

LichtAusFassade

Optimierte Tages- und Kunstlichtversorgung über Fassaden
Beurteilung der Energiebilanz und der visuellen Qualität

W. Pohl

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

26/2012

Impressum:

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

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

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

LichtAusFassade

Optimierte Tages- und Kunstlichtversorgung über Fassaden
Beurteilung der Energiebilanz und der visuellen Qualität

Mag. Wilfried Pohl, Mag. Christian Knoflach,
DI Dr. David Geisler-Moroder
Bartenbach LichtLabor GmbH

Prof. DI Dr. Wolfgang Streicher, DI Daniel Neyer, DI Martin Hauer
Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen –
Gebäudetechnik und erneuerbare Energien

DI Dr. Mario J. Müller
FIBAG (Hans Höllwart – Forschungszentrum für integrales
Bauwesen AG)

Ing. Johann Gerstmann
Ingenieurbüro Johann Gerstmann

Aldrans, Dezember 2011

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Abstract	9
1 Einleitung.....	11
2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt	12
2.1 Beschreibung des Standes der Technik.....	12
2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema.....	14
2.3 Verwendete Methoden	16
3 Ergebnisse des Projektes.....	17
3.1 Recherche, Literatur und Systeme, Marktanalyse.....	17
3.2 Definition und Modellierung des Referenzraumes	18
3.2.1 Definition Referenzraum	18
3.2.2 Thermische Modellierung.....	19
3.2.3 Thermische Modelle zur Abbildung von komplexen Tageslichtsystemen.....	21
3.2.4 Kopplung der thermischen Modelle mit dem TRNSYS Gebäudemodell.....	22
3.2.5 Lichttechnische Modellierung.....	23
3.3 Konzepte Tages- und Kunstlichtkombinationen in der Fassade	25
3.4 Evaluierung an Hand von Lichtsimulation, Auswirkung der Tages- und Kunstlichtkombinationen auf den Gesamtenergieverbrauch	28
3.4.1 Gekoppelte thermische und lichttechnische Simulation.....	28
3.4.2 Betrachtete Tageslichtsysteme.....	29
3.4.3 Validierung der thermischen Modelle.....	30
3.4.4 Simulationsvarianten und Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch	31
4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms	35
4.1 Einpassung in das Programm	35
4.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms	35
4.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	36
4.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse	36
5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	38
6 Ausblick und Empfehlungen	41
7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis	42
7.1 Literatur	42

7.2	Abbildungen	42
7.3	Tabellen.....	43

Kurzfassung

Die Fassade als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenklima ist entscheidend für den Energieverbrauch des Gebäudes, sie steuert Tagesbelichtung, solare Energieeinträge und Wärmeströme. Neben der Energie ist die Fassade auch entscheidend für den visuellen und thermischen Komfort. Licht ist der wichtigste Informationsträger (visuelle Wahrnehmung), gleichzeitig werden die Anforderungen an die Belichtung von Arbeitsplätzen immer höher. Wird im Winter der Heizenergiebedarf durch das Tageslicht und die künstliche Beleuchtung reduziert, so erhöht sich im Sommerfall der Kühlbedarf, der Strom für die Beleuchtung muss also wieder über Strom rückgekühlt werden.

Multifunktionelle vorgefertigte Fassadenelemente eröffnen dem Baugewerbe die Möglichkeit, schneller und flexibler und mit der Verwendung von qualitäts-geprüften Bauteilen zu agieren. Je mehr technische Funktionen durch die Fassade erfüllt werden, desto geringer ist der Aufwand für den Innenausbau, was insbesondere im Sanierungsbereich entscheidend ist.



**Beispiel innovative Fassade: ZVK Wiesbaden (Arch. Herzog & Partner)
© Bartenbach LichtLabor**

Das im April 2008 gestartete K-Projekt „Multifunctional Plug&Play Façade“ (MPPF), welches im COMET Programm gefördert wird, beschäftigt sich mit der Entwicklung multifunktionaler vorgefertigter Fassadenelemente. Im Laufe des Projekts hat sich allerdings gezeigt, dass der Aspekt der Tageslichtnutzung und der künstlichen Beleuchtung aus der Fassade heraus sowohl personell als auch finanziell zu gering berücksichtigt wurde. Dieser für die Behaglichkeit und den Energiebedarf für Heizen und Kühlen bedeutende Aspekt der Beleuchtung konnte somit tiefergehend bearbeitet werden. Aus diesem Grund wurde dieses Projekt „Licht aus Fassade“ als „Side Projekt“ im non-K Bereich von MPPF durchgeführt.

Ziel des Projektes war die Entwicklung von energetisch optimierten Konzepten der Tages- und Kunstlichtversorgung von Räumen über die Fassade. Hierbei sollten die Leuchten für das Kunstlicht möglichst bereits in der vorgefertigten Fassade integriert sein. Diese Fassadenkonzepte sollten sowohl für Tageslicht als auch für Kunstlicht eine ausreichende

Belichtung vor allem auch in der Raumtiefe bei gleichzeitig hohem visuellem Komfort (etwa ohne Blendung) bieten. Im Bereich Tageslicht waren dabei neben den Standardkomponenten Verglasung und Verschattungselemente auch lichtlenkende Systeme von großer Bedeutung. Für das Kunstlicht spielten unterschiedliche Leuchtenbauarten (direkt/indirekt- bzw. indirekt/indirekt-Beleuchtung) eine große Rolle.

Durch die Partner im Projektkonsortium (Sonnenschutzexperte, Fassadenbauunternehmen) wurde eine realisierbare Betrachtung der Integration der künstlichen Beleuchtung und der Tageslicht-Elemente (Belichtung, Sonnen- und Blendschutz) in die Fassade sichergestellt.

Aufbauend auf ausführlichen Recherchen der am Markt angebotenen Kunst- und Tageslichtsysteme, der durchgeführten Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sowie der relevanten Patente wurden Referenzräume definiert, die der thermischen sowie der lichttechnischen Simulation als Grundlage dienen. Die ausgearbeiteten und integrierten Fassadensysteme wurden für diese Referenzräume im Hinblick auf Lichtqualität und Gesamtenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Kunstlichtstrombedarf evaluiert. Dafür wurde eine gekoppelte Simulationsmethode entwickelt, die eine kombinierte Bewertung der Raumsituation (Licht und thermisch) zu jedem Zeitpunkt der gesamten Jahressimulation ermöglicht.

Die Ergebnisse des Projekts sind Grundlage für weitere Fassadenentwicklungen und wurden sowohl in Workshops, Schulungen als auch in Lehrveranstaltungen der beteiligten universitären Institutionen eingearbeitet (Universität Innsbruck, Lichtakademie Bartenbach).

Im Rahmen eines Fortsetzungsprojekts sollen thermische und lichttechnische charakteristische Kenngrößen für Tageslichtsysteme ausgearbeitet werden, um derartige Fassadenelemente einheitlich bewerten zu können. Zusätzlich soll aufbauend auf dem in „LichtAusFassade“ entwickelten Ansatz der gekoppelten Simulation ein Tool für Licht-/Gebäude-/Fassadenplaner erstellt werden. Darin werden die zugrundeliegenden Modelle weiter verbessert, das Programm soll gleichzeitig für den Anwender einfach zu verwenden sein.

Abstract

The façade, as an interface between the outdoor and indoor climates, is a decisive factor for energy consumption of a building. It controls daylighting, influx of solar energy and heat flow. Apart from energy, the façade is also a decisive factor for visual and thermal comfort. Light is the most important information medium (visual perception) and demands on the illumination of work places are becoming more prevalent. When energy for heating demand is reduced due to daylight and artificial lighting in winter, the need for cooling is increased in summer as the electricity for illumination must be re-cooled by electricity.

Multi-functional pre-fabricated façade elements open up possibilities for the building industry, in that they are able to operate faster and in a more flexible manner using quality controlled building components. The more technical functions that the façade can fulfil, therefore results in less complexity for the interior work, which is especially decisive in the area of renovation.



**Example of innovative façade: ZVK Wiesbaden (Arch. Herzog & Partner)
© Bartenbach LichtLabor**

The K-Project, “Multifunctional Plug&Play Façade (MPPF)”, which started in April 2008 and is aided by the COMET Program, deals with the development of such façade elements. During the course of the work it has however shown that the aspect of daylight utilization and artificial lighting out of the façade, is not sufficiently taken into account from a personal or a financial point of view. This important aspect concerning comfort and the energy requirements for heating and cooling could thus be dealt with more intensively. Therefore, this project represents a „Side Project” in the non-K area of MPPF.

The aim of the project was the development of energy-based optimized concepts for the provision of daylight and artificial lighting from the facades for the interior spatial areas. For this purpose, the luminaires for artificial lighting should possibly be already integrated into the pre-fabricated façade. These façade concepts were designed to yield sufficient daylighting as well as artificial lighting especially in the depth of the room, while concurrently providing high visual comfort (e.g. without glare). Concerning daylighting not only standard

components such as glazing or shading elements, but also daylight deflection systems were important, for artificial lighting diverse luminaire systems (direct/indirect or indirect/indirect) played a decisive role.

With the involvement of a façade construction company, integration of the artificial lighting and the daylight elements (lighting, sun-screening and glare protection) into the façade elements were ensured.

Following extensive research in terms of a market analysis of daylighting systems and combined façade systems, of scientific work, and of relevant patents, reference rooms with energy efficient and lighting optimized concepts including controls have been defined. The integrated façade systems were evaluated in respect of lighting quality, overall energy requirements of the rooms for heating, cooling and electricity. To do so a combined method for thermal and light simulations was developed that allows for an integrated evaluation of the interior space for each timestep of the full annual simulation.

The results are a basis for further façade developments and will be introduced into workshops, training courses and also into educational courses of the participating university institutions (University of Innsbruck, Lichtakademie Bartenbach).

Within a follow-up project the project consortium wants to define characteristics specifying the properties of a daylighting system concerning its thermal and light behaviour to enable a uniform evaluation of such complex façade systems. Additionally, the approach of a coupled light and thermal simulation from this project "LightFromFaçade" shall be extended to a tool to be used by light-, building- or façade-planners. The physical models used to represent the daylighting systems are to be further developed and the resulting tool should be easy to use for the user.

1 Einleitung

In Kooperation mit dem K-Projekt ‚Multifunktional Plug&Play Fassade‘ (MPPF, im COMET Programm gefördert) hat sich dieses Projekt im Speziellen mit den Möglichkeiten einer energieeffizienten Beleuchtung (Tageslichtnutzung und künstliche Beleuchtung) von Gebäuden von der Fassade aus befasst. Nach einer ausführlichen Recherche inklusive einer Marktanalyse wurden Referenzräume definiert, für die dann energieeffiziente Tages- und Kunstlichtkonzepte (inklusive Regelung) ausgearbeitet wurden. Über gekoppelte Licht- und Gebäudesimulationen wurden dann diese Standardräume im Hinblick auf Lichtqualität, Gesamtenergiebedarf der Räume und Kosten evaluiert. Die Ergebnisse sind die Ausgangsbasis für Fassadenentwicklungen und sie werden sowohl in Schulungen als auch in universitären Lehrveranstaltungen verwendet.

2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

2.1 Beschreibung des Standes der Technik

Die Gebäudefassade muss neben den passenden bauphysikalischen Kennwerten vor allem auch über die geeigneten lichttechnischen Eigenschaften verfügen

- es muss genügend Tageslicht mit entsprechender Verteilung in den Raum gelangen
- gleichzeitig muss jede Blendung vermieden werden
- im Sommer muss sie Schutz vor Überhitzung (solare Einträge) bieten
- im Winter soll sie solare Gewinne (heizen) ermöglichen
- es muss ein guter Ausblick gewährleistet sein.

Diese Anforderungen widersprechen sich zum Teil, zusätzlich ändert sich die Außensituation laufend (z.B. Sonnenstand). Diese komplexen Zusammenhänge erfordern entsprechend intelligente Fassadenkonzepte und -komponenten.

Es gibt verschiedene Lösungsansätze für solche Fassaden, die von statischen und »gutmütigen« Fassaden bis hin zu Hightec Fassaden mit optischen und computergesteuerten Vorrichtungen reichen. Alle diese Fassadenlösungen erfüllen meist nur eine der oben genannten Anforderungen, eine umfassende Erfüllung der sich zum Teil widersprechenden Anforderungen fehlt.

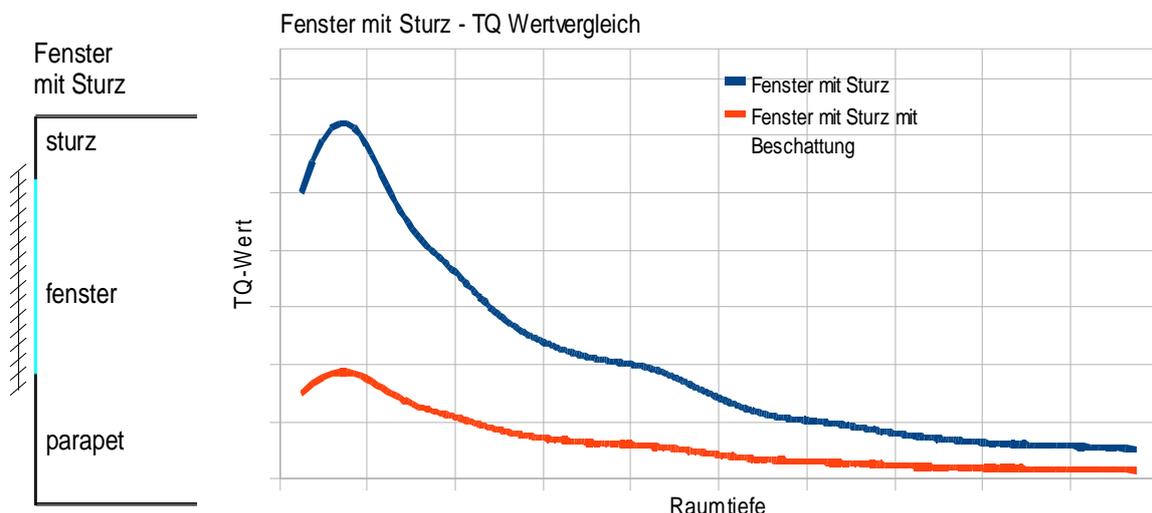


Abbildung 1: Tageslichtverlauf ohne Beschattung (blaue Kurve) und mit Beschattung (rote Kurve): Die hohe Leuchtdichte im unbeschatteten, fensternahen Bereich nimmt zur Raumtiefe hin rasch ab. Ein konventioneller Blend- oder Sonnenschutz reduziert den Lichteinfall linear.

