

Integrale Tages- und Kunstlicht- steuerung für hohen visuellen und melanopischen Komfort bei hoher Primärenergieeffizienz

VisErgyControl

D. Plörer, M. Hauer, R. Pfluger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

43/2019

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/>

Integrale Tages- und Kunstlichtsteuerung für hohen visuellen und melanopischen Komfort bei hoher Primärenergieeffizienz

VisErgyControl

Mag. Daniel Plörer, Dr. Martin Hauer,
Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger
Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften, Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen

Mag. Wilfried Pohl, Dipl.-Ing. MMag. Markus Canazei, MSc.,
Dipl.-Ing. Dr. David Geisler-Moroder
Bartenbach GmbH

Mag. Robert Weitlaner, Msc., Manuel Stanglechner,
Emanuel Mühlmann
HELLA Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH

Innsbruck, Februar 2018

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.....	14
1.1 Aufgabenstellung	14
1.2 Stand der Technik.....	16
1.2.1 Kunstlichtsteuerung – Tageslichtsteuerung	16
1.2.2 Messsysteme/Sensorik.....	17
1.2.3 Nichtvisuelle Lichtwirkung	17
1.2.4 Energieeinsparpotential durch Tageslichtlenksysteme	18
1.3 Verwendete Methoden.....	19
1.3.1 Systemkonzept und Sensorik	20
1.3.2 Simulation und Modellierung	20
1.3.3 Erprobung und Demonstration.....	22
2 Ergebnisse	24
2.1 Entwicklung eines melanopischen „Modells“	24
2.1.1 Grundlagen	24
2.1.2 Modell	26
2.2 Entwicklung der Steuerstrategie	28
2.2.1 Lichttechnische Simulation im Steuerungsmodul.....	28
2.2.2 Thermische Simulation im Steuerungsmodul.....	29
2.2.3 Steuerungslogik.....	29
2.3 Simulationstechnische Erprobung des Steuerungsmoduls.....	30
2.3.1 Verwendete Simulationsmethoden	31
2.3.2 Vergleich des VEC-Moduls gegen eine konventionelle Steuerstrategie	33
2.4 Testablauf an der PASSYS-Zelle	37
2.4.1 Kalibrierung PASSYS	37
2.4.2 Testfassaden-Einbau.....	38
2.4.3 Langzeitmonitoring an der PASSYS-Zelle der UIBK.....	39
2.4.4 Ergebnisse aus dem Vergleich Simulation vs. Messung	42
2.5 Vergleich mit Simulations- und mit Monitoringdaten an der Technische Fakultät an der Universität Innsbruck	45
2.6 Einbindung der VEC-Steuerung in ein reales Büroobjekt	50

2.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung	52
3	Schlussfolgerungen	54
4	Ausblick und Empfehlungen	56
5	Verzeichnisse	57
5.1	Abbildungsverzeichnis	57
5.2	Tabellenverzeichnis	58
7	Anhang	61

Kurzfassung

Im Forschungsprojekt VisErgyControl wird das Konzept einer integralen, simulations-gestützten Tages- und Kunstlichtsteuerung entwickelt und umgesetzt. Während bei derzeitigen Bauvorhaben meist eine Regelungsstrategie basierend auf Innenraumsensorik zur Steuerung der Fassade realisiert wird, ermöglicht der Ansatz einer Steuerstrategie einen zielführenden Betrieb des Gebäudes. Anstatt reaktiv auf die aktuelle Situation im Gebäude zu reagieren, kann durch eine mit „Intelligenz“ beaufschlagte Steuerung präventiv agiert werden. Das in VisErgyControl umgesetzte Steuerungskonzept geht dabei erstmals auf die visuellen und melano-pischen Bedürfnisse der NutzerInnen (biologische Wirksamkeit von Tages- u.- Kunstlicht) ein, während gleichzeitig thermischer Komfort gewährleistet sowie Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes auf ein Minimum reduziert werden.

Ausgangssituation/Motivation

Österreichs Städte sind weiterhin im Wachstum begriffen. Die Stadt der Zukunft wird neben der verbesserten Energieeffizienz der Gebäudehüllen im Zuge der nachhaltigen Sanierung auch an Flächeneffizienz zunehmen müssen. Nachverdichtung und Aufstockungen sind eine bereits sichtbare Folge, womit aber auch eine geringere Tagesbelichtung der unteren Stockwerke und folglich eine geringere Tageslichtautonomie mit einhergehen. Die Folge ist ein hoher Kunstlichtanteil und damit – trotz künftig noch effizienterer Leuchtmittel – erhöhter Stromverbrauch für die Beleuchtung. Mit dem Projekt VisErgyControl sollen hierzu Lösungen erarbeitet werden, um dem Aspekt des reduzierten Tageslichteintrages aktiv gegenzusteuern.

Im selben Ausmaß erleben wir derzeit vor allem im Bürobau einen starken (architektonisch motivierten) Trend hin zu Fassaden mit einem hohen Transparenzanteil. Dies bringt zum einen Vorteile für die Tagesbelichtung, wirkt sich andererseits aber ebenso kritisch auf den Kühlbedarf aus. Um hier für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb ein Optimum zu erreichen, kommt intelligent gesteuerten Fassadensystemen eine hohe Bedeutung zu. Durch Entwicklung eines integralen Steuerungsansatzes, welcher sowohl energetische als lichttechnische Anforderungen optimiert und zugleich mit einem Minimum an Sensorik und Implementierungsaufwand auskommt, sollen diesen Anforderungen für zukünftige Fassaden erreicht werden.

Zusätzlich zum rein quantitativ messbaren Tageslichteintrag (z.B. Lux auf Arbeitsfläche) kommt auch den nicht-visuellen Faktoren zunehmend Bedeutung zu. Der rein normative Einsatz von Kunstlicht und die dadurch geringe Tageslichtnutzung im Raum können den psychophysiologischen Lichtbedarf meist nicht adäquat decken. Durch die gezielte Steuerung lichtlenkender Fassadensysteme wurde im Projekt VisErgyControl auch diesem Aspekt Rechnung getragen, um so in Zukunft Wohlbefinden und Produktivität von Büroinsassen weiter zu verbessern.

Inhalte und Zielsetzungen

An diesen drei ganz wesentlichen Ausgangspunkten für den zukünftigen effizienten Betrieb von Fassadensystemen setzte das Projekt VisErgyControl an:

- Integraler Steueransatz von Fassadensystemen nach energetischen, lichttechnischen sowie melanopischen Kriterien für den Einsatz in der Gebäudeleittechnik
- Verbesserte Tagesbelichtung bei Nachverdichtung und tiefen Bürogrundrissen durch effiziente Steuerung von Tageslichtlenksystemen
- Reduktion bzw. Verbesserung der notwendigen Sensorik für eine kostengünstige und effiziente Implementierung der entwickelten Steuerstrategie

Ausgehend vom aktuellen Stand der Technik sollte mit dem neuartigen Steuerungskonzept eine Reduktion an notwendiger Sensorik ermöglicht und somit die Komplexität bei der Implementierung in eine Gebäudeleittechnik reduziert werden können. Mit dem Steuerungsansatz wird ebenso erstmals der Anspruch verfolgt, das Gebäude basierend auf einer simulations-technischen Vorberechnung der Ist-Situation zu steuern. Dieser Ansatz unterscheidet sich somit klar von dem etablierten Regelungsansatz in der Praxis, welcher meist auf Basis von Innenraumsensoren (z.B. Look-Down Sensoren für die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz) auf die Ist-Situation reagiert. Thermisch vorausschauend kann ein Regelungsansatz nicht agieren.

Die Herausforderung im Steuerungsansatz liegt vor allem in einer hinreichend genauen Simulation der aktuellen Situation, welche basierend auf einem theoretischen Gebäudemodell (thermisch und lichttechnisch) und dem aktuellen Außenklima (zentrale Messstation am Dach) die Situation im Innenraum realitätsgetreu nachbildet. Hierzu wurde ein anwendbares Konzept entwickelt, welches Hauptgegenstand im Projekt VisErgyControl war.

Das Steuerkonzept wurde an einem entwickelten Tageslichtlenksystem im Fassadenprüfstand einem Real-Langzeittest unterworfen und anschließend auch in die GLT einer realen Bürofassade implementiert.

Methodische Vorgehensweise

Die Arbeitsinhalte orientierten sich initialisierend an der Aufbereitung des Wissensstandes zu aktuellen Konzepten der Fassadensteuerung in der Praxis sowie dem Stand der Wissenschaft hinsichtlich biologischer Wirksamkeit von Tages- und Kunstlicht und deren möglicher Berücksichtigung in der Steuerung von Fassaden. Davon abgeleitet wurden Kriterien definiert, welche ein Fassadensystem erfüllen muss, um den Anforderungen einer energetisch, lichttechnisch und melanopisch optimierten Fassade gerecht zu werden.

Parallel dazu wurde hinsichtlich notwendiger Sensorik an verschiedenen Konzepten sowie an Algorithmen und Definitionen zur Quantifizierung der melanopischen Wirkung des Tageslichts gearbeitet, welche weiterfolgend in das Steuerkonzept eingebunden wurden. Im Bereich der Simulation und Modellierung wurde das Steuermodul „Visual and Energy Control Module“ (VEC-Modul) aufgebaut und in einem ersten Schritt simulationstechnisch getestet. Eine Evaluierung der Potentiale des Steuerungsansatzes erfolgte aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ebenso auf Simulationsbasis anhand eines Einzelraummodells sowie eines Mehrzonenmodells. Zusätzlich wurden in der Simulation unterschiedliche Szenarien durchgespielt, um das Verhalten des Steuermoduls genauer zu analysieren und unterschiedliche Betriebsmodi abzuleiten.

Im Langzeitversuch (ca. 1 Jahr) des Steuerungsmodules in Kombination mit einem Tageslichtlenksystem am Fassadenaußenteststand der Universität Innsbruck wurden umfassende thermische und lichttechnische Messdaten erfasst, welche zur praktischen Erprobung des Steuerungsmodules dienten. Die Ergebnisse ermöglichten außerdem einen ersten Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Werten und erlaubten somit auch einen ersten Rückschluss auf die Praxistauglichkeit der Steuerung. Um auch Aussagen über die Anwendung an einem realen Bürogebäude zu untersuchen, wurde das Steuermodul auch noch in die Bürofassade eines Projektpartners implementiert. Eine abschließende Befragung der Büroinsassen gab Aufschluss über die Nutzerfreundlichkeit.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt VisErgyControl ist es gelungen, verschattende und tageslichtlenkende Fassade-systeme in Kombination mit dem Kunstlicht so zu steuern, dass sowohl visueller Komfort, als auch nicht-visuelle (melanopische) Wirkung bei minimalem Primärenergieeinsatz für Kunstlicht und Klimatisierung (Heizen und Kühlen) optimiert werden. Das vorerst als Excel-Prototyp ausgeführte Steuerungsmodul „VEC-Modul“ wurde für unterschiedliche Anwendungsfälle getestet und mittels Simulationsstudien wurden unterschiedliche Betriebsmodi ausgearbeitet. Im Vergleich zu einer konventionellen Regelungsstrategie nach fix vorgegebenen Grenzwerten konnte eine Einsparung im Endenergiebedarf von bis zu 31% erzielt werden. In der Praxiserprobung des VEC-Moduls in der PASSYS-Zelle konnte ein realistisches Verhalten des Steuermodules nachgewiesen werden. Im direkten Vergleich zwischen Simulations- und realen Messergebnissen zeigten sich Abweichungen, welche auf Vereinfachungen im Modell sowie auf externe Einflüsse während der Monitoringphase zurückzuführen sind. Die Implementierung in die GLT eines existierenden Bürogebäudes war erfolgreich und konnte für mehrere Wochen einem realen Testbetrieb unterzogen werden.

Ausblick

Der aktuelle Stand des Steuerungsmoduls beweist, dass mit vergleichsweise einfachen und effizienten Methoden eine deutlich effizientere Fassadensteuerung möglich ist. Vom Konsortium wird daher großes Potential für die zukünftige Anwendung in der Gebäudeleittechnik gesehen und eine Fortsetzung der Forschungsarbeit angestrebt.

Eine sinnvolle Tätigkeit wäre die Weiterentwicklung des VEC-Modul-Prototyps in eine Dienstleistung zur Steuerung der Lamellenpositionen und der Kunstlichtleistung. Die Integration in die Gebäudeleittechnik sollte dabei modular möglich sein, sodass etwa die Steuerung des Kunstlichtes als Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, welche unabhängig von der Lamellensteuerung genutzt werden kann. Weiters wird die Einbindung von Wettermodellen diskutiert, womit eine vorrausschauende Steuerung möglich wäre, welche sich positiv auf den resultierenden Energiebedarf auswirken dürfte. Zudem könnte ein räumlich hoch aufgelöstes Wettermodell (etwa basierend auf Himmelskameradaten) dazu beitragen die erforderliche Messtechnik am Einzelgebäude weiter zu reduzieren.

Abstract

In the research project VisErgyControl the concept of an integral, simulation-based daylight and artificial light control is developed and implemented. While in current construction projects usually a control strategy based on interior sensors for controlling the facade is realized, the approach of an open loop control strategy allows a purposeful operation of the building. Rather than just reacting to the current situation in the room, a controller equipped with "intelligence" can act preventively. For the first time, the control concept implemented in VisErgyControl addresses the visual and melanopic needs of users (biological effectiveness of daylighting and artificial lighting) while at the same time ensuring thermal comfort and minimizing the building's heating and cooling demand.

Starting point/Motivation

Austria's cities continue to grow. In addition to the improved energy efficiency of the building envelopes in the course of sustainable renovation, the city of the future will also need to increase in terms of space efficiency. Densification and topping-up are already visible consequences, but also associated with lower daylighting of the lower floors and consequently less daylight autonomy. The consequence is a high artificial lighting demand and – in spite of prospective improved luminaire efficiency – increased lighting energy demand. With the VisErgyControl project, solutions will be developed to actively counteract the aspect of reduced daylighting.

To the same extent, we are currently experiencing a strong (architecturally motivated) trend towards facades with a high proportion of transparency, especially in office construction. On the one hand, this brings advantages for the daylight exposure, but on the other hand, it also has a critical effect on the cooling requirements. In order to achieve the optimum for energy-efficient building operation, intelligently controlled façade systems are of great importance. By developing an integral control approach, which optimizes both energetic and lighting requirements and at the same time manages with a minimum of sensor technology and implementation effort, these requirements for future facades are to be achieved.

In addition to the purely quantitatively measurable daylight input (e.g., lux on work surface), non-visual factors are becoming increasingly important. Focusing only on fulfilling normative specifications cannot adequately cover the psychophysiological need for light. By specifically controlling light-directing façade systems, this aspect was also been taken into account in the VisErgyControl project in order to further improve the well-being and productivity of office occupants in the future.

Contents and Objectives

The VisErgyControl project started at these three very important starting points for the future efficient operation of façade systems:

- Integral control of façade systems according to energetic, photometric and melanopic criteria for use in building control systems
- Improved daytime exposure for rooms at densified regions and deep office layouts by efficiently controlling daylight steering systems
- Reduction or improvement of the necessary sensors for a cost-effective and efficient implementation of the developed control strategy

Compared to the current state of the art, the novel control concept was intended to enable a reduction of the necessary sensor technology and thus reduce the complexity of implementing it in a building management system. The open loop control approach claims for the first time to control the building based on a simulation based pre-calculation of the actual situation. This approach thus clearly differs from the established control approach in practice, which mostly responds to the actual situation on the basis of interior sensors (for example look-down sensors for the illuminance at the workplace). In contrast to the novel open loop control approach a closed loop control solution cannot act prescient.

The challenge in the control approach lies above all in a sufficiently precise simulation of the current situation, which based on a theoretical building model (thermal and lighting technology) and the current outdoor climate (central monitoring station on the roof) realistically recreates the situation in the interior. For this purpose, an applicable concept was developed, which was the main topic in the VisErgyControl project.

The control concept was subjected to a real long-term test on a developed daylight steering system in the façade test bench and then also implemented in the GLT of a real office façade.

Methods

The work contents were based on the initialization of the state of knowledge on current concepts of façade control in practice and the state of the art in terms of biological effectiveness of daylight and artificial light and their possible consideration for the control of facade systems. Based on this, criteria were defined that a façade system must fulfill in order to meet the requirements of an energy, lighting and melanopically optimized façade.

At the same time different sensory concepts as well as algorithms and definitions for the quantification of the melanopic effect of daylight were elaborated, which were further integrated into the control concept. In the area of simulation and modeling, the control module "Visual and Energy Control Modules" (VEC module) was set up and first tested in simulation environments. For reasons of better comparability, an evaluation of the potentials of the control approach was also carried out on a simulated basis using a single-space model and a multi-zone model. In addition, different scenarios were simulated in order to analyze the behavior of the control module more precisely and to derive different operating modes.

In the long-term trial (about 1 year) of the control module in combination with a daylight-directing system at the external facade test stand of the University of Innsbruck, comprehensive thermal and photometric data were logged, which served for practical testing of the control module. The results also allowed a first comparison between simulated and measured values,

thus allowing a first conclusion on the practicality of the control approach. In order to also examine statements about the application on a real office building, the control module was also implemented in the office façade of a project partner. A final survey of office occupants shed light on user friendliness.

Results

The VisErgyControl project succeeded in controlling shading and daylight-directing façade systems in combination with the artificial light. Both visual comfort and non-visual (melanopic) effect are optimized with minimal use of primary energy for artificial lighting and climate control (heating and cooling). The control module (VEC module), which was initially designed as an Excel prototype, was tested for different applications and different operating modes were developed using simulation studies. Compared to a standard control strategy according to fixed limit values, savings in final energy demand of up to 31% are possible. In practice testing of the VEC module in the PASSYS cell, a realistic behaviour of the control module was demonstrated. The direct comparison between simulation and real measurement results showed deviations, which are due to simplifications in the model and external influences during the monitoring phase. The implementation into the BMS of an existing office building was successful at a real test operation for several weeks.

Prospects/Suggestions for future research

The current status of the control module proves that comparatively simple and efficient methods make significantly more efficient façade control possible. The project consortium therefore sees great potential for future application in building control technology and strives to continue its research work.

A meaningful activity would be the further development of the VEC module prototype into a service for controlling the lamella positions and the artificial light output. The integration into the building management system should be possible in a modular manner, so that, for example, the control of the artificial light is provided as an interface, which can be used independently of the lamella control. Furthermore, the integration of weather models is discussed, which would allow for predictive control, which should have a positive effect on the resulting energy demand. In addition, a spatially highly resolved weather model (e.g. based on sky camera data, for example) could help to further reduce the required measurement technology at the individual building.

1 Einleitung

Mit einer erfolgten Sensibilisierung im Bereich energieeffizienter Kunstlichtlösungen sowie der gezielten Verbesserung der Tageslichtnutzung zur Belichtung von Innenräumen rücken nun neben der **energetischen Optimierung** von Systemlösungen zunehmend die **psychophysiologischen Auswirkungen des Lichts** auf den menschlichen Organismus ins Zentrum der Betrachtung. Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (ca. 10% des weltweiten Strombedarfs) und die Nutzung von Tageslicht hat mittlerweile, wo Niedrigstenergie- und Passivhausbauweisen zum Baustandard geworden sind, einen enormen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf von Gebäuden bekommen (Werner M. et al. 2017). Speziell im städtischen Bereich spielen Lösungen zur effizienten Steuerung und Nutzung von Tageslicht und Kunstlicht aufgrund der hohen Baudichten eine entscheidende Rolle. Dabei steckt das höchste Effizienzpotential vor allem in einem aufeinander abgestimmten Betrieb dieser beiden Systeme.

Während sowohl verbesserte Kunstlichtlösungen als auch eine aktive Tageslichtnutzung für sich schon einer **erhöhten Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz** durch eine verbesserte Lichtsituation nachkommen, stellt vor allem die kommunizierende Steuerung beider Systeme (Kunst- und Tageslichtsteuerung) zusätzliches Verbesserungspotential dar. Mittels einer vorausschauenden Simulation kann dabei eine zusätzliche **Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz** durch Ermittlung des lichttechnischen sowie energetischen Optimums erreicht werden. Unter Berücksichtigung der visuellen und „**melanopischen**“ Wirkungen von Licht auf den menschlichen Organismus kann aufgrund neuester Erkenntnisse und des aktuellen Standes der Wissenschaft zudem eine deutliche **Erhöhung der Lebensqualität (Schlüsselindikator „subjektive Gesundheit“, Subindikator „Arbeitszufriedenheit“ und Indikator „subjektive Lebenszufriedenheit“** siehe (AUSTRIA 2017) für BewohnerInnen und NutzerInnen erreicht werden (Fachverband Licht 2013).

