasst, systematisiert und dokumentiert (Abb. 15, Seite 13+14):

- Sollektormodell
neben vier Sollektormodellen wurden weitere Systementwicklungen aufgenommen, u.a. das Parans SP3 System² (auf Basis von Glasfasern)
- Platzbedarf
der für die jeweiligen Modelle ermittelte geometrische Raum für die zweiachsige Nachführung

² <http://www.parans.com> <22.02,2016>

- Lichtkuppelgeometrie
die Geometrie des Aufsatzkranzes beeinflusst in entscheidender Weise Anordnungsmöglichkeiten des Sollektors sowie Ausbildung der Unterkonstruktion
- Öffnung
die Öffnungsarten (geschlossen, einseitig bzw. allseitig zur Entlüftung angehoben, vollständige Öffnung) der Lichtkuppelhaut bestimmen die vertikale Position des Sollektors
- Abmessung und
Seitenverhältnis
sind maßgebliche Parameter für das Maß des Sonnenschutzes bezogen auf die Aperturfläche
- Sollektorposition horizontal / Nord-Süd-Achse und
Sollektorposition horizontal / Ost-West-Achse
prinzipielle Anordnungsmöglichkeiten des Sollektors zur Lichtkuppel bezogen auf die Horizontale
- Flächenverhältnis
Relation der Flächenbelegung von Sollektorgroße zur Lichtkuppel-Aperturfläche
- Sollektorposition vertikalt
prinzipielle Anordnungsmöglichkeiten des Sollektors zur Lichtkuppel bezogen auf die Vertikale
- Leitungsmaterial,
Leitungsquerschnitte,
Querschnittsgeometrie und
Querschnittsgrößen
enthalten wesentliche Parameter für Handhabung und Ausbildung der Leitungsführung



SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Vorarbeiten

Abb. 10 KV-Gebäude Grundriss und Schnitt OG
(ohne Maßstab)

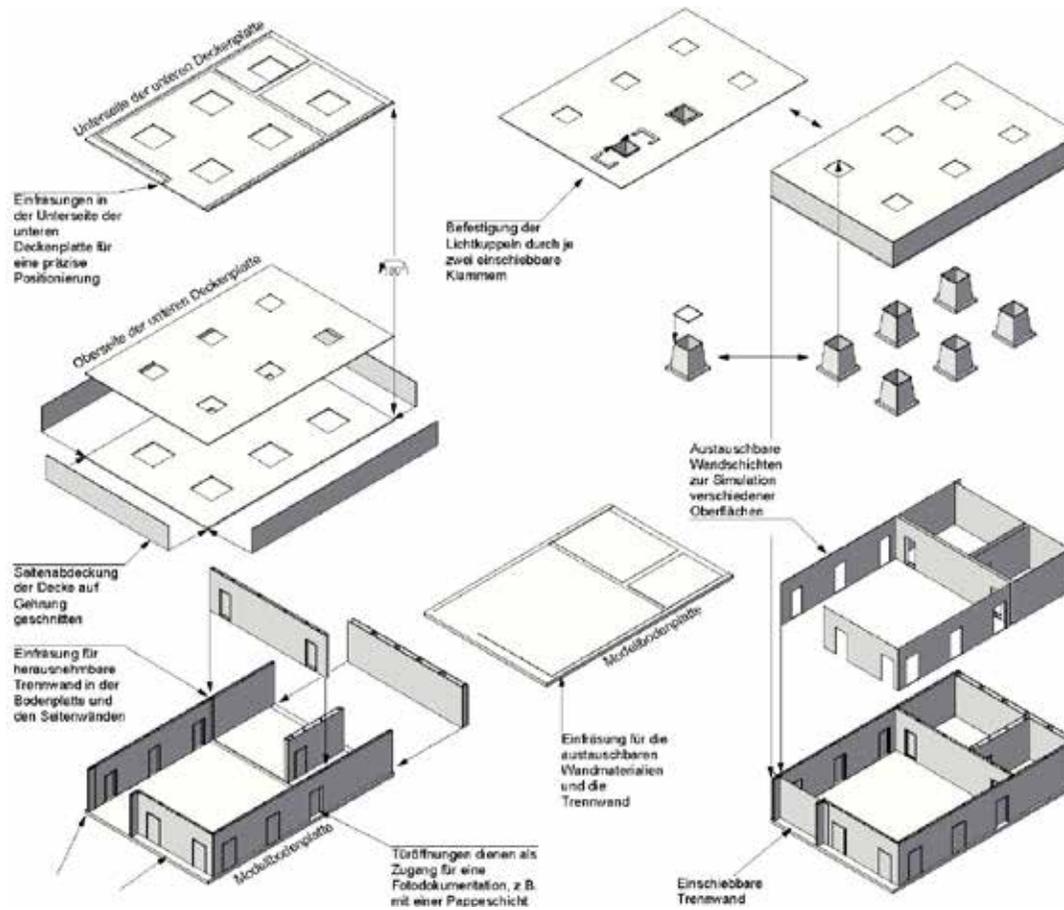


Abb. 11 Modellbauplanung

- Leitungsdurchführung
die Lage der Durchführung des Leitungsbündels (innerhalb der Lichtkuppel, im Lichtkuppelschacht, Flachdach) bestimmt den Aufwand an Abdichtungsarbeiten
- Position Gitter / Absturzsicherung beeinflusst den Eintrag an Diffuslicht und die innenräumliche Wirkung in der Deckenzone

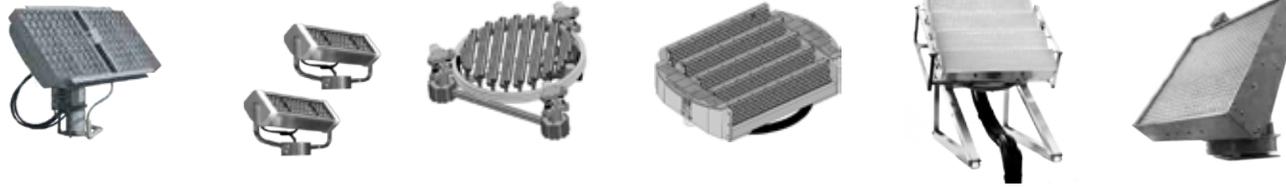


Abb. 12 Modell (1:10), Außenaufnahme

Abb. 13 ..., Innenraumaufnahme

Abb. 14 ..., Innenraumaufnahme mit Oberflächen und Unterdecke (Lochblech)

Kollektormodell

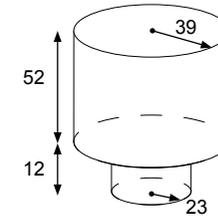
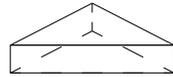
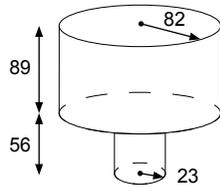


SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Vorarbeiten

Morphologischer Kasten Teil 1

Platzbedarf



Lichtkuppel-geometrie



Öffnung



Abmessung

< 60

60-89

90-119

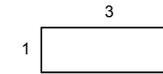
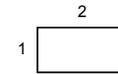
120-149

150-179

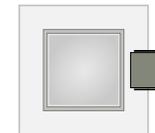
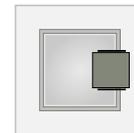
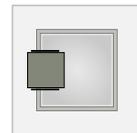
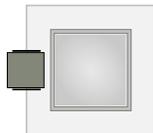
180-210

>210

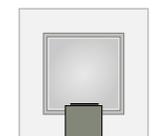
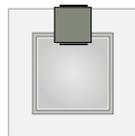
Seitenverhältnis



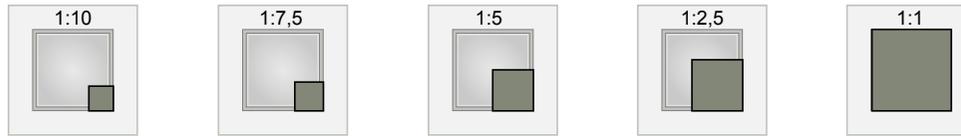
Sollektorposition horizontal Nord-Süd Achse



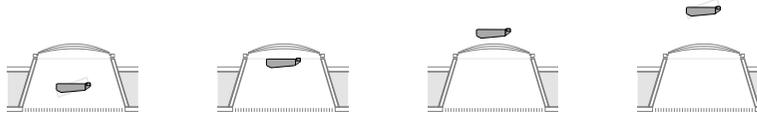
Ost-West Achse



Flächenverhältnis



Sollektorposition
vertikal



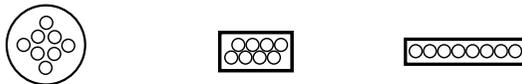
Leitungsmaterial



Biegeradius

$\varnothing < 1,00\text{cm}$ $\varnothing 1,00\text{cm} - 5,00\text{cm}$ $\varnothing 6,00\text{cm} - 10,00\text{cm}$ $\varnothing 11,00\text{cm} - 15,00\text{cm}$ $\varnothing > 15,00\text{cm}$

Leitungsquer-
schnittsgeometrie

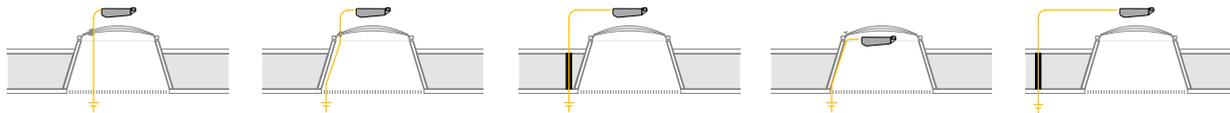


Quer-
schnitts-
größen

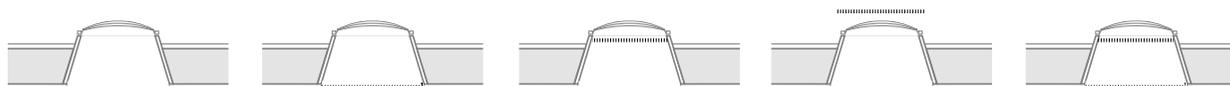
Optiken
Anzahl in Bündel
Bündel
Anzahl in Leitung
Leitung

$\varnothing > 1,00\text{mm}$	$\varnothing 1,00\text{mm} - 0,91\text{mm}$	$\varnothing 0,90\text{mm} - 0,81\text{mm}$	$\varnothing 0,80\text{mm} - 0,70\text{mm}$	$\varnothing < 0,70\text{mm}$
> 800	800-701	700-601	600-501	< 500
$\varnothing > 10\text{mm}$	$\varnothing 10\text{mm}-9\text{mm}$	$\varnothing 8\text{mm}-7\text{mm}$	$\varnothing 6\text{mm}-5\text{mm}$	$\varnothing < 5\text{mm}$
> 10	10-9	8-7	6-5	< 4
$\varnothing > 100\text{mm}$	$\varnothing 100\text{mm}-81\text{mm}$	$\varnothing 80\text{mm}-61\text{mm}$	$\varnothing 60\text{mm}-51\text{mm}$	$\varnothing < 50\text{mm}$

Leitungs-
durchführung



Position Gitter/
Absturzsicherung



SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Vorarbeiten

Morphologischer Kasten
Teil 2

Abb. 15 Morphologischer Kasten

4 Tageslichtstudien

Bei der Planung und Auslegung der Versuche waren zu Beginn die Wünsche der "Architekten" mit den Möglichkeiten der "Optiker" abzugleichen. Dazu mussten eine Reihe von Fragen geklärt werden:

- Welche Aussagen sollen gewonnen werden? Intensität (Beleuchtungsstärke) und Gleichmäßigkeit der Beleuchtung.
- Welche natürlichen und künstlichen Lichtquellen stehen zur Verfügung?
- Wo kann gemessen werden?
- Welche Messgeräte stehen zur Verfügung?
- Wie können diese Ergebnisse mit denen der Beleuchtungssimulation¹ verglichen werden?

Die Durchführung der Tageslichtstudien erfolgten im THN-Gebäude WE:

- Lichtquellen: Sonne und Theater-Spot-scheinwerfer als Sonnensimulator (vgl. Datenblatt im Anhang)
- Messung mit Kunstlicht: erfordert beim Aufbau der In-Haus Teststrecke (im langen Gang vor dem POF-AC) mit Sonnensimulator eine optimierte Einstellung der Abstrahlcharakteristik
- Messung mit Sonnenlicht auf dem Dach des WE Gebäudes: konstruktive Auslegung hinsichtlich der Konsequenzen für die Optik, konkret: notwendige Steifigkeit der Halterung um die Ausrichtung auf die Sonne sicher zu stellen sowie verlustarme Verlegung und Führung der Lichtleiter
- Messgeräte: diverse Beleuchtungsstärke-Messgeräte (Luxmeter), Leuchtdichtekamera Lumicam 1300 (vgl. Datenblatt im Anhang, Seite 51)

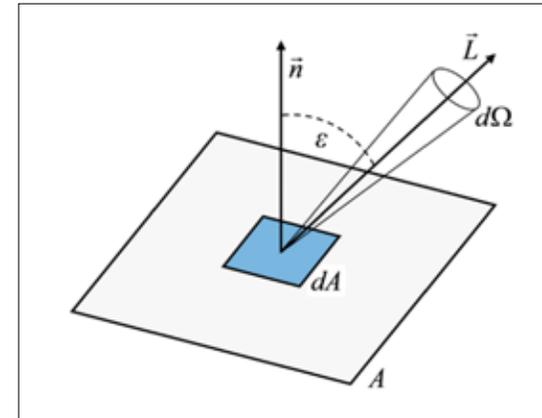


Abb. 16 Geometrie zur Bestimmung der Leuchtdichte L

Die große Schwierigkeit generell liegt darin, dass der Vergleich der verschiedenen Messungen untereinander als auch der mit den Ergebnissen der Beleuchtungssimulation nur sehr qualitativ zu ziehen ist.

Dazu folgende Erklärungen: Innerhalb des Projekts wird mit photometrischen Größen gearbeitet, welche im Gegensatz zu radiometrischen Größen die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigen, also den visuellen Eindruck beschreiben. Die Grundgröße der Photometrie ist das Lumen, welches die Einheit für den Lichtstrom Φ_v ist. Letzterer kann nach verschiedenen geometrischen Parametern differenziert werden, die sowohl die Lichtquelle als auch die bestrahlte Fläche betreffen. Zwei davon werden innerhalb dieses Projekts erfasst:

- a) die (lokale) Beleuchtungsstärke E, welche das Verhältnis des auf eine Fläche A_2 auftreffenden Lichtstroms Φ_v angibt:

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

¹ Stephan/Franz, 28.01.2015 und Stephan/Franz, 27.02.2015

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2}$$

$$[E_v] = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{Lux} = \text{lx}$$

Die Beleuchtungsstärke E ist die Größe, die mit einem Luxmeter gemessen wird und letztlich als einzige einer direkten Messung zugänglich ist.

- b) die Leuchtdichte L_v , die angibt, welcher Lichtstrom Φ_v von einem Flächenelement dA der Quelle in einen bestimmten Raumwinkelbereich $d\Omega$ (Abb. 16, Seite 15) unter einem Winkel ε gegen die Flächennormale n abgestrahlt wird.

$$L_v = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\varepsilon \cdot d\Omega}$$

$$[L_v] = \frac{\text{lm}}{\text{sr m}^2} = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Im Projekt wurde ein 1:10 Modell des betrachteten KV-Gebäudes untersucht und die Beleuchtungsverhältnisse in dem Modell zum einen durch einen beweglichen Sensorkopf des Luxmeters räumlich aufgelöst (Boden, Decke, Wände) gemessen, zum anderen von außen mit der Leuchtdichtekamera in den Modellraum geschaut.

Bei einer Leuchtdichtekamera, wie sie hier zum Einsatz kommt, wird eigentlich auch "nur" eine Beleuchtungsstärke gemessen, nämlich die auf dem Pixel des CCD-Chips.

Bei bekannten Parametern der Abbildung (also Objektentfernung, Brennweite des Objektivs und betrachteter Feldwinkel, i.W. also das betrachtete Objektfeld quer zur optischen Achse in der Objektweite) kann daraus die gesuchte Leuchtdichte abgeleitet werden.

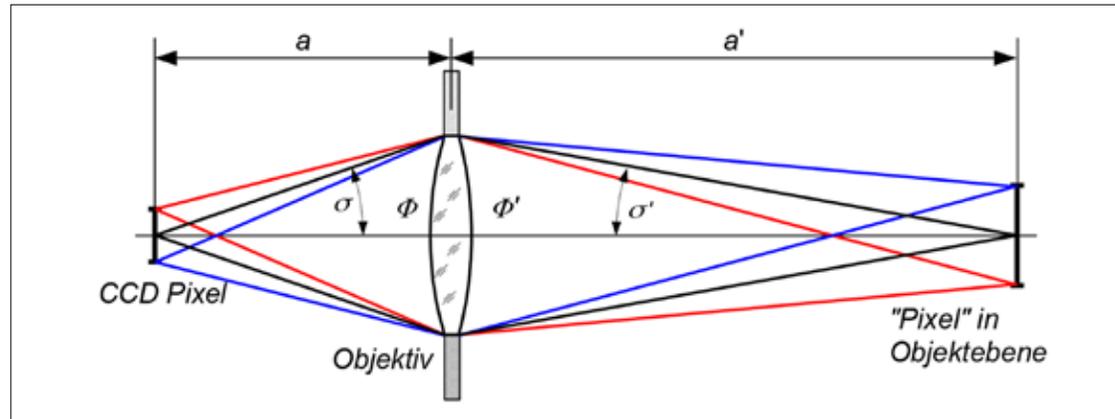


Abb. 17 Verhältnisse bei der Abbildung durch ein Objektiv

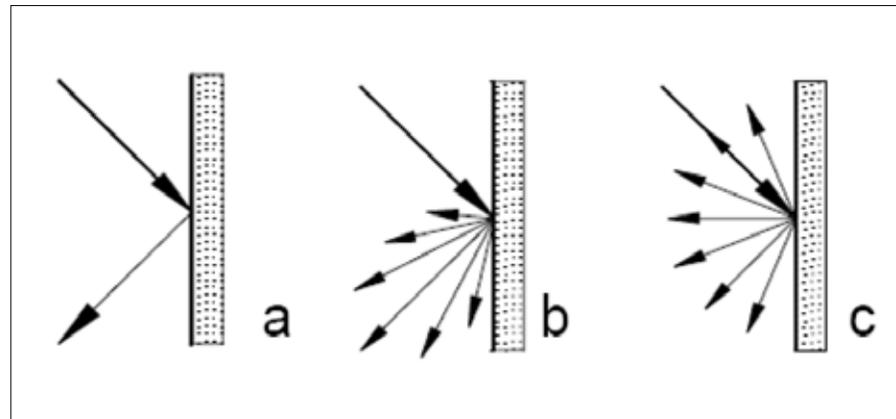


Abb. 18 Beispiele für Lichtstreuung an Oberflächen:
a) spiegelnd
b) streuend mit Vorzugsrichtung (Glanzwinkel)
c) diffus streuend

Es folgt der Versuch einer einfachen Erklärung: Durch das Objektiv der Kamera wird ein Pixel des CCD Chips auf ein entsprechendes Element in der Objektebene abgebildet (Umkehrung des Strahlengangs: üblicherweise spricht man von einer Abbildung des Objekts auf die Pixel des CCD Chip). (Abb. 17, Seite 16)

Dieses "Pixel" in der Objektebene entspricht dem Flächenelement dA aus Abb. x1. Typische Pixelgrößen bei CCD Kameras sind im Bereich $5 \mu\text{m}$ Durchmesser, sind also im Vergleich zum Durchmesser des Objektivlinse nahezu punktförmig. Nimmt man eine typische Brennweite von 50 mm für das Objektiv an, ergibt sich in der Objektebene bei einer Entfernung von 2 m zur Kamera ein Durchmesser für die Fläche dA von etwa $2000/50 \cdot 5 \mu\text{m} = 200 \mu\text{m}$.

Durch den Öffnungswinkel $2\sigma'$ ist der Raumwinkel $d\Omega'$ bestimmt, in den der Lichtstrom Φ' von dem Flächenelement dA durch die Linse aufgenommen wird. Bei bekannter spektraler Transmission des Objektivs kann daraus der Lichtstrom berechnet werden, der mit einem Öffnungswinkel 2σ auf den zugeordneten Pixel des CCD Chips gelangt.

Bei der Messung wird nun mit dem CCD Chip die Beleuchtungsstärke E gemessen, räumlich aufgelöst durch die Matrix der Pixel (z.B. 600×800). Damit kann jedem Pixel, da dessen Fläche ja bekannt ist, ein Lichtstrom Φ zugeordnet werden, daraus der Lichtstrom Φ' und somit die Leuchtdichte

$$L = \Phi' / (dA \cdot d\Omega')$$

Bei dieser stark vereinfachten Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass die mit der Kamera betrachtete Ebene senkrecht zur optischen Achse steht.

Ist dies nicht der Fall, also ist beispielsweise die Fläche um den Winkel ε geneigt, so macht sich dies in zweifacher Weise bemerkbar:

- die Kamera sieht nur die projizierte Fläche, d.h. es kommt nur der Wert $dA \cdot \cos\varepsilon$ zum Tragen
- der Betrag des in Richtung ε reflektierten Anteils des von einer der Lichtquellen stammenden Lichts. Dieser kann in komplizierter Weise vom Material (Absorption) und dessen Oberflächenbeschaffenheit (Streuung) abhängen. (Abb. 18, Seite 16)

Dementsprechend kann eine an ein und demselben Ort gemessene Beleuchtungsstärke sich völlig unterschiedlich in der Leuchtdichte auswirken wenn unterschiedliche Materialien beleuchtet werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der Messung mit dem Luxmeter und der Leuchtdichtekamera ist daher nur für genau bekannte Materialien möglich. Der Vergleich ist einfach, wenn die beleuchtete Fläche perfekt diffus reflektiert, also eine sog. Lambert-Charakteristik (Abb. x3 c) aufweist.

Dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$L = (E \cdot \rho) / (\pi \cdot \Omega_0)$$

wobei ρ die Reflektivität des Materials beschreibt und Ω_0 die Einheit für den Raumwinkel angibt. Die Ergebnisse Leuchtdichtekamera sind also direkt proportional zu denen des Luxmeters.

In dem 1:10 Modell war dies näherungsweise für Wände und Decken erfüllt, nicht jedoch für den Bodenbelag. Insofern sind die Ergebnisse der beiden Typen von Messungen für Wände und Decken gut vergleichbar, nicht aber für die Böden.

4.1 Messung mit Kunstlicht

Ziel dieser experimentellen Phase ist es, die Position der Kollektorfläche des Sollektors als Verschattungselement bis auf eine oder wenige Varianten festzulegen.

Es wird beschlossen, die Versuche im Innenbereich des THN-Gebäudes WE² durchzuführen um zunächst unabhängig von Witterungseinflüssen grundlegende Abhängigkeiten zu untersuchen. Um den Aufbau an die langen Flure anzupassen, wird dieser um 90° gedreht. Ein Scheinwerfer leuchtet horizontal auf die Dachöffnungen des gekippten Modells. Zu diesem Zweck wird ein Tisch mit klappbarer Tischplatte dem Versuchsaufbau angepasst, leicht modifiziert und mit einem Gegengewicht ausgestattet um das Modell in Position halten zu können. (Abb. 19-22, Seite 18)

Um Jahreszeiten nachzubilden, wird das Modell zu dem Scheinwerfer jeweils in dem Winkel gekippt, der den jeweiligen Sonnenstand um 12 Uhr Mittags beträgt. Dafür leiten möglichst präzise gebaute Gestelle die auftretenden Kräfte in den Boden, ohne dass das Gesamtsystem kippt.

