

Lightyard

Vom Innenhof zum Lichthof

D. Geisler-Moroder,
C. Knoflach,
W. Pohl

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

38/2019

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/>

Lightyard

Vom Innenhof zum Lichthof

Dipl.-Ing. Dr. David Geisler-Moroder, Mag. Christian Knoflach,
Mag. Wilfried Pohl
Bartenbach GmbH, Research & Development

Aldrans, Juli 2016

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	8
Abstract.....	11
1 Einleitung.....	13
1.1 Aufgabenstellung.....	13
1.2 Stand der Technik.....	13
1.2.1 Technischer Stand	13
1.2.2 Stand in der wissenschaftlichen Literatur.....	14
1.2.3 Thematisch relevante Vorprojekte	15
1.3 Verwendete Methoden.....	16
2 Ergebnisse	18
2.1 Projektergebnisse	18
2.1.1 Lichttechnische Optimierung von Innenhöfen ("Theorie")	19
2.1.2 Anforderungen an Materialien, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit ("Praxis") ..	25
2.1.3 Konzept für einen Innenhof-Kalkulator ("Tool")	27
2.2 Innovationen	31
2.3 Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms.....	32
3 Schlussfolgerungen	33
3.1 Nutzbarkeit	33
3.2 Marktpotential	35
4 Ausblick und Empfehlungen	36
5 Verzeichnisse	37
5.1 Abbildungsverzeichnis	37
5.2 Literaturverzeichnis.....	38

Kurzfassung

Es wurde untersucht, ob eine intelligente Anordnung unterschiedlicher Materialien tageslichttechnisch optimale Lösungen für die Sanierung von Innenhöfen ermöglicht. Das Anheben der Tagesbelichtung in unteren Geschoßen auf mehr als das 10-fache ist damit realistisch. Zusätzlich wurde ein Berechnungstool konzipiert, mit dem optimierte Innenhoflösungen erstellt und bewertet werden können. Dabei werden sowohl lichttechnische als auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt.

Ausgangssituation/Motivation

Bei der Sanierung von Gebäuden liegt der Schwerpunkt heutzutage meist auf der Verbesserung der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle. Speziell im urbanen Bereich bieten jedoch die häufig vorhandenen Innenhöfe aus tageslichttechnischer Sicht besonderes Potenzial. Durch eine optimale Materialausstattung mit entsprechenden Oberflächeneigenschaften kann die Tageslichtversorgung in den angrenzenden Räumen deutlich verbessert werden. Speziell die unteren Geschoße mehrstöckiger Bauten können davon stark profitieren. Exemplarische Auswertungen zeigen, dass allein die Erhöhung des Reflexionsgrades im Innenhof die 4-fache Menge an Tageslicht in das unterste Geschoß bringt. Verspiegelte Oberflächen im Innenhof erhöhen die mittlere Tageslichtversorgung sogar auf mehr als das 10-fache. Mit intelligenten Materialien und deren entsprechender Anordnung soll dieser Wert noch deutlich gesteigert werden.



Abbildung 1: Innenhöfe im dicht bebauten, urbanen Bereich (Ausschnitt: Wien I. Bezirk) ©2014 Google

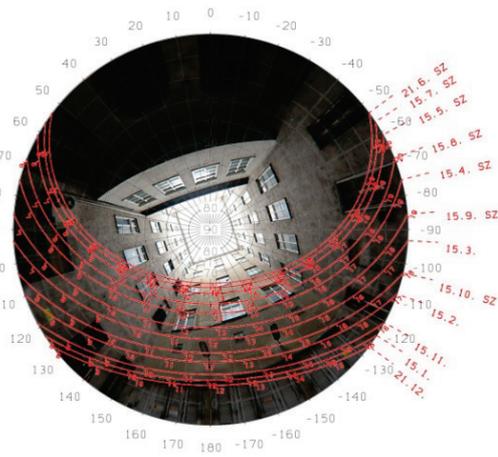


Abbildung 2: Fischaugenbild mit Sonnenstandsdiagramm eines Wiener Innenhofs

Inhalte und Zielsetzungen

Um zu klären, wie im Rahmen von Sanierungen aus Innenhöfen optimale „Lichthöfe“ entstehen können, wurden im Projekt „Lightyard“ folgende Fragen aufgeworfen:

- Mit welchen Materialien kann eine optimale Tageslichtversorgung erreicht werden? Wie müssen verschiedene Materialien dafür im Innenhof angeordnet werden?
- Welche derzeit am Markt verfügbaren Materialien kommen dafür in Frage? Könnten spezielle Materialien entsprechend der theoretischen Anforderungen hergestellt werden?
- Welche architektonischen Anforderungen gibt es? Welche bautechnischen Einschränkungen sind zu erwarten? Welche normativen Vorgaben sind einzuhalten?
- Gibt es Möglichkeiten lichttechnisch optimale Innenhöfe mit Hilfe eines vereinfachten Algorithmus / Berechnungstools zu erstellen und somit für Architekten, Fassadenbauer und Bauherren planbar zu machen?

Methodische Vorgehensweise

Das Projekt „Lightyard“ sollte diese Fragestellungen im Sinne einer Machbarkeitsstudie beantworten und sicherstellen, dass weiterführende Forschungen und Entwicklungen in diesem Bereich zielführend sind. Die theoretische Optimierung wurde basierend auf Grundlagenüberlegungen durchgeführt und mit Tageslichtsimulationen ergänzt und validiert. Markt-, Normen- und Patentrecherchen liefern den notwendigen Input aus der Praxis. Die Extraktion wesentlicher Parameter des Innenhofs gingen in die Konzeption eines vereinfachten "Innenhof-Kalkulators" zur Erstellung optimierter Lösungen ein.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Allgemein stellen die Überprüfung der Machbarkeit von lichttechnisch optimierten Materialkonzepten für Innenhöfe sowie die Untersuchung des entsprechenden Berechnungskonzeptes die wesentlichen Ergebnisse dieses Sondierungsprojektes dar. Zusammenfassend lassen sich die Projektergebnisse folgendermaßen auflisten:

- Machbarkeitsanalyse zur optimalen Tageslichtversorgung von Räumen durch Innenhöfe
- Modulares Material-Konzept
- Anforderungskatalog an Materialien zur Verwendung in Innenhöfen aus lichttechnischer und bautechnischer Sicht inklusive Kostenabschätzung
- Exemplarische Auflistung optimierter Innenhofkonzepte für einzelne Randbedingungen inkl. deren Evaluierung
- Dokumentation notwendiger fortführender Forschungs- bzw. Entwicklungsarbeiten zur Umsetzung der Konzepte
- Konzeptevaluierung des "Innenhof-Kalkulators"

Durch die lichttechnisch optimale Nutzung von Innenhöfen steigt neben der Tagesbelichtung (mit entsprechender Energieeinsparung für Kunstlicht) auch die visuelle Qualität. Eine Vielzahl von innenhofangrenzenden Räumen wird dadurch überhaupt erst als Wohnraum oder Arbeitsbereich nutzbar.

Ausblick

In Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft (bauphysikalische und thermische Auswirkungen) und Industrie (Realisierungsmöglichkeiten) soll die praktische Umsetzung der Konzepte vorangetrieben werden. Dies wird möglicherweise im Rahmen eines noch einzureichenden kooperativen F&E-Projekts erfolgen.

Abstract

The feasibility of daylight-optimized solutions for retrofitting courtyards by an intelligent alignment of different materials has been examined. With it, daylighting levels in lower floors can realistically be increased tenfold. Additionally, a calculation tool for generating and evaluating optimal courtyard solutions was designed. Besides daylighting parameters also economic criteria were considered.

Starting point/Motivation

Nowadays the focus in retrofitting buildings is usually on enhancing the thermal properties of building envelopes. However, especially in urban regions courtyards are often providing high potential in terms of daylighting. Using optimal materials with appropriate surface reflectance properties the daylighting of adjacent rooms can be improved significantly. Lower floors of multi-story buildings particularly benefit from that. Exemplary evaluations show that simply increasing the reflectance in the courtyard yields quadrupled daylighting values in the lowest floor. Using specular materials can bring up the daylighting levels even up ten times compared to the existing situation.



Abbildung 3: Inner courtyards in a densely built-up area (picture detail: Vienna, district I) ©2014 Google

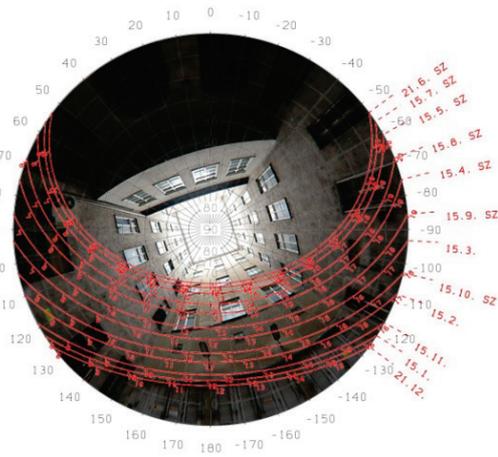


Abbildung 4: Fisheye image with sun path diagram of an inner courtyard in Vienna

Contents and Objectives

To clarify how to transform courtyards into optimal "lightyards", the following questions have been addressed within this project:

- Which materials have to be used for optimal daylighting? How do these materials need to be aligned in the courtyard?
- Which materials available on the market can be used for it? Can materials be custom-built to meet theoretical requirements?

- Which kind of architectural requirements exist? Which engineering restrictions might appear? Which standards have to be met?
- Is it possible to generate optimal courtyards with a simplified calculation module and thus allow architects, façade designers and building owners to design them?

Methods

The project “Lightyard” should answer these questions as a feasibility study and guarantee that continuing research and developments on this topic are promising. The theoretical optimization is based on considerations of basic principles and complemented and validated by daylight simulations. Market, literature and engineering standard research provide necessary input from practice. Deriving the main parameters of a courtyard was the basis for the concept of a simplified "courtyard calculator" for designing optimized solutions.

Results

The main results are the verification of the feasibility of optimized material concepts for courtyards and the proof of concept of the corresponding calculation tool. In detail, the following results were achieved:

- Feasibility study for optimal daylighting of rooms adjacent to courtyards
- Modular concept for materials
- Catalog of requirements regarding daylighting, structural engineering and costs for materials used in courtyards
- Listing of selected optimized courtyard concepts including their evaluation
- Documentation of necessary further investigations and development
- Draft evaluation of the “courtyard calculator”

By optimally using courtyards from a lighting point of view, daylighting (and with that energy savings from electric lighting) as well as visual quality is increased. Numerous rooms adjacent to courtyards can thus be made utilizable as living space or working area.

Prospects / Suggestions for future research

In cooperation with academic partners (impact on building physics and thermal performance) and industry (implementation potential) the practical realization of the concepts shall be expedited. This will possibly be carried out in the framework of a cooperative R&D project yet to be submitted.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Bei sehr vielen Innenhöfe ist Tageslicht nur in den oberen Geschoßen zur Ausleuchtung anliegender Räume ausreichend vorhanden. Im Rahmen von Gebäudesanierungen soll die optimale Nutzung bestehender Innenhöfe zur Tagesbelichtung speziell der unteren Geschoße ermöglicht werden. Dadurch können dicht gebaute Gebäudestrukturen verbessert und bisher nicht oder nur schlecht nutzbare Bereiche (Geschoße) aufgewertet werden. Die optimierte Nutzungsmöglichkeit der Gebäude kann somit in gewisser Weise auch als "Nachverdichtung" im urbanen Bereich betrachtet werden. Im Falle einer realen Nachverdichtung durch Geschoßaufstockung steigen die Anforderungen an die tageslichtbringende Wirkung eines Innenhofs noch zusätzlich.

Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der angestrebten Innenhoflösungen sollte durch die Verwendung einfacher Low-Tech Prinzipien anstatt aufwändiger mechanischer Anlagen sichergestellt werden. Eine optimale Kombination von Lichtspiegelung, Lichtstreuung und Lichtdiffusion mit geeigneten Materialoberflächen kann dabei den bestmöglichen Tageslichttransport bis in tiefliegende Geschoße gewährleisten. Diese Prinzipien sind gleichermaßen in der Sanierung bestehender Innenhöfe wie auch im Neubau umsetzbar.