1.1 Aufgabenstellung

Die Sicherstellung des visuellen Komforts ist ein wichtiger Bestandteil bei der Auslegung eines Gebäudes. Hierfür wird die Nutzung des Tageslichts bevorzugt, da es starke psychophysiologische Vorteile mit sich bringt und zu dem frei zur Verfügung steht. Doch gerade die wechselnden äußeren Bedingungen stellen bei der Sicherstellung des visuellen Komforts, wie zum Beispiel ausreichende Tagesbelichtung auch in die Raamtiefe, Blendschutz und Sichtbezug nach Außen, eine große Herausforderung dar. Bei fehlendem Tageslicht sollte möglichst effizient und mit hoher lichttechnischer Qualität Kunstlicht ergänzt werden. Nebenbei beeinflusst die Einstrahlung der Sonne stark die Energiebilanz eines Gebäudes. Die Berücksichtigung all dieser Aspekte überfordert den Nutzer eines Gebäudes bzw. kann ihm im alltäglichen Betrieb nicht zugemutet werden.

Tageslichtregelungen sind meist unzureichend durchdacht und reduzieren die Komplexität des Zusammenhangs zwischen Tagesbelichtung und Energieeintrag (Sommer- und Winterfall) zu

sehr. Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Charakterisierung von Tageslichtsystemen (winkelabhängige Transmission, visuell und energetisch). Standard- Regelungsalgorithmen reagieren z.B. bei Sonnenbestrahlung mit völligem Schließen des Behangs, wodurch die nötige Beleuchtungsstärke im Blickfeld durch Kunstlicht und somit Primärenergieeinsatz stattfinden muss. Um richtige Steuerungsbefehle geben zu können, ist das Ermitteln der exakten Außensituation Voraussetzung.

Eine intelligente optimierte Steuerung des gesamtheitlichen Lichtsystems (Fassade und Kunstlicht) reagiert je nach Außen- und Innensituation entsprechend der zu optimierenden Parameter Nutzerzufriedenheit, Wohlbefinden und Energieeffizienz.

Im Forschungsprojekt VisErgyControl wurden daher folgende Problemstellungen und Aspekte im Detail untersucht, Lösungswege erarbeitet und getestet:

- Wie kann das Kunstlicht-, Verschattungs- bzw. Tageslichtlenksystem so gesteuert werden, dass die Auswirkungen auf die einzelnen Zielgrößen (melanopische Wirkung, visueller & thermischer Komfort, Heiz- und Kühlbedarf, Kunstlichtbedarf) in jedem Zeitschritt sichtbar und bewertbar werden
- Wie kann das Kunstlicht im Raum so ergänzt werden, dass das Licht am Arbeitsplatz nicht nur den normativen und quantitativen Anforderungen (Mindestbeleuchtungsstärken) entspricht, sondern auch hohen visuellen und melanopischen Komfort bietet?
- Wie können tageslichtlenkende Systeme so gesteuert werden, dass sie sich reduzierend auf den Kunstlichtbedarf, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des Gebäudes auswirken?
- Welche Sensorik ist notwendig um den Zustand der Außensituation erfassen zu können (z.B.: diffuse/globale Strahlungsdaten für die Fassadenorientierungen, Farbtemperatur des Himmels, etc.) bzw. wie kann die Ermittlung effizient durchgeführt werden?
- Wie können Verschattungsparameter, wie zum Beispiel bei einer verdichteten Bauweise, aber auch Gebirge, Bäume, etc., möglichst realitätsnah in einer Steuerung berücksichtigt werden
- Wie kann die genannte Problemstellung in einem integralen Steuerungskonzept praxistauglich gelöst werden?

Das Projekt *VisErgyControl* fokussiert sich daher aus Sicht der *Optimierung und Modernisierung von Gebäuden* im Speziellen auf die **Gewährleistung bzw. Verbesserung des visuellen und melanopischen Komforts** der NutzerInnen unter Berücksichtigung der **Verringerung des Energiebedarfs für künstliche Beleuchtung** von Innenräumen. Dies wird neben optimierten Kunstlicht- und Tageslichtsystemlösungen vor allem durch die **Entwicklung einer simulationsgestützten Steuerstrategie und intelligenter Algorithmen** für Tageslicht (solarer Eintrag) und Kunstlicht unter Einbezug der gesamten Gebäudehülle erreicht.

Es soll erstmals ermöglicht werden, neben den zeitnahen Kriterien durch Sensormesswerte (aktuelle Einstrahlungswerte, Außenlufttemperaturen) auch (vorberechnete) langfristige Parameter aus der Simulation wie *saisonale/klimatische Bedingungen* oder *Nutzerprofile* mit einfließen zu lassen, und somit zu einer ganzheitlichen Optimierung im Energiesystem „Gebäude“ beizutragen.

1.2 Stand der Technik

Grundlage für das Projekt ist der Stand der Technik in den Gebieten Kunst- und Tageslichtsteuerung, damit verbundene Messsysteme und Sensorik, nichtvisuelle Lichtwirkung sowie Einsparpotential durch Tageslichtlenksysteme. Im Folgenden wird ein Überblick des Standes der Technik auf diesen Gebieten gegeben.

1.2.1 Kunstlichtsteuerung – Tageslichtsteuerung

Gängige Kunst- und Tageslichtsteuerungsmodulare vereinen die beiden Systeme nicht **integral**. Standardmäßig wird das Tageslichtsystem rein der Außensituation nachgeführt (z.B. wird direkter Sonnendurchtritt verhindert). Die benötigte Kunstlichtzuschaltung wird entweder mit einem Helligkeitssensor im Innenraum nachgeregelt oder mittels einer Steuerung und einem Außenmesskopfsystem ermittelt. Um die tatsächlichen Nutzungszeit des Raumes zu ermitteln, wird üblicherweise ein Präsenzmelder verwendet.

1.2.1.1 Regelung

Ein Helligkeitssensor schaltet zumeist mehrere Leuchtengruppen im Raum, wie in Abbildung 1 gezeigt. Über ein festes Dimm-Verhältnis wird das Kunstlicht abhängig vom Messwert am Helligkeitssensor hinzugeschaltet. Optimale Lichtverhältnisse im gesamten Arbeitsbereich, vor allem bei Direktstrahlung und tageslichtlenkenden Systemen, kann mit diesem Verfahren nicht bereitgestellt werden. Zudem ist bei diesem Regelungsverfahren in jedem Raum eine Sensorinstallation notwendig, was bei einem größeren Gebäudekomplex zu einer hohen Investition führen kann.

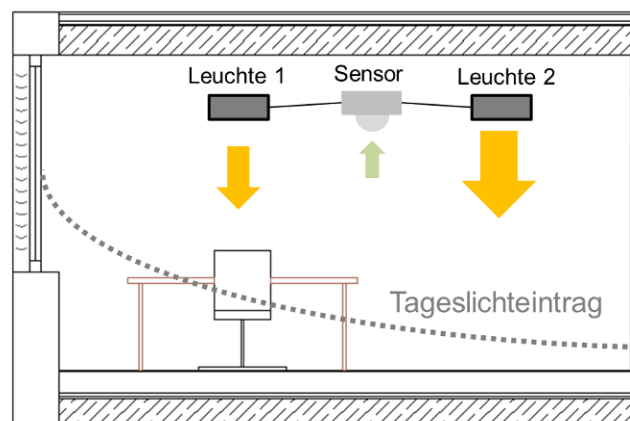


Abbildung 1: Leuchtenregelung basierend auf raumbezogenen Sensordaten (Quelle: Eigene Darstellung)

1.2.1.2 Steuerung

Die notwendige Kunstlichtergänzung wird bei einem heute gängigen Steuerungsansatz mittels eines vereinfachten Verfahrens ermittelt. Hierfür werden zwischen einzelnen Stützpunkten, die temporäre Himmelszustände abbilden, interpoliert (z.B. zwei Stützpunkte, einmal ist das System in Position gefahren, der zweite Messpunkt erfasst die Situation „System weggefahren“). Die Güte dieser interpolierten Kunstlichtsteuerung ist nur für wenige Fassadensysteme (z.B. textile Rollos) brauchbar (Ergebnis aus Vorprojekt K-Licht P01). Topografische Verschattungen und Nachbargebäude werden als Horizontverschattungen modelliert, Reflexionen von Außenoberflächen können nicht berücksichtigt werden. Tageslichtlenkende Systeme sind bisher nicht abbildbar.

Simulationsgestützte Steuerungsansätze für die Kunstlichtzuschaltung wurden von den Partnern Uni Innsbruck (AB Energieeffizientes Bauen) und Bartenbach GmbH im Vorprojekt „K-Licht P01“ untersucht, ebenso am Fraunhofer-Institut IBP in einem im Jahr 2014 abgeschlossenen Forschungsprojekt (Boer und Hubschneider 2016).

1.2.2 Messsysteme/Sensorik

Um den solaren Tageslichteintrag in den Raum ermitteln zu können, sind Sensoren notwendig. Für einen Regelungsansatz werden üblicherweise, wie schon beschrieben, Anwesenheits- und Helligkeitssensoren im Innenraum verbaut. Für die Steuerungsmethodik wird ein Außenmesskopfsystem benötigt, welches sowohl den Direkt- als auch den Diffusanteil des Himmels bestimmt. Üblicherweise werden Globalstrahlungssensoren (Pyranometer / Luxmeter) verwendet und der Direktanteil mit einem Schattenring geblockt. Mittels eines zweiten Sensors, welcher die unverschattete Globalstrahlung misst, kann über die Differenz dann der Direktanteil ermittelt werden. Nachteil ist jedoch, dass der Schattenring über das Jahr hinweg nachgeführt werden muss. Systeme, die ohne Nachführung von Verschattungselementen auskommen, sind das Sunshine Pyranometer SPN1 und der Tageslichtmesskopf von Zumtobel, der mittels acht Helligkeitssensoren und eines Algorithmus den Direkt- bzw. Diffusanteil ermittelt.

1.2.3 Nichtvisuelle Lichtwirkung

Durch die langen Aufenthaltszeiten in Innenräumen – Studien im EU-Raum (Schweizer et al. 2007) belegen, dass sich der Mensch bis zu 90% seiner Zeit in Innenräumen aufhält –, den geringen Tageslichteintrag in Gebäuden und die Normen für die Innenraumbeleuchtung, welche sich ausschließlich um die Erhaltung der visuellen Wahrnehmungsleistung kümmern, ist der Mensch heute sehr geringen Lichtdosen ausgesetzt. So zeigen Studien, dass sich der Mensch heute mehr als 50% seiner Zeit unter einer Beleuchtung mit maximal 100 lx aufhält (Hubert et al. 2009; Nioi et al. 2017).

Neben der Intensität spielt die spektrale Verteilung des Lichtes eine entscheidende Rolle. Der Mensch hat sich evolutionsbedingt an die spektrale Variabilität und die veränderliche Intensität des Tageslichtes über den Tag hinweg angepasst und gleicht seine „innere“ Uhr damit ab. Niedrige Beleuchtungsstärken im Innenraum, gepaart mit einer konstanten spektralen Intensitätsverteilung reichen nicht aus, um eine Taktung des circadianen Rhythmus zu gewährleisten. Längerfristig resultieren daraus gesundheitliche Nachteile für den Menschen.

30 Jahre der psychophysiologischen Lichtwirkungsforschung und daraus abgeleitete, grundlegende Erkenntnisse bilden das wissenschaftliche Fundament der Projektidee. Das Gesamtsystem „Beleuchtung“ wird hinsichtlich gesundheitlicher Aspekte optimiert, wobei erhöhte Beleuchtungsstärken hauptsächlich durch Tageslicht generiert werden müssen, da sonst der Einsatz von Kunstlicht zu gesteigerten Energiebedarf führen wird. Der Zielkonflikt zwischen geforderten hohen Beleuchtungsstärken und Blendungsbeschränkungen ist mit Standardkomponenten derzeit weitgehend noch nicht lösbar. Unter Berücksichtigung der modernen Gebäudearchitektur und Stadtentwicklung ergibt sich die weitere Randbedingung, dass Tagesbelichtung nur durch Auswahl geeigneter Systemkomponenten möglich sein wird.

1.2.4 Energieeinsparpotential durch Tageslichtlenksysteme

Neben den psychophysiologischen Vorteilen des Tageslichtes, bietet das natürliche Licht auch ein erhebliches Energieeinsparpotential. Für eine möglichst hohe Tageslichtautonomie sind Systeme notwendig, die das Tageslicht auch im Sommerfall nicht blocken, sondern eine dosierte gut verteilte natürliche Belichtung zulassen. Durch immer effizientere Gebäude sinkt der Heiz- und Kühlbedarf. Der elektrische Energiebedarf rückt immer mehr in den Mittelpunkt und nimmt bei hocheffizienten Gebäuden sogar bis zu 50% ein. Ein hoher Teil hiervon ist der Energiebedarf für Kunstlicht. Durch eine frühzeitige Tages- und Kunstlichtplanung kann der Endenergiebedarf, bezogen auf Heizung, Kühlung und Beleuchtung um bis zu 50% gesenkt werden (Werner M. et al. 2017).

In Abbildung 2 ist ein Vergleich von verschiedenen Tageslichtlenksystemen – zweigeteilter Lamellenbehang (SYS2 – SYS5) und reflektorische (starre) Systeme (SYS6-SYS8)] – zu einem konventionellen, durchgehenden Raffstore (SYS1) hinsichtlich Endenergiebedarf und nutzbarer Tageslichtniveaus dargestellt (Standort Innsbruck, südorientiertes Büro mit 8m Raumtiefe). Mit einer tageslichtoptimierenden Steuerung können in diesem konkreten Fall deutliche Einsparungen bei Heizenergiebedarf und Kunstlicht erzielt bzw. Tageslichtniveaus verbessert werden (Hauer 2017).

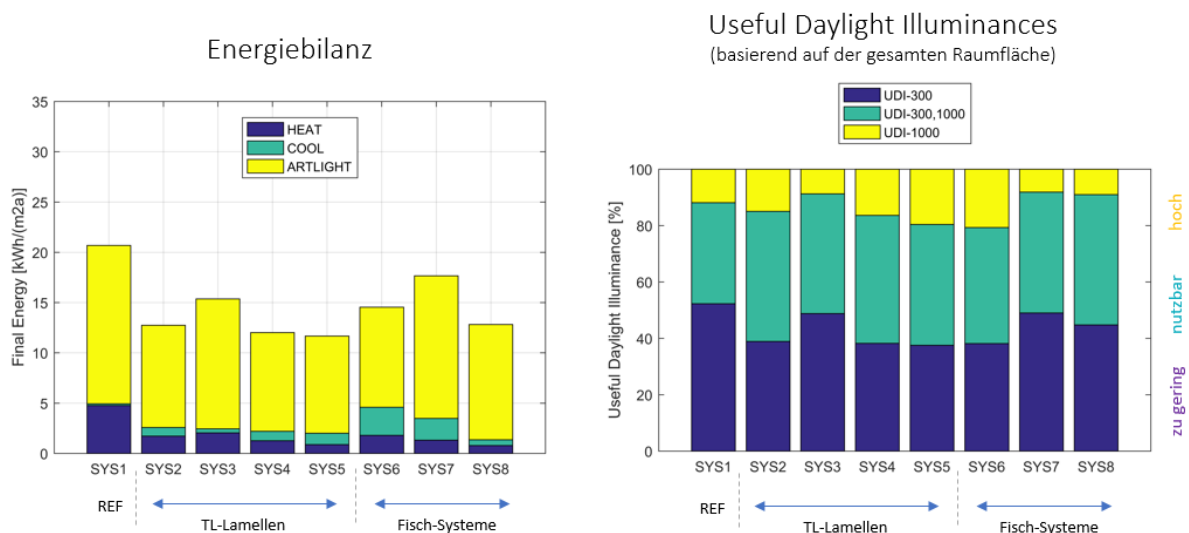


Abbildung 2: Energetischer (links) und lichttechnischer Vergleich (rechts, Useful Daylight Illuminance) von Fassadensystemen (Hauer 2017)

Mittels entwickelter Tools aus den parallelen Forschungsprojekten K-Licht (P01), lightSIMheat (Proj.-Nr. 838717) und DALEC (Proj.-Nr. 850120) ist eine detaillierte Quantifizierung dieser Energieeinsparpotentiale nun möglich und erlaubt ein Planen solcher Systeme auf Basis exakter Berechnungen. Diese Methoden fanden auch Anwendung im Forschungsprojekt VisErgyControl.

1.3 Verwendete Methoden

Die methodische Vorgehensweise im Projekt (Abbildung 3) konnte in 4 Bereiche untergliedert werden:

- Organisatorische Arbeitspakete (orange)
- Arbeitspakete zur Ausarbeitung der Kernthemen aus Simulation und Steuerung (grün)
- Arbeitspakete zur Implementierung und Umsetzung der Steuerstrategie (blau)
- Auswertung, Feedback und Optimierung (rot)

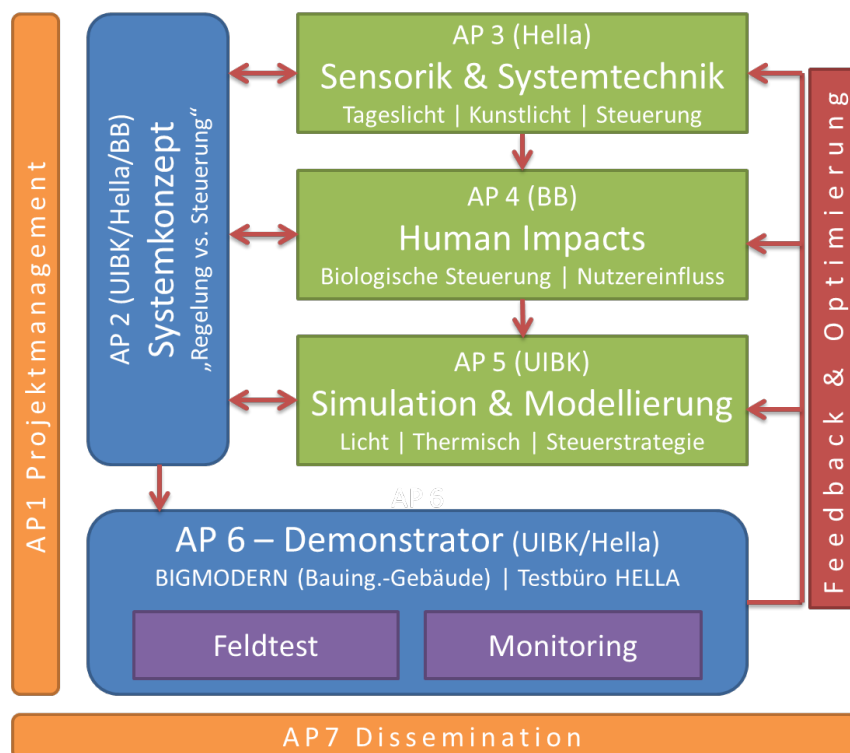


Abbildung 3: Projektflussbild VisErgyControl

Die Arbeitsinhalte orientieren sich initialisierend an der Aufbereitung des Wissensstandes zu aktuellen Konzepten der Fassadensteuerung in der Praxis sowie dem Stand der Wissenschaft hinsichtlich biologischer Wirksamkeit von Tages- und Kunstlicht und deren möglicher Berücksichtigung in der Steuerung von Fassaden. Davon abgeleitet werden Kriterien definiert, welche ein Fassadensystem erfüllen muss, um den Anforderungen einer energetisch, lichttechnisch und melanopisch optimierten Fassade gerecht zu werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde von der HELLA-GmbH eine neue Tageslichtlenklamelle konzipiert und für den späteren Mock-Up Testbetrieb inklusive Ansteuereinheit angefertigt.

1.3.1 Systemkonzept und Sensorik

Die Methodik im Projekt VisErgyControl setzt auf eine Steuerung anstelle der heute noch gebräuchlichen Regelung. Dazu werden zur jeweiligen Tageszeit – im entsprechenden Steuerungszeitschritt – die optimale Stellung für Jalousie/Tageslichtsystem und die Dimmwerte für die Kunstlichtgruppen abhängig vom gegebenen Außenzustand

- Solarstrahlung
- Beleuchtungsstärken auf die jeweiligen Fassaden
- Temperatur

unter Berücksichtigung der klimatischen Situation im Gebäude und unter Berücksichtigung des physiologischen Einflusses des Lichtmilieus simulationstechnisch ermittelt. Einzelraumsensoren sind dadurch nur noch zur Fehlerkorrektur bzw. Erfolgskontrolle notwendig.

Parallel dazu wurde hinsichtlich notwendiger Sensorik an verschiedenen Konzepten sowie an Algorithmen und Definitionen zur Quantifizierung der melanopischen Wirkung des Tageslichts gearbeitet, welche weiterfolgend in das Steuerkonzept einfließen.

1.3.2 Simulation und Modellierung

Die lichttechnische und thermische Simulation wurde sowohl zum Zwecke der Entwicklung und Evaluation des Steuerungsmoduls eingesetzt als auch im Steuermodul selbst zur Bestimmung der optimalen Systemstellung. Im Folgenden werden die dabei angewandten Methoden für diese beiden Fälle beschrieben.