Trotz zusehends steigender Glasflächenanteile und effizienter werdender Kunstlichtsysteme nimmt der Energiebedarf für Beleuchtung zu. Einer der Gründe: Glasflächen, insbesondere solche hinter denen Bildschirme stehen, werden über den Großteil des Tages bewusst verschattet (abgeblendet), um „produktiv“ arbeiten zu können. Im so genannten „Standard

Bürogebäude“ mit ca. 200 kWh/m²a entfallen bis zu 50% des Primärenergiebedarfs auf die künstliche Beleuchtung. Der Kunstlichtbedarf – so die Ausführungen der Firma Zumtobel im Rahmen der World Energy Days 2008 in Wels – könnten durch gezielte Tageslichtnutzung und Lichtmanagement um bis zu 80% gesenkt werden. Dass bei der Erzeugung von Licht vorwiegend teure Wärme (60- 90%) entsteht, wurde bereits zuvor erwähnt.

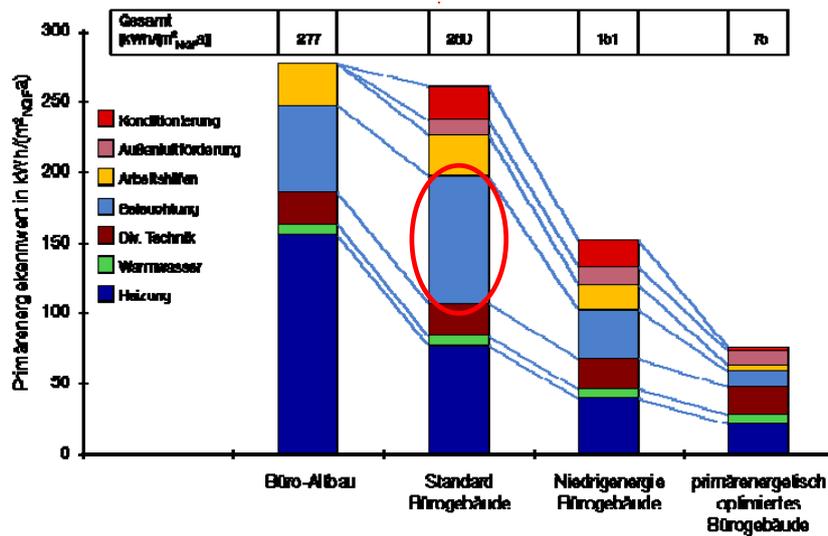


Abbildung 2: Primärenergiekennwerte für Bürogebäude (Quelle: IWU-Darmstadt)



Abbildung 3: Bild: Hohe Glasflächenanteile garantieren nicht automatisch eine ausreichende Tageslichtbeleuchtung. Bei steigendem Glasflächenanteil steigt auch die Kunstlichtzuschaltung infolge von Blendschutzvorrichtungen (v. a. bei Bildschirmarbeitsplätzen)

Lichtlenksysteme sind hoch effizient, sie können z.B. im Sommer gleichzeitig solare Energie (direkte Sonne) reflektieren und diffuses Tageslicht zur Raumausleuchtung nutzen; mit

anderen Worten – sie zeichnen sich durch sehr gute g-Werte und einen hohen Tageslichtquotienten aus. Das Potenzial für Fassaden mit integrierter Funktion zur Tageslichtnutzung liegt trotz günstiger Rahmenbedingungen (Gebäudeausweis, Energiekosten, gesundheitliche und psychologische positive Aspekte des Tageslichtes ...) nahezu brach. Das liegt u.a. daran, dass die Industrie die Chance dieser Technologie noch nicht ausreichend erkannt und genützt hat sowie an der Tatsache, dass Investoren und Betreiber den Mehrwert einer Tageslichtfassade, die sich vor allem über Betriebs- und Personalkosten rechnet, noch nicht vermitteln konnte.

Lichtlenkende Fassaden definieren sich durch eingebaute optische Komponenten (meist Reflektoren in Form von Spiegellamellen aber auch Prismen und Linsen); das hat zur Folge, dass es sich um gewerkübergreifende Entwicklungen handelt, die vor allem die Glas-, Beschattungs-, Beleuchtungs-, und Steuerungstechnik betrifft. Die Systeme können starr oder beweglich eingebaut sein; bewegliche Reflektoren haben den Vorteil, dass sich die Helligkeit regeln (dimmen) lässt, das System dem Sonnenstand folgen kann oder vorprogrammierte Nutzungsszenen (bspw. Bildschirmarbeit, Besprechung, Präsentation u.s.w.) auf Abruf zur Verfügung stehen. Vorteilhafterweise werden lichtlenkende Systeme in ein Glassystem integriert (Schutz gegen Verschmutzung). In diesem Fall ist eine industrielle Vorfertigung anzustreben.

Hinzuweisen ist auch darauf, dass „Lichtlenkung“ in der Architektur sowie in der Fassaden- und Sonnenschutzbranche zu einem Modewort geworden ist – vielen Produkten, vor allem Jalousien, Raffstore aber auch Rollläden, Markisen und Folienrollos) wird eine lichtlenkende Wirkung (vermeintlich aus Marketinggründen) angedichtet, obwohl sich an deren Grundprinzip (Abschatter) nichts geändert hat. Fast nirgends, wo heute „Lichtlenkung“ draufsteht, wird Tageslicht in ausreichender Menge und Qualität im Raum verteilt.

Vor allem die Sonnenschutzindustrie mit ihren dynamischen Systemen (einstellbar entsprechend den Tages- und Jahreszeiten sowie nutzerorientierten Bedürfnissen) wäre prädestiniert ihre Produkte vom Abschatterprinzip auf Tageslichtnutzung aufzurüsten und aufzuwerten. Derzeit gibt es am Markt kaum Systeme, die für Tageslichtnutzung konstruiert sind, das Potenzial, bestehende Produkte entsprechend um- bzw. nachzurüsten erscheint jedoch beträchtlich.

Die Innovation dieses Projektes liegt damit auch in der Konzeption von vorgefertigten, standardisierbaren, lichtlenkenden Systemen inkl. Wissenstransfer zur Zielgruppe der Planer und Industrie.

2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Im Kompetenzzentrum Licht (www.k-licht.at) bzw. im COMET –Projekt K-Licht wurden seit 2002 zahlreiche Grundlagenforschungsprojekte zum Thema Lichtwirkungen (visuelle und nicht visuelle Wirkungen) und zum Thema Tageslicht und Sonnenschutz durchgeführt.

Im Themenfeld Tageslichttechnik wurden im Rahmen dieses Kompetenzzentrums die besonderen Wirkungen und Effekte des Tageslichtes auf den Menschen untersucht, und weiters für die Messung eines winkelabhängigen g-Wertes (Gesamtenergiedurchlassgrad) ein eigener Messstand aufgebaut.

Es gilt nun, diese Erkenntnisse, Methoden und Verfahren bei der Umsetzung realer Fassaden zu berücksichtigen. Einerseits müssen die winkelabhängigen g-Werte von Fassaden so genützt werden, dass der solare Eintrag im Sommer (Sommerfall, Überhitzungsschutz) gering gehalten wird (optimalerweise durch einen g-Wert <10%), während im Winter (Heizfall) diese solaren Einträge als Unterstützung für die Heizung genützt werden können.

Bei all diesen energetischen Überlegungen ist der damit verbundene thermische und visuelle Komfort entsprechend zu berücksichtigen, um eine Akzeptanz dieser Techniken zu erreichen.

Ein guter g-Wert ($g < 0,10$) bedeutet nicht nur geringe solare Lasten im Sommer, sondern in der Regel auch, dass die innere Oberflächentemperatur an der Fassade entsprechend gering ist, was einen verbesserten thermischen Komfort impliziert. Die durch hohe g-Werte verursachten Übertemperaturen an der inneren Fassadenoberflächen sind die Hauptursache für Hitzeprobleme, die für Personen in Nähe der Fassaden entstehen.

Im laufenden K-Projekt „Multifunctional Plug&PlayFacade, MPPF“ des COMET-Programmes wird an der Entwicklung von modularen Fassadenelementen gearbeitet, die zusätzlich die haustechnischen Funktionen (innovative Verschattungssysteme, Heizung-, Lüftung-, Klimatechnik, Elektro- und IT-Installationen (BUS System), Beleuchtung und EMV-Verträglichkeit) übernehmen können. Durch den hohen Vorfertigungsgrad sollen sich die zusätzlichen Investitionskosten für die Fassade in Grenzen halten, die Mehrkosten sollen durch den verringerten Innenausbau und die Einsparung an Geschoßhöhe (Wegfall von abgehängten Decken) wettgemacht werden.

Im Projekt IEA Annex45 „Energy efficient electric Lighting“ (2005-2009) vertrat das Bartenbach LichtLabor im Auftrag des BMVIT Österreich. Das Projekt lief im Rahmen des IEA-Programmes „Energy Conservation in Buildings and Community Systems“ (ECBCS).

Ziel des Projektes war, energieeffiziente und qualitativ hochwertige Lichttechnologien zu identifizieren und deren Gebrauch zu fördern, um den zu erwartenden Anstieg im elektrischen Energieverbrauch einzudämmen. Weiters wurden die bestehenden technischen Möglichkeiten zur Energieeinsparung abgeschätzt und dokumentiert sowie das Potential für zukünftige technische Entwicklungen. Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)

2.3 Verwendete Methoden

Nach einer ausführlichen Recherche bisher auf diesem Gebiet durchgeführter Arbeiten und einer Marktanalyse über typische Bauformen im Wohn- und Bürobereich wurden marktrelevante, typische Referenzräume definiert (vgl. Abschnitt 3.2). Dabei wurden ihre geometrischen Abmessungen, die bauphysikalischen Randbedingungen (Wandaufbauten, U-Werte, Speichermassen, bei Fenstern zusätzlich g-Werte und Lichttransmission), die Lichtabsorptionskoeffizienten der Wände, das Benutzerverhalten (Anzahl und Anwesenheit von Personen, gewünschte Raumtemperatur Heizen, Kühlen, innere Lasten, Luftwechselraten, Regelungsschemata, Verschattungsregelungen) und zugehörige Außenklimabedingungen festgelegt. Die verwendeten Werte wurden mit einschlägigen Normen (OIB-Richtlinie 6, ÖNORM B8110-5, DIN 18599 Teil 10 oder SIA 2024, ÖNORM EN 12464, ÖNORM EN 15193, Neufert 2009) abgestimmt.

Für diese Referenzräume wurden Konzepte zur optimierten Tages- und Kunstlichtversorgung über die Fassade bzw. mit Kunstlicht, das in die Fassade integriert ist, erstellt (vgl. Abschnitt 3.3). Hierbei wurde sowohl die Tageslichtnutzung mit Lichtlenksystemen und Anti-Blend Einrichtungen, fixe oder variable Verschattungs- und Umlenksysteme sowie die Einbaumöglichkeiten, Art und Verteilung der Leuchten in der Fassade betrachtet. Außerdem wurden das lichttechnische Verhalten des Raumes mit seinen Oberflächen und die Ausrichtung der Fassade berücksichtigt. Das Ziel der Konzepte ist es aus der Fassade heraus Räume möglichst tief beleuchten zu können. Als zu erfüllende Randbedingung gelten dabei ein möglichst geringer Energiebedarf für die Beleuchtung selbst und ein geringer Energiebedarf für Heizen und Kühlen des Raumes. Hierzu wurden für die Konzepte entsprechende Regelungsstrategien entwickelt.

Diese Konzepte wurden für einen Referenzraum mit Hilfe einer gekoppelten lichttechnischen und thermischen Jahressimulation analysiert und evaluiert (vgl. Abschnitt 3.4). Dabei wurde basierend auf Klimadaten stündlich ein entsprechendes Himmelsmodell erstellt und für die simulationstechnische Bewertung verwendet. Die in diesem Projekt entwickelte, kombinierte lichttechnische und thermische Simulationsmethodik ist ihrerseits in dieser Weise erstmalig realisiert worden. Die Verschränkung der Berechnungen führte über die Verwendung lichttechnischer Ergebnisse als Input in der dynamischen thermischen Gebäudesimulation hinaus (interne Lasten durch notwendiges Kunstlicht). Vielmehr wurden die Berechnungsprogramme in jedem Zeitschritt der Jahressimulation gekoppelt, wodurch Regelstrategien implementiert werden konnten, die gleichzeitig auf thermische und lichttechnische Ergebnisse reagieren. Durch die Möglichkeit von Iterationen innerhalb eines Zeitschritts kann somit eine – aus thermischer und lichttechnischer Sicht – optimale Stellung des Tageslichtsystems in der Fassade bestimmt werden. Die Minimierung des Gesamtenergiebedarfs (Heizen, Kühlen und Kunstlicht) bei gleichzeitiger optimaler Lichtqualität (visueller Komfort, ausreichende Beleuchtung und keine Blendung) kann damit erreicht werden.