Bei diesem Experimentaufbau ersetzt ein 2 kW Spotscheinwerfer aus der Beleuchtungstechnik von Bühnenbildern die Sonne. Diese künstliche Lichtquelle wird weit entfernt von dem Modell, in einem langen Flur, aufgestellt, damit die Lichtstrahlen möglichst parallel in dem Modellraum ankommen. (Abb. 23, Seite 19)

² POF Application Center (POF-AC) an der Technische Hochschule Nürnberg, Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg

Der genaue Abstand ist mit Hilfe eines Faktors ermittelt, der das Verhältnis von Sonnendurchmesser und der Distanz zur Sonne aufzeigt. Das Ergebnis lautet 108, womit der Spotscheinwerfer, mit einer Lichtaustrittsöffnung von 11,7 cm, 126 cm entfernt vom Modell aufgestellt sein muss, damit die Differenzwinkel der Lichtstrahlen mit denen der Sonne auf der Erdoberfläche übereinstimmen.

Die ideale Position für den Sollektor als Verschattungselement findet man im Optimum von Anforderungen, die aus dem Gesamtsystem resultieren. (Abb. 24, Seite 20) Um die Feldfläche, in dem das Verschattungselement verweilen kann, genauer zu bestimmen, werden die Anforderungen definiert:

- Es bedarf einer minimalen Höhe über der Haube der Kuppel, damit die Unterkonstruktion des Sollektors ungehindert installiert werden kann und keine Gefahr der Beschädigung durch Windbewegungen an beiden Systemen besteht (Abb. 25, Seite 20)
Der Sollektor bietet mit seiner Aperturfläche eine Angriffsfläche für Windkräfte. Je nach Unterkonstruktion kann das System zu schwingen beginnen.
- Der Verschatter muss in einem Bereich angeordnet sein, in welchem er die Lichtstrahlen der im Sommer hoch stehenden, Sonne mit gesamter Fläche blockiert. Dieser Bereich stellt sich als Parallelogramm dar (Abb. 26, Seite 20)
Der Sonnenhöhenwinkel beträgt für Mittel-franken etwa 63° . Dieser Wert ändert sich ortsbedingt und kann am Äquator bis zu 90° betragen.
- Eine Vielzahl der Lichtkuppeln wird im Brandfall zur Entrauchung eingesetzt. Zu diesem Zweck schwenkt die Haube um



Abb. 19 Versuchsaufbau der In-Haus Teststrecke im THN-Gebäude WE



Abb. 21 Versuchsaufbau am Modell mit Leuchtdichtkamera Lumicam 1300



Abb. 20 Laufender Versuch mit Scheinwerfer ohne Schattendummys

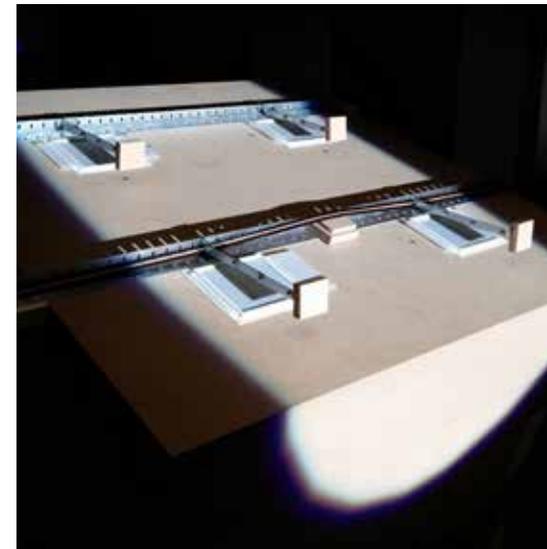
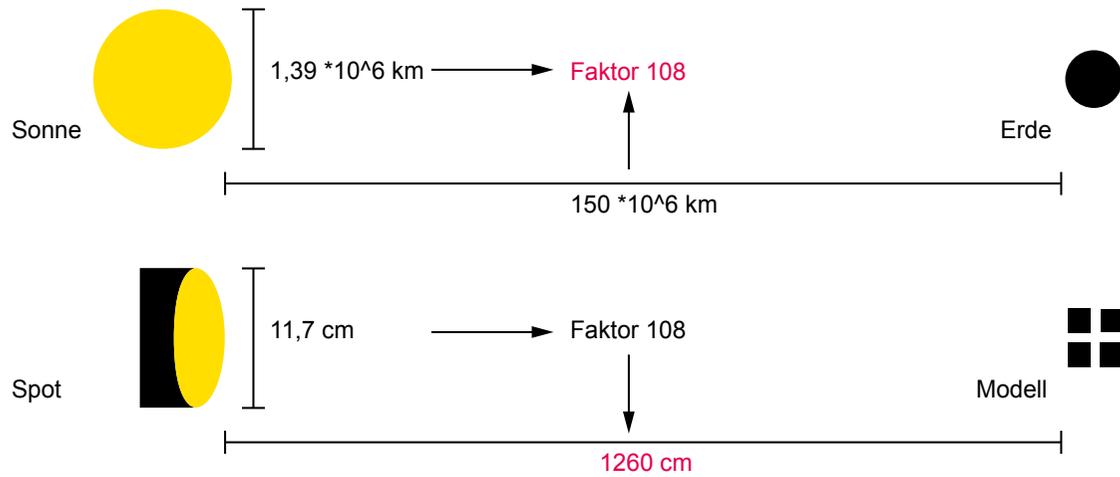


Abb. 22 Laufender Versuch mit Scheinwerfer und Schattendummys

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien



SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Tageslichtstudien

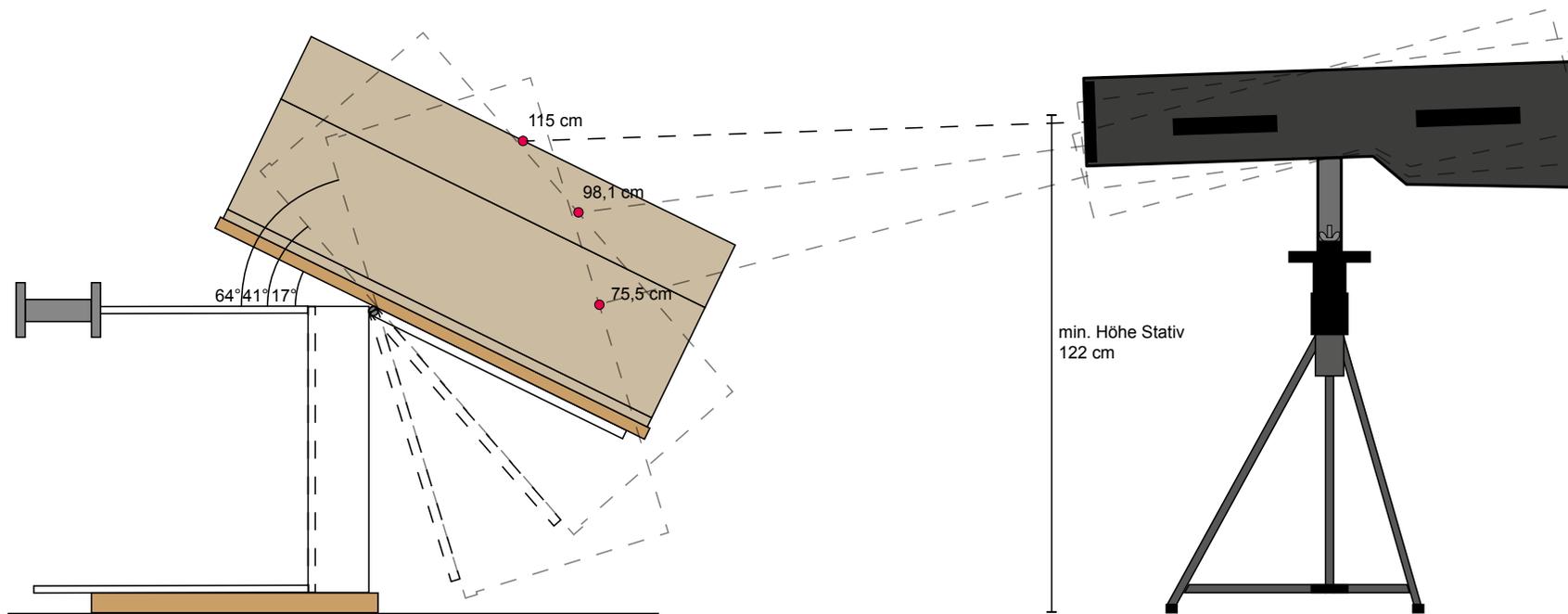
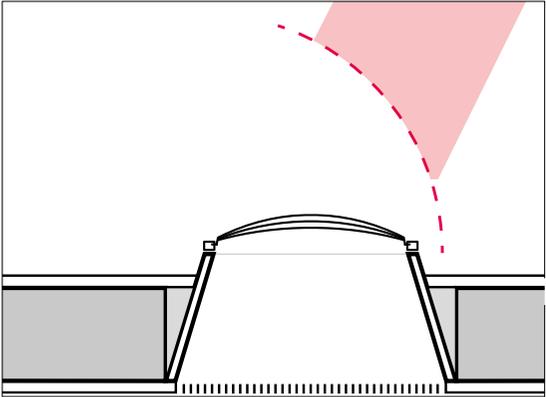
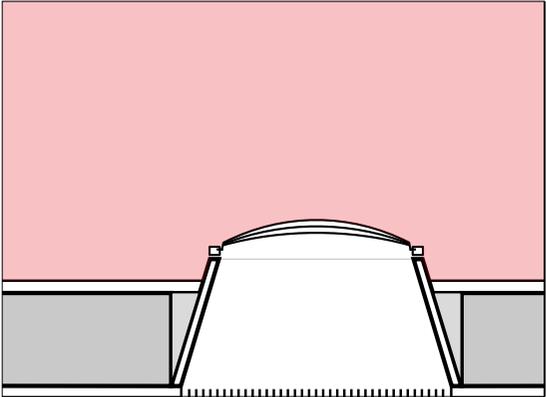


Abb. 23 Skizzierter Versuchsaufbau

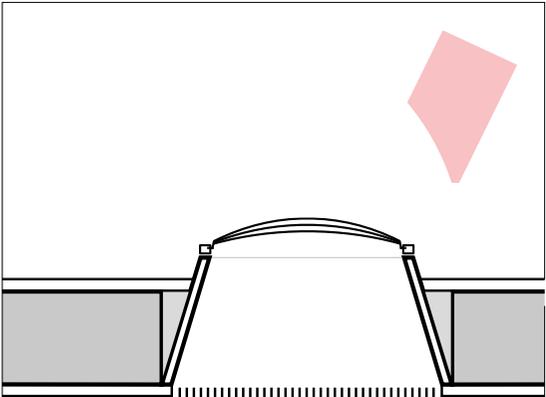
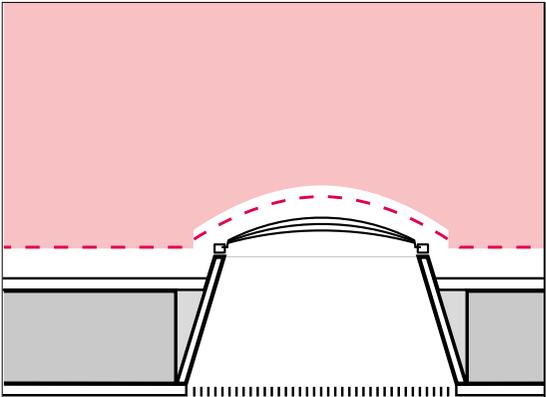
180° auf. Dieser geometrische Raum darf durch den Sollektor nicht beeinträchtigt werden, damit die Kombination von Sollektor und Lichtkuppel als nachrüstbares System möglichst großflächig eingesetzt werden kann (Abb. 27)

- Eine räumliche Nähe zur Dachoberfläche hat sowohl für Unterkonstruktion, als auch für Verschattungszeit einen positiven Effekt. Zeichnerische Untersuchungen zeigen, dass sich die Verschattungszeit mit zunehmender Nähe des Sollektors zur verschatteten Fläche verlängert

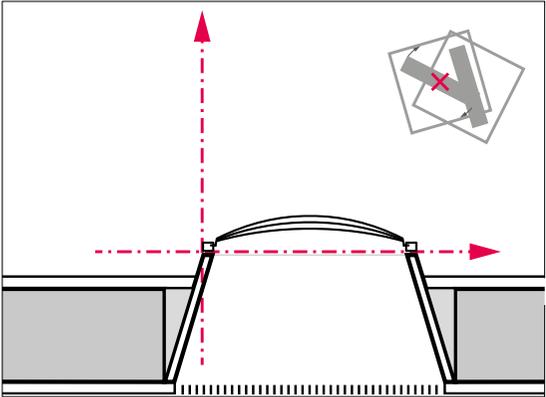
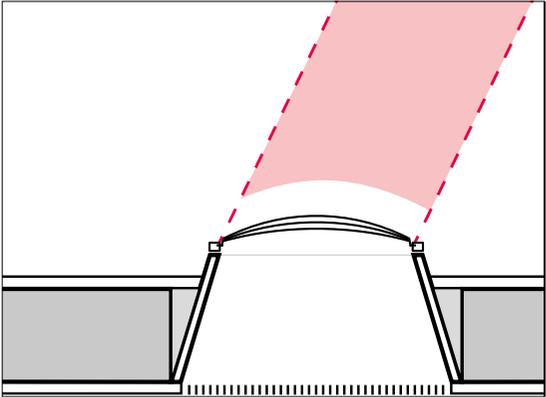


Für die Erfassung der Messwerte werden im Vorfeld die Messpunkte im Modellraum festgelegt. Diese sollen die Beleuchtungssituation im Foyer des KV Gebäudes beurteilen: (Abb. 30, Seite 21)

- Messpunkt 1 [MP01] am Boden in Raummitte
- Messpunkt 2 [MP02] am Boden zentral unterhalb der Lichtkuppel (Südwesten)
- Messpunkt 3 [MP03] am Boden zwischen Lichtkuppel (Nordwesten) und Lichtkuppel (Südwesten)
- Messpunkt 4 [MP04] an Südwand in Flucht von MP01, Höhe 80 cm



- Abb. 24 (links oben) Geometrischer Raum für mögliche Sollektorpositionen
- Abb. 25 (links mitte) Minimale Höhe des Sollektors über der Lichtkuppel
- Abb. 26 (links unten) Höhenwinkel der Sommersonne, etwa 63°
- Abb. 27 (rechts oben) Bewegungsradius der Lichtkuppelhaube zur Entrauchung
- Abb. 28 (rechts mitte) Optimierte Höhe des Sollektors über der Lichtkuppel
- Abb. 29 (rechts unten) Exakt ermittelte Sollektorposition



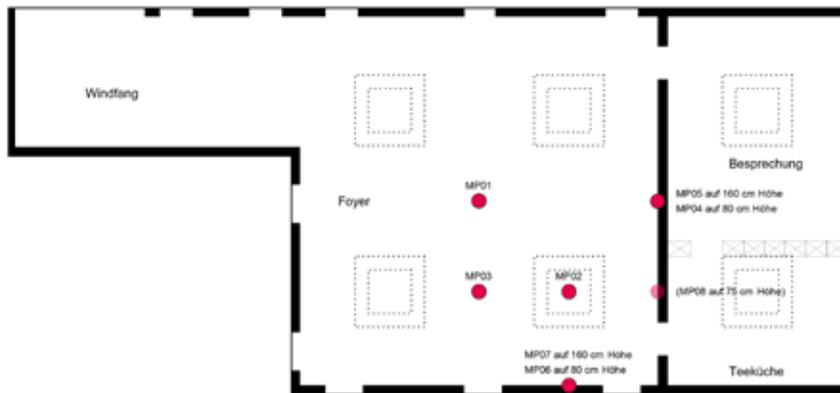


Abb. 30 KV Gebäude "Foyer" Messpunkteplan

- Messpunkt 5 [MP05] an Südwand in Flucht von MP01, Höhe 160 cm
- Messpunkt 6 [MP06] an Westwand in Flucht von MP02, Höhe 80 cm
- Messpunkt 7 [MP07] an Westwand in Flucht von MP02, Höhe 160 cm
- Messpunkt 8 [MP08] an Südwand in Flucht von MP02, Höhe 75 cm; wird als Bedarfsmesspunkt auf Arbeitsflächenhöhe integriert, um arbeitsschutzrechtliche Aspekte prüfen zu können

Die ideale Position für die Kollektorfläche als Verschattungselement wurde sowohl zeichnerisch als auch mathematisch³ ermittelt. Sollektorpositionen mit aufschwenkbarer und nicht-öffnbarer Lichtkuppelhaube. Die Positionsangaben beziehen sich auf die Mitte der Kollektorfläche (seitlich gesehen).

- aufschwenkbare Lichtkuppel (Abb. 31)
Der Sollektor befindet sich 145 cm von dem Drehpunkt der Lichtkuppel in süd-

licher Richtung entfernt. Die Höhe über dem Rahmen beträgt 104 cm. Bei dieser Anordnung kann die Kuppel ungehindert aufklappen.

- nicht-öffnbare Lichtkuppel (Abb. 32)
Die niedrigere untersuchte Position beträgt 133 cm südlich bei einer Höhe von 74 cm. Diese Anordnung kann nur bei Lichtkuppeln verwendet werden, die nicht zur Ent Rauchung eines Raums eingesetzt werden.

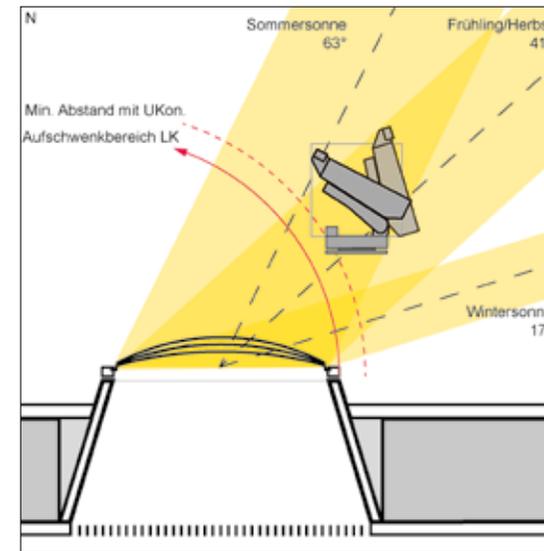


Abb. 31 Ermittelte Sollektorstellung für aufschwenkbare Lichtkuppeln

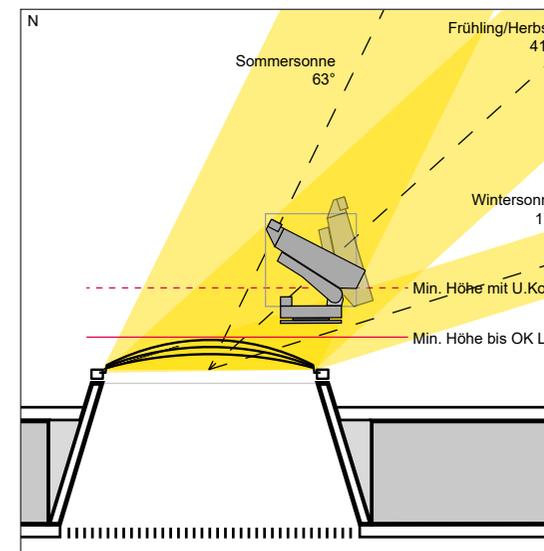


Abb. 32 Ermittelte Sollektorstellung für nicht-aufschwenkbare Lichtkuppeln

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

3 Vgl. Neberich, 2014, S. 47-50

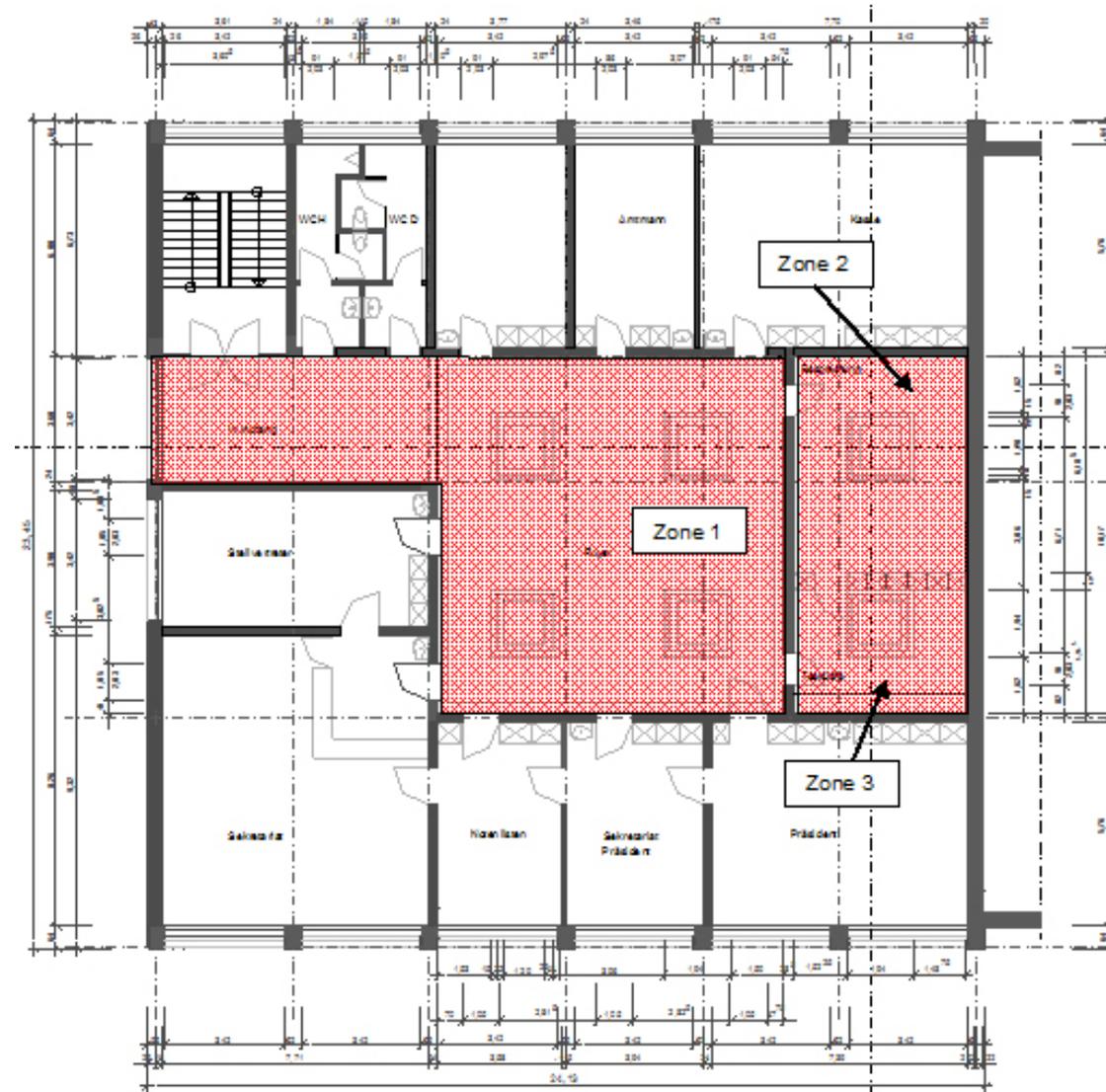
4.2 Simulationsberechnungen Bestand (KV-Gebäude)

Ziel der Simulationsberechnungen ist es, die Tageslichtversorgung des Foyers im KV-Gebäude durch die bestehenden im Flachdach integrierten Lichtkuppeln näher zu untersuchen. Anschließend werden mehrere Optimierungsvorschläge erarbeitet, in denen auf den Einsatz der Sollektortechnologie zurückgegriffen wird, um an sonnigen Tagen die Tageslichtsituation zu verbessern und den Kunstlichtanteil zu reduzieren, um Stromkosten zu senken. Weiterhin wird untersucht, inwiefern der Sollektor durch Anordnung, Konfiguration und Bauteilabmessung als Sonnenschutzsystem, zumindest in Teilbereichen eingesetzt werden kann.