Ein "Innenhof-Kalkulator" in Form eines vereinfachten Berechnungstools soll bei der Erstellung lichttechnisch optimierter Innenhoflösungen unterstützen. Damit ist nicht nur die lichttechnische Bewertung eines Innenhofs möglich, sondern es kann - in dieser Form komplett neu - das effizienteste Design für den Innenhof mit Hilfe des Tools ermittelt werden. Ein derartiges Berechnungstool sollte im Projekt Lightyard konzipiert werden.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Technischer Stand

Großvolumige Gebäudestrukturen wurden und werden sehr häufig mit Innenhöfen geplant und gebaut, um dadurch den Fassadenanteil und somit die Tageslichtversorgung zu erhöhen. Die große Anzahl und die Bedeutung von Innenhöfen lassen sich etwa am Beispiel der Stadt Wien sehr gut darstellen. Auf der Homepage der Stadt wird ein virtueller Stadtpaziergang durch "Innenhöfe, Durchhäuser und Pawlatschen" angeboten [wien.gv.at, 2016], Leisch und Scheiterle haben das Thema sogar in ihrem Buch "Wiener Innenhöfe: eine photographische Betrachtung von Erich Leisch und Gerhard Scheiterle erläutert nach Wiener Chroniken" [Leisch, 1983] verarbeitet.

Wie die nachfolgenden Bilder zeigen, sieht die Realität der Tageslichtversorgung über Innenhöfe jedoch anders aus. Die Oberflächen werden so gut wie nie nach lichttechnischen Kriterien ausgewählt und durch langjährige Ablagerung von Staub und Dreck werden die Oberflächen über die Jahre noch deutlich dunkler. Dadurch wird die Versorgung mit

Tageslicht speziell in den unteren Geschoßen drastisch verringert. Das Bild ganz rechts zeigt dies sehr deutlich - der untere Bereich des Innenhofs ist sogar bei Besonnung und damit hohen Außenbeleuchtungsstärken sehr dunkel.



Abbildung 5: Beispiel eines Wiener Innenhofs mit dunklen Oberflächen und offensichtlich schlechtem Lichttransport in die unteren Geschoße.

Bei der Sanierung von Gebäuden mit Innenhöfen liegt heutzutage - wie allgemein in der Gebäudesanierung - der Fokus immer klar auf der Verbesserung der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle. Der Einfluss auf die Tagesbelichtung der angrenzenden Räume spielt dabei bis dato keine Rolle. Die in diesem Projekt durchgeführte allgemeine Analyse des Potenzials und der Machbarkeit der lichttechnischen Optimierung von Innenhöfen stellt dabei einen ersten Schritt dar, die entsprechenden Interessensgruppen dafür zu sensibilisieren.

1.2.2 Stand in der wissenschaftlichen Literatur

Zahlreiche Veröffentlichungen zur Tagesbelichtung durch Innenhöfe bzw. Atrien dokumentieren die Relevanz dieses Themas. Die Aktualität zeigt sich durch neun der angeführten 13 wissenschaftlichen Arbeiten (die Website wurde ausgenommen), die innerhalb der vergangenen Jahre publiziert wurden.

Im Wesentlichen lässt sich die relevante Literatur zu diesem Thema in zwei Bereiche einteilen. Zum einen werden Einflüsse durch die Innenhofgeometrie oder Reflexionsgrade der Oberflächen auf die Tagesbelichtung im Innenhof bzw. den angrenzenden Räumen evaluiert ([advanced buildings, 2016], [Bittencourt, 2001], [Du, 2009], [Du, 2010], [Du2, 2009], [Du, 2012], [Du, 2011], [Freewan, 2011], [Yunus, 2011], [Yunus2, 2011]). Zum anderen leiten die Autoren Regeln zur Vorhersage von Beleuchtungsstärken bzw. Tageslichtquotienten im Innenhof ab ([Laouadi, 2000], [Tregenza, 1997], [Wright, 1998]).

Allerdings decken die Autoren dabei in beiden Fällen nur bedeckten oder diffusen Himmel ab, nicht aber besonnte Himmelszustände oder überhaupt klimadatenbasierte Himmelsmodelle. Außerdem werden lediglich Auswertungen durchgeführt, aber keine optimierten Zustände erzeugt. Zusätzlich werden in den meisten Arbeiten die auf Simulationen basierenden Aussagen durch Modellmessungen validiert. Arbeit [Ghasemi, 2013] dient rein der Validierung der Simulationssoftware durch Modellmessungen.

In allen Arbeiten, die den Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften untersuchen, werden lediglich unterschiedliche Reflexionsgrade von ideal diffusen Oberflächen berücksichtigt, nie aber spiegelnde Materialien oder Materialien mit Streuung um eine gegebene Vorzugsrichtung. Für verspiegelte Lichtschächte und Lichtrohre (die im Vergleich zu Innenhöfen deutlich kleinere Dimensionen aufweisen) wurden zwar Untersuchungen durchgeführt und publiziert, diese Ergebnisse lassen sich jedoch auf Innenhöfe mit Fensterflächen ("Auslässe") und nicht durchgehend verspiegelten Oberflächen nicht anwenden.

Für die Simulationen wird in allen Arbeiten das weltweit für physikalisch korrekte Tageslichtberechnungen meistgenutzte Programmpaket Radiance bzw. darauf aufbauende Software verwendet (IES-VE Radiance, Daysim). Mit Ausnahme der Arbeit von Du, Sharples und Johnson [Du, 2011], in der basierend auf Jahressimulationen mit Daysim der Kunstlichtbedarf evaluiert wird, werden in den Simulationen nur statische Berechnungen für einen bedeckten Himmel durchgeführt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Sonnenstände bei klarem Himmel oder bei Mischzuständen werden damit nicht abgedeckt.

1.2.3 Thematisch relevante Vorprojekte

1.2.3.1 Lichtfänger (Haus der Zukunft)

Im Rahmen des „Haus der Zukunft“-Projekts *"Lichtfänger - Entwicklung eines „Lichtfängers“ für tageslichttransparente, hochenergieeffiziente, mehrgeschossige Gebäude"* wurde bei Bartenbach eine neuartige Gebäudestruktur erarbeitet. Dabei werden die Gebäude durch verspiegelte Lichtschächte von oben tagesbelichtet und die Fassade wird von ihrer tageslichtversorgenden Wirkung weitgehend befreit. Aus diesem Projekt entstand die Idee spezielle Lösungen für die Sanierung bestehender Innenhöfe zu entwickeln. Es stellte sich schnell heraus, dass die Betrachtung sehr komplex wird, sobald man sich von rein diffusen oder rein verspiegelten Lichtschächten entfernt. Zudem sind in Innenhöfen die Randbedingungen fest vorgegeben (Verhältnis Grundfläche/Höhe, Fensteranteile, etc). Diese für Innenhöfe ganz wesentlichen, grundlegenden Überlegungen zum Einfluss verschiedener Oberflächeneigenschaften auf den Zusammenhang zwischen Lichtleitung und Lichtverteilung waren daher Thema dieses Projekts.

1.2.3.2 P01 - Integrated Day- and Artificial Light (K-Licht, COMET K-Projekte)

Im Kompetenzzentrum Licht (www.k-licht.at, 2002 bis 2009) und im COMET K-Projekt K-Licht (2009 - 2015) wurden von Bartenbach zahlreiche Grundlagenforschungsprojekte zum Thema Lichtwirkungen (visuelle und nicht visuelle Wirkungen), Tageslicht und Sonnenschutz durchgeführt. Im unter diesem Programm laufenden Teilprojekt P01, beschäftigte sich Bartenbach u.a. mit der Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur ganzheitlichen Abbildung (Licht und Energie) kombinierter Tages- und Kunstlichtsysteme inkl. Steuerung. Die hier erarbeitete Methodik eines vereinfachten Tools basierend auf der Interpolation zwischen vorberechneten Stützstellen lieferte die Idee und erste Ansätze zur Realisierung des "Innenhof-Kalkulators".

1.2.3.3 IEA SHC Task 50 - IEA Solares Heizen und Kühlen: Task 50: Beleuchtungslösungen für die Gebäudesanierung (IEA Kooperation)

Das Projekt beschäftigt sich mit allgemeinen Systemlösungen für Tages- und Kunstlicht für Gebäude mit dem Fokus auf Innenräumen in Nicht-Wohngebäuden. Fachlich wurden folgende Themen bearbeitet: (i) Tageslichtnutzung durch verbesserte Fassadentechnologien und architektonische Lösungen, (ii) Kunstlichtkonzepte für Technologie- und Designstrategien, (iii) Systeme und Strategien zur Lichtsteuerung. Die Synergie mit dem vorliegenden Projekt liegt im Bereich der Anforderungen an Sanierungstechnologien. Zusätzlich konnten Evaluierungsmethoden aus dem Task 50 übernommen bzw. angepasst werden.

1.3 Verwendete Methoden

Zunächst wurden aus Sicht der Tagesbelichtung optimale Materialeigenschaften und Anordnungen von Materialien erarbeitet. Dazu wurden analytische Überlegungen basierend auf den optischen Grundlagen der Lichtreflexion durchgeführt (z.B. Einfallswinkel = Ausfallswinkel bei spiegelnden Flächen, Verteilung mit Kosinusverlauf bei ideal diffusen Flächen). Dabei wurden mögliche Außensituationen über standardisierte, theoretische Himmelsmodelle für klaren, bedeckten und diffusen Himmel berücksichtigt. Zusätzlich wurden numerische Verfahren zur globalen und lokalen Optimierung eingesetzt, um entsprechende Lösungen zu finden. Diese Vorgehensweise wird bei Bartenbach vielfach für verschiedenste lichttechnische Problemstellungen eingesetzt (z.B. Berechnung optimierter Spektren mit speziellen Eigenschaften, Berechnung von Freiformflächen für Kunst- und Tageslichtsysteme, ...).

Zur Evaluierung von Konzeptentwürfen wurden Tageslichtsimulationen mit Radiance durchgeführt. Dieses Programm stellt weltweit den Maßstab für Tageslichtberechnungen dar und eignet sich ideal für die im Projekt benötigten Aufgaben. So können etwa durch Weiterentwicklungen der letzten Jahre inzwischen beliebige Streueigenschaften (BRDFs) von Materialien vom Benutzer definiert werden. Bisher war dies nur für den "Direktanteil" des Lichts möglich, nicht aber für den reflektierten Teil, der aber speziell im Innenhof von großer Bedeutung ist. Außerdem bietet das Programm seit ein paar Jahren die Möglichkeit, über

einen sogenannten "daylight coefficient" - Ansatz lichttechnische Jahressimulationen in vernünftiger Zeit durchzuführen.

Um praxisrelevante Vorgaben und Bestimmungen zu sammeln, wurde eine Normenrecherche zu den entsprechenden Themen durchgeführt. Die Ergebnisse einer Marktrecherche zu verfügbaren Materialien sowie eine Kostenschätzung für angedachte Innenhofkonzepte ergänzen den Anforderungskatalog aus praktischer und bautechnischer Sicht. Eine weitere Säule - der Einfluss des Erscheinungsbilds - wurde basierend auf Gesprächen mit Architekten und Planern sowie auf der Analyse von Bartenbach-Wahrnehmungsversuchen ausgearbeitet. Einfache Anschauungsmodelle ermöglichen eine Evaluierung des Erscheinungsbilds und damit des Eindrucks für den Raumnutzer bzw. Bewohner.

Vereinfachte Berechnungsansätze wurden mit Hilfe von Tageslichtsimulationen überprüft und basieren auf Interpolation zwischen vorberechneten Stützstellen. Die Konzeptprüfung für das Berechnungstool erfolgte anhand einer einfachen Umsetzung in einem Tabellenkalkulationsprogramm (MS Excel).

2 Ergebnisse

2.1 Projektergebnisse

Das große Potenzial zur verbesserten Tagesbelichtung der Räume, die direkt an einen Innenhof angrenzen, konnte belegt werden. Dazu müssen keine komplexen, beweglichen Apparaturen wie Heliostaten angebracht werden. Durch eine optimal an die geometrischen Gegebenheiten des Innenhofs angepasste Materialwahl kann die Tageslichtversorgung besonders in den unteren Stockwerken von engen Innenhöfen dramatisch verbessert werden. Derzeit sind hofseitig liegende Räume in den ersten Geschoßen vielfach kaum tagesbelichtet und können weder als Büros noch als Wohnräume genutzt werden. Die in diesem Projekt untersuchten "Low-Tech" Ansätze decken eine breite Palette von Verbesserungsmöglichkeiten ab: Beginnend von der Wahl geeigneter Anstriche bis zur Verwendung einer idealen Kombination von unterschiedlichen Paneelen mit speziellen Reflexionseigenschaften gilt es die Lösung zu finden, die für das jeweilige Objekt das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet. Dabei müssen auch die Vorstellungen bezüglich des Erscheinungsbilds und die bauphysikalischen Forderungen (Brandschutz, Beständigkeit, thermische Auswirkungen, ...) gewährleistet werden.

