

Freiformflächen-Tageslichtsysteme für Fassaden und Oberlichter

FFF-TaliSys

C. Knoflach,
D. Plörer,
R. Weitlaner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

34/2019

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Freiformflächen-Tageslichtsysteme für Fassaden und Oberlichter

FFF-TaliSys

Mag. C. Knoflach, Dipl.-Ing. Dr. D. Geisler-Moroder, Mag. W. Pohl
Bartenbach GmbH

Mag. R. Weitlaner MSc, F. Perathoner, C. Kofler, D. Trojer
HELLA Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH

Mag. D. Plörer, Dipl.-Ing. Dr. M. Hauer, assoz. Prof. Dr.-Ing. R. Pfluger
Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

Aldrans, April 2019

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
1. Ausgangslage	8
1.1. Ausgangssituation und Zielsetzung des Projekts	8
1.2. Stand der Technik bzw. Stand des Wissens.....	9
2. Projektinhalt	12
2.1. Vorgangsweise.....	12
2.2. Methoden.....	13
2.3. Umsetzung.....	14
3. Ergebnisse.....	15
3.1. Neue Tageslichtsysteme zur Umsetzung von Zielen in „Stadt der Zukunft“	15
3.2. Marktanalyse	18
3.3. Allgemeines thermisches Design.....	18
3.3.1. Thermisches Modell	18
3.3.2. Randbedingungen	19
3.3.3. Simulationsergebnisse.....	20
3.4. Fassaden-System	25
3.5. Oberlicht-System	27
3.6. Funktionsmuster.....	31
4. Schlussfolgerungen.....	36
5. Ausblick und Empfehlungen	38
6. Verzeichnisse	40
6.1. Abbildungsverzeichnis	40
6.2. Literaturverzeichnis	42

Kurzfassung

Im Rahmen von FFF-TaliSys wurden neuartige Tageslichtsysteme auf Basis der Freiformflächentechnologie erarbeitet und bis zu Funktionsmustern umgesetzt. Das Ziel war die Entwicklung von Systemen für Fassaden und Oberlichter, welche möglichst ohne bewegte Teile und ohne komplexe Steuerung auskommen, aber dennoch eine optimale optische und thermische Funktionalität bieten (Low-Tech Systeme mit High-Tech Optiken). Für die Integration in die Gebäudehülle wurden neben lichttechnischen auch bauphysikalische Randbedingungen berücksichtigt und in die Optimierung der Optiken miteinbezogen. Ziel waren energieeffiziente Lösungen, die gleichzeitig höchsten visuellen und thermischen Komfort in neu gebauten und sanierten Gebäuden garantieren.

In Abstimmung mit den Geschäftsleitungen der beteiligten Firmen HELLA und Bartenbach (BB) und unter Einbindung der Planungsgruppen bei BB („Lighting Design“) wurde beschlossen, den Schwerpunkt auf die Nutzung der direkten Sonne zu legen. Die Ergebnisse der Marktanalyse und einer Patentrecherche haben diese strategische Ausrichtung des Projekts FFF-TaliSys nahegelegt.

Beim System für Seitenlicht handelt es sich um Linsenplatten, die das Sonnenlicht an die Decke in der Raumtiefe lenken. Damit wird die natürliche Sonnenstrahlung nicht durch Sonnen- und Blendschutzsysteme vom Raum ferngehalten, sondern gezielt genutzt, um in fassadenfernen Bereichen ohne Einsatz von Primärenergie einen wesentlichen Beitrag zum Human Centric Lighting zu leisten.

Besonders für sehr hohe Gebäude sind außenliegende Systeme auf Grund der Windlasten nicht praktikabel. Außerdem werden starre Systeme sowohl von Architekten als auch von Nutzern häufig abgelehnt. Eine Realisierung als innenliegende, wegfahrbare Vertikaljalousie löst diese Probleme. Abhängig von den Miniaturisierungsmöglichkeiten sind auch andere Aufbauten denkbar, etwa als Rollläden.

Das gewählte Konzept ermöglicht eine flexible Anpassung an die geographische Lage, die Gebäudeorientierung, die thermischen Gebäudeeigenschaften und die Raumnutzung. Das erfolgt beim Einbau in Form einer geeigneten Zusammensetzung von Linsenplatten-Typen und erfordert keine Nachführung oder eine andere Steuerung der Vertikaljalousie.

Als Oberlicht-System wurden Aufsätze für Lichtrohre zur besseren Nutzung der direkten Sonne entwickelt. Dabei wurden unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten untersucht, die als Baukastensystem speziell auf die Gegebenheiten und den Anwendungszweck zugeschnittene Lösungen ermöglichen.

Zusätzlich zu Mustern in Form von 3D-Drucken für diese beiden Systeme wurde auch eine spezielle 4 x 1-fach Spritzgussform für eine Linsenplatte beauftragt. Anhand dieser Versuchsform wurden die Möglichkeiten für eine kosteneffiziente Serienfertigung geprüft: Die Platte kann entweder aus drei getrennten Teilen, die zusammengebaut werden müssen oder im 2K-Spritzguss (Zweikomponentenspritzguss) durch Umspritzen des zentralen Teils gefertigt werden.

Abstract

In the course of the project FFF-TaliSys novel daylighting systems based on freeform surface technology have been developed and implemented into functional models. The project was aimed at developing systems for façades and skylights that yield optimal visual and thermal functionality avoiding moveable parts and complex controls (low-tech systems with high-tech optics). For the integration into the building skin as well as the optimization of the optical systems both thermal and visual boundary conditions were considered aiming at energy-efficient solutions that guarantee highest visual and thermal comfort in new and retrofitted buildings.

Consulting the management of the participating companies HELLA and Bartenbach (BB) and involving the planning groups at BB („Lighting Design“) it was decided to put a focus on the usage of direct sunlight. The results of a market analysis and a patent research have reinforced this strategic orientation of the project FFF-TaliSys.

The sidelight system is a lens disk directing sunlight up to the floor in the depth of the room. Thus natural solar radiation is not kept away by sun protecting and glare sheet but intentionally contributes to Human Centric Lighting in areas far from the façades without wasting primary energy.

Especially for high buildings, exterior systems are not feasible due to wind load. Fixed systems are frequently rejected by architects as well as occupants. An implementation as vertical removable blinds solves these issues. Depending on the potential to miniaturize the optics other compositions are imaginable too, for example roller shutters.

The chosen concept enables an adjustable adaptation to geographical position, orientation and thermal characteristics of the building and room use. Realized by an adequate configuration of lens disks during installation this avoids autotracking and complex control strategies for the blends.

For the skylight different supports for solar tubes to optimize the utilization of direct sunlight have been developed. Different implementations have been studied, which allow for a construction kit adaptable to the situation and the purpose on hand.

Functional models have been realized by 3D printing. Additionally, a special four cavity mold for a lens disk has been ordered. This allows to check different methods for a cost-efficient serial production. The lens disk can be manufactured either in three different parts that have to be assembled afterwards or in Two-Component Injection Moulding by insert molding of the central part.

1. Ausgangslage

1.1. Ausgangssituation und Zielsetzung des Projekts

Der Einsatz von lichtlenkenden Tageslichtsystemen bildet sowohl bei Neubauten als auch bei der Sanierung des Gebäudebestands trotz bisheriger Anstrengungen einen Nischenmarkt. Das liegt neben den unzureichenden Planungsmethoden einerseits am Fehlen eines breiten, attraktiven Angebots solcher Systeme und andererseits an deren problematischen Eigenschaften: Zusätzlich zu dem gegenüber reinen Verschattungssystemen höheren Preis treten häufig Schwierigkeiten im Betrieb (unzulängliche Steuerung, mechanische Anfälligkeit, Beeinträchtigung der Lebensdauer der Verglasung, ...), lichttechnische Unzulänglichkeiten (Blendung und/oder zu geringe Tageslichtnutzung, schlechter Sichtbezug nach außen) und thermische Probleme (zu hohe Wärmeeinträge im Sommer) auf. Trotz höherer Investitionskosten kommt es daher verbreitet zu Defiziten beim visuellen und thermischen Komfort. Dazu kommen noch Abstriche bei der möglichen Energieeinsparung: Die künstliche Beleuchtung muss häufig eingeschaltet werden und die Kühllasten können durch hohe Solareinträge sogar steigen.

Bisherige gemeinsame Forschungsprojekte von Bartenbach GmbH (BB) und der Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen (UIBK-EEB) orientierten sich neben einer Verbesserung der Systemtechnik und deren Mechanik vor allem an der Entwicklung von Planungs- und Berechnungstools zur theoretischen Bewertung. Die Schnittstelle „Fassade“ bestimmt neben lichttechnischen Kriterien ganz wesentlich in direktem Zusammenhang ebenso das Innenraumklima und den Energiebedarf für Heizen und Kühlen, weshalb eine voneinander losgelöste Bewertung beider Aspekte keine optimale Lösung gewährleistet (Gefahr von Fehloptimierungen).

Die theoretischen Überlegungen mündeten in der Entwicklung von Tools für die rechnerische Berücksichtigung und Bewertung solcher Systeme und zeigten die theoretische Machbarkeit. Diese Software-Werkzeuge zur gekoppelten lichttechnischen und thermischen Simulation werden laufend im Rahmen von Forschungsprojekten weiter verbessert. Die praktische Umsetzung stieß bisher allerdings an die Grenzen des Machbaren, welche zu großen Teilen auf die hohen Anforderungen an eine präzise Systemmechanik (Genauigkeit der Anstellwinkel, Ansteuerung, Materialermüdung bei hohen Temperaturen im Scheibenzwischenraum) zurückzuführen waren. Zudem bringen hochtechnisierte Systeme auf langfristige Betriebssicht ein erhöhtes Risiko an Fehleranfälligkeit mit sich und stellen für eine ausreichende Funktionalität höchste Ansprüche an Exaktheit im Betrieb. Diesen teils „unrealistischen“ Anforderungen in der Praxis wurde gezielt durch den im vorliegenden Projektvorhaben verfolgten „Low-Tech“-Ansatz entgegengearbeitet (etwa durch Reduzierung bewegter Teile).

Die genannten lichttechnischen, thermischen und mechanischen Probleme lieferten die Motivation für das vorliegende Projekt. Durch den Einsatz der innovativen Freiformflächentechnik im Tageslichtbereich sollten die lichttechnischen Herausforderungen gelöst werden (Bartenbach), mit der bauphysikalischen Unterstützung der Universität Innsbruck die Systeme in thermisch funktionierende, möglichst energieeffiziente Fassadenkonzepte integriert werden und mit dem Know-how von Hella Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH (Hella) die mechanischen Probleme beseitigt werden. Das Entwicklungsziel waren hochwertige und gleichzeitig kostengünstige und praxistaugliche Tageslichtsysteme auf Basis der Freiformflächentechnologie.

1.2. Stand der Technik bzw. Stand des Wissens

In der Gebäudetechnik stellt die Fassade als Schnittstelle zwischen Raum- und Außenklima einen entscheidenden Faktor dar. Konventionelle Verschattungssysteme (Raffstore, Jalousien, Rollläden, ...) bieten Lösungen für den Sonnen- und den Blendschutz, aber keine Tageslichtnutzung. Die im Trend liegenden tageslichtdurchfluteten verglasten Gebäude bringen sehr häufig mehr Probleme als Vorteile für die Nutzer, es kommt u.a. zu Überhitzung, zu Blendung, und zu hohem Kunstlichtbedarf trotz vollverglaster Fassade.



Abbildung 1: Innovatives „konventionelles“ Umlenksystem im Projekt „Kreditanstalt für Wiederaufbau, Neubau“ (Berlin).

Fassadenelemente mit lichttechnischem Planungshintergrund beinhalten Systeme für Sonnenschutz und Blendschutz und erlauben gleichzeitig Sichtkontakt nach außen. Die Systeme können starr oder beweglich eingebaut sein. Bei der Integration in ein Verglasungssystem (im Scheibenzwischenraum) wird Verschmutzung vermieden.

Die am Markt verfügbaren Tageslichtsysteme und zu diesem Thema erteilten Patente wurden in verschiedenen internationalen und nationalen Forschungsprojekten, aber auch im Rahmen von firmen-internen Projekten analysiert:

- Daylight in Buildings: Design Tools and Performance Analysis. IEA SHC Task 21. A Source Book on Daylighting Systems and Components (2000). [RUC 2000]
- Im Rahmen des Projekts "Lichtblicke" ("Haus der Zukunft", Integrierte Bewertung von Tageslichtlenksystemen für eine verstärkte Tageslichtnutzung im Gebäudebestand) wurde eine

Datenbank erstellt, die rund 35 Hersteller bzw. Händler mit insgesamt rund 95 Produkten enthält. [ECO 2005]

<http://www.ecology.at/lichtblicke/>

- "LichtAusFassade": Patent-Recherche BB und Recherche SLS Praun & Gerstmann u.a. zu Tageslichtsystemen (2010). [POH 2012]
- Tageslichtoffensive BB: Zusammenfassung zu verfügbaren Tageslichtsystemen (2010).
- New Buildings Institute: Daylighting Pattern Guide (2015). [NBI 2015]
<https://newbuildings.org/resource/daylighting-pattern-guide/>
- Whole Building Design Guide WBDG, a program of the National Institute of Building Science Daylighting (2016). [NIB 2016]
<http://www.wbdg.org/resources/daylighting>
- SolarLits: Journal of Daylighting (seit 2014). [SOL 2014]
<http://solarlits.com/>

BB entwickelt bereits seit vielen Jahrzehnten Tageslichtsysteme mit unterschiedlichen Funktionen:

- Bewegliche und starre 45°-Sonnenschutzprismen zur Reduktion der solaren Lasten bei Seitenlichtern.
- Umlenklamellen und Umlenkprismen zur Lenkung von Himmelslicht und direktem Sonnenlicht in die Raumtiefe.
- Ausblendprismen zur Integration in Dachschrägen (Oberlichter).
- Speziell strukturierte Aluminium-Deckenprofile zur Nutzung der Decke als lichtlenkendes Element.
- Kombiniertes Sonnenschutz- und Ausblendraster (Kombisol).
- Einspeisung von Sonnenlicht in horizontale Lichtschächte (ADASY).

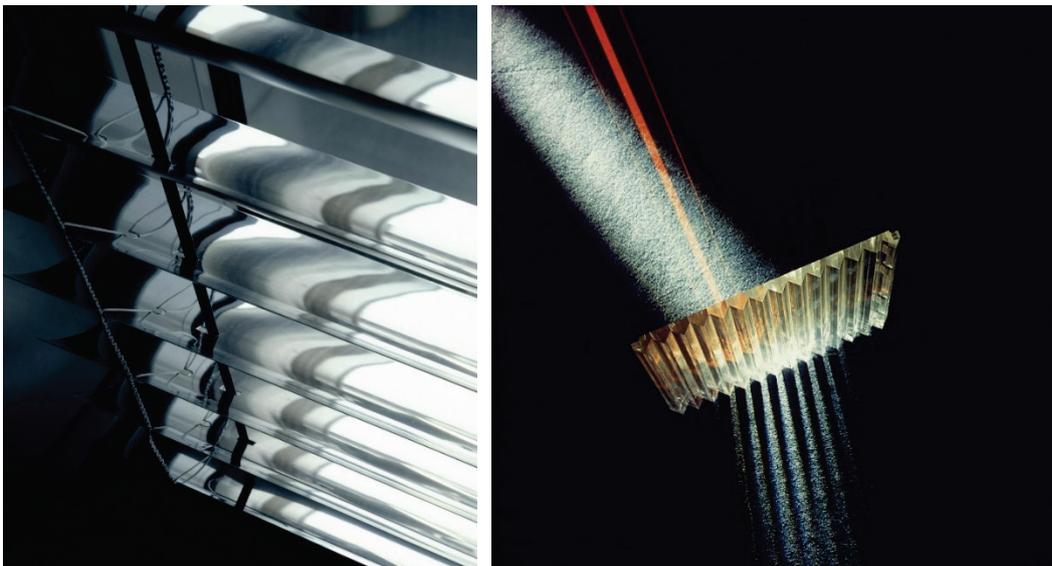


Abbildung 2: Umlenklamelle und Sonnenschutzprisma (BB-Systeme, lineare Symmetrie).

Viele dieser Systeme werden bereits von Firmen für den Weltmarkt produziert. Diese Tageslichtsysteme weisen relativ einfache optische Strukturen auf. Meist sind es extrudierte Teile mit linearer Symmetrie. Bestimmte Komponenten sind auch rotationssymmetrisch, aber verkippt. Somit ist die Geometrie im Wesentlichen 2-dimensional. Auch die Systeme von anderen Firmen weisen vergleichbare geometrische Einschränkungen auf.

Die Entwicklung und wahrnehmungspsychologische Evaluierung solcher Systeme wurde im Rahmen von Forschungsprojekten vorangetrieben:

- „ADASY“ („Active DALighting SYstem“, EUREKA, 2006-2008)
- „Daylight Technology“ (K-Licht, COMET Application Intermediate Funding, 04/2009-03/2010)
- „Integrated Day- and Artificial Light“ (COMET Application K-Projekt, 07/2010-06/2013)
- „LichtAusFassade“ (Haus der Zukunft, 07/2009-06/2008)

Synergie-Effekte aus diesen Projekten wurden genutzt. Das betraf insbesondere die Zusammenarbeit mit Experten aus dem Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen (UIBK-EEB) an der Universität Innsbruck (Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger; Arbeitsbereichsleitung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Streicher, Univ.-Prof. Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Wolfgang Feist).