4.2.1 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Rechenverfahren

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen sind mit dem Rechenkern RADIANCE¹ berechnet. RADIANCE wurde als Forschungswerkzeug für die Vorhersage bezüglich der Verteilung sichtbarer Strahlung in beleuchteten Räumen entwickelt. Als Eingabe wird ein dreidimensionales geometrisches Modell der Realität verwendet. Als Ausgabe wird grundsätzlich eine Karte mit spektralen Strahlungswerten in einem farbigen Bild erzeugt. Für die Modellierung wird die Raytracing-Methode (Strahlverfolgung) verwendet. Aus diesem Grund können sowohl diffuse wie auch spektral reflektierende Oberflächen simuliert werden.



SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Abb. 33 Grundriss Verwaltungsgebäude, 1.OG (rot hinterlegt: betrachtete Bereiche)

¹ Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, U.S. Department of Energy, USA

Repräsentative Zonen

Es werden folgende Zonen des KV-Gebäudes (Abb. 33, Seite 22) für den Ist-Zustand vor der Renovierung näher betrachtet:

- Zone 1: Foyer
- Zone 2: Besprechungsraum
- Zone 3: Teeküche

In den weiterführenden Schritten wird für den renovierten Zustand nur noch das reduzierte Modell des Foyers betrachtet. Diese Ergebnisse können dann mit den Ergebnissen aus den Messungen mit dem Modell im Maßstab 1:10 verglichen werden.

Randbedingungen

Randbedingungen Foyer für Ist-Zustand:

- Standort: Nürnberg (49°27' N; 11°05' E)
- Himmelsmodell:
 - bedeckter Himmel nach CIE (ohne Sonne), entspricht einem Himmel mit einer vollständig geschlossenen Wolkendecke, d.h. 100 % der Himmelsfläche ist mit Wolken bedeckt
 - klarer Himmel nach CIE (mit Sonne), entspricht einem Himmel, bei dem weniger als 30 % der Himmelsfläche durch Wolken bedeckt ist
- Lichtkuppeln sind zur Raumseite hin mit weiß lackiertem Gitterrost abgeschlossen
- Reflexionsgrade:
 - Lichtkuppel: 80 %
 - Foyer (Zone 1):
 - Boden: 83,5 % (geschliffener heller Naturstein)
 - Decke: 80 % (weiße Deckenplatten)
 - Wände: 80 % (weiß verputzt)
 - Besprechungsraum (Zone 2):
 - Boden: 26,8 % (blauer Teppich)

- Decke: 80 % (weiße Deckenplatten)
- Wände: 80 % (weiß verputzt)
- Teeküche (Zone 3):
 - Boden: 26,8 % (blauer Teppich)
 - Decke: 80 % (weiße Deckenplatten)
 - Wände: 80 % (weiß verputzt)
- Lichttransmissionsgrade unter Berücksichtigung Verwitterung und Verschmutzung:
 - Foyer (Zone 1):
 - Fenster: 74 % (2-Scheiben Wärmeschutzverglasung)
 - Lichtkuppel: 40 % (doppelschalig, PVC)
 - Besprechungsraum (Zone 2):
 - Teeküche (Zone 3):
 - Lichtkuppel: 40 % (wie Foyer)
- Nutzebene - Betrachtungsebene:
 - Foyer (Zone 1): 0,00 m
 - Besprechungsraum (Zone 2): 0,85 m
 - Teeküche (Zone 3): 0,85 m

Randbedingungen Foyer für renovierten Zustand:

- Lichttransmissionsgrade Lichtkuppel:
 - Renovierter Neu-Zustand: 70 %
 - Transluzente Lichtkuppel: 52 %
- Lichtkuppeln sind zur Raumseite hin nicht mit Gitterrost abgeschlossen

Technischen Daten des Sollektors:

- Länge x Breite x Höhe: 0,583 m x 0,56 m x 0,625 m (voll aufgestellt)
- Gewicht: 26,5 kg, zusätzlich 1,1 kg/m Lichtkabel
- Max. Lichtübertragungslänge: 40 m
- Übertragender Spektralbereich: 350 nm - 780 nm (sichtbares Licht)
- Lichtleiter/Sollektorkabel (110 POF-Bundle) pro Sollektor: 8 Stück
- Abstrahlwinkel Lichtleiter: $\pm 30^\circ$

4.2.2 Simulationsergebnisse Bestandssituation

Betrachtet wird ein bedeckter Himmel nach CIE, mit einem geringen Indirektanteil, die externe Beleuchtungsstärke beträgt dabei 11.300 lx (21. März, 10.00 Uhr).

Foyer (Zone 1)

Für das Foyer wird ein durchschnittlicher Tageslichtquotient von ca. 2,2 % und ein minimaler Tageslichtquotient von etwa 0,3 % ausgegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass der aktuell bestehende natürliche Lichteintrag keine ausreichende Tageslichtversorgung ergibt. Weiterhin ist zu erkennen, dass aufgrund der beiden Außenfenster auf der Nord- bzw. Ostseite der mittlere Tageslichtquotient deutlich angehoben werden kann, d.h. dass ohne die beiden Fenster der mittlere Tageslichtquotient noch geringer ausfallen wird. (Abb. 34, Seite 24)

Für einen Tag mit bedecktem Himmel ergibt sich für das Foyer eine minimale Beleuchtungsstärke von 50 lx und eine mittlere Beleuchtungsstärke von 246 lx, im Bereich direkt unterhalb der Lichtkuppeln eine Beleuchtungsstärke von ca. 100 bis 150 lx. (Abb. 35, Seite 24) Nach DIN 12464 Teil 1 beläuft sich die geforderte Beleuchtungsstärke für Verkehrswege und Flure auf 100 lx, diese wird nicht überall im Foyer erreicht. Aufgrund dieser Tatsache und des insgesamt dunklen Raumeindrucks ist zusätzliches Einschalten von künstlicher Beleuchtung unumgänglich.

Besprechungsraum (Zone 2)

Die Berechnungsergebnisse für den Besprechungsraum (Zone 2) zeigen, dass auch hier die geforderten Tageslichtquotienten nicht

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

erreicht werden. Das Programm gibt einen durchschnittlichen Tageslichtquotienten von ca. 0,62 % und einen minimalen Tageslichtquotienten von etwa 0,01 % an. Der Lichteintrag in den Raum bzw. die Verteilung liegt sogar unterhalb der Ergebnisse von Zone 1.

Teeküche (Zone 3)

Ebenso wie in den zuvor betrachteten Räumen wird für die Teeküche die geforderte Beleuchtungsstärke von 200 lx nach DIN 12464 Teil 1 nicht erreicht. Aus den Berechnungen ergibt sich eine mittlere Beleuchtungsstärke von etwa 95 lx, bei einem mittleren Tageslichtquotienten von ca. 0,84 % und einem minimalen Tageslichtquotienten von etwa 0,20 %.

4.2.3 Fazit: Bestandssituation

Folgende Erkenntnisse werden am Beispiel des Foyers deutlich:

- Unzureichende Beleuchtungsstärke (bei bedecktem Himmel) für alle Räume:
 - Foyer: ≈ 166 lx (Sollwert 100 lx), jedoch keine gleichmäßige Ausleuchtung
- Unzureichender mittlerer und minimaler Tageslichtquotient (TLQ) für alle Räume (Soll: TLQmittel: 4,0 %, TLQmin: 2,0 %)
 - Foyer: TLQmittel: 2,2 %, TLQmin: 0,2 %
- Unzureichende Gleichmäßigkeit der Beleuchtung in allen Bereichen:
 - Foyer: 0,12 (Sollwert 0,40)

Der Ist-Zustand von Foyer, Besprechungsraum und Teeküche erfüllt aufgrund der alten und verwitterten Lichtkuppeln hinsichtlich Tageslichtquotienten, Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit der Beleuchtung nicht die geforderten Werte der einschlägigen Richtlinien und Normen.

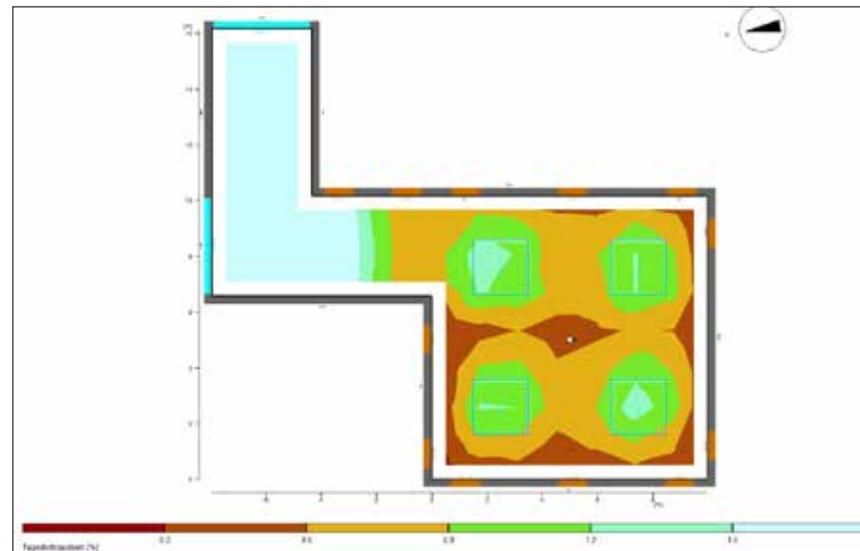


Abb. 34 Simulationsergebnisse - Tageslichtquotient für das Foyer (Zone 1)

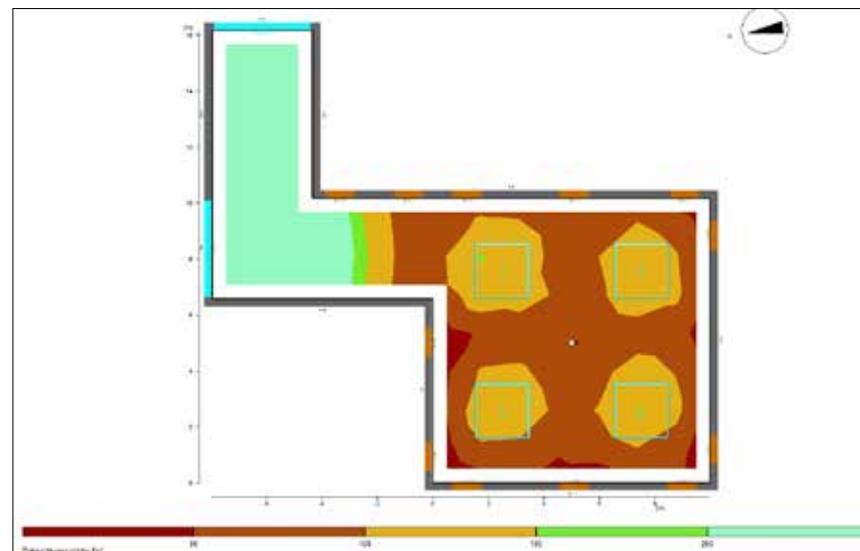


Abb. 35 Simulationsergebnisse - Beleuchtungsstärke für das Foyer (Zone 1)

4.3 Kunstlichtuntersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen, Messungen und Analysen verschiedener tageslichttechnischer Situationen, erfolgten in zwei Stufen: Mit künstlicher Lichtquelle (Versuchsreihe 1 bis 3) und unter freiem Himmel (Versuchsreihe 4 bis 7).

Die Versuche umfassen zwei Versuchsreihen mit 18 und eine Versuchsreihe mit 12 Aufbauvariationen. (Abb. 36) In der Ersten wurden drei Sollektorstellungen mit zwei verschiedenen Transmissionsgraden der Haube im Jahresverlauf miteinander verglichen. Zusätzlich zur Erfassung der cd/m^2 -Werte durch eine Leuchtdichtekamera und den Lux-Werten durch die manuelle Messung mit einem Luxmeter, wird für jeden Durchgang eine Falschfarben-Darstellung (Abb. 45, Seite 29) erstellt. Diese verdeutlicht Helligkeitsunterschiede und macht sie anhand einer Farbskala ablesbar. Außerdem entsteht ein Foto mit einer stationär angebrachten Systemkamera um die jeweiligen Beleuchtungseffekte auch visuell vergleichen und beurteilen zu können. (Abb. 44, Seite 29)

Neben der Referenzmessung, Lichtkuppeln mit klarer und transluzenter Haube (Transmissionsgrad der Folie 52%) ohne Sollektor, erfolgen die Versuche mit unterschiedlichen Sollektorpositionen zur Lichtkuppel. In den Versuch wird ein opaker Dummy im Maßstab 1:10 eingesetzt.

IST

0.1 - Sommer, klare Haube¹

- 0.2 - Sommer, transluzente Haube
- 0.3 - Frühling, klare Haube
- 0.4 - Frühling, transluzente Haube

¹ vgl. S. 28, 29, 30 (Versuchsreihe 1, 2, 3)

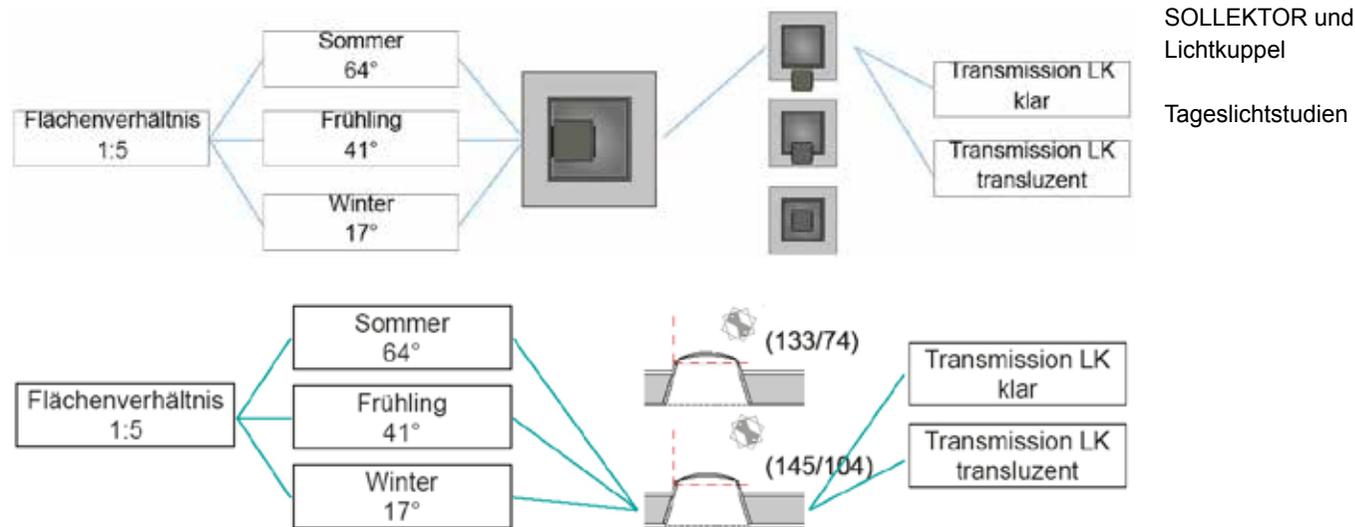


Abb. 36 Struktur der Versuchsreihen

- 0.5 - Winter, klare Haube
- 0.6 - Winter, transluzente Haube

Mittlere Ausrichtung

- 1.1 - Mittag, Sommer, klare Haube²**
- 1.2 - Mittag, Sommer, transluzente Haube
- 1.3 - Mittag, Frühling, klare Haube
- 1.4 - Mittag, Frühling, transluzente Haube
- 1.5 - Mittag, Winter, klare Haube
- 1.6 - Mittag, Winter, transluzente Haube
- 1.7 - über Rahmen, Sommer, klare Haube³**
- 1.8 - über Rahmen, Sommer, transluzent
- 1.9 - über Rahmen, Frühling, klare Haube
- 1.10 - über Rahmen, Frühling, transluzent
- 1.11 - über Rahmen, Winter, klare Haube
- 1.12 - über Rahmen, Winter, transluzent

² vgl. S. 28 (Versuchsreihe 1)
³ vgl. S. 28 (Versuchsreihe 1)

- 1.13 - vor Rahmen, Sommer, klare Haube
- 1.14 - vor Rahmen, Sommer, transluzent
- 1.15 - vor Rahmen, Frühling, klare Haube
- 1.16 - vor Rahmen, Frühling, transluzent
- 1.17 - vor Rahmen, Winter, klare Haube
- 1.18 - vor Rahmen, Winter, transluzent

Westliche Ausrichtung

- 2.1 - Mittag, Sommer, klare Haube⁴**
- 2.2 - Mittag, Sommer, transluzente Haube
- 2.3 - Mittag, Frühling, klare Haube
- 2.4 - Mittag, Frühling, transluzente Haube
- 2.5 - Mittag, Winter, klare Haube
- 2.6 - Mittag, Winter, transluzente Haube
- 2.7 - über Rahmen, Sommer, klare Haube⁵**
- 2.8 - über Rahmen, Sommer, transluzent
- 2.9 - über Rahmen, Frühling, klare Haube

⁴ vgl. S. 29 (Versuchsreihe 2)
⁵ vgl. S. 29 (Versuchsreihe 2)

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

- 2.10 - über Rahmen, Frühling, transluzent
- 2.11 - über Rahmen, Winter, klare Haube
- 2.12 - über Rahmen, Winter, transluzent

2.13 - vor Rahmen, Sommer, klare Haube⁶

- 2.14 - vor Rahmen, Sommer, transluzent
- 2.15 - vor Rahmen, Frühling, klare Haube
- 2.16 - vor Rahmen, Frühling, transluzent
- 2.17 - vor Rahmen, Winter, klare Haube
- 2.18 - vor Rahmen, Winter, transluzent

Favorisierte Positionen

3.1 - Hoch, Sommer, klare Haube⁷

- 3.2 - Hoch, Sommer, transluzente Haube
- 3.3 - Hoch, Frühling, klare Haube
- 3.4 - Hoch, Frühling, transluzente Haube
- 3.5 - Hoch, Winter, klare Haube
- 3.6 - Hoch, Winter, transluzente Haube

3.7 - Tief, Sommer, klare Haube⁸

- 3.8 - Tief, Sommer, transluzente Haube
- 3.9 - Tief, Frühling, klare Haube
- 3.10 - Tief, Frühling, transluzente Haube
- 3.11 - Tief, Winter, klare Haube
- 3.12 - Tief, Winter, transluzente Haube

4.4 Simulationsberechnungen

4.4.1 Vergleich klare – transluzente Lichtkuppel

Die beiden Simulationen berücksichtigen einen klaren Himmel nach CIE und werden für den 21. März um 12.00 Uhr berechnet. In Abbildung 37 sind die Mittelwerte der Beleuchtungsstärke für die verschiedenen Betrachtungspunkte der zwei Varianten grafisch dargestellt.

⁶ vgl. S. 29 (Versuchsreihe 2)
⁷ vgl. S. 30 (Versuchsreihe 3)
⁸ vgl. S. 30 (Versuchsreihe 3)

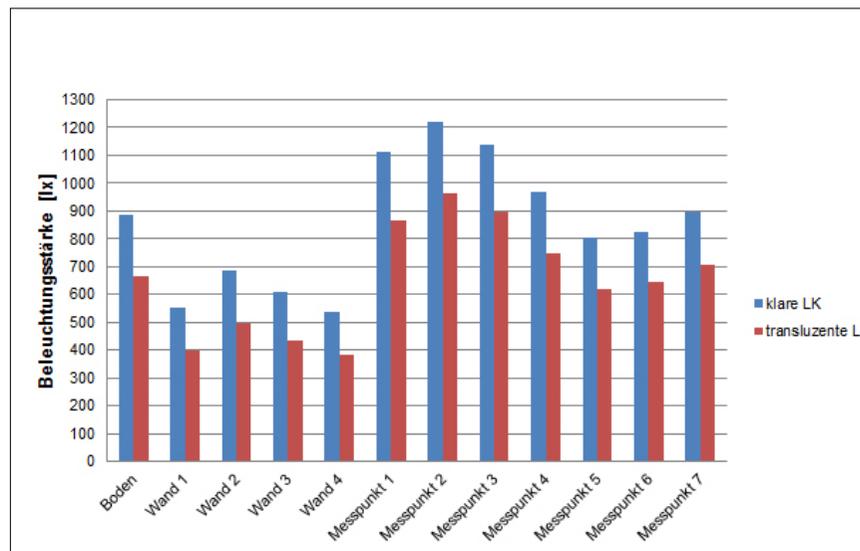


Abb. 37 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche für klare und transluzente Lichtkuppel

Es zeigt sich, dass durch die transluzente Lichtkuppel durchschnittlich 200 lx weniger im Raum erreicht werden können, dennoch ist die Beleuchtungsstärke im Raum zu diesem Zeitpunkt ausreichend hoch. Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus den Simulationsberechnungen feststellen:

- Klare Lichtkuppel:
 - Ausreichende Beleuchtungsstärke
 - Ausreichende Gleichmäßigkeit der Beleuchtung auf dem Boden (Nutzebene)
- Transluzente Lichtkuppel:
 - Ausreichende Beleuchtungsstärke
 - Ausreichende Gleichmäßigkeit der Beleuchtung auf dem Boden (Nutzebene)
 - ≈ 24 % geringere Beleuchtungsstärke bei transluzenter Lichtkuppel
 - ≈ 18 % geringere Gleichmäßigkeit der Beleuchtung bei transluzenter Lichtkuppel

4.4.2 Einfluss Sollektor auf Verschattung

Es werden zur Beurteilung der Verschattung durch den Sollektor folgende Zeitpunkte betrachtet (alle Uhrzeiten für den 21. Juni bei klarem Himmel gültig):

- 11:00 Uhr
- 12:00 Uhr
- 13:00 Uhr
- 14:00 Uhr
- 15:00 Uhr

Die Position des Sollektors wird in Bezug zum nördlichen Rand der Lichtkuppel gemessen, von dort sitzt dieser in der horizontalen 1,34 m und in der vertikalen 0,91 m entfernt.