3 Ergebnisse des Projektes

3.1 Recherche, Literatur und Systeme, Marktanalyse

Zunächst wurde eine umfassende Recherche zum Themengebiet „Belichtung (Tages- bzw. Kunstlicht) aus der Fassade“ durchgeführt. Diese Recherche umfasste folgende Themenschwerpunkte:

- Marktanalyse von bestehenden Produkten
- Patentrecherche (national/international)
- Wissenschaftlichen Arbeiten
- Nutzerbefragung (Interviews mit Nutzern von Tageslichtsystemen zur Erfassung der Usability und Akzeptanz)

Weiters wurde eine Recherche zum Thema „Kombinierte Berechnungsverfahren für Beleuchtung und Energiebedarf“ durchgeführt. Im Speziellen waren folgende Programmarten von Interesse:

- Komplett-Software-Systeme, die eine thermische und lichttechnische Simulation zulassen
- Software zur Bestimmung des Kunstlichtbedarfes zur Ermittlung der internen Lasten (Input thermische Simulation)

Die Ergebnisse der Marktanalyse und der Patentrecherche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen. In der Tageslichttechnik gibt es eine Reihe von Systemen, die von der Fassade aus den Raum belichten. Diese Tageslichtsysteme können eingeteilt werden in

- Sichtschutzsysteme
- Sonnenschutzsysteme (Verschattungssysteme)
- Blendschutzsysteme
- Umlenksysteme

Auf diesem Gebiet findet man daher eine unübersehbare Anzahl von Patenten, die vor allem die Konstruktion, Mechanik, Steuerung, Materialien etc. ansprechen. Schränkt man den Begriff Tageslichtsystem aber auf lichtlenkende Systeme ein, so betrifft es nur mehr eine sehr geringe Anzahl dieser Patente.

Diese Produkte sind in der sehr kleinen Tageslichtbranche bekannt, sie konnten sich aber bis heute aus diversen Gründen nicht am Markt durchsetzen (zu teuer, zu aufwändig in der Planung, Installation und im Betrieb).

Die Suche nach Tageslichtsystemen mit integriertem Kunstlicht liefert praktisch keine Treffer mehr.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass keine Fassadensysteme vorhanden sind, die sowohl eine Tages- als auch Kunstlichtversorgung aus der Fassade heraus ermöglichen.

Ebenfalls wurde eine Recherche der vorhandenen Berechnungsverfahren betrieben, die eine thermische und lichttechnische Simulation bzw. die Ermittlung der Kunstlichtzuschaltung ermöglichen. Zum Startzeitpunkt des Projekts war keine Software vorhanden, die die Wechselwirkung zwischen der thermischen und lichttechnischen Simulation mit den im Projekt benötigten Anforderungen berücksichtigt.

3.2 Definition und Modellierung des Referenzraumes

3.2.1 Definition Referenzraum

Im Zuge umfassender Literaturstudien wurden unterschiedliche Raumnutzungsarten (Büroraum, Hotelzimmer, Konferenzzimmer und Wohnraum) analysiert, um allgemein gültige Aussagen über Geometrie und Abmessungen treffen zu können. Als Ergebnis der umfassenden Recherche wurde die Büronutzung mit

- den geometrischen Abmessungen,
- den bauphysikalischen und lichttechnischen Randbedingungen (Wandaufbauten, Reflexionsgrade der Oberflächen, U-Werte, Speichermassen, g-Werte und Licht/solare Transmission für Fenster),
- dem Benutzerverhalten (Anzahl / Anwesenheit von Personen, gewünschte Raumtemperatur, Heizen / Kühlen, innere Lasten, Luftwechselraten, Regelungsschemata, Steuerung / Regelung der Verschattung) und
- den zugehörigen Außenklimabedingungen

als geeignete Referenz für die Betrachtung einer komplexen Fassade mit integriertem Tageslichtsystem definiert.

Für die durchgeführten Simulationen wurde das Doppelbüro als Referenzraum nach Abbildung 4 mit adiabaten Begrenzungsflächen (5x5x3m) für Innenwand/Boden/Decke verwendet. In die Südfassade (Außenwand) ist eine Fensterfläche (9m² / 60%) mit den zu untersuchenden Tageslichtsystemen integriert. Neben einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) sind die internen Lasten (Personen / Equipment / Feuchte) gemäß SIA 2024 in Form eines wöchentlichen Lastprofils implementiert.

Die geometrischen Abmessungen orientieren sich an der Zusammenstellung im Projekt MPPF, sowie am standardisierten Referenzraum des *Bartenbach LichtLabor*. Dadurch ist ein Vergleich der Ergebnisse (z.B.: Tageslichtquotient, interne Lasten durch künstliche Beleuchtung, etc.) aus „Licht aus Fassade“ mit vorhandenen Ergebnissen herkömmlicher Beleuchtungssystemen von BLL möglich. Die Maße bzw. Anordnung des Mobiliars wurden auf Grundlage des Bauentwurfsnachsschlagewerk Neufert [Neufert, 2009] bestimmt.

Die Gebäudehülle war ursprünglich in zwei Varianten sowohl als Baustandard als auch in Passivhausstandard ausgeführt. Auf Grund der geringen Einflüsse der unterschiedlichen Baustandards aus Sicht der thermischen Ergebnisse wurde der Passivhausstandard für das weitere Vorgehen fixiert.

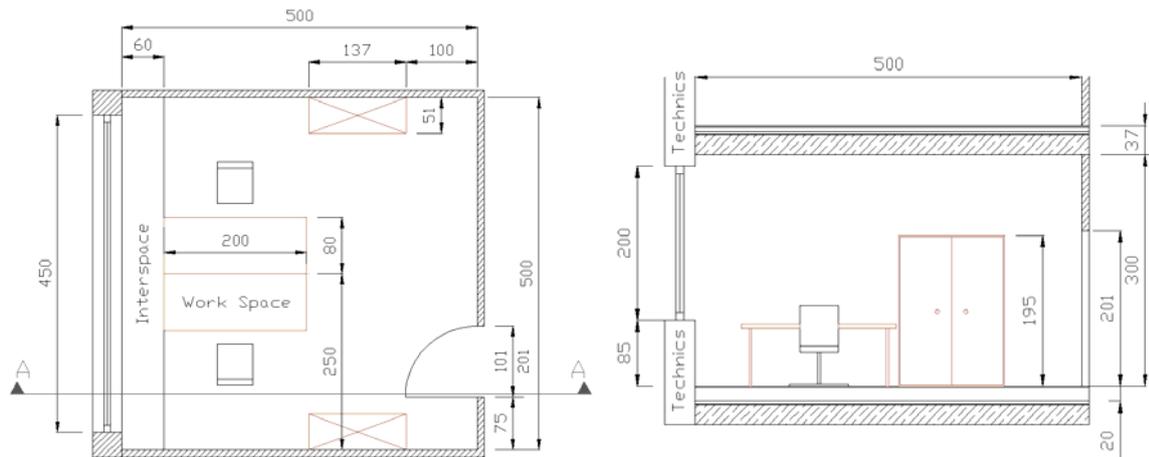


Abbildung 4: Grund- und Seitenriss des verwendeten Referenzraummodells Doppelbüro

Tabelle 1: Übersicht der gewählten Randbedingungen des Referenzraumes im Passivhausstandard

Parameter	Definition	Quelle
Klimadaten	Graz, Österreich	TMY2 (Meteonorm)
U-Wert Wand U_{wall}	0.15 W/m ² K	Abschätzung
U-Wert Fenster U_{window}	0.8 W/m ² K	Abschätzung
Fensterfläche	9 m ² (Breite: 4.5 m, Höhe: 2 m)	Abschätzung
Glasanteil der Fassadenfläche	60 %	SIA 2024
Sensible Wärmeabgabe (Pers.)	70 W/Person (at 24 °C)	SIA 2024
Mittlere Feuchteabgabe (Pers.)	80 g/(h Person) (at 24 °C)	SIA 2024
Belegungszeiten	Montag bis Freitag – 7.00 bis 18.00 Uhr	SIA 2024
Interne Lasten (Geräte, EDV)	9.6 W/m ²	SIA 2024
Raumtemperaturen	21 °C (Heizen), 26 °C (Kühlen)	SIA 2024
Ventilation - Luftwechselrate	0.96 h ⁻¹	SIA 2024
Reflexionsgrad (Decke/Wände/Boden)	80 % / 50 % / 30 %	Abschätzung
Lichtausbeute (Kunstlicht)	40 lm/W	Abschätzung

3.2.2 Thermische Modellierung

Für die Umsetzung der thermischen Simulation wurde TRNSYS [transsolar, 2011] verwendet. TRNSYS verfügt über ein umfassendes Gebäudemodell – durch die offene Programmstruktur sowie der Verfügbarkeit der Source-Codes ist es durch beliebige Modelle erweiterbar und für eine Kopplung zu anderen Programmen einfach adaptierbar. Dies war im Zuge dieses Projektes wesentlich, da speziell für die simulationstechnische Abbildung der

thermischen Eigenschaften von Tageslichtsystemen neue Modelle entwickelt und eine Kopplung von TRNSYS und RADIANCE angestrebt wurden.

Vorstudien g-Wert Jahresverlauf

Ausgangspunkt für die thermische Modellbetrachtung der TL-Systeme (Tageslichtsysteme) bildete eine detaillierte Analyse des g-Wertes im Jahresverlauf, auf deren Grundlage sich die entwickelten Modellansätze stützten. Dazu wurden in einer Parameterstudie die wesentlichen Einflussparameter auf den g-Wert (Einstrahlungsleistung, Einstrahlwinkel, Übergangskoeffizienten, Temperaturdifferenz) auf deren Sensitivität auf den g-Wert untersucht (vgl. Abbildung 5). Im Speziellen waren die Jahresverläufe von Transmission und sekundärer Wärmeabgabe von Relevanz, da diese die Form des Energieeintrages in den Raum (Strahlung und Konvektion) – und damit die Randbedingungen für die Modellierung – wesentlich bestimmten.

Diese Studien wurden mit ähnlichen Ergebnissen im thermischen Verhalten an 2- und 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasungen durchgeführt und auf ein Verglasungssystem mit Lamelle übertragen. Es stellte sich heraus, dass das Verhältnis von Transmission zu sekundärer Wärmeabgabe für ausreichend genaue Ergebnisse (Heiz- und Kühlenergie) übers Jahr konstant angenommen werden können. Die Änderung des g-Wertes wird im Wesentlichen durch den Einstrahlwinkel (α_i) bestimmt. Um das anisotrope Verhalten komplexer TL-Systeme abbilden zu können, ist daher eine zweidimensionale Winkelabhängigkeit für die Modellierung entscheidend. Die restlichen Parameter (Variation Einstrahlung (IT), Temperaturdifferenz (DT), Wärmeübergangswiderstände (h_o , h_i)) zeigten wenig Einfluss auf den g-Wert (vgl. Abbildung 5).

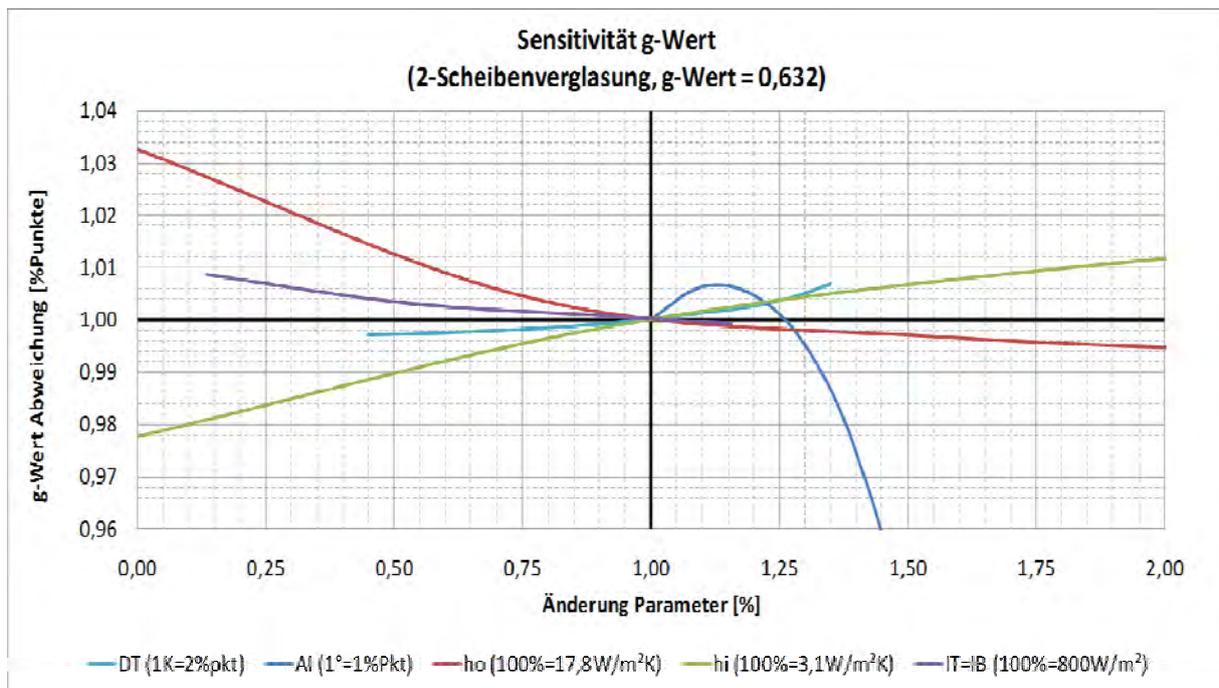


Abbildung 5: Sensitivitätsdiagramm – Einflussfaktoren auf den g-Wert am Bsp. 2-Scheibenverglasung

3.2.3 Thermische Modelle zur Abbildung von komplexen Tageslichtsystemen

Ausgehend von den Ergebnissen der g-Wert Studie und der Standardapplikation im Gebäudemodell (Type 56 in TRNSYS) zur Abbildung von Verglasungssystemen wurden drei Modellansätze (g-Modell / Fc-Modell / Abs-Modell) unterschiedlichen Detaillierungsgrades entwickelt.