1.3.2.1 Lichttechnische Berechnung

Zur Ermittlung des melanopischen Effektes sowie des Kunstlichtbedarfes ist die Kenntnis des Tageslichteintrages erforderlich. Dieser wird durch eine realitätsnahe Lichtsimulation ermittelt. Für die Durchführung solcher auf Raytracing basierender Lichtsimulationen werden gewöhnlich Rechenzeiten von mehreren Stunden bis Tagen benötigt, abhängig von der Komplexität der Szenerie. Um den Einfluss einer Systemstellungsänderung auf die Lichtsituation im Raum korrekt prognostizieren zu können, muss sowohl für die alte als auch für die neue Stellung eine Lichtsimulation durchgeführt werden. Da nicht vor jeder Systemstellungsänderung stundenlang auf das Ergebnis der Lichtsimulation gewartet werden kann, musste eine beschleunigte Methode entwickelt werden. Analog zum von der FFG geförderten Forschungs- und Planungstool Dalec (Projekt.-Nr: 850120), wurden auch im vorliegenden Projekt Raytracing-Daten des jeweiligen Raumes inklusive aller möglichen Stellungen des anzusteuernenden Fassadensystems erstellt. Diese vorberechneten Daten wurden in einer datenbankähnlichen Struktur abgelegt, auf welche das Steuerungsmodul zum Zeitpunkt der Systemstellungsänderung zugreift. Die Lichtsimulation im Steuerungsmodul ließ sich so auf wenige Matrizenmultiplikationen vereinfachen, sodass die für die Systemstellungsentscheidung erforderlichen Tageslichtberechnungen für die jeweilige Außenlichtsituation in Sekundenbruchteilen durchgeführt werden können.

Die Lichtsimulation wird demnach in zwei Schritten durchgeführt. Die Eingabeparameter für die Vorberechnung sind die Geometrie des Raumes inklusive der Oberflächeneigenschaften der verbauten Materialien (ggf. auch inklusive der Innenarchitektur, sofern diese den Tageslichteintrag auf einzelne Arbeitsplätze wesentlich beeinträchtigt), die genaue Geometrie der Fensteranteile inklusive Laibung, die BSDF-Daten für alle einstellbaren Systemstellungen unter Berücksichtigung des Scheibenaufbaus sowie die Position und Blickrichtung der Raumnutzer. Das Raytracing wird für den jeweils anzusteuern den Raum nach der Dreiphasenmethode mit Hilfe des Softwarepaketes Radiance durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Satz von Faktoren, welche für die Berechnung der aktuellen Lichtsituation im Steuerungsmodul herangezogen werden.

Die Eingabeparameter für die Lichtberechnung im Steuerungsmodul sind die globale und diffuse Beleuchtungsstärke auf die Horizontale, die Uhrzeit zur Ermittlung der Sonnenposition und der Büronutzung, die Position und Ausrichtung des zusteuernden Raumes, die Albedo der Umgebung sowie die Horizontlinie, welche vom jeweiligen Fenster aus betrachtet werden kann. Abhängig von letzterer wird der Raumwinkel des vom Fenster aus sichtbaren Himmels ermittelt. Mit dessen Hilfe wird die vom Himmel kommende und die vom Boden reflektierte Diffusbeleuchtungsstärke berechnet. Die Direktbeleuchtungsstärke wird aus der Differenz zwischen Global- und Diffusbeleuchtungsstärke ermittelt. Die Lichtsituation im Raum wird danach für die vom Himmel und vom Boden kommende diffuse sowie für die direkte Beleuchtungsstärke berechnet. Die Addition der Ergebnisse ergibt die simulierte Lichtsituation im Raum für die jeweilige Systemstellung. Das Ergebnis der Lichtsimulation bilden die horizontalen Beleuchtungsstärken an den Arbeitstischen, aus denen der Kunstlichtbedarf ermittelt wird, die vertikalen Beleuchtungsstärken auf die Gesichtsflächen der Büronutzer aus denen die melanonische Wirkung berechnet wird, sowie die mittlere und maximale Leuchtdichte der Fassade zur Ermittlung der Blendsituation.

1.3.2.2 Thermische Berechnung

Parallel zur Lichtsimulation ist für die Auswahl der optimalen Systemstellung auch die Ermittlung des thermischen Eintrages in den Raum erforderlich. Die Eingabeparameter hierfür sind die Global- und Diffusstrahlung auf die Fassade, die Uhrzeit, die Fassadengeometrie, vor allem die Anteile von Wandelementen und Verglasung, die zugehörigen U-Werte von Wandelementen und Fenstern sowie die winkelabhängigen g-Werte für die jeweilige Systemstellung. Mithilfe der winkelabhängigen g-Werte lässt sich der direkte und indirekte thermische Eintrag für jeden Sonnenstand korrekt ermitteln. Für den jeweiligen Zeitschritt wird nun eine thermische Berechnung nach Norm (EN 13790) durchgeführt. Die thermische Trägheit des Raumes wird dabei auf null gesetzt. Die errechneten Werte für Heiz- oder Kühlbedarf sowie der Raumtemperatur würden sich im stationären Fall einstellen, d.h. sie ergäben sich, wenn der Testraum über Tage mit denselben Außenbedingungen konfrontiert würde. Im Modell wird dies erreicht, indem die thermischen Massen auf null gesetzt werden. Dadurch wird für die Wahl der optimalen Systemstellung der aktuelle thermische Eintrag als Auswahlkriterium herangezogen, und nicht die aktuelle thermische Situation im Raum. Würde man letztere als Auswahl-

kriterium nehmen, so würde sich die thermische Historie des Tages auf die aktuelle Lamellenauswahl auswirken. Beispielsweise würde so an einem warmen Sommertag, der einer relativ kühlen Nacht folgt, am Vormittag die Auswirkung des thermischen Eintrags unterschätzt werden, was am Nachmittag zu Überhitzungsproblemen führen würde. Betrachtet man die Energiebilanz des Zeitschrittes, so führt die Berücksichtigung der thermischen Trägheit zu einer Unterschätzung des Energieeintrags. Zum besseren Verständnis dieses Sachverhaltes betrachte man das Beispiel eines heißen Sommertages, dem eine relativ kühle Nacht vorangeht. Am Morgen ist das Gebäude dank Nachtlüftung gut konditioniert. Wird nun im Steuerungsmodul die thermische Trägheit realistisch mitberücksichtigt, etwa durch Einbeziehung einer gemessenen Massentemperatur im Betonkern des Gebäudes, so wird in den ersten Stunden der Gebäudenutzung die Lamelle bis zur Blendgrenze geöffnet, da ja aufgrund der geringen Massentemperatur ohnehin keine Überhitzungsgefahr droht. Im Laufe des Tages wärmt sich das Gebäude immer weiter auf, es kommt zur Überhitzung und die Lamellen schließen. Dadurch entsteht am Nachmittag hoher Kühl- und Kunstlichtenergiebedarf. Dies lässt sich vermeiden, wenn bereits in der Früh ein Kompromiss zwischen Tageslichteintrag und Überhitzungsschutz bei der Systemstellungswahl gefunden wird. Durch Vernachlässigung der thermischen Masse in der Simulation des Steuerungsmoduls wird der Ernst der Lage bereits am Morgen richtig eingeschätzt und die Systemstellung entsprechend getroffen. Der so berechnete stationäre Heiz- oder Kühlbedarf wird zur Bewertung der Systemstellung herangezogen.

Es wurden die einzelnen Module (thermische Simulation, lichttechnische Simulation, Außenabbildung) im Detail erarbeitet und als Steuermodul („VEC-Modul“) miteinander verknüpft.

1.3.3 Erprobung und Demonstration

Das Potential der genannten Methoden wurde im Projekt in mehreren Stufen getestet. Zunächst wurde die Steuerungsmethodik einem simulationstechnischen Vergleich unterzogen und die theoretischen Potentiale anhand verschiedener Betriebsarten (Berücksichtigung der thermischen Gebäudemasse, ohne thermische Gebäudemasse, etc.) eruiert. Eine Evaluierung der Potentiale des Steuerungsansatzes erfolgte aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ebenso auf Simulationsbasis anhand eines Einzelraummodells (PASSYS-Zelle) sowie eines Mehrzonenmodells (Stockwerksmodell des Bürogebäudes – Technische Fakultät der Uni Innsbruck). Zum simulationstechnischen Vergleich des neuen Steuerungsansatzes mit einer State-of-the-Art Installation wurden Auswertungen der Messdaten aus dem BIGMODERN-Subprojekt 9 (Technische Fakultät der Universität Innsbruck), welches über raumbezogene Sensoren geregelt wird, herangezogen.

Folgend wurde die Steuermethodik an einem Fassaden Mock-up (PASSYS Außenteststand an der UIBK) unter realen Außenbedingungen, aber noch ohne NutzerInnen implementiert und mittels Langzeitmonitoring auf deren Funktionalität untersucht. Anhand der Auswertung der Messdaten konnte eine praktische Erprobung des Steuerungsmoduls unter definierten Testbedingungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse ermöglichen außerdem einen ersten Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Werten und geben somit einen ersten Rückschluss auf Genauigkeit und Praxistauglichkeit der Steuerung. Dabei wurde auch bereits eine

Integration des Steuerungs-Prototyps (auf Excel-Basis) in die Fassadensteuerung der HELLA-GmbH erfolgreich umgesetzt.

Abschließend wurde das Steuerungsmodul in der Projektendphase in die Fassadensteuerung eines realen Beispielgebäudes (Bürogebäude der HELLA-GmbH in Abfaltersbach) integriert und getestet und mittels einer NutzerInnenbefragung praktische Erfahrungswerte eruiert.

2 Ergebnisse

Basierend auf dem beschriebenen Stand wurden im Rahmen des Projektes „VisErgyControl“ folgende primären Entwicklungen realisiert:

- Entwicklung eines Modells zur Bewertung nichtvisueller Lichtwirkung
- Entwicklung einer Steuerstrategie basierend auf gekoppelter energetischer und lichttechnischer Simulation
- Entwicklung und Fertigung einer Testfassade inklusive einer Steuereinheit
- Simulations- und messtechnische Überprüfungen dieser Steuerstrategie
- Erstellung eines Nutzerinterfaces zur Ermöglichung von Nutzereingriffen und zur Visualisierung der aktuellen energetischen und lichttechnischen Werte
- Einbindung der Steuerung in ein reales Gebäude

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Weiterentwicklungen im Detail erläutert und die Projektergebnisse dargestellt.

2.1 Entwicklung eines melanopischen „Modells“

Seit der Entdeckung des Fotopigments Melanopsin im menschlichen Auge welches photochemisch maximal auf kurzwellige Strahlung im Wellenlängenbereich um 480nm reagiert, hat weltumspannend intensive Grundlagenforschung zu nicht-visuellen Lichtwirkungen auf den Menschen begonnen. ExpertInnen aus unterschiedlichsten Forschungsgebieten (z.B. Endokrinologie, Chronobiologie, Physiologie, Onkologie, Epidemiologie, Neurologie, Psychiatrie, Arbeitsmedizin, Psychologie, Lichttechnik, Ergonomie, Physik) versuchen seither intensiv, die unmittelbaren und langfristigen Lichtwirkungen auf neurophysiologische, endokrine, kognitive und stimmungsbezogene Parameter zu erfassen und zu beschreiben.

Die Bezeichnung ‚melanopisches Modell‘ ist eine Bartenbach-Titulierung, sie leitet sich vom Fotopigment Melanopsin ab und bezieht sich auf die o.a. teilweise nachgewiesenen aber auch teilweise noch vermuteten positiven Wirkungen des Lichtes.

Im Folgenden werden die notwendigen Grundlagen sowie das Modell selbst erläutert.

2.1.1 Grundlagen

Aufbauend auf den Arbeiten bis Mai 2016 wurde das Bartenbach-Dosis-Modell für nichtvisuelle Lichtwirkungen (‚biologische Lichtwirkungen‘) unter Berücksichtigung des Tageslichtes weiterentwickelt (siehe zweiten Zwischenbericht).

Dabei flossen einerseits die Ergebnisse und Erfahrungen von parallelaufenden Grundlagenforschungsprojekten bei Bartenbach (z. B. PsyLicht) ein.

Andererseits wurden neueste Forschungsergebnisse von anderen Forschungsteams analysiert und in das Bartenbach-Modell eingearbeitet:

- Figueiro (2016) (Basis = Rea-Modell von 2012) mit der Circadian Light Theory
- Konis mit seinem WELL Building Standard (2016)
- Anderson (2012) mit den Cajochen-Nachtstudien im Schlaflabor und Phipps-Nelson mit seinen Tagstudien
- Amundadottir (2016) mit der Weiterentwicklung der Kennziffern von Anderson (2012)

Zusätzlich wurde eine ausführliche Studie durchgeführt, um den Einfluss von Bildschirmen (Fernseher, Personalcomputer, Laptops, Tablets, iPhones) im täglichen Gebrauch auf die Melatoninunterdrückung und damit auf den Schlaf-Wach-Rhythmus (circadianen Rhythmus) verlässlicher abschätzen zu können (die spärliche Literatur dazu ist widersprüchlich). Im Zuge dieser Studie wurden verschiedenste Bildschirme photometrisch und spektral vermessen und deren Einfluss mit den verschiedenen Bewertungsmethoden analysiert.

Der circadiane Rhythmus, umgangssprachlich auch Tag-/Nacht-Rhythmus oder innere Uhr genannt, beschreibt einen biologischen Mechanismus im Menschen, der es erlaubt, gewisse Ereignisse, z.B. Sonnenaufgang, Essenszeiten, Schlafzeiten etc., zu antizipieren und darauf abgestimmt biologischen Prozesse zu starten. Als solches steuert der circadiane Rhythmus maßgeblich den Schlaf-Wach-Rhythmus oder körperliche Aktivität generell. Da dieser interne Zyklus zeitlich betrachtet nicht zu 100% an den 24-Stunden Tag-Nachtwechsel gekoppelt ist (um sich so leichter an veränderte Umweltbedingungen anpassen zu können), benötigt dieses System täglich (Zeitgeber)-Reize von außen, dass es laufend kalibriert. Der wichtigste Zeitgeber-Reiz für den Menschen ist das Licht. In Abbildung 4 werden die physiologischen Grundlagen der Phototransduktion zur Kalibrierung des circadianen Rhythmus mit Fokus auf die Steigerung der Wachheit und Reduktion der Schläfrigkeit gezeigt.

Konkret bedeutet dies, dass der Nucleus suprachiasmaticus (SCN) – die Masterclock des circadianen Systems - unmittelbar mit photischem Input versorgt wird und in weiterer Folge nachgereichte physiologische Systeme (z.B. die Zirbeldrüse [PINEAL, Abb.4], den Locus Coeruleus [LC, Abb. 4], den ventrolateralen präoptischen Nucleus [VLPO, Abb.4]) in ihrer Aktivität moduliert und so beispielsweise Müdigkeit dämpft oder Schläfrigkeit induziert.

Sobald kein Licht mehr in das menschliche Auge fällt, signalisiert der SCN an die Zirbeldrüse, Melatonin (das menschliche Schlafhormon) zu produzieren. Mit der Ausschüttung des Melatonins in die Blutbahn werden alle Zellen des Körpers über den Beginn und Länge der Nachtphase informiert.

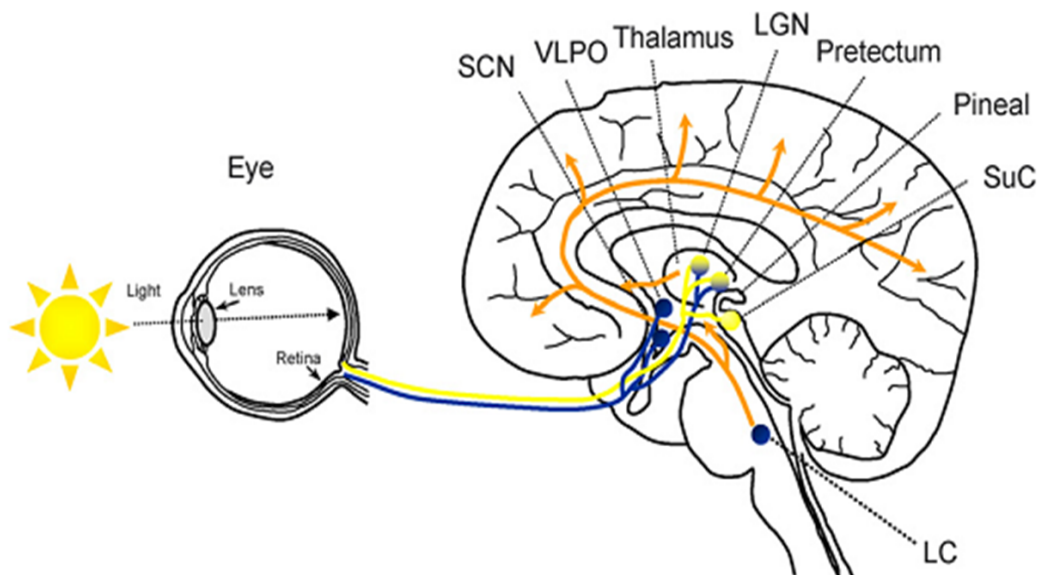


Abbildung 4: Lichtinduzierte Aktivierung von Hirnarealen (Cajochen 2007)

Es ist bekannt, dass das circadiane System durch eine zu geringe Lichteinwirkung während des Tages oder eine zu hohe Lichtexposition während der typischen Schlafphase gestört werden kann, wie z. B. bei Schichtarbeit mit stark wechselnden Uhrzeiten, oder im Winter durch Lichtmangel.

Diese Erkenntnisse werden heute in der sogenannten Lichttherapie genutzt, wo durch gezielte Exposition mit hellem Licht, präferenziell am frühen Morgen unmittelbar nach dem Aufstehen, die Stimmung und der Schlaf-Wach-Rhythmus positiv beeinflusst werden können (siehe Bartenbach, interner Bericht ‚Circadianer Rhythmus und Bildschirme‘, Letztversion vom 22.02.2018).

Die mathematischen Bewertungsmodelle von Bartenbach (inkl. Dosismodell) wurden anschließend zusammen mit den neuen Methoden nach dem Stand der Wissenschaft in die Bartenbach-interne Software ‚SpeClient‘ eingearbeitet. Diese Software enthält nun alle derzeit bekannten – mehr als 100 – spektralen Bewertungsmethoden, inklusive der Bartenbach-eigenen Methoden.

2.1.2 Modell

Alle am Markt befindlichen Steuervorgaben im Bereich biologischer Lichtwirkungen beschränken sich auf das Kunstlicht, der Einfluss des Tageslichts wird jedoch vernachlässigt. Dabei ermöglicht gerade erst die gezielte Nutzung von Tageslicht im Innenraum dem Benutzer hohe Lichtdosen energie- und kosteneffizient zur Verfügung zu stellen. Daher wurde ein Modell zur Bewertung biologischer Lichtwirkungen auf den Menschen („Human Impacts“) mit speziellem Fokus auf Tageslicht erstellt.

Dabei wurde der Fokus auf drei zentrale Bereiche gelegt: visuelle Kriterien, nicht-visuelle Kriterien und emotionale Kriterien.

Visuelle Kriterien

- Mittlere Fensterleuchtdichte $\leq 1000 \text{ cd/m}^2$
- Maximale Fensterleuchtdichte $\leq 3000 \text{ cd/m}^2$
- Beleuchtungsstärke am Auge $\leq 1000 \text{ Lux}$

Achtung: Basierend auf Wahrnehmungsstudien bei Bartenbach hat sich gezeigt, dass die In-feldhelligkeit (Monitor, Arbeitsplatz) dabei zwischen 150 und 250 cd/m^2 liegen sollte.

Nicht-visuelle Kriterien

- Modell zur Bewertung der vertikalen Beleuchtungsstärke E_v am Auge
- Ziel: bewertete Lichtdosis $D \geq 5000 \text{ blxh}$ (bewertete Lux Stunden)

Das Modell zu Bewertung von E_v am Auge lässt sich dabei folgendermaßen formulieren:

$$\text{Schwellwert: } S = 1000 \text{ lx}$$

$$\text{Offset Wirkung: } W = 150 \text{ lx}$$

$$E_{v,\text{bewertet}} = f * S \text{ [blx]}$$

$$f = 0 \quad \text{für } E_v \leq W$$

$$f = \sqrt{(E_v - W)/(S - W)} \quad \text{für } W < E_v \leq S$$

$$f = 1 \quad \text{für } E_v > S$$

$$D = E_{v,\text{bewertet}} * t \text{ [blx * h]}$$

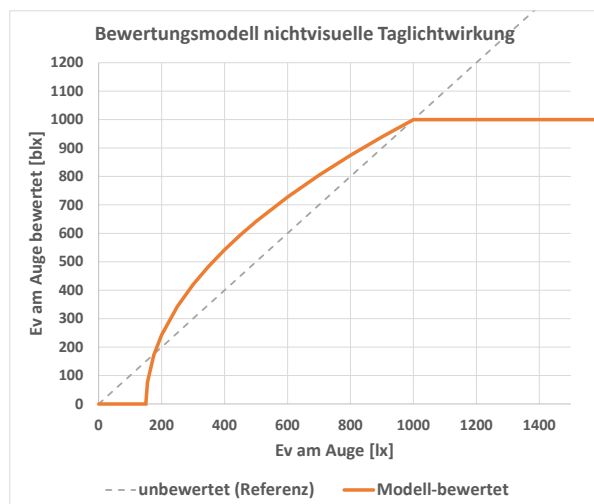


Abbildung 5: Bewertungsmodell nichtvisueller Taglichtwirkung

Die Bewertung des Lichtspektrums (melanopischer Wirkfaktor, a_{cv}) wird für das Tageslicht vernachlässigt, da hier die absolute Intensität die ausschlaggebende Größe ist.