Im Rahmen dieses Sondierungsprojekts traten die Vorteile dieser neuen Innenhöfe in Bezug auf die Nachhaltigkeit und die Lebensqualität klar zutage. Zusätzlich zur Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs durch eine höhere Tageslichtautonomie ergeben sich durch die gute Tagesbelichtung positive Auswirkungen auf die Nutzer. Zu nennen sind etwa eine erhöhte visuelle Qualität der Räume und die biologischen, nicht-visuellen Lichtwirkungen von Tageslicht. Insgesamt führt das zur einer Aufwertung bestehender oder neu zu errichtender Bausubstanz.

Das im Projekt entwickelte einfache Bewertungstool in Form eines „Innenhof-Kalkulators“ auf Excel-Basis zeigt die Verbesserungsmöglichkeiten beim Einsatz von einfachen, bereits existierenden Materialien auf. Darüber hinaus kann damit auch das Leistungsvermögen der in Lightyard neu konzipierten Ansätze verdeutlicht werden.

Eine unmittelbare Umsetzung scheitert derzeit daran, dass die speziellen Materialien zur Innenhof-Verkleidung, die vielfach für optimale Lösungen benötigt würden, am Markt nicht verfügbar sind. Derzeit konzentrieren sich die Hersteller auf die bautechnischen und ästhetischen Aspekte und berücksichtigen die lichttechnischen Auswirkungen kaum. Deshalb sind auch keine für Tageslichtberechnungen brauchbare Charakterisierungen bestehender Produkte mit komplexerer Geometrie verfügbar.

In Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft (bauphysikalische und thermische Auswirkungen) und Industrie (Realisierungsmöglichkeiten) soll die praktische Umsetzung der Konzepte vorangetrieben werden. Dies wird möglicherweise im Rahmen eines noch einzureichenden kooperativen F&E-Projekts erfolgen.

2.1.1 Lichttechnische Optimierung von Innenhöfen ("Theorie")

Typische Innenhöfe weisen eine quaderförmige Geometrie auf. Diese standen im Fokus der Optimierungen. Während in den oberen Geschoßen eine ausreichende Tageslichtversorgung der Räume über den Innenhof meist problemlos möglich ist, stellt die Belichtung der bodennahen, unteren Stockwerke ein Problem dar.

Für eine optimale Nutzung von Tageslicht in Innenhöfen sind folgende Faktoren entscheidend:

- a) geringe Absorption an den Wänden und am Boden (Tageslicht nicht „vernichten“)
- b) möglichst wenig Licht verlässt den Innenhof (Tageslicht im Innenhof nutzen)
- c) gleichmäßige Versorgung der Räume in den unterschiedlichen Stockwerken mit Tageslicht, soweit eine hochwertige Nutzung gewünscht ist (Räume tagesbelichten)

Somit müssen die verwendeten Materialien einen möglichst hohen Reflexionsgrad aufweisen (siehe AP2) und das Tageslicht muss mit möglichst wenigen Reflexionen in die Räume gelenkt werden.

Der Ansatz, die Reflexions- und Streueigenschaften der Materialien (theoretische BRDFs) durch mathematische Optimierung zu bestimmen, stieß schnell an seine Grenzen. Die angedachten praktisch realisierbaren Modelle basieren auf einer Zwischenform zwischen den beiden Extremen der diffusen Reflexion (Leuchtdichte nach Reflexion in allen Richtungen gleich) und der spiegelnden Reflexion (gesamtes Licht im Glanzwinkel reflektiert). Solche BRDFs haben typischerweise ein Maximum im Glanzwinkel und streuen unterschiedlich stark um diesen Glanzwinkel. Eine praktische Realisierung sind etwa Aluminiumqualitäten mit unterschiedlich starker Aufstreuung des Lichts. Solche Materialien wirken jedoch im Wesentlichen wie ideal spiegelnde Flächen mit einer zusätzlichen „Verschmierung“. Dadurch ist jedoch keine deutliche Umlenkung von Tageslicht möglich und die Ergebnisse, die durch Kombination von diffusen und ideal spiegelnden Flächen erzielt werden, können mit solchen Materialien nicht in praxisrelevantem Ausmaß verbessert werden.

Ein wesentlicher Vorteil dieser streuenden Aluminiumqualitäten besteht in der höheren Akzeptanz bei den Anwendern. Gleichzeitig weisen sie eine vergleichbare lichttechnische Wirkung wie hochglänzende Flächen auf, die als ideale Spiegel das räumliche Erscheinungsbild des Innenhofs auflösen und damit auf Ablehnung stoßen.

Erste einfache Ansätze zur Erhöhung des Tageslichtquotienten in Räumen in Bodennähe beruhen auf einer Maximierung der Beleuchtungsstärke auf der Fassade (entspricht dem Lichtstrom, der außen auf das Fenster trifft) bzw. hinter einer Verglasung (entspricht dem Lichtstrom, der durch das Fenster in den Raum tritt). Bei komplexeren Zielfunktionen werden Jahresberechnungen für Bewertungsflächen oder für Punkte im Innenraum auf Basis von Klimadaten durchgeführt. Solche Bewertungen zielen auf eine Ermittlung der Tageslichtautonomie ab und dienen letztlich der Minimierung des jährlichen Energiebedarfs für künstliche Beleuchtung. In anderen Forschungsprojekten wurden vergleichbare

Auswertungen für Tageslichtsysteme in der Fassade von Bartenbach in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Zumtobel und der Universität Innsbruck in Form des Online-Tools DALEC bereits umgesetzt und zur Verfügung gestellt: <http://dalec.zumtobel.com/>. Für die Bewertung von Innenhöfen gibt es noch kein vergleichbares Werkzeug.

In Lightyard erfolgten zuerst allgemeine Berechnungen zur Mischungen der Reflexionseigenschaften der Wände zwischen ideal diffus und hochglänzend (idealer Spiegel). Der Boden wurde dabei als diffus angenommen, da hier ein Spiegel gemäß den Berechnungen keine Vorteile bietet: Ein Großteil des am Boden reflektierten Lichts geht durch Vielfachreflexionen verloren.

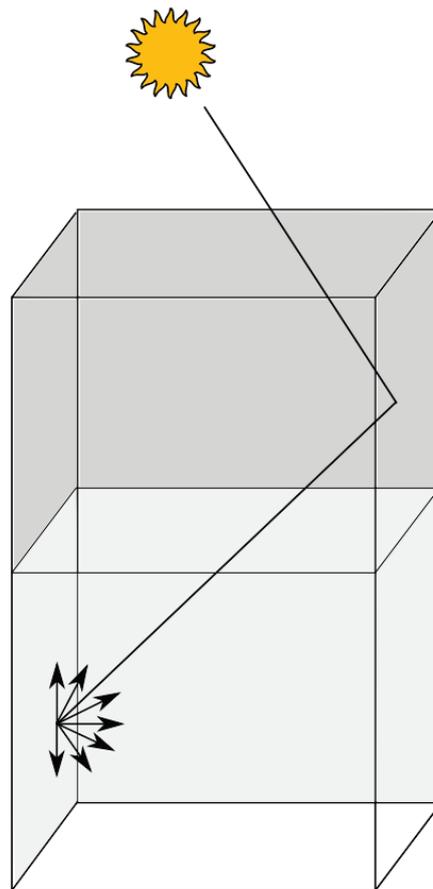


Abbildung 6: Innenhof mit spiegelnder oberer und diffuser unterer Hälfte

Abbildung 7 enthält als Beispiel Tageslichtquotienten für einen Innenhof mit einem Verhältnis Höhe zu Länge $H:L = 4:1$, d.h. einer Höhe von 20 m (5 Stockwerke à 4 m) und einer Seitenlänge von 5 m. Die vier großen Zeilenblöcke enthalten die Ergebnisse für einen diffusen Boden mit einem Reflexionsgrad von 0.1, 0.3, 0.5 und 0.7 (ρ_{Boden} , von oben nach unten).

