

Erkennung von Personen und Gruppen in bestehenden Gebäuden auf Basis von sichtbarem Licht (Vilipa)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 58/2025

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Dr. Andreas Peter Weiss, MSc Omar El-Ouahabi, MSc Christian Fragner (JOANNEUM
RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH)

DI Pirmin Pezzei, Dr. Hristo Ivanov, Pasha Bekhrad, Yingjie Liu, Prof. Erich Leitgeb
(Technische Universität Graz)

Wien, Pinkafeld 2025. Stand: März 2023

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). 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 aller betroffener Bereiche 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 BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract.....	9
3	Ausgangslage.....	11
	3.1. Ausgangssituation, Motivation für das Projekt.....	11
	3.2. Forschungsfragen.....	12
	3.3. Zielsetzung des Projekts.....	13
	3.4. Stand des Wissens.....	13
4	Projekthalt.....	17
	4.1. Methodik.....	17
5	Ergebnisse	24
	5.1. Relevanz im Hinblick auf die Ausschreibung	28
6	Schlussfolgerungen	30
	6.1. Erkenntnisse.....	30
	6.2. Weiterführende Tätigkeiten & Zielgruppen.....	30
	6.3. Rechtliche Hürden.....	31
7	Ausblick und Empfehlungen	32
8	Verzeichnisse.....	33

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Eines der Schlüsselemente zur Bekämpfung der Energie- und Klimakrise besteht darin den Betrieb von Gebäuden energieeffizienter zu gestalten. Weltweit sind Gebäude für bis zu 40 % des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich. Daher werden viele Anstrengungen unternommen, um den Energieverbrauch von Gebäuden zu senken. Um dies zu erreichen, ohne den Komfort der Menschen im Gebäude zu senken, sind technologische Innovationen in verschiedenen Bereichen notwendig. Zuverlässige Belegungsinformationen sind dabei ein wesentlicher Aspekt, für den bedarfsgerechten, energieeffizienten Betrieb von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage Systeme eines Gebäudes. Zur Realisierung solcher Systeme werden derzeit unterschiedlichen Technologien und Methoden eingesetzt, die jedoch in vielen Fällen einen umfangreichen Installationsaufwand verursachen, und zudem hinsichtlich mancher eingesetzter Technologie, Datenschutzbedenken auslösen. Besonders im Bereich der Bestandsgebäude verhindert der zu erwartende Installationsaufwand aufgrund von wirtschaftlichen Bedenken den Einsatz von Belegungserkennungssystemen, obwohl das Potential solcher Systeme zur Senkung des Energiebedarfs außer Frage steht.

Ausgehend von der Notwendigkeit zur Realisierung von Belegungsinformationssystemen mittels bestehender Infrastruktur, wurde in diesem Sondierungsprojekt die Erweiterung der Funktionen der Beleuchtungsinfrastruktur in den Fokus gerückt. Der verfolgte Ansatz zur Erkennung von Personen anhand der Reflexion von sichtbarem Licht, hervorgerufen durch die Person selbst, bekannt unter dem Synonym Visible Light Sensing, und der daraus abgeleiteten Belegungserkennung in Bereichen von Gebäuden stellt einen solchen innovativen Ansatz dar. Die wesentlichen zu adressierenden Forschungsfragen zur Realisierung eines solchen Systems waren:

- Technische Machbarkeit eines Belegungserkennungssystems auf Basis des Visible Light Sensing
- Zuverlässige Erkennung bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungen
- Möglichkeiten zur Kommunikation ohne zusätzlichen Installationsaufwand
- Integrationsmöglichkeiten bzw. Ermöglichung von Retrofit Ansätzen

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Projektziel war die Überprüfung der wirtschaftlichen und technischen Sinnhaftigkeit und der Umsetzbarkeit eines Ansatzes zur Generierung von Belegungsinformationen mittels in den Beleuchtungskörper integrierter photosensitiver Elemente, aufbauend auf der Technologie des Visible Light Sensing. Einer der Hauptaugenmerke lag dabei auf einer robusten, zuverlässigen Detektion von Personen, deren Bewegungsrichtung und deren Gehgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungszuständen. Insbesondere die große zu erwartende Variation der Reflektionen bzw. Intensitäten des reflektierten Licht, begründet in unterschiedlicher Körpergröße, Frisuren und Bekleidung stellte dabei eine Herausforderung dar, insbesondere im Bereich der Algorithmusentwicklung. Um das geplante System auch von wirtschaftlicher Seite für den Einsatz in Bestandsgebäuden umsetzbar zu machen, bestand ein

weiterer Schwerpunkt des Projekts darin, die Kommunikation der Beleuchtungskörper zu ermöglichen, ohne der Notwendigkeit von zusätzlichem Installationsaufwand. Übergeordnetes Ziel der Sondierung war es das Potential zur Erweiterung der Funktionen der Beleuchtungsinfrastruktur zu demonstrieren und somit die Weiterentwicklung der Beleuchtung von einer reinen Lichtquelle hin zu einem aktiven Akteur im Gebäude weiter voranzutreiben.