- Gewichtung mit Tageszeit (Abbildung 6)
- Optional: Gewichtung mit Jahreszeit (wenn Sonnenaufgang nach 7 Uhr)

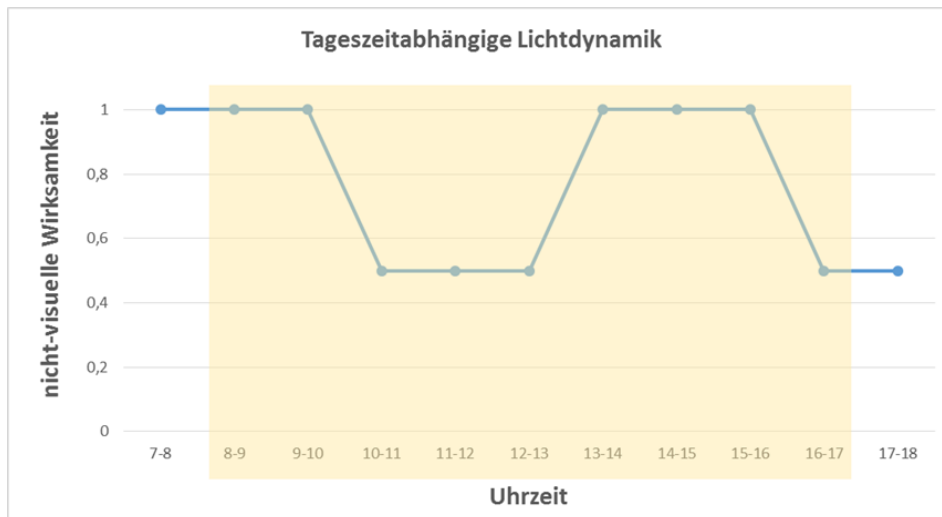


Abbildung 6: Tageszeitabhängige Lichtdynamik

Emotionale Kriterien

Der Kontakt zum Außenraum ist ein wesentlicher Parameter für das Wohlbefinden des Nutzers und ein wichtiger Faktor für die Akzeptanz eines Fassadensystems. Daher wird diese Systemeigenschaft als Bewertungsgröße in den Kriterienkatalog aufgenommen:

- Bewertung der Durchsicht gemäß DIN 14501

2.2 Entwicklung der Steuerstrategie

Der im Projekt VisErgyControl verfolgte Ansatz zielt auf die Reduktion des Gebäudeprimärenergiebedarfes, die Erhöhung des visuellen Komforts sowie auf die Optimierung der melano-pischen Wirkung des Tageslichtes auf die Büronutzer ab. Um diese Ziele mit einem Regelungskonzept erreichen zu können, wäre ein beträchtlicher Sensorikaufwand erforderlich. Die Nutzung des Raumes und die Freiheit der Nutzer wären durch die im Raum positionierte Sensorik auch erheblich eingeschränkt. Bei der im Projekt verfolgten Steuerungsstrategie wird für jeden Zeitschritt die Tageslichtbeleuchtungsstärke des Innenraumes durch eine Lichtsimulation errechnet, sodass sich der Kunstlichtbedarf aus der Differenz der durch das Tageslicht gewährleisteten Beleuchtungsstärke zum normativ vorgeschriebenen Wert ergibt. Dadurch kann auf Messungen im Raum verzichtet werden, weshalb es keinen Regelkreis gibt. Die Stellwerte für Fassade und Kunstlicht können so gezielt angesteuert werden. In den folgenden Kapiteln werden die lichttechnische und die thermische Simulation sowie die Steuerungslogik beschrieben.

2.2.1 Lichttechnische Simulation im Steuerungsmodul

Die Lichtsimulation im Steuerungsmodul wird wie in Kapitel 1.3.2.1 beschrieben nach einer Vorberechnung basierend auf den folgenden Parametern durchgeführt:

- die Geometrie des Raumes inklusive der Oberflächeneigenschaften der verbauten Materialien (ggf. auch inklusive der Innenarchitektur, sofern diese den Tageslichteintrag auf einzelne Arbeitsplätze wesentlich beeinträchtigt)
- die genaue Geometrie der Fensteranteile inklusive Laibung
- die BSDF-Daten für alle einstellbaren Systemstellungen unter Berücksichtigung des Scheibenaufbaus, sowie
- die Position und Blickrichtung der Raumnutzer.

Die Eingabeparameter für die Lichtberechnung im Steuerungsmodul sind:

- die globale und diffuse Beleuchtungsstärke auf die Horizontale
- die Uhrzeit zur Ermittlung der Sonnenposition und der Büronutzung
- die Position und Ausrichtung des zu steuernden Raumes
- die Albedo der Umgebung sowie
- die Horizontlinie, welche vom jeweiligen Fenster aus betrachtet werden kann.

Das Ergebnis der Lichtsimulation bilden die horizontalen Beleuchtungsstärken an den Arbeits-tischen, aus denen der Kunstlichtbedarf und die vertikalen Beleuchtungsstärken auf die Ge-sichtsflächen der Büronutzer ermittelt werden, aus denen wiederum die melanopische Wirkung berechnet wird, sowie die mittlere und maximale Leuchtdichte der Fassade zur Ermittlung der Blendungssituation.

2.2.2 Thermische Simulation im Steuerungsmodul

Parallel zur Lichtsimulation ist für die Auswahl der optimalen Systemstellung auch die Ermittlung des thermischen Energieeintrages in den Raum erforderlich. Die Eingabeparameter hier-für sind:

Die thermische Simulation im Steuerungsmodul wird wie in Kapitel 1.3.2.2 beschrieben nach einer Vorberechnung basierend auf den folgenden Parametern durchgeführt:

- die Global- und Diffusstrahlung auf die Fassade
- die Uhrzeit
- die Fassadengeometrie, vor allem die Anteile von Wandelementen und Verglasung
- die zugehörigen U-Werte von Wandelementen und Fenstern sowie
- die winkelabhängigen g-Werte für die jeweilige Systemstellung.

Der damit berechnete stationäre Heiz- oder Kühlbedarf wird zur Bewertung und schließlich zur Optimierung der Systemstellung herangezogen.

2.2.3 Steuerungslogik

Der logische Ablauf dieser Steuerstrategie ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Input wird von einer Wetterstation am Dach des jeweiligen Gebäudes, oder im Fall von vernetzt agierenden Gebäuden von Wetterstationen in der näheren Umgebung geliefert.

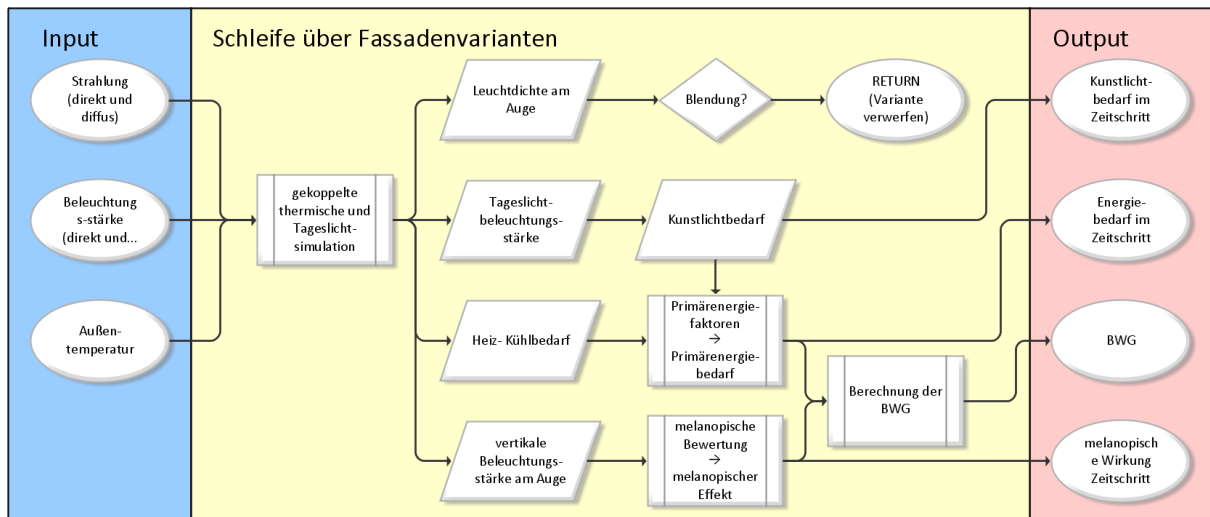


Abbildung 7: Logik der VisErgyControl Steuerung. Links: Input aus Messung; Mitte: Berechnung des Tageslichteintrages, Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarfs, des melanopischen Effektes, der blendungsrelevanten Parameter sowie der Bewertungsgröße (BWG) als Schleife über alle möglichen Fassadenvarianten; Rechts: Output des Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarfs, der Bewertungsgröße sowie der melanopischen Wirkung für die optimale Fassadenvariante.

Diese Wetterstationen umfassen zwar etwas teurere Messtechnik als aktuelle Gebäudeleittechnik erfordert, da die VEC-Lösung jedoch gänzlich auf Sensorik in den Räumen verzichten kann, ist die Einsparung hinsichtlich Hardwarebedarf und vor allem Inbetriebnahme beträchtlich. Das im Projekt verfolgte Konzept basiert darauf, lichttechnisch und thermisch relevante Daten mithilfe einer gekoppelten Simulation zu bestimmen, welche von den extern gemessenen Werten gespeist wird. Relevante Daten des jeweiligen Gebäudes, wie U-Werte, thermische Massen, Reflexionsgrade der Oberflächen, Position und Blickrichtung der Büronutzer, müssen bei der Inbetriebnahme eingegeben werden.

2.3 Simulationstechnische Erprobung des Steuerungsmoduls

Vor der Inbetriebnahme des Steuerungsmoduls in der PASSYS-Testzelle wurde eine Simulationsumgebung aufgebaut, mit deren Hilfe das VEC-Modul im vollen Umfang getestet, weiterentwickelt und mit einer Referenzstrategie verglichen wurde. Die Simulationsumgebung beinhaltete ein dem PASSYS-Testraum entsprechendes thermisches 1-Zonen-Modell mit einem 3-geteilten Fassadenelement in TRNSYS 17 zur Untersuchung der Tageslichtlenkung (Abbildung 8).

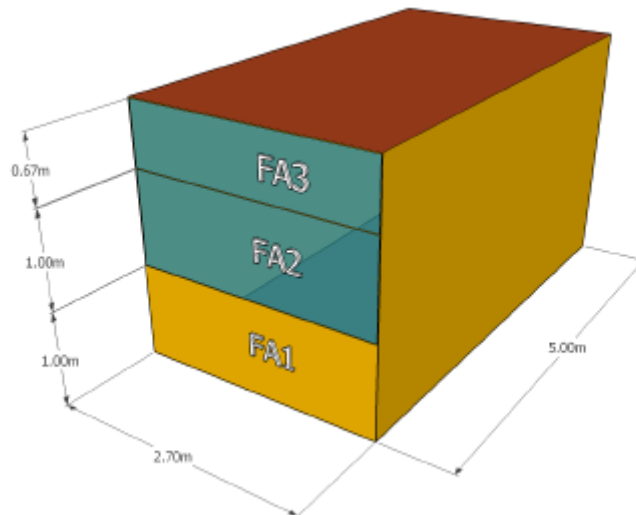


Abbildung 8: Thermisches Modell der PASSSYS Testzelle in TRNSYS Type56

2.3.1 Verwendete Simulationsmethoden

Mit Hilfe des von Transsolar zur Verfügung gestellten Updates des Gebäudemodells (Type56) und des im Parallelprojekt „lightSIMheat“ (Projekt-Nr. 838717) weiterentwickelten Simulationsmodells für komplexe Verglasungssysteme (Abbildung 9), konnten mit Hilfe von BSDF-Dateien eine korrekte thermische Modellierung von Tageslichtsystemen mit komplexer Optik durchgeführt werden. Dies ist wichtig, da erst dieser Ansatz die korrekte Simulation der solaren Transmission für Nichtstandard-Lamellen ermöglicht.

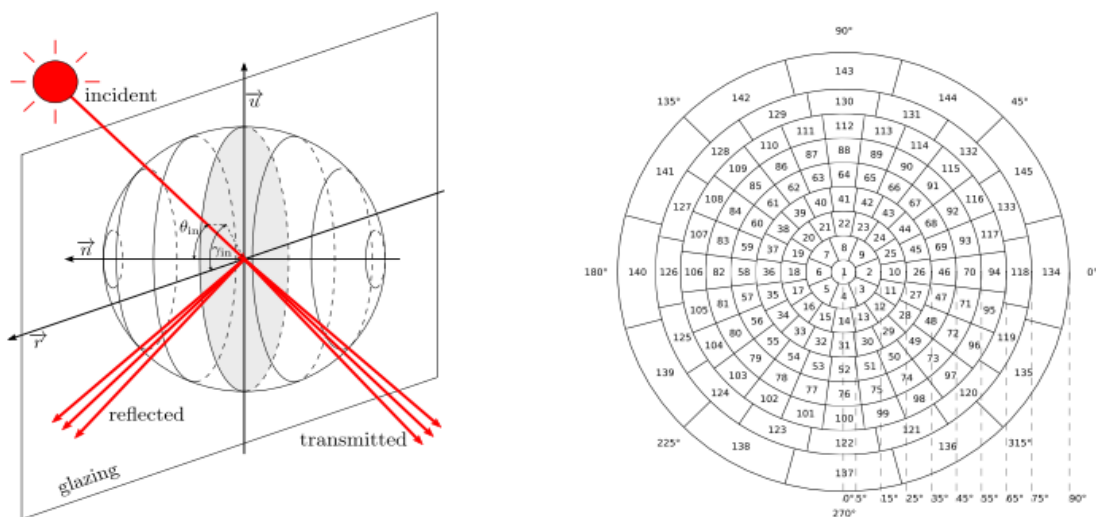


Abbildung 9: BSDF-Methodik zur detaillierten thermischen Simulation von CFS in TRNSYS

Eine dynamische Änderung der Lamellenstellung im Zeitschritt erfolgt in TRNSYS standardmäßig durch einen definierten Hysterese-Controller, welcher etwa ein prozentuelles Öffnen (z.B. bei 200 W/m²) und Schließen (z.B. bei 120 W/m²) der Lamellen abhängig von der Bestrahlungsstärke auf die Fassade durchführt. Diese Fassadensteuerung basierend auf Außenbedingungen entspricht in der Gebäudeleittechnik derzeit dem Stand der Technik, weshalb diese als Referenzstrategie zum Vergleich mit der komplexeren VEC-Strategie festgelegt

wurde. Als Schwellwert für das Öffnen und Schließen der Fassade wurde dabei der Wert 150 W/m² Globalstrahlung auf die Fassade gewählt. Um die im Forschungsprojekt entwickelte VEC-Strategie in die TRNSYS-Simulationsumgebung zu implementieren, musste eine Schnittstelle zum in Excel umgesetzten VEC-Modul hergestellt werden. Durch die Einbindung über den Type 155 (Aufruf Matlab) konnten im Simulationszeitschritt Inputdaten von TRNSYS an das VEC-Modell übergeben werden, welches noch im selbigen Zeitschritt die optimale Lamellenstellung hinsichtlich tageslichttechnischer, energetischer sowie melanopischer Kriterien an TRNSYS retournierte. Die Anzahl der Parameter ist in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Inputs und Outputs (Type155) Kommunikation TRNSYS und VEC-Modul

#	Type of Input	#	Type of Output
1	Year	1	Boolean value for blind (on/off)
2	Month	2	Upper Angle of blind (FA3)
3	Day	3	Lower Angle of blind (FA2)
4	Hour	4	resultierende Ev TL Bereich MP5 [lx]
5	Minute	5	resultierende Ev TL Bereich MP6 [lx]
6	Second	6	Indoor air temperature [° C]
7	External-temperature [°C]	7	Indoor temperature (operative) [° C]
8	Radiation global vertical [W/m ²]	8	Cooling demand [W/m ²]
9	Radiation diffuse vertical [W/m ²]	9	Heating demand [W/m ²]
10	Radiation global horizontal [W/m ²]	10	Electric Light W/m ²
11	Radiation diffuse horizontal [W/m ²]		
12	Illuminance global horizontal [lx]		
13	Mass Temperature (Time step before) [°C]		

In Abbildung 10 ist der gesamte Aufbau der Simulationsumgebung in TRNSYS dargestellt. Neben den Hauptkomponenten (Strahlungsprozessor, Gebäudemodell, Matlab-Kopplung) zeigt sie auch die Verknüpfungen der einzelnen Komponenten. Die thermische Berechnung in TRNSYS erfolgt anhand eines detaillierten 3D-Strahlungsmodells, während das VEC-Modul eine vereinfachte thermische Berechnung basierend auf dem RC-Modell nach EN13790 durchführt.

Das VEC-Modul errechnet unabhängig vom thermischen Gebäudemodell basierend auf den Inputdaten die optimale Lamellenstellung im Zeitschritt, im detaillierteren TRNSYS-Modell erfolgt eine genaue thermische Bewertung der Situation im Raum, welche sich bei Steuerung der Lamellen nach der jeweiligen Steuerstrategie, Referenz oder VEC, einstellt.

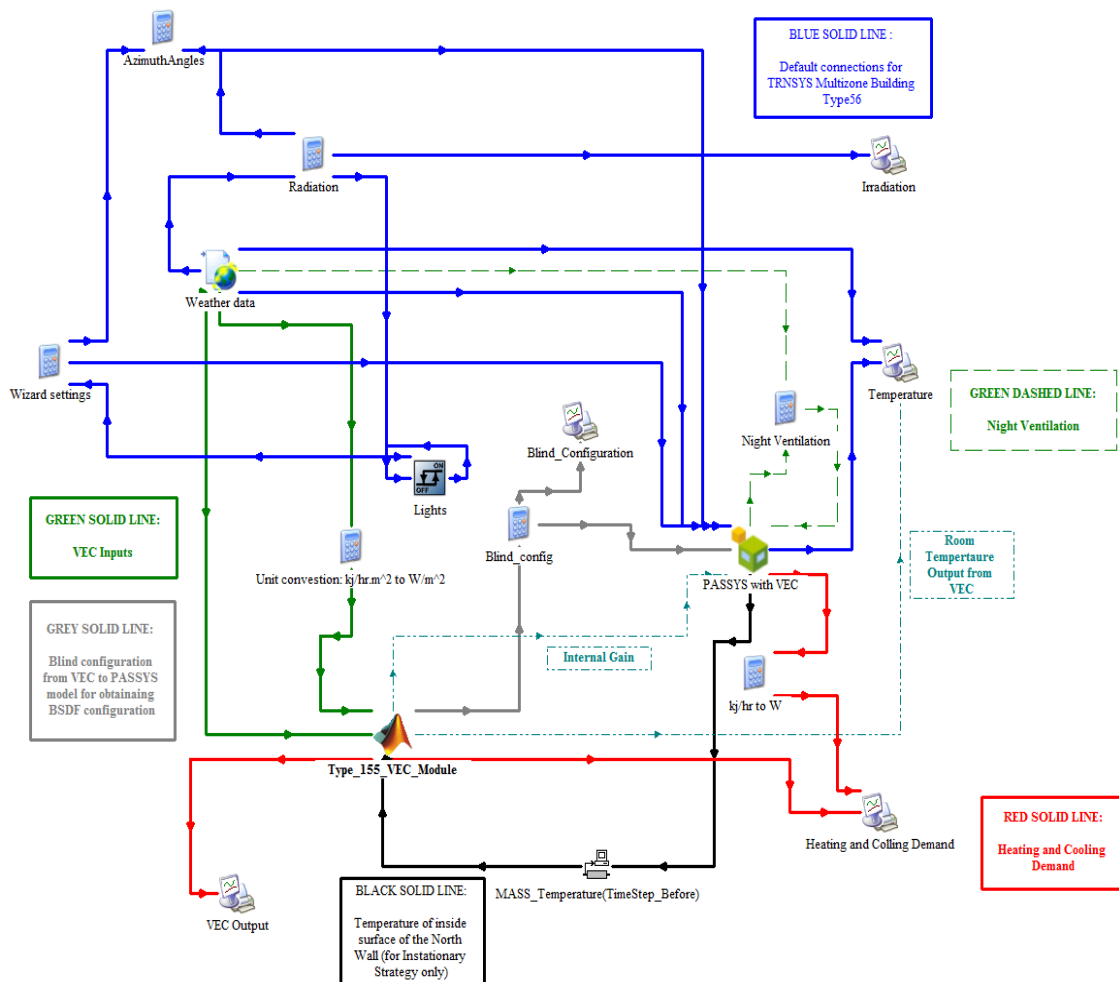


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Simulations-Workflows: TRNSYS und VEC-Modul

Da in TRNSYS (v17) keine Algorithmen zur Lichtsimulation implementiert sind, wurde auch der vom VEC-Modul errechnete Kunstlichtanteil pro Zeitschritt als interne Last dem Gebäudemodell in TRNSYS übergeben. Für die Referenzstrategie konnte aus demselben Grund nicht auf das TRNSYS interne Lamellensteuerungsmodul zurückgegriffen werden. Hierfür wurde eine vereinfachte Version der VEC-Modul-Excel-Datei erstellt, in welcher die Steuerlogik entsprechend adaptiert wurde.