Tabelle 2: Entwickelte thermische Modelle in TRNSYS

Modell	Abbildung des Tageslichtsystems über
g – Modell	gemessenen / simulierten, winkelabhängigen g-Wert für Gesamtsystem
Fc – Modell	winkelabhängigen "Verschattungsfaktor" des Tageslichtsystems
Abs – Modell	"Schichtmodell" mit winkelabhängigem α , τ und ϵ

Diese Modelle ersetzen dabei das standardmäßig im Type 56 integrierte Verglasungsmodell und ermöglichen so die Integration von komplexen Lamellensystemen in die Gebäudesimulation.

Dem *g-Modell* liegt eine zweidimensional winkelabhängige g-Wert Matrix für das TL-System zugrunde, aufgrund derer der Anteil der durch das System tretenden Solarstrahlung

berechnet wird. Die Auftrennung in „internal gain“ und „wallgain“ (siehe Abschnitt 3.2.4) erfolgt auf Grund der Strahlungstransmission des Tageslichtsystems.

Das *Abs-Modell* beruht gegenüber dem g-Modell überwiegend auf physikalischen Kenngrößen (Absorptionskoeffizienten und Emissionsfaktoren von Scheiben und Lamelle, Gesamttransmission vom System). Dies erlaubt eine wesentlich detailliertere Modellierung sowie die Abbildung einer höheren Systemvariabilität hinsichtlich Systemaufbau und Umgebungsbedingungen.

Das *Fc-Modell* ist ähnlich dem Prinzip des g-Modells gestaltet, trifft allerdings noch deutlichere Vereinfachungen mit Vorteilen in einer vergleichsweise einfachen Berechnung und Einbindung in die Simulation. Es wird ein Verschattungsfaktor (ähnlich einem Fc-Wert), gebildet aus System- und Verglasungs-g-Wert, berechnet. Das Modell arbeitet hinreichend genau für externe Lamellen, weist auf Grund der stark vereinfachten Modellierung für innenliegende Verschattungssysteme allerdings Eignungsgrenzen auf. Das g-Modell und das Abs-Modell sind daher als die genaueren Modelle zu bewerten.

Eine Validierung der thermischen Modelle wurde dabei auf Basis der Simulationsdaten und vorhandenen Referenzmessungen durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4.3).

3.2.4 Kopplung der thermischen Modelle mit dem TRNSYS Gebäudemodell

Neben der eigentlichen Modellierung der TL-Systeme bildet die Kopplung der externen Modelle mit dem TRNSYS Gebäudemodell „Type 56“ das wesentliche Kriterium für die Abbildung des thermischen Zusammenwirkens von Tageslichtsystem und dahinterliegendem Referenzraum.

Der berechnete Solareintrag wird dabei - aufgetrennt als „wallgain“ für den sekundären Strahlungsanteil und als „internal gain“ für den Transmissionsanteil - dem Gebäudemodell als Input aufgegeben. Der „wallgain“ ist als Input der innersten Scheibe aufgeprägt und wirkt somit über die resultierende Scheibeninnentemperatur und der sich daraus ergebenden sekundären Wärmeabgabe (langwellig) indirekt auf die Raumtemperatur. Der „internal gain“ wird als rein radiativer (kurzwelliger) Anteil dem Luftknoten aufgeprägt, und beeinflusst somit direkt die Raumtemperatur (vgl. Abbildung 6)

Um eine den Umgebungsbedingungen nach korrekte Abbildung der Wärmeverluste über die Verglasung zu berücksichtigen (variabler U-Wert), ist im Gebäudemodell die Verglasung weiterhin implementiert – allerdings im vollständig verschatteten Zustand ($F_c=1$).

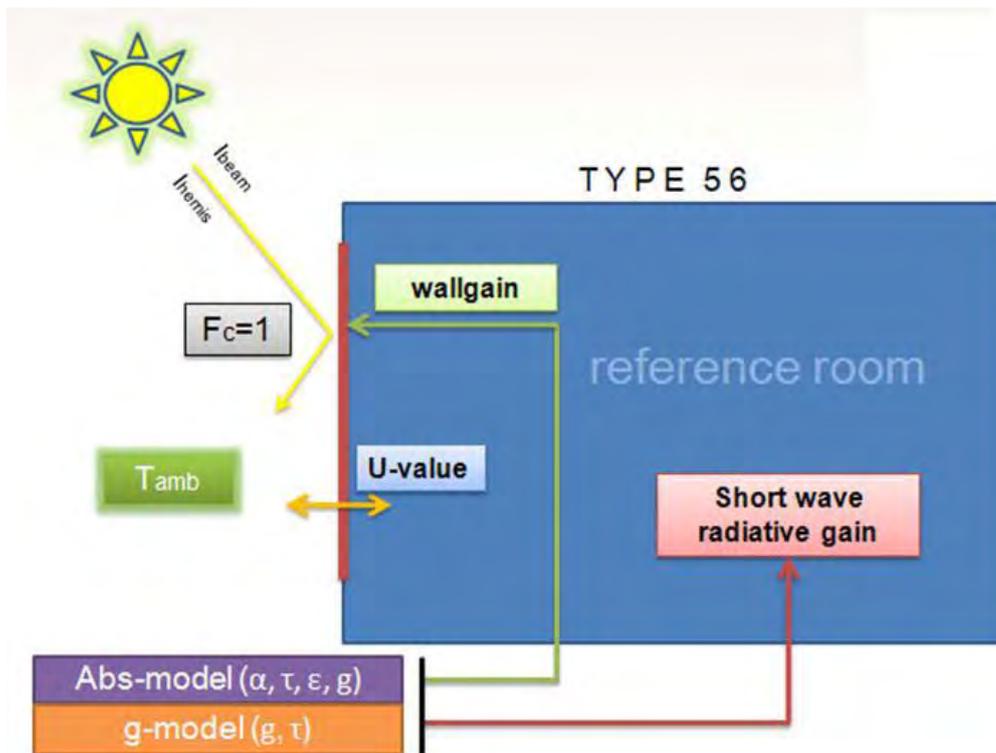


Abbildung 6: Schema der thermischen Modellierung (g-Modell / Abs-Modell)

Mit den entwickelten thermischen Modellen konnte ein ausreichend genaues Verfahren erstellt werden, welche die Grundlage zur weiterfolgenden thermischen Bewertung der betrachteten Tageslichtsysteme bildete. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge mussten die aktuellen Modelle entsprechend der zur Verfügung stehenden Zeit vorerst mit getroffenen Vereinfachungen umgesetzt werden und sind deshalb nur auf die in diesem Projekt betrachteten Systeme anwendbar.

3.2.5 Lichttechnische Modellierung

Für die Simulation der Referenzräume wurde das Softwarepaket RADIANCE [Ward, Shakespeare 1998, radiance-online 2011] verwendet. Dieses physikalisch basierte Ray-Tracing Tool ist weltweit Standard im Bereich der Tageslichtberechnungen. Sowohl theoretische CIE-Himmelsmodelle als auch aus Klimadaten abgeleitete Modelle können dabei zur Simulation des Tageslichts verwendet werden. Die Modellierung der Referenzräume in RADIANCE wurde entsprechend den lichttechnischen Oberflächeneigenschaften durchgeführt, die in der Referenzraumdefinition angegeben sind (vgl. Absatz 3.2.1).



Abbildung 7: Simulation des Referenzraums „Doppelbüro“

Eine besondere Herausforderung in der Modellierung stellen allerdings lichtlenkende Tageslichtsysteme dar. Um derartige Systeme sowohl für das Himmelslicht als auch für die Sonne ausreichend genau abbilden zu können, wurde auf einen Ansatz basierend auf sogenannten BSDFs (bidirectional scattering distribution function) zurückgegriffen. Bei dieser Methode wird vorab für das Tageslichtsystem eine „Übertragungsfunktion“ bestimmt, welche die räumlichen Transmissions- und Reflexionseigenschaften beschreibt. Diese BSDFs wurden für die auszuwertenden Systeme in jeweils allen Stellungen (Lamellenkippwinkel) berechnet und konnten für eine effektive Jahressimulation hinterlegt werden.

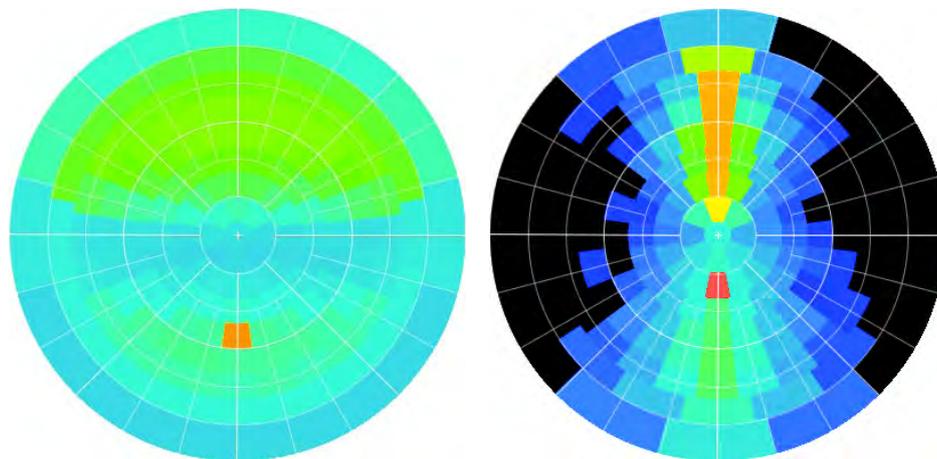


Abbildung 8: Beispiele für BSDFs: Transmissionseigenschaften des Referenzsystems (links) und des komplexen Tageslichtsystems „Flügellamelle“ (rechts) für spezifische Einstrahlwinkel

Die Verwendung von BSDFs ist für eine effiziente lichttechnische Jahressimulation ausschlaggebend. Die angewandte Methode (die sogenannte „3-Phasen-Methode“) nutzt die physikalische Eigenschaft der Additivität des Lichts und erlaubt es „Einheitsbeiträge“ zur Beleuchtung im Raum aus einzelnen Bereichen des Himmels zu bestimmen. Abbildung 9 skizziert die Funktionsweise der 3-Phasen-Methode. Dabei werden – ebenso wie die BSDF (s.o.) – die „Sicht-Matrix“ (Übergang System – Raum) und die „Tageslicht-Matrix“ (Übergang Himmel – System) vorberechnet. Lediglich die Leuchtdichteverteilung des Himmels wird entsprechend der Klimadaten zum gegebenen Zeitpunkt ermittelt. Mit diesem Ablauf kann

mit sehr geringem Rechenaufwand das lichttechnische Ergebnis berechnet und somit in einem iterativen, gekoppelten Ansatz verwendet werden.

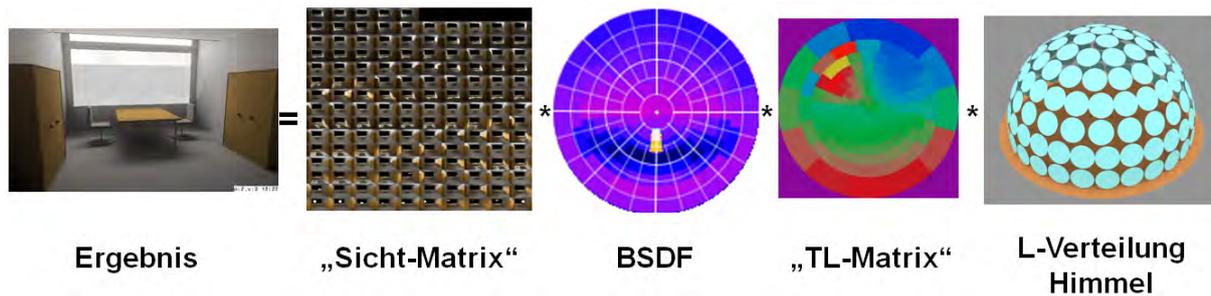


Abbildung 9: Idee der 3-Phasen-Methode zur lichttechnischen Jahressimulation

3.3 Konzepte Tages- und Kunstlichtkombinationen in der Fassade

Um Räume aus der Fassade heraus ausreichend zu beleuchten, wurden kombinierte Tages- und Kunstlichtkonzepte ausgearbeitet. Die entsprechenden Überlegungen wurden für die in 3.2 definierten Referenzräume (Einzelbüro und Doppelbüro) durchgeführt. Jedoch wurde immer der Aspekt einer allgemeineren Verwendung (Veränderungen im Grundriss, Fassadenaufbau, etc.) berücksichtigt.

Die Tageslichteigenschaften einer Fassadenfläche bei bedecktem Himmel und bei klarem Himmel mit Sonne wurden für alle vier Himmelsrichtung betrachtet und bewertet. Die Sonnenscheinwahrscheinlichkeit und vertikalen Beleuchtungsstärken wurde dafür mit dem Bartenbach-internen Programm „Zwiebel“ errechnet.

Um ein optimales System für die Fassade entwickeln zu können, wurde in verschiedenen Schritten versucht, die Fassade ihren lichttechnischen Anforderungen entsprechend aufzuteilen und die einzelnen Teile optimal vor dem Raum zu platzieren. Daraus ergaben sich grundsätzliche Bereiche für verschiedene Anforderungen, welche mit bestehenden Systemen bzw. neuen Systemen gelöst werden sollten.