Die Abmessungen des Sollektors sind wie folgt angesetzt: (Abb. 31+32, Seite 21)

- Länge x Breite x Höhe: 0,56 m x 0,50 m x 0,19 m (entspricht einer Einzel-Sollektorfläche von 0,28 m²)

In einer weiteren Betrachtung für 13.00 Uhr (Variante 2) werden die Abmessungen wie folgt angesetzt:

- Länge x Breite x Höhe: 1,12 m x 1,00 m x 0,19 m (entspricht einer Einzel-Sollektorfläche von 1,12 m²)

Die ermittelten mittleren Beleuchtungsstärken für die betrachteten Messbereiche (11:00 Uhr) zeigen gegenüber der Version ohne Sollektor, dass sich die Beleuchtungsstärke lediglich um durchschnittlich 51 lx (= 3,6 %) reduziert. Dieser geringe Wert ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt keine direkte Verschattung durch den Sollektor, d.h. direkte Sonneneinstrahlung gelangt am Sollektor vorbei in den Raum, erfolgt. (Abb. 38) Mit Hilfe des Sollektors reduziert sich die Beleuchtungsstärke durchschnittlich um 261 lx (= 13,4 %). Gegenüber den Berechnungen für 11:00 Uhr bedeutet dies einen starken Zuwachs, da bereits um 12:00 Uhr eine geringfügige Beschattung durch den Sollektor erfolgt. (Abb. 39)

Da zum Berechnungszeitpunkt 13:00 Uhr eine hohe direkte Beschattung durch den Sollektor vorliegt, kann im Schnitt die Beleuchtungsstärke um 666 lx (= 25,9 %) reduziert werden. (Abb. 40, Seite 28) Die Untersuchungen mit kleinerem und größerem Sollektor zeigen, dass durch einen doppelt so großen Sollektor die Beleuchtungsstärke und damit der Wärmeeintrag um 1.035 lx (= 55,4 %) gegenüber dem kleineren Sollektor reduziert werden kann, da ein Großteil der direkten Sonneneinstrahlung durch den Sollektor verschattet wird. (Abb. 41, Seite 28)

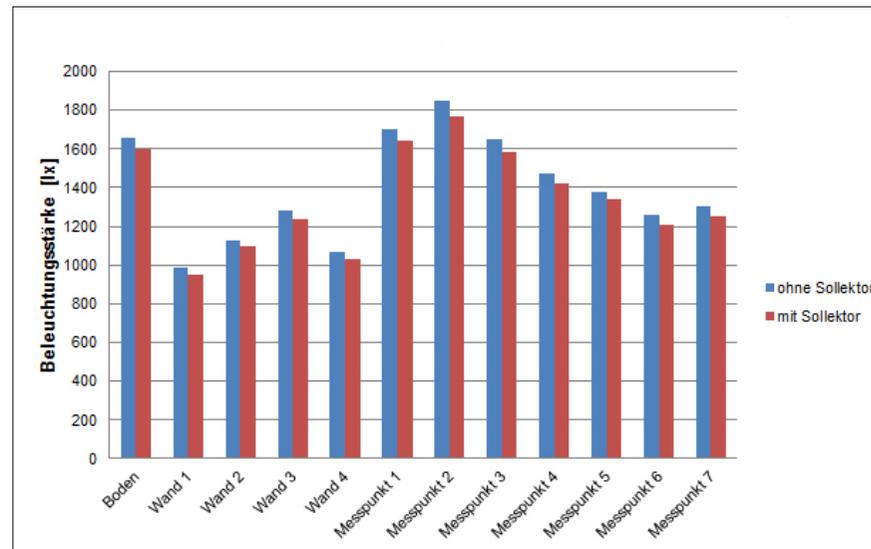


Abb. 38 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – mit und ohne Sollektor, 11:00 Uhr

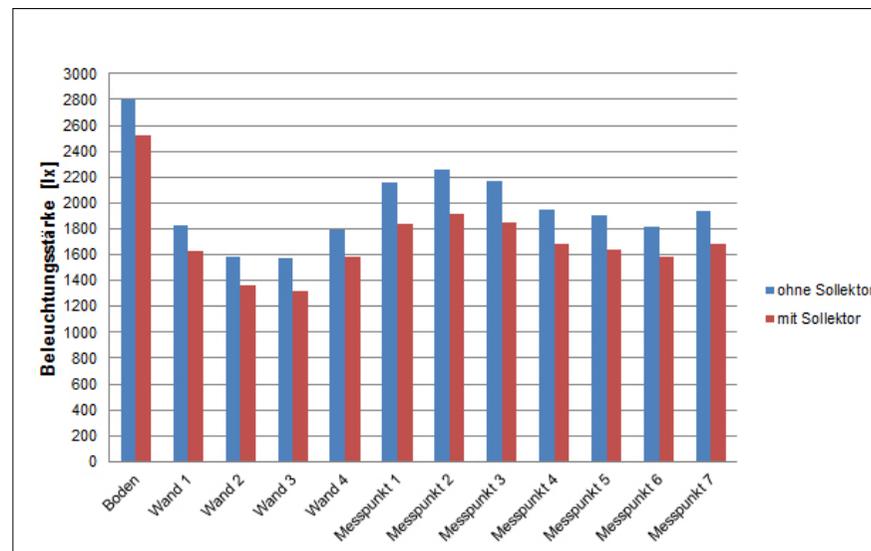


Abb. 39 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – mit und ohne Sollektor, 12:00 Uhr

Da die Sonne um 14:00 Uhr direkt über der Lichtkuppel steht, kann ein großer Teil der direkten Sonneneinstrahlung verschattet werden, dadurch resultiert eine durchschnittliche Reduzierung der Beleuchtungsstärke um 680 lx (= 25,9 %). (Abb. 42, Seite 29)

Um 15:00 Uhr kann nur noch ein Teil der direkten Sonneneinstrahlung durch den Sollektor vom Raum ferngehalten werden, daraus ergibt sich eine durchschnittliche Reduzierung der Beleuchtungsstärke um 328 lx (= 17,4 %). (Abb. 43, Seite 29)

4.4.3 Fazit: Simulationsberechnungen

- 11.00 Uhr:
 - Keine direkte Verschattung
 - \varnothing 4 % geringere Beleuchtungsstärke
- 12.00 Uhr:
 - Keine direkte Verschattung
 - \varnothing 13 % geringere Beleuchtungsstärke
- 13.00 Uhr:
 - Direkte Verschattung
 - \varnothing 26 % geringere Beleuchtungsstärke
- 13.00 Uhr und doppelter Kollektorfläche:
 - Direkte Verschattung
 - \varnothing 55 % geringere Beleuchtungsstärke gegenüber der kleineren Kollektorfläche
- 14.00 Uhr:
 - Direkte Verschattung
 - \varnothing 26 % geringere Beleuchtungsstärke
- 15.00 Uhr:
 - Direkte Verschattung
 - \varnothing 17 % geringere Beleuchtungsstärke

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Sollektor vor allem bei hohem Sonnenstand die Beleuchtungsstärke und damit die direkte Sonneneinstrahlung reduziert werden kann, dies führt dementsprechend zu geringeren anfallenden Wärmelasten im Raum während den wärmeren Monaten.

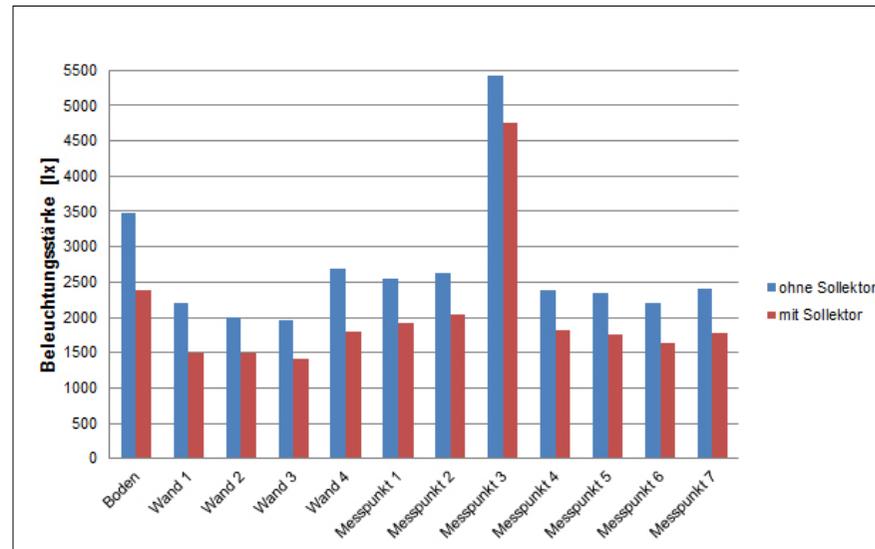


Abb. 40 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – mit und ohne Sollektor, 13:00 Uhr

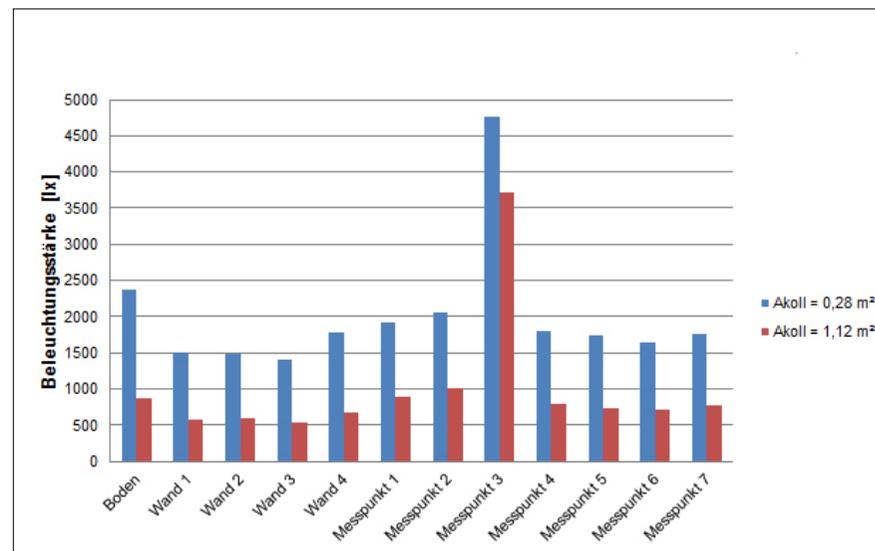


Abb. 41 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – kleinerer (A = 0,28 m²) und größerer (A = 1,12 m²) Sollektor, 13:00 Uhr

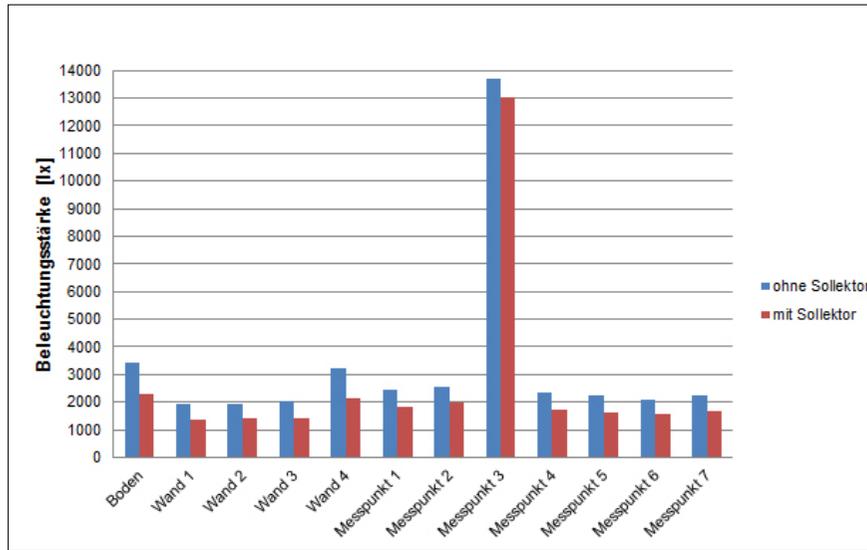


Abb. 42 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – mit und ohne Sollektor, 14:00 Uhr

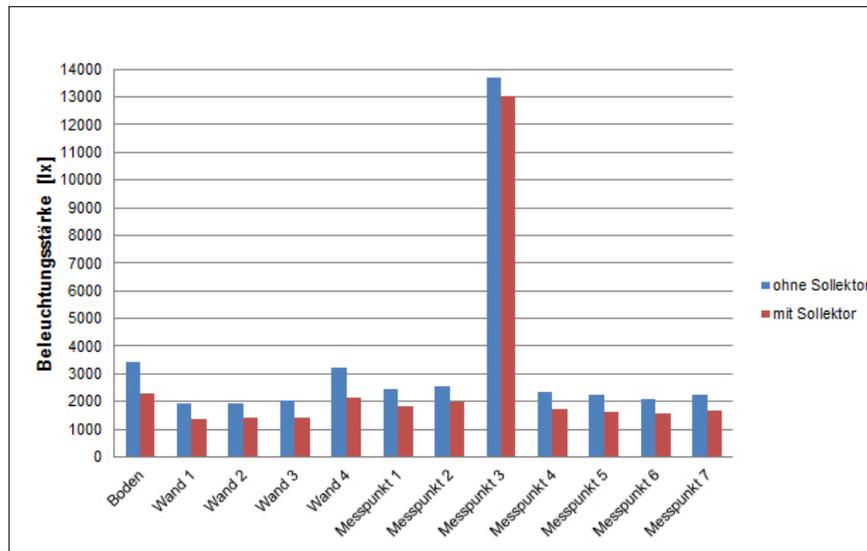


Abb. 43 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche – mit und ohne Sollektor, 15:00 Uhr



SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Abb. 44 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch ohne Schattendummies

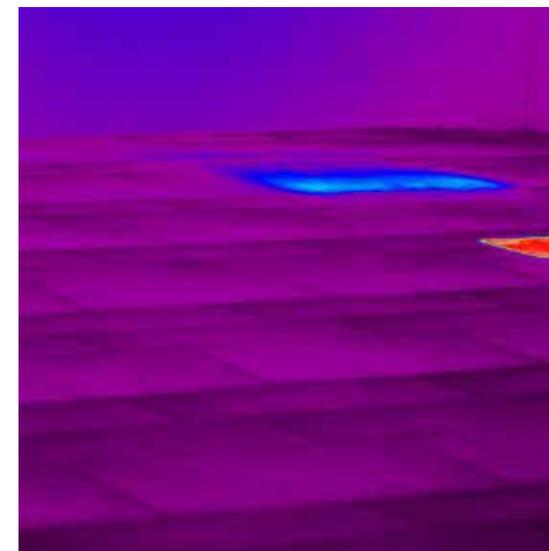
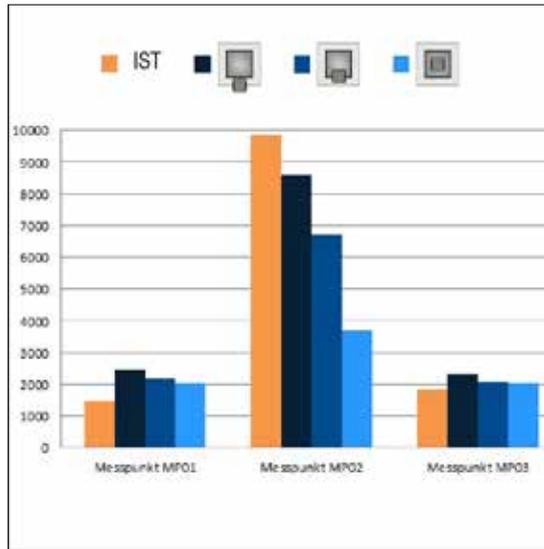
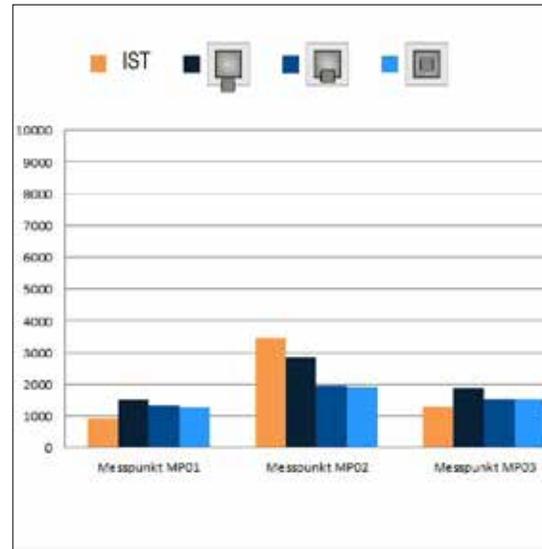


Abb. 45 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch ohne Schattendummies



Tab. 1 Sommer 63°, klare Haube, Starke Beeinflussung, Treppung invertiert



Tab. 2 Sommer 63°, transluzente Haube, Starke Beeinflussung, Treppung invertiert



Abb. 47 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 1.13

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Versuchsreihe 1
Mittlere Ausrichtung
0.1, 1.1, 1.7, 1.13
Sommer / klare Haube

Bei der Datenauswertung (Tab. 1+2) der Beleuchtungsstärke-Messungen in dieser Versuchsreihe sind Ungereimtheiten aufgefallen. Es kommt immer wieder vor, dass die Werte ihr jeweiliges Pendant im IST-Zustand überschreiten. Die erlaubte Fehlertoleranz des Luxmeters von $\pm 20\%$ überschreitet diese Abweichung nicht. Die Messungen der Versuchsreihe werden deshalb immer dann, wenn der Fehler auftaucht, nur untereinander verglichen.

Fazit Variante Mittig (1.1)

Diese Sollektorstellung zeigt bei alleiniger Betrachtung der Messung positive Ergebnisse.

Fazit Variante über Rahmen (1.7)

Diese Anordnung des Sollektors beeinflusst die solaren Erträge im Sommer zwar nicht so

stark wie die Variante Mittig, auf Grund der einfacheren Konstruktion weist diese dennoch Vorteile auf.

Fazit Variante vor Rahmen (1.13)

Die Stellung ist, trotz einfacherer Montage, denkbar ungeeignet für eine Verbesserung der Beleuchtungssituation des Foyerraumes. Die zu beeinträchtigenden Sommersonnenstrahlen können den Raum beinahe ungehindert aufheizen wohingegen die gewünschten Wintersonnenstrahlen zu einem großen Teil abgeblockt werden.

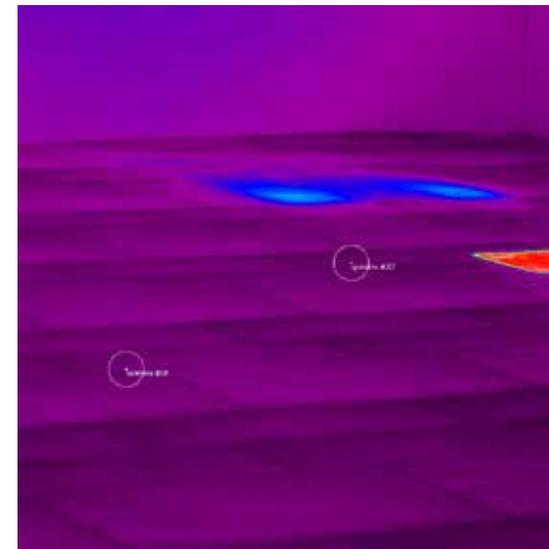
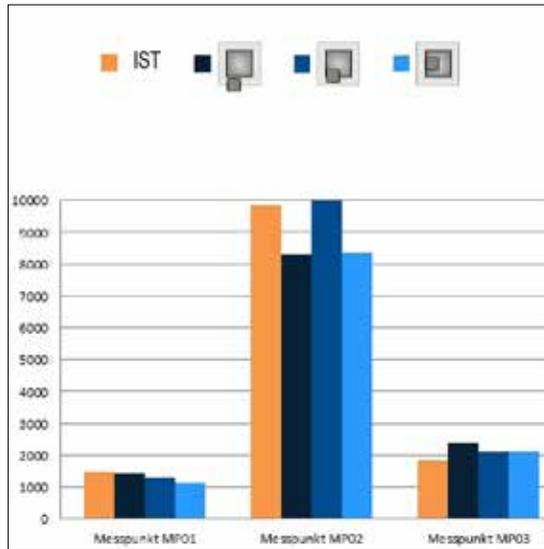
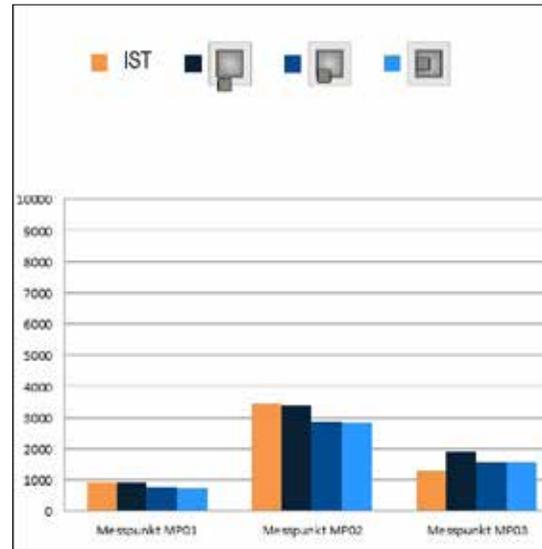


Abb. 46 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 1.13



Tab. 3 Sommer 63°, klare Haube, Starke Beeinflussung, Treppung invertiert



Tab. 4 Sommer 63°, transluzente Haube, Starke Beeinflussung, Treppung invertiert



Abb. 48 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 2.13

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Versuchsreihe 2
Westliche Ausrichtung
0.1, 2.1, 2.7, 2.13
Sommer / klare Haube

Die Auffälligkeiten von Versuchsreihe 1 konnten in abgeminderter Form auch bei dieser Auswertung (Tab. 3+4) beobachtet werden. Es kommt auch hier vor, dass die Werte ihr jeweiliges Pendant im IST-Zustand überschreiten. Die erlaubte Fehlertoleranz des Luxmeters von $\pm 20\%$ überschreitet diese Abweichung teilweise. Vor allem die Werte im Sommer unter Messpunkt 2 erscheinen wenig plausibel, die die Messpunkte starr sind und der Sollektorschatten auf Grund der Verschiebung aus der mittigen Nord-Süd Achse diese nun nicht mehr abdeckt.

Die Werte in dieser Versuchsreihe zeigen sich, im Vergleich zu Versuchsreihe 1, von der veränderten Sollektorstellung beinahe unberührt. Die Unterschiede sind sehr gering und lassen sich keinem erkennbaren Muster zuordnen. Das lässt vermuten, dass die marginalen Abweichungen eher von

Messungenauigkeiten und Fehlertoleranzen verursacht sind. Die Ergebnisse sind somit vergleichbar den Einschätzungen und Abhängigkeiten wie bei Versuchsreihe 1.

Ursache für diese sehr ähnlichen Werte könnte sein, dass die mehrfache Reflexion der Lichtstrahlen an den Wänden des vergleichsweise hohen Lichtschachts der Lichtkuppel für eine Kompensation des asymmetrisch einfallenden Lichtes sorgt. Festzustellen ist hierbei, dass das Licht auf dem Boden weiterhin gleichermäßig verteilt ist. Das Schattenbild, von der diffusen Strahlung erzeugt, zeigt sich bei einer veränderten Position des Sollektors auf der West-Ost-Achse unverändert.