Besonders durch Projekte aus dem Stärkefeld „Freiformflächen“ wurden im K-Licht die Grundlagen für eine Anwendung von komplexeren 3D-Flächen geschaffen:

- „Berechnung von Freiformflächen für die Lichttechnik“ (Forschungsförderungsfond 1998/99)
- „Freiformflächen - Berechnungsverfahren“ (K-Licht, KPZ I 2002-2005)
- „Freiformflächen für ausgedehnte Lichtquellen“ (Fortsetzungsprojekt K-Licht, KPZ II 2006 - 2009)
- „High performance calculation and tolerancing for Complex Surfaces“ (K-Licht, COMET Application Intermediate Funding, 2009/10)

Bisher sind diese Methoden und Verfahren im Bereich Kunstlicht zur Berechnung von Reflektoren und Linsen von Bartenbach angewendet worden. Insbesondere im LED-Sektor wurden diese Verfahren mittlerweile zu unverzichtbaren Instrumenten in der Entwicklung von Leuchten. Im Rahmen des Projekts

- "Berechnung und Planung von Tageslichtsystemen mit Freiformflächen" TL+FFF (FFG Basisprogramm, 10/2010 - 12/2014)

wurden diese Verfahren entsprechend den Anforderungen für Tageslichtentwicklungen angepasst und erweitert und standen somit in diesem Projekt für Berechnungen zur Verfügung.

Ansätze zur Entwicklung von Tageslichtsystemen unter Ausnützung der Wellennatur des Lichts wurden im Projekt nicht betrachtet (siehe z.B. Forschungsprojekt "Holographisch-optische Elemente", [ALT 2013] und Artikel in INGENIEUR.de "Hologramme lenken Licht und Schatten", [STO 1999]).

2. Projektinhalt

2.1. Vorgangsweise

Konzepte für Tageslichtsysteme mit weitgehendem Verzicht auf bewegliche Teile und damit ohne die Notwendigkeit einer komplexen Steuerung stehen im Projektfokus. Hochoptimierte Freiformflächenoptiken werden durch eine ganzheitliche Betrachtung der wesentlichen Aspekte zu Bausteinen intelligenter, funktioneller aber trotzdem kosteneffizienter Tageslichtsysteme. Durch die Umlenkung von Tageslicht in die Raumtiefe wird das Potential an Kunstlichteinsparung weitgehend ausgeschöpft und der Primärenergiebedarf reduziert. Ein wesentliches Designkriterium ist dabei die visuelle Qualität bei weitgehender Vermeidung zu hoher Leuchtdichten (Blendung). Durch Gewährleistung einer stabilen Wahrnehmung wird höchstmögliche Arbeitsleistung erreicht. Der visuelle Kontakt zur Umgebung (möglichst ungestörter Ausblick) und die Dynamik des Tageslichts bieten zusammen mit den sich im Tagesverlauf ändernden Spektren eine natürliche Unterstützung des circadianen Rhythmus und somit einen wesentlichen Beitrag zur Gesundheit.

Aus thermischer Sicht erlaubt ein dosierter und gezielter Lichteintrag die solaren Einträge auf ein tolerierbares Maß zu verringern und damit im Besonderen die meist hohen Kühllasten von Bürobauten mit großem Transparenzanteil in der Fassade zu reduzieren. Gleichzeitig werden in der Heizsaison thermische Einträge zur Verringerung der Heizlast intelligent genutzt. Die Vermeidung von erhöhten Innenoberflächentemperaturen, speziell an der Fassadenseite, sowie gezielte Lichtlenkung in den Raum wirkt sich entscheidend auf die thermische und visuelle Behaglichkeit aus. Bei der Entwicklung eines „intelligenten“ Fassadenkonzeptes wurde deshalb besonderes Augenmerk auf die bauphysikalische Auslegung und die thermischen Auswirkungen der Systeme auf das Innenraumklima gelegt. Dies bezieht sich sowohl auf eine thermisch optimale Integration der Freiformflächen-Elemente in den Fassadenaufbau als auch auf die Einhaltung der energetischen Kriterien (Vermeidung hoher Oberflächentemperaturen, Verringerung der Heiz- und Kühllasten).

Betrachtet wurden dabei sowohl Systeme zum Einsatz in Fassaden, als auch Lösungen für Oberlichter.

Durch die breit aufgestellten Expertisen des Konsortiums konnten dabei lichttechnische, wahrnehmungspsychologische und gesundheitliche Zielvorgaben (BB) ebenso einbezogen werden, wie die fundamentalen bauphysikalischen Eigenschaften zur Gewährleistung des thermischen Komforts (UIBK-EEB). Oberlichter stellen aufgrund erhöhter Anforderungen an U-Werte (höhere Konvektion im Scheibenzwischenraum, höhere langwellige Abstrahlung), vermehrte Beeinflussung durch Regen und Schneelast sowie aufgrund erhöhter solarer Einträge durch horizontale Orientierung besondere Anforderungen an die Bauphysik. Die Zusammenarbeit mit HELLA bildete die Grundlage für eine größtmögliche Praxisorientierung der Ansätze. Diese Firma hat sehr viel Erfahrung mit großflächig eingesetzten, konventionellen Verschattungs-Systemen (Jalousien, Markisen, etc.), d.h. mit der Produktion und dem Einbau solcher Fensterabschlüsse. Die dabei auftretenden Probleme, die einzuhaltenden Normen und die dazugehörigen Bewertungstools konnten somit bereits in den Konzepten Berücksichtigung finden.

Die wesentlichen Projektziele lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Markt- und Patentrecherche zu am Markt befindlichen Tageslichtsystemen und patentierten Konzepten
- Thermisches Design
- Konzepte für Fassadensysteme (Seitenlicht)
- Konzepte für Oberlichtsysteme
- Je ein Funktionsmuster für ein Fassaden- und ein Oberlichtsystem sowie deren Evaluierung
- Verbreitung der Ergebnisse

2.2. Methoden

Die wenigen am Markt verfügbaren tageslichtlichtlenkenden Systeme weisen entweder eine lineare Symmetrie auf, oder sie beruhen auf relativ einfachen geometrischen Kurven (Bsp.: CPC "Compound Parabolic Concentrator", Querschnittskurve ist eine Parabel).

Bei der Entwicklung von Leuchten ist es inzwischen Stand der Technik Freiformflächenoptiken einzusetzen, die sich aus lichttechnischen Vorgaben ergeben. Ein Vorreiter bei dieser Technologie, die sich zusammen mit den LEDs immer mehr durchsetzt, ist seit vielen Jahren BB. Im Rahmen des Projekts "Berechnung und Planung von Tageslichtsystemen mit Freiformflächen" TL+FFF (FFG Basisprogramm, 10/2010 - 12/2014) wurden die auf Kunstlichtberechnungen zugeschnittenen Verfahren entsprechend erweitert und ersten Ideen für Tageslichtsysteme nachgegangen. Außerdem wurden Methoden für die Tageslichtplanung mit solchen Systemen entwickelt.

Bisher gibt es am Markt noch keine lichtlenkenden Systeme zur Tageslichtnutzung, die auf Freiformflächen-Technologie beruhen. In diesem Forschungsprojekt sind erste Bausteine für innovative Produkte und deren Integration in Fassadenkonzepte entstanden. Die Zusammenarbeit von Experten aus den Gebieten Lichttechnik & Wahrnehmung (BB) und Bauphysik (UIBK-EEB) mit einem österreichischen Großbetrieb (HELLA) im Verschattungsbereich, der bei diesen Systemtechniken weltweite Vorreiteransprüche stellen möchte, bot optimale Voraussetzungen für einen solchen Technologiesprung.

Im Rahmen dieses Projekts wurden Freiformflächen-Komponenten für eine Nutzung von Tageslicht in der Fassade und in Oberlichtern entwickelt. Diese können (je nach Zielrichtung des jeweiligen Konzepts) zur Gewährleistung aller Funktionen mit konventionellen Systemen kombiniert werden (Beispiel: Raffbares Rollo als Blendschutz).

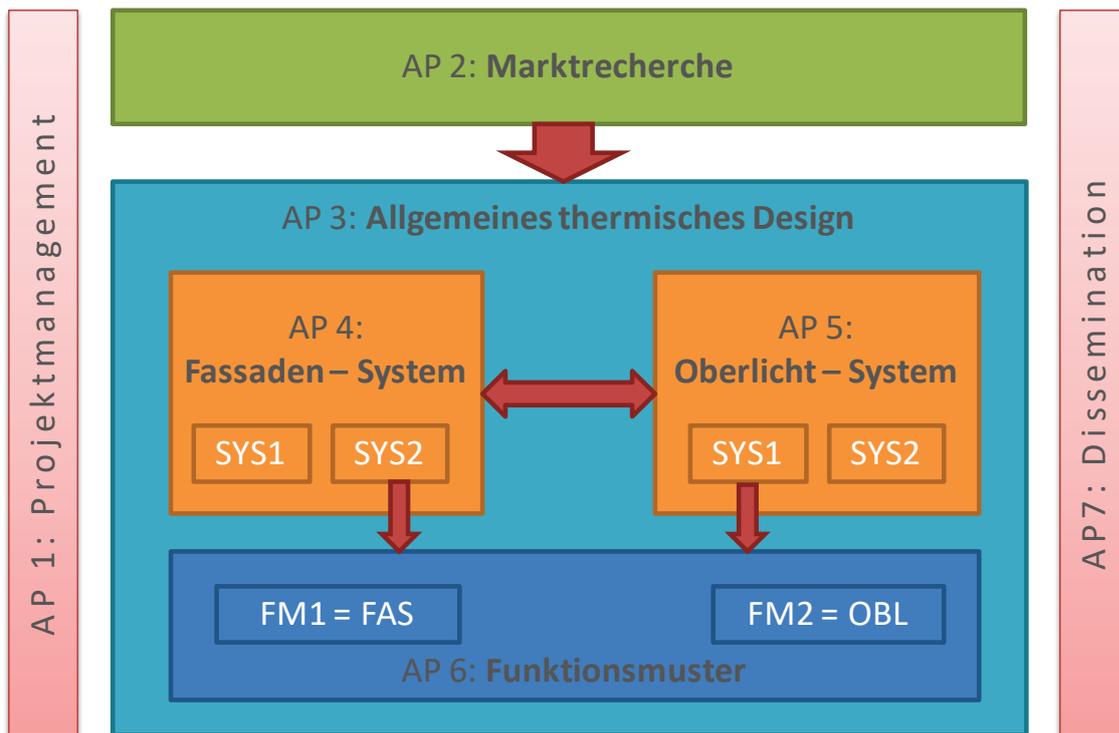


Abbildung 3: Flussdiagramm zu den Arbeitspaketen.

2.3. Umsetzung

Geplant war die Entwicklung von je zwei Konzepten für Fassaden- und Oberlichtsysteme. Beim Seitenlicht wurde ein ganz neuer Ansatz gefunden, zu dessen Umsetzung mehrere unterschiedliche Systemideen verfolgt wurden, was sich als sehr aufwändig herausgestellt hat. In Zukunft ist noch zu klären, ob dazu eine Patentanmeldung erfolgen wird und wie weitere Schritte in Richtung einer marktfähigen Umsetzung finanziert werden können.

Als Grundlage für die Berechnung der Systeme wurde im ersten Forschungsjahr bei BB eine Bibliothek für NURBS-Flächen entwickelt. Diese Flächen bilden den Industriestandard zur Weitergabe von Freiformflächen an Hersteller (etwa im IGES- oder STEP-Format). Der BB-spezifische „Werkzeugkasten“ für die Berechnung von Freiformflächen wurde somit ergänzt und erweitert. Eine laufende Anpassung bestehender Programme und die Entwicklung neuer Software wird bei BB sowohl bei Produktentwicklungen, als auch für die Bearbeitung von Forschungsprojekten durchgeführt. Diese Herangehensweise ermöglicht die Umsetzung innovativer Lösungsansätze, die über bestehendes Know-how hinausgehen.

Schließlich wurden Funktionsmuster für die erfolversprechendsten Lösungen gefertigt.

3. Ergebnisse

3.1. Neue Tageslichtsysteme zur Umsetzung von Zielen in „Stadt der Zukunft“

Künstliche Beleuchtung ist für ca. 19% des globalen elektrischen Energieverbrauchs verantwortlich und hat einen wesentlichen Anteil am Gesamtenergiebedarf von Gebäuden. Dieser Anteil könnte u.a. durch eine bessere Nutzung von Tageslicht stark reduziert werden. Die EU-Richtlinie, welche besagt, bis 2020 nur mehr „nearly zero energy buildings“ zu haben und der anhaltende architektonische Trend hin zu verglasten und offenen Fassaden stellt die Gebäudeplaner verstärkt vor neue Herausforderungen. Ein besonderes Problem stellt dabei mittlerweile auch in Österreich der zunehmende Kühlbedarf dar.

War bis vor wenigen Jahren der Strombedarf für Kühlung von Gebäuden in Österreich noch praktisch Null, so ist es in der Zwischenzeit speziell in Verwaltungsgebäuden zur Gepflogenheit geworden, Kühlanlagen einzubauen. Durch die Entwicklung von neuen Fassadenelementen kann ein Beitrag geleistet werden, diesen Trend in Zukunft umzukehren. Die Werkzeuge und Methoden für Planer und Entwickler zur Fassadenevaluation stehen in ersten Ansätzen bereits zur Verfügung und wurden in parallel zu diesem Projekt laufenden Forschungsvorhaben weiter vorangetrieben. Damit wird die Integration tageslichtlenkender Fassadensysteme in den Gebäudebetrieb unterstützt, womit der Energiebedarf in Gebäuden drastisch gesenkt werden kann. Allerdings stehen derzeit kaum umlenkende Tageslichtsysteme zur Verfügung, die optimal in Fassaden integriert werden können. Ein noch stärkeres Verbesserungspotential besteht bei Tageslichtsystemen für Oberlichter. In beiden Bereichen fehlen Systeme, die vorhandene technische Möglichkeiten ausschöpfen und am Markt in großer Stückzahl eingesetzt werden. Die im Kunstlicht bereits im großen Maßstab eingesetzte Freiformflächentechnologie für die optischen Elemente (Linsen, Reflektoren) wurde bisher im Tageslichtbereich noch nicht eingesetzt. Durch ‚freie‘ Flächenformen (d.h. numerisch Punkt für Punkt berechnete Flächen), die mithilfe komplexer mathematischer Optimierungsverfahren für mehrdimensionale Zielfunktionen ermittelt werden, entstehen auch für Tageslichtsysteme ganz neue optische Lösungen.

Werden am Markt mehr und bessere Tageslichtsysteme mit gezielter Tageslichtnutzung angeboten, so kann der Kunstlichtbedarf und die Heiz- und Kühllasten der Gebäude drastisch reduziert werden.

Das Projekt behandelte prioritär folgende Schwerpunkte der Programmlinie „Stadt der Zukunft“:

Schwerpunkt:

Themenfeld 3: Technologieentwicklung für die Gebäudeoptimierung und -modernisierung

Subschwerpunkt 1:

Im Mittelpunkt stehen Systeme und Technologien, die wesentliche Beiträge zur Reduktion des Energieverbrauches (Strom, Wärme und Kälte) leisten. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Konzeption, Entwicklung und Demonstration von innovativen Technologien und Systemen im Bereich des Gebäudebestandes und im Neubau.

Begründung:

Die Entwicklung und Bewertung von effizienten Systemen zur Tageslichtnutzung ist Grundvoraussetzung zur Maximierung der Energieeinsparung im Gebäudebetrieb. Dies wird besonders durch die ganzheitliche Betrachtung dieser Systeme (lichttechnische und bauphysikalische

Funktionalität, aber auch die Auswirkungen auf Wahrnehmung und Gesundheit) gewährleistet, bei gleichzeitiger Integration der im Projekt entwickelten Komponenten in ein ganzheitliches Fassadenkonzept. In Vorstudien konnte gezeigt werden, dass mithilfe von Tageslichtlenksystemen in einem Referenzraum im Vergleich zu einem klassischen Verschattungssystem über 40% Einsparung im Gesamtenergiebedarf (Kunstlicht, Heizung und Kühlung) erzielt werden kann. Die Entwicklung praxistauglicher Tageslichtlenksysteme kann somit wesentlich dazu beitragen, im Neubau und in Sanierungsprojekten den Energiebedarf zu reduzieren.

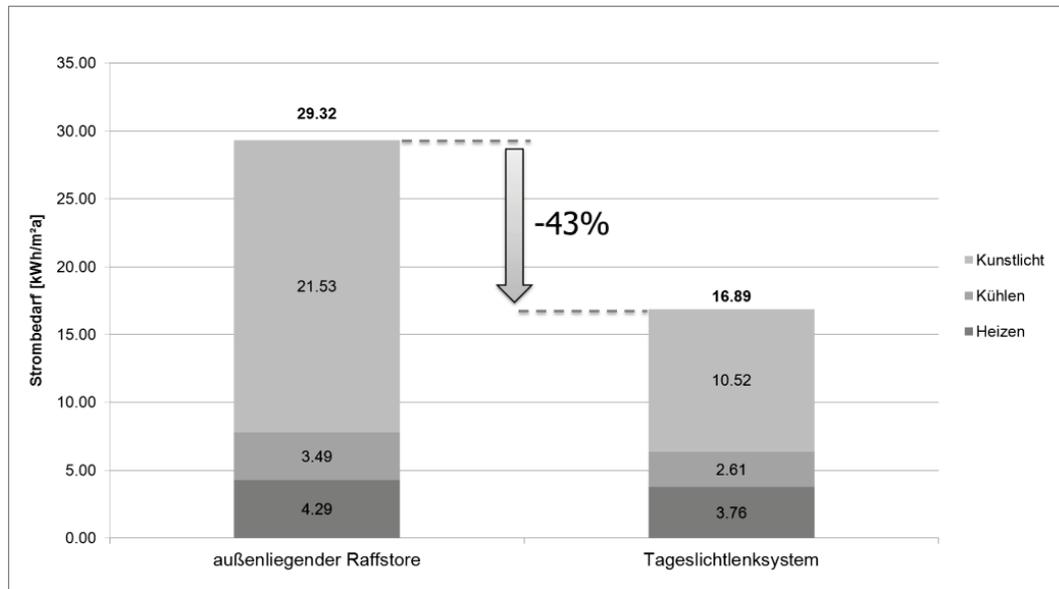


Abbildung 4: Einsparpotential beim Einsatz von Tageslichtlenksystemen. [HAU 2011]

Subschwerpunkt 2:

Es soll besonders darauf geachtet werden, dass bestehendes Wissen aus vorangegangenen Forschungsvorhaben in die Projekte einfließt.