Die lichttechnischen Bereiche der Fassade teilen sich auf in den Bereich der Sonnenumlenkung, den Bereich der Umlenkung des diffusen Himmelslichtes und den Bereich der Durchsicht (vgl. Abbildung 10). Weitere Flächen bei der Unterteilung der Fassade müssen berücksichtigt werden. Diese werden jedoch nicht von den lichttechnischen Kriterien, sondern durch architektonische Anforderungen wie z.B. die Brüstungshöhe bestimmt. Für die Platzierung der erforderlichen Gebäudeöffnung vertikal an der Fassade sind weitere Kriterien zu berücksichtigen. Der Bereich der Sonnenumlenkung wird durch die Umlenk-Charakteristik der zur Wahl stehenden Sonnenlichtumlenksysteme und die Blendungsbegrenzung bestimmt. Für den Bereich der Durchsicht sind die Blendungsbegrenzungen und die sitzenden und stehenden Positionen der Personen zu berücksichtigen. Auch Kriterien aus der Architektur und der Statik sowie Charakteristiken der Materialien beeinflussen die Aufteilung der Fassade.

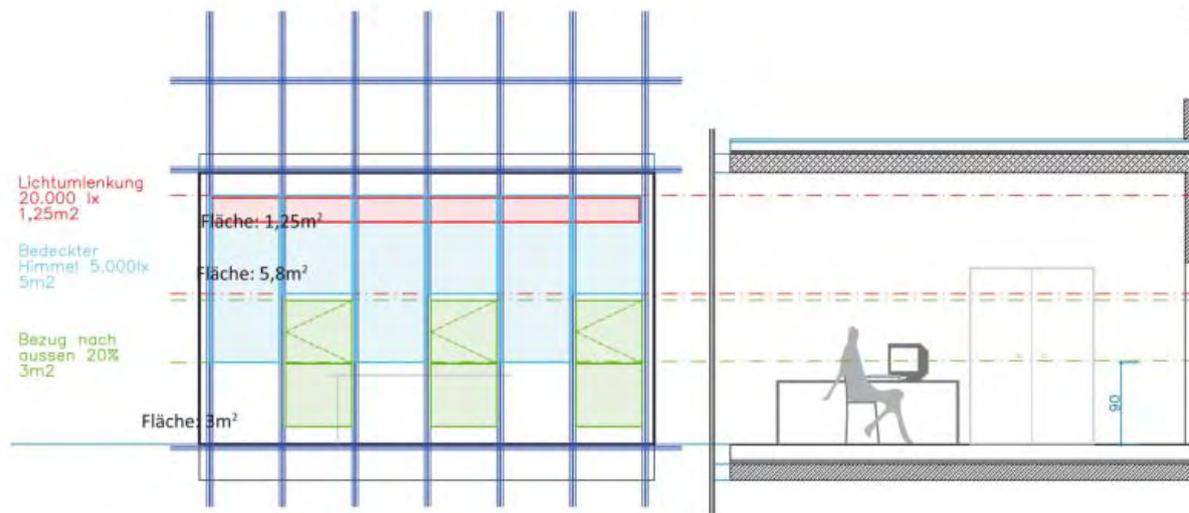


Abbildung 10: Konzept zur Fassadenunterteilung in Bereiche zur Integration des Tageslichtsystems entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen

Für die einzelnen in diesem Arbeitsschritt definierten Bereiche wurden im nächsten Schritt die genauen Anforderungen definiert. Daraus kann zum Einen ein Vergleich zu bestehenden Systemen gezogen und zum Anderen ein Anforderungskatalog für neue Produkte erstellt werden.

Die künstliche Beleuchtung sowohl des Einzel- als auch des Doppelbüros wurde in diesem Arbeitsprozess ebenfalls von der Fassade aus organisiert und angedacht. Die Unterschiede der beiden Büros liegen vordergründig in der Unterschiedlichkeit der Anordnung des Arbeitstisches. Beim Doppelbüro steht der Arbeitsplatz an der Fassade, jedoch in der Mitte des Raumes. Demgegenüber steht der Arbeitstisch im Einzelbüro direkt an der Wand. Für die Betrachtung und notwendige Dimensionierung wurde sowohl die Norm „Beleuchtung von Arbeitsstätten DIN EN 12464-1:2011-08“ als auch die Norm „Beleuchtung mit künstlichem Licht DIN 5035-1“ als Grundlage verwendet.

Auf diesen Anforderungen aufbauend wurden Beleuchtungskonzepte sowohl für das Doppelbüro, als auch für das Einzelbüro entwickelt. Für die Anordnung vertikal an der Fassade ergaben sich ebenfalls verschiedene Varianten. Die Kriterien für diese Anordnung wurden bestimmt durch die Beleuchtungsart und der entsprechenden LVK, sowie durch die Rasterung der Fassadenteilung für das Tageslicht, die natürlich auch für das Kunstlicht übernommen wurde.

Von der Fassade aus können unterschiedliche Beleuchtungsarten realisiert werden. Die Herausforderung bei direktstrahlenden Komponenten liegt darin, dass einerseits ein kleiner Ausstrahlwinkel (enge LVK) gefordert ist, damit keine Blendung entsteht, gleichzeitig aber auch der hintere Teil des Büros noch beleuchtet werden soll (Abbildung 11, links). Um eine gleichmäßige Beleuchtung im ganzen Raum von der Fassade aus zu erreichen, werden sekundäre Lichtsysteme ab einer bestimmten Raumgröße empfohlen. Diese strahlen entweder an die Decke und werden dort diffus reflektiert oder sie strahlen auf Reflektoroberflächen, die an der Decke angeordnet sind und werden somit noch weiter in

den Raum reflektiert. Dadurch ist eine Raumerweiterung möglich, ohne ein zusätzliches Lichtsystem im Raum integrieren zu müssen (Abbildung 11, rechts).

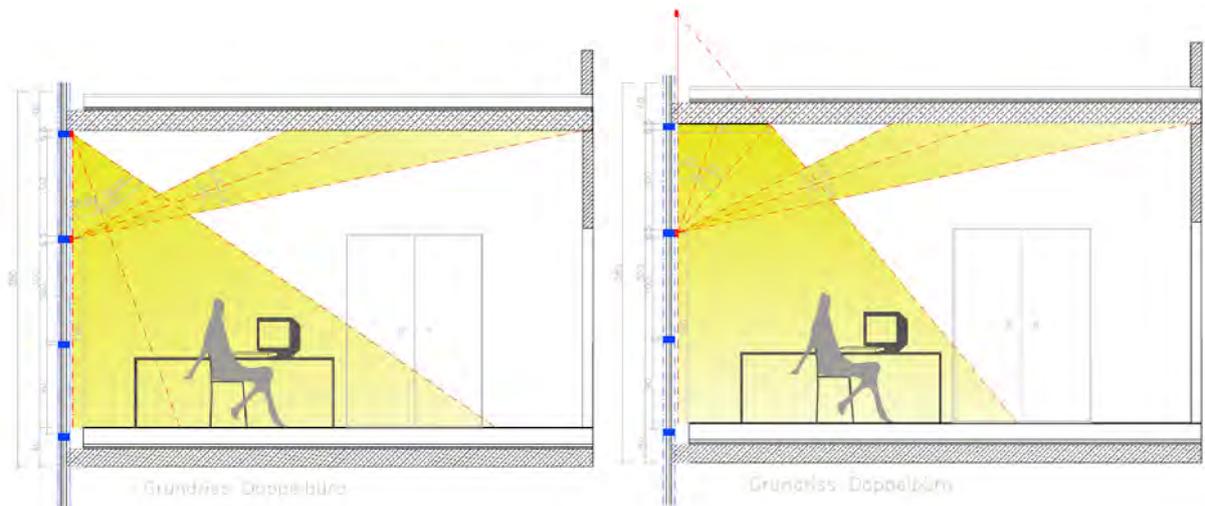


Abbildung 11: Kunstlichtkonzept 1: Beleuchtung aus zwei Positionen in der Fassade (links), Kunstlichtkonzept 2: Beleuchtung aus einer Positionen in der Fassade (rechts)

Eine LED- wird einer Leuchtstofflampenlösung gegenübergestellt. Alle Kunstlicht-Beleuchtungskonzepte werden in den zwei Leuchten-Varianten durchgerechnet. Dabei ergeben sich Unterschiede in der möglichen Einbaugröße, in der Anschlussleistung, in der Blendungsbegrenzung, in der Erfüllung der Norm und in der Flexibilität des Systems. Mit der Flexibilität wird dabei die Möglichkeit bezeichnet, die Ausstrahlcharakteristik des Lichtsystems den Anforderungen des Raumes entsprechend zu verändern und anzupassen. Diese Anpassungsfähigkeit der LVK an die Anforderungen führt etwa bei den LED-Lösungen zu einer Reduktion der Anschlussleistung im Vergleich zur Leuchtstofflampen-Möglichkeit.

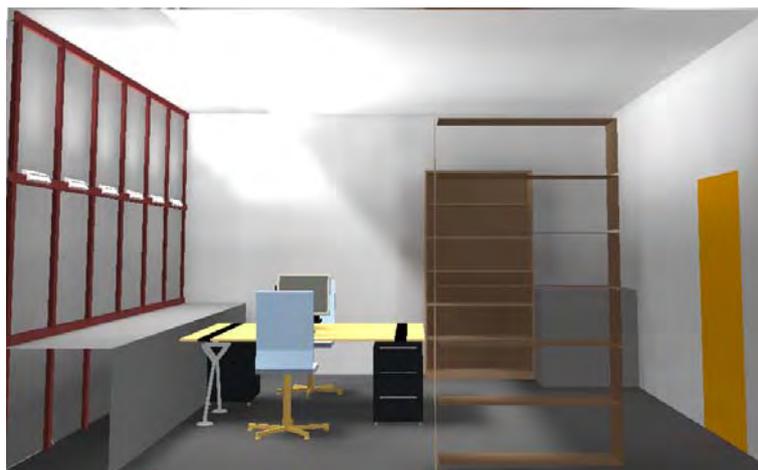


Abbildung 12: Visualisierung des Kunstlichtkonzeptes 2 mit LED Beleuchtung

3.4 Evaluierung an Hand von Lichtsimulation, Auswirkung der Tages- und Kunstlichtkombinationen auf den Gesamtenergieverbrauch

Die erarbeiteten Konzepte sollten sowohl lichttechnisch als auch thermisch unter Verwendung der in 3.2.2 und 3.2.5 dargestellten Modelle evaluiert werden. Für die entsprechenden Simulationen wurde wie in 3.2 beschrieben auf die Programme TRNSYS (thermisch) und RADIANCE (lichttechnisch) zurückgegriffen. Erste Ansätze diese beiden Simulationen zu verbinden wurden ausgearbeitet, wobei Ergebnisse einer lichttechnischen Jahressimulation als Eingabedaten in der thermischen Simulation verwendet wurden.

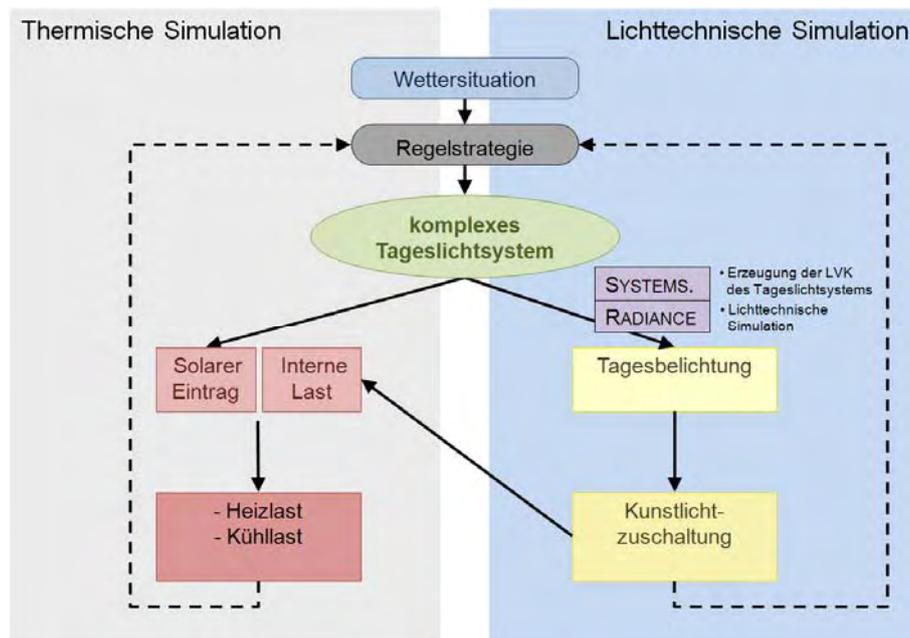


Abbildung 13: Erster Ansatz gemeinsamer thermischer und lichttechnischer Evaluierung

Mit diesem Ansatz war es zwar möglich in der thermischen Simulation die Ergebnisse der Licht-Berechnung zu berücksichtigen, es konnte jedoch in der Lichtsimulation nicht auf thermische Gegebenheiten im jeweiligen Zeitschritt reagiert werden (Stellung des TL-Systems).

Aus diesem Grund wurde ein gekoppelter Simulationsablauf ausgearbeitet der in jedem Zeitschritt eine Kommunikation zwischen der thermischen und der lichttechnischen Berechnung ermöglicht. Eine derartige integrative Berechnung der beiden wesentlichen Eigenschaften einer Fassade ist laut Wissensstand des Projektkonsortiums bis dato weder in kommerziellen Programmen möglich noch in wissenschaftlichen Arbeiten zu finden.