Methodische Vorgehensweise

Die methodische Vorgehensweise folgte einem iterativen Entwicklungskonzept. So wurden bereits sehr früh im Projekt umfangreiche Messungen auf Einzelkomponenten bzw. Subsystemebene durchgeführt, um möglichst frühzeitig Problemstellungen aufzudecken und entsprechende Gegenmaßnahmen setzen zu können. Dies umfasste nicht nur die Charakterisierung der Auswirkungen von veränderten Lichtverhältnissen auf den Ansatz des Visible Light Sensing, sondern auch veränderte Umgebungseinflüsse, wie zum Beispiel unterschiedliche Bodenmaterialien. Diese frühzeitigen Messergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten außerdem die Basis für die Konzeptentwicklung und Realisierung der erstellten Labormuster, sowohl hinsichtlich der eingesetzten Komponenten als auch im Bereich der Algorithmusentwicklung. Auch die Konzepterstellung sowie die schlussendliche Realisierung der Powerline Kommunikation der Labormuster folgte diesem iterativen Ansatz, beginnend mit der umfangreichen Erhebung der verfügbaren relevanten Komponenten über die Inbetriebnahme auf Einzelkomponenten bzw. Subsystemebenen bis hin zur Integration in die Labormuster. Die gefertigten Labormuster wurden schlussendlich in zahlreichen Messversuchen in unterschiedlichen Testbed-Umgebungen möglichst realitätsnah hinsichtlich der erreichbaren Resultate überprüft, optimiert und bewertet.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der umfangreichen Messversuche in unterschiedlichen Testbed-Umgebungen konnte die zuverlässige und robuste Umsetzung der Belegungserkennung mittels Visible Light Sensing demonstriert werden. Insbesondere die erreichte Unabhängigkeit von Umgebungseinflüssen (z.B.: Sonnenlicht) und der großen Variation der Parameter der Personen (Größe, Haare, Bekleidung) stellt dabei einen wesentlichen Mehrwert, besonders hinsichtlich weiterführender Tätigkeiten dar.

Ein wesentlicher dabei erreichter Aspekt war die Integration der photosensitiven Elemente in einen bestehenden zugekauften Beleuchtungskörper mit Standardabmessungen, der die einfache Installation bzw. die Möglichkeit einer Retrofit Lösung unterstreicht. Weiters konnte mit der realisierten Powerline Kommunikation die avisierte Schnittstelle erfolgreich umgesetzt werden, welche wiederum den Ansatz der möglichst unkomplizierten Realisierung unterstreicht.

Besonders die kompakte Bauform sowie der implementierte Algorithmus, konnten dabei den zukunftssträchtigen innovativen Ansatz unter Beweis stellen und die Machbarkeit sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht demonstrieren.

Ausblick

Die erfolgreiche Demonstration der auf Visible Light Sensing basierten Belegungserkennung, integriert in die Beleuchtungsinfrastruktur, ist die Basis für weitere Entwicklungen bzw. Transformation dieses Ansatzes in flächendeckende Anwendungen. Besonders der geringe Installationsaufwand, sowie die Wahrung der Privatsphäre der Personen stellen dabei einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderen Technologien und Methoden in diesem Bereich dar.

2 Abstract

Motivation and research question

One of the key elements to combat the energy and climate crisis is to make the operation of buildings more energy efficient. Worldwide, buildings are responsible for up to 40% of total energy consumption. Therefore, many efforts are being made to reduce the energy consumption of buildings. In order to achieve this without compromising the comfort of the people in the building, technological innovations in various areas are necessary. Reliable occupancy information is an essential aspect for the demand-driven, thus energy-efficient operation of a building's heating, ventilation and air conditioning system. For the realization of such systems, different technologies and methods are currently used, which, however, in many cases result in extensive installation efforts. Additionally some of the technologies used, trigger data protection concerns. Especially in the area of existing buildings, the expected installation effort prevents the use of occupancy detection systems due to economic concerns, although the potential of such systems to reduce energy demand is beyond question.