Begründung:

Das Projekt schloss direkt an das Vorgängerprojekt von Bartenbach an („Berechnung und Planung von Tageslichtsystemen mit Freiformflächen TL+FFF“, FFG Basisprogramm). Hier wurden die notwendigen Methoden (Algorithmen und Simulationstools) erarbeitet, um Freiformflächenberechnungen nicht nur für Kunstlichtquellen, sondern auch für Tageslicht (Himmel und Sonne) durchführen zu können. Im nächsten Schritt wurden somit konkrete Konzepte für Freiformflächen-Tageslichtsysteme in der Fassade und im Oberlicht bis zum Funktionsmuster ausgearbeitet. Dazu wurden Partner mit den dafür notwendigen Kompetenzen bezüglich thermischem Design (Uni Innsbruck) und Konstruktion (Hella) mit ins Boot geholt.

Ausschreibungsziele:

Ziel 1: *Beitrag zur Entwicklung resilienter Städte und Stadtteile mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität*

Die optimale Versorgung von Gebäuden mit Tageslicht verringert durch die Einsparung von künstlicher Beleuchtung den Primärenergiebedarf. Dabei können mit verstärkter Tageslichtnutzung auch die Heizlast im Winter und die Kühllast im Sommer reduziert werden. Allerdings bedarf es zur Gewährleistung eines hohen visuellen Komforts und der thermischen Behaglichkeit ausgereifter

Systemtechniken. Gleichzeitig wird durch die biologischen Wirkungen ein wesentlicher Beitrag zur Gesundheit der Menschen geleistet, die sich in tageslichtdurchfluteten Räumen aufhalten.

Statische Systeme benötigen keine Steuerung und sind somit einfacher in der Installation, der Wartung und im Betrieb. Außerdem liefern sie tagsüber Licht und steuern den Wärmeeintrag, auch wenn keine elektrische Energie zur Verfügung steht, und erhöhen somit die Resilienz. Ein grundlegender Ansatz im Projekt war daher die Verwendung von ausgeklügelten Optiken anstatt beweglicher Teile.

Ziel 2: *Beitrag zur Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und zur Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz*

Durch den Einsatz von High-End Tageslichtsystemen in z.B. öffentlichen Gebäuden können die Aufenthalts- und Arbeitsbedingungen etwa in Behörden und Schulen verbessert und gleichzeitig der Energiebedarf reduziert werden. Zusätzlich wird ein wesentlicher Beitrag zur körperlichen und psychischen Gesundheit (z.B. natürliche Unterstützung des circadianen Rhythmus) geleistet. Sind solche Systeme zusätzlich für den Einsatz in Low-tech Gebäuden ohne hochkomplexe Mechanik und Steuer- und Regeltechnik ausgelegt, kann auch der Aufwand für Betrieb und Wartung deutlich reduziert werden.

Ziel 3: *Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte*

BB beschäftigt sich schon seit vielen Jahrzehnten mit der Entwicklung von Tageslichtsystemen und renommierte Hersteller haben bereits Bartenbach-Systeme im Programm. Den großen Markt für Fensterabschluss-Systeme bilden aber immer noch einfache und relativ preiswerte Massenprodukte ohne Tageslichttechnik. Während im Kunstlichtbereich der Einsatz von Freiformflächen besonders für LED-Leuchten bereits Stand der Technik ist, findet diese Technologie im Tageslicht noch keine Anwendung. Ziel war daher die Umsetzung des BB Know-how mit Hilfe der im Projekt TL+FFF entsprechend entwickelten Methoden in praxistaugliche Tageslichtprodukte. Das bildet einen wesentlichen Baustein für BB, um sich in einem kompetitiven Umfeld auch in Zukunft eine führende Position sichern zu können.

HELLA ist ein äußerst erfolgreiches Großunternehmen, das europaweit wächst und in den letzten Jahren den Umsatz vervierfacht und die Mitarbeiterzahl verdoppelt hat. Ein künftiger Baustein für eine Fortsetzung dieses Wachstums ist die Ergänzung des Kerngeschäfts mit Sonnen- und Wetterschutzsystemen um optisch hochwertige, lichtlenkende Tageslichtsysteme unter Berücksichtigung der bauphysikalischen und thermischen Auswirkungen.

Das Forschungs- und Technologieprogramm "Stadt der Zukunft" bot damit einen Rahmen für die Kooperation zwischen zwei erfolgreichen österreichischen Unternehmen auf einem zukunftssträchtigen, aber auch risikobehafteten Gebiet. Durch die Einbindung der Universität Innsbruck war eine optimale Berücksichtigung der energetischen und bauphysikalischen Aspekte der zu erarbeitenden Tageslichtlösungen gewährleistet.

Die Universität Innsbruck bzw. hier der Arbeitsbereich „Energieeffizientes Bauen“ konnte in diesem Projekt nicht nur seine Expertise im Bereich Bauphysik einbringen, sondern auch weiteres Know-how

im Tageslichtsektor aufbauen. Durch Publikationen in Zeitschriften und auf Tagungen wird in weiterer Folge der Stellenwert in der internationalen wissenschaftlichen Community gestärkt.

3.2. Marktanalyse

Die in früheren Projekten erarbeiteten Zusammenfassungen und Marktanalysen wurden aktualisiert und ergänzt. Dabei wurden Referenz-Systeme genauer untersucht und neue Ansätze diskutiert, die von anderen Firmen und Universitäten in Forschungsprojekten verfolgt werden wie etwa: „Smart Glass“ (NanoEC™ Smart Tinting Glass, schaltbares Glas, Heliotrop Technologies <https://heliotropetech.com/> [HEL 2016]), „MicroShade“ (Folie für passive Verschattung, <http://www.microshade.net/> [MIC 2016]) und „Micro Mirrors“ (schaltbare Mikrospiegel, Universität Kassel, MEM4WIN <http://mem4win.eu/> [MEM 2012]).

Die Ergebnisse wurden im Bericht „Tageslichtsysteme“ zusammengefasst, wobei die Details in eigenen Dokumenten aufbereitet wurden, etwa in einer Zusammenfassung zu schaltbaren Gläsern. Zusätzlich erfolgte eine Patentrecherche zu neuen Patentanmeldungen als Ergänzung zu bestehenden Recherchen.

Die Geschäftsleitungen von HELLA und BB, aber auch die Planungsgruppen bei BB („Lighting Design“) wurden bezüglich der Erwartungen an neue Tageslichtprodukte und der strategischen Ausrichtung des Projekts FFF-TaliSys eingebunden.

3.3. Allgemeines thermisches Design

Die bauphysikalischen Auswirkungen der neu entwickelten Komponenten und besonders ihre thermischen Eigenschaften sind entscheidende Aspekte von Tageslichtsystemen. So werden Vertikaljalousien in den üblichen Modellen nur unzureichend abgebildet. Daher wurde ein Schwerpunkt auf die thermische Modellierung von Vertikaljalousien gesetzt. Auch bei der Verglasung werden laufend Fortschritte erzielt, wobei hier besonders druckentspannte Isoliergläser betrachtet wurden. Solche Glasaufbauten verbessern die Möglichkeiten für einen Einbau von Tageslichtsystemen im Scheibenzwischenraum. Als Seitenlicht-Lösung wurde eine innenliegende, wegfahrbare Vertikaljalousie gewählt. Trotzdem kann künftig auch der Einbau in eine Verglasung oder ein Kastenfenster eine attraktive Alternative sein.

Die Nutzung der direkten Sonnenstrahlung kann besonders bei stark bündelnden Systemen Materialien an ihre Belastungsgrenzen bringen. Deshalb wurden speziell für das Fassaden-System aufwändige FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) durchgeführt. Diese thermischen Berechnungen mit ANSYS werden im Folgenden beschrieben und ergaben für aluminiumbedampfte Komponenten keine kritischen Temperaturen.

3.3.1. Thermisches Modell

Im Laufe des Projektes kristallisierte sich ein innenliegendes System, welches in Vertikallamellen eingesetzt werden kann, als favorisierte Lösung heraus. Da dieses als möglichst dünne Platte, bestehend aus einem Raster an Mikrolinsen ausgeführt werden soll, in dem an mehreren Stellen das Sonnenlicht hoch konzentriert wird, ergab sich die Fragestellung, welche thermischen Anforderungen an die Materialien gestellt werden. Eine detaillierte thermische Simulation mittels finite Elemente

Methode konnte zeigen, welche Maximaltemperaturen im Inneren dieser Linse erreicht werden.

Hierzu wurde ein quaderförmiger Volumenkörper aus hochtransparentem Material modelliert (Abbildung 5), welcher ein Mikrolinsensystem darstellt. In jenem Bereich, indem die höchste Konzentration der Sonnenstrahlung vorherrscht, findet eine Umlenkung statt.

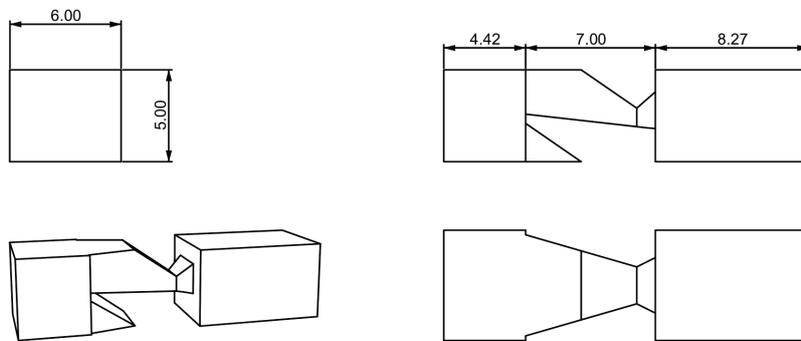


Abbildung 5: Mikrolinsensystem als für die thermische Simulation modellierter Volumenkörper.

Da für den gewählten Aufbau keine Totalreflexion möglich ist, kommt es an dieser Stelle zur Absorption. Es wird angenommen, dass die gesamte Energie, die im System bleibt, an diesem Hotspot absorbiert wird. Beim Durchgang durch das Medium wird auch ein Teil der Strahlung absorbiert, wodurch es zur Erwärmung an anderer Stelle kommt. Dadurch entspannt sich jedoch die Lage im Hotspot, weshalb man mit o.g. Annahme auf der sicheren Seite für die Berechnung der Maximaltemperatur liegt.

Die Berechnung der Wärmeverteilung mittels finite Elemente Methode wurde in der Software Ansys durchgeführt. Die Strahlungssimulation mittels Raytracing, aus welcher sich die Größe des Hotspots und die darin absorbierte Energie ergibt, wurde davon unabhängig durchgeführt. Für die Wärmetransportberechnung wurde der Hotspot als flächige Wärmequelle mit den Parametern aus der Strahlungssimulation modelliert. Der Wärmetransport findet daraufhin an die vordere und hintere Grenzfläche des modellierten Quaders statt, welche einen Teil der Linseplattenoberflächen darstellen. An ihnen erfolgt der gesamte Wärmeaustausch mit der Umgebung über Konvektion und Strahlung. Über die seitlichen Grenzflächen findet kein Wärmeabtransport statt, da die Situation der benachbarten Mikrolinsensysteme dieselbe ist, weshalb adiabate Randbedingungen angenommen werden konnten.

Die Berechnung wurde erst stationär durchgeführt, da in diesem Zustand die höchste Temperatur zu erwarten ist. Anschließend wurde auch dynamisch simuliert wie lange es dauert, bis sich die maximale Temperatur einstellt. Es wurden mehrere Varianten für die Situation für verschiedene Raumsituationen, hinter verschiedenen Verglasungssystemen, und verschiedene Materialaufbauten berechnet.

3.3.2. Randbedingungen

Die maximale Konzentration im Hotspot wurde in der Strahlungsberechnung mit 2.400 [-] bestimmt. Die Solarstrahlung wurde mit 800 W/m^2 auf die vertikale Fläche angenommen, was einer direkten Sonnenexposition entspricht. Für den Absorptionsgrad zwischen dem transparenten Material und der Aluminiumbeschichtung wurde der Wert 0,17 [-] gewählt. Die Eintrittsfläche für ein

Mikrolinsensystem misst 5 mm mal 6 mm. Daraus ergibt sich für den Hotspot eine Heizleistung von 4,08 mW auf einer Fläche von 0,0125 mm².

Da die für die Linse infrage kommenden Kunststoffe alle über ähnliche thermische Eigenschaften verfügen, wurden hierfür keine Varianten gerechnet, sondern für alle eine Wärmeleitfähigkeit von 0,18 W/m/K und eine thermische Masse von 2300 J/kg/K angenommen.

Um die gewünschten Reflexionseigenschaften zu erlangen, ist der Körper aus transparentem Kunststoff im mittleren Bereich mit Aluminium beschichtet. Da die erreichbare Dicke der Aluminiumbeschichtung für das Funktionsmuster bzw. für ein mögliches späteres Serienprodukt schwierig vorherzusagen ist, diese jedoch einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmeabtransport vom Hotspot hat, wurden hierfür vier Varianten berechnet, eine mit 100 µm, eine mit 10 µm Schichtdicke, eine ohne Aluminiumbeschichtung sowie eine Variante, bei der die Beschichtung nur kleinräumig um den Hotspot mit Schichtdicken kleiner 1 µm modelliert wurde.

Für den Wärmeabtransport an den Grenzflächen wurden drei verschiedenen Varianten berechnet. Für die erste wurde eine konstante Oberflächentemperatur von 50 °C angenommen und für die anderen beiden wurde der Wärmeabtransport von den Oberflächen über Strahlung und Konvektion berechnet. Bei der zweiten Version wurde angenommen, dass alle Objekte im Sichtfeld der Linseplatte sowie die Raumluft über eine Temperatur von 22 °C verfügen. Für die dritte Variante wurde die Situation hinter einer Zweischeibenverglasung mit low-e-Beschichtung abgebildet. Die raumseitige Glasoberfläche stellt dabei den Strahlungspartner der fensterzugewandten Seite der Linseplatte dar und für diese wurde eine Temperatur von 40 °C angenommen. Da eine Zweischeibenverglasung einen Teil der Solarstrahlung absorbiert, wurde die eintreffende Strahlung dabei mit 640 W/m² angenommen.

Für die dynamische Berechnung wurde die Leistung des Hotspots 4000 Sekunden lang auf 10% der Maximalleistung gesetzt und dann sprunghaft auf 100% angehoben und weitere 6000 Sekunden simuliert. So konnte der Eintritt der Sonne in den Akzeptanzbereich des Mikrolinsensystems realistisch nachgestellt werden.

3.3.3. Simulationsergebnisse

Zuerst wurde der Körper mit einer 100 µm dicken Aluminiumbeschichtung modelliert. Die Simulation wurde mit der Randbedingung konstante Oberflächentemperatur von 50 °C durchgeführt. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium fällt die Temperaturspreizung bei dieser Konfiguration sehr gering aus (Abbildung 6).

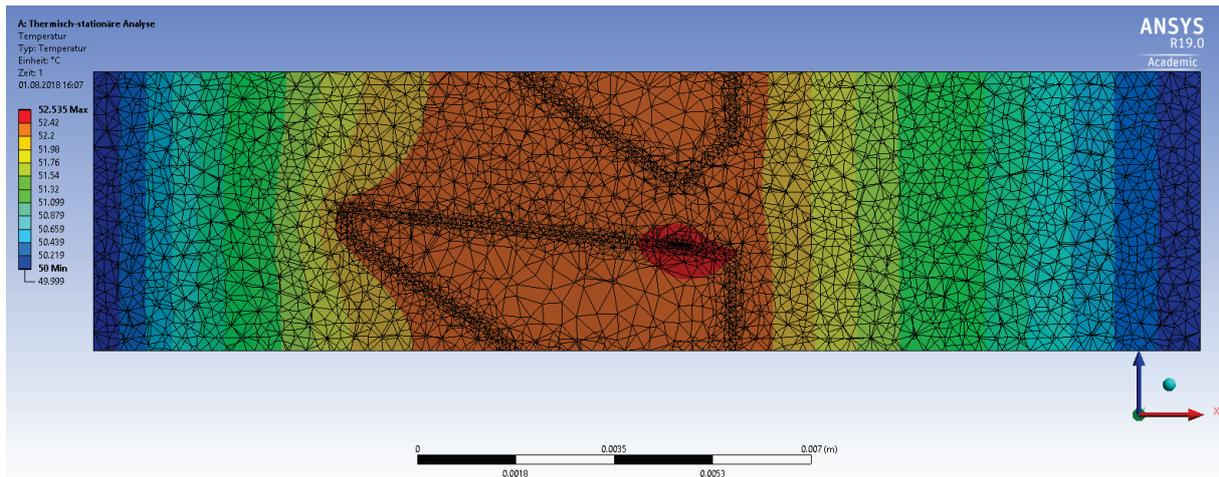


Abbildung 6: Temperaturverteilung für 100 µm Aluminiumbeschichtung und konstante Oberflächentemperatur von 50 °C.

Die Maximaltemperatur liegt lediglich 2,5 K über der Minimaltemperatur.

Die nächste Simulation wurde für denselben Aufbau mit realistischeren Randbedingungen durchgeführt, bei denen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum nachgebildet wurde.