TQ im Raum - Stockwerk					Ev - Position im Innenhof		TQm je Stock
5	4	3	2	1	19.5m ----- 0.5m		
4.15	1.15	0.35	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
4.15	2.25	1.45	1.00	0.50	0.00	0.00	0.00
4.15	3.35	2.55	1.75	1.25	0.50	0.00	0.00
4.15	4.45	3.65	2.50	2.00	1.00	0.50	0.00
4.15	5.55	4.75	3.25	2.75	1.50	1.00	0.50
4.15	6.65	5.85	3.90	3.50	2.00	1.50	1.00
4.15	7.75	6.95	4.55	4.25	2.50	2.00	1.50
4.15	8.85	8.05	5.20	5.00	3.00	2.50	2.00
4.15	9.95	9.15	5.85	5.75	3.50	3.00	2.50
4.15	11.05	10.25	6.50	6.50	4.00	3.50	3.00
4.15	12.15	11.35	7.15	7.25	4.50	4.00	3.50
4.15	13.25	12.45	7.80	8.00	5.00	4.50	4.00
4.15	14.35	13.55	8.45	8.75	5.50	5.00	4.50
4.15	15.45	14.65	9.10	9.50	6.00	5.50	5.00
4.15	16.55	15.75	9.75	10.25	6.50	6.00	5.50
4.15	17.65	16.85	10.40	11.00	7.00	6.50	6.00
4.15	18.75	17.95	11.05	11.75	7.50	7.00	6.50
4.15	19.85	19.05	11.70	12.50	8.00	7.50	7.00
4.15	20.95	20.15	12.35	13.25	8.50	8.00	7.50
4.15	22.05	21.25	13.00	14.00	9.00	8.50	8.00
4.15	23.15	22.35	13.65	14.75	9.50	9.00	8.50
4.15	24.25	23.45	14.30	15.50	10.00	9.50	9.00
4.15	25.35	24.55	14.95	16.25	10.50	10.00	9.50
4.15	26.45	25.65	15.60	17.00	11.00	10.50	10.00
4.15	27.55	26.75	16.25	17.75	11.50	11.00	10.50
4.15	28.65	27.85	16.90	18.50	12.00	11.50	11.00
4.15	29.75	28.95	17.55	19.25	12.50	12.00	11.50
4.15	30.85	30.05	18.20	20.00	13.00	12.50	12.00
4.15	31.95	31.15	18.85	20.75	13.50	13.00	12.50
4.15	33.05	32.25	19.50	21.50	14.00	13.50	13.00
4.15	34.15	33.35	20.15	22.25	14.50	14.00	13.50
4.15	35.25	34.45	20.80	23.00	15.00	14.50	14.00
4.15	36.35	35.55	21.45	23.75	15.50	15.00	14.50
4.15	37.45	36.65	22.10	24.50	16.00	15.50	15.00
4.15	38.55	37.75	22.75	25.25	16.50	16.00	15.50
4.15	39.65	38.85	23.40	26.00	17.00	16.50	16.00
4.15	40.75	39.95	24.05	26.75	17.50	17.00	16.50
4.15	41.85	41.05	24.70	27.50	18.00	17.50	17.00
4.15	42.95	42.15	25.35	28.25	18.50	18.00	17.50
4.15	44.05	43.25	26.00	29.00	19.00	18.50	18.00
4.15	45.15	44.35	26.65	29.75	19.50	19.00	18.50
4.15	46.25	45.45	27.30	30.50	20.00	19.50	19.00
4.15	47.35	46.55	27.95	31.25	20.50	20.00	19.50
4.15	48.45	47.65	28.60	32.00	21.00	20.50	20.00
4.15	49.55	48.75	29.25	32.75	21.50	21.00	20.50
4.15	50.65	49.85	29.90	33.50	22.00	21.50	21.00
4.15	51.75	50.95	30.55	34.25	22.50	22.00	21.50
4.15	52.85	52.05	31.20	35.00	23.00	22.50	22.00
4.15	53.95	53.15	31.85	35.75	23.50	23.00	22.50
4.15	55.05	54.25	32.50	36.50	24.00	23.50	23.00
4.15	56.15	55.35	33.15	37.25	24.50	24.00	23.50
4.15	57.25	56.45	33.80	38.00	25.00	24.50	24.00
4.15	58.35	57.55	34.45	38.75	25.50	25.00	24.50
4.15	59.45	58.65	35.10	39.50	26.00	25.50	25.00
4.15	60.55	59.75	35.75	40.25	26.50	26.00	25.50
4.15	61.65	60.85	36.40	41.00	27.00	26.50	26.00
4.15	62.75	61.95	37.05	41.75	27.50	27.00	26.50
4.15	63.85	63.05	37.70	42.50	28.00	27.50	27.00
4.15	64.95	64.15	38.35	43.25	28.50	28.00	27.50
4.15	66.05	65.25	39.00	44.00	29.00	28.50	28.00
4.15	67.15	66.35	39.65	44.75	29.50	29.00	28.50
4.15	68.25	67.45	40.30	45.50	30.00	29.50	29.00
4.15	69.35	68.55	40.95	46.25	30.50	30.00	29.50
4.15	70.45	69.65	41.60	47.00	31.00	30.50	30.00
4.15	71.55	70.75	42.25	47.75	31.50	31.00	30.50
4.15	72.65	71.85	42.90	48.50	32.00	31.50	31.00
4.15	73.75	72.95	43.55	49.25	32.50	32.00	31.50
4.15	74.85	74.05	44.20	50.00	33.00	32.50	32.00
4.15	75.95	75.15	44.85	50.75	33.50	33.00	32.50
4.15	77.05	76.25	45.50	51.50	34.00	33.50	33.00
4.15	78.15	77.35	46.15	52.25	34.50	34.00	33.50
4.15	79.25	78.45	46.80	53.00	35.00	34.50	34.00
4.15	80.35	79.55	47.45	53.75	35.50	35.00	34.50
4.15	81.45	80.65	48.10	54.50	36.00	35.50	35.00
4.15	82.55	81.75	48.75	55.25	36.50	36.00	35.50
4.15	83.65	82.85	49.40	56.00	37.00	36.50	36.00
4.15	84.75	83.95	50.05	56.75	37.50	37.00	36.50
4.15	85.85	85.05	50.70	57.50	38.00	37.50	37.00
4.15	86.95	86.15	51.35	58.25	38.50	38.00	37.50
4.15	88.05	87.25	52.00	59.00	39.00	38.50	38.00
4.15	89.15	88.35	52.65	59.75	39.50	39.00	38.50
4.15	90.25	89.45	53.30	60.50	40.00	39.50	39.00
4.15	91.35	90.55	53.95	61.25	40.50	40.00	39.50
4.15	92.45	91.65	54.60	62.00	41.00	40.50	40.00
4.15	93.55	92.75	55.25	62.75	41.50	41.00	40.50
4.15	94.65	93.85	55.90	63.50	42.00	41.50	41.00
4.15	95.75	94.95	56.55	64.25	42.50	42.00	41.50
4.15	96.85	96.05	57.20	65.00	43.00	42.50	42.00
4.15	97.95	97.15	57.85	65.75	43.50	43.00	42.50
4.15	99.05	98.25	58.50	66.50	44.00	43.50	43.00
4.15	100.15	99.35	59.15	67.25	44.50	44.00	43.50
4.15	101.25	100.45	59.80	68.00	45.00	44.50	44.00
4.15	102.35	101.55	60.45	68.75	45.50	45.00	44.50
4.15	103.45	102.65	61.10	69.50	46.00	45.50	45.00
4.15	104.55	103.75	61.75	70.25	46.50	46.00	45.50
4.15	105.65	104.85	62.40	71.00	47.00	46.50	46.00
4.15	106.75	105.95	63.05	71.75	47.50	47.00	46.50
4.15	107.85	107.05	63.70	72.50	48.00	47.50	47.00
4.15	108.95	108.15	64.35	73.25	48.50	48.00	47.50
4.15	110.05	109.25	65.00	74.00	49.00	48.50	48.00
4.15	111.15	110.35	65.65	74.75	49.50	49.00	48.50
4.15	112.25	111.45	66.30	75.50	50.00	49.50	49.00
4.15	113.35	112.55	66.95	76.25	50.50	50.00	49.50
4.15	114.45	113.65	67.60	77.00	51.00	50.50	50.00
4.15	115.55	114.75	68.25	77.75	51.50	51.00	50.50
4.15	116.65	115.85	68.90	78.50	52.00	51.50	51.00
4.15	117.75	116.95	69.55	79.25	52.50	52.00	51.50
4.15	118.85	118.05	70.20	80.00	53.00	52.50	52.00
4.15	119.95	119.15	70.85	80.75	53.50	53.00	52.50
4.15	121.05	120.25	71.50	81.50	54.00	53.50	53.00
4.15	122.15	121.35	72.15	82.25	54.50	54.00	53.50
4.15	123.25	122.45	72.80	83.00	55.00	54.50	54.00
4.15	124.35	123.55	73.45	83.75	55.50	55.00	54.50
4.15	125.45	124.65	74.10	84.50	56.00	55.50	55.00
4.15	126.55	125.75	74.75	85.25	56.50	56.00	55.50
4.15	127.65	126.85	75.40	86.00	57.00	56.50	56.00
4.15	128.75	127.95	76.05	86.75	57.50	57.00	56.50
4.15	129.85	129.05	76.70	87.50	58.00	57.50	57.00
4.15	130.95	130.15	77.35	88.25	58.50	58.00	57.50
4.15	132.05	131.25	78.00	89.00	59.00	58.50	58.00
4.15	133.15	132.35	78.65	89.75	59.50	59.00	58.50
4.15	134.25	133.45	79.30	90.50	60.00	59.50	59.00
4.15	135.35	134.55	79.95	91.25	60.50	60.00	59.50
4.15	136.45	135.65	80.60	92.00	61.00	60.50	60.00
4.15	137.55	136.75	81.25	92.75	61.50	61.00	60.50
4.15	138.65	137.85	81.90	93.50	62.00	61.50	61.00
4.15	139.75	138.95	82.55	94.25	62.50	62.00	61.50
4.15	140.85	140.05	83.20	95.00	63.00	62.50	62.00
4.15	141.95	141.15	83.85	95.75	63.50	63.00	62.50
4.15	143.05	142.25	84.50	96.50	64.00	63.50	63.00
4.15	144.15	143.35	85.15	97.25	64.50	64.00	63.50
4.15	145.25	144.45	85.80	98.00	65.00	64.50	64.00
4.15	146.35	145.55	86.45	98.75	65.50	65.00	64.50
4.15	147.45	146.65	87.10	99.50	66.00	65.50	65.00
4.15	148.55	147.75	87.75	100.25	66.50	66.00	65.50
4.15	149.65	148.85	88.40	101.00	67.00	66.50	66.00
4.15	150.75	149.95	89.05	101.75	67.50	67.00	66.50
4.15	151.85	151.05	89.70	102.50	68.00	67.50	67.00
4.15	152.95	152.15	90.35	103.25	68.50	68.00	67.50
4.15	154.05	153.25	91.00	104.00	69.00	68.50	68.00
4.15	155.15	154.35	91.65	104.75			

Wenn bei der Modellierung der BRDF eines Materials im Innenhof völlige Freiheit zugestanden wird, dann erreicht eine BRDF hervorragende Kenndaten, wenn sie das Licht vom Mittelpunkt der Eintrittsfläche des Innenhofs auf den betrachteten Punkt auf der Fassade reflektiert. Solche BRDFs können zwar theoretisch mit einem beliebigem Reflexionsgrad definiert werden, lassen sich aber in einem planen Material parallel zu den Wänden des Innenhofs nicht realisieren. Der Grund dafür ist die gegenseitige Verschattung der dafür notwendigen Mikro- oder Makrostrukturen auf dem Material. Damit stellte sich die direkte Optimierung von BRDFs als wenig zielführend heraus und wurde nicht weiterverfolgt.

Beispielhaft für diese Problematik ist der Versuch, die oben angeführte theoretische BRDF durch ein Fresnel-Ellipsoid zu realisieren. Während der maximale Tageslichtquotient in der Theorie $9/7 = 129\%$ beträgt (für eine „parabolische“ BSDF, die in den Zenit reflektiert), konnte durch Fresnel-Strukturen „nur“ $D_{\max} = 27\%$ realisiert werden.

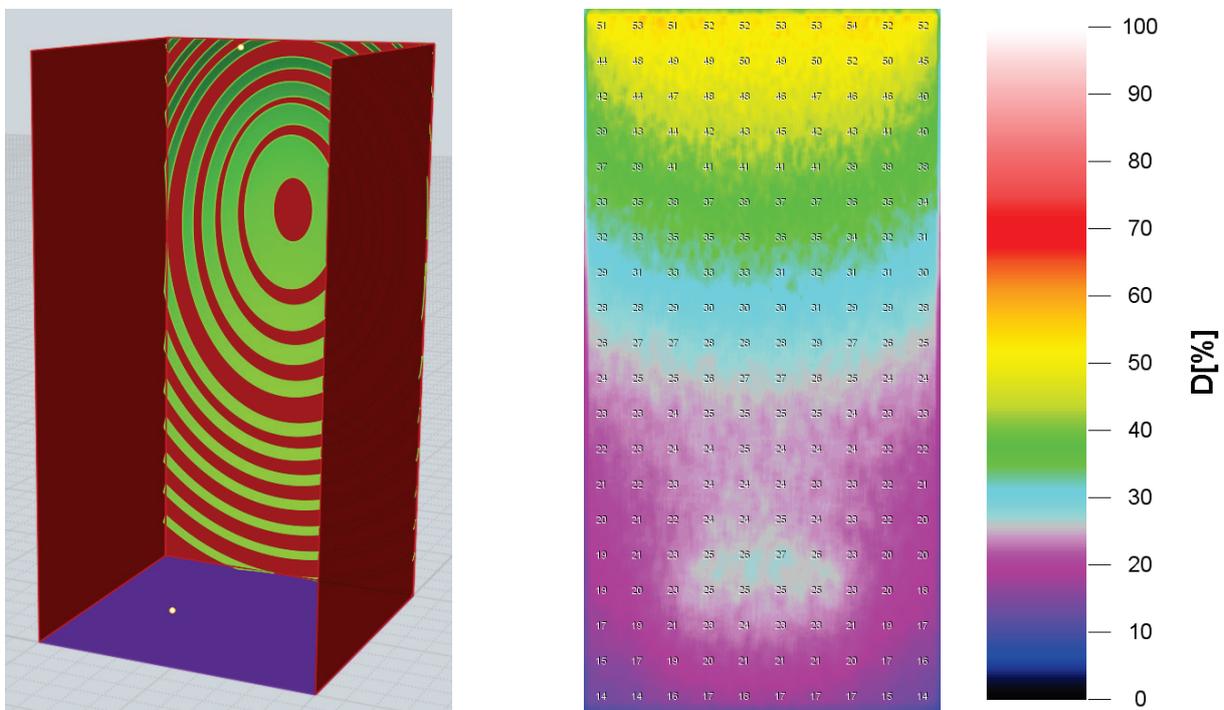


Abbildung 9: Fresnel-Ellipsoid auf gegenüberliegender Wand, $D_{\max} = 27\%$ (simuliert)

Als erfolgversprechend herausgestellt hat sich die lichttechnische Optimierung der Struktur, die einer BRDF zugrunde liegt. Mit einem ähnlichen Konzept wurden von Bartenbach im Bereich Kunstlicht bereits „leuchtende Fenster“ unter Verwendung eines speziell entwickelten Strukturblechs umgesetzt (Skybright von Alanod <http://alanod.com/de/produkte/eloxal/struktur>, Aluminium).

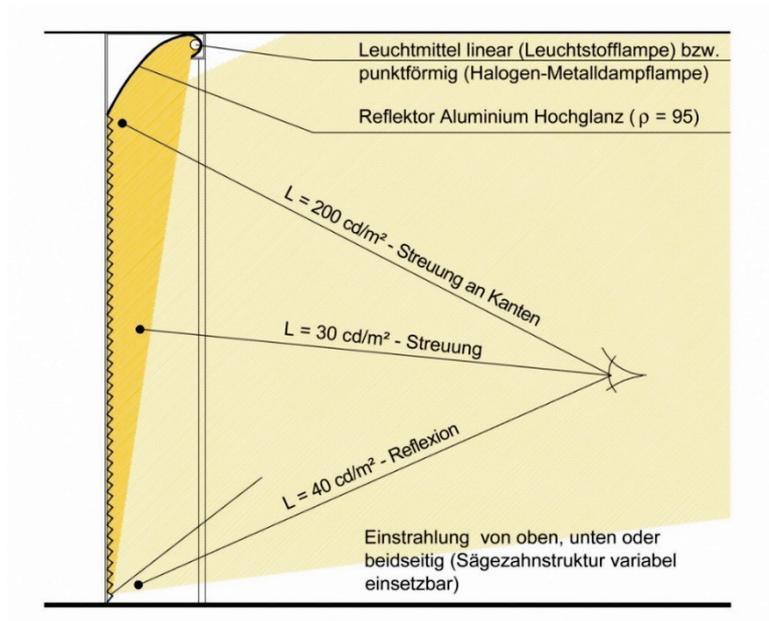


Abbildung 10: Strukturblech zur Lichtumlenkung, Prinzip-Bild



Abbildung 11: Leuchtende Wand als praktische Umsetzung eines Strukturblechs zur Lichtumlenkung

Auch im Innenhof kann durch den Einsatz solcher, nach lichttechnischen Vorgaben ermittelten, speziell strukturierten Oberflächen der Tageslichteintrag besonders in bodennahen Räumen noch einmal deutlich erhöht werden. Allerdings müssen diese Materialien erst entwickelt und als Produkte umgesetzt werden, da sie derzeit für einen Einsatz im Innenhof nicht zur Verfügung stehen.