3.4.1 Gekoppelte thermische und lichttechnische Simulation

In Abbildung 14 wird der Ablauf der gekoppelten Simulation skizziert. Mit dem Programmaufruf von TRNSYS (thermische Simulation) wird die gekoppelte Jahressimulation gestartet. In jedem Zeitschritt wird eine lichttechnische Auswertung basierend auf der „3-Phasen-Methode“ durchgeführt und das Ergebnis als Input (interne Lasten durch notwendige

Kunstlichtzuschaltung) in der thermischen Berechnung verwendet. Dabei kann – bei Auftreten thermischer Probleme (Überhitzung, zu geringe solare Einträge) – auch im Zeitschritt iteriert werden, um so die optimale Stellung des Tageslichtsystems zu bestimmen. Abbildung 14 zeigt schematisch den Ablauf der gekoppelten Simulation.

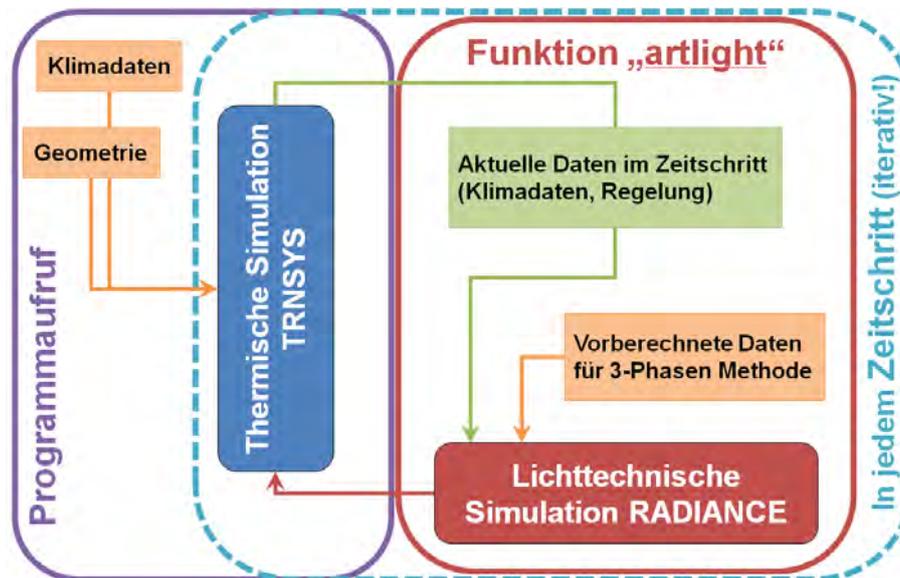


Abbildung 14: Ablauf der gekoppelten thermischen und lichttechnischen Simulation mit TRNSYS und RADIANCE

Um diese Koppelung zwischen thermischer und lichttechnischer Simulation zu ermöglichen, wurden für die TL-Systeme entsprechende Regelstrategien implementiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass bereits in der lichttechnischen Steuerung auf mögliche thermische Einflüsse Rücksicht genommen wird (Unterschiede Sommer – Winter, etc.). Ziel dieser Regelstrategien ist immer die Optimierung hinsichtlich Tageslichtnutzung, um somit eine Verringerung bei Heiz- und Kühlenergiebedarf zu erreichen.

3.4.2 Betrachtete Tageslichtsysteme

Für die Systembewertung wurde ein Referenzsystem in Form eines außenliegenden Raffstores sowie das komplexe Tageslichtsystem „Flügellamelle“ (entwickelt und patentiert von Bartenbach LichtLabor) gewählt (vgl. Abbildung 15). Das Referenzsystem entspricht einem weit verbreiteten Standardsystem. Die „Flügellamelle“ bringt durch ihre spekulare Oberfläche viel Licht in den Raum, ermöglicht aber durch den großen Lochanteil gleichzeitig in jeder Stellung Durchsicht und somit einen Bezug nach außen. Eine Evaluierung des komplexen Tageslichtsystems „Flügellamelle“ im Vergleich zu konventionellen Verschattungssystemen ist dadurch möglich.

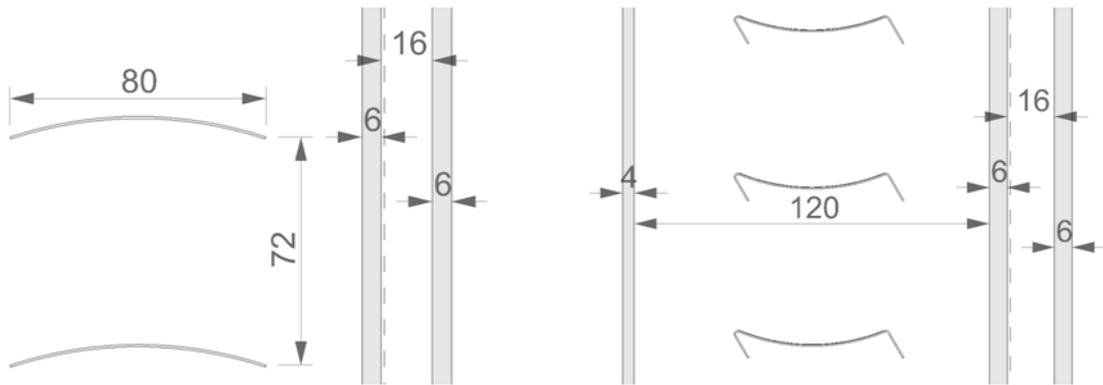


Abbildung 15: Tageslichtsysteme im Vergleich: Referenzsystem außenliegender Raffstore (links), komplexes Tageslichtsystem „Flügellamelle“ (rechts)

Die Flügellamelle besteht aus 2 getrennten Bereichen – einer perforierten und folierten Sichtzone zur Blendungsvermeidung bei gleichzeitiger Durchsicht, sowie einer lichtlenkenden Zone mit hochreflektierenden Lichtlenklamellen zum gezielten Tageslichteintrag in den Raum. Diese Funktion soll bei gleichzeitig vermindertem thermischem Eintrag eine möglichst hohe Tageslichtautonomie bieten und dadurch den Kunstlichtbedarf reduzieren.

Beide Systeme sind mit verstellbaren Lamellen zum gezielten Blendschutz und mit derselben lichttechnischen und thermischen Kontrolle ausgeführt. Das Referenzsystem besitzt drei Lamellenstellungen, die „Flügellamelle“ erlaubt mit 7 möglichen Stellungen ein genaueres Nachregeln.

3.4.3 Validierung der thermischen Modelle

Der Ausarbeitung und Darstellung der Unterschiede zwischen dem neuen, verbesserten Tageslichtsystem und dem konventionellen Raffstore ist jeweils ein Vergleich der thermischen Modelle untereinander vorangegangen.

In Tabelle 3 sind die aufgetretenen absoluten Abweichungen zwischen den beiden thermischen Modellen g-Modell und Abs-Modell angeführt. Die Werte resultieren aus einer Jahressimulation unter den in Tabelle 1 angeführten Randbedingungen und basieren auf einer Optimierung der thermischen Modelle auf das jeweilige TL-System. Stimmen die Modelle beim außenliegenden Raffstore sehr gut überein, so zeigen sich beim komplexen Tageslichtsystem „Flügellamelle“ höhere Abweichungen aufgrund der nicht ausreichend genauen Modellierung der sekundären Wärmeabgabe.

Tabelle 3: Abweichungen zwischen den beiden thermischen Modellen bzgl. operativer Raumtemperatur (TOP), Scheibeninnentemperatur (TSI) und Gesamtenergiebilanz

Absolute Abweichungen	TOP	TSI	Gesamtenergiebilanz
	[°C, abs.]	[°C, abs.]	[% , abs.]
außenliegender Raffstore	0.3 °C	0.1 °C	2%
Tageslichtsystem "Flügellamelle"	1 °C	0.3 °C	7%

Die Validierung der Modelle erfolgte anhand von simulationsgestützten g-Wert-Messungen. Eine ausführliche Validierung anhand von Referenzmessungen für diverse TL-Systeme ist für eine gesicherte Aussage bezüglich Modellgenauigkeit noch durchzuführen. Dies soll in einem Nachfolgeprojekt stattfinden.

3.4.4 Simulationsvarianten und Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch

Betrachtet man zum Vergleich der beiden Systeme die Jahresgesamtenergiebilanz aufgeteilt in Heizenergie, Kühlenergie, solarem Eintrag und Kunstlichtbedarf (vgl. Abbildung 16), so zeigt sich deutlich ein hohes Kunstlichteinsparpotential mit dem neuen Tageslichtsystem „Flügellamelle“. Trotz erhöhten solaren Eintrags durch die Fassade verringert sich beim Tageslichtsystem der Kühlenergiebedarf, was auf den deutlich reduzierten Kunstlichtbedarf zurückzuführen ist. Die in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse entstammen einer thermisch und lichttechnisch gekoppelten Jahressimulation.

Die in der gekoppelten Simulation (vgl. Absatz 3.4) implementierte, kombinierte lichttechnische und thermische Regelung hat dabei das Ziel der Erreichung von 500lux auf der Arbeitsfläche unter gleichzeitiger Vermeidung von Blendung sowie thermischer Überhitzung im Raum. Der auf die normbedingt vorgegebene Zielgröße fehlende Tageslichteintrag wird entsprechend der gesetzten Randbedingungen zu jedem Zeitpunkt durch Kunstlicht ergänzt.

Mehrere Parametersimulationen mit veränderten Leuchtdichtegrenzen an der Fensterscheibe (1000cd/m^2 , 3000cd/m^2) haben dabei noch wesentliches Optimierungspotential in der Reduktion des Kunstlichtbedarfes gezeigt, was die positive Einflussmöglichkeit einer integrativen lichttechnischen und thermischen Regelung unterstreicht.

Es zeigte sich, dass durch eine intelligente Regelungsstrategie aus lichttechnischer Sicht bereits ein hohes Maß an Optimierung erreicht werden kann – weitere Einsparungen durch zusätzliche thermische Regelstrategien sind in diesem Fall nicht mehr notwendig. Speziell die Flügellamelle, welche bei lichttechnischem Optimum auch thermischen Kriterien Rechnung trägt, zeigt, dass die sonst teils gegenläufigen lichttechnischen und thermischen Anforderung mit derartigen Systemen kombiniert werden können.

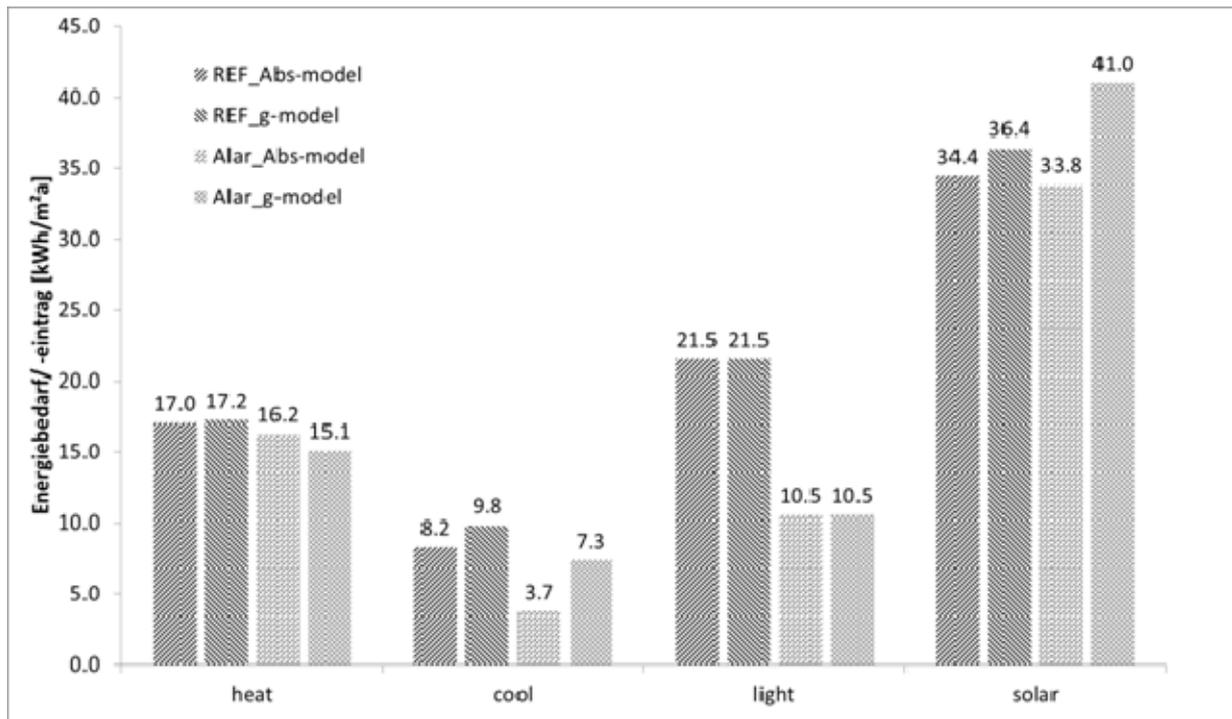


Abbildung 16: Gesamtenergiebilanz für Raffstore (REF) und Tageslichtsystem „Flügellamelle“ (Alar)

Mit einer strikten Regelstrategie konnten schließlich für beide Systeme folgende in Tabelle 4 angeführten Tageslichtautonomiewerte für die Arbeitsfläche sowie für die Raumtiefe erreicht werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die mittleren Leuchtdichten im Sichtfeld zu keinem Zeitpunkt über einer gegebenen Schranke lagen. Ebenso wird durch variable Lamellenstellung ein Überschreiten der komfortablen Raumtemperaturen möglichst vermieden. Aufgrund der strikten Regelungsstrategie wird mit der „Flügellamelle“ im Jahresmittel lediglich eine Tageslichtautonomie von 65% erreicht. Durch Anhebung des Grenzwertes für die max. Leuchtdichte an der Verglasung auf 3000cd/m² erhöht sich dieser Wert auf 79%. Die Erhöhung des Grenzwertes zeigt deutliche Einsparungen im Kunstlichtbedarf. Allerdings wird dadurch der visuelle Komfort (Blendung) verschlechtert. Thermisch wirkt sich dies vor allem in einer erhöhten Kühlleistung aus.