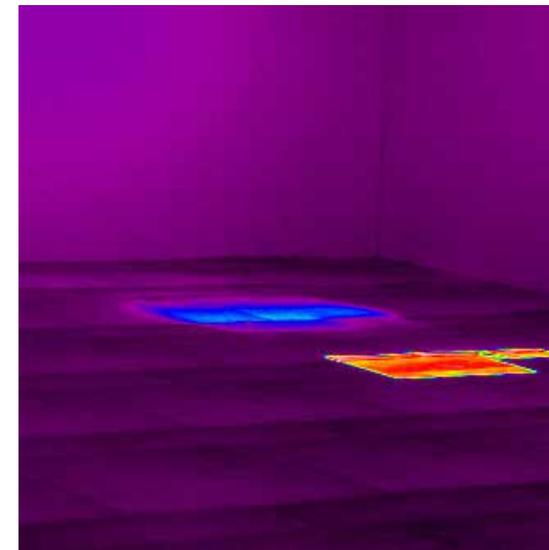
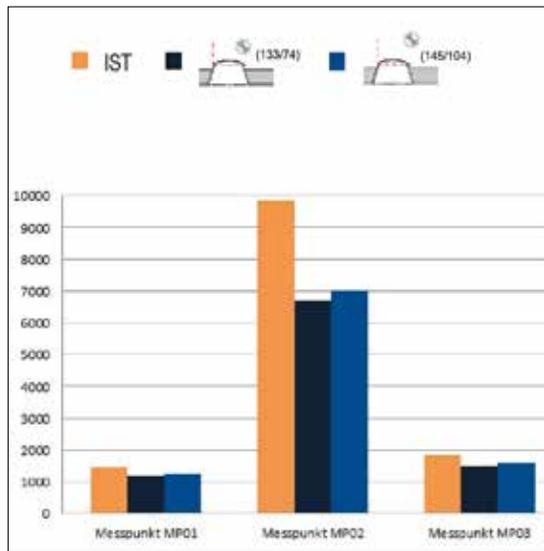
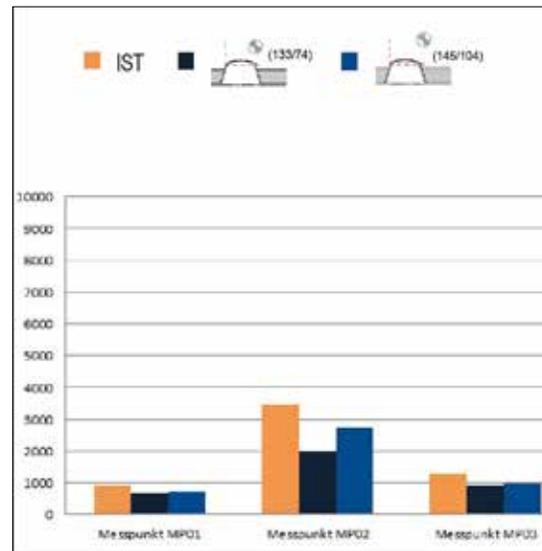


Abb. 49 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 2.13



Tab. 5 Sommer 63°, klare Haube, Starke Beeinflussung, Trepnung invertiert



Tab. 6 Sommer 63°, transluzente Haube, Starke Beeinflussung, Trepnung invertiert



Abb. 50 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 3.7

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Versuchsreihe 3
Favorisierte Positionen
0.1, 3.1, 3.7
Sommer / klare Haube

Die Auffälligkeiten von Versuchsreihe 1 und 2 sind bei diesem Durchgang nicht mehr festzustellen. Die Messungen des IST-Zustandes werden nach dieser Erkenntnis wiederholt und ergeben vergleichbare Werte. Diese Daten können daher als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Möglicherweise ist der zeitliche Abstand der Messungen von Versuchsreihe 1 und 2, zu denen des IST-Zustandes, in Verbindung mit der Fehlertoleranz des Luxmeters, Grund für die Abweichungen.

Fazit Variante Hoch (3.1)

Diese Positionierung des Sollektors, die auf einer umfangreichen zeichnerischen und geometrisch-mathematischen Herleitung basiert, zeigt sich fundiert und wird nachvollziehbar bestätigt. Für nicht-aufschwenkbare Lichtkuppelhauben stellt dies die bevorzugte Sollektorposition dar. Gleichwohl sind in Ver-

suchsreihe 1 Positionen mit besseren Werten gemessen worden. Eine genauere Evaluierung der Messergebnisse im Vergleich zeigt keine neuen Erkenntnisse. Auch hier wäre zu kontrollieren, ob es sich um Messfehler handeln kann.

Fazit Variante Tief (3.7)

Der Sollektor befindet sich an der niedrigsten Position, die die Sonnenstrahlen mit der gesamten Adaptionfläche trifft, ohne das Aufklappen der Lichtkuppelhaube zu unterbinden. Diese Anordnung erweist sich somit als idealer Kompromiss zwischen Verschattung und einfacher Konstruktion, was auf Basis des geometrisch-zeichnerischen Nachweises sich aber in den Messwerten nicht eindeutig widerspiegelt.

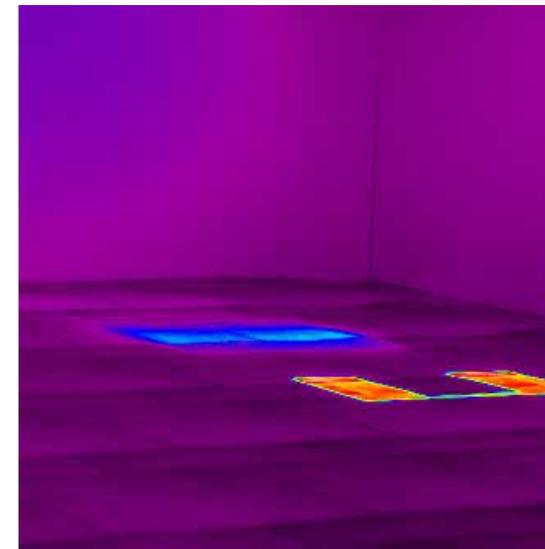


Abb. 51 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 3.7

4.5 Tageslichtuntersuchungen

Bei der zweiten Phase der lichttechnischen Untersuchungen unter freiem Himmel¹ sind zunächst Anpassungen an dem Modellraum erforderlich. (Abb. 52+53) Da nun auch mit einem Sollektormodell im Maßstab 1:10 gearbeitet wird (Abb. 54, rechts), ist die Planung der Lichtauslässe notwendig. Bei diesen handelt es sich um die Leitungsenden der Kunststofffasern des Sollektors, durch die direktes Sonnenlicht in einem Kegel von $\pm 30^\circ$ in den Raum eintritt. Aus einem Sollektor führen 8 Faserbündel Licht in das Gebäudeinnere. Da in diesem Projekt 4 Lichtkuppeln mit dem Lichtleitsystem bestückt sind, wird mit 32 Bündeln gearbeitet. (Abb. 54+55)

Auf Basis unterschiedlicher konzeptioneller Ansätze werden Lichtkonzept-Varianten für das Foyer entwickelt. Grundlage sind u.a. die Ergebnisse der begleitenden Simulationsberechnungen, klare geometrische Anordnung der Lichtauslässe und ‚künstlerische‘ Aspekte. In jeder Variante werden 32 Spots verwendet. Es wird darauf geachtet, dass die Versuche bei direkter Sonnenstrahlung durchgeführt werden. Bevor eine Versuchsreihe startet, ist stets die Beleuchtungsstärke der Sonne zu ermitteln. Diese pendelte im Versuchszeitraum² zwischen $103 \cdot 10^3 \text{ lx}$ und $126 \cdot 10^3 \text{ lx}$. Neben der Ermittlung des IST-Zustands umfassen die Experimente 3 Messreihen mit 4 Versuchen. Jede dieser Reihen beinhaltet die Situation mit und ohne zugeschaltetem Sollektoren bei jeweils klarer und transluzenter Lichtkuppelhaube.

1 Die Arbeiten finden auf dem Dach des WE-Gebäudes statt, Technische Hochschule Nürnberg, Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg
2 Zwischen 28. August und 17. September 2014 (an den einzigen drei wolkenlosen Tagen)



Abb. 52 Modell (Foyer KV-Gebäude) mit Mess-technik-Equipment



Abb. 53 Montage der opaken Sollektor-Modelle (M 1:10) als Verschatterelemente



Abb. 54 Montage der abgehängten Decke zur Aufnahme der lichtleitenden Fasern

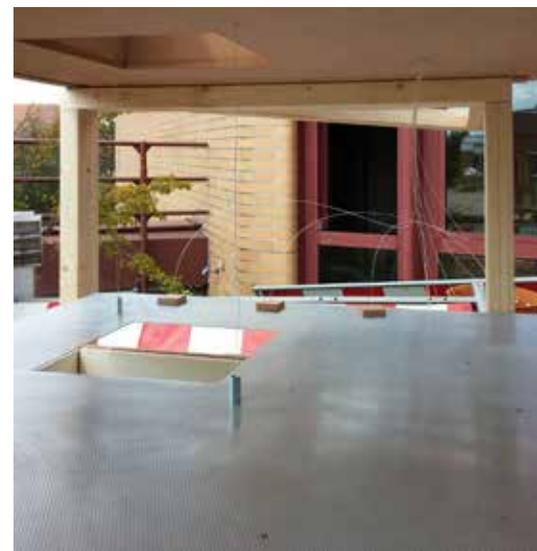


Abb. 55 Lochblech aus Aluminium als Raster für variable wählbare Austrittspunkte

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

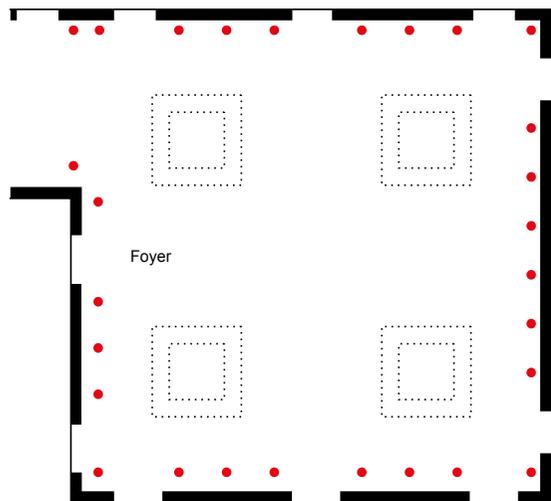


Abb. 56 Lichtplanung Variante 1

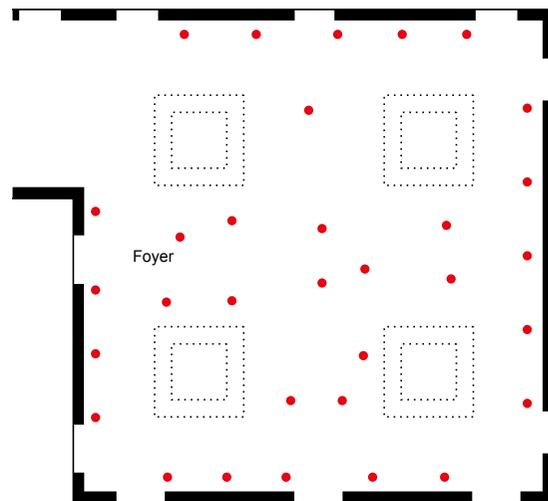


Abb. 57 Lichtplanung Variante 2

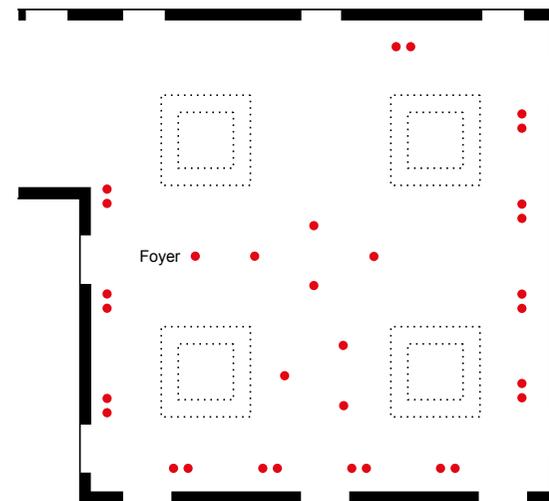


Abb. 58 Lichtplanung Variante 3

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Die Ergebnisse beinhalten, neben der Erfassung von Leuchtdichte [cd/m^2] und Beleuchtungsstärke [lx] auch Falschfarbendarstellungen sowie Bilder der Systemkamera. Letztere sind von hoher Wichtigkeit, weil sich die zum Teil freieren Anordnungen der Lichtauslässe in den Konzeptvarianten nicht so einfach in ihren Messwerten vergleichen lassen. Angesichts der geringen Anzahl an Messpunkten ist es möglich, dass sich ein Messpunkt in einem absichtlich dunkel gehaltenen Bereich befindet.

Durchgeführte Messungen

IST

0.1 - Sommer, klare Haube³

0.2 - Sommer, transluzente Haube

³ vgl. S. 33, 34, 35 (Variante 1, 2, 3)

Lichtplanung Variante 1 (Abb. 56)

- 1.1 - Hoch, Sommer, m.Sol., klare Haube⁴**
- 1.2 - Hoch, Sommer, m.Sol., transluz. Haube
- 1.3 - Hoch, Sommer, o.Sol., klare Haube⁵**
- 1.4 - Hoch, Sommer, o.Sol., transluz. Haube
- 1.5 - Tief, Sommer, m.Sol., klare Haube
- 1.6 - Tief, Sommer, m.Sol., transluz. Haube
- 1.7 - Tief, Sommer, o.Sol., klare Haube
- 1.8 - Tief, Sommer, o.Sol., transluz. Haube

Lichtplanung Variante 2 (Abb. 57)

- 2.1 - Hoch, Sommer, m.Sol., klare Haube⁶**
- 2.2 - Hoch, Sommer, m.Sol., transluz. Haube
- 2.3 - Hoch, Sommer, o.Sol., klare Haube⁷**
- 2.4 - Hoch, Sommer, o.Sol., transluz. Haube

⁴ vgl. S. 33 (Variante 1)

⁵ vgl. S. 33 (Variante 1)

⁶ vgl. S. 34 (Variante 2)

⁷ vgl. S. 34 (Variante 2)

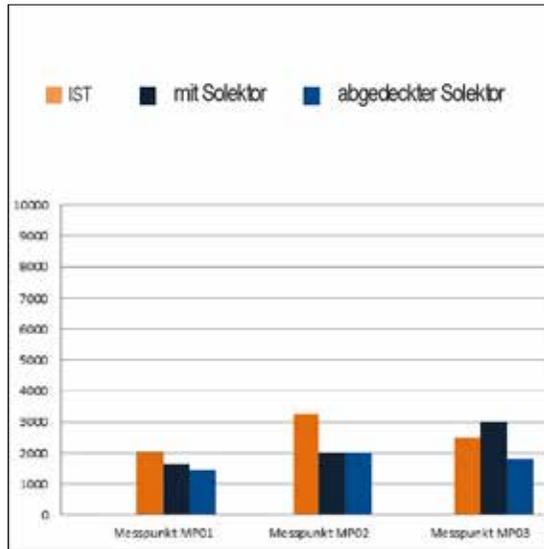
- 2.5 - Tief, Sommer, m.Sol., klare Haube
- 2.6 - Tief, Sommer, m.Sol., transluzent
- 2.7 - Tief, Sommer, m.Sol., klare Haube
- 2.8 - Tief, Sommer, m.Sol., transluzent

Lichtplanung Variante 3 (Abb. 58)

- 3.1 - Hoch, Sommer, m.Sol., klare Haube⁸**
- 3.2 - Hoch, Sommer, m.Sol., transluz. Haube
- 3.3 - Hoch, Sommer, o.Sol., klare Haube⁹**
- 3.4 - Hoch, Sommer, o.Sol., transluz. Haube
- 3.5 - Tief, Sommer, m.Sol., klare Haube
- 3.6 - Tief, Sommer, m.Sol., transluz. Haube
- 3.7 - Tief, Sommer, o.Sol., klare Haube
- 3.8 - Tief, Sommer, o.Sol., transluz. Haube

⁸ vgl. S. 35 (Variante 3)

⁹ vgl. S. 35 (Variante 3)



Tab. 7 28.08.2014, 13:40 Uhr V1: Beleuchtung mit Solektor übersteigt IST-Wert [MP03]

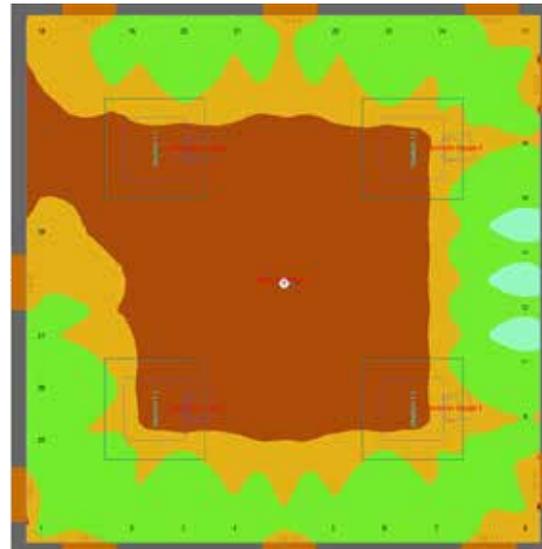


Abb. 59 Beleuchtungsstärke auf dem Boden Simulation [Stephan/Franz, 28.01.2015]

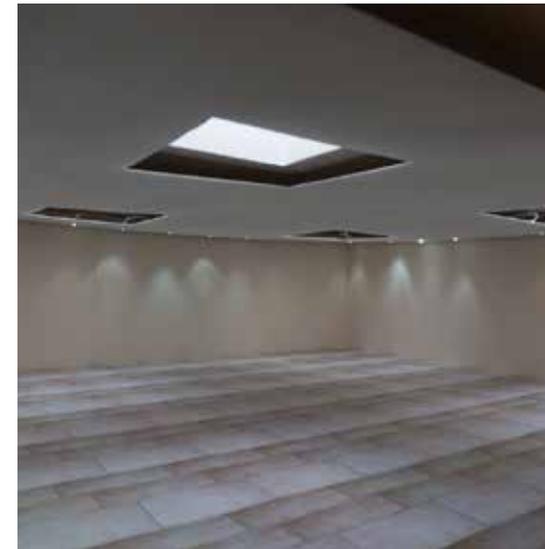


Abb. 60 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 1.1

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Variante 1
0.1, 1.1, 1.3
Sommer / klare Haube

Grundsätzlich können bei der alleinigen Analyse der Messwerte nur wenige Aussagen über die Qualität der Varianten getätigt werden. Die Brauchbarkeit zeigt sich in den meisten Fällen darin, dass der Wert für Beleuchtung mit Solektor den IST-Wert übersteigt. Messpunkt 2 ist eine Ausnahme, denn dieser befindet sich direkt unter der Lichtkuppel. Da die Messungen im Sommer stattfanden, muss an dieser Stelle der IST-Wert nicht zwingend überschritten sein, weil die Verschattung vor allem in diesem Bereich wirksam ist. Nicht in jeder Variante kompensiert die zusätzliche Beleuchtung durch den Solektor den verschatteten Anteil des Lichts an den gemessenen Punkten.

Lichtplanung - Variante 1 (Abb. 56, Seite 34)

Verteilung der Lichtspots, mit Ausnahme der Türen, gleichmäßig an den Wänden. In der

Modellinnenraumaufnahme (Abb. 60) lässt sich deshalb ein schattiger Bereich in der Mitte des Raum erkennen. Messpunkt 3, der sich zwischen den Lichtkuppeln befindet, wird trotz der Verschattung besser beleuchtet. Die Leuchtdichte ist bei dieser Variante insgesamt besonders hoch. Das könnte daran liegen, dass die Raumecke (Südwesten), in die die Leuchtdichtemesskamera zielt, von vielen Spots umgeben ist. Die Lichtkegel zeichnen sich bei dieser Verteilung besonders gut an den Wänden ab. Auf den Bereich am hellen Eingang des Foyers wird nicht reagiert. Die Herangehensweise kann ortsunabhängig in vielen Anwendungsfällen verwendet werden.

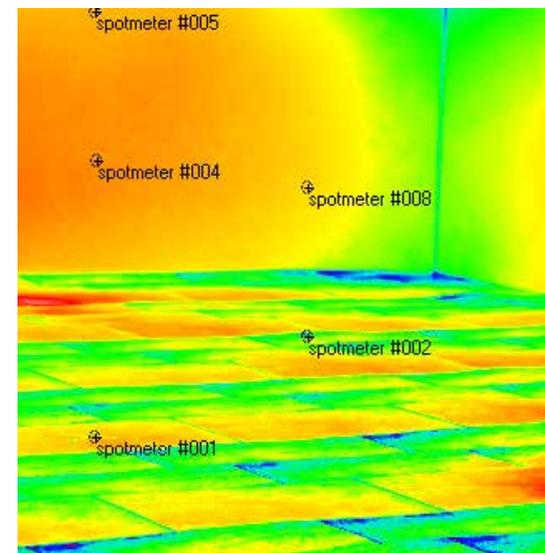


Abb. 61 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 1.1

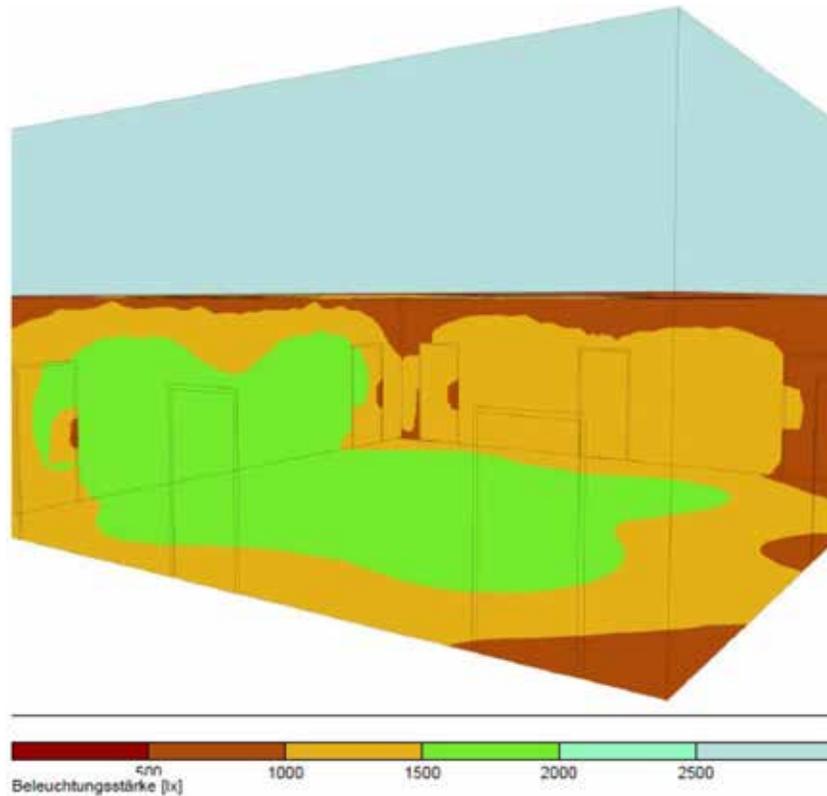


Abb. 62 Zu erwartende Verteilung der Beleuchtungsstärke im Foyer
21.08. um 13.25 Uhr bei klarem Himmel ohne Sollektor
[Stephan/Franz, 28.01.2015]