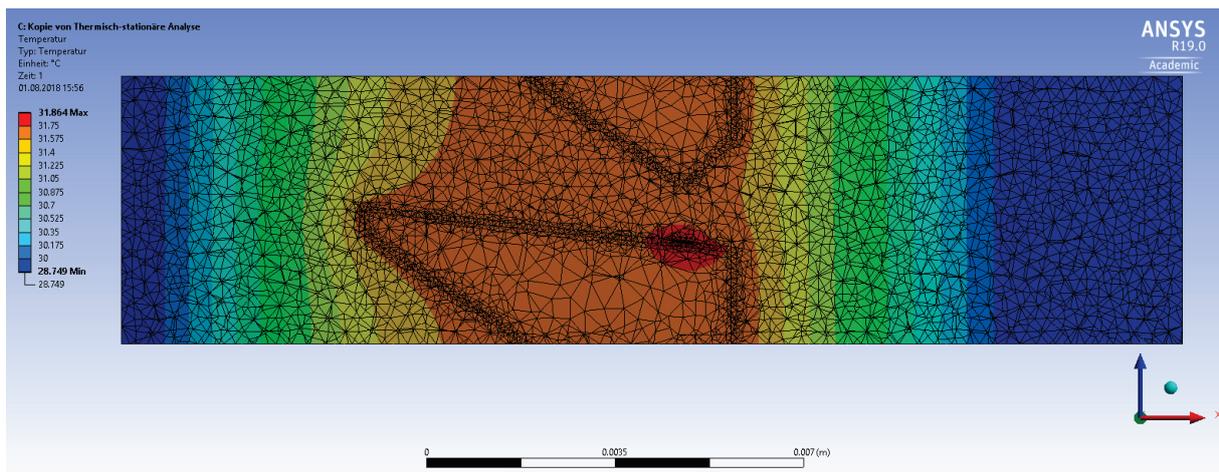


Abbildung 7: Temperaturverteilung für 100 µm Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.

Der Unterschied zwischen minimaler und maximaler Temperatur fällt hierbei mit 3,1 K ähnlich gering aus.

Die nächste Simulation wurde mit denselben Randbedingungen und einer geringeren Aluminiumschichtdicke von 10 µm durchgeführt.

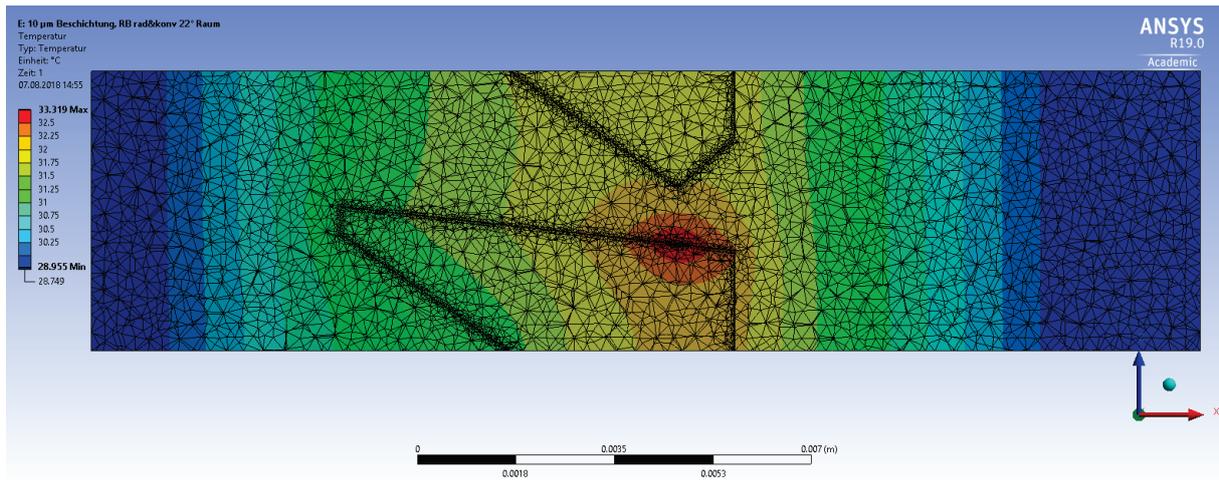


Abbildung 8: Temperaturverteilung für 10 µm Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.

Aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit von Aluminium fällt der Unterschied zwischen minimaler und maximaler Temperatur mir 3,4 K immer noch sehr gering aus.

Als nächstes wurde eine Simulation mit denselben Randbedingungen aber ohne Aluminiumbeschichtung durchgeführt.

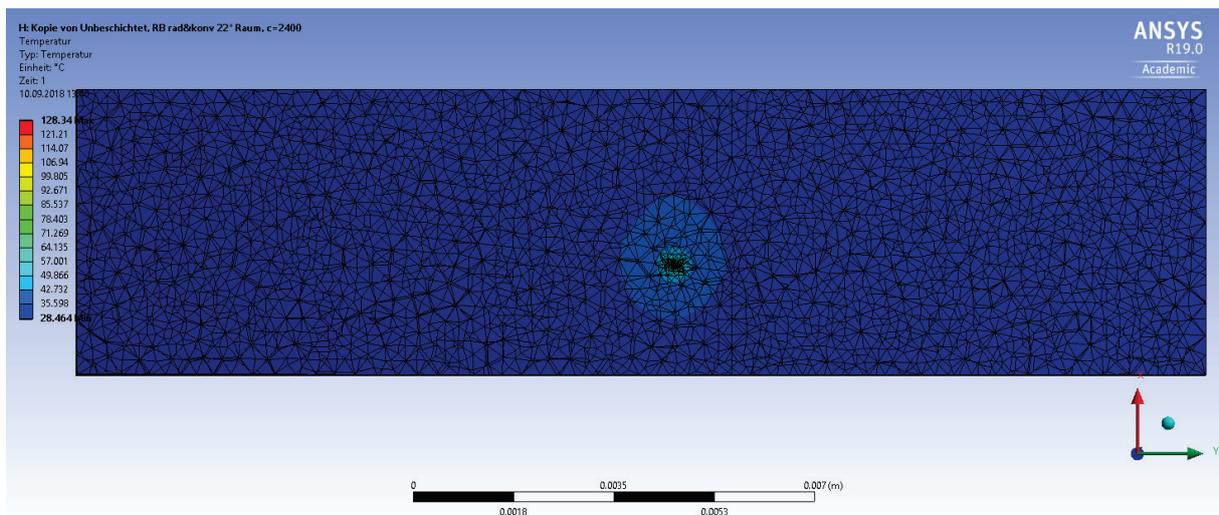


Abbildung 9: Temperaturverteilung für Modell ohne Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.

Hierbei wird der Effekt des Wärmeabtransports über die Aluminiumschicht deutlich. Bei fehlender Beschichtung stellt sich eine Differenz zwischen maximaler und minimaler Temperatur von 100 K ein. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes bleibt die höchste Temperatur in einem räumlich sehr konzentrierten Bereich unmittelbar um den Hotspot

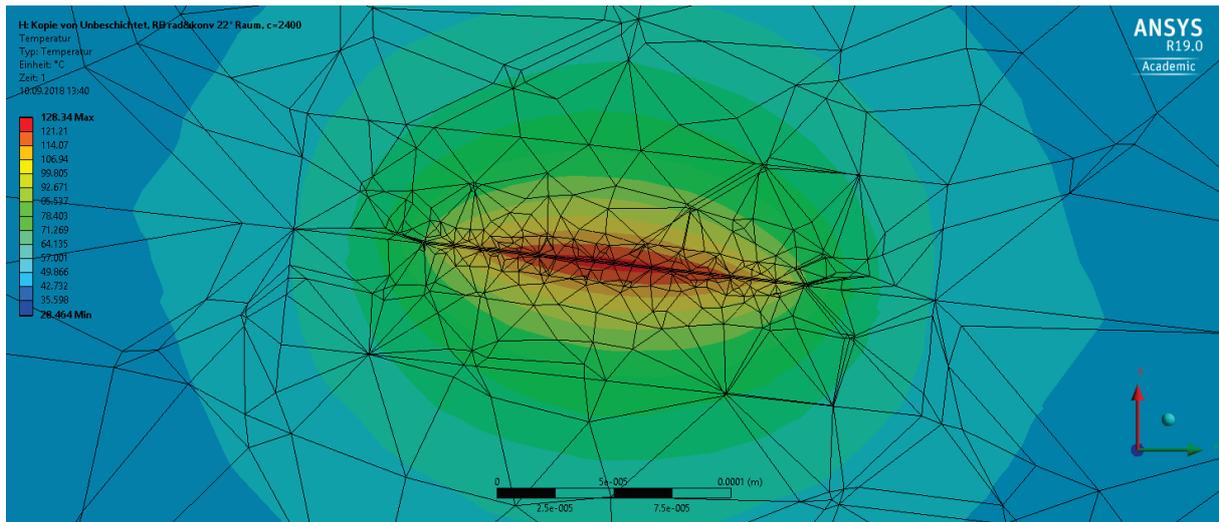


Abbildung 10: Vergrößerung der Temperaturverteilung unmittelbar um den Hotspot.

Da zu befürchten ist, dass die Dicke der Aluminiumschicht deutlich unter $10\ \mu\text{m}$ liegt und die Situation ohne Aluminiumbeschichtung thermisch kritisch wird, wurden Simulationen mit geringeren Schichtdicken durchgeführt. Für diese wurde die Aluminiumschicht nur in einer lokalen Umgebung um den Hotspot modelliert. Sowohl die Dicke als auch die Ausdehnung dieser lokalen Aluminiumbeschichtung wurde dabei variiert. Für einen Radius der beschichteten Umgebung um den Hotspot von $250\ \mu\text{m}$ wurde die Schichtdicke zwischen $0\ \mu\text{m}$ und $1\ \mu\text{m}$ mit drei Zwischenschritten variiert. Für eine Schichtdicke von $0,3\ \mu\text{m}$ wurde der Radius der beschichteten Umgebung von $0\ \mu\text{m}$ bis $500\ \mu\text{m}$ mit zwei Zwischenschritten variiert. Für diese genaue Betrachtung der zu erwartenden Maximaltemperatur wurden auch die Randbedingungen noch einmal realitätsnäher gestaltet. Es wurde die Situation hinter einer Zweischeibenverglasung nachgestellt, wobei eine Transmission von 80% und eine Temperatur der innenliegenden Scheibe von $40\ ^\circ\text{C}$ angenommen wurde. Die Bestrahlungsstärke wurde dem entsprechend mit $640\ \text{W}/\text{m}^2$ angenommen.

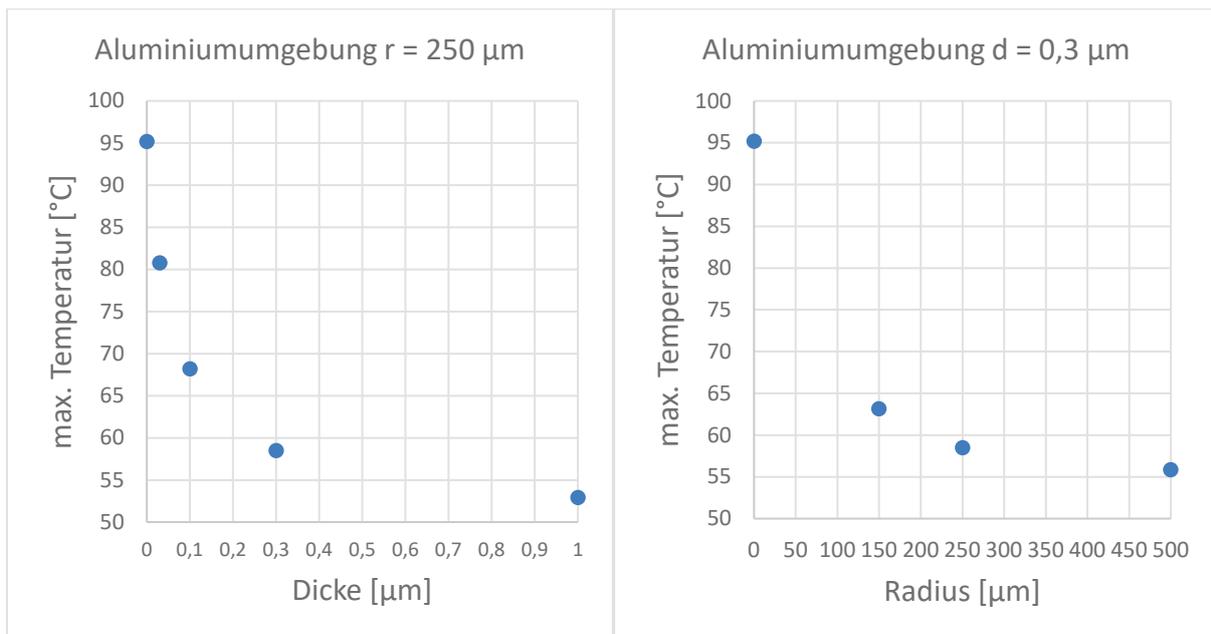


Abbildung 11: Simulationen mit verschiedenen Schichtdicken und Radien der mit Aluminium beschichteten Umgebung. Als Randbedingungen wurde eine Situation hinter einer Zweischeibenverglasung mit einer Oberflächentemperatur von $40\ ^\circ\text{C}$, einer Raum- und Lufttemperatur von $22\ ^\circ\text{C}$ und einer Bestrahlungsstärke von $640\ \text{W}/\text{m}^2$ definiert.

Bereits ab einer Schichtdicke von $0,1\ \mu\text{m}$ bleibt die Maximaltemperatur in einem akzeptablen Bereich. Ab einem Radius der beschichteten Umgebung um den Hotspot von $150\ \mu\text{m}$ kann ausreichend Wärme vom Hotspot abtransportiert werden, dass die Maximaltemperatur wiederum im akzeptablen Bereich bleibt. Bei einer Schichtdicke von $0,3\ \mu\text{m}$ und einem Radius der beschichteten Umgebung von $250\ \mu\text{m}$ ergibt sich eine Differenz zwischen minimaler und maximaler Temperatur von $25,2\ \text{K}$.

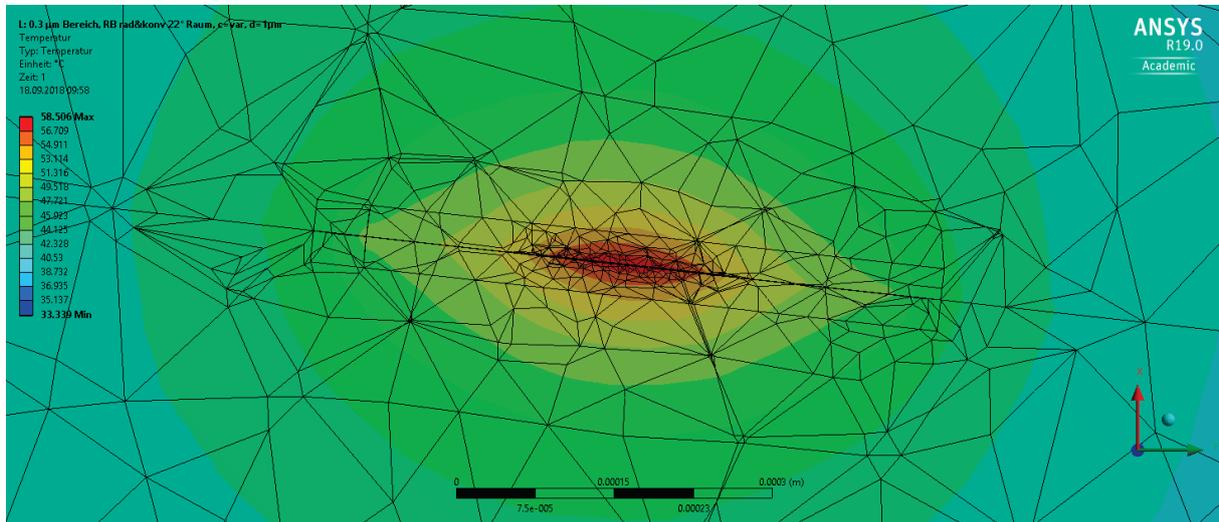


Abbildung 12: Temperaturverteilung bei einer Beschichtungsdicke von $0,3\ \mu\text{m}$ und einem Radius der beschichteten Umgebung um den Hotspot von $250\ \mu\text{m}$. Als Randbedingungen wurde eine Situation hinter einer Zweischeibenverglasung mit einer Oberflächentemperatur von $40\ ^\circ\text{C}$, einer Raum- und Lufttemperatur von $22\ ^\circ\text{C}$ und einer Bestrahlungsstärke von $640\ \text{W}/\text{m}^2$ definiert.

Die Dynamik des Prozesses der Erwärmung im Hotspot wurde simuliert, indem die thermische Leistung des Hotspots zuerst für $4000\ \text{s}$ auf 10% gehalten, und danach schlagartig auf 100% erhöht wurde. Dadurch wird das plötzliche Eintreten der Sonne in den Akzeptanzbereich abgebildet. Die Aluminiumbeschichtung wurde dabei wieder in einer Umgebung mit einem Radius von $250\ \mu\text{m}$ und einer Schichtdicke von $0,3\ \mu\text{m}$ modelliert.

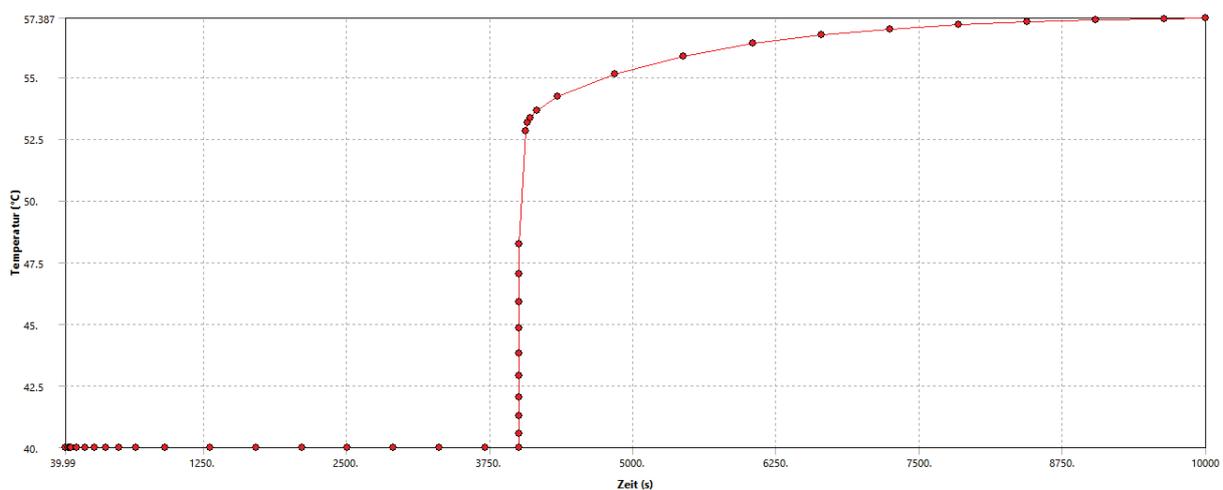


Abbildung 13: Dynamische Simulation: Zum Zeitpunkt $4000\ \text{s}$ wird die thermische Leistung des Hotspots von 10% auf 100% erhöht.