Tabelle 4: Erreichte Tageslichtautonomie der Systeme

Beleuchtungsstärke	Raffstore 1000cd/m ²	Raffstore 3000cd/m ²	Flügellamelle 1000cd/m ²	Flügellamelle 3000cd/m ²
auf Arbeitsfläche > 300lx	20.4% (554 h)	67.2% (1828 h)	65.4% (1778 h)	78.7% (2140 h)
Hintergrundbereich > 70lx	67.4%(1834h)	85.6% (2328 h)	87.1% (2370 h)	88.9% (2418 h)

Gemäß EN12464 sind für die minimale Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 500 lx einzuhalten. Laut DIN 5034 sind bei reiner Tagesbelichtung bereits 60% (300 lx) dieser Beleuchtungsstärke ausreichend. Im Hintergrundbereich werden 30% der Vorgabe für den unmittelbaren Umgebungsbereich (200 lx) gefordert, was in etwa 70 lx entspricht.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die erreichten Beleuchtungsstärken einer reinen Tageslichtnutzung auf der Arbeitsfläche mit dem außenliegenden Raffstore und der Flügellamelle (X-Achse: Simulationsjahr in Tagen / Y-Achse: Tagstunden 0-24h).

Die gezielte Lichtlenkung in den Raum liefert dabei eine deutlich verbesserte Lichtsituation auf der Arbeitsfläche.

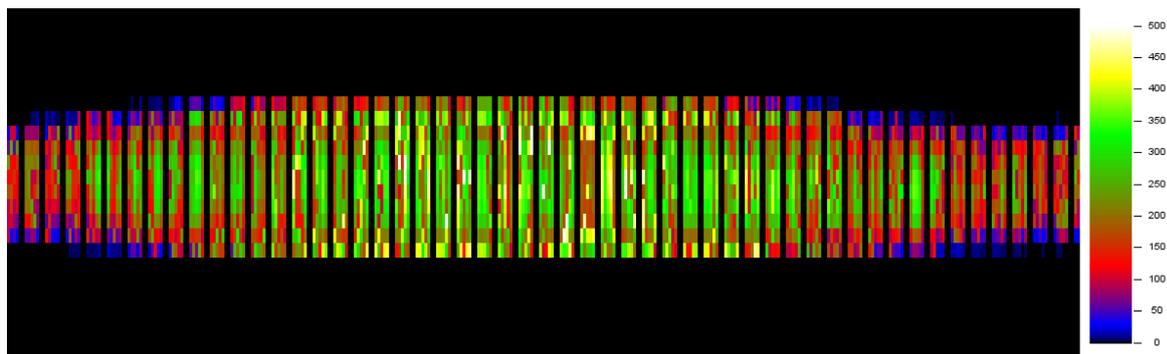


Abbildung 17: Jährliche Beleuchtungsstärke [lux] auf Arbeitsfläche (Referenzsystem Außenraffstore)

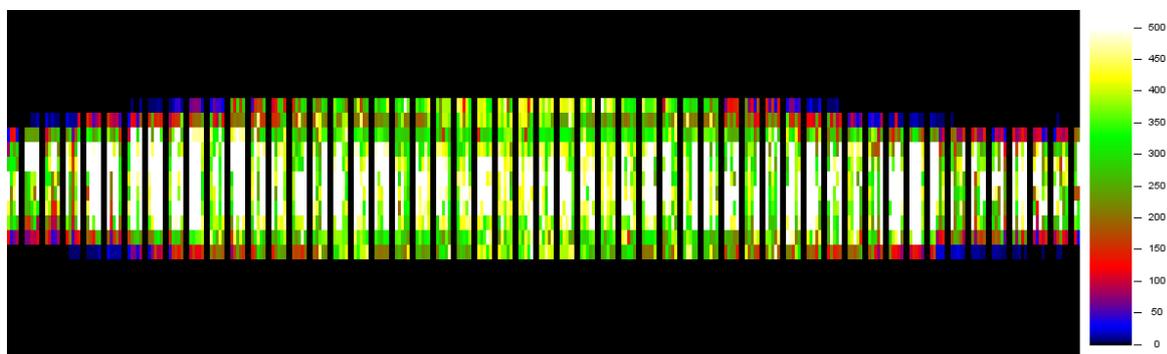


Abbildung 18: Jährliche Beleuchtungsstärke [lux] auf Arbeitsfläche (Tageslichtsystem „Flügellamelle“) (X-Achse: Simulationsjahr in Tagen / Y-Achse: Tagstunden 0-24h)

Der kumulierte Strombedarf für Heizen/Kühlen/Kunstlicht ist unter Berücksichtigung einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 2.8 für die Kältebereitstellung und einer JAZ von 4 für die Wärmebereitstellung berechnet worden (vgl. Abbildung 19). Es sind für einen

Leuchtdichtegrenzwert von 1000cd/m² auf der Verglasungsfläche zwei Varianten der Regelung angeführt:

- „light“ – mit Regelung nach lichttechnischen / visuellen Kriterien, die bereits thermische Überlegungen beinhalten und
- „therm“ – zur vorrangigen Einhaltung eines komfortablen Raumklimas gemäß der operativen Raumtemperatur mit Einfluss der Ergebnisse der thermischen Simulation in die Regelung („Rückkoppelung“).

Dabei war das Kriterium Blendschutz für beide Fälle maßgebend. Eine dritte Variante stellt die deutliche Verringerung des Kunstlichtbedarfs bei Erhöhung des Leuchtdichtegrenzwertes auf 3000cd/m² dar.

In Summe zeigt sich zu jedem Szenario ein deutlicher Vorteil des Tageslichtsystems speziell bezogen auf den resultierenden Kunstlichtbedarf, wobei der Unterschied mit „weicheren“ Randbedingungen (Beschränkung der Leuchtdichte auf 3000cd/m²) abnimmt.

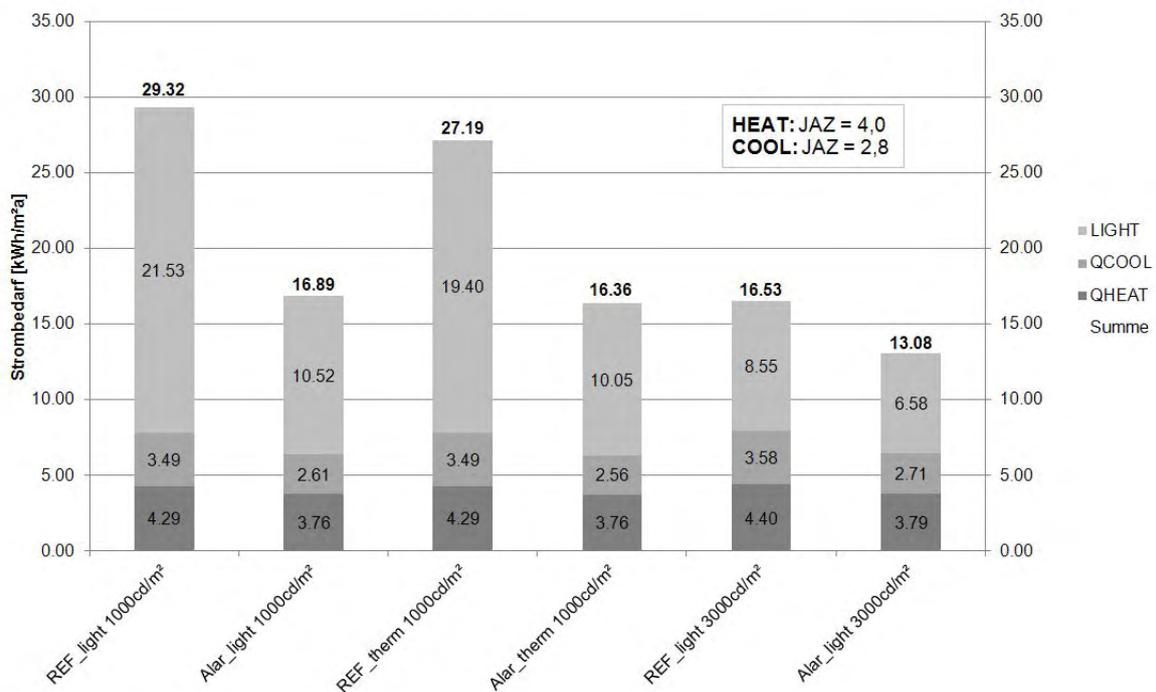


Abbildung 19: Kumulierter Jahresstrombedarf für Raffstore und Tageslichtsystem „Flügellamelle“

4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms

4.1 Einpassung in das Programm

Die Fassade insbesondere von großflächig verglasten Verwaltungsgebäuden stellt derzeit eines der Hauptprobleme in unserer Baukultur dar. Die meisten ausgeführten Lösungen kontrollieren den Energiefluss unzureichend, was zu stark erhöhtem Energieverbrauch der Gebäude führt. Hier gibt es ein sehr großes Verbesserungspotential, der Bedarf für Kunstlicht und der Kühlbedarf im Sommer können stark gesenkt werden.

Mit diesen Fragestellungen knüpft das vorliegende Projekt an die Programminhalte von „Haus der Zukunft Plus“ direkt an, wo durch grundlegende Forschungsarbeiten sowie kooperative Technologieentwicklungen neue Erkenntnisse für die Effizienzsteigerung im Gebäudebereich erreicht werden konnten.

4.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms

Das vorliegende kooperative Projekt zur industriellen Forschung stellt einen neuartigen Ansatz der Vereinigung der Funktionen Tageslicht und künstlicher Beleuchtung dar. Die Entwicklung und Bewertung von effizienten Tages- und Kunstlichtsystemen ist Grundvoraussetzung zur Maximierung von Energieeinsparungen. Dies wird besonders durch die Integration in ein ganzheitliches Fassadenkonzept gewährleistet. Die Fassade als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenklima ist entscheidend für den Energieverbrauch des Gebäudes, sie steuert Tagesbelichtung, solare Energieeinträge und Wärmeströme.

Die in diesem Projekt entwickelten Berechnungs- und Planungsmethoden stellen dabei eine Möglichkeit dar, im Zuge von intelligenten Fassadensystemen eine sehr innovative und zukunftssträchtige Bauweise umzusetzen. Durch die Minimierung des Gesamtenergiebedarfs für Heizen, Kühlen und Strombedarf für die Beleuchtung können maßgebliche Entlastungen im Strombedarf und damit sowohl eine Erhöhung der Energieeffizienz als auch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich erzielt werden.

4.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Im gegenständlichen Projekt waren drei österreichische Firmenpartner (Fassadenbauer, Sonnenschutzexperte, Lichtforscher und -planer) beteiligt. Über das K-Projekt „Multifunctional Plug&Play Facade (MPPF)“ waren 9 weitere österreichische Firmen und 2 weitere Forschungseinrichtungen eingebunden.

Eine kooperative Technologieentwicklung sowie eine starke Verschränkung der fachlichen Inhalte war dabei durch die einschlägigen Kompetenzbereiche der involvierten Partner (Lichttechnik und Planung durch BLL, Gebäudetechnik und thermische Simulation durch UIBK, Fassadenkonzepte durch FIBAG) sehr stark ausgeprägt und wertvoll für einen erfolgreichen Projektverlauf.

Durch die Verzahnung mit dem österreichischen K-Projekt „Multifunctional Plug&PlayFacade, MPPF“ war gewährleistet, dass an realisierbaren Lösungen gearbeitet werden konnte. Zudem bestand durch die Partner ein enger wirtschaftlicher Konnex mit zukünftigen österreichischen Anwenderfirmen und Planern.

Damit hat das Projekt zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Anbieter durch Erreichung bzw. Absicherung des Technologievorsprunges beigetragen. Außerdem sind die Ergebnisse somit einer größeren Anzahl von Firmen zugänglich, was einer Verbreitung dieser Technologien und des begleitenden Know How's zugutekommt.

4.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse

Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung und die Nutzung von Tageslicht hat einen hohen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf von Gebäuden. Ein besonderes Problem stellt in Österreich der zunehmende Kühlbedarf dar. War bis vor wenigen Jahren noch der Strombedarf für Kühlung von Gebäuden in Österreich praktisch null, so ist es in der Zwischenzeit speziell in Verwaltungsgebäuden zur Gepflogenheit geworden, Kühlanlagen einzubauen.

Hauptursache für diese Entwicklung sind vor allem ungenügende Sonnenschutzmaßnahmen. Vermeidet man durch entsprechende Fassadenkonstruktion diesen im Sommer unnötigen solaren Eintrag, so kann in den meisten Fällen auf eine mechanische Kühlung verzichtet werden. Diese Entwicklung in eine völlig falsche Richtung muss sofort gestoppt werden, um nicht in der Zukunft zusätzliche Energieprobleme zu schaffen.

Durch die Verringerung des Strombedarfs für Beleuchtung und Kühlung soll eine Trendumkehr des heute stetig steigenden Strombedarfs im Gebäudebereich erzielt werden. Damit stellt das Projekt einen Schritt in Richtung eines CO₂-neutralen Gebäudesektors dar. Je geringer der Energiebedarf des Gebäudes wird, desto eher kann mit aktiven Sonnenenergiemaßnahmen wie Solarthermie und Photovoltaik ein Plus-Energie-Haus realisiert werden.

Eine gemeinsame Betrachtung der Funktion Tageslichtnutzung und dessen Auswirkung auf den Energieverbrauch sind damit unabdingbar und für die zukünftige Gebäude- bzw. Fassadenplanung ein wichtiges Element um den Gesamtenergiebedarf in Gebäuden zu senken. Besonders interessant war hier das Wechselspiel Verschattung / Tagesbelichtung / Kunstlicht, um für die unterschiedlichen Jahreszeiten jeweils ein Minimum an Kühl-/ Heizenergiebedarf und Strombedarf zu erreichen.