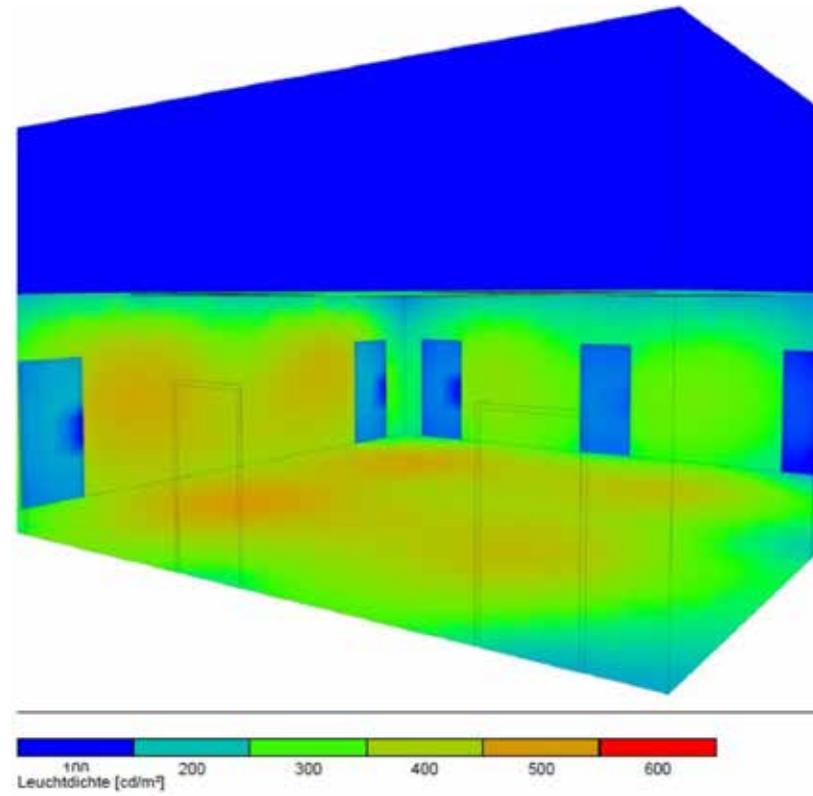


Abb. 63 Zu erwartende Verteilung der Leuchtdichte im Foyer, Helligkeitsverteilung (Raumeindruck) für den betrachteten Bereich
21.08. um 13.25 Uhr bei klarem Himmel ohne Sollektor
[Stephan/Franz, 28.01.2015]

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Tageslichtstudien

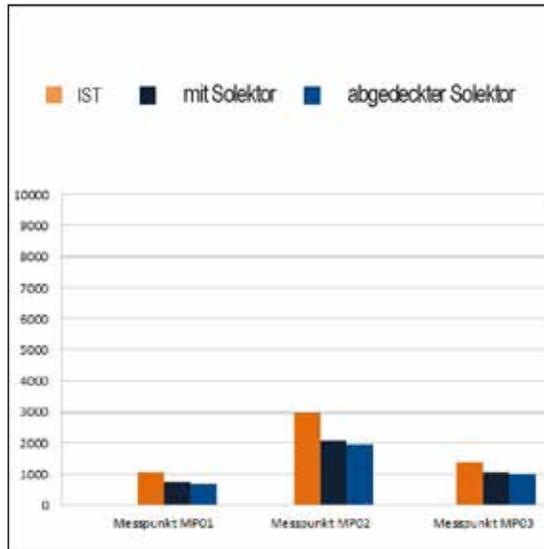
Variante 1
0.1, 1.1, 1.3
Sommer / klare Haube

Lichtplanung - Variante 1 (Abb. 56, Seite 34)
Simulationsberechnung

Für die Lichtplanungsvarianten (Abb. 62+63) wird ein Wartungsfaktor MF von 0,7 angesetzt, dieser Wert entspricht einem normalen Verschmutzungsgrad der Umgebung. Der Wartungsfaktor ist als Verhältnis vom Wertungswert der Beleuchtungsstärke zum Anfangswert der Beleuchtungsstärke bei der Inbetriebnahme definiert. Der Wertungswert der Beleuchtungsstärke wird in DIN EN

12464-1 als der Wert bezeichnet, unter den die mittlere Beleuchtungsstärke auf einer Bewertungsfläche nicht sinken darf.

Die Simulationsberechnungen werden für den 21. August um 13.25 Uhr bei klarem Himmel ohne Sollektor auf dem Dach durchgeführt. (Abb. 59)



Tab. 8 28.08.2014, 13:40 Uhr, V2: Beleuchtung mit Solektor übersteigt IST-Wert nicht

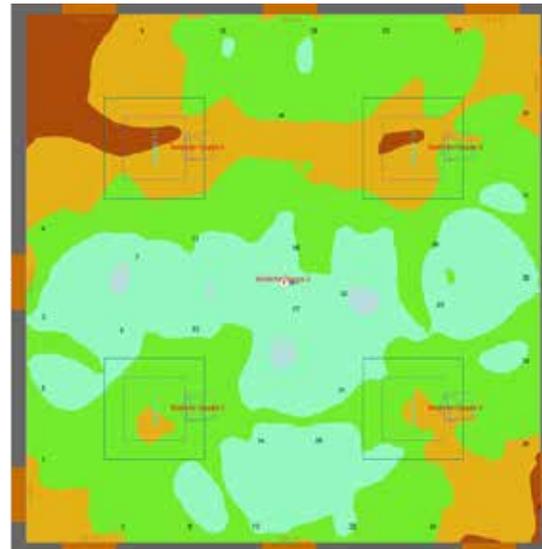


Abb. 66 Beleuchtungsstärke auf dem Boden Simulation [Stephan/Franz, 28.01.2015]



Abb. 64 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 2.1

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Variante 2
0.1, 2.1, 2.3
Sommer / klare Haube

Lichtplanung - Variante 2 (Abb. 57, Seite 34)

Verteilung einiger Spots auf Basis der Simulationsergebnisse an den Wänden und in einer eher freieren Anordnung im Zentrum des Foyers, mit Betonung einer Nord-Süd-Ausrichtung. Diese Variante untersucht die Beleuchtungssituation im IST-Zustand. Messpunkt 3, der sich zwischen den Lichtkuppeln befindet, wird auch hier besser beleuchtet.

Da sich zahlreiche Spots in Raummitte befinden, zeigt sich bei Messpunkt 1 eine Verbesserung, wenn die Hauben der Lichtkuppel transluzent ausgeführt werden. Die Ecke (Südwesten), die durch die Leuchtdichtemesskamera fokussiert wird, weist weniger Spots auf, als bei Variante 1. Die Leuchtdichte ist dementsprechend gering. Die Beleuchtung hat einen gleichmäßigen Charakter mit vereinzelt hellen Akzentuierungen.

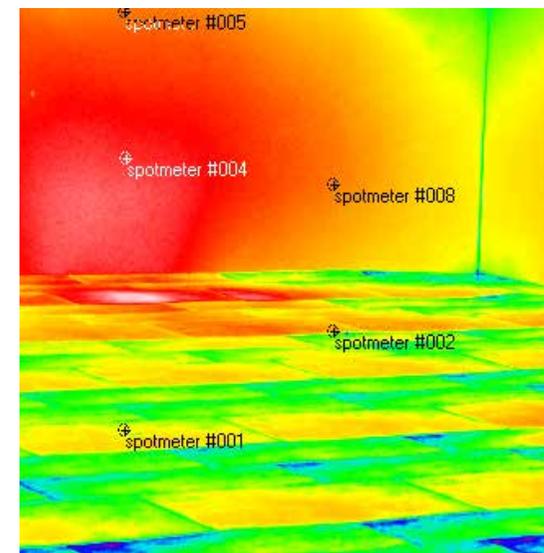
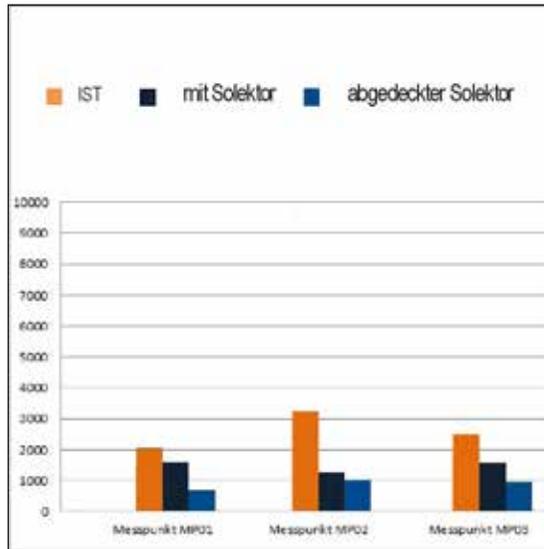


Abb. 65 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 2.1



Tab. 9 17.09.2014, 15:30 Uhr, V3: Beleuchtung mit Solektor übersteigt IST-Wert nicht

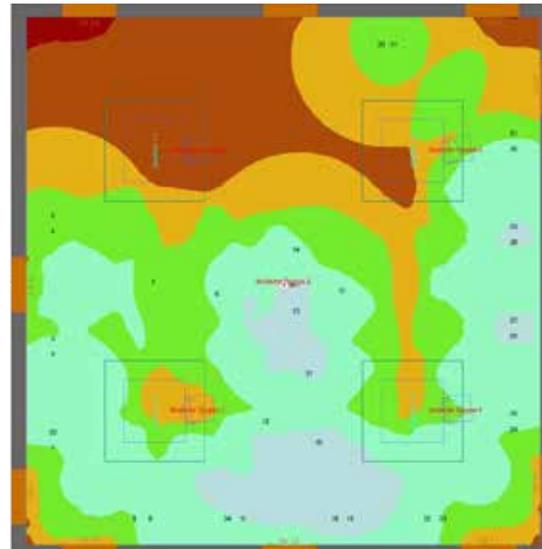


Abb. 67 Beleuchtungsstärke auf dem Boden Simulation [Stephan/Franz, 28.01.2015]

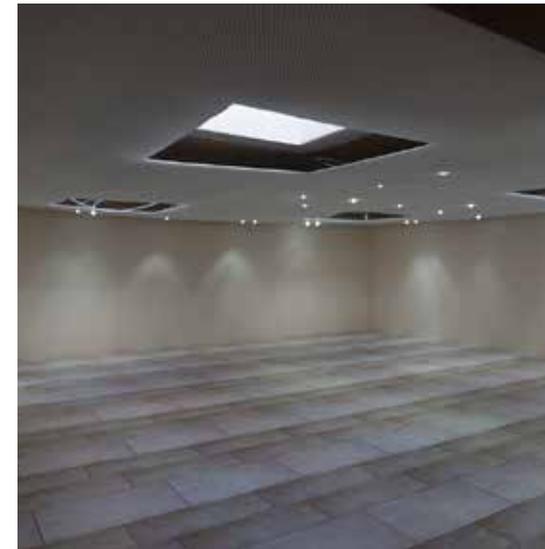


Abb. 68 Innenraumaufnahme während laufendem Versuch 3.1

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

Variante 3

0.1, 3.1, 3.3

Sommer / klare Haube

Lichtplanung - Variante 3 (Abb. 58, Seite 34)

Diese Variante stellt eine Weiterentwicklung der vorangegangenen Spotverteilung dar. Die Herangehensweise ist gleich, zusätzlich werden hier jeweils zwei der Spots in den Wandbereichen gebündelt um eine akzentreiche Beleuchtungssituation mit stärkeren Kontrasten zu erzielen. Die Helligkeitsverteilung wirkt auf den Bildern erneut relativ gleichmäßig, dabei sind die aufgehellten Bereiche an den Wänden klar zu erkennen. (Abb. 66) Diese Variante ist die einzige im Rahmen der durchgeführten Versuche, bei der sich kein Messpunkt in einer verbesserten Beleuchtungssituation wieder findet. (Tab. 9) Möglicherweise ist das auf die geplanten, teilweise freier in der Anordnung bestimmten, hellen und dunkel Bereiche zurückzuführen.

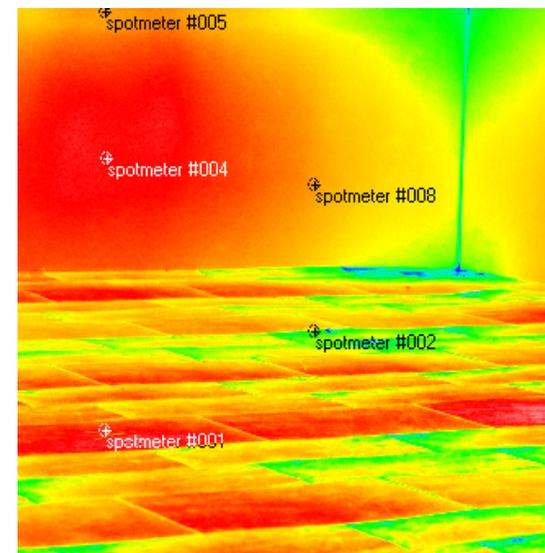


Abb. 69 Falschfarbenaufnahme während laufendem Versuch 3.1

4.6 Verschattungszeit

Bei der Entwicklung des Verschattungselements ist es wichtig, das Gesamtsystem nicht nur in Momentaufnahmen zu betrachten. Analysiert man den Tagesverlauf, stellt man fest, dass die Veränderung der Position nicht nur unterschiedliche Messwerte in der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte, sondern auch Änderungen der Verschattungszeit und -dauer mit sich zieht.

Verlängert man in einer zeichnerischen Herangehensweise die Lichtstrahlen über den Sollektor auf die Dachfläche, kann man den Winkel bestimmen, den die Sonne wandern muss bis der Schatten die Haube der Lichtkuppel trifft. Eine Winkeleinheit entspricht dabei 4 Minuten. Setzt man diesen Lösungsansatz fort, lassen man 5 'Zeitfenster' unterscheiden: (Abb. 70-72)

- Dauer, die der Schatten nach Sonnenaufgang benötigt um die Aperturfläche der Lichtkuppel zu erreichen. Bis der Schatten auf die Kuppel gewandert ist, beträgt die Verschattung 0%.
- Dauer, die benötigt wird bis der Schatten die Haube vollflächig bedeckt hat. Die Verschattung steigt erst langsam an. Der Anstieg beschleunigt sich so lange, bis die Diagonale des Schattens auf der Aperturfläche angelangt ist. Ab diesem Zeitpunkt steigert sich die Verschattung immer langsamer, bis diese konstant bleibt.
- Dauer, die der Schatten vollflächig auf der Fläche wandert. Während dieser Phase behält die Verschattung ihren maximalen Wert bei. In den meisten Fällen ist es jetzt 12 Uhr \pm 1-2 Stunden (abhängig von Jahreszeit).
- Die Dauer, die der Schatten braucht um die Fläche zu verlassen.
- Dauer, die der Schatten nach dem Verlassen der Kuppel wandert, bis die Sonne unter geht.

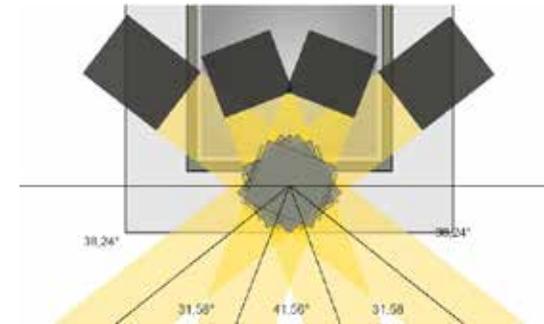
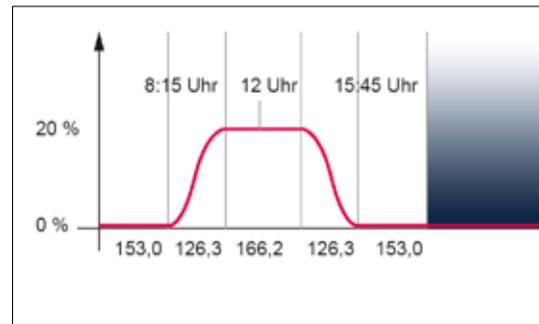


Abb. 70 Verschattungszeit Sollektorposition Hoch, Sommer

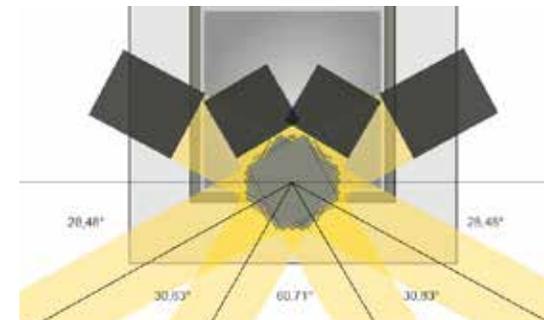
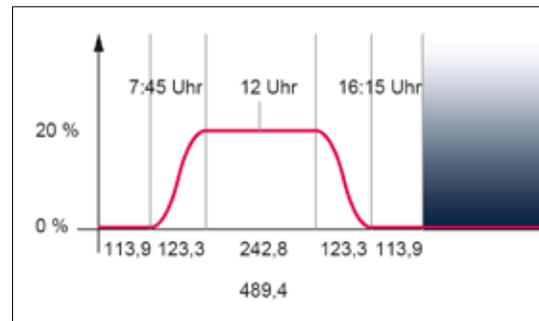


Abb. 72 Verschattungszeit Sollektorposition Tief, Sommer

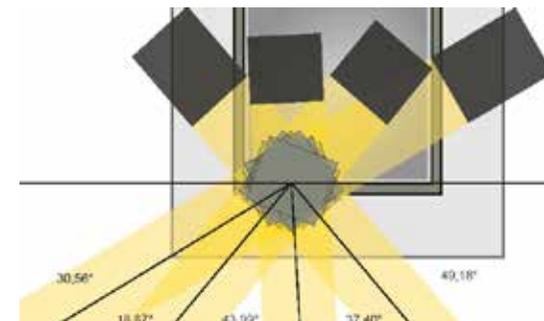
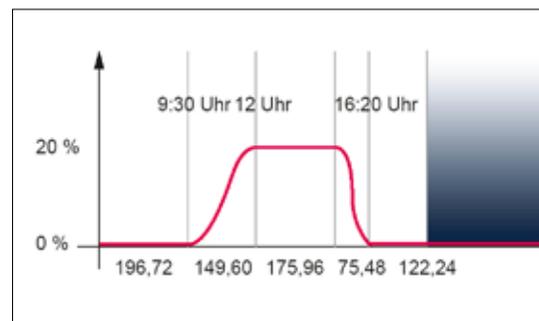


Abb. 71 Verschattungszeit Sollektorposition asymmetrisch, Sommer

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Tageslichtstudien

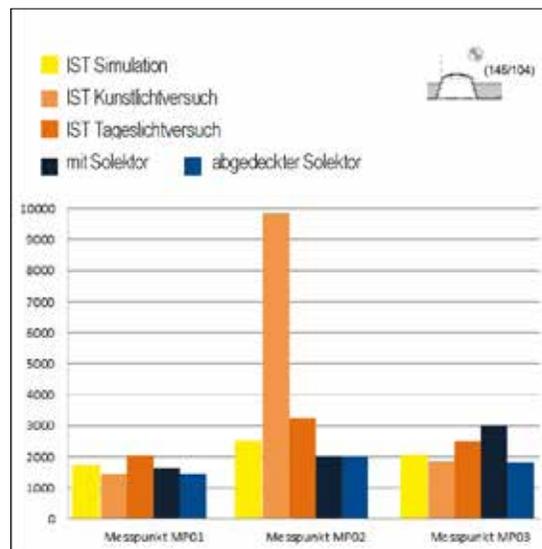
4.7 Vergleich

Bei dem Vergleich der Ergebnisse lassen sich weniger Abhängigkeiten als bei den Experimenten im Innenbereich erkennen. Die Arbeit mit der natürlichen Lichtquelle beinhaltet zahlreiche Parameter, die die Messungen beeinträchtigen können. Diese sind unter anderem der tageszeitabhängige Sonnenstand, Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung. Als Folge ist mit Ausgleichsquotienten gearbeitet worden.

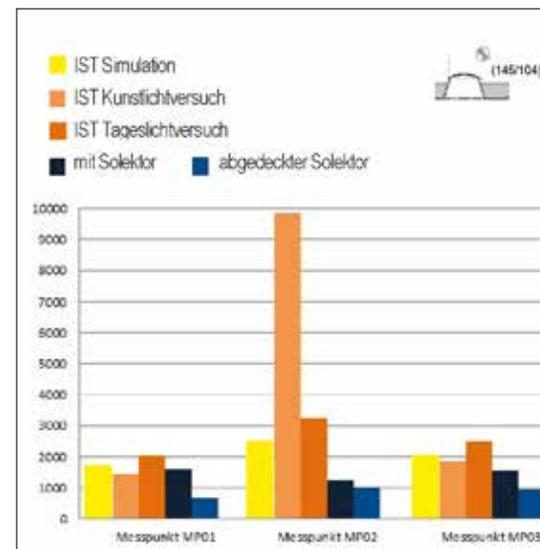
Grundsätzlich kann trotz aller Unwägbarkeiten bei der Analyse der Messwerte festgestellt werden, dass in den meisten Fällen die Leuchtdichte [cd/m^2] und/oder Beleuchtungsstärke [lx] mit zusätzlicher Sollektorbeleuchtung den IST-Zustand übersteigt. Da die Messungen im Sommer stattfanden, ist es jedoch nicht zwingend erforderlich, dass die IST-Werte überschritten werden, da ja die Verschattungsfunktion vor allem für diese Jahreszeit ausgelegt ist. Allerdings kompensiert die zusätzliche Beleuchtung durch den Sollektor nicht in jeder Variante den Verschattungseffekt.

Grundsätzlich lässt sich zusammenfassen, dass bei der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel die Ermittlung der Verschattungsposition von zentraler Bedeutung ist. Dagegen spielt die Lichtplanung, die im Regelfall objektbezogen stets neu entwickelt werden muss, eher eine untergeordnete Rolle.

Vergleicht man die zu erwartenden Beleuchtungsstärken der untersuchten Lichtplanungsvarianten für die verschiedenen Messbereiche (Tageslicht und Kunstlicht) (Abb. 73, Tab. 10+11) ist festzustellen, dass den größten Zuwachs an Beleuchtungsstärke die Lichtplanungsvariante 3 in fast allen Bereichen liefert. Lichtplanungsvariante 1 hingegen zeigt die geringsten Werte, wobei zu



Tab. 10 28.08.2014, 13:40 Uhr V1: Sollektorbeleuchtung übersteigt IST-Wert bei MP03



Tab. 11 17.09.2014, 15:30 Uhr, V3: Sollektorbeleuchtung übersteigt IST-Wert nicht

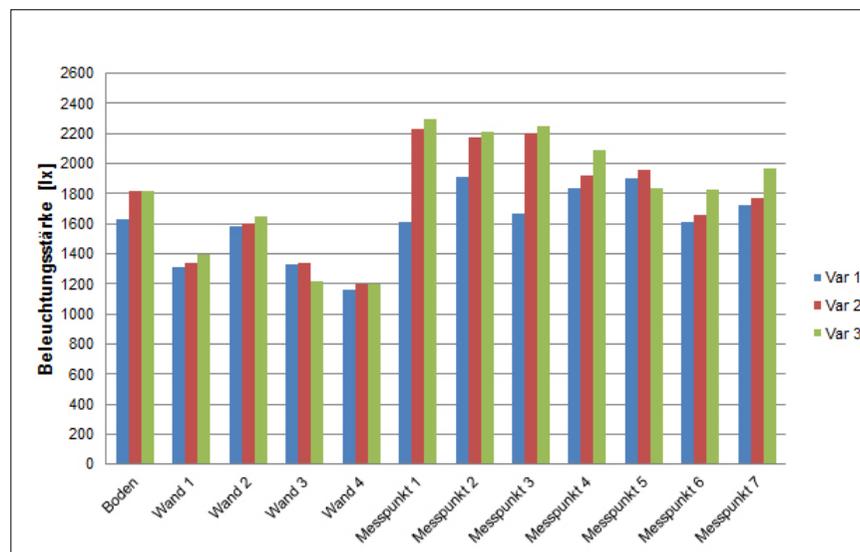


Abb. 73 Vergleich Beleuchtungsstärke für verschiedene Bereiche in Bezug auf die jeweilige Lichtplanungsvariante

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Tageslichtstudien

beachten ist, dass bei dieser Variante nur 26 Lichtkegel im Berechnungsgebiet angeordnet sind und die beiden anderen beiden Varianten jeweils 32 Lichtkegel aufweisen.