2.3.2 Vergleich des VEC-Moduls gegen eine konventionelle Steuerstrategie

Folgend sind erreichte Optimierungsergebnisse durch Verwendung der VEC-Steuerstrategie im Vergleich zur Standard-Referenzstrategie dargestellt. Als Vergleichssystem wurde in die Testfassade (vgl. Abbildung 8) in beiden Fassadenbehängen (FA2/FA3) eine Dreischeiben-Isolierverglasung mit externem Raffstore (Abbildung 11) implementiert. Der untere Fassadenbereich (FA1) wurde opak ausgeführt.

Tabelle 2: Verglasungsaufbau mit externem Raffstore

ID	External Raffstore	[mm]
2207	BSDF (Raffstore – 00deg)	80.0
2		
1	Gas 1 (Air)	15.0
7197	Glazing 1 (ip_fl_4.ipe)	4.0
9	Gas 2 (Air, 10%; Argon, 90%)	16.0
7110	Glazing 2 (ip_ip14E.ipe)	4.0
9	Gas 2 (Air, 10%; Argon, 90%)	16.0
7110	Glazing 2 (ip_ip14E.ipe)	4.0

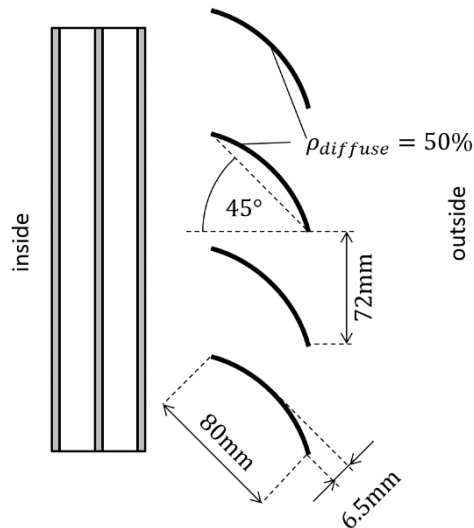


Abbildung 11: Geometriedefinition Raffstore

Weiters wurde auch der Einsatz von Lichtlenklamellen untersucht (Abbildung 12). Da diese mit einer konventionellen Strategie vor allem aufgrund von Blendungsproblemen nicht sinnvoll angesteuert werden können, erfolgte ihr Einsatz im Simulationstest nur in Kombination mit der VEC-Steuerungsstrategie.

Tabelle 3: Verglasungsaufbau mit Umlenklamelle

ID	Re-directing system	[mm]
7197	Glazing 1 (ip_fl_4.ipe)	4.0
1	Gas 1 (Air, 100%)	10.0
22056	BSDF (UL30_Warema_00deg)	80.0
1	Gas 1 (Air, 100%)	10.0
7197	Glazing 1 (ip_fl_4.ipe)	4.0
9	Gas 2 (Air, 10%; Argon 100%)	16.0
7110	Glazing 2 (ip_ip14E.ipe)	4.0
9	Gas 2 (Air, 10%; Argon 100%)	16.0
7110	Glazing 2 (ip_ip14E.ipe)	4.0

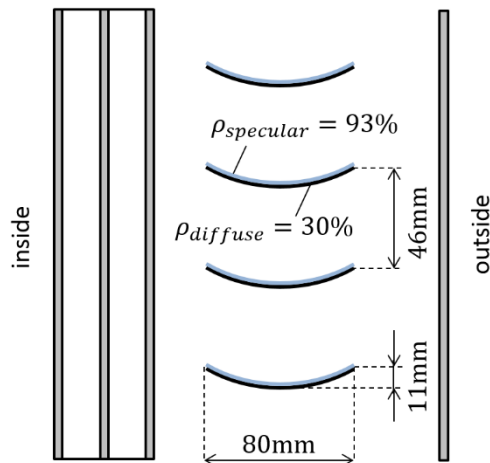


Abbildung 12: Geometriedefinition Umlenklamelle

Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse zeigen für den Vergleich zwischen Referenz- und VEC-Steuerstrategie jeweils den kumulierten Primärenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Kunstlichtbedarf als Jahressumme (oben) und Verlauf der Monatssummen (unten). Es wurden drei Hauptvarianten des VEC-Moduls getestet. Die erste wurde zur bestmöglichen Vergleichbarkeit zur Referenzstrategie konzipiert. Genau wie diese wird dabei die Lamellenstellung über den gesamten Behang, welcher als außenliegender Raffstore ausgeführt wurde gleich angesteuert. Die zweite Variante unterscheidet sich dadurch, dass der mittlere und der obere Fassadenbereich getrennt voneinander angesteuert werden können. Bei der dritten Variante kommt als zusätzliche Optimierung im oberen Fassadenbereich eine Lichtlenklamelle statt des außenliegenden Raffstores zum Einsatz.

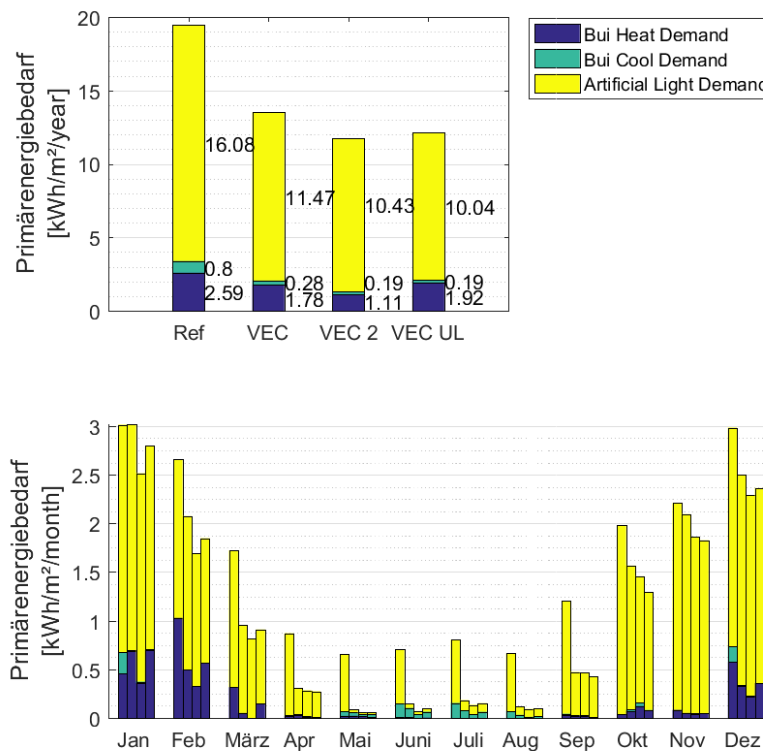


Abbildung 13: Ergebnis Primärenergiebedarf – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien

Durch die intelligentere VEC-Steuerstrategie (VEC) ergibt sich somit ein Einsparungspotential im Primärenergiebedarf von ca. 31% gegenüber einer konventionellen Steuerung. Weitere 9% des Primärenergiebedarfs lassen sich durch getrenntes Ansteuern des oberen und mittleren Behanges erzielen (VEC 2), wobei die Einsparung beim Kunstlichtbedarf am größten ist. Beim Einsatz der Umlenklamelle (VEC UL) verschlechtert sich die Primärenergieeffizienz gegenüber dem Referenzsystem wieder um 2%. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Umlenklamelle für eine Tageslichtbeleuchtung tieferer Räume optimiert wurde. Fensternahe Arbeitsplätze, wie sie im vorliegenden Fall untersucht wurden profitieren abhängig von der genauen Fassaden- und Raumgeometrie nur wenig von der Lichtumlenkung oder sind sogar benachteiligt, wie es sich für die untersuchte Situation zeigte. Durch die verbesserte Nutzung solarer Gewinne lässt sich der Heizwärmebedarf im Winter deutlich reduzieren. Im Sommer geht der erhöhte Tageslichteintrag zur Gewährleistung des melanopischen Effektes geringfügig zu Lasten des Kühlbedarfs. Der Kunstlichtbedarf lässt sich um ca. 25 % reduzieren. Das VEC-Modul wurde dabei mit einem stationären thermischen Modell (ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte durch Gebäudekapazitäten) ausgeführt.

In Abbildung 14 ist der Kunstlichtbedarf in der Ganzjahresdarstellung für alle Strategien im Vergleich angeführt, wobei Tage als Spalte mit Stunde eins unten und Stunde 24 oben dargestellt, und alle Tage im Jahr nebeneinander vom ersten Jänner links bis zum 31. Dezember rechts aufgelistet sind. Speziell in den Sommermonaten kann eine deutliche Reduzierung des Kunstlichtbedarfs für die VEC-Strategien im Vergleich zur Referenzstrategie aufgezeigt werden.

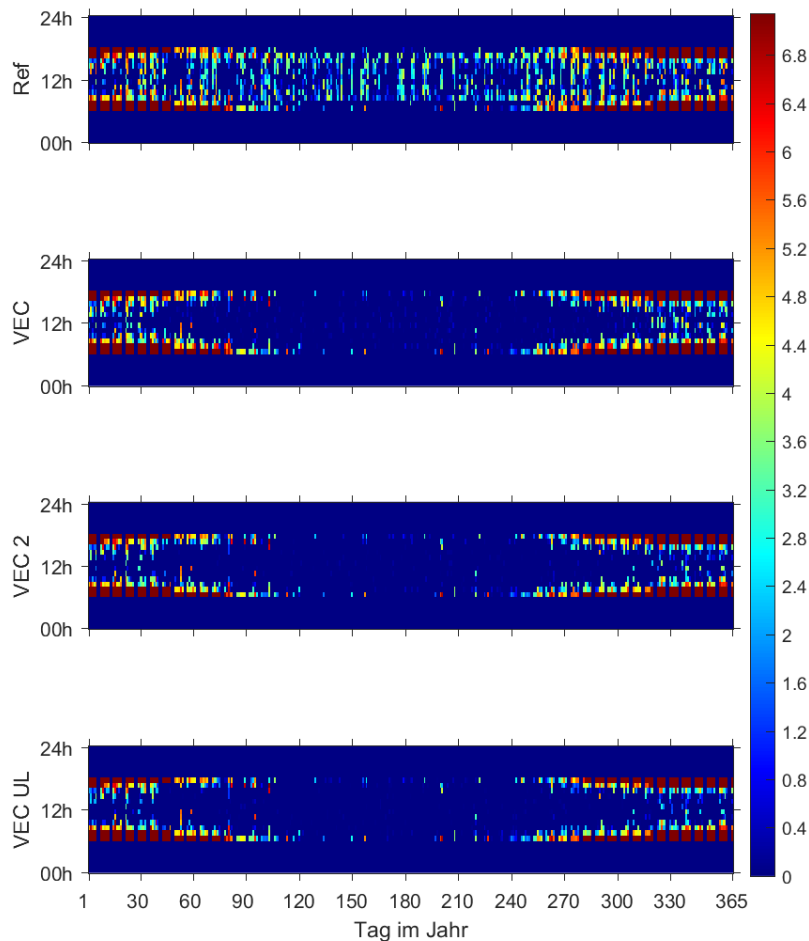


Abbildung 14: Ergebnis Kunstlichtbedarf im W/m^2 für jede Stunde im Jahr – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien

Abbildung 15 zeigt den melanopischen Effekt für die Büronutzer. Es wurden zwei Nutzer, die sich gegenüber sitzen, angenommen, wobei für beide der melanopische Effekt berechnet und als Mittelwert ausgegeben wurde. Die linke Grafik zeigt den melanopischen Effekt für jede Stunde im Jahr in Blx (bewertete Lux, Definition siehe Kapitel 2.1.2) für die Referenz- und die VEC-Strategien. In der rechten Grafik sind die zugehörigen über die Büronutzungszeiten gebildeten Jahresmittelwerte oben und die Monatsmittelwerte unten abgebildet. Die Werte wurden dabei in Relation zur empfohlenen Tagesdosis von 5000 blxh gesetzt. Die Auswertung erfolgte dabei nur zwischen dem fünften Oktober und dem 16. Jänner, da die Annahme getroffen wurde, dass die Büronutzer zur übrigen Zeit des Jahres ihren Tageslichtbedarf außerhalb des Büroarbeitstages decken können, etwa am Weg von und zur Arbeitsstelle oder in der Freizeit.

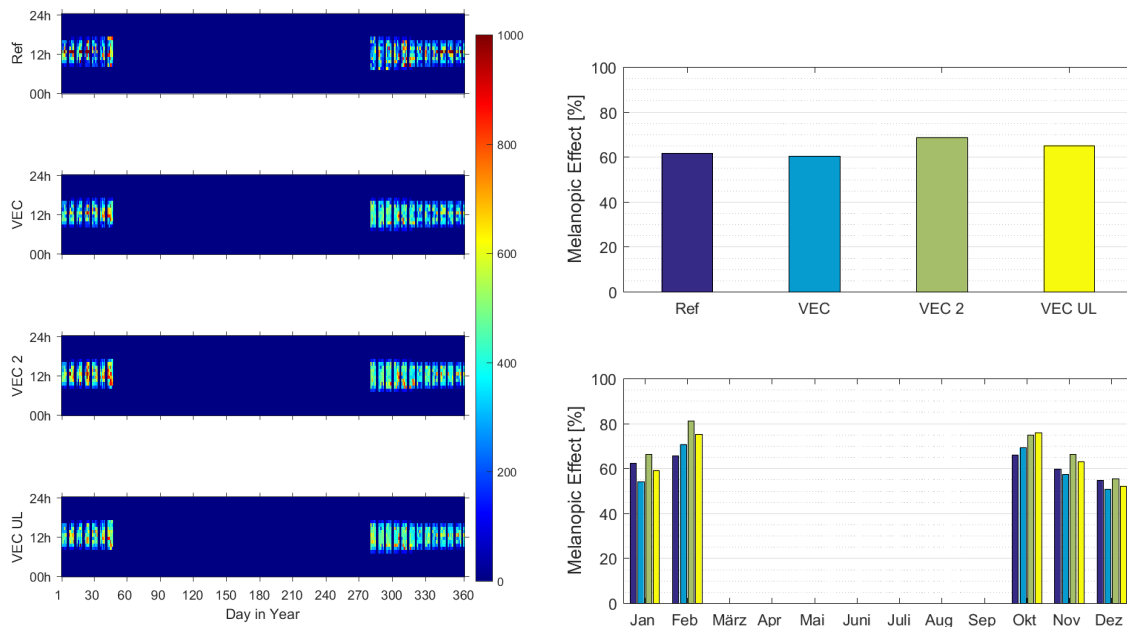


Abbildung 15: Ergebnis melanopischer Effekt – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien. Links: Stündliche Werte in Blx. Rechts: Jahres- und Monatsbilanzen in Prozent des zu erreichenden Wertes von 5000 Blx/d.

Der Vergleich der Strategien zeigt keine großen Unterschiede. Da die Referenzstrategie jedoch keinerlei Blendungsprävention beinhaltet ist davon auszugehen, dass ein Gutteil der erzielten bewerteten Luxstunden in der Realität aufgrund von Blendung nicht nutzbar ist. Die Strategien VEC 2 und VEC UL schneiden gegenüber der Strategie VEC leicht besser ab, da sie im oberen Fassadenbereich das System weiter öffnen können ohne dass Blendung auftritt. Das bessere Abschneiden der Strategie VEC 2 gegenüber VEC UL lässt sich auf denselben Effekt zurückführen wie ihr besseres Abschneiden beim Kunstlichtbedarf.

2.4 Testablauf an der PASSYS-Zelle

Neben der simulationstechnischen Erprobung des VEC-Moduls wurde auch ein Mock-up-Test in der Passys-Testzelle der UIBK durchgeführt. Neben der Prüfung der Umsetzbarkeit des VEC-Moduls zur Steuerung eines realen Fassadensystems diente der Testablauf auch dem Vergleich zwischen der im Modul in jedem Zeitschritt durchgeführten Simulation mit Messdaten, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

2.4.1 Kalibrierung PASSYS

Vor dem Einbau des Fassadensystems erfolgte eine ca. vierwöchige thermische Kalibrierung der PASSYS-Zelle, um die Wärmeverluste über die Außenhülle der Testzelle zu erfassen. Für den späteren Vergleich der thermischen Messdaten mit Simulationsergebnissen wird die PASSYS-Zelle vereinfacht als RC-Modell (im VEC-Modul) sowie in einem detaillierten Gebäudemodell mit allen physikalischen Materialkennwerten der Außenhülle in der Simulationssoftware

TRNSYS modelliert. Um eine möglichst exakte Übereinstimmung der beiden Simulationsmodelle mit der realen Situation an der PASSYS-Zelle zu erhalten, wurden beide Modelle mit Hilfe des Messdatensatzes aus der Kalibrierphase kalibriert. Für das RC-Modell wurde dafür eine programmierte Optimierungsroutine in Matlab angewendet. Die Parameter des physikalischen TRNSYS-Modells wurden mit dem Optimierungstool GENOPT auf die gemessenen Werte gefittet. Die Validierung der kalibrierten Modelle („cross-Check“) erfolgte anhand einer zusätzlichen Messperiode, welche außerhalb der Kalibrierperiode lag. Die Modellergebnisse für das TRNSYS-Modell zeigen eine zufriedenstellende Abbildung der Messwerte.

2.4.2 Testfassaden-Einbau

Das installierte Lamellensystem mit Lichtlenkwirkung im oberen Behang wurde im Zuge des Projektes von der HELLA GmbH eigens entwickelt. Neben der systemtechnischen Umsetzung wurde von der HELLA-GmbH ebenso eine dazu passende Automatisierung programmiert, welche in der PASSYS-Zelle implementiert wurde.

Die Zusammenstellung des Fassadensystems basierte auf Studien, die mit dem Prototyp des Onlinetools DALEC durchgeführt wurden. Verschiedene Kombinationen von Lichtlenk- und Verschattungslamellen mit unterschiedlichen Flächenaufteilungen der Fassadenbereiche wurden dabei miteinander verglichen (siehe auch Deliverable 4.2). Abbildung 16 zeigt die lichttechnisch und energetisch beste Fassadenzusammenstellung, die bei der Untersuchung gefunden wurde.

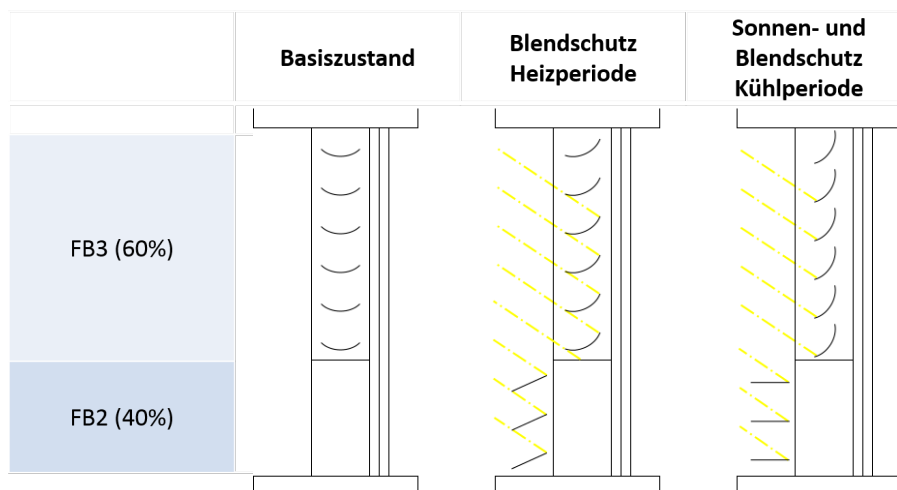


Abbildung 16: Ausgewählte Fassadenkonfiguration aus der Fassadenstudie (Deliverable 4.2)

Die Planungsphase des Musterbehangs endete mit der Fertigung der Lamellen durch die HELLA Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH im Jänner 2016 (Abbildung 17). Der anschließende Einbau in die PASSYS-Zelle der Universität Innsbruck erfolgte im März 2016 (Abbildung 18).

Die Steuereinheit an der PASSYS-Zelle umfasst sowohl das Steuermodul (VEC-Modul) zur Ansteuerung der Lamelle, die Außen- und Innenraumsensorik als Steuerungsinpott sowie die gesamte Sensorik für das thermische und lichttechnische Monitoring.