Nach Erhöhung der Leistung ist dabei innerhalb der erste $0,5\ \text{s}$ ein Anstieg der Maximaltemperatur um $8\ \text{K}$ zu beobachten.

3.4. Fassaden-System

Für die Nutzung von diffusem Himmelslicht gibt es bereits eine Vielzahl von Systemen am Markt, mit diesen Systemen ist aber in der Regel keine Tageslichtlenkung in die Raumtiefe möglich. Die gerichtete Sonnenstrahlung bietet grundsätzlich die Möglichkeit, das Licht tief hinein an die Raumdecke zu lenken, weshalb sich die Projektpartner für die Entwicklung eines solchen Systems entschieden. Als wesentliche Eigenschaften wurden dabei der Sichtkontakt nach außen und die Wegfahrbarkeit beurteilt. Bei einer relativ geringen Pakethöhe wäre zwar auch ein starres System ohne Durchsicht akzeptabel, aber nicht optimal.

Für eine uneingeschränkte Einsetzbarkeit auch bei mehrstöckigen Gebäuden wurde einem innenliegenden Produkt der Vorzug gegeben. Alternativ kam der Einbau in ein Verbundfenster in Frage. Für diese Lösungen wurden mehrere Realisierungsmöglichkeiten in Betracht gezogen:

- ein starres, reflektorisches System („Hybridfisch“) im Verbundfenster mit einem Folienrollo oder einem Blendschutzplissee
- ein rollbares, transparentes System („Glasfischrollo“) im Verbundfenster mit einem Folienrollo
- eine innenliegende Glasplattenvertikaljalousie (Glasfisch + Vertikaljalousielamellen)

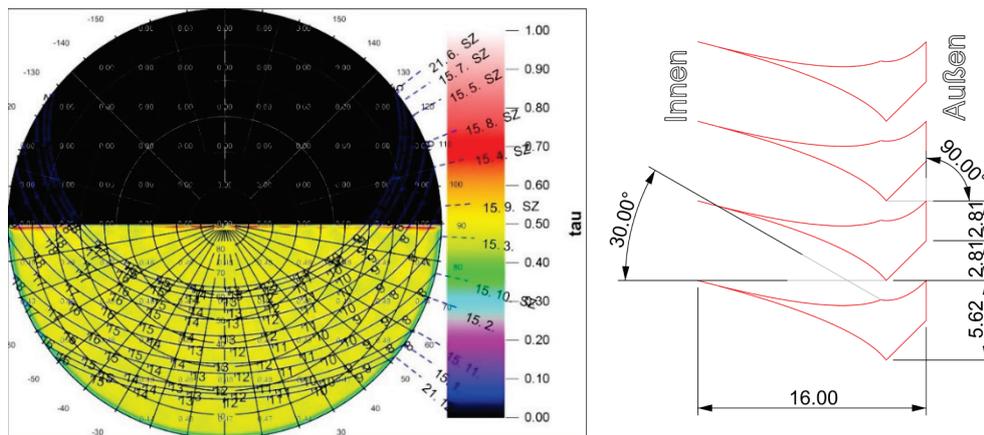


Abbildung 14: Gerichtetes Transmissionsdiagramm: Reflektorischer Hybridfisch (Viertelraum außen, 0° - 30° innen)

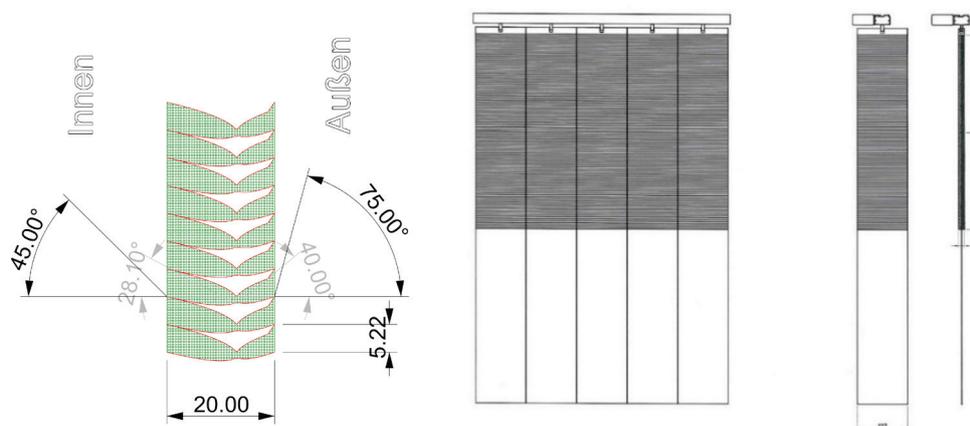


Abbildung 15: Glasfisch (0° - 75° außen, 0° - 45° innen) und Realisierungsvorschlag wegfuhrbare Vertikaljalousie.

Die linearen Fischsysteme wurden im Projekt nach langer Diskussion schließlich verworfen und durch ein herausforderndes Linsensystem ersetzt. Ein Rollladensystem (jalousierbar von der Firma Rolltek) wurde als Träger eines linearen, roll-produzierbaren Systems begutachtet, aufgrund der vorliegenden mechanischen Lösung allerdings verworfen. Das Vertikaljalousiesystem erschien als direkteste Umsetzungsmöglichkeit.

Für den Markterfolg entscheidend ist ein konkurrenzfähiger Preis, da zu hohe Mehrkosten nicht akzeptiert werden, wenn das Produkt in großen Mengen verkaufbar sein soll. Sonst wird es zu einem Nischenprodukt. Deshalb fiel die Entscheidung für eine Vertikaljalousie aus Platten mit Freiformflächen-Optiken. Raumseitig sollte die Sonnenstrahlung nur in einen kleinen Raumwinkel an die Decke in der Raumtiefe ausgestrahlt werden.

Die Umsetzung erfolgte durch Freiformflächen-Linsenplatten. Diese Optik benötigte eine zusätzliche möglichst hochreflektierende Trennplatte oder eine Bedampfung bestimmter Teilflächen. Parallel zur Ausarbeitung dieses Konzepts wurde deshalb weiter nach einfacher zu fertigenden Alternativen gesucht. Ansätze wie der Einsatz von abbildenden Optiken stellten sich als lichttechnisch nicht sinnvoll heraus. Grundsätzlich wurde eine Realisierung benötigt, die sehr nahe an den theoretisch machbaren Grenzen, d.h. an einem „Optimal-System“ war.

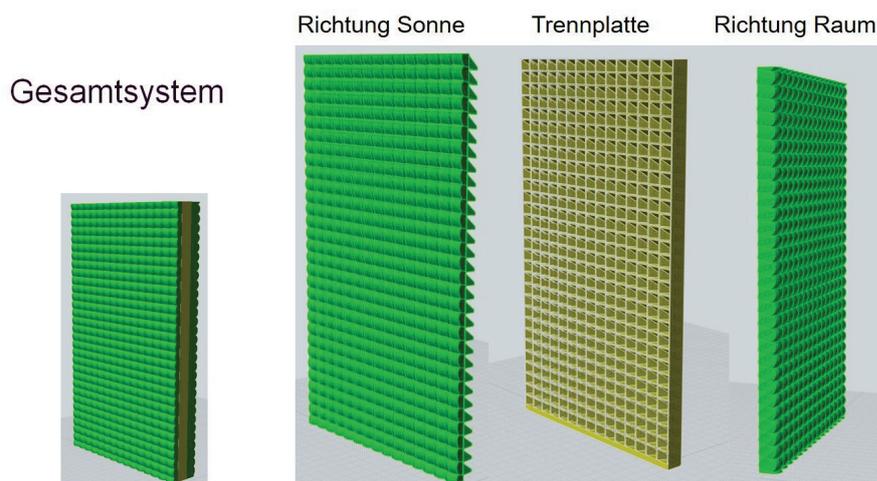


Abbildung 16: Linsenplatte zur Umlenkung direkter Sonnenstrahlung an die Decke in der Raumtiefe.

Vorteile einer innenliegenden Vertikaljalousie mit Linsenplatten:

- keine komplizierte Steuerung / Regelung, d.h. starres System ohne Nachführung (**„Resilienz“**)
- **wegfahrbar**, wenn die Sonne nicht scheint bzw. kein Blendschutz erforderlich ist (Ausblick)
- optimale **Anpassbarkeit** an
 - geographische Lage
 - Fassadenorientierung
 - Anwendungszweck (Büro, Schule, Wohnung, ...)
 - individuelle Benutzerwünsche

- bei später **anderer Nutzung** oder geänderten Wünschen kann die lichttechnische Funktion relativ einfach durch Ersetzen der Vertikaljalousie erfolgen (d.h. **ohne Eingriffe in die Bausubstanz**)

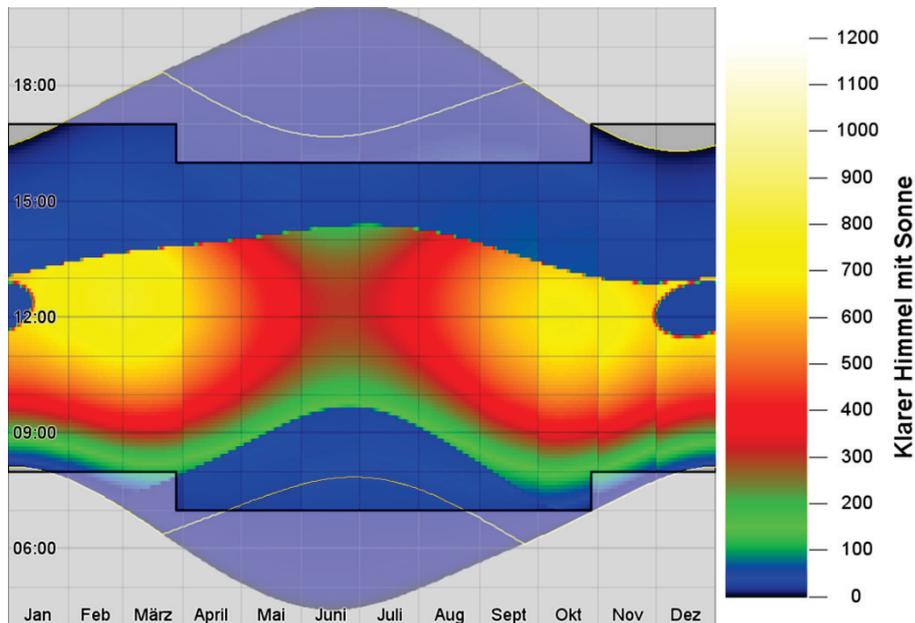


Abbildung 17: Schule, Sonnen-Nutzung primär während Unterrichtszeit (Innsbruck Südfassade, klarer Himmel mit Sonne). Beleuchtungsstärke in Raumtiefe 4m (Referenzpunkt)

3.5. Oberlicht-System

Bestehende Sonnenschutzraster sollen die direkte Sonnenstrahlung zurückreflektieren und gleichzeitig eine möglichst hohe Transmission für die „diffuse“ Himmelsstrahlung erzielen. Im Gegensatz dazu wurde der Sonnennutzraster so ausgelegt, dass die Transmission im Bereich der Sonnenbahnen maximiert wurde.

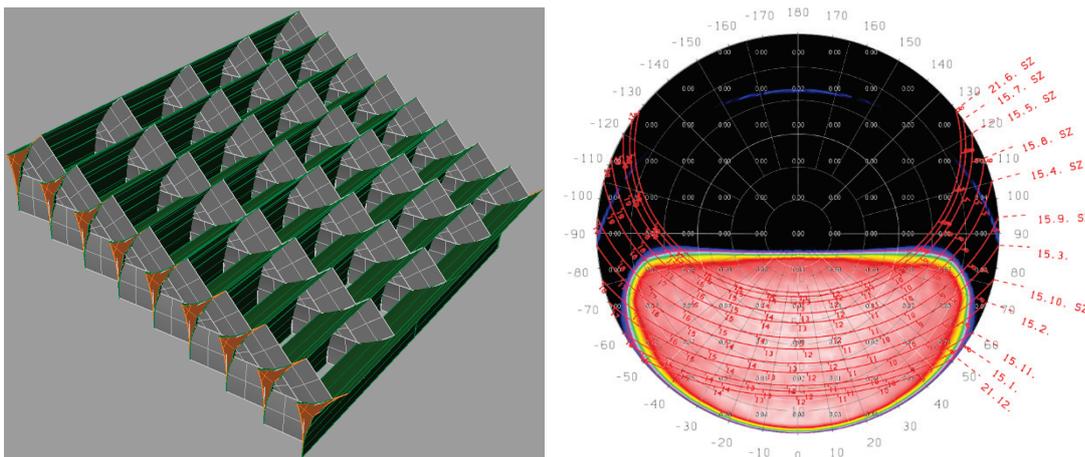


Abbildung 18: Sonnennutzraster, 24,5° verkippt, Transmission ohne Verglasung

In der Praxis besteht bei Oberlichtern primär das Problem der solaren Lasten im Sommer und des fehlenden Außenbezugs bei den meisten Sonnenschutz-Lösungen. Einer Sonnen-Nutzung im Oberlicht wurde deshalb von HELLA keine Priorität eingeräumt. Interessanter wäre ein System, das thermische Einträge im Sommer vermeidet, im Winter jedoch eine gezielte Nutzung der Einträge zur

Reduktion der Heizleistung erlaubt. Dabei sollte vor allem an bewölkten, sonnenlosen Tagen möglichst der Sichtkontakt nach außen gewährleistet werden.

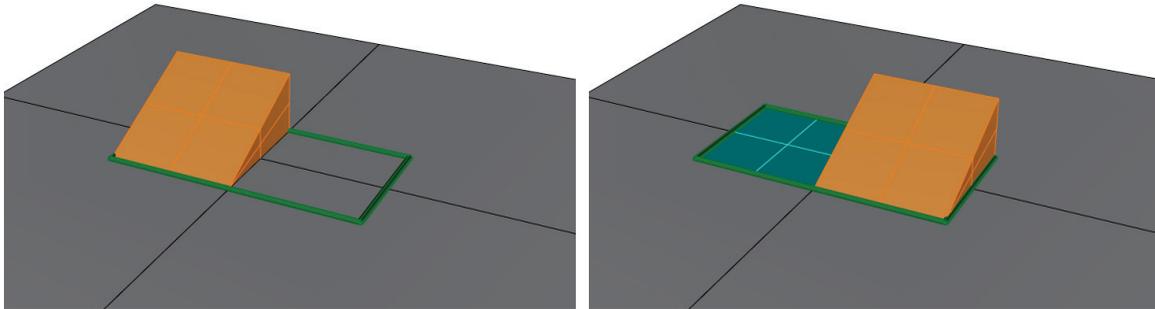


Abbildung 19: Wegfahrbarkeit: „Schienensystem“

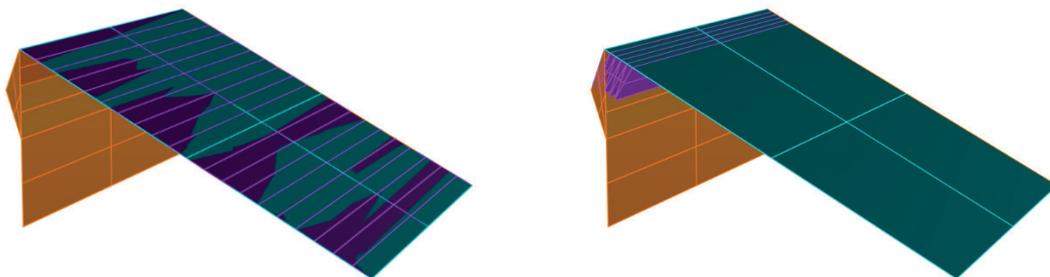


Abbildung 20: Raffbarkeit: „Ziehharmonika“

Genauer untersucht wurden Freiformflächen als Aufsätze für Lichtrohre. Diese Oberlichtsysteme werden von BB sowohl hausintern als auch in Projekten immer wieder eingesetzt.

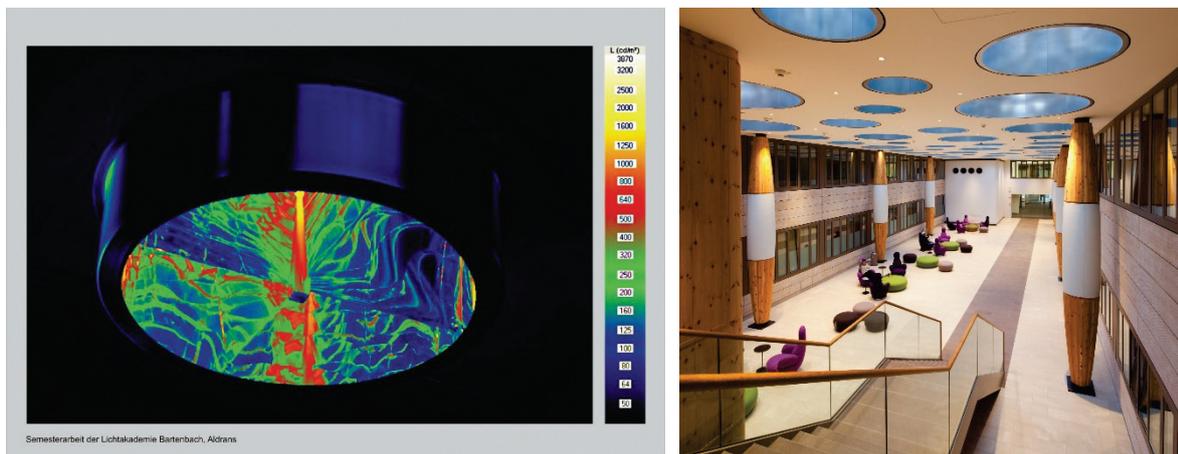


Abbildung 21: Lichtrohr im Gebäude der Lichtakademie Bartenbach in Aldrans (Leuchtdichteverteilung als Falschfarbenbild; Foto: Verena Bartenbach) und Lichtrohre im Klinikum Garmisch-Partenkirchen (Foto: Peter Bartenbach)

Ansatz: Durch speziell optimierte Einkoppelungssysteme soll der Tageslichteintrag in die Lichtrohre besonders bei niedrigen Sonnenständen im Winter deutlich erhöht werden.