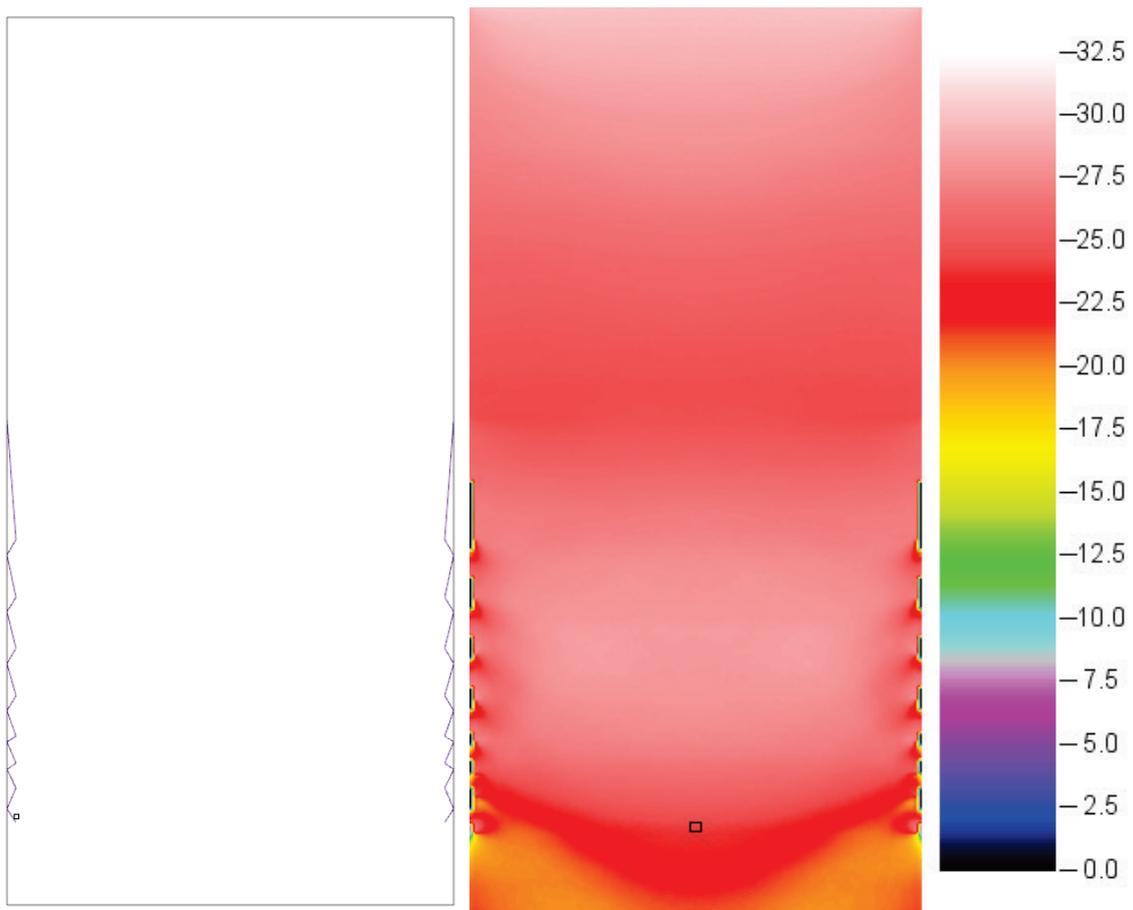


Abbildung 12: Optimierte Struktur im Innenhof zur gezielten Umlenkung des Tageslichts (links), resultierende Tageslichtquotienten hinter dem Fenster im Verlauf über den gesamten Innenhof (rechts)

Durch bauliche Maßnahmen im Innenhof (Zwischendächer mit lichtlenkenden Systemen oder reflektorische Strukturen am Boden des Innenhofs) kann die Verfügbarkeit von Tageslicht in ausgesuchten Stockwerken weiter gezielt erhöht werden. Allerdings sind solche Eingriffe kostenintensiv und reduzieren die Tageslichtnutzung in anderen Geschoßen. Außerdem stellen sie einen Eingriff in die Architektur dar und müssen daher vom Architekten unterstützt und gegebenenfalls bezüglich Erscheinungsbild geprüft werden (Stichwort Denkmalschutz). Derartige Konzepte sind daher nur als Sonderlösungen umsetzbar.

Für das Gros der Innenhöfe können aber auf Basis der Vorabberechnung der lichttechnischen Wirkung ausgewählter Materialien (siehe 2.1.2) mit Hilfe einer einfachen ersten Variante des Innenhof-Kalkulators (siehe 2.1.3) gezielt Verbesserungsvorschläge für eine optimierte Tageslichtnutzung erstellt werden.

2.1.2 Anforderungen an Materialien, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit ("Praxis")

Materialien, die im Außenbereich zum Einsatz kommen, müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, etwa in Bezug auf

- Brandverhalten
- Bruchfestigkeit
- Abriebfestigkeit
- Hitzebeständigkeit
- Frostbeständigkeit

Dadurch soll einerseits eine lange Einsatzfähigkeit und andererseits möglichst große Sicherheit in Extremsituationen (Brand, Erdbeben, ...) gewährleistet werden. Die Klassifizierungen und Definitionen sind in teilweise produktspezifischen Normen festgehalten, etwa DIN 4102, DIN EN ISO 4892, DIN EN ISO 10545, DIN EN 13501, DIN EN 14509 und DIN 51130.

Eine Vielzahl von Herstellern bieten entsprechende Produkte an, wobei die Datenblätter keine lichttechnisch relevanten Informationen enthalten. Normalerweise können die Firmen keine Aussagen zu den Reflexionsgraden der Materialien machen.

Eine Ausnahme bildet MIRO-SUN <http://www.bluetec.eu/de/Reflexion> von Alanod-Solar, das speziell für den Außeneinsatz konzipiert ist. Die langfristige Haltbarkeit hängt stark von der nachträglichen Verarbeitung ab. Der Aufbau der Paneele und speziell der Schutz des Rands des Bandmaterials sind entscheidend. Dementsprechend ist es für den Hersteller problematisch, Garantien in der Anwendung abzugeben, was den Einsatz dieses Material in Planungsprojekten erschwert.

Ein weiteres Problem stellt in vielen Projekten die Akzeptanz von ideal spiegelnden Oberflächen dar. Solche Flächen wirken wie Spiegel und die hervorgerufene Entmaterialisierung wird von Architekten und Nutzern häufig nicht akzeptiert. Dieser unerwünschte Effekt kann durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden:

- Bedruckung
- Lochung
- ausreichender Anteil an gestreuter Reflexion
- Formgebung, die den Eindruck eines planen Spiegels vermeidet

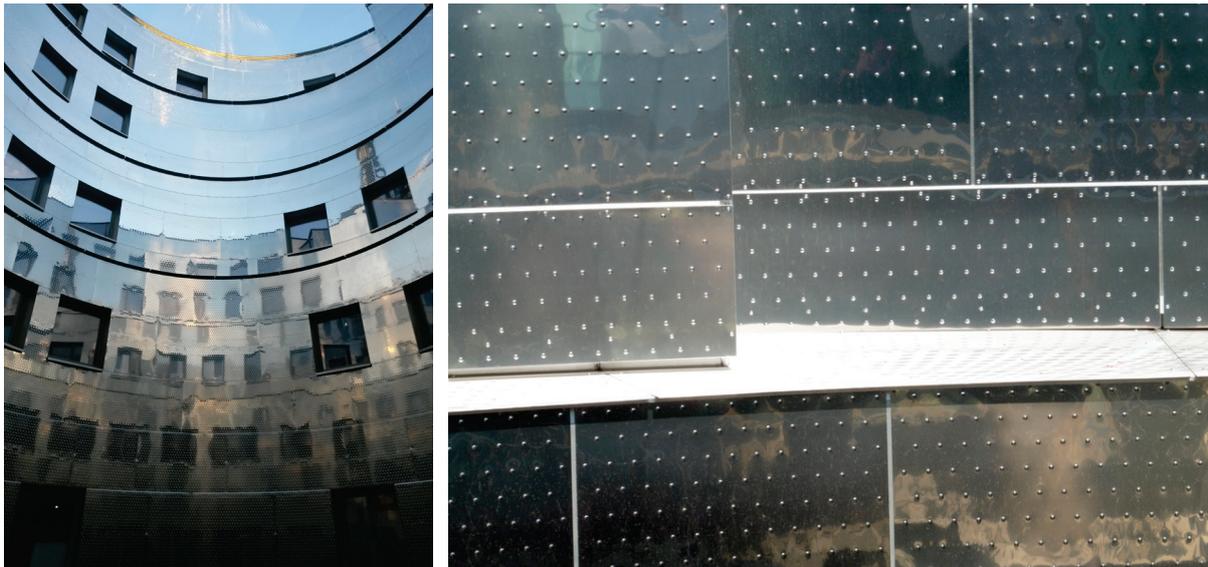


Abbildung 13: Projektbeispiel: Innenhof eines Wiener Hotels mit verspiegelten Oberflächen (links), Detailansicht Material mit Prägung um Entmaterialisierung zu minimieren (rechts)

Für Anwendungen im Innenbereich hat Bartenbach in den letzten Jahren selbst neue Materialien entwickelt, die vom Grundkonzept her auch für eine Anwendung im Innenhof geeignet sind.

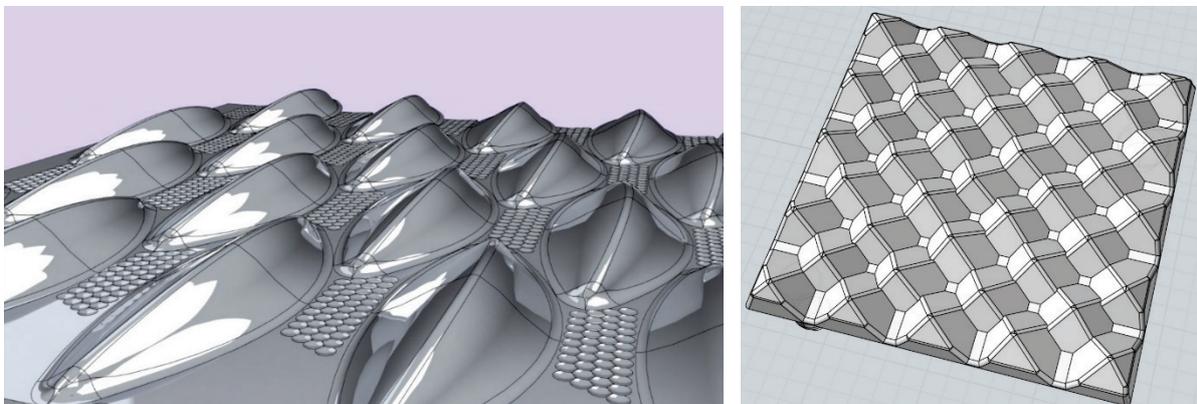


Abbildung 14: Muschel-Material und Pyramiden (Bartenbach, Muster realisiert für Innenraum-Nutzung)

Die Kosten für die Anbringung solcher Materialien in einem Innenhof variieren je nach

- Materialkosten
- Ausführung der Unterkonstruktion
- Brandschutzmaßnahmen
- Wärmedämmung
- benötigten Mengen
- Aufwand für die Montage

Die preiswerteste Verbesserungsmöglichkeit ($\sim 20 \text{ €/m}^2$) für die Wände ist ein neuer, weißer Anstrich mit möglichst hohem Reflexionsgrad. Auch ein weißer Boden kann durch eine Kiesschicht ($\sim 8 \text{ €/m}^2$) oder die Verlegung von Steinplatten ($\sim 25 \text{ €/m}^2$) sehr günstig realisiert werden, wobei die angegebenen reinen Materialkosten im Vergleich zum Arbeitsaufwand gering sind. Für Metallfassaden, bestehend aus Paneelen und einer Unterkonstruktion ohne zusätzliche Isolierung, muss mit Kosten von $\sim 200 - 1200 \text{ €/m}^2$ gerechnet werden. Preiswerte Fassadenpaneele sind zwar bereits ab $\sim 20 \text{ €/m}^2$ erhältlich, können aber in hochwertigen Spezialausführungen auch mit über 400 €/m^2 zu Buche schlagen. Dazu kommen die Kosten für die Unterkonstruktion, etwaige zusätzliche Brandschutz- und Wärmedämmungsmaßnahmen und die Montage selbst.