5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Besonders für eine Modernisierung oder Sanierung von bestehenden Gebäuden bietet eine energieeffiziente Lösung der Kunst- und Tageslichtversorgung von der Fassade her viele Vorteile, da sich dabei die notwendigen Eingriffe in die bestehende Bausubstanz vor allem auf die Gebäudehülle beschränken. Das schonende Retrofitting ist ein wesentlicher Aspekt im Rahmen des Kompetenz-Zentrums MPPF „Multifunctional Plug&Play Facade“, deren Gesamtleitung (FIBAG) und deren wissenschaftlicher Leiter UP DI Dr. Wolfgang Streicher in diesem Forschungsprojekt (Seitenprojekt zu MPPF) ebenfalls als Partner beteiligt sind.

Gemäß der ausführlichen Marktanalyse verbunden mit einer Literatur- und Patentrecherche erfüllen die verfügbaren Tages- und Kunstlichtsysteme die im Projekt gestellten Anforderungen nicht. Daher füllt eine neu entwickelte kombinierte Kunst- und Tageslichtlösung, die einfach in die Fassade integriert werden kann, eine Marktlücke und hat ein entsprechendes wirtschaftliches Potential.

Die dabei erstellte Produktübersicht ist darüber hinaus für die Projektpartner eine wertvolle Informationsquelle bei der Bearbeitung von künftigen Planungsprojekten und Produktentwicklungen. Weiters wird dieses Wissen auch in die Lehre an der Lichtakademie Bartenbach und an der Universität Innsbruck einfließen.

Die für genauere Untersuchungen definierten Referenzräume inklusive den detaillierten bauphysikalischen und lichttechnischen Randbedingungen sind einerseits die Grundlage für die in diesem Projekt entwickelten Konzepte und durchgeführten Berechnungen, bilden aber auch für künftige Forschungsprojekte und Produktentwicklungen eine Basis zum Vergleichen der Ergebnisse unter identischen Rahmenbedingungen.

Die von der Anwendungsgruppe im Bartenbach LichtLabor erarbeiteten Konzepte für die Kombination von Kunst- und Tageslicht haben ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten, die über die konkreten Problemstellungen in diesem Projekt hinausreichen und können auch in künftigen Projekten umgesetzt und ergänzt werden. Die Realisierung von Innovationen in der Gebäudehülle und eine zeitgemäße Nutzung von Fassaden können wesentlich zur Einsparung von Primärenergie und zur größeren Nachhaltigkeit im Bauwesen beitragen.

Ein Problempunkt bei der intelligenten Nutzung von Tageslicht sind die fehlenden Verfahren zur Berechnung der lichttechnischen und energetischen Auswirkungen des Einsatzes moderner Tageslichtsysteme. Während es für Kunstlichtplanungen hochwertige und kostenlos verfügbare Standardsoftware gibt, die eine herstellerunabhängige Verplanung von Leuchten durch einen weiten Anwenderkreis (Planungsbüros, Elektroplaner, ...) ermöglicht. Im Vergleich dazu stecken Tageslichtplanungsprogramme noch in ihren Kinderschuhen: Tageslichtöffnungen sind häufig nur Löcher in der Fassade, die das auftreffende Licht um einen Faktor vermindern. Nicht einmal Verglasungen können mit diesen Programmen korrekt berücksichtigt werden und umso weniger hochwertige Tageslichtsysteme.

Eine Koppelung mit thermischen Berechnungen erfordert außerdem nicht nur eine statische Berechnung für einen definierten Normhimmel wie etwa den bedeckten Himmel nach CIE, sondern eine zumindest stündliche Auswertung für möglichst realitätsnahe Außensituationen, die den Klimadaten entsprechen, die Basis jeder Gebäudesimulation sind. Dazu kommt, dass sich nicht nur das Tageslicht selbst dynamisch ändert, sondern auch die Systeme anhand von ausgeklügelten Steuerungs- oder Regelungsstrategien auf die geänderten Außenbedingungen reagieren müssen, um eine optimale lichttechnische Wirkung bei gleichzeitig hohem Komfort für die Nutzer gewährleisten zu können.

Diese Herausforderung konnte durch eine geeignete Kombination und teilweise auch Anpassung von High-End Software wie

- TRNSYS: Thermische Gebäudesimulation <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- ASAP: Simulation optischer Systeme <http://www.breault.com/>
- Radiance: Ray Tracer für Renderings und lichttechnische Berechnungen <http://radsite.lbl.gov/radiance/>

mit selbst geschriebener Software

- zusätzliche TRNSYS-Module zur Berücksichtigung des winkelabhängigen g-Werts
- Tools zur Bestimmung der lichttechnischen und thermischen Eigenschaften von Tageslichtsystemen mit ASAP: Bestimmung einer BSDF für Radiance
- Regelungsstrategie für ein mehrteiliges, bewegliches Tageslichtsystem mit der Möglichkeit eines thermischen Eingriffs von TRNSYS aus
- Nutzung und Verbesserung eines neuen Konzepts in Radiance (Three Phase Daylight Coefficient Method) in Zusammenarbeit mit dem Programmator Greg Ward

gemeistert werden.

Diese neu entstandenen Verfahren und Werkzeuge sollen im beantragten Forschungsprojekt „Komplexe Fassaden“ (Langtitel: „Gekoppelte thermische und lichttechnische Simulationsmethode für komplexe Fassaden“) im Rahmen der 5. Ausschreibung zu „NEUE ENERGIEN 2020“ vertieft und weiterentwickelt werden. Damit soll dann in Zukunft auch eine einfachere Anwendung in Standardplanungen möglich sein.

Bereits jetzt stellt diese einzigartige Methode eine Innovation dar, die sowohl in der Lichttechnik (Bartenbach LichtLabor), als auch in der Gebäudesimulation (Universität Innsbruck) in Projekten eingesetzt werden soll. Damit ist erstmalig eine dynamische Koppelung aufwendiger Tageslichtberechnungen mit thermischen Berechnungen zu Heizung und Kühlung in jedem Zeitschritt einer Jahressimulation möglich. Die Neuartigkeit dieses Vorgehens hat bei Vorträgen in Fachkonferenzen und Tagungen entsprechendes Interesse hervorgerufen, soll aber in dieser Form nur den jeweiligen Projektpartnern zur Verfügung stehen.

Die Projektergebnisse wurden veröffentlicht und bei verschiedenen Anlässen einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Außerdem findet dieses Wissen Eingang in die Vorlesungen der Partner sowohl an Universitäten, als auch an der Lichtakademie Bartenbach.

6 Ausblick und Empfehlungen

Die im Rahmen des Projekts ausgearbeiteten kombinierten Tageslicht- und Kunstlichtkonzepte zur Raumbelichtung aus der Fassade bieten eine wertvolle Grundlage für eine folgende Detailentwicklung dieser Systeme. Um die entworfenen Kunstlichtvarianten in Projekten umzusetzen, können basierend auf den Vorgaben der Lichtstärkeverteilung entsprechende Systemkomponenten (Linsen, Reflektoren) entwickelt werden. In Kombination mit dem im Projekt untersuchten Tageslichtsystem „Flügellemelle“ können dann vorgefertigte Fassadenelemente (etwa im Rastermaß einer „Multifunctional Plug&Play Façade“ aus dem Partnerprojekt MPPF) geplant und verbaut werden. Derartige Fassaden erfüllen dann die vorgegebenen thermischen Anforderungen, liefern aber zusätzlich eine ausreichende Belichtung mit Tages- und Kunstlicht im Raum.

Um solche komplexe Fassaden vorab simulationstechnisch evaluieren zu können, wurde im Rahmen des Projekts eine Routine zur gekoppelten thermischen und lichttechnischen Jahressimulation zwischen den Programmen TRNSYS und RADIANCE entwickelt. Damit kann dem Aspekt der Tageslichtnutzung aus der Fassade in der Gebäudeplanung künftig verbessert Rechnung getragen werden. Eine essentielle Rolle in der gekoppelten Simulation spielt die zugrundeliegende Steuer- bzw. Regelstrategie. Dabei muss eine intelligente Abstimmung zwischen lichttechnischen und thermischen Anforderungen gefunden werden um thermische Behaglichkeit (Temperatur, keine Strahlungsasymmetrie) bei gleichzeitigem visuellem Komfort (ausreichende Beleuchtung, keine Blendung) zu garantieren.

Im Bereich der gekoppelten Simulation sollten noch weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Die vorhandenen Berechnungsansätze zur thermischen Abbildung von komplexen Fassaden mit integrierten Tageslichtsystemen in der thermischen Simulation sollten weiter verfeinert und validiert werden (etwa winkelabhängige Durchlassgrade und Oberflächentemperaturen). Auch im Bereich der lichttechnischen Simulationen ist noch Optimierungspotential vorhanden (z.B. BSDF-Diskretisierung oder spektrale Eigenschaften von Verglasungen, insbesondere in Wechselwirkung mit dem komplexen Tageslichtsystem). Zusätzlich sollte die Schnittstelle zwischen thermischer und lichttechnischer Simulation verbessert werden um kürzere Berechnungszeiten zu ermöglichen.

Zur weiterführenden Entwicklung der gekoppelten Simulation wird von den Projektpartnern aus dem „LichtAusFassade“-Konsortium ein Folgeprojekt angestrebt. Hier soll u.a. ein in der Planung anwendbares Simulationstool für die zukünftige Fassadenkonzeption und -planung bieten.

7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis

7.1 Literatur

[Neufert, 2009] Neufert Ernst: Bauentwurfslehre Neufert. In Neufert Peter, Kister Johannes (Hrsg.), 39. Auflage, 2009

[radiance-online, 2011] <http://www.radiance-online.org/> (abgerufen am 20.12.2011, 19:27 Uhr)

[transsolar, 2011]

http://www.transsolar.com/_software/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm
(abgerufen am 20.12.2011, 19:27 Uhr)

[Ward, Larson, 1998] Ward Larson Gregory, Shakespeare Rob: Rendering with Radiance, Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

7.2 Abbildungen

Abbildung 1: Tageslichtverlauf ohne Beschattung (blaue Kurve) und mit Beschattung (rote Kurve): Die hohe Leuchtdichte im unbeschatteten, fensternahen Bereich nimmt zur Raumtiefe hin rasch ab. Ein konventioneller Blend- oder Sonnenschutz reduziert den Lichteinfall linear.....	12
Abbildung 2: Primärenergiekennwerte für Bürogebäude (Quelle: IWU-Darmstadt).....	13
Abbildung 3: Bild: Hohe Glasflächenanteile garantieren nicht automatisch eine ausreichende Tageslichtbeleuchtung. Bei steigendem Glasflächenanteil steigt auch die Kunstlicht-zuschaltung infolge von Blendschutzvorrichtungen (v. a. bei Bildschirmarbeitsplätzen)	13
Abbildung 4: Grund- und Seitenriss des verwendeten Referenzraummodells Doppelbüro ...	19
Abbildung 5: Sensitivitätsdiagramm – Einflussfaktoren auf den g-Wert am Bsp. 2-Scheibenverglasung.....	21
Abbildung 6: Schema der thermischen Modellierung (g-Modell / Abs-Modell).....	23
Abbildung 7: Simulation des Referenzraums „Doppelbüro“	24
Abbildung 8: Beispiele für BSDFs: Transmissionseigenschaften des Referenzsystems (links) und des komplexen Tageslichtsystems „Flüggellamelle“ (rechts) für spezifische Einstrahlwinkel	24

Abbildung 9: Idee der 3-Phasen-Methode zur lichttechnischen Jahressimulation	25
Abbildung 10: Konzept zur Fassadenunterteilung in Bereiche zur Integration des Tageslichtsystems entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen	26
Abbildung 11: Kunstlichtkonzept 1: Beleuchtung aus zwei Positionen in der Fassade (links), Kunstlichtkonzept 2: Beleuchtung aus einer Positionen in der Fassade (rechts).....	27
Abbildung 12: Visualisierung des Kunstlichtkonzeptes 2 mit LED Beleuchtung	27
Abbildung 13: Erster Ansatz gemeinsamer thermischer und lichttechnischer Evaluierung ...	28
Abbildung 14: Ablauf der gekoppelten thermischen und lichttechnischen Simulation mit TRNSYS und RADIANCE	29
Abbildung 15: Tageslichtsysteme im Vergleich: Referenzsystem außenliegender Raffstore (links), komplexes Tageslichtsystem „Flügellamelle“ (rechts)	30
Abbildung 16: Gesamtenergiebilanz für Raffstore (REF) und Tageslichtsystem „Flügellamelle“ (Alar)	32
Abbildung 17: Jährliche Beleuchtungsstärke [lux] auf Arbeitsfläche (Referenzsystem Außenraffstore)	33
Abbildung 18: Jährliche Beleuchtungsstärke [lux] auf Arbeitsfläche (Tageslichtsystem „Flügellamelle“) (X-Achse: Simulationsjahr in Tagen / Y-Achse: Tagstunden 0-24h).....	33
Abbildung 19: Kumulierter Jahresstrombedarf für Raffstore und Tageslichtsystem „Flügellamelle“	34

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der gewählten Randbedingungen des Referenzraumes im Passivhausstandard	19
Tabelle 2: Entwickelte thermische Modelle in TRNSYS	21
Tabelle 3: Abweichungen zwischen den beiden thermischen Modellen bzgl. operativer Raumtemperatur (TOP), Scheibeninnentemperatur (TSI) und Gesamtenergiebilanz	30
Tabelle 4: Erreichte Tageslichtautonomie der Systeme	33