Die Neigung der Lichteintrittsfläche hat bereits einen starken Einfluss auf den Lichtstromeintrag durch direkte Sonnenstrahlung:

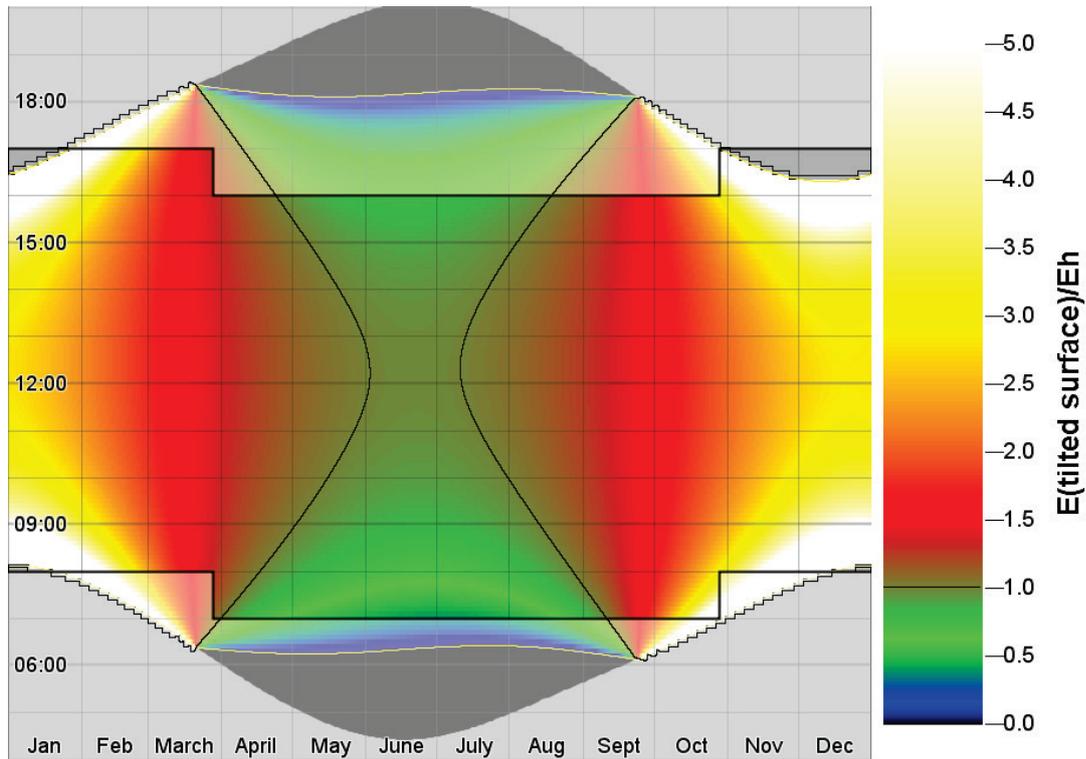


Abbildung 22: Lichtstromgewinn direkte Sonne für 50° geneigte Eintrittsfläche, Standort: Innsbruck

Außerdem kann damit auch der jahreszeitliche Verlauf der eingespeisten Direktstrahlung der Sonne maßgeblich bestimmt werden:

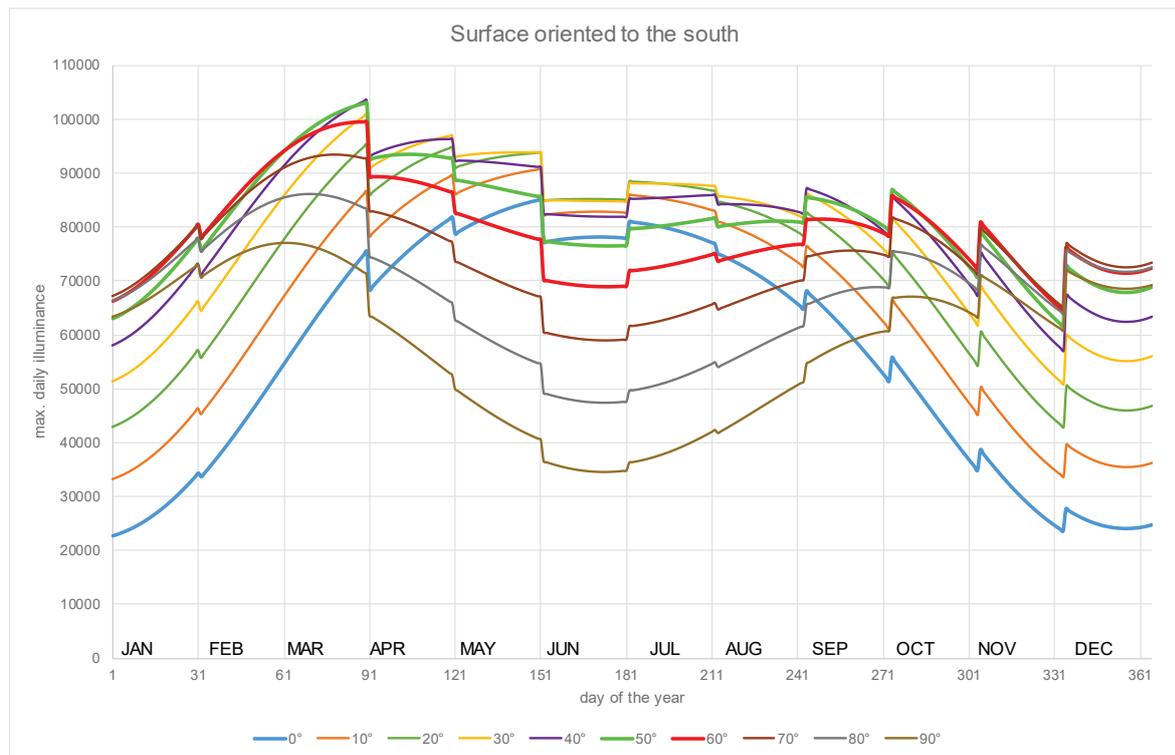


Abbildung 23: Eintrittsfläche SonnenNutzKopf: Max. tägliche Beleuchtungsstärke durch direkte Sonne, Standort Innsbruck

Durch die Wahl einer geeigneten Form der streuenden Lichteintrittsfläche („SonnenSchlumpf“) kann die Sonnen-Nutzung gezielt beeinflusst werden.



Abbildung 24: Aufsatz für Lichtrohr: SonnenNutzKopf mit streuender Freiformfläche („SonnenSchlumpf“)

Entscheidend für die optische und lichttechnische Wirkung sind die Streueigenschaften („BSDF“) des beim „SonnenSchlumpf“ verwendeten Materials. Mit dem Messgerät Mini-Diff von Light Tec wurden die BSDFs vieler in Frage kommender Kunststoffe und Gläser gemessen und in einer Excel-Datenbank erfasst.

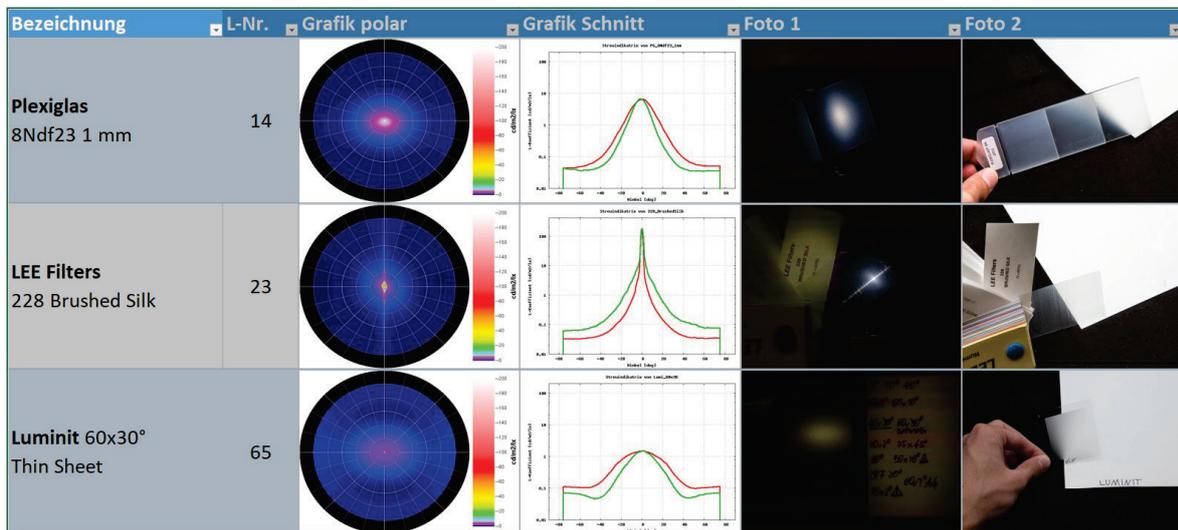


Abbildung 25: Streueigenschaften von Materialien. Beispiele aus Datenbank zu Messungen bei BB.

Der Einsatz eines zusammenfahrbaren Fresnel-Kreuzes zur Ausblendung wurde überlegt, aber letztlich verworfen. Somit weist das Oberlicht-System keine beweglichen Teile auf (Resilienz).

3.6. Funktionsmuster

Die Methoden und Materialien, die bei der Erstellung von Rapid Prototyping-Mustern zum Einsatz kommen, waren für das **Fassadensystem** wenig zielführend. Bei beträchtlichen Kosten wären die Ergebnisse zu weit von einer umsetzbaren Lösung entfernt gewesen. Um konstruktive Ansätze zu testen und eine mögliche Ausführung als Vertikaljalousie zu demonstrieren wurde von HELLA ein entsprechendes Muster gefertigt:



Abbildung 26: Vertikaljalousie (Muster HELLA) und jalousierbarer Rollladen (nicht weiterverfolgt)

Der jalousierbare Rollladen der Firma Rolltek wurde hinsichtlich mechanischer Umsetzung als Testkandidat für das Tragen der Linsenplatten begutachtet. Das Konstrukt wurde verworfen.

Da BB unabhängig vom Projekt FFF-TaliSys inzwischen in 3D-Drucker investiert hatte, konnten Designmuster der Näpfchenlinsenplatten und der zugehörigen Trennplatte erstellt werden:



Abbildung 27: Linsenplatte, Freiformflächen-Näpfchenlinse (3D-Druck, Designmuster ohne lichttechnische Funktion)

Für lichttechnische Funktionsmuster wurde bei der Firma Beneder eine Versuchsform beauftragt:

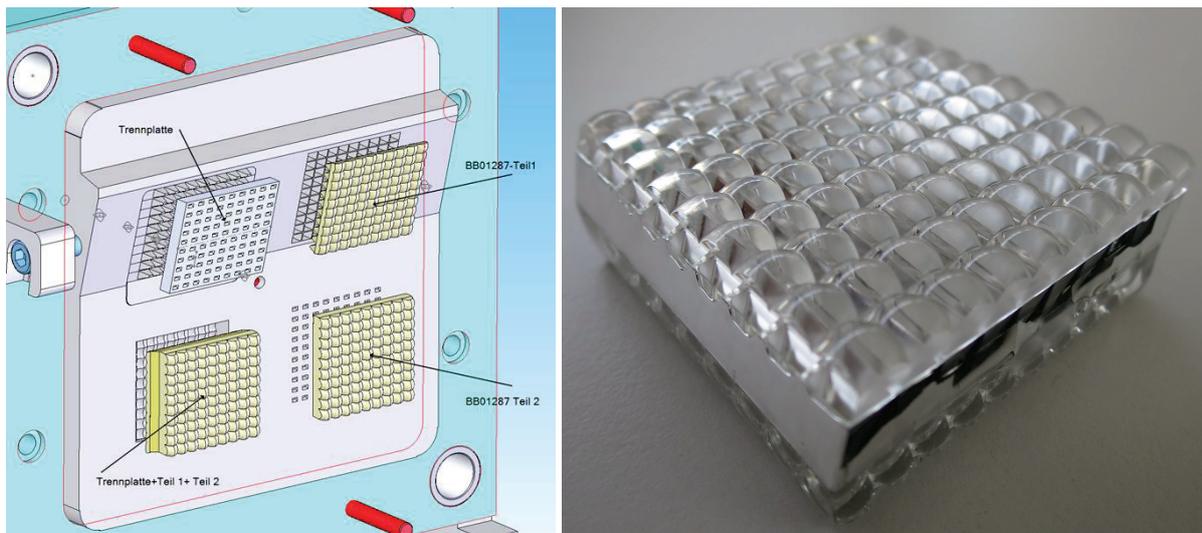


Abbildung 28: Linsenplatte (Näpfchenlinsen), 4 x 1-fach Spritzgussform (Konstruktion Beneder), 2K-Funktionsmuster

Diese 4 x 1-fach Spritzgussform erlaubt den Vergleich zwischen zwei Herstellungsverfahren, die auch in einer Serienfertigung zum Einsatz kommen können: Einerseits können damit die Einzelteile getrennt gespritzt werden: Das Ergebnis sind zwei Linsenplatten aus Näpfchenlinsen und eine Trennplatte, die bedampft werden muss. Diese drei Teile müssen dann in einem Montagevorgang zusammengefügt werden.

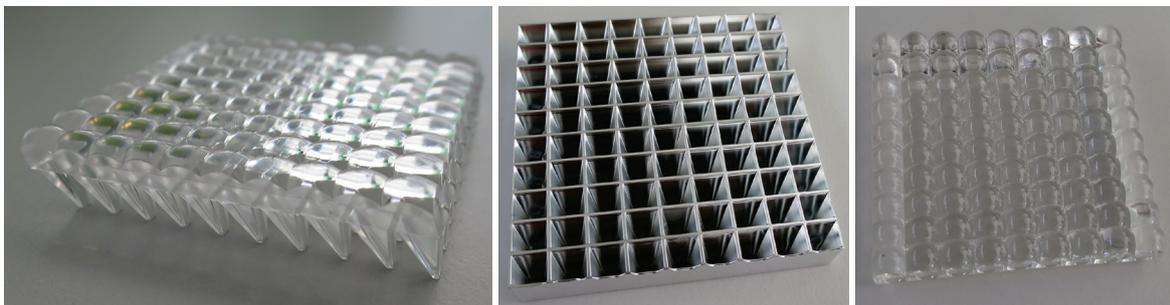


Abbildung 29: Funktionsmuster Linsenplatte aus drei Einzelkomponenten (Richtung Sonne, Trennplatte, Richtung Raum)

Alternativ kann die Trennplatte in der 4. Spritzform zuerst bedampft und dann in einem 2K-Spritzguss (2-Komponenten-Spritzguss, siehe Abbildung 28) umspritzt werden. Dabei ist das Ergebnis eine dichte Linsenplatte mit den unterschiedlichen Näpfchenlinsen an der Außen- und Innenseite. Von dieser Linsenplatte wird die Trennplatte umschlossen und die Montage entfällt somit. Außerdem bildet dieses Funktionsmuster eine dichte Einheit.

Diese Versuchsform verursachte Kosten in der gleichen Größenordnung wie einzeln gefräste Funktionsmuster (Rapid Prototyping), erlaubte aber eine bessere Beurteilung des in einer Serienfertigung tatsächlich erzielbaren Ergebnisses.

Prüfungen und Messungen zur Beurteilung dieses Funktionsmusters:

- Visuelle Prüfung: Oberflächenfehler (Strukturen und Einschlüsse bzw. Lunker) sind vorhanden. Diese können aber typischerweise durch Anpassungen im Spritzguss oder Modifikationen am Werkzeug reduziert werden.

- Thermische Prüfung: Hochbelastungsmessungen im g-Wert Messraum bei BB. Beaufschlagung mit Werfer (Weule Glas-Parabel + OSRAM HMI 2500 W/GS) mit einer Beleuchtungsstärke am Funktionsmuster von 135 klx, d.h. mehr als bei direkter Sonnenbestrahlung. Dabei zeigte sich ein stabiles Verhalten, wie es nach den Simulationen bezüglich des thermischen Designs zu erwarten war.
- Messungen im künstlichen Himmel (BB): Die gerichtete Transmission und die auftretenden Leuchtdichten (BTDF) wurde für verschiedene Einstrahlrichtungen mit der künstlichen Sonne bestimmt.
- Die gerichtete Transmission wurde darüber hinaus in der Kunstlichtmessanlage bei BB gemessen.