Abbildung 17: Fertigung des Behangmusters 28. Jänner 2016

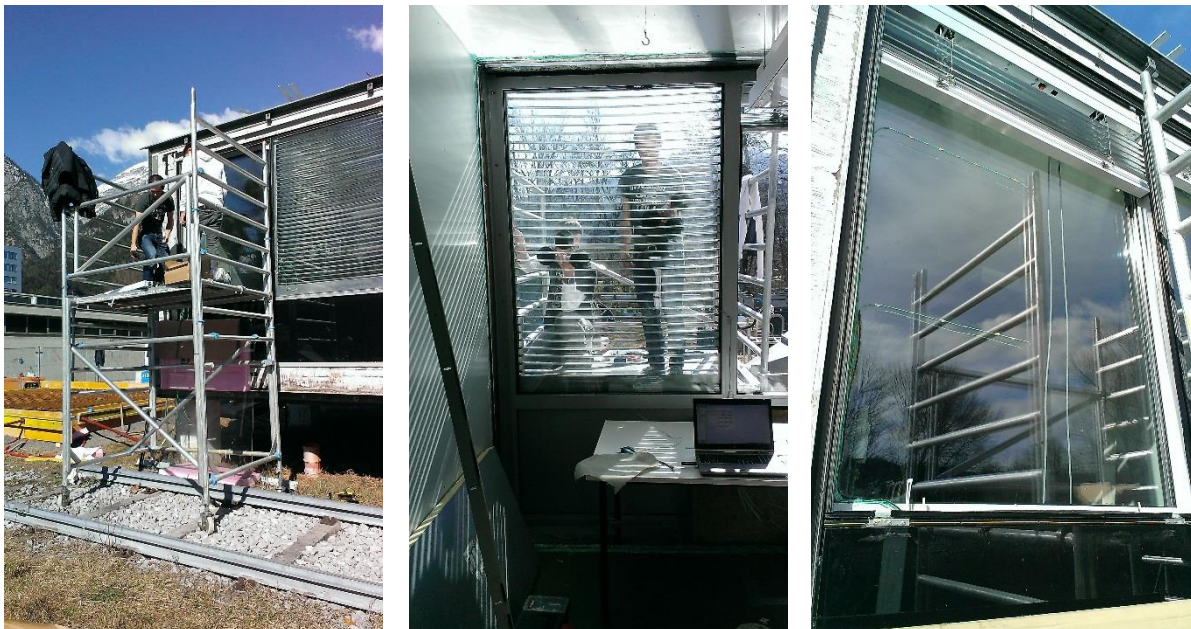


Abbildung 18: Einbau der Testbehänge am 14. März 2016

2.4.3 Langzeitmonitoring an der PASSYS-Zelle der UIBK

Das Monitoring in der PASSYS-Zelle dient zur Evaluierung der Algorithmen des VEC-Moduls. Das VEC-Modul bestimmt, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, das Optimum aus dem Tageslichteintrag, Heiz- bzw. Kühlbedarf und den visuellen/nicht-visuellen Komforteigenschaften.

Folgende Input-Daten für das VEC-Modul werden an der Wetterstation oberhalb der PASSYS-Zelle gemessen und der Steuerung übergeben:

- Horizontale diffuse und direkte Strahlung
- Vertikale Diffus- und Direktstrahlung an der Fassade der Passys-Zelle
- Horizontale Beleuchtungsstärke
- Außenlufttemperatur

Mit der PASSYS-Zelle kann in einem Außenprüfstand unter Realbedingungen getestet werden, ob die implementierten Algorithmen die Realität korrekt abbilden und somit auch die Steuerung plausibel agiert. Zu diesem Zweck werden für die Evaluierung der Lichttechnik und der Bauphysik Sensoren installiert, welche im Folgenden beschrieben werden (Abbildung 20).

2.4.3.1 Lichttechnisches Monitoring

Zur Evaluierung des Tageslichteintrages werden zwei Beleuchtungsstärkesensoren im fensternahen und fensterfernen Bereich installiert. Zusätzlich wird ein Spektrometer zur Messung der spektralen Verteilung am Auge des Nutzers positioniert. Aus dem Spektrum können zum einen Größen des nicht visuellen (melanopische Wirkung) als auch des visuellen Komforts abgeleitet werden (vertikale Beleuchtungsstärke E_v). Mittels einer Leuchtdichtekamera können Blendzustände detektiert werden.



Abbildung 19: Passys-Zelle

2.4.3.2 Bauphysikalisches Monitoring:

Die kalibrierte Passys-Zelle zeichnete sowohl den Heiz- als auch Kühlbedarf auf, welcher notwendig war, um die gewünschte Innenraumtemperatur von 20°C zu halten.

Mittels der Messgrößen aus Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Feuchte und Luftgeschwindigkeit konnte die Behaglichkeit nach Fanger bestimmt und somit eine Bewertungsgröße für den thermischen Komfort dargestellt werden.

Mit einer sternartigen Lufttemperatur-Sensorenaufteilung konnte die Schichtung der Lufttemperatur aufgezeichnet werden. Ebenfalls wurden die Scheiben- und Lamellentemperatur an der Fassade sowie der Wärmefluss durch die opake Brüstung bzw. die Verglasung (nur Nachtstunden) mitgeloggt.

Zudem war im weiteren Verlauf des Monitorings auch ein neu entwickeltes in-situ Messgerät zur Bestimmung von Betriebs U-Wert und g-Wert zum Einsatz gekommen, welches im parallelen Forschungsprojekt lightSIMheat entwickelt wurde, um weitere Kenndaten der Fassade zur Modellvalidierung zu liefern.

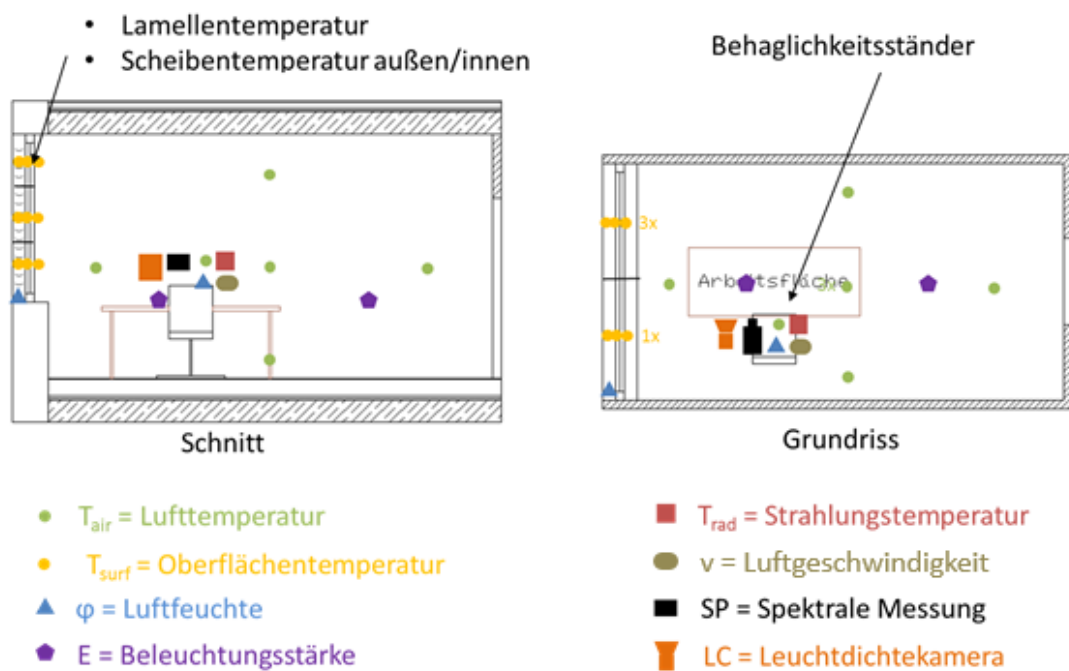


Abbildung 20: Übersicht der installierten Sensoren in der PASSYS-Zelle

Die Messungen in der Passys-Zelle dienen vordergründig der Überprüfung der Steuerungskette zur Stellung der Lamellenposition, welche sich aus dem VEC-Modul und der Steuerungshardware zusammensetzt.

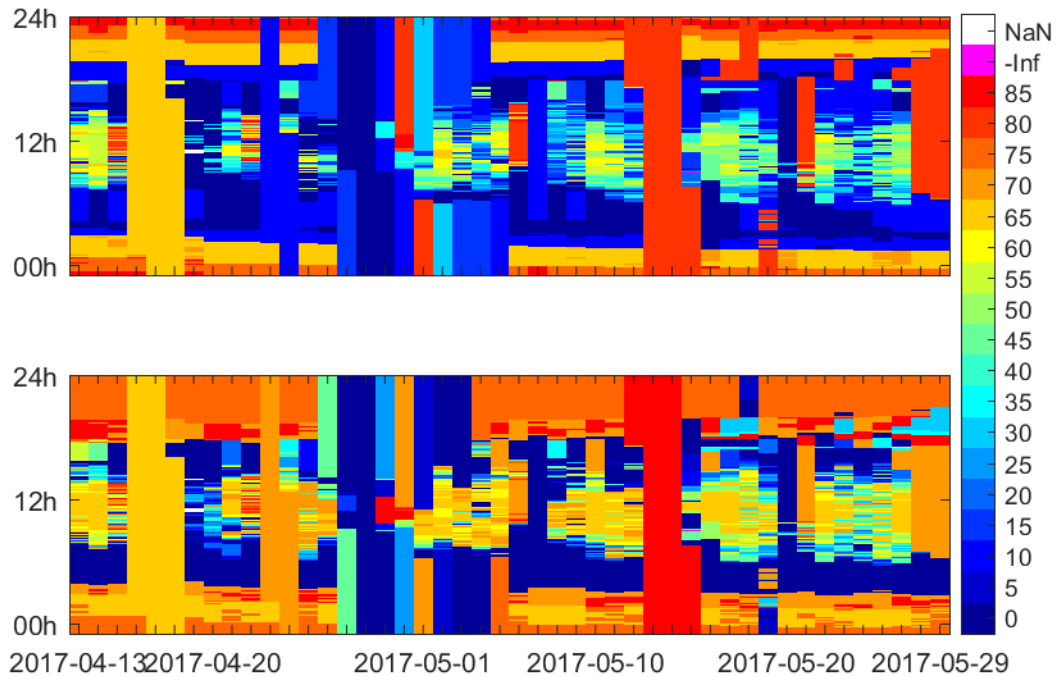


Abbildung 21: Carpet-Plot der Lamellenstellungen im oberen (oben) und mittleren (unten) Fassadenbereich. Einzelne Tage sind als Spalten dargestellt, beginnend bei null Uhr unten und endend bei 24 Uhr oben. Zeiten, zu denen die Lamellen gerafft sind, werden in Pink dargestellt.

Abbildung 21 zeigt die Lamellenstellungen in den Monaten April und Mai 2017. An den Wochenenden sowie in der Nacht bleiben die Lamellenstellungen häufig unverändert. Da zu diesen Zeiten keine Büronutzung angenommen wurde, ist die einzige verbleibende Größe in der Optimierung der thermische Eintrag durch die Fassade, welche somit für minimalen Heiz- bzw. Kühlbedarf eingestellt wird.

2.4.4 Ergebnisse aus dem Vergleich Simulation vs. Messung

Da sich bei der Entwicklung der Steuerstrategie herausstellte, dass realistische thermische Ergebnisse in der gekoppelten Simulation im Steuerungsmodul nicht vorkommen, beschränkt sich der Vergleich zwischen Messung und Simulation auf die Überprüfung der lichttechnischen Simulation. Da die Beleuchtungsstärke in der Simulation an jenen Positionen berechnet wurde, an denen Beleuchtungsstärkesensoren in der PASSYS-Zelle montiert wurden, können die simulierten Werte direkt mit den gemessenen verglichen werden. Abbildung 22 zeigt exemplarisch die gemessene und die simulierte vertikale Beleuchtungsstärke für einen Tag der Messung.

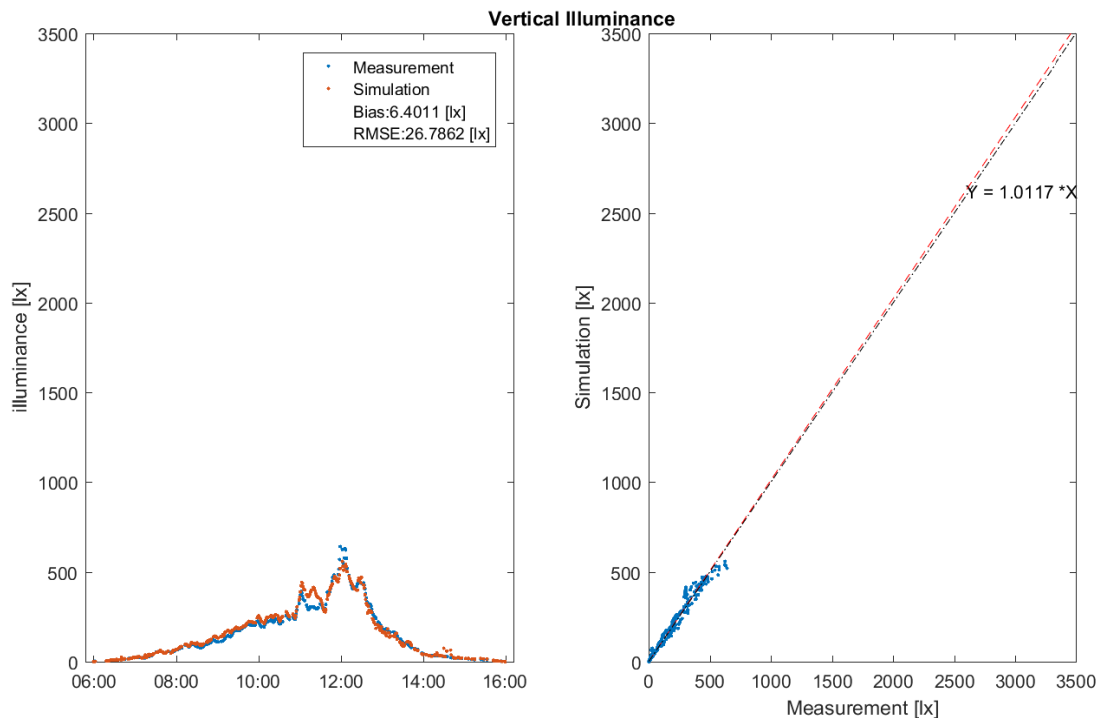


Abbildung 22: Vertikale Beleuchtungsstärke. Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) vertikalen Beleuchtungsstärke. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene vertikale Beleuchtungsstärke.

Der Vergleich der Leuchtdichtewerte gestaltet sich nicht so einfach, da die Messung mit der Kamera ein Bild der Leuchtdichteverteilung über einen ausgedehnten Bereich liefert, wohingegen in der Simulation die Leuchtdichteverteilung nur für die Fassade in grober Auflösung berechnet wurde. Die Simulation hochauflöser Leuchtdichtebilder in jedem Simulationsschritt wäre zu rechenaufwendig, um die geforderte Geschwindigkeit der Steuerungslogik aufrechterhalten zu können. Für die Blendungsbewertung genügt hingegen eine grobe Auflösung, da der Bereich des Himmels, in dem die Sonne nicht zu sehen ist, keinen großen Leuchtdichtegradienten aufweist und selbst ein relativ großes Raumwinkelelement, welches die Sonne beinhaltet, ausreichend hell erscheint, um die Blendungskriterien deutlich zu überschreiten. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen Messung und Simulation zu erzielen, wurde die Auflösung der Kamerabilder um den Faktor 16 in beiden Dimensionen reduziert. Aufgrund der unterschiedlichen Raumwinkelauflösung in Simulation und Messung ist hingegen ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich. Wie in den Scatter-Plots rechts in Abbildung 23 bzw. in Abbildung 24 zu sehen, passen die Werte der maximalen sowie der mittleren Leuchtdichte von Messung und Simulation im Tagesmittel gut zusammen, weshalb eine genauere Untersuchung der simulierten Leuchtdichteverteilung für diesen Anwendungsfall nicht notwendig erscheint.

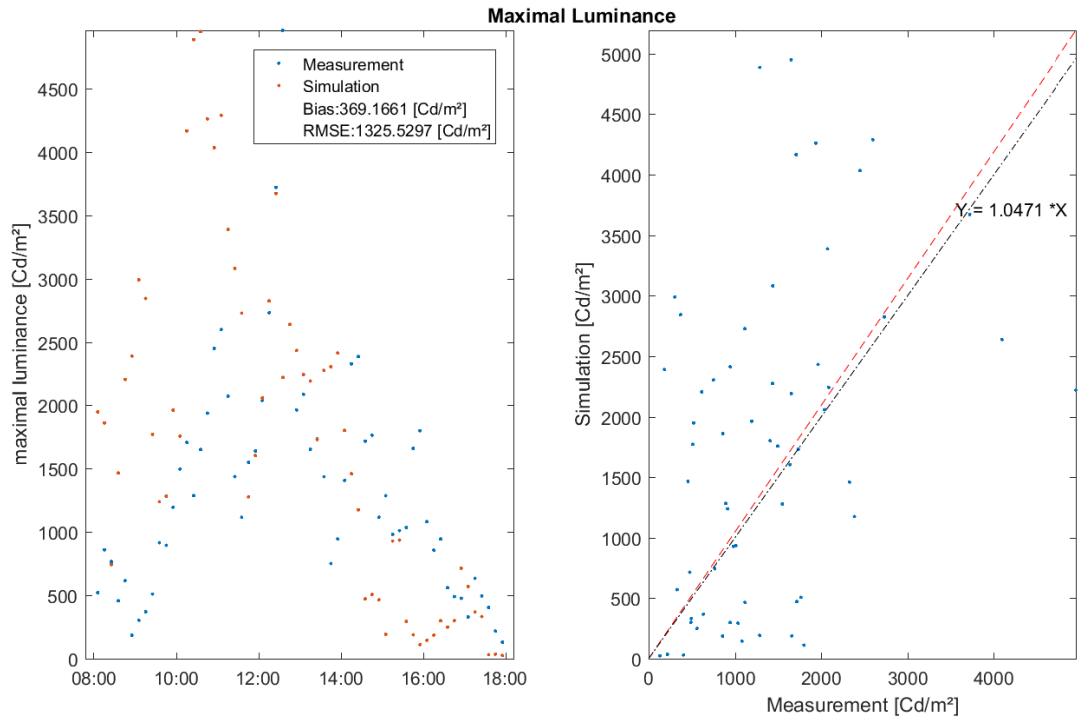


Abbildung 23: Maximale Leuchtdichte: Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) maximalen Leuchtdichte. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene maximale Leuchtdichte.

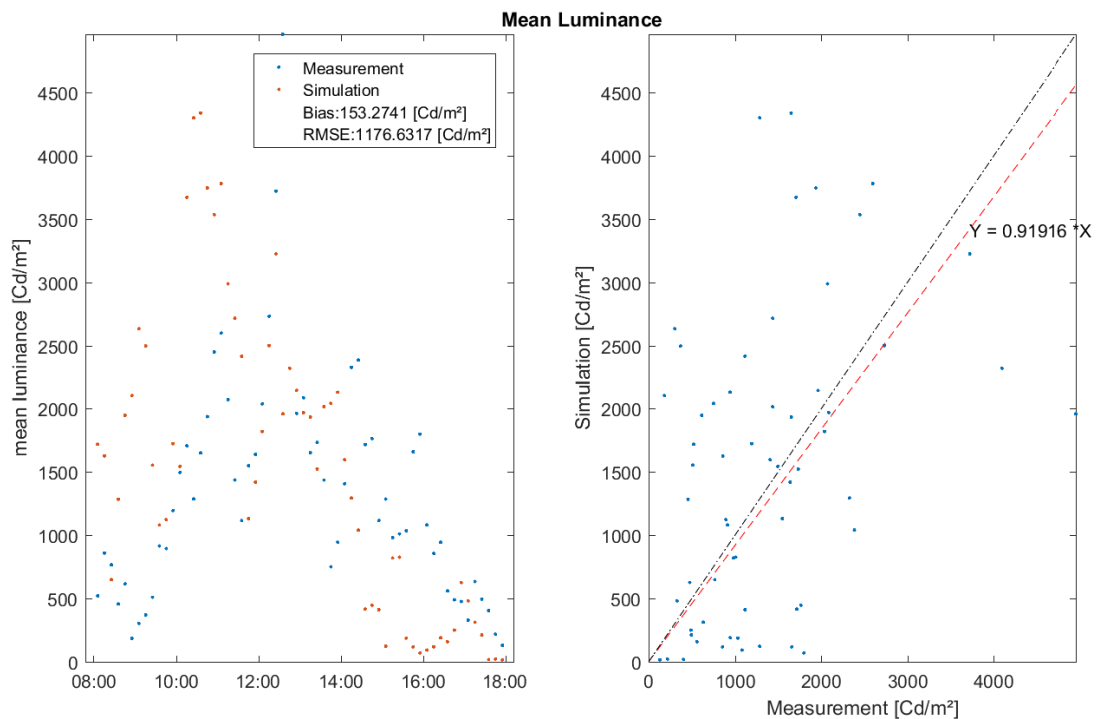


Abbildung 24: Mittlere Leuchtdichte: Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) mittleren Leuchtdichte. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene mittlere Leuchtdichte.

2.5 Vergleich mit Simulations- und mit Monitoringdaten an der Technische Fakultät an der Universität Innsbruck

Neben dem Realtest des entwickelten Steuerungsansatzes in der PASSYS-Zelle erfolgt ein Vergleich mit einer konventionellen Kunstlicht- und Lamellensteuerung über Look-down Sensoren pro Büroraum, wie sie im sanierten Bauingenieurgebäude umgesetzt ist. Für den Vergleich mit Monitoringdaten aus dem Realbetrieb wurde ein thermisches Simulationsmodell, exemplarisch vom 5. Stock des Bauingenieurgebäudes (Abbildung 25), in der Simulationsumgebung TRNSYS aufgebaut (Abbildung 26).