Für eine deutliche Anhebung der Tageslichtnutzung besonders in tiefen Innenhöfen in Bodennähe sind Materialien mit einem hohen Anteil an gerichteter Reflexion äußerst vorteilhaft. Somit gilt es, ein optimales Kosten-Nutzen Verhältnis für den Einsatz unterschiedlicher Materialien zu erreichen, das auf die konkrete bauliche Situation und die Nutzung zugeschnitten ist.

Ein erstes, einfaches Hilfsmittel dafür steht jetzt in Form eines konzeptuellen Innenhof-Kalkulators (siehe 2.1.3) zur Verfügung.

Für eine breite Umsetzung möglichst hochwertiger Lösungen für den Innenhof wären jedoch zusätzliche Schritte notwendig

- Entwicklung bzw. reale Umsetzung von neuen, speziell auf die Tageslichtnutzung im Innenhof zugeschnittenen, möglichst preiswerten Materialien
- ausgereiftes Tool zur Verfügung stellen, um eine optimale Kombination verfügbarer Materialien für konkrete Projekte zu ermitteln

Drei Innenhof-Modelle sind in der Lichtwelt der „Bartenbach academy“ in die interaktiv bedienbare Schautafel „Innenhöfe / Courtyards“ integriert worden (siehe Abbildung 20).

2.1.3 Konzept für einen Innenhof-Kalkulator ("Tool")

Im Rahmen der Prüfung der Möglichkeit der lichttechnischen Optimierung von Innenhöfen mit einem einfach zu bedienenden Berechnungstool ("Innenhof-Kalkulator") wurde bereits ein erstes Konzept in einem Excel-Programm umgesetzt.

Die Geometrie des Innenhofs (Länge, Breite und Höhe) und die Reflexionsgrade der Fassade und des Bodens können dabei ebenso vorgegeben werden, wie die Fenstergröße und die Transmission der Verglasung. Das Tool kann derzeit für neun unterschiedliche Fassadenausführungen sowohl den Verlauf des Tageslichtquotienten außen auf den

Wänden im Innenhof, als auch auf Nutzebenen in Standardräumen in verschiedenen Geschossen ermitteln.

Die dafür benötigten aufwändigen Vorabberechnungen mit Radiance (<http://www.radiance-online.org/>) sind direkt im Tool als Datenbank enthalten. Dadurch kann „auf Knopfdruck“ eine vergleichende Bewertung aller neun Fassadenausführungen erfolgen und die im Projekt optimale Lösung durch einen Vergleich der Ergebnisse ausgewählt werden.

INNENHOF-KALKULATOR
v1.0/25.04.2016

Bartenbach
research & development

		MIN	MAX
IH_Länge	9.0 m	5.0	25.0
IH_Breite	8.0 m	5.0	25.0
IH_Höhe	27 m	6.0	30.0
Fassade	diffus		
Rho Fassade	75 %	10	90
Rho Boden	25 %	10	70
Fenstergröße über Brüstung	3 m ²	0	6
τ Verglasung	75 %	0	100
Faktor Verschmutzung	90 %	0	100

Abbildung 15: Innenhof-Kalkulator, Eingabemaske

INNENHOF-KALKULATOR
v1.0/25.04.2016

Bartenbach
research & development

		MIN	MAX
IH_Länge	9.0 m	5.0	25.0
IH_Breite	8.0 m	5.0	25.0
IH_Höhe	27 m	6.0	30.0
Fassade	diffus		
Rho Fassade	75 %	10	90
Rho Boden	25 %	10	70
Fenstergröße über Brüstung	3 m ²	0	6
τ Verglasung	75 %	0	100
Faktor Verschmutzung	90 %	0	100

Options for Fassade dropdown:

- spiegelnd
- diffus
- obere 30% verspiegelt
- obere 50% verspiegelt
- obere 70% verspiegelt
- obere 90% verspiegelt
- verlaufend verspiegelt - diffus
- verlaufend verspiegelt - 50/50

Abbildung 16: Innenhof-Kalkulator, Auswahl der Fassadenausführung (9 Varianten)

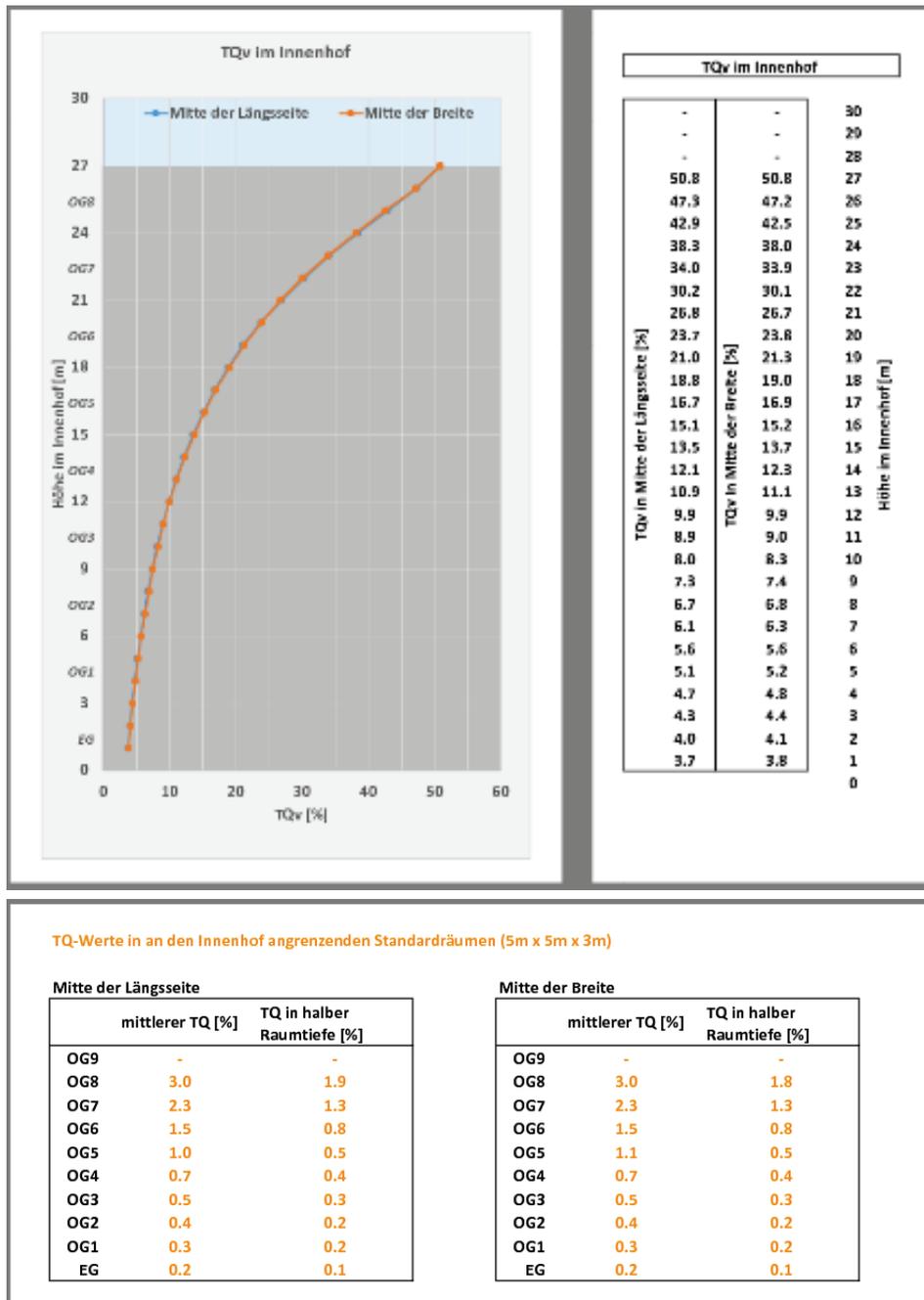
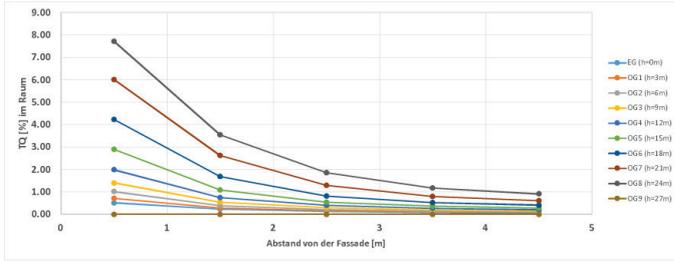
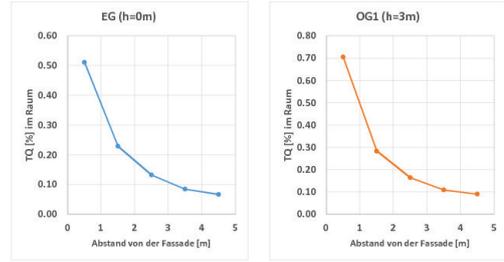


Abbildung 17: Innenhof-Kalkulator, Tageslichtquotient auf Fassade und in Standardraum

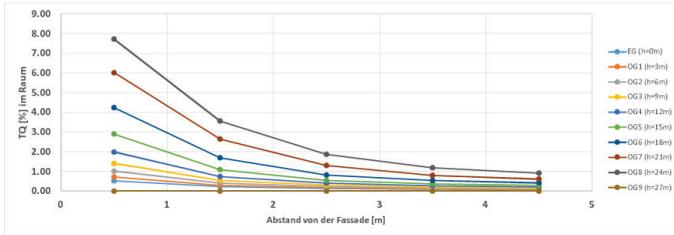
TQ-Verlauf im Standardraum (5m x 5m x 3m) in der Mitte der Längsseite



TQ-Werte in Räumen in Mitte der Längsseite



TQ-Verlauf im Standardraum (5m x 5m x 3m) in der Mitte der Breite



TQ-Werte in Räumen in Mitte der Breite

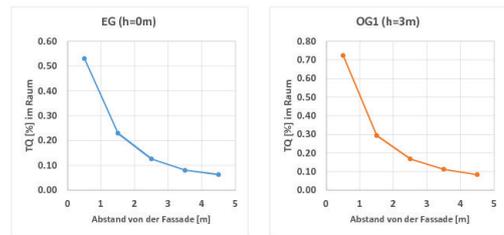


Abbildung 18: Innenhof-Kalkulator, Tageslichtquotienten-Verlauf in den Geschossen (Bsp. EG + OG1)