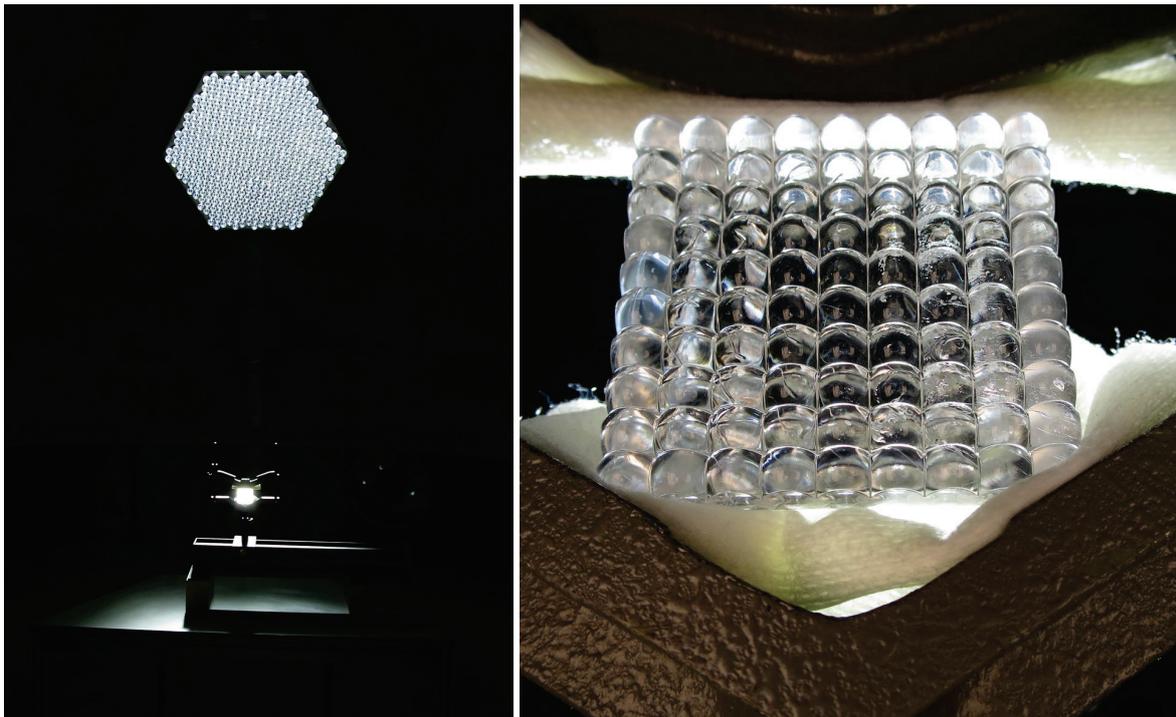


Abbildung 30: Prüfung des Funktionsmusters (Linsenplatte) im künstlichen Himmel bei BB auf einer optischen Bank.

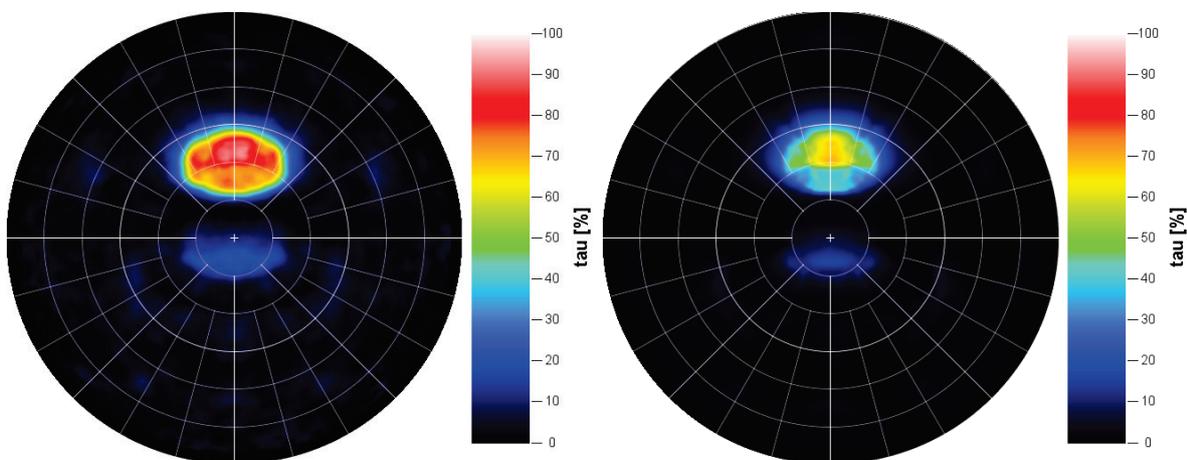


Abbildung 31: Simulation gerichtete Transmission der Linsenplatte, Vergleich Silikon + Miro-Silver (theoretisches Konzept) mit PMMA + Aluminium-Bedampfung (Konstruktion Spritzgusswerkzeug mit Verrundungen)

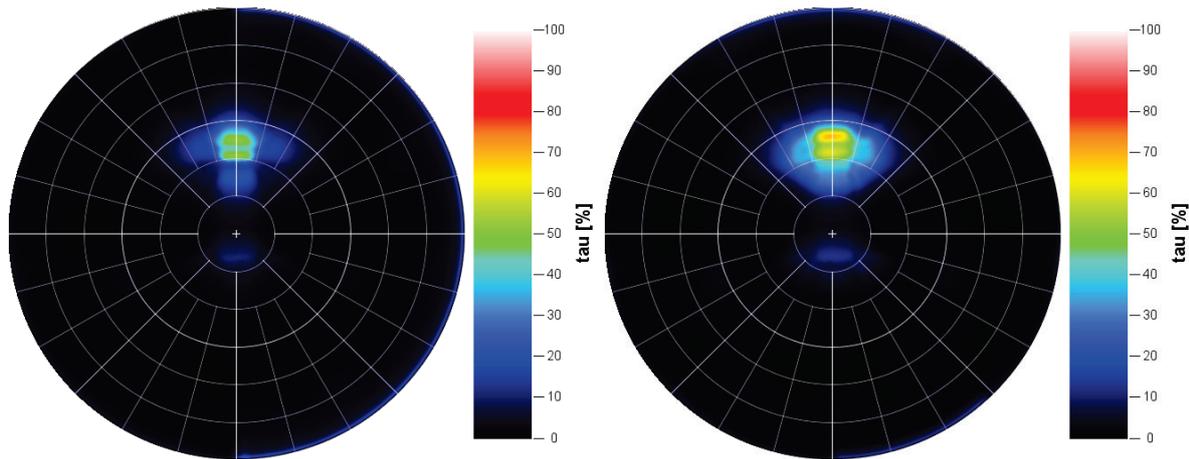


Abbildung 32: Messung gerichtete Transmission der Funktionsmuster zur Linseplatte (3 Komponenten und 2K-Spritzguss)

Die Übereinstimmung zwischen der theoretisch für das Spritzgusswerkzeug und den real verwendeten Materialien simulierten Transmission und der für das Funktionsmuster im 2K-Spritzguss gemessenen Transmission ist gut. Dabei muss beachtet werden, dass dieses Funktionsmuster das Ergebnis erster Spritzversuche mit einer Versuchsform ist.

Das Funktionsmuster zum **Oberlichtsystem** (Aufsatz für Lichtrohr) konnte bei BB im Haus als 3D-Druck gefertigt werden:

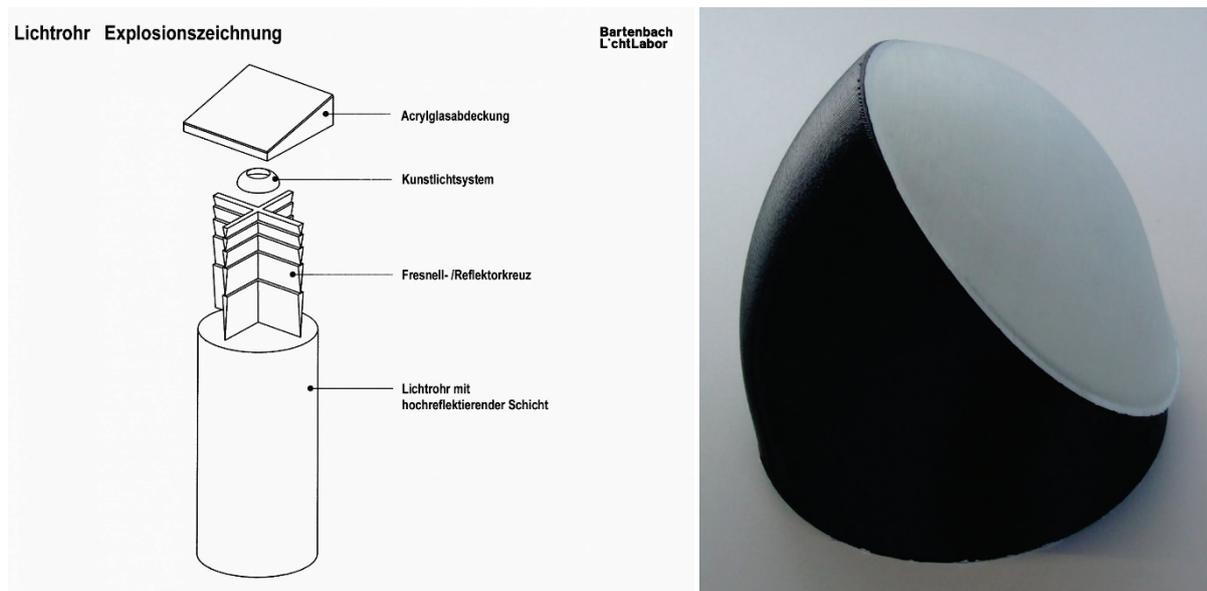


Abbildung 33: SonnenNutzKopf mit SonnenSchlumpf als Aufsatz für ein Lichtrohr (Darstellung BB)

Statt einer Acrylglasabdeckung wird hier als Aufsatz für ein Lichtrohr ein spezieller Kopf verwendet, der auf Sonnen-Nutzung optimiert ist. Dabei ist die streuende Abdeckung („SonnenSchlumpf“) eine Freiformfläche, die einerseits das Auftreten von störenden Sonnenflecken im Gebäudeinneren vermeidet und andererseits die Lichtstromeinträge der direkten Sonnenstrahlung im Jahres- und Tagesverlauf gezielt beeinflusst.

Die Messungen für dieses Funktionsmuster erfolgten bei BB im künstlichen Himmel mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel und des Laborluxmeters.



Abbildung 34: Messung des SonnenNutzKopfs mit SonnenSchlumpf im künstlichen Himmel

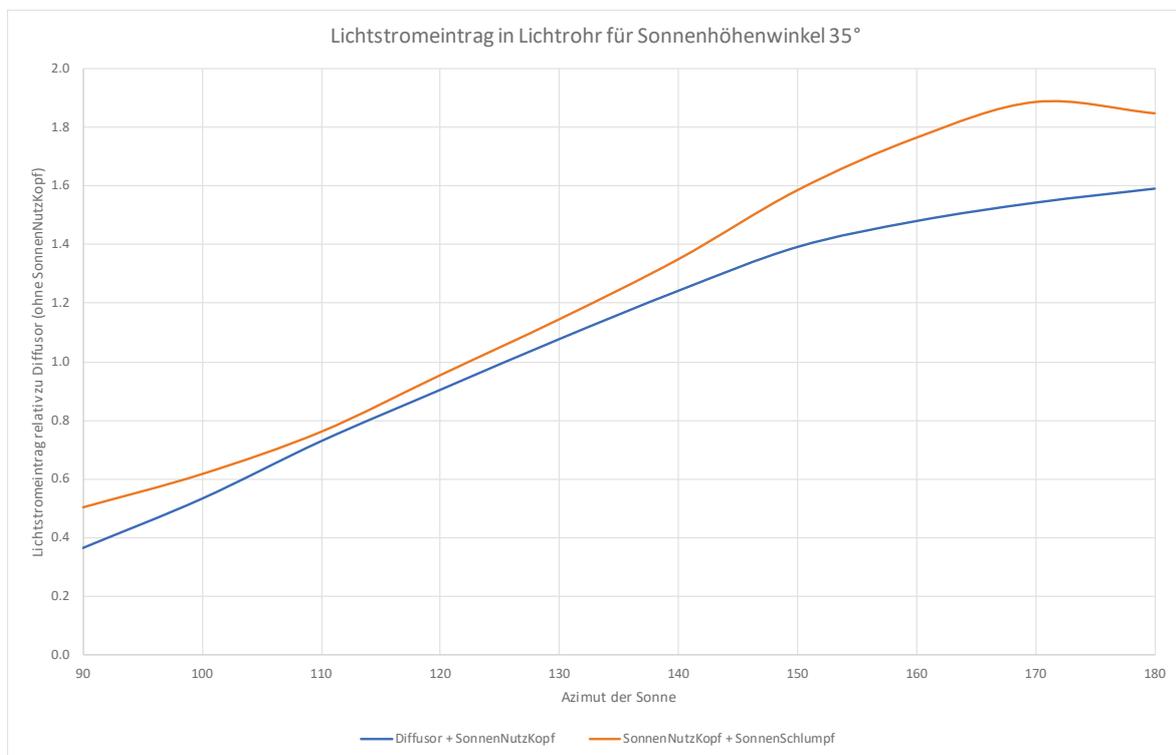


Abbildung 35: Lichtstromeinträge des Aufsatzes für ein Lichtrohr (SonnenNutzKopf mit SonnenSchlumpf)

In das Gesamtsystem bestehend aus dem Lichtrohr, dem SonnenNutzKopf mit dem SonnenSchlumpf als Aufsatz und einer optionalen Ausblendeinheit (etwa einem Fresnelkreuz) kann ein Kunstlichtsystem integriert werden. Die einzelnen Komponenten können an projektspezifische Gegebenheiten angepasst werden. Besonders die als Freiformfläche ausgeformten streuende Lichteintrittsfläche (SonnenSchlumpf) bietet dabei vielfältige Möglichkeiten, den jahres- und tageszeitlichen Lichtstromeintrag gezielt zu beeinflussen. Neben der Form selbst ist dabei auch das gewählte Material und seine Streueigenschaften (BSDF) entscheidend.

4. Schlussfolgerungen

Zwei der im Projekt erarbeiteten Systemkonzepte wurden als Funktionsmuster umgesetzt. Damit konnte die prinzipielle Machbarkeit praktisch gezeigt werden. Eine industrielle Umsetzung dieser Tageslichtsysteme erfordert weitere Anstrengungen, deren Finanzierung in den nächsten Monaten geklärt wird. Denkbar sind Detailentwicklungen durch Bartenbach nach Beauftragung durch einen Hersteller. Im Kunstlichtbereich sind von Bartenbach fertig entwickelte Komponenten verfügbar, die von verschiedenen Herstellern genutzt werden können. Obwohl das Risiko und die Kosten bei Tageslichtsystemen erheblich größer sind, wäre ein ähnliches Vorgehen auch in diesem Bereich denkbar.

Erster Ansprechpartner für weitere Aktivitäten ist der Projektpartner HELLA, der durch den in diesem Projekt begonnenen Einstieg in lichtlenkende Freiformflächen-Technologien neue Geschäftsfelder erschließen würde. Das Vertriebsnetz von HELLA besteht in Österreich aus einem Direktvertrieb, der in der HELLA internen Schulungsabteilung auf neue Technologien und Kennwerte geschult wird.

Der Einsatz solcher Systeme in größerem Maßstab erweitert die Möglichkeiten in der Planung mit Tageslicht, wobei dabei auch die Auswirkungen auf die Gebäudephysik in einer integrativen Betrachtungsweise berücksichtigt werden müssen. Die Universität Innsbruck als beteiligte Forschungseinrichtung (Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen) hat sich im Rahmen dieses Projekts intensiv mit thermischen Berechnungen beschäftigt und aufwändige FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) mit ANSYS durchgeführt. Das dabei erarbeitete Wissen kann künftig sowohl in der Forschung und Lehre, als auch bei konkreten Projekten angewendet werden.

Der Preis für ein Sonnenschutz- bzw. Tageslichtsystem beträgt derzeit ca. € 100 bis € 500 pro m² (zusätzlich zur fertigen Glasfassade), bzw. € 500 bis € 1.000 pro m² für die gesamte Fassade. Die geplanten Tageslichtsysteme mit Freiformflächentechnik bewegen sich im gleichen Preisrahmen, soweit sie überhaupt mit bestehenden Techniken vergleichbar sind. Geht man von einem Preis von € 500 pro m² aus, und werden von einem System jährlich 15.000m² verkauft (was etwa drei großen Gebäuden entspricht), so ergibt sich für HELLA ein Umsatz von € 7.500.000. Geht man von einer Lizenzgebühr von 2% für Bartenbach aus, ergibt sich ein Lizenzerslös von € 150.000 pro Jahr allein für dieses System.

Über eine Patentierung im Rahmen der Regeln, die im Konsortialvertrag festgelegt worden sind, wurde bereits intensiv diskutiert. Im Rahmen der Klärung des Vorgehens wird auch dieses Thema demnächst entschieden.

Statement von HELLA:

Die Sonnenschutzindustrie ist bekanntlich eine Industrie, die auf Technologie-Trends langsam anspringt. Dies hat sowohl herstellereitige als auch anwenderorientierte Ursachen. Selbst die Namensgebung der Branche verändert sich nur langsam vom „Schützen vor Sonne“ auf „Nutzen der Sonne“. In diesem Projekt wurde eine Technologie, die in der gesamten Kunstlichtbranche nun zum State-of-Art wird, auf die Tageslichttechnik angewandt. Bei HELLA haben die Mikrostrukturen der Optik die intensive Beschäftigung mit bis dato für HELLA unbekanntem Polymerverarbeitungs-, Herstellungs- und Beschichtungstechnologien bzw. deren Grenzen ausgelöst. Diese Erkenntnisse werden im Forschungs- und Entwicklungsteam weitergetragen und sukzessive angewandt.

Parallel zur Projektbearbeitung fanden laufend Maßnahmen zur Verbreitung von Projekthinhalten statt. Dies hat bereits 2015 mit der Teilnahme am Vernetzungsworkshop für Projekte der 2. Ausschreibung „Stadt der Zukunft“ begonnen und wurde mit Vorträgen bei der „Applied Industrial Optics“ (Heidelberg, 25.-28.07.2016) und der LICHT 2016 (Karlsruhe, 26. – 28.09.2016) fortgesetzt. Im weiteren Verlauf erfolgten Beiträge bei verschiedenen Tagungen:

- „Advanced Building Skins“ (Bern, 2016 + 2018)
- „Building Simulation 2017“ (San Francisco, 2017)
- „LuxEuropa 2017“ (Ljubljana, 2017)
- „BASF Architects Day“ (Köln, 08.03.2018)
- „SESWA 2018“ (Wien, 2018)
- „LICHT 2018“ (Davos, 2018)

Siehe dazu auch die Zitate unten („wissenschaftliche Verwertung“).