Folgende Ergebnisse lassen sich aus den Simulationsberechnungen für die Lichtplanungsvarianten ableiten:

- Ohne Sollektor:
 - Durchschnittliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung: 0,46
- Verschattung durch Sollektor:
 - Durchschnittlich 23 % geringere Beleuchtungsstärke
 - Durchschnittliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung: 0,34
- Lichtplanungsvariante 1 (26 Lichtkegel):
 - Durchschnittlich 11 % höhere Beleuchtungsstärke gegenüber ohne Sollektor
 - Durchschnittliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung: 0,51
- Lichtplanungsvariante 2 (32 Lichtkegel):
 - Durchschnittlich 21 % höhere Beleuchtungsstärke gegenüber ohne Sollektor
 - Durchschnittliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung: 0,48
- Lichtplanungsvariante 3 (32 Lichtkegel):
 - Durchschnittlich 23 % höhere Beleuchtungsstärke gegenüber ohne Sollektor
 - Durchschnittliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung: 0,48

Die Ergebnisse legen dar, dass zu einem wiederum während den wärmeren Monaten die Wärmelasten aufgrund der solaren Einstrahlung reduziert werden können und zum anderen, dass die Reduzierung der Beleuchtungsstärke durch die eingebrachte Beleuchtung über die Lichtkabel aufgefangen werden kann, weiterhin liegt eine ausreichend hohe Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit für alle Varianten vor.

Bei der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel konnten im Rahmen der experimentellen Versuche und der begleitenden Simulationen die gewünschten Synergieeffekte nachgewiesen werden. Es ist möglich, die Kollektorfläche des Lichtleiters so zu positionieren, dass die Sommersonne nur stark eingeschränkt den Raum betritt. Das zeigt sich vor allem an den Messwerten der Versuchsreihe 1. Die Verschiebung des Verschatters in Ost-West-Richtung (Versuchsreihe 2) hat mutmaßlich keinen Effekt, denn der asymmetrische Eintritt der Strahlung gleicht sich aus.

Zwei Parameter beeinflussen die Ergebnisse maßgeblich. Am wichtigsten ist die Verschiebung des Verschatters in Nord-Süd-Richtung. Sobald der Schatten den Lichtkuppelrand bei höchstem Sonnenstand südlich berührt, erfährt der Innenraum die beste Verschattung von der Sommersonne und die höchstmögliche Versorgung mit solaren Erträgen der Wintersonne. In Versuchsreihe 3 konnte dies an zwei Positionen des Sollektors in unterschiedlichen Höhen festgestellt werden. Damit ist der zweite ausschlaggebende Effekt genannt. Je höher der Sollektor montiert ist, desto kürzer befindet sich der Schatten im Tagesverlauf auf der Haube der Lichtkuppel.

Die Ergebnisse beziehen sich auf einen Referenzraum mit ungewöhnlich hohen Lichtschächten. Dieser Faktor hat die Ergebnisse mit Sicherheit stark beeinflusst, da somit nur selten direkte Sonnenstrahlung den Innenraum belichtet. Die Erhöhung der Beleuchtungsstärke durch den Einsatz der Sollektoren hat eine geringere Auswirkung als erwartet. Ein Unterschied ist zwar klar zu erkennen, dass aber in der Versuchsanordnung mit vier Lichtkuppeln insgesamt auch vier Sollektoren eingesetzt wurden, spiegeln die Messergebnisse so nicht wieder.

5 Konstruktions- und Prototypenplanung

5.1 Formstudien

Die formale Ausbildung der Unterkonstruktion hängt in erster Linie von den funktionalen Anforderungen ab; zusätzlich sind produktspezifische Merkmale des Sollektors zu berücksichtigen. Die Aspekte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Blockieren der Wintersonne vermeiden
- Sommersonne mit gesamter Fläche des Sollektors abschirmen
- Sollektor soll an möglichst niedriger Position die Lichtkuppelhaube nicht am Aufklappen hindern
- Schwingungen der Sollektorfläche entgegenwirken
- Windgeräusche weitestgehend vermeiden
- Statisch relevante Lasten dürfen die Konstruktion nicht verformen
- Gestalt der Unterkonstruktion soll sich dem Aussehen des Sollektors und der Lichtkuppel unterordnen oder sich gezielt davon absetzen
- Zu Lichtkuppelhaube und Rahmen ist Sicherheitsabstand von 8 cm einzuhalten
- Aufnahme der Leitungsführung

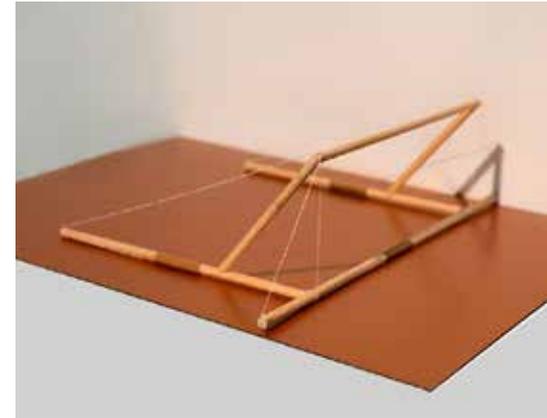
Für die Ausbildung der Unterkonstruktion bestehen zahlreiche Möglichkeiten. Es wurden drei Varianten näher untersucht:

- Tensegrity (aufgelöste Struktur aus Stäben und Seilen) (Abb. 74)
- Rohr (Reduktion auf ein gebogenes Rohr) (Abb. 75)
- Karosserie (zwei seitliche, großflächig perforierte Schenkelbleche mit Dreiecksträger) (Abb. 76)

Abb. 74 Konzeptmodell Variante Tensegrity

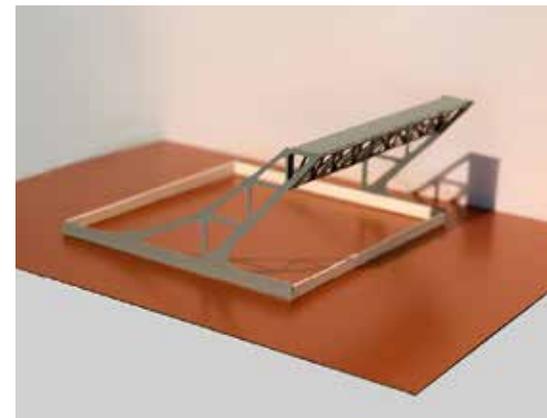
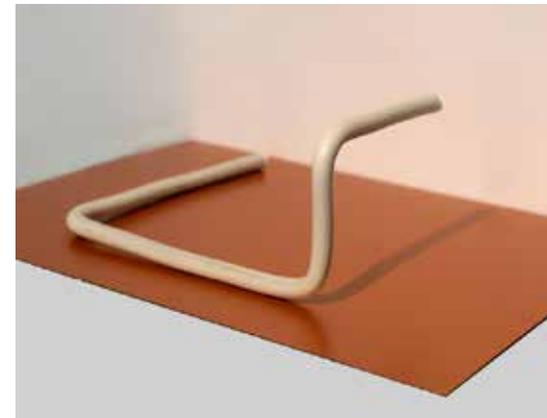
Abb. 75 Konzeptmodell Variante Rohr

Abb. 76 Konzeptmodell Variante Karosserie



SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Konstruktions- und Prototypenplanung



5.1.1 Tensegrity

Nur aus Stäben mit gespannten Seilen bestehend, hält diese Konstruktionsvariante den Sollektor auf einem eingespannten Rahmen in der vorgesehenen Position. Tensegrity-Gebilde sind sehr filigrane Konstruktionen, die dennoch äusserst stabil sind, was selbst durch den Einsatz von extrem dünnen Drahtseilen erreicht werden kann. Für diese Variante wurde nachgewiesen, dass Seile mit einem Durchmesser von 1 mm statisch ausreichend sind. Der Rahmen verläuft vom Sollektor nicht senkrecht auf die Adapterbleche, sondern steht in einem Winkel von 53° . So ist gewährleistet, dass die solaren Erträge der Wintersonne ungehindert genutzt werden können. Lediglich zwei Drahtseile befinden sich in der besonnten Zone. (Abb. 77+78)

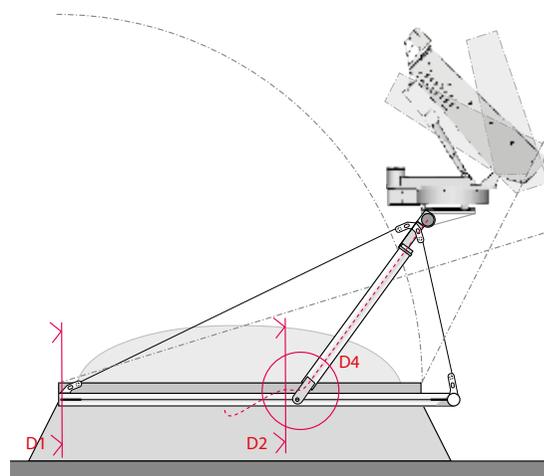


Abb. 77 Seitenansicht Gesamtsystem Tensegrity

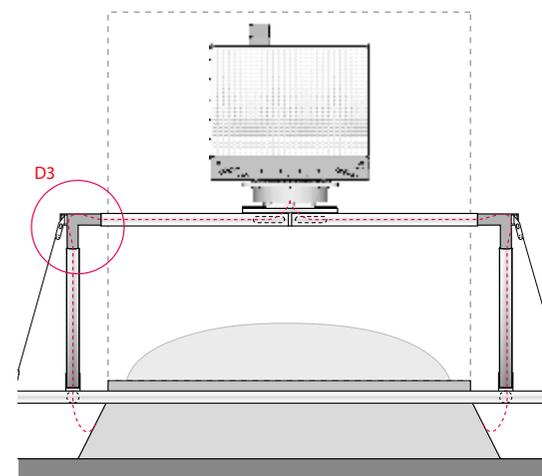


Abb. 78 Frontansicht Gesamtsystem Tensegrity

5.1.2 Rohr

Das Rohr, ein gegenüber der Variante Tensegrity stark formal reduzierter Ansatz, stellt eine Verbindung mit dem Sollektor über 3 Adapterpunkte her. Mit einem Durchmesser von 63,5 mm liegt es über dem statisch notwendigen Minimum von 48,3 mm, damit alle 8 Faserbündel im Hohlraum verzogen werden können. Die Dimensionierung des Rohrs erleichtert, die verhältnismäßig hohen Biegeradien der Kunststofffasern einzuhalten. Gestalterisch hebt es sich klar von dem Sollektor ab.

Die Einfachheit dieser Konstruktion weist eine Reihe von Vorteilen auf. Sie ermöglicht die einseitige Verbindung und hält so den südöstlichen Bereich vor Lichtkuppel frei von, möglicherweise die Wintersonne verschattenden, Elementen. In Abhängigkeit der Montage kann das Rohr aus bis zu 4 Teilen zusammengesetzt werden oder aus einem durchlaufenden Profil bestehen. (Abb. 79+80)

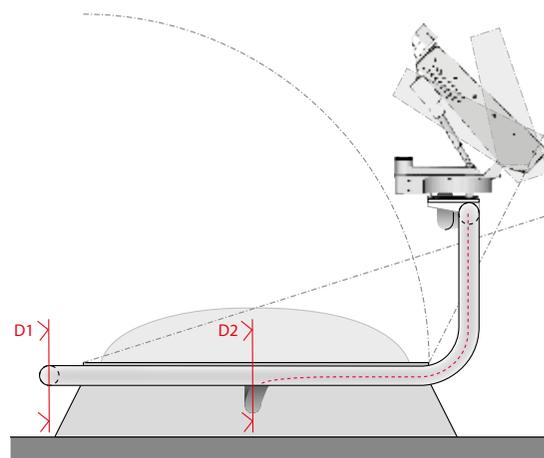


Abb. 79 Seitenansicht Gesamtsystem Rohr

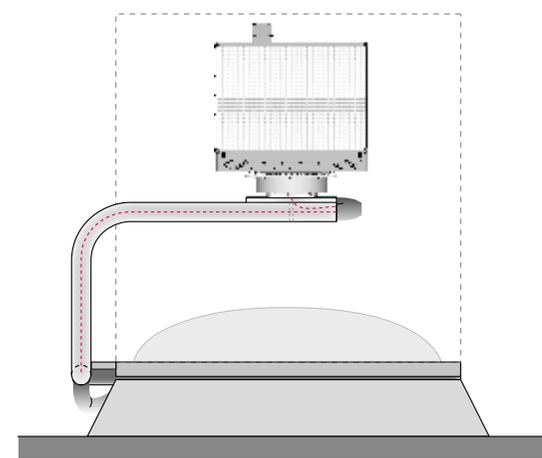


Abb. 80 Frontansicht Gesamtsystem Rohr

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Konstruktions- und
Prototypenplanung

5.1.3 Karosserie

Konstruiert aus zwei Schenkelblechen und einem, im Schnitt, dreieckigen Träger, spielt das Gestell die Mitte um die Lichtkuppel frei, ohne dabei den Öffnungsradius der Haube zu beeinträchtigen. Die Unterkonstruktion entwickelt sich von Norden nach Süden aus dem um die Lichtkuppel verlaufenden Rahmen heraus. Die Bewegung der Form geht fließend in den Sollektor über. Dessen Fläche erscheint als eine Art 'Bekrönung' auf der Kopfplatte der Unterkonstruktion. (Abb. 81+82)

Die Konstruktion sorgt sowohl für einen freien Bereich für die Wintersonnenstrahlen, als auch für eine dynamische Gestalt aus Lichtkuppel und Sollektor. Um die Figur 'organisch' fließend in Erscheinung treten zu lassen, werden die Ecken weitgehend abgerundet. Diese Form wird durch die exakt senkrecht und horizontal verlaufenden Stege gefasst. Die aufgelöste Konstruktion, die seitlich und frontal an Fachwerkträger anspielt, reduziert das Bauteilgewicht.

Im Zuge der Weiterentwicklung der konstruktiven Detailplanung (Abb. 83+84) zeigt sich, dass sich eine Spiegelung der Schenkel positiv auswirken kann. Die Bleche zeigen dann mit der umgekaneteten Seite nach außen. Die Verbindung zu Träger und Rahmen ist in diesem Fall einfacher zu bewerkstelligen. Auch würde die Abkantung nicht mehr durch den Rahmen unterbrochen werden. Unter gestalterischen Aspekten zeigt ein Schattenspiel auf den ebenen Blechflächen. Die Leitungsführung wäre nun sichtbar, so dass deren Verlauf visuell verfolgt werden kann. Allerdings geht aber die kompakte Gestalt des Gesamtsystems etwas verloren.

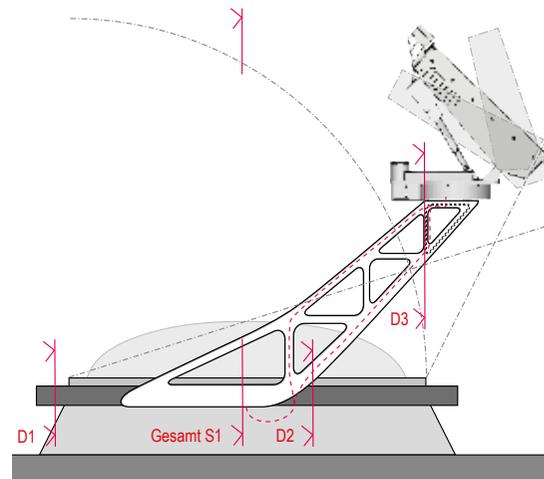


Abb. 81 Seitenansicht Gesamtsystem Karosserie

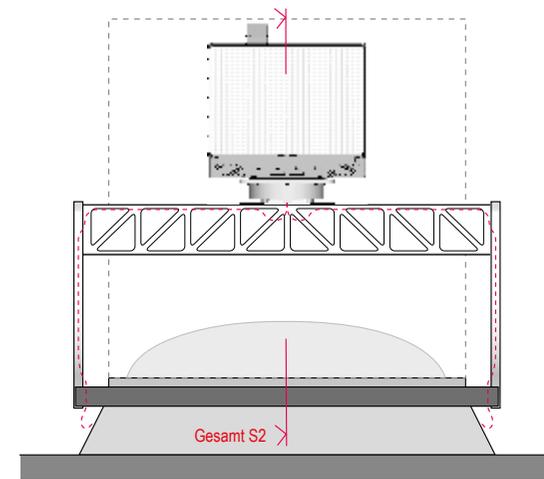


Abb. 82 Frontansicht Gesamtsystem Karosserie

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Konstruktions- und
Prototypenplanung

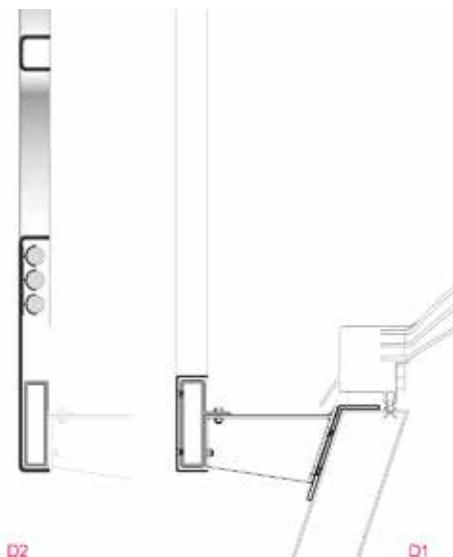


Abb. 83 Detailplanung Karosserie

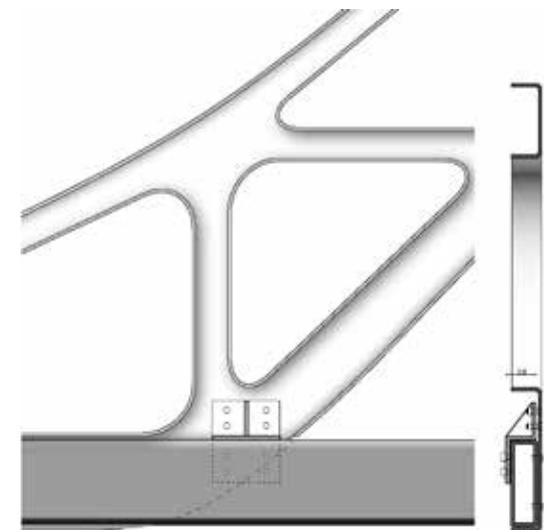


Abb. 84 Detailplanung Karosserie

5.1.4 Kabeldurchführung

Ein naheliegender Ansatz bei der Dachhautdurchdringungen eines nachträglich installierten Systems, wie zum Beispiel dem Sollektor, besteht darin, für die Verlegung von Lichtleiterbündeln und zusätzlichem Stromkabel vom Dach in das Gebäude, die vorhandenen Durchbrüche in der Flachdachkonstruktion aufzugreifen und wenn nötig für die neuen Anforderungen anzupassen. Wenn keine bestehende Kabeldurchführung mit entsprechenden freien Kapazitäten vorhanden ist, aber eine Dachhautdurchdringung in Form eines Tageslichtsystems wie einer Lichtkuppel auf dem Dach verfügbar ist, könnte diese Baukomponente bei entsprechender Vorbereitung die Kabel und Leitungen mit in das Gebäude führen. Damit werden zusätzliche Durchdringungen mit jeweils erforderlichen Abdichtungsmaßnahmen und damit einhergehende Schwachstellen vermieden.

Eine optimale Lösung wäre es, in den Aufsatzkranz einer Lichtkuppel (eingesetzt in der Regel im Rahmen von Flachdachsanieerungen) eine Kabeldurchführung zu integrieren. Diese integrierte Durchdringung sollte möglichst auf die unterschiedlichen Kabel- und Leitungsdurchmesser verschiedener Anlagen (neben dem Sollektor z.B. Photovoltaik-Module oder Solarkollektoren) angepasst werden können um eine hohe Flexibilität zu garantieren. Hierzu wurden Produkte aus unterschiedlichen Technikbereichen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten untersucht: (Abb. 85, erste Spalte von links)

- Gummipressdichtung
- Kabeldurchführung mit Bajonett
- Metallhülsen mit Flansch
- Kabeldurchführung Kunststoffgehäuse
- Kabeldurchführung Wasserfahrzeuge

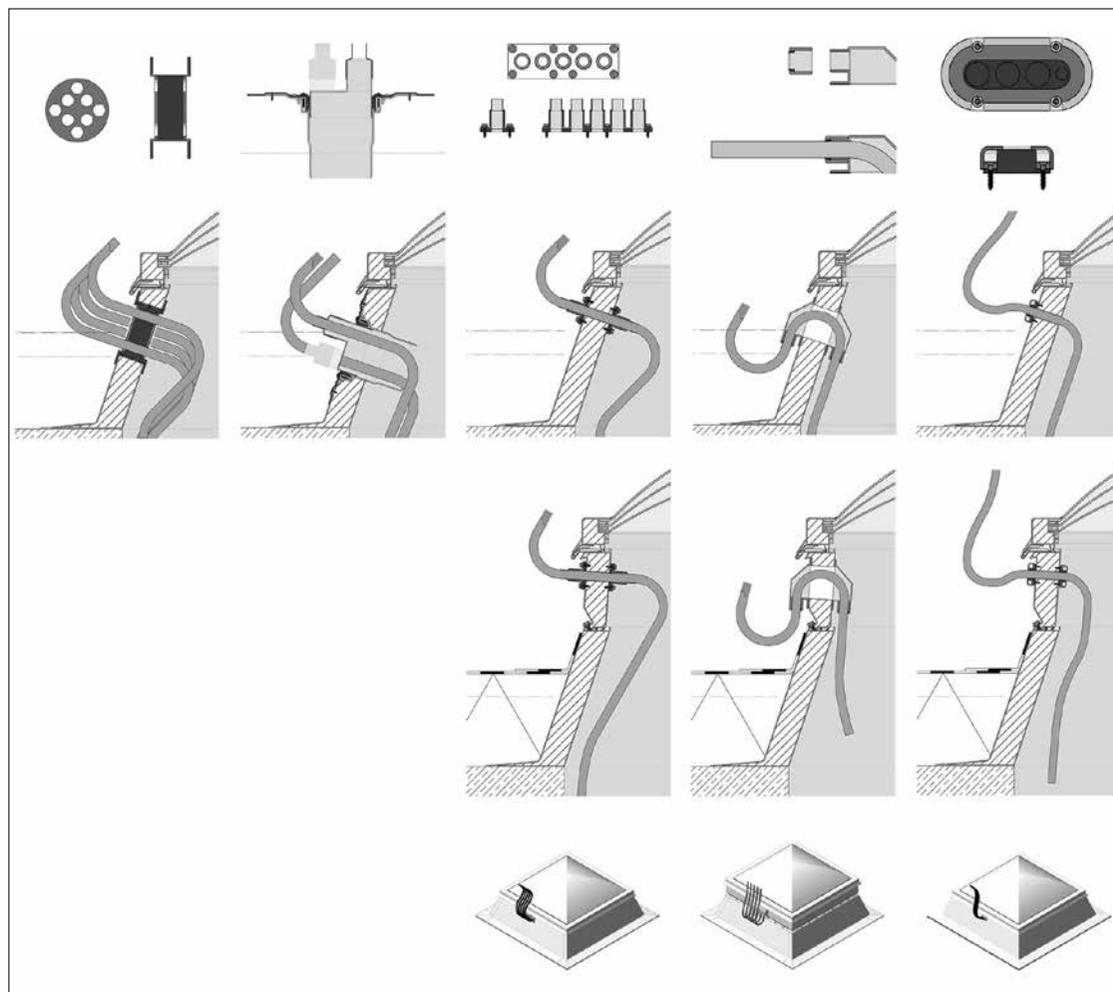


Abb. 85 Typologische Einteilung unterschiedlicher Kabeldurchführungssysteme

und jeweils verglichen nach: (Abb. 85, erste Zeile von oben)

- Grundriss/Schnitt
- System-Schnitt mit Lichtkuppel
- System-Schnitt mit Lichtkuppel und Aufsatzkranz
- Perspektive Lichtkuppel mit System

Im Rahmen des Prototypenbaus wird schließlich eine wasserdichte Kabeldurchführung für KFZ und Wohnmobile eingesetzt.¹ Hierbei handelt es sich um ein kleines und preiswertes Produkt, das leicht zu installieren ist und ausreichende Dichtigkeiten aufweist.