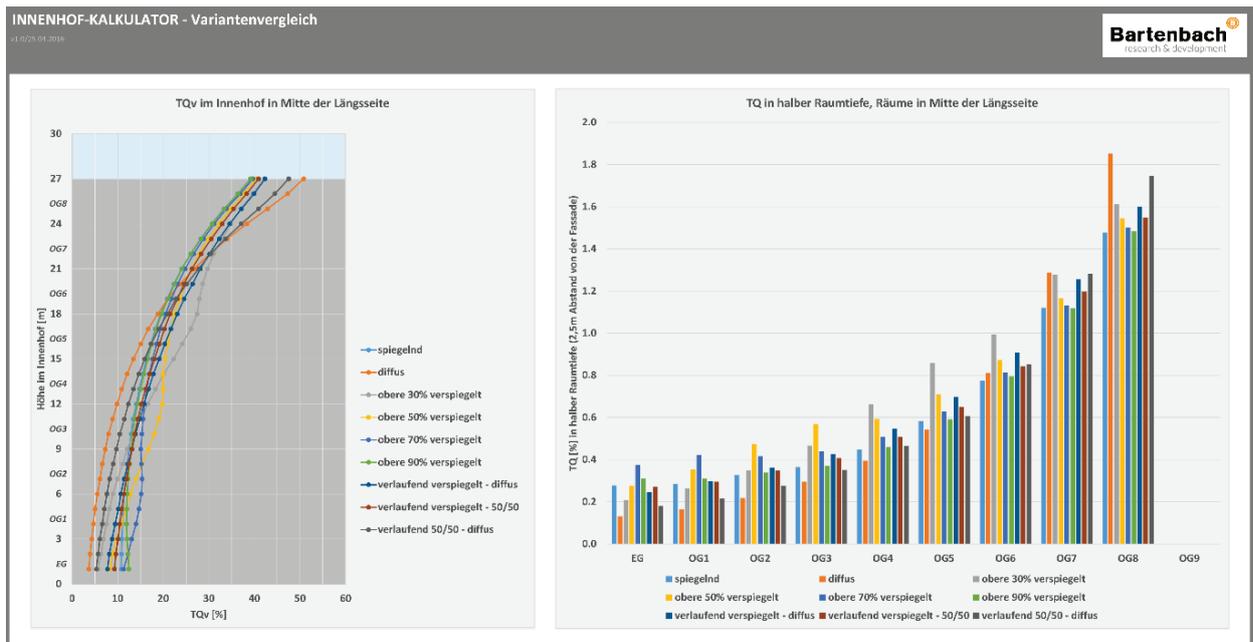


Abbildung 19: Innenhof-Kalkulator, Variantenvergleich

Im gezeigten Beispiel (Abbildung 17 bis Abbildung 19) eines sehr tiefen Innenhofs (Geometrie 9 m x 8 m, Höhe 27 m mit neun Geschossen á 3 m) sieht man den Unterschied verschiedener Sanierungsansätze sehr gut. Wenn im Bestand Wände und Boden durch Verschmutzung eine graue Färbung mit einem durchaus üblichen Reflexionsgrad von 20% aufweisen, resultiert ein Tageslichtquotient im 1. Obergeschoß in einem Standardraum in Raummitte von nur 0.02%. Im Vergleich dazu liefert ein einfach sanierter, heller Innenhof (neuer, weißer Anstrich, Reflexionsgrad der Fassade 75%) einen Tageslichtquotienten von 0.16% und damit achtmal so viel Tageslicht. Durch eine Verspiegelung der oberen 70% des

Innenhofs lässt sich dieser Wert sogar auf 0.42% erhöhen, was einer Erhöhung des Tageslichtquotienten um einen Faktor von 21 entspricht.

Mit diesem einfachen Tool können ohne Eingabeaufwand „in Echtzeit“ erste Aussagen zur Tageslichtverfügbarkeit in Innenhöfen sowie in angrenzenden Räumen gemacht und das Verbesserungspotenzial dargestellt werden.

2.2 Innovationen

Dieses Sondierungsprojekt stellt einen Schritt in die Richtung der qualitativen Aufwertung der Gebäudesanierung dar. Bis dato liegt der Fokus dabei meist auf der Verbesserung der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle, die Ergebnisse dieses Projekts helfen darüber hinaus auch die Komponente "Tageslicht" in der Sanierung optimal abzudecken. Da die Untersuchungen zu Materiallösungen für Innenhöfe und den Möglichkeiten eines entsprechenden Berechnungstools sehr grundlegend ausgerichtet sind, können die Resultate aber gleichermaßen auf die verdichtete Bauweise neuer Projekte mit Innenhöfen angewandt werden.

Die Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur zum Thema optimaler Innenhöfe oder Atrien untersuchen den Einfluss der Geometrie des Innenhofs auf die Tagesbelichtung. Werden darüber hinaus Überlegungen zum Material angestellt, beschränken sich diese immer auf unterschiedliche Reflexionsgrade diffuser Oberflächen. Die Umsetzung in die Praxis spiegelt sich darin wider, auch hier werden - sofern überhaupt lichttechnische Überlegungen angestellt werden - Geometrien oder diffuse Oberflächen geplant.

Im Gegensatz dazu wurden in diesem Projekt gezielt die unterschiedlichen Eigenschaften von Materialien (spiegelnd, streuend, diffus), d.h. deren BRDF, untersucht und dazu genutzt, optimale Kombinationen abzuleiten. Dadurch kann das wichtige "Medium" Tageslicht verstärkt Einzug in die Diskussion, Planung und Ausführung von Innenhofprojekten finden.

Die Überlegungen zum "Innenhof-Kalkulator" stellen in dieser Form eine komplette Neuerung dar. Bisherige Ansätze versuchen die Auswirkungen von Geometrien oder Oberflächenreflexionsgraden auf die Tagesbelichtung im Innenhof abzuschätzen. Im vorliegenden Projekt wurde aber ein Konzept erstellt, das für vorgegebene Zielgrößen und Randbedingungen eine optimale Innenhoflösung liefert und dabei spiegelnde Oberflächen und Kombinationen aus diffusen und spiegelnden Flächen berücksichtigt.

Zusammengefasst, bieten die Ergebnisse des vorliegenden Sondierungsprojektes in zwei wesentlichen Bereichen Neuerungen bzw. Verbesserungen zum aktuellen Stand der Technik:

1. Konzepte für **lichttechnisch optimierte Innenhoflösungen**, d.h. optimale Materialien bzw. Materialanordnungen

2. Einen **Ansatz für ein neuartiges Berechnungstool**, um derartige Lösungen zu erstellen und planbar zu machen

2.3 Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms

Das zentrale Ausschreibungsziel, das mit diesem Sondierungsprojekt erreicht wird, ist: *„Beitrag zur Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und zur Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz“*, im speziellen *„Energie- und ressourceneffizient sanierte und neu geschaffene bzw. modernisierte Infrastruktureinrichtungen (Gebäude)“*. Die Anwendung lichttechnisch optimierter Low-Tech Lösungen in Innenhöfen führt zu signifikanten Verbesserungen der Tageslichtversorgung in den angrenzenden Räumen und somit zur Reduktion des Kunstlichtbedarfs (Energieeinsparung).

Die Firma Bartenbach kann durch derartige Lösungen ihre Innovationsführerschaft am Markt behaupten, wodurch ihre Stellung am Markt und damit auch der Wirtschaftsstandort Österreich gestärkt wird. Die aus der Sondierung erwachsenden Ideen werden nach Möglichkeit patentiert und somit der Vorsprung im Know-How und am Markt sichergestellt. Weiterführend erfolgt die Verwertung über Lizenzen, die an die entsprechende Industrie vergeben werden sowie über die Umsetzung in Planungsprojekten bei Bartenbach. Damit wird ein Beitrag zum Ziel *„Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte“* erreicht.

3 Schlussfolgerungen

Allgemein stellen die Überprüfung der Machbarkeit von lichttechnisch optimierten Materialkonzepten für Innenhöfe sowie die Untersuchung des entsprechenden Berechnungskonzeptes die wesentlichen Ergebnisse dieses Sondierungsprojektes dar. Zusammenfassend lassen sich die Projektergebnisse folgendermaßen auflisten:

- Machbarkeitsanalyse zur optimalen Tageslichtversorgung von Räumen durch Innenhöfe
- Modulares Material-Konzept
- Anforderungskatalog an Materialien zur Verwendung in Innenhöfen aus lichttechnischer und bautechnischer Sicht inklusive Kostenabschätzung
- Exemplarische Auflistung optimierter Innenhofkonzepte für einzelne Randbedingungen inkl. deren Evaluierung
- Dokumentation notwendiger fortführender Forschungs- bzw. Entwicklungsarbeiten zur Umsetzung der Konzepte
- Konzeptevaluierung des "Innenhof-Kalkulators"

Durch die lichttechnisch optimale Nutzung von Innenhöfen steigt neben der Tagesbelichtung (mit entsprechender Energieeinsparung für Kunstlicht) auch die visuelle Qualität. Eine Vielzahl von innenhofangrenzenden Räumen wird dadurch als Wohnraum oder Arbeitsbereich nutzbar.

3.1 Nutzbarkeit

Als Sondierungsvorhaben wurde in diesem Projekt die Machbarkeit lichttechnisch optimierter Innenhoflösungen evaluiert. Die daraus resultierenden Ergebnisse dienen daher primär als Ausgangspunkt für eine nachfolgende Detailbearbeitung der Fragestellungen im Rahmen eines kooperativen Forschungsprojekts mit potenziellen Herstellern.

In weiterer Folge sollen Gebäudeplaner, Bauherren und Investoren davon profitieren, indem sie in Sanierungsprojekten Innenhöfe gezielt für die Tagesbelichtung nutzen können. Dadurch werden speziell die unteren Geschoße deutlich aufgewertet bzw. für gewisse Anwendungen nutzbar oder bewohnbar gemacht. So müssen etwa in Büroräumen normative Vorgaben für die Tagesbelichtung eingehalten werden (mittlerer TQ von 0.9% in halber Raumtiefe nach EN 12464). Für den Endkunden resultiert die Verbesserung der Tagesbelichtung von Räumen in höherer visueller Qualität sowie in gestärktem Wohlbefinden (nichtvisuelle, biologische Lichtwirkungen).

Wie die Zusammenfassung zum Stand der Wissenschaft und zum Stand der Technik in 1.2.1 zeigt, werden variierende und spezielle Eigenschaften von Materialien für die Anwendung im Innenhof bis dato nicht berücksichtigt. Dadurch bietet sich für Bartenbach die Chance auf ein

Alleinstellungsmerkmal und ein erneutes Aufzeigen der Innovationsführerschaft im Bereich Tageslicht.

In weiterer Folge sollen die Ergebnisse zu neuen Materialien, d.h. zu neuen Produkten am Markt führen. Diese können etwa in Form von Paneelen als Baukastensystem für das Innenhofdesign von Architekten und Fachplanern verwendet werden. Das konzipierte Berechnungstool kann dabei - durch einfache Bedienbarkeit nutzerfreundlich gestaltet - behilflich sein.

Anfang 2016 wurde in den Räumen der Bartenbach academy die „Bartenbach Lichtwelt“ fertiggestellt. Sie bietet eine Plattform des Austauschs und der Inspiration zu dem vielschichtigen Thema Licht. Technisch-physikalische Aspekte spielen genauso eine Rolle wie gestalterische und wahrnehmungspsychologische Perspektiven. Info-Tafeln, großformatige Fotografien, Modelle und 1:1 Präsentationsräume bringen alles Wissenswerte rund um dieses faszinierende Medium sowie zu Lichtforschung und -planung näher. Für die Lichtwelt wurden drei Modelle zum Thema „Beleuchtung von Innenhöfen“ in eine interaktiv bedienbare Schautafel („Innenhöfe / Courtyards“) integriert. Im Rahmen der „Langen Nacht der Forschung“ am 22.04.2016 wurde die Lichtwelt erstmals einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt.

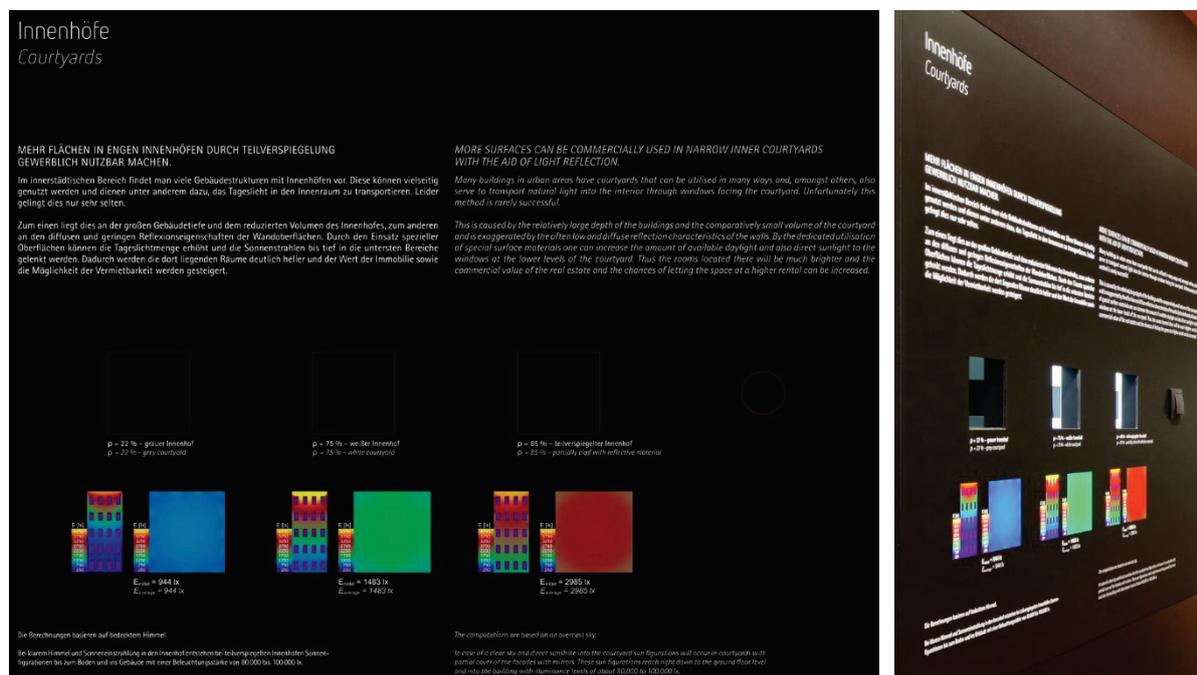


Abbildung 20: Bartenbach academy / Lichtwelt, Innenhöfe (Druckvorlage + Foto der Schautafel)

Mit der eigenen Informationsbroschüre „courtyards“ wird Stakeholdern das Thema und die Relevanz der Tagesbelichtung über Innenhöfe nähergebracht.