Das Projekt FFF-TaliSys wurde beim Vernetzungsworkshop für Projekte der 2. Ausschreibung „Stadt der Zukunft“ am 19.11.2015 in Wien vorgestellt (Teilnehmer: David Geisler-Moroder).

- Pohl W.: FFF-TaliSys – Freiformflächen-Tageslichtsysteme für Fassaden und Oberlichter. Tagungsband „Stadt der Zukunft“ Intelligente Energielösungen für Gebäude und Städte, Vernetzungsworkshop für Projekte der 2. Ausschreibung. Wien, 2015. [POH 2015]

Vorträge zum Thema Freiformflächen wurden bei der „Applied Industrial Optics“ (Heidelberg, 25.-28.07.2016) und der LICHT 2016 (Karlsruhe, 26. – 28.09.2016) gehalten.

- Föger D., Knoflach C., Spielberger G.: Complex Surface Optics applied in modern Illumination Concepts. Applied Industrial Optics, OSA. Heidelberg, 2016. [FÖG 2016]
- Spielberger G., Knoflach C., Reisecker C.: Freiformflächenoptiken für die Umsetzung von Dynamic-White Beleuchtungskonzepten. LICHT 2016. Karlsruhe, 2016. [SPIE 2016]

Die Schwerpunkte vieler Vorträge und Veröffentlichungen, an denen die Projektpartner beteiligt sind, umfassen Themen wie Tageslicht und Fassaden, wobei auch die Auswirkungen auf den Energiehaushalt von Gebäuden und auf die Gesundheit des Menschen betrachtet werden:

- Pohl W., Geisler-Moroder D.: Daylight driven and user centered lighting and energy management. Advanced Building Skins. Bern, 2016. [POH 2016]
- Weitlaner R., Geisler-Moroder D., Pfluger R.: Advanced Insolation Detection Module. Building Simulation 2017. San Francisco, 2017. [WEI 2017]
- Werner M., Pfluger R., Geisler-Moroder D., Feist W.: Analysis of Worldwide Performance of Façade Systems. Building Simulation 2017. San Francisco, 2017. [WER 2017]
- Geisler-Moroder D., Pohl W.: Advances in daylight simulation – validation and applications. LuxEuropa 2017. Ljubljana, 2017. [GEI 2017]

- Pohl W., Geisler-Moroder D., Knoflach C.: New daylight solutions for energy and health. LuxEuropa 2017. Ljubljana, 2017. [POH 2017]
- Pohl W.: Tageslicht und Lebensqualität. BASF Architects Day. Köln, 2018. [POH 2018]
- Geisler-Moroder D.: Innovative Lösungen für Tages- und Kunstlicht. SESWA 2018. Wien, 2018. [GEI 2018]
- Geisler-Moroder D., Christian Knoflach C., Öttl S., Pohl W.: Characterization of advanced daylighting systems and combined lighting and thermal simulation. Advanced Building Skins 2018. Bern, 2018. [GEI 2018,2]
- Pohl W., Geisler-Moroder D., Knoflach C.: Trends im Tageslicht. LICHT 2018. Davos, 2018. [POH 2018,2]

Darüber hinaus hat Wilfried Pohl an zwei Messen teilgenommen (San Francisco 14. – 19.02.2016 und Light + Building, Frankfurt 12. – 15.03.2016).

Da über eine Patentierung erst nach Projektabschluss entschieden wird, konnte in Vorträgen und Publikationen nicht konkret auf die Ideen und Ansätze aus diesem Forschungsprojekt eingegangen werden. Generell bewirbt BB neue Produkte nicht nur in Veröffentlichungen, sondern auch in Showrooms im Rahmen von Messen wie „Light + Building“ oder Symposien wie der LpS. In Zusammenarbeit mit Partnern wird dieses Product Placement auch außerhalb von Europa durchgeführt.

5. Ausblick und Empfehlungen

Besonders bezüglich des Fassaden-Systems, der Freiformflächen-Linsenplatte, haben die im Rahmen dieses Projekts gefertigten Funktionsmuster die Einschränkungen bestehender Herstellungsverfahren aufgezeigt. Probleme bei der Umsetzung in großem Maßstab bereiten etwa die Dicke dieser Platten, aber auch die für großflächigen Einsatz problematische Größe. So müssten für einen Quadratmeter Linsenplatten über 300 Einzelplatten möglichst spaltfrei montiert werden. Neben den dabei entstehenden Kosten ist auch das Gesamtgewicht dieser Anordnung kritisch. Dazu kommen technische Nachteile wie etwa der relativ niedrige Reflexionsgrad der Aluminium-Bedampfung. Während dieser im praktischen Einsatz bei etwa 83% liegt, haben moderne hochreflektierende Materialien Reflexionsgrade von teilweise über 99%. Solche hochwertigen Oberflächen können derzeit im Spritzguss nicht eingesetzt werden.

Die Herausforderung besteht darin, die lichtlenkenden Strukturen möglichst zu verkleinern. Der Idealfall wären Mikrostrukturen, die als leichte Folien ausgeführt werden können. Die hinter den Linsenplatten stehenden optischen Konzepte eignen sich allerdings nicht gut für eine solche Miniaturisierung.

Die nächsten Schritte sind einerseits die Klärung der Anmeldung von Schutzrechten und andererseits des Vorgehens zur Umsetzung in industriellem Maßstab. Möglicherweise müssen die Grundkonzepte für eine effiziente Serienfertigung überarbeitet werden. Auch im Rahmen des bestehenden Konzepts sind weitere zeit- und kostenintensive Schritte für eine Realisierung als marktfähiges Produkt erforderlich.

Denkbar ist als erster Schritt der Aufbau einer größeren Fläche aus den kleinen Linsenplatten, um den visuellen Eindruck und die lichttechnische Funktion erlebbar zu machen. Dafür notwendige Anpassungen des Versuchswerkzeugs und eine Optimierung der Spritzgussparameter verursachen dabei ebenso erhebliche Kosten wie die Konstruktion und Umsetzung der Anordnung und die anschließende Evaluierung der Wirkung.

Alternativ bietet eine vorherige Überarbeitung des Konzepts in Richtung einfacher, großflächiger Umsetzbarkeit viele Vorteile.

Für die Finanzierung dieser Aufwände gibt es mehrere Möglichkeiten.

- **Beauftragung durch den künftigen Hersteller des Systems:**
Dazu muss eine Firma gefunden werden, die bereit ist, die Kosten für eine weitere Bearbeitung zu übernehmen. Das entstehende Produkt hätte gegenüber den derzeit verfügbaren Tageslichtsystemen viele Alleinstellungsmerkmale.
- **Vorleistung durch Bartenbach und/oder HELLA zur Umsetzung im Markt:**
Die Kosten bis zur Umsetzung als Serienprodukt sind derart hoch, dass die dafür notwendigen Investitionen aus derzeitiger Sicht nicht komplett von diesen Unternehmen getragen werden können.
- **Einreichung eines Förderprojekts:**
Der Eigenanteil der Kosten kann auf mehrere Projektpartner aufgeteilt werden und das Risiko wird durch die Förderung abgedeckt.

In den kommenden Monaten müssen die Projektpartner entscheiden, welches Vorgehen für eine weitere Umsetzung gewählt wird. Die Entscheidung wird entsprechend den finanziellen Rahmenbedingungen und der Einschätzung des wirtschaftlichen Potenzials dieses innovativen Tageslichtprodukts getroffen.

6. Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Innovatives „konventionelles“ Umlenksystem im Projekt „Kreditanstalt für Wiederaufbau, Neubau“ (Berlin).....	9
Abbildung 2: Umlenklamelle und Sonnenschutzprisma (BB-Systeme, lineare Symmetrie).....	10
Abbildung 3: Flussdiagramm zu den Arbeitspaketen.	14
Abbildung 4: Einsparpotential beim Einsatz von Tageslichtlenksystemen. [HAU 2011]	16
Abbildung 5: Mikrolinsensystem als für die thermische Simulation modellierter Volumenkörper.	19
Abbildung 6: Temperaturverteilung für 100 µm Aluminiumbeschichtung und konstante Oberflächentemperatur von 50 °C.	21
Abbildung 7: Temperaturverteilung für 100 µm Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.	21
Abbildung 8: Temperaturverteilung für 10 µm Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.	22
Abbildung 9: Temperaturverteilung für Modell ohne Aluminiumbeschichtung und Randbedingungen, bei welchen der Energieaustausch über Strahlung und Konvektion mit dem auf 22 °C temperierten Raum realistisch nachgebildet wurde.	22
Abbildung 10: Vergrößerung der Temperaturverteilung unmittelbar um den Hotspot.	23
Abbildung 11: Simulationen mit verschiedenen Schichtdicken und Radien der mit Aluminium beschichteten Umgebung. Als Randbedingungen wurde eine Situation hinter einer Zweischeibenverglasung mit einer Oberflächentemperatur von 40 °C, einer Raum- und Lufttemperatur von 22 °C und einer Bestrahlungsstärke von 640 °W/m ² definiert.	23
Abbildung 12: Temperaturverteilung bei einer Beschichtungsdicke von 0,3 µm und einem Radius der beschichteten Umgebung um den Hotspot von 250 µm Als Randbedingungen wurde eine Situation hinter einer Zweischeibenverglasung mit einer Oberflächentemperatur von 40 °C, einer Raum- und Lufttemperatur von 22 °C und einer Bestrahlungsstärke von 640 °W/m ² definiert.	24
Abbildung 13: Dynamische Simulation: Zum Zeitpunkt 4000 s wird die thermische Leistung des Hotspots von 10% auf 100% erhöht.	24
Abbildung 14: <i>Gerichtete Transmission: Reflektorischer Hybridfisch (Viertelraum außen, 0° - 30° innen)</i>	25
Abbildung 15: Glasfisch (0° - 75° außen, 0° - 45° innen) und Realisierungsvorschlag wegführbare Vertikaljalousie.....	25
Abbildung 16: Linsenplatte zur Umlenkung direkter Sonnenstrahlung an die Decke in der Raumtiefe.	26
Abbildung 17: Schule, Sonnen-Nutzung primär während Unterrichtszeit (Innsbruck Südfassade, klarer Himmel mit Sonne). Beleuchtungsstärke in Raumtiefe 4m (Referenzpunkt).....	27
Abbildung 18: Sonnennutzraster, 24,5° verkippt, Transmission ohne Verglasung.....	27

Abbildung 19: Wegfahrbarkeit: „Schienensystem“	28
Abbildung 20: Raffbarkeit: „Ziehharmonika“	28
Abbildung 21: Lichtrohr im Gebäude der Lichtakademie Bartenbach in Aldrans (Leuchtdichteverteilung als Falschfarbenbild; Foto: Verena Bartenbach) und Lichtrohre im Klinikum Garmisch-Partenkirchen (Foto: Peter Bartenbach)	28
Abbildung 22: Lichtstromgewinn direkte Sonne für 50° geneigte Eintrittsfläche, Standort: Innsbruck	29
Abbildung 23: Eintrittsfläche SonnenNutzkopf: Max. tägliche Beleuchtungsstärke durch direkte Sonne, Standort Innsbruck	29
Abbildung 24: Aufsatz für Lichtrohr: SonnenNutzkopf mit streuender Freiformfläche („SonnenSchlumpf“).....	30
Abbildung 25: Streueigenschaften von Materialien. Beispiele aus Datenbank zu Messungen bei BB.	30
Abbildung 26: Vertikaljalousie (Muster HELLA) und jalousierbarer Rollladen (nicht weiterverfolgt) ..	31
Abbildung 27: Linsenplatte, Freiformflächen-Näpfchenlinse (3D-Druck, Designmuster ohne lichttechnische Funktion)	31
Abbildung 28: Linsenplatte (Näpfchenlinsen), 4 x 1-fach Spritzgussform (Konstruktion Beneder), 2K- Funktionsmuster.....	32
Abbildung 29: Funktionsmuster Linsenplatte aus drei Einzelkomponenten (Richtung Sonne, Trennplatte, Richtung Raum).....	32
Abbildung 30: Prüfung des Funktionsmusters (Linsenplatte) im künstlichen Himmel bei BB auf einer optischen Bank.	33
Abbildung 31: Simulation gerichtete Transmission der Linsenplatte, Vergleich Silikon + Miro-Silver (theoretisches Konzept) mit PMMA + Aluminium-Bedampfung (Konstruktion Spritzgusswerkzeug mit Verrundungen)	33
Abbildung 32: Messung gerichtete Transmission der Funktionsmuster zur Linsenplatte (3 Komponenten und 2K-Spritzguss)	34
Abbildung 33: SonnenNutzkopf mit SonnenSchlumpf als Aufsatz für ein Lichtrohr (Darstellung BB) .	34
Abbildung 34: Messung des SonnenNutzkopfs mit SonnenSchlumpf im künstlichen Himmel	35
Abbildung 35: Lichtstromeinträge des Aufsatzes für ein Lichtrohr (SonnenNutzkopf mit SonnenSchlumpf).....	35

6.2. Literaturverzeichnis

- [ALT 2013] Altmeyer S., Hu Y., Thié P, Matrisch J., Wallentin M., Silbermann J.: Multiplexing of transmission holograms in photopolymer. DGaO Proceedings 2013.
- [ECO 2005] Österreichisches Ökologie-Institut: Lichtblicke.
<http://www.ecology.at/lichtblicke/> (abgerufen am 24.04.2019; 16:50)
- [FÖG 2016] Föger D., Knoflach C., Spielberger G.: Complex Surface Optics applied in modern Illumination Concepts.
Applied Industrial Optics, OSA. Heidelberg, 2016.
- [GEI 2017] Geisler-Moroder D., Pohl W.: Advances in daylight simulation – validation and applications.
LuxEuropa 2017. Ljubljana, 2017.
- [GEI 2018] Geisler-Moroder D.: Innovative Lösungen für Tages- und Kunstlicht.
SESWA 2018. Wien, 2018.
- [GEI 2018,2] Geisler-Moroder D., Christian Knoflach C., Öttl S., Pohl W.: Characterization of advanced daylighting systems and combined lighting and thermal simulation.
Advanced Building Skins 2018. Bern, 2018.
- [HAU 2011] Hauer M., Neyer D., Streicher W., Geisler-Moroder D., Knoflach C., Pohl W: Gekoppeltes Simulationsmodell zur Fassadenbewertung.
ENOVA, Pinkafeld 2011.
- [HEL 2016] Heliotrope Technologies: NanoEC™ Smart Tinting Glass.
<https://heliotropetech.com/> (abgerufen am 25.04.2019; 10:39)
- [MEM 2012] MEM4WIN: Micro Mirror Arrays.
<http://mem4win.eu> (abgerufen am 25.04.2019; 11:00)
- [MIC 2016] MicroShade: Folie für passive Verschattung.
<http://www.microshade.net/> (abgerufen am 25.04.2019; 10:56) (PhotoSolar, WINSMART)
- [NIB 2016] National Institute of Building Science: Whole Building Design Guide WBDG, Daylighting (2016).
<http://www.wbdg.org/resources/daylighting> (abgerufen am 24.04.2019; 17:13)
- [NBI 2015] New Buildings Institute: Daylighting Pattern Guide (2015).
<https://newbuildings.org/resource/daylighting-pattern-guide/> (abgerufen am 24.04.2019, 17:08)

- [POH 2012] Pohl W.: LichtAusFassade - Optimierte Tages- und Kunstlichtversorgung über Fassaden. Beurteilung der Energiebilanz und der visuellen Qualität. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 26/2012, Wien 2012.
- [POH 2015] Pohl W.: FFF-TaliSys – Freiformflächen-Tageslichtsysteme für Fassaden und Oberlichter. Tagungsband „Stadt der Zukunft“ Intelligente Energielösungen für Gebäude und Städte, Vernetzungsworkshop für Projekte der 2. Ausschreibung. Wien, 2015.
- [POH 2016] Pohl W., Geisler-Moroder D.: Daylight driven and user centered lighting and energy management. Advanced Building Skins. Bern, 2016.
- [POH 2017] Pohl W., Geisler-Moroder D., Knoflach C.: New daylight solutions for energy and health. LuxEuropa 2017. Ljubljana, 2017.
- [POH 2018] Pohl W.: Tageslicht und Lebensqualität. BASF Architects Day. Köln, 2018.
- [POH 2018,2] Pohl W., Geisler-Moroder D., Knoflach C.: Trends im Tageslicht. LICHT 2018. Davos, 2018.
- [RUC 2000] Ruck N., Aschehoug Ø., Aydinli S., Christoffersen J., Courret G., Edmonds I., Jakobiak R., Kischkoweit-Lopin M., Klinger M., Lee E., Michel L., Scartezzini J.-L., Selkowitz S.: Daylight in Buildings - A Source Book on Daylighting Systems and Components. IEA Solar Heating and Cooling Programme SHC Task 21, 2000.
- [SOL 2014] SolarLits: Journal of Daylighting (seit 2014). <http://solarlits.com/> (abgerufen am 24.04.2019, 17:24)
- [SPIE 2016] Spielberger G., Knoflach C., Reisecker C.: Freiformflächenoptiken für die Umsetzung von Dynamic-White Beleuchtungskonzepten. LICHT 2016. Karlsruhe, 2016.
- [STO 1999] Stoller D.: Hologramme lenken Licht und Schatten. INGENIEUR.de (1999) <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/hologramme-lenken-licht-schatten/> (abgerufen am 24.04.2019, 17:35)
- [WEI 2017] Weitlaner R., Geisler-Moroder D., Pfluger R.: Advanced Insolation Detection Module. Building Simulation 2017. San Francisco, 2017.

[WER 2017]

Werner M., Pfluger R., Geisler-Moroder D., Feist W.: Analysis of Worldwide Performance of Façade Systems.
Building Simulation 2017. San Francisco, 2017.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a parallelogram, is positioned on the right side of the page. It is oriented vertically, with its hypotenuse facing left. The shape is solid and has a consistent light blue color.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
bmvit.gv.at