Neben der Berücksichtigung der Gebäudehülle und der internen Lasten basierend auf den Gebäudeplanungsdaten, wurde mittels eines komplexen TRNFlow-Modells die maschinelle Lüftung sowie der Einfluss von Fensterlüftung im thermischen Modell berücksichtigt. Die Abbildung der Fassade erfolgte wieder durch das detaillierte BSDF-Modell, wobei die aktuelle Lamellenposition sowie die Fensteröffnung als Inputdaten aus den protokollierten Daten der Gebäudeleittechnik übernommen wurden. Als Wetterinputdaten wurden Messdaten der ZAMG aus dem Monitoringzeitraum (Standort Innsbruck Universität) herangezogen. Aus Symmetriegründen und zur Bewertung auftretender Übertemperatur wurde als Modellvereinfachung nur der südliche Trakt des Stockwerkes mit raumweiser thermischer Zonierung modelliert.

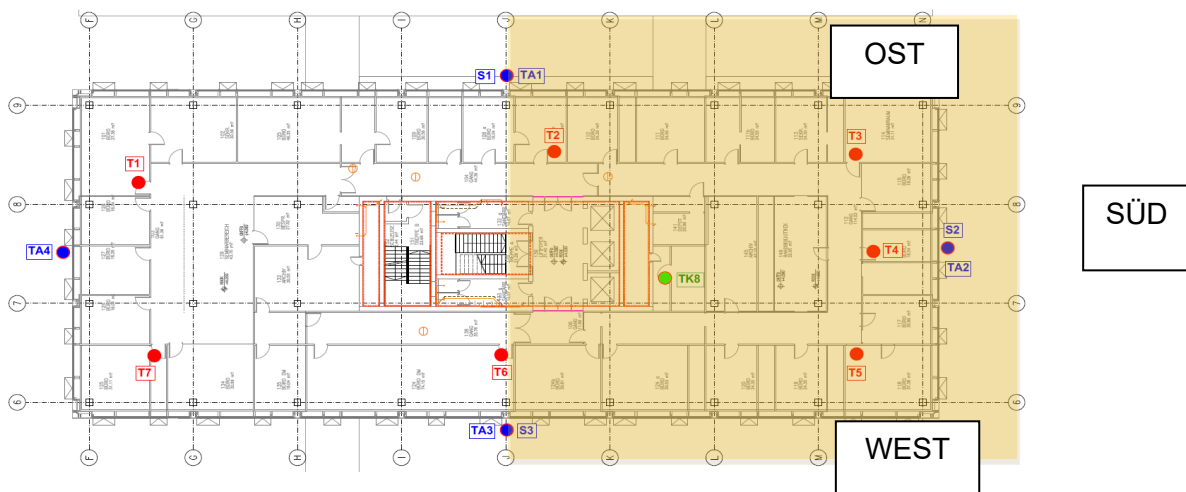


Abbildung 25: Grundrissplan – modellierter Südtrakt, 5.Stock der Technischen Wissenschaften, Uni Innsbruck

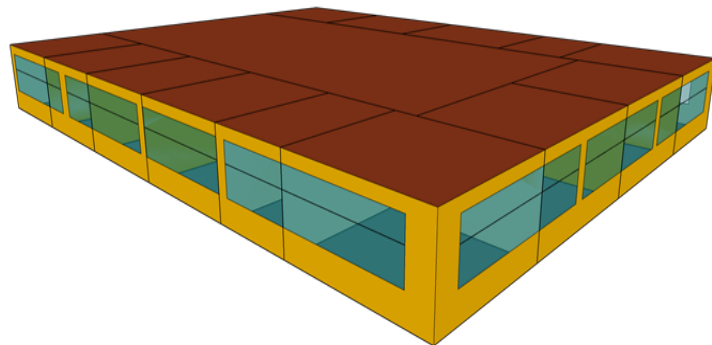
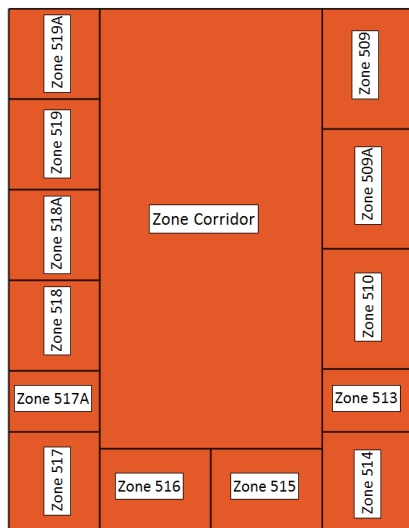


Abbildung 26: Thermische Zonierung und TRNSYS 3D-Stockwerksmodell

Die Lamellenstellung wird vorerst konstant mit 45 Grad angenommen, da die Daten keine genauere Auswertung zulassen. Der Grad der Fensteröffnung bestimmt die Höhe der Luftwechselrate. Geometrie und Zonierung, Eigenschaften der Gebäudehülle sowie der Verglasung (inkl. Lamelle) wurden weitgehend von einem bestehenden Simulationsmodell (Simulationssoftware DYNBIL) des Passivhausinstitutes Innsbruck übernommen, welches zur Planung des Gebäudes verwendet wurde.

Für die thermische Situation entscheidend sind das Nutzerverhalten beim Fensteröffnen und Lamellenschließen sowie die automatisierte Steuerung von Fenster und Jalousie durch die GLT. Es wurde deshalb eine Matlab-Auswerteroutine entwickelt, mit derer anhand der vorhandenen KNX/GLT-Daten Behang- und Fensterposition ausgewertet werden können (Abbildung 27).

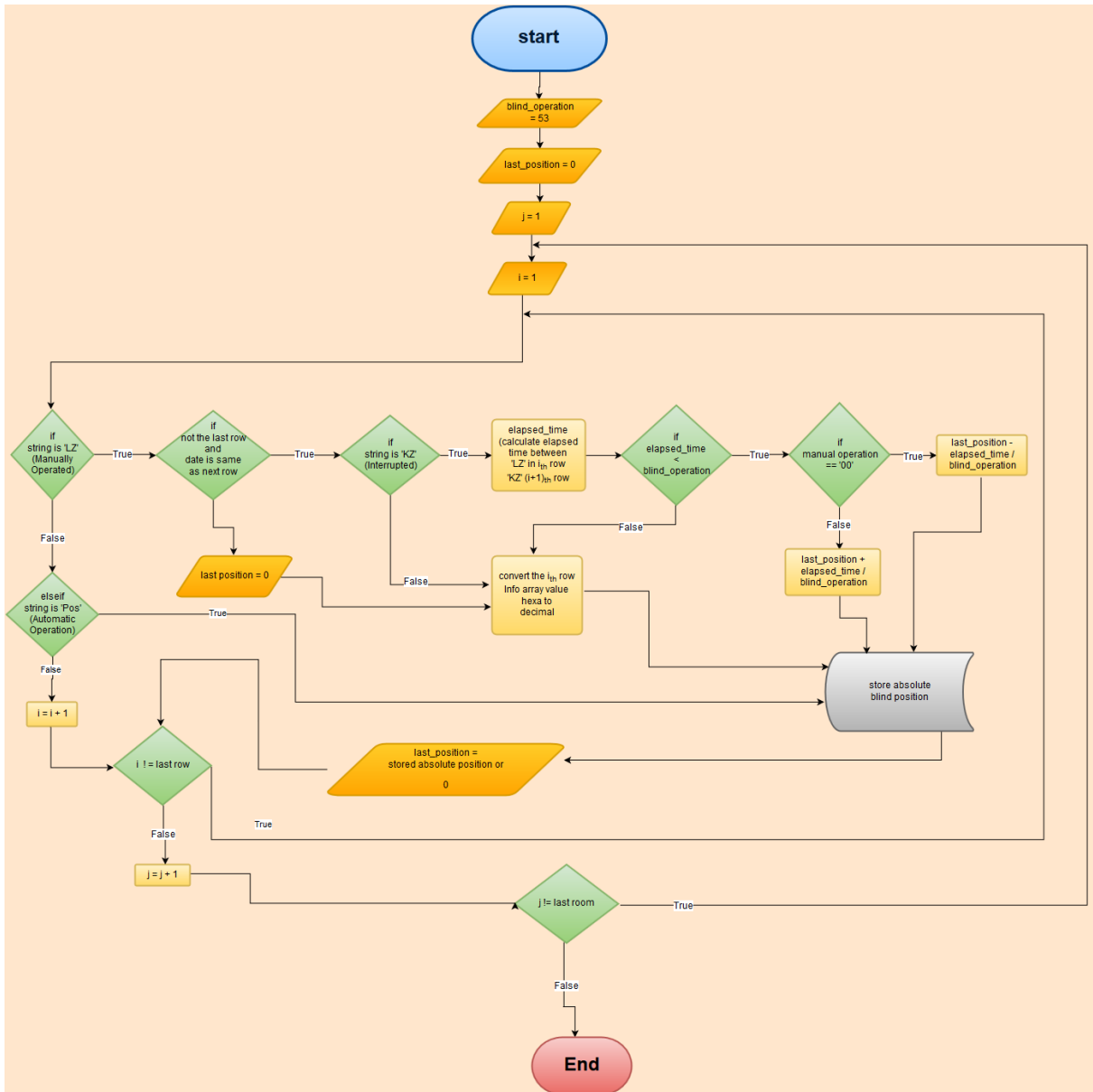


Abbildung 27: Flussbild der KNX/GLT-Datenauswertung zur Analyse der Lamellenposition

Als Ergebnis daraus konnten Steuersignale als Input für die dynamische Simulation der Behangposition (entscheidend für solaren Eintrag) sowie des Fensteröffnungsgrad (entscheidend für Berücksichtigung der natürlichen Fensterlüftung) abgeleitet werden (Abbildung 28).

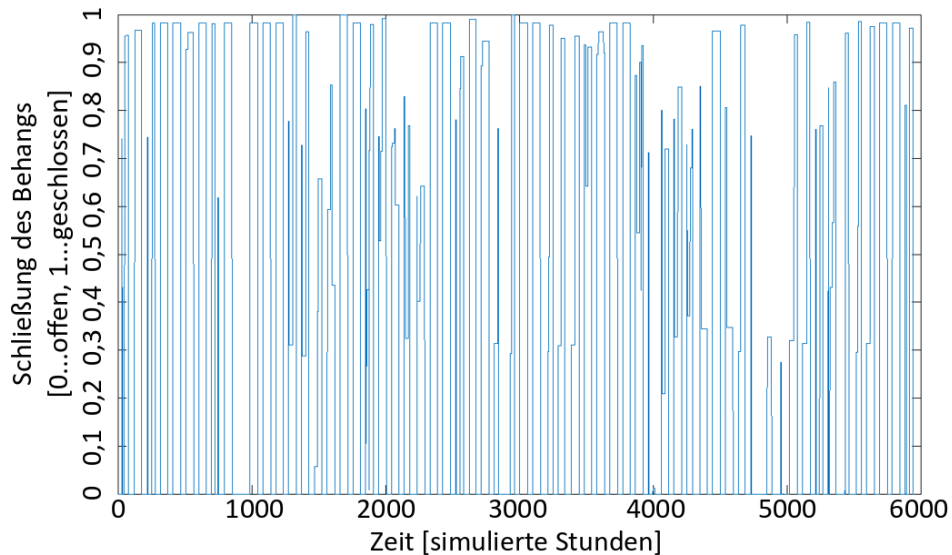


Abbildung 28: Einzelraumergebnis - Verlauf Behangpositionen (01.07.15 - 31.08.15)

Eine Validierung der Plausibilität des thermischen Modells erfolgt mit Vergleichen der Resultate für Raumtemperaturen mit Messdaten aus dem Monitoring. Ein Abgleich des Simulationsmodells erfolgte mit Einzelraumtemperaturen aus dem Monitoring. Das Simulationsmodell zeigte für die Sommerperiode von 01.07.15 – 31.08.15 bereits ein plausibles Verhalten.

In Abbildung 29 sind exemplarisch Vergleichsergebnisse für einen südorientierten Raum sowie das Süd-West Eckbüro (kritischer Fall) dargestellt. Die Monitoringdaten wurden im 15s-Intervall erfasst und entsprechend die Simulationszeitschrittweite gewählt. In beiden Fällen zeigt sich eine deutliche höhere Schwankungsbreite der Simulationsergebnisse im Vergleich zu den gemessenen Raumtemperaturen. Dies ist auf die Modellierung der Fenster-Nachtlüftung zurückzuführen, welche aufgrund ungenauer Winddaten und schwieriger Vorhersage der Nachtlüftungssituation im Gebäude in der Simulation nicht genau nachgebildet werden kann. Dennoch stimmt der Trend zwischen Simulation und Messung sehr gut überein.

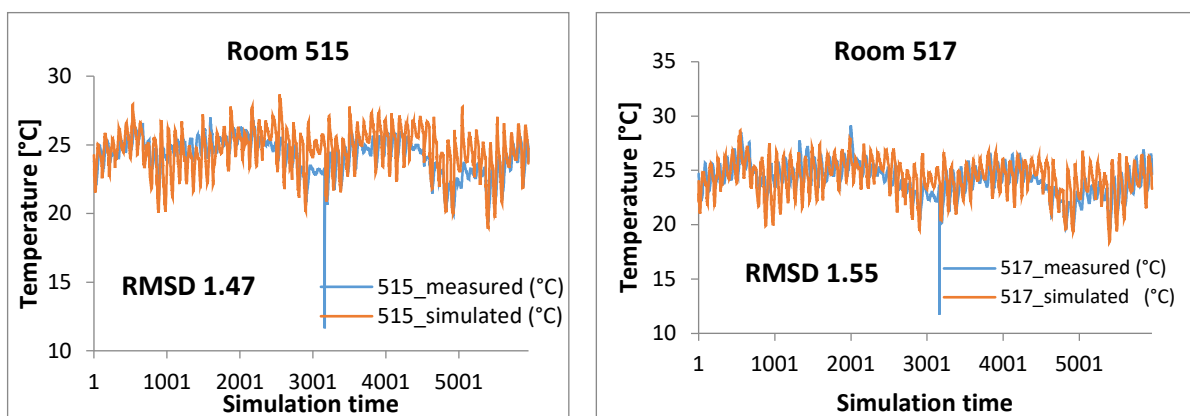


Abbildung 29: Vergleich Einzelraumtemperaturen: Simulation vs. Messdaten aus Monitoring

In weiterer Folge wurde das verifizierte Stockwerkmodell mit je einem VEC-Steuermodul für die Ost-/ Süd-/ und Westfassade gekoppelt, mit dem Ziel, das theoretische Einsparpotential mit Hilfe einer intelligenten Fassadensteuerung zu eruieren. Im direkten Vergleich zu den Simulationsergebnissen basierend auf dem Input aus Monitoringdaten soll so der praktische

Nutzen in einem realen Gebäude simulationstechnisch nachgewiesen werden. Das Fassadenmodell wurde gemäß der installierten Fassade umgesetzt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Aufbau der modellierten Fassadensysteme – Technische Wissenschaften, Uni Innsbruck

With Blind (45° slat angle)			Without Blind		
ID	Existing façade system	[mm]	ID	Existing façade system	[mm]
7197	Glazing 1 (ip_fl_4.ipe)	4.0	7197	Glazing 1 (ip_fl_4.ipe)	4.0
1	Gas 1-1 (Air, 100%)	10.0	1	Gas 1-1 (Air, 100%)	48.8
22056	0.4" Venetian Blind	28.8	7199	Glazing 2 (ip_fl_6.ipe)	6.0
1	Gas 1-2 (Air, 100%)	10.0	9	Gas 2 (Air, 10%; Argon 90%)	16.0
7199	Glazing 2 (ip_fl_6.ipe)	6.0	7111	Glazing 3 (ip_ip16E.ipe)	6.0
9	Gas 2 (Air, 10%; Argon 90%)	16.0	9	Gas 3 (Air, 10%; Argon 90%)	16.0
7111	Glazing 3 (ip_ip16E.ipe)	6.0	7199	Glazing 4 (ip_fl_6.ipe)	6.0
9	Gas 3 (Air, 10%; Argon 90%)	16.0			
7199	Glazing 4 (ip_fl_6.ipe)	6.0			

With Blind (45° slat angle)		Without Blind	
U-Value – 0.791 W/m ² -K	SHGC – 0.143	U-Value – 0.791 W/m ² -K	SHGC – 0.483

Aufgrund der hohen Schwankungsbreite in der Simulation durch den Einfluss der Nachtlüftung wurde auf einen direkten Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen mit VEC-Modul und den Monitoringdaten verzichtet. Stattdessen wurde ein Vergleich auf Simulationsbasis durchgeführt, um vergleichbare Randbedingungen zu gewährleisten. Der so über das VEC-Modul berechnete Kunstlichtbedarf wurde im Stockwerksmodell als dynamische Last inkludiert und für die Monitoring-Periode nachsimuliert. Als Vergleich wurde das Fassadensystem einmal mit einem konventionellen Raffstore wie im Bestand (AR-AR) sowie mit einer Tageslichtlenkmaße im oberen Fassadenbereich (AR-UL) ausgeführt.

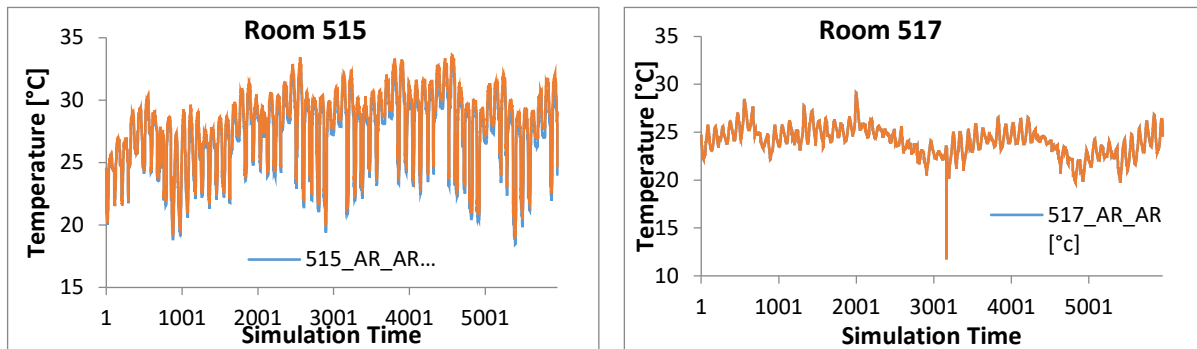


Abbildung 30: Vergleich Einzelraumtemperaturen: Simulationen mit dem VEC-Modul

Die Ergebnisse in Abbildung 30 zeigen ein nur geringes Optimierungspotential durch die Tageslichtlamelle. Dieses Ergebnis bestätigt somit auch die Erkenntnisse aus dem Systemvergleich unter Verwendung der PASSYS-Geometrie. Während ein 2-teiliges Raffstore bereits sehr positive Effekte in der Tageslichtnutzung für fensternahe Arbeitsplätze bringt, würde ein tieferes Büro von einer Lichtlenklamelle profitieren.

2.6 Einbindung der VEC-Steuerung in ein reales Büroobjekt

Im Testbüro im Hause HELLA wurden zwei unterschiedliche Steuerungsvarianten erprobt, welche im Folgenden beschrieben werden.

Variante 1 im HELLA Bürogebäude

Zuerst kam die von HELLA entwickelte Steuerungsvariante „Cut-Off“ zum Einsatz, bei welcher eine Version des HELLA SunTrackings angewendet wurde. Hierbei wird der Lamellenwinkel in 6 Stufen im Tagesverlauf angefahren. Es wird immer der „Cut-Off“ Winkel gehalten, es gibt keine zusätzliche Logik, welche dieses Verhalten beeinflussen könnte.

Variante 2 im HELLA Bürogebäude

Bei dieser Variante wird das VEC-Modul verwendet, um den richtigen Winkel der Lamellen einzustellen. Das VEC-Modul liefert direkt den notwendigen Winkel, dieser wird an die Beckhoff-Steuerung weitergegeben und im Anschluss angefahren.

Beschreibung des Bürogebäudes

Beide Varianten werden im selben Büro angewandt. Dieses ist südseitig ausgerichtet und hat eine große Glasfront. Insgesamt zwei Beschattungselemente sind vor dieser Glasfront montiert.

Versuchszeitraum

Im Zeitraum von Juni 2017 bis September 2017 konnten Testergebnisse gesammelt werden. In diesem Zeitraum wurde ein automatisches Log-File mit allen relevanten Daten der Steuerung erstellt. Eine Testperson war während des Zeitraumes immer Montags bis Freitags von ca. 7:00 bis 17:00 anwesend.