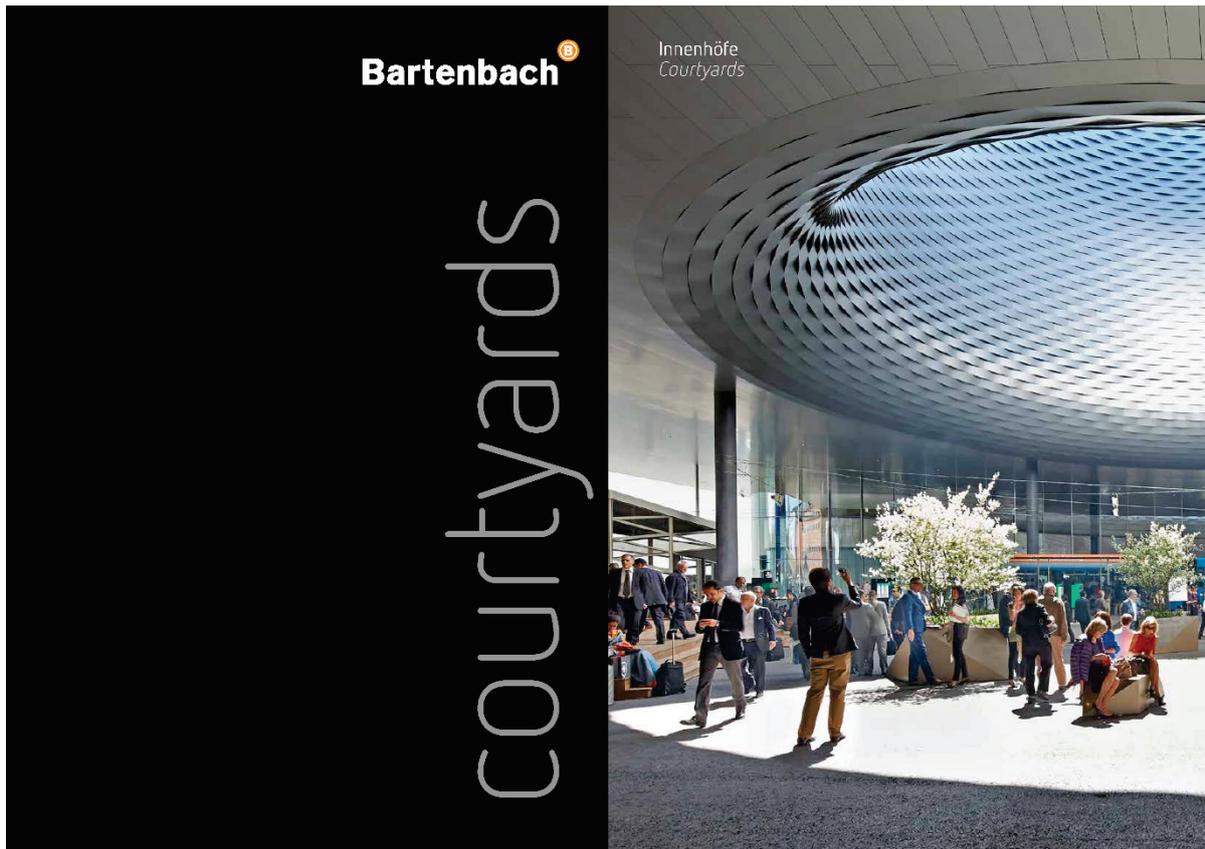


Abbildung 21: Informationsbroschüre „courtyards“

3.2 Marktpotential

Laut Aussage von Arnold Immobilien (Wien) "liegt der Verkehrswert von Altbau-Immobilien mit Innenhöfen in der Wiener Innenstadt für die oberen Geschoße (OG3 - OG5) bei ca. 6.000 €/m² - 10.000 €/m². Die unteren Geschoße (OG1/OG2) werden aufgrund der schlechten Tagesbelichtung mit einem reduzierten Verkehrswert von lediglich 50% der oberen Geschoße bewertet. Eine Verbesserung der Tageslichteigenschaften der unteren Stockwerke durch einen tagesbelichteten Innenhof wird den Verkehrswert erheblich steigern."

Bartenbach wurde im Rahmen von Sanierungsprojekten immer wieder mit der Problematik der Nutzung von Innenhöfen zur Tagesbelichtung konfrontiert. Die Erfahrungen daraus zeigen, dass Bauherren und Investoren bereit sind, in optimierte Lösungen zu investieren, um daraus einen Mehrwert für das sanierte Gebäude zu generieren.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die demonstrierte Machbarkeit von Konzepten zur optimierten Tageslichtversorgung über Innenhöfe sowie deren Design bzw. Planung können als Grundlage für ein nachfolgendes Forschungsprojekt dienen. Dazu muss ein Projektkonsortium zusammengestellt werden, in dem die lichttechnische Expertise von Bartenbach durch einen wissenschaftlichen Partner mit Expertise im Bereich Bauingenieurwissenschaften / Bauphysik und zumindest einem Industriepartner mit Möglichkeiten zur Herstellung spezieller Fassadenlösungen für Innenhöfe ergänzt wird.

Bartenbach ist bereits in vertraulichem Kontakt mit Herstellern zur Realisierung von speziellen hochreflektierenden Aluminiumqualitäten, die außertauglich sind und vor allem in Innenhöfen zum Einsatz kommen würden. Diese sind bis dato jedoch plan und weisen keine optimierten Spezial-Strukturen auf. Hier soll gezielt auf lichttechnisch optimierte Lösungen hingearbeitet werden.

Daraus entstehen in weiterer Folge konkrete Konzepte und Planungsvorgaben für lichttechnisch optimierte Innenhöfe, die sowohl für Sanierungsprojekte aber auch im Neubau dichter Gebäudestrukturen anwendbar sind.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Innenhöfe im dicht bebauten, urbanen Bereich (Ausschnitt: Wien I. Bezirk) ©2014 Google	8
Abbildung 2: Fischaugenbild mit Sonnenstandsdiagramm eines Wiener Innenhofs.....	8
Abbildung 3: Inner courtyards in a densely built-up area (picture detail: Vienna, district I) ©2014 Google	11
Abbildung 4: Fisheye image with sun path diagram of an inner courtyard in Vienna.....	11
Abbildung 5: Beispiel eines Wiener Innenhofs mit dunklen Oberflächen und offensichtlich schlechtem Lichttransport in die unteren Geschoße.	14
Abbildung 6: Innenhof mit spiegelnder oberer und diffuser unterer Hälfte.....	20
Abbildung 7: Innenhof mit Höhe zu Länge = 4:1, Berechnung von Tageslichtquotienten.....	21
Abbildung 8: Fassadenvarianten in den Zeilen Z1 – Z8 in obiger Tabelle (Abbildung 7).....	21
Abbildung 9: Fresnel-Ellipsoid auf gegenüberliegender Wand, $D_{max} = 27\%$ (simuliert)	22
Abbildung 10: Strukturblech zur Lichtumlenkung, Prinzip-Bild	23
Abbildung 11: Leuchtende Wand als praktische Umsetzung eines Strukturblechs zur Lichtumlenkung	23
Abbildung 12: Optimierte Struktur im Innenhof zur gezielten Umlenkung des Tageslichts (links), resultierende Tageslichtquotienten hinter dem Fenster im Verlauf über den gesamten Innenhof (rechts)	24
Abbildung 13: Projektbeispiel: Innenhof eines Wiener Hotels mit verspiegelten Oberflächen (links), Detailansicht Material mit Prägung um Entmaterialisierung zu minimieren (rechts)...	26
Abbildung 14: Muschel-Material und Pyramiden (Bartenbach, Muster realisiert für Innenraum-Nutzung)	26
Abbildung 15: Innenhof-Kalkulator, Eingabemaske	28
Abbildung 16: Innenhof-Kalkulator, Auswahl der Fassadenausführung (9 Varianten).....	28
Abbildung 17: Innenhof-Kalkulator, Tageslichtquotient auf Fassade und in Standardraum...	29
Abbildung 18: Innenhof-Kalkulator, Tageslichtquotienten-Verlauf in den Geschoßen (Bsp. EG + OG1)	30
Abbildung 19: Innenhof-Kalkulator, Variantenvergleich.....	30
Abbildung 20: Bartenbach academy / Lichtwelt, Innenhöfe (Druckvorlage + Foto der Schautafel).....	34
Abbildung 21: Informationsbroschüre „courtyards“	35

5.2 Literaturverzeichnis

- [advanced buildings, 2016] advanced buildings - Daylight Pattern Guide: *Pattern 6: Courtyard Depth and Width* (zuletzt aufgerufen 20.07.2016)
- [Bittencourt, 2001] Bittencourt L., Melo M.: *Daylighting of Classrooms through Courtyards*, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001
- [Du, 2009] Du J., Sharples S.: *Computational Simulations for Predicting Vertical Daylight Levels in Atrium Buildings*, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 2009
- [Du, 2010] Du J., Sharples S.: *Daylight in atrium buildings: Geometric shape and vertical sky components*, Lighting Research and Technology, 42, 2010
- [Du2, 2009] Du J., Sharples S.: *Daylight Prediction in Atrium Buildings: Measurement, Theoretical Analysis and Simulation*, PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 2009
- [Du, 2012] Du J., Sharples S.: *The assessment of vertical daylight factors across the walls of atrium buildings, Part 1: Square atria / Part 2: Rectangular atria*, Lighting Research and Technology, 44, 2012
- [Du, 2011] Du J., Sharples S., Johnson: *A model study of the daylight and energy performance of rooms adjoining an atrium well*, World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, 2011
- [Freewan, 2011] Freewan A. A., *Modifying Courtyard Wall Geometries to Optimize the Daylight Performance of the Courtyard*, Sustainability in Energy and Buildings, Smart Innovation, Systems and Technologies Volume 7, 2011
- [Ghasemi, 2013] Ghasemi M., Kandar M. Z., Noroozi M., Yazdipour F., Namaziyan S., Roshan M.: *Capability of Computer Simulation Software for Predicting Average Daylight Factors in a Vertical Top-Light Atrium*, Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2013
- [Laouadi, 2000] Laouadi A., Atif M.R.: *Daylight availability in top-lit atria: prediction of skylight transmittance and daylight factor*, Lighting Research and Technology, 32, 2000
- [Leisch, 1983] Leisch E., Scheiterle G.: *Wiener Innenhöfe. Eine photographische Betrachtung von Erich Leisch und Gerhard Scheiterle erläutert nach Wiener Chroniken*, Hrsg. Langthaler Gerhart, Wien Edition A im Verlag Christian Brandstätter, 1983
- [Tregenza, 1997] Tregenza P.R.: *Daylight attenuation in top-lit atria*, Lighting Research and Technology, 29, 1997
- [wien.gv.at, 2016] <http://www.wien.gv.at/spaziergang/innenhoefe/> (zuletzt aufgerufen am 19.07.2016)

[Wright, 1998] Wright J.C., Letherman K.M.: Illuminance in atria: Review of prediction methods, *Lighting Research and Technology*, 30, 1998

[Yunus, 2011] Yunus J., Ahmad S., Zain-Ahmed A.: Analysing the Impact of Roof Obstructions on Daylight Levels in Atrium Buildings: Physical Scale Model Measurements under Real Sky Conditions, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, IPCBEE vol.6, 2011

[Yunus2, 2011] Yunus J., Ahmad S., Zain-Ahmed A.: Evaluating Daylighting of Glazed Atrium Spaces through Physical Scale Model Measurements under Real Tropical Skies Condition, Recent Researches in Energy, Environment, Entrepreneurship, Innovation, Lanzarote, Spain, 2011



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)