¹ Westech® Dachdurchführung für 1 oder 2 Kabel

Beim Sollektor bestehen für die Lichtleitung mehrere Kabelbündel, (Abb. 86) dies erfordert auf Basis des Grundbauteils die Entwicklung einer Mehrfachanordnung. Der Durchmesser der Kabeldurchführung ist bei diesem Produkt auf maximal 15 mm begrenzt, daher bedarf es einer Unterteilung des POF-Faserbündels in kleinere Stränge mit einem Kabeldurchmesser von 12 mm um über mehrere gekoppelte Elemente eine sicher abgedichtete Durchdringung zu gewährleisten. Somit werden beidseits jeweils vier Dachdurchführung auf dem Aufsatzkranz angeordnet.

5.2 Prototypenbau

Da die Funktionstüchtigkeit des Sollektors bereits bei geringen Abweichungen von $\leq 2^\circ$ massiv eingeschränkt ist, muss die Konstruktion ein hohes Maß an Steifigkeit aufweisen, um Schwingungen der Kollektorfläche entgegenzuwirken. Ferner gilt es Windgeräusche weitestgehend zu vermeiden (Vorteile bei linearen, Nachteile bei flächigen Bauelemente) und statisch relevante Lasten dürfen die Konstruktion nicht verformen. Als konstruktive Schnittstelle zwischen Lichtkuppelzarge und Unterkonstruktion wird eine bauaufsichtlich zugelassene Anseilsicherung gewählt. Ein daran befestigter, umlaufender Rahmen muss einen Sicherheitsabstand von 80 mm zur Haube aufweisen, damit die Haube im Brandfall ungehindert aufschwenken und einen Raum entrauchen kann.

Im Zuge der Planungen für einen Prototypen zeigt sich schnell, dass unter den gegebenen zeitlichen und finanziellen Bedingungen der Projektarbeiten von den drei untersuchten Ansätzen, die Varianten Tensegrity und Karosserie nicht zu realisieren sind.

Gerade die Variante Karosserie, bei der zwei seitliche, großflächig perforierte Seitenbleche



Abb. 86 Muster Seitenteil Karosserie (M 1:1) mit Test der seitlichen Kabelführung

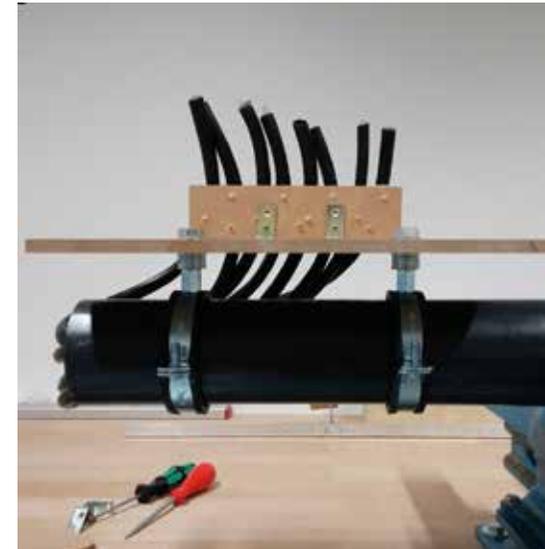


Abb. 87 Muster Kopfplatte Rohr (M 1:1) mit Test Kabelführung Sollektor / Rohr



Abb. 88 Edelstahlteile Kopfplatte Variante 2 für Prototyp Rohr



Abb. 89 Prototyp Rohr (Kopfplatte Variante 2) mit installiertem Sollektor

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Konstruktions- und Prototypenplanung

mit Dreiecksträger den Sollektor in Position halten, erfordert aufwändige Metallbearbeitungsverfahren, die in den Werkstätten der THN nicht zur Verfügung stehen. Dieser Ansatz weist einige spezifische Vorteile auf, da die Seitenteile je nach Einsatzort und Solargeometrie an unterschiedlichen Stellen des umlaufenden Rahmens, bei gleichbleibenden Befestigungsbedingungen, angebracht werden können. (Abb. 91)

Schließlich wird ein Prototyp der Variante Rohr (Edelstahl Rundrohr 76,1 x 2,9 mm) gebaut, um neben Fragen von Detailausbildung, Bauteilfügung und Sollektorbefestigung vor allem auch die Handhabung der Kabelführung (Abb. 87) zu testen.

Die mehrteilige Rohrkonstruktion, zur besseren Handhabung, ist über 3 Adapterpunkte an Anseilsicherungen in den Ecken des Lichtkuppelaufsatzkranzes befestigt. Durch den Rohrdurchmesser werden die Faserbündel witterungsgeschützt geführt. Es werden zwei Ausführungen mit unterschiedlichen Variante für die Kopfplatte gebaut. (Abb. 88+89, Seite 44) Die Arbeiten zeigen, dass die relativ einfache Konstruktion, sich leicht montieren lässt.

Die betrachteten Varianten können prinzipiell alle verwendet werden. Letztendlich ist die Wahl der Ausführung standortabhängig, sowohl die Solargeometrie, der Bereich der Wintersonne ist stets freizuhalten, bei ausreichender Verschattungszone der Sommersonne, als auch die objektspezifische Materialwahl betreffend. Entscheidend ist eine größtmögliche Kompaktheit des Gesamtsystems, wobei insbesondere die Möglichkeit der Haubenöffnung die Abmessungen bestimmt.

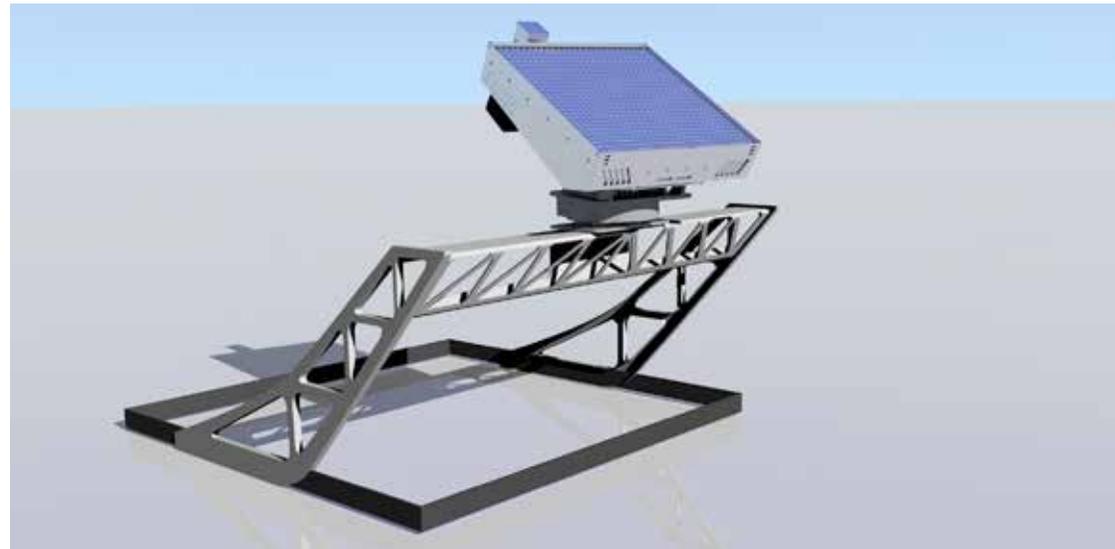


Abb. 90 Visualisierung des Gesamtsystems "Karosserie"



Abb. 91 Visualisierung des Innenraums

SOLLEKTOR und
Lichtkuppel

Konstruktions- und
Prototypenplanung

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von Tageslicht in Gebäuden stellt für "Smart Buildings" eine wichtige Planungsstrategie dar. Ein innovatives System in diesem Kontext ist der am Anwendungszentrum für Polymere Optische Fasern (POF-AC) entwickelte Sollektor. In der Projektstudie wurden Kombinationsmöglichkeiten mit Lichtkuppeln untersucht. Der Ansatz zielt auf Synergieeffekte durch die Nutzung der jeweils positiven Eigenschaften beider Systeme. Der Sollektor ist auf Direktstrahlung angewiesen, die Lichtkuppel ist optimiert für Diffusstrahlung. Bei dieser Kombination soll der Sollektor als Sonnenschutzsystem eingesetzt werden und gleichzeitig das Lichtmilieu im Innenraum verbessern.

Zur Entwicklung von Lösungsstrategien wurde eine umfangreiche morphologische Übersicht erarbeitet, die relevante Parameter beider Systeme, u.a. Position des Sollektors zur Lichtkuppel, Flächenverhältnis der Aperturflächen, Lage der Faserdurchführung umfasst.

Die experimentellen Untersuchungen, Messungen und Analysen verschiedener tageslichttechnischer Situationen, erfolgten in zwei Stufen:

- Mit künstlicher Lichtquelle
- Unter freiem Himmel

Parallel wurden umfangreiche Simulationsberechnungen durchgeführt.

Anforderungen der baulichen Integration galt es konzeptionell bis zum Prototypenbau beispielhaft aufzuzeigen. Für die Ausbildung der Unterkonstruktion wurden drei Varianten näher untersucht:

- Tensegrity (aufgelöste Struktur aus Stäben und gespannten Seilen).
- Karosserie (zwei großflächig perforierte Seitenbleche mit Dreiecksträger)
- Rohr (gebogenes Rundrohr)

Mit der Kombination von Sollektor und Lichtkuppel konnten die gewünschten Synergieeffekte nachgewiesen werden. Es ist möglich, die Sammelfläche des Lichtleiters so zu positionieren, dass die Sommersonne stark eingeschränkt den Raum aufheizt und eine höchstmögliche Versorgung mit solaren Erträgen der Wintersonne gewährleistet bleibt. Die Simulationen zeigen, dass mit Sollektor bei hohem Sonnenstand die Beleuchtungsstärke durchschnittlich um 23 % reduziert werden kann; dies führt zu geringeren Wärmelasten im Raum in den Sommermonaten.

Ferner bestätigen die Versuche, dass durch den Sollektor und eine gezielte Verteilung der Lichtleiter im Raum sich lichttechnische Akzentuierungen der Wandflächen erzielen lassen. (Abb. 91, Seite 47) Die Beleuchtungsstärke kann so um bis zu 293 lx (etwa 20 %) zunehmen.

Die betrachteten Konstruktionsvarianten können prinzipiell verwendet werden. Letztendlich ist die Wahl der Ausführung standortabhängig, wobei eine größtmögliche Kompaktheit des Gesamtsystems anzustreben ist. Es hat sich bei den Arbeiten zweierlei gezeigt: Damit der konstruktive Aufwand in einer halbwegs sinnfälligen Relation zu dem funktionalen 'Mehrwert' steht, wären in einer nächsten Projektstufe zwingend die Wärmeschutzeffekte der Kombination von Sollektor mit Lichtkuppeln zu untersuchen.

Die experimentellen Arbeiten in dem fakultätsübergreifenden Projekt ermöglichten erstmals die Bearbeitung derartiger Forschungsinhalte im Rahmen zweier erfolgreich absolvierter Master-Thesis-Arbeiten an der Fakultät Architektur. Mittlerweile laufen erste Folgeprojekte, die eine stärkere Verknüpfung von aFuE-Themen mit Abschlussarbeiten von Architekturstudierenden innerhalb von interdisziplinärer Forschergruppen erwarten lassen.

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Literaturverzeichnis

- ASR A3.4 – Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4: Beleuchtung <April 2011>. Dresden: Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) / Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2011.
- Baunetz Wissen: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Tageslicht_Lichtkuppeln-und-Lichtbaender_167210.html <10.05.2012>
- Cornelius, Wolfgang: Komfort durch Synergie. Produktionshalle in Bocholt. In: *Industriebau*, 52. Jg., 1/2006, S. 30–33.
- Cornelius, Wolfgang: Dachoberlichter nach DIN V 18599 Tl. 4. In: *Bauphysik*, 28. Jg., 3/2006, S. 197–205.
- Cornelius, Wolfgang: Optimierte Tageslichtnutzung durch Dachoberlichter. Einsatz, Planung und Auslegung zur Innenraumbeleuchtung. In: *TAB – Technik am Bau*, 37. Jg., 3/2006, S. 86–89.
- Dietrich, Udo: Tageslicht. Eigenschaften und einfache Planungsregeln. In: *Tageslicht, Kunstlicht. Grundlagen, Ausführung, Beispiele*. Hrsg. v.: Ulrike Brandi Licht GmbH, Hamburg. Detail Praxis. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2005, S. 16–41.
- DIN 5034-1: Tageslicht in Innenräumen; Teil 1: Allgemeine Anforderungen <Juli 2011>. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- DIN 5034-2: Tageslicht in Innenräumen; Teil 2: Grundlagen <Februar 1985>. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- DIN 5034-3: Tageslicht in Innenräumen; Teil 3: Berechnung <Februar 2007>. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN 5034-5: Tageslicht in Innenräumen; Teil 5: Messung <November 2010>. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- DIN 5034-6: Tageslicht in Innenräumen; Teil 6: Vereinfachte Bestimmung zweckmäßiger Abmessungen von Oberlichtöffnungen in Dachflächen <Februar 2007>. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN EN 1873: Vorgefertigte Zubehörteile für Dachdeckungen. Lichtkuppeln aus Kunststoff - Produktspezifikation und Prüfverfahren <August 2014>. Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten; Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen <August 2011>. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- DIN V 18599-4: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung <Dezember 2011>. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- Friederici, Annette; Wand, Burkhard: Tageslicht und Wohlbefinden. In: *Tageslicht, Kunstlicht. Grundlagen, Ausführung, Beispiele*. Hrsg. v.: Ulrike Brandi Licht GmbH, Hamburg. Detail Praxis. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2005, S. 8–15.
- Haas-Arndt, Doris; Ranft, Fred: Tageslichttechnik in Gebäuden. Hrsg. v.: Energieagentur NRW. Heidelberg: C.F. Müller Verlag, 2007.
- Hnida, Ullrich: Sollektoren: Tageslicht für fensterlose Räume. Sogenannte Sollektoren auf dem Dach konzentrieren das Sonnenlicht und flexible Lichtfaserkabel transportieren es ins Gebäude - auch in fensterlose Räume. Die Wärme bleibt draußen und die Energiebilanz kann sich sehen lassen. *FAZ.NET*, vom 27.07.2011. <http://fazarchiv.faz.net> <29.07.2011>.
- Kücker, Wilhelm: *Architektur zwischen Kunst und Konsum*. Auf der Suche nach einem neuen Selbstverständnis. st, Bd. 309. Frankfurt/Main: Suhrkamp Verlag, 1976.

Müller, Helmut; Kischkoweit-Lopin, Martin: Architektur auf der Sonnenspur. Innovative Fassaden. Licht gewinnen - Energie sparen. Hrsg. v.: Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Hamburg. Köln, August/1997.

Schuler, Matthias; Reuss, Stefanie: Glas und Energie - Bauphysik. In: Christian Schittich et al.: Glasbau Atlas. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2/2006, S. 119–159.

SOLLEKTOR®. Hrsg. v.: BavarianOptics - Optik | Elektronik GmbH. Broschüre "LCA 284". Neumarkt i.d.Opf., 2011.

SOLLEKTOR® LCA 251. Sonnenlicht flexibel leiten. Hrsg. v.: BavarianOptics - Optik | Elektronik GmbH. Produkt-Information. Nürnberg, 2013.

SOLLEKTOR®. Sonnenlicht für „alle“ Räume. Hrsg. v.: BavarianOptics - Optik | Elektronik GmbH. Produktblatt "LCA 251". Nürnberg, 2013.

Stephan, Wolfram; Franz, Mario: SOLLEKTOR und Lichtkuppel – Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach. Analysen verschiedener tageslichttechnischer Situationen durch Simulationsberechnungen. Dokument-Nr.: 1404-01. Nürnberg: THN, Institut für Energie und Gebäude (ieg), 28.01.2015.

Stephan, Wolfram; Franz, Mario: SOLLEKTOR und Lichtkuppel – Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach. Analysen verschiedener tageslichttechnischer Situationen durch Simulationsberechnungen. Zusammenfassung. Dokument-Nr.: 1404-01. Nürnberg: THN, Institut für Energie und Gebäude (ieg), 27.02.2015.

Tageslicht, Kunstlicht. Grundlagen, Ausführung, Beispiele. Hrsg. v.: Ulrike Brandi Licht GmbH, Hamburg. Detail Praxis. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2005.

Masterthesis-Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts

Berghofer, Thomas: Tageslicht orientierte Architektur. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner, Prof. Dipl.-Ing. Hartmut Fuchs. Masterthesis. Nürnberg: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Fakultät Architektur, SS 2014.

Neberich, Marcel: Innovative Tageslichtnutzung für das Flachdach. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner, Prof. Dipl.-Ing. Josef Reindl. Masterthesis. Nürnberg: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Fakultät Architektur, SS 2014.

7.2 (Poster-)Präsentationen

Berghofer, Thomas; Neberich, Marcel: Research Project SOLLEKTOR & Rooflight Dome. Veranstaltung: IP Erasmus course Lighting Design: State of the Art & New Trends (LiDe). Porto, ESAD - Escola Superior de Artes e Design, 23.07.2014.

Berghofer, Thomas; Neberich, Marcel: SOLLEKTOR und Lichtkuppel - Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach. Veranstaltung: BA-3240 Technische Installationen (Prof. Dipl.-Ing. Hubert Kress, THN-AR). Nürnberg: Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur, 26.11.2014.

Krippner, Roland; Berghofer, Thomas; Neberich, Marcel: SOLLEKTOR und Lichtkuppel - Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach. Posterpräsentation - im Rahmen von "Offen Auf AEG". Nürnberg, Wissenschaftsstandort "Auf AEG", 19./20. September 2015.

Krippner, Roland; Berghofer, Thomas; Neberich, Marcel: SOLLEKTOR und Lichtkuppel - Innovative Tageslichtnutzung vom Flachdach. Posterpräsentation - im Rahmen von

"Die Lange Nacht der Wissenschaften". Nürnberg, Wissenschaftsstandort "Auf AEG", 24. Oktober 2015.

SOLLEKTOR und Lichtkuppel

Anhang

7.3 Abbildungsverzeichnis

BavarianOptics 2, 3
 Thomas Berghofer 85, 91
 Mario Franz 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 59, 62, 63, 66, 67, 73
 Roland Krippner 1, 4, 5, 6, 9, 89
 Marcel Neberich Titel, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 90
 Hans Poisel / POF-AC 16, 17, 18

Alle anderen Abbildungen Thomas Berghofer und Marcel Neberich

7.4 Datenblätter



Abb. 92 Sonnensimulationsscheinwerfer
 Datenblatt

LumiCam 1300	Mono	Color	Advanced
Größen			
Photometrische Größen	Leuchtdichte (cd/m ²), Lichtstärke (cd), Kontrast		
	Lichtstärkeverteilung LVK ¹ (cd), Beleuchtungsstärke ¹ (Lux)		
Farbmestrische Größen	-	Farbort (x,y), Farbort (u', v'), Tristimuluswerte (X, Y, Z), Dominante Wellenlänge (nm), Farbsättigung, Korrelierte Farbtemperatur CCT (K)	
Kameradaten			
Effektive Pixelzahl (h x v)	1370 x 1020		
Pixelgröße	6,45 µm x 6,45 µm		
A/D-Wandler	12 bit		
Größe CCD-Sensor	2/3", 11 mm diagonal		
Leuchtdichte			
Dynamikbereich (Einfachbelichtungsmodus) ²	4.600:1		
Dynamikbereich (Mehrfachbelichtungsmodus) ²	6.000.000:1		
Einfacher Messbereich ³	0,1 mod/m ² ... 100.000 cd/m ²		
Erweiterter Messbereich ^{4, 5}	bis zu 10 ⁹ cd/m ²		
Messzeit (bei 10 cd/m ²) ⁶	1 s		
Messzeit (bei 100 cd/m ²) ⁶	0,8 s		
Genauigkeit für Normlichtart A ⁷	±4 %	±4 %	±4 %
Genauigkeit für LED-Farblicht ⁸	-	-	±2 %
Wiederholbarkeit ⁹	±0,1 %		
Linearität	±0,5 %		
Homogenität ¹⁰	±1 %		
Filteranpassung ¹¹	f ₁ ' = 1,6 %		
Farbinformation			
Messzeit (bei 10 cd/m ²) ⁶	-	13 s	16 s
Messzeit (bei 100 cd/m ²) ⁶	-	8 s	8 s
Genauigkeit (x, y) für Normlichtart A ⁵	-	±0,003	±0,003
Genauigkeit (x, y) für Farblicht ^{4, 12}	-	±0,010	±0,003
Genauigkeit (x, y) für LED-Farblicht ^{4, 8}	-	-	±0,005
Wiederholbarkeit (x, y) ⁹	-	±0,0001	±0,0001
Homogenität (x, y) ¹⁰	-	±0,001	±0,001
Genauigkeit (Dominante Wellenlänge)	-	siehe Diagramm (S. 5)	siehe Diagramm (S. 5)
Wiederholbarkeit (Dominante Wellenlänge) ^{9, 13}	-	±0,05 nm	±0,05 nm
Filteranpassung	-	f ₁ ' = 6 % (für X), f ₁ ' = 4 % (für Z)	n. a.
Allgemeines			
Interface	Gigabit Ethernet		Gigabit Ethernet, USB 1.0/2.0
Betriebssystem	Windows 7 (32/64 bit)		
Maße (L x B x H)	129 mm x 95 mm x 78 mm	275 mm x 120 mm x 175 mm	
Gewicht	1 kg	3 kg	
Stromversorgung	12 V extern		
Betriebsbedingungen	10 - 35 °C ¹⁴ , max. 70 % relative Luftfeuchtigkeit (nicht-kondensierend)		
LVK-Messplatz (optional)			
Abstrahlwinkel	-65° ... 65°		
Genauigkeit (Abstrahlwinkel)	±1°		
Maße Messplatz (L x B x H)	2.000 mm x 708 mm x 678 mm		
Messfläche Schirm (B x H)	610 mm x 480 mm		

Abb. 93 Leuchtdichtekamera "Lumicam 1300
 color" – Datenblatt

SOLLEKTOR und
 Lichtkuppel

Anhang