Resümee und Potential aus der Praxisanwendung des VEC-Moduls

In einem ersten Versuch wurde das obere Drittel der Behänge abgeknüpft, um eine Umlenkung der Lamellen in diesem Bereich zu erwirken und einen ähnlichen Effekt wie in der PASSYS-Zelle mit geteiltem Behang zu erzielen. Dieser Effekt stellte sich leider nicht ein, da die Lamellenwendung auf 90° beschränkt war und somit im oberen Bereich so gut wie keine Bewegung stattfand. Die Abknüpfung wurde daraufhin wieder entfernt und hatte keine Auswirkung auf die weiteren Testergebnisse.



Abbildung 31: Beschattung Büro HELLA Gebäude

Resümee Variante 1

Die verwendete Steuerung hat die Lamellen je nach Sonneneinstrahlung automatisch auf Blendschutz gesteuert. Das Produkt wurde immer genau so eingestellt, dass maximales Tageslicht in den Raum gelangen konnte, aber keine direkte Blendung entstand. Bei manuellem Eingriff wurde diese automatische Nachstellung für 2 Stunden deaktiviert (einstellbar). Die Logs haben gezeigt, dass bei sonnigen Tagen in Summe sehr viel gegengesteuert wurde. Meistens wurden die Lamellen manuell auf 0° gewendet, um direktes Sonnenlicht in den Raum zu bringen. An bewölkten Tagen wurden die Lamellen über die Automatik auf 0° gewendet. In dieser Konstellation wurde selten gegengesteuert. Das zeigt, dass der User in den meisten Fällen viel Tageslicht bevorzugte, egal ob Blendung herrschte oder nicht. Das verwendete Steuerungsprinzip führte somit für den User zu keinem vollständig zufriedenstellenden Ergebnis.

Resümee Variante 2

Bei der Umstellung auf die VEC-Variante (Energiesteuerung) wurde das Verdunkeln des Raums aus energetischen Gründen noch mehr verstärkt (im Spätherbst). Das führte für die Testperson zu einem noch weniger zufriedenstellendem Ergebnis und nach ein paar Wochen wurde diese Art von Steuerung wieder deaktiviert.

2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit im Projekt VisErgyControl sind im Konsortium 3 Konferenzbeiträge sowie Artikel in Fachzeitschriften mit peer-review Verfahren erschienen. Weiters wurden fünf Fachvorträge zum Themengebiet der Lichtwirkung auf Fachtagungen gehalten. Im Rahmen der Forschungsarbeit sind außerdem zwei Masterarbeiten aus den Projektinhalten erarbeitet worden. Außerdem bot das Forschungsprojekt Inhalte für zwei verfasste Dissertationen an der Universität Innsbruck.

Im Rahmen des Projektes sind folgende Publikationen in Form von an der Universität Innsbruck verfassten wissenschaftlichen Arbeiten sowie Präsentationen bei wissenschaftlichen Tagungen erfolgt:

- IBPSA-Italy Building Application Simulation 2017, 08.–10. Februar 2017, Bozen Italien
Akzeptierter Vortrag (D 7.3) + Full Paper (D 7.4): Effect of blind control strategy on energy demand of office buildings and melanopic effect for occupants
Autoren: Daniel Plörer, Matthias Werner, Martin Hauer, David Geisler-Moroder

- IBPSA Building Simulation Conference 2017, 07.–09. August 2017, San Francisco, USA
Akzeptierter Vortrag (D 7.3) + Full Paper (D 7.4): Advanced Insolation Detection Module in Solar Shading Automation
Autoren: Robert Weitlaner, David Geisler-Moroder, Rainer Pfluger

- Masterarbeit von Mag. Robert Weitlaner an der Universität Innsbruck (in Kooperation mit der HELLA-GmbH)
Titel: Simulationstechnische Erfassung des Verschattungszustandes für die Sonnenschutzautomation, abgeschlossen 05/2016 (Arbeit aktuell gesperrt)

- Masterarbeit von Kazi Alam, BSc an der Universität Innsbruck (Student der FH OÖ, Wels)
Titel: Case studies on an integral, simulation-based energy-efficient open loop control for daylight and artificial lighting, abgeschlossen 12/2016 (Arbeit aktuell gesperrt)

Außerdem konnten im Projektzeitraum zwei Dissertationen an der Universität Innsbruck abgeschlossen werden, welche für einzelne Aufgabenbereiche Input für VisErgyControl lieferten:

- Dissertation von Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn Matthias Werner

Titel: Gekoppelte lichttechnische und thermische Methoden zur Ganzjahresbewertung von Fassadensystemen für die Planungspraxis, abgeschlossen 07/2017

- Dissertation von Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn Martin Hauer

Titel: Model Development and Validation for an Integrative Thermal and Daylight Evaluation of Complex Fenestration Systems in Building Performance Simulations, abgeschlossen 12/2017

Die Ergebnisse der umfangreichen Arbeiten zum Thema ‚Human Impact‘ (AP4) bei Bartenbach werden dort sowohl in den Planungsprojekten als auch in den Produktentwicklungen für die Industrie laufend verwendet.

Auf folgenden internationalen wissenschaftlichen Tagungen wurden Ergebnisse aus AP 4 eingebracht, einige Vorträge berichteten direkt über das Projekt:

- New daylight solutions for energy and health, LuxEuropa 2017, Ljubljana, 18.-20.09.2017
- View of a lighting design company on HCL Intelligent, efficient solid-state lighting, Swissphotonics, Basel, 12.12.2016
- Daylight driven and user centered lighting and energy management, Advanced Building Skins Tagung, Bern, 10.-11.10.2016
- Biodynamische Beleuchtung – Anwendungen und wissenschaftlicher Hintergrund, LICHT 2016, Karlsruhe, 2016
- Light and Health – newest research findings and its applications, LpS 2016, Bregenz, 20.-22.09.2016.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die entwickelte Steuerstrategie in VisErgyControl zeigen neue Geschäftsfelder für die Firma HELLA hinsichtlich verbesserter Steuerungskomponenten, wie auch für die Firma Bartenbach im Bereich nicht-visueller Bewertung von Tageslichtnutzung auf. In beiden Firmen werden die neuen Inhalte Anstoßpunkt für neue Entwicklungen sowie weiterführende Forschungsideen sein.

3 Schlussfolgerungen

Der aktuelle Stand des Steuerungsmoduls beweist, dass mit vergleichsweise einfachen Methoden eine deutlich effizientere Fassadensteuerung möglich ist. Vom Konsortium wird daher großes Potential für die zukünftige Anwendung in der Gebäudeleittechnik gesehen.

Eine sinnvolle Tätigkeit wäre die Weiterentwicklung des VEC-Modul-Prototyps in eine Dienstleistung zur Steuerung der Lamellenpositionen und der Kunstlichtleistung. Die Integration in die Gebäudeleittechnik sollte dabei modular möglich sein, sodass etwa die Steuerung des Kunstlichtes als Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, welche unabhängig von der Lamellensteuerung genutzt werden kann. Weiters wird die Einbindung von Wettermodellen diskutiert, womit eine vorrausschauende Steuerung möglich wäre, welche sich positiv auf den resultierenden Energiebedarf auswirken dürfte. Zudem könnte ein räumlich hoch aufgelöstes Wettermodell (etwa basierend auf Himmelskameradaten) dazu beitragen, die erforderliche Messtechnik am Einzelgebäude weiter zu reduzieren.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die entwickelte Steuerstrategie in VisErgyControl konnten durchaus neue spannende Geschäftsfelder für die Firma HELLA hinsichtlich verbesserter Steuerungskomponenten, wie auch für die Firma Bartenbach im Bereich nicht-visueller Bewertung von Tageslichtnutzung aufzeigen. In beiden Firmen werden die neuen Inhalte Ansatzpunkt für neue Entwicklungen sowie weiterführende Forschungsideen sein.

Nach wie vor wird die integrale Schnittstelle „Fassade“ bei der Abhandlung von Bauprojekten unabhängig von vielen verschiedenen Gewerken bedient (Statiker, Glasbauer, Jalousienhersteller, Elektroinstallateur...). Schlechte Abstimmung und Kommunikation ist dabei leider noch immer die Realität, was meist zu nicht zufriedenstellenden Lösungen für den Endkunden führt. Insbesondere der Aspekt der Fassadensteuerung ist hiervon betroffen, da sich eine Fehlfunktion am gravierendsten beim Gebäudenutzer auswirkt. Aus Sicht des Konsortiums wäre hier ein Umdenken dringend nötig, welches die einzelnen Gewerke bereits während der Planungsphase an einen Tisch bringt, um eine zufriedenstellende, integrale Lösung zu erarbeiten. Nachdem diese Schnittstelle in der Form noch nicht existiert, könnten sich hier aus Sicht des Konsortiums neue Geschäftsfelder als gewerkübergreifender Fassadenplaner ergeben.

Durch die Universität Innsbruck konnten Kompetenzen vor allem in der thermischen Modellierung und Bewertung von Fassadensystemen eingebracht werden. Außerdem wurden die wesentlichen Schritte zur Umsetzung des VEC-Modules durch Forschungsarbeiten von der Universität Innsbruck durchgeführt. Die erarbeiteten Inhalte bilden zudem die Ausgangsbasis für die Dissertationsarbeit von Mag. Daniel Plörer an der Universität Innsbruck. Bartenbach brachte ihre hohe Expertise im noch sehr jungen Forschungsgebiet der nicht-visuellen Lichtwirkung ein und konnte dank der exzellenten Vernetzung zu den wesentlichen Wissenschaftlergruppen in diesem Bereich Forschung an vorderster Front betreiben. Zusätzlich steuerte Bartenbach unterstützend mit Fragestellungen zur Lichtsimulation bei. Mit dem Projektpartner HELLA wurde die notwendige fachliche Expertise aus der Fassadenindustrie vollends abgedeckt. Neben Bereitstellung von Demonstrationsobjekten im Projekt wurde vor allem auch

hohe Expertise im Bereich Lamellensteuerung und Sensorik in das Projekt eingebracht, so dass eine erfolgreiche Praxiserprobung der erarbeiteten Konzepte ermöglicht wurde.

Die im Zuge des Projektes VisErgyControl entwickelte Steueralgorithmik zur integralen thermisch-lichttechnischen und melanopischen Optimierung wurde im Entwurf als Excel-Prototyp umgesetzt. Im Zuge der Integration in die Fassadensteuerung bei HELLA hat sich gezeigt, dass die Implementierung auf Basis von Excel umständlich und fehleranfällig ist. Um zukünftige Implementierungen zu erleichtern, wurde die Steueralgorithmik innerhalb des Projektes VisErgyControl noch auf die Plattform Matlab umgestellt, um so für etwaige Folgeanwendungen bzw. Folgeprojekte darauf aufbauen zu können.

4 Ausblick und Empfehlungen

Das Konsortium ist sich einig, dass die Erkenntnisse des Projektes am besten genutzt werden können, indem ein Folgeprojekt angestrebt wird. Eine sinnvolle Tätigkeit wäre die Weiterentwicklung des VEC-Modul-Prototyps in ein Produkt oder eine Dienstleistung zur Steuerung der Lamellenpositionen und der Kunstlichtleistung. Die Integration in die Gebäudeleittechnik sollte dabei modular möglich sein, sodass etwa die Steuerung des Kunstlichtes als Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, welche unabhängig von der Lamellensteuerung genutzt werden kann. Weiters wird die Einbindung von Wettermodellen diskutiert, womit eine vorrausschauende Steuerung möglich wäre, welche sich positiv auf den resultierenden Energiebedarf auswirken dürfte. Zudem könnte ein räumlich hoch aufgelöstes Wettermodell (etwa basierend auf Himmelskameradaten) dazu beitragen, die erforderliche Messtechnik am Einzelgebäude zu reduzieren.

Das entwickelte Steuerkonzept aus VisErgyControl wird aktuell bereits in weiterführenden Forschungsaktivitäten des Konsortiums angewendet und weiter verbessert. So wird im aktuellen laufenden INTERREG- ITAT 1039 Projekt FACEcamp "Competence Center to Support the Development of Modern Façade Systems" (www.facecamp.it/de) im Bereich der Steuerung auf den Erfahrungen aus VisErgyControl aufgebaut und dieses dort erweitert und verbessert. Zudem wurde bereits um ein Folgeprojekt als K-Regio Projekt beim Land Tirol angesucht, wo das Thema und die Erfahrungen zur Steuerung mit aktuellen Herausforderungen in der Projektplanung mittels BIM vereint werden sollen und der hierin entwickelte integrale Steueransatz auf arbeitsplatzindividuelle Tagesbelichtung aus der Fassade erweitert werden soll.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leuchtenregelung basierend auf raumbezogenen Sensordaten (Quelle: Eigene Darstellung).....	16
Abbildung 2: Energetischer (links) und lichttechnischer Vergleich (rechts, Useful Daylight Illuminance) von Fassadensystemen (Hauer 2017).....	18
Abbildung 3: Projektflussbild VisErgyControl	19
Abbildung 4: Lichtinduzierte Aktivierung von Hirnarealen (Cajochen 2007)	26
Abbildung 5: Bewertungsmodell nichtvisueller Taglichtwirkung	27
Abbildung 6: Tageszeitabhängige Lichtdynamik.....	28
Abbildung 7: Logik der VisErgyControl Steuerung. Links: Input aus Messung; Mitte: Berechnung des Tageslichteintrages, Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarfs, des melanopischen Effektes, der blendungsrelevanten Parameter sowie der Bewertungsgröße (BWG) als Schleife über alle möglichen Fassadenvarianten; Rechts: Output des Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarfs, der Bewertungsgröße sowie der melanopischen Wirkung für die optimale Fassadenvariante.....	30
Abbildung 8: Thermisches Modell der PASSYS Testzelle in TRNSYS Type56.....	31
Abbildung 9: BSDF-Methodik zur detaillierten thermischen Simulation von CFS in TRNSYS	31
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Simulations-Workflows: TRNSYS und VEC-Modul	33
Abbildung 11: Geometriedefinition Raffstore	34
Abbildung 12: Geometriedefinition Umlenklamelle.....	34
Abbildung 13: Ergebnis Primärenergiebedarf – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien.....	35
Abbildung 14: Ergebnis Kunstlichtbedarf im W/m^2 für jede Stunde im Jahr – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien.....	36
Abbildung 15: Ergebnis melanopischer Effekt – Vergleich Referenzstrategie vs. VEC-Strategien. Links: Stündliche Werte in Blx. Rechts: Jahres- und Monatsbilanzen in Prozent des zu erreichenden Wertes von 5000 Blxh/d.	37
Abbildung 16: Ausgewählte Fassadenkonfiguration aus der Fassadenstudie (Deliverable 4.2)	38
Abbildung 17: Fertigung des Behangmusters 28. Jänner 2016.....	39
Abbildung 18: Einbau der Testbehänge am 14. März 2016	39
Abbildung 19: Passys-Zelle	40
Abbildung 20: Übersicht der installierten Sensoren in der PASSYS-Zelle.....	41
Abbildung 21: Carpet-Plot der Lamellenstellungen im oberen (oben) und mittleren (unten) Fassadenbereich. Einzelne Tage sind als Spalten dargestellt, beginnend bei null Uhr unten und endend bei 24 Uhr oben. Zeiten, zu denen die Lamellen gerafft sind, werden in Pink dargestellt.....	42

Abbildung 22: Vertikale Beleuchtungsstärke. Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) vertikalen Beleuchtungsstärke. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene vertikale Beleuchtungsstärke.....	43
Abbildung 23: Maximale Leuchtdichte: Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) maximalen Leuchtdichte. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene maximale Leuchtdichte.....	44
Abbildung 24: Mittlere Leuchtdichte: Links: zeitlicher Verlauf der gemessenen (blau) und simulierten (rot) mittleren Leuchtdichte. Rechts: Scatter-Plot der simulierten über die gemessene mittlere Leuchtdichte.	44
Abbildung 25: Grundrissplan – modellierter Südtrakt, 5.Stock der Technischen Wissenschaften, Uni Innsbruck	45
Abbildung 26: Thermische Zonierung und TRNSYS 3D-Stockwerksmodell.....	46
Abbildung 27: Flussbild der KNX/GLT-Datenauswertung zur Analyse der Lamellenposition.....	47
Abbildung 28: Einzelraumergebnis - Verlauf Behangpositionen (01.07.15 - 31.08.15).....	48
Abbildung 29: Vergleich Einzelraumtemperaturen: Simulation vs. Messdaten aus Monitoring	48
Abbildung 30: Vergleich Einzelraumtemperaturen: Simulationen mit dem VEC-Modul	49
Abbildung 31: Beschattung Büro HELLA Gebäude.....	51

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inputs und Outputs (Type155) Kommunikation TRNSYS und VEC-Modul	32
Tabelle 2: Verglasungsaufbau mit externem Raffstore	34
Tabelle 3: Verglasungsaufbau mit Umlenklamelle	34
Tabelle 4: Aufbau der modellierten Fassadensysteme – Technische Wissenschaften, Uni Innsbruck.....	49

6 Literaturverzeichnis

Andersen, Marilyne; Mardaljevic, John; Lockley, Steve W. (2012): A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part I: photobiology-based model, In: *Lighting Research and Technology* 44: S.37-55

Amundadottir, Maria L.; Rockcastle, Siobhan; Khanie, Mandana Sarey; Andersen, Marilyne (2016): A human-centric approach to access daylight in buildings for non-visual health potential, visual interest and gaze behaviour; In: *Building and Environment*; DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.09.033

AUSTRIA, STATISTIK (2017): Wie geht's Österreich? 2017. Online verfügbar unter http://www.statistik.at/web_de/services/publikationen/1/index.html?includePage=etailedView§ionName=Allgemein&pubId=692, zuletzt geprüft am 28.02.2018.

Cajochen, Christian (2007): Alerting effects of light. In: *Sleep Medicine Reviews* 11, S. 453 - 464. DOI: 10.1016/j.smr.2007.07.009

Boer, Jan de; Hubschneider, Carolin (2016): Katalog von Empfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz für beleuchtungszwecke. Online verfügbar unter https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/oeffentliche_Berichte/WB-190_Katalog_Ma%C3%9Fnahmen_Empfehlung_Beleuchtung_15-09-2016.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2018.

Fachverband Licht (2013): Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Oktober/Market_Study__Human_Centric_Lighting/ZVEI-FV-Licht-Human-Centric-Lighting-Ueberblick.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2018.

Figueiro, Mariana G; Gonzales, Kassandra; Pedler, David (2016): Designing with Circadian Stimulus, LD+A article, verfügbar unter: https://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/LDA_CircadianStimulus_Oct2016.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2019

Hauer, Martin (2017): Model Development and Validation for an Integrative Thermal and Daylight Evaluation of Complex Fenestration Systems in Building Performance Simulations. Dissertation. Universität Innsbruck. Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, AB Energieeffizientes Bauen. Online verfügbar unter <http://diglib.uibk.ac.at/ulbtirolhs/content/titleinfo/2269534>, zuletzt geprüft am 28.02.2018.

Hubert, Marc; Dumont, Marie; Paquet, Jean (2009): Seasonal and Diurnal Patterns of Human Illumination Under Natural Conditions. In: *Chronobiology International* 15 (1), S. 59–70. DOI: 10.3109/07420529808998670.

Nioi, Amanda; Roe, Jenny; Gow, Alan; McNair, David; Aspinall, Peter (2017): Seasonal Differences in Light Exposure and the Associations With Health and Well-Being in Older Adults: An Exploratory Study. In: *HERD* 10 (5), S. 64–79. DOI: 10.1177/1937586717697650.

Konis, Kyle (2016): A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. In: *Building and Environment*, DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.025


Schweizer, Christian; Edwards, Rufus David; Bayer-Oglesby, Lucy; Gauderman, William James; Ilacqua, Vito; Jantunen, Matti Juhani et al. (2007): Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. In: *Journal of exposure science & environmental epidemiology* 17 (2), S. 170–181. DOI: 10.1038/sj.jes.7500490.

Werner M.; Pfluger R.; Geisler-Moroder, D.; Feist, W. (2017): Analysis of Worldwide Performance of Facade Systems. In: *Proceedings of the 15th IBPSA Conference*, S. 1011–1020. DOI: 10.26868/25222708.2017.267.

7 Anhang

Weiterführende Informationen können folgenden Dokumenten entnommen werden, welche im Zuge der Erarbeitung der Deliverables entstanden sind.

- Schulungsunterlagen zur Implementierung des entwickelten Steuerungsansatzes für firmeninterne Planungsabteilungen
- Dokumentation von Systemen und Sensorik
- Publikation: Weitlaner, R.; Geisler-Moroder, D.; Pfluger R. (2017): Advanced Insolation Detection Module in Solar Shading Automation. In: Proceedings of the 15th IBPSA Conference, S. 719–725. DOI: 10.26868/25222708.2017.184.
- Planungsleitfadens zur „melanopischen“, mensch-zentrierten Beleuchtung (visuell, nicht-visuell, thermisch)
- Leitfaden zur Interface-Erstellung „Human Interfaces“
- Auswertung der NutzerInnenbewertung bei der Anwendung der Steuerstrategie in einem realen Bürogebäude.
- Publikation: Plörer, D.; Werner, M.; Hauer, M.; Geisler-Moroder, D. (2017): Effect of blind control strategy on energy demand of office buildings and melanopic effect for occupants. In: *Proceedings of Building Simulation Application Conference 2017, Bolzano*



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