Based on the need to realize occupancy information systems using existing infrastructure, this exploratory project focused on extending the functions of the lighting infrastructure. The approach pursued for the recognition of persons on the basis of the reflection of visible light caused by the person himself, known under the synonym Visible Light Sensing, and the derived occupancy detection in areas of buildings represents such an innovative approach. The main research questions to be addressed for the realization of such a system were:

- Technical feasibility of an occupancy detection system based on Visible Light Sensing
- Reliable detection in different light conditions and environments
- Possibilities for communication without additional installation effort
- Possibilities for seamless integration or retrofit approaches

Project contents and objectives

The project objective was to verify the economic and technical feasibility of an approach to generate occupancy information by means of photosensitive elements integrated into the lighting fixture, based on the technology of Visible Light Sensing. One of the main focuses was on robust, reliable detection of people, their direction of movement and walking speed under varying lighting conditions and environmental conditions. In particular, the large expected variation of the reflections or intensities of the reflected light, based on different body sizes, hairstyles and clothing, posed a challenge, especially in the area of algorithm development. In order to make the planned system economically feasible for the usage in existing buildings, another focus of the project was to enable communication between the lighting fixtures without the need for additional installation work. The overall goal of the exploratory work was to demonstrate the potential for expanding the functions of the lighting infrastructure and thus to further advance the evolution of lighting from a mere light source to an active player in the building.

Methodical procedure

The methodological approach, followed an iterative development concept. Extensive measurements were carried out at the component and subsystem level at a very early stage of the project in order to identify problems as early as possible and to be able to take appropriate countermeasures. This included not only the characterization of the effects of changing light conditions on the Visible Light Sensing approach, but also changing environmental influences, such as different floor materials. These early measurement results and the knowledge gained from them, also formed the basis for the concept development and realization of the laboratory samples created, both in terms of the components used and in the area of algorithm development. The concept development as well as the final realization of the Powerline communication of the laboratory samples also followed this iterative approach, starting with the extensive survey of the available relevant components, followed by the characterization of single components or subsystems, and finally the integration into the laboratory samples. Finally, the manufactured laboratory samples were tested, optimized and evaluated in extensive measurement trials in different testbed environments as close to reality as possible with regard to the achievable results.

Results and conclusions

During the extensive measurement tests in different testbed environments, the reliable and robust implementation of occupancy detection using Visible Light Sensing was demonstrated. In particular, the achieved independence from environmental influences (e.g.: sunlight) and the large variation of the parameters of the persons (size, hair, clothing) represents a significant added value, especially with regard to further activities.

An important aspect was the integration of the photosensitive elements into an existing off-the-shelf luminaire with standard dimensions, which underlines the resulting advantage of easy installation and the possibility of a retrofit solution. Furthermore, with the realized Powerline communication, the intended interface was successfully implemented, which in turn underlines the approach of enabling a low complex solution.

Especially the compact design and the implemented algorithm approach proved the future-oriented innovative approach and demonstrated the feasibility in technical as well as economic terms.

Outlook

The successful demonstration of Visible Light Sensing based occupancy detection, integrated into the lighting infrastructure, is the basis for further developments or transformation of this approach into area-wide applications. Especially the low installation effort, as well as the preservation of the privacy of the persons represent a significant advantage compared to other technologies and methods in this field.

3 Ausgangslage

3.1. Ausgangssituation, Motivation für das Projekt

Gebäude verantworten in Europa und weltweit einen erheblichen Anteil des Primärenergieeinsatzes. Dem deutschen Umweltbundesamt zufolge betrug der Endenergiebedarf für Raumwärme in Deutschland rund 32 % des gesamten Endenergiebedarfs [1]. Im Sinne dieser Problemstellung fordert die EU Richtlinie 2018 die Reduzierung des gebäudebezogenen Energieverbrauchs. Besonders die Implementierung von Belegungserkennungssystemen die mit zentralen Gebäudesteuerungssystemen interagieren, kann hier einen wesentlichen Beitrag leisten. Das damit realisierbare Einsparungspotential kann Studien zufolge mit bis zu 40 % beziffert werden. Ein wesentlicher Aspekt mit verhinderndem Charakter in der Implementierung von Belegungserkennungssystemen stellt jedoch die oftmals damit einhergehenden hohen Aufwendungen hinsichtlich der Installation, besonders in Bestandsgebäuden, dar. In den derzeit gebräuchlichsten Ansätzen, abhängig von der zugrundeliegenden Technologie und Methode, müssen zumeist neue zusätzliche Sensoren in das Gebäude eingebracht werden. Grundsätzlich können die Ausprägungsformen von Belegungserkennungssystem in zwei Hauptkategorien unterschieden werden, nämlich ob das System auf bestehender Infrastruktur aufsetzt oder ob neue Sensorik oder Geräte in das Gebäude eingebracht werden müssen. So wird zum Beispiel in [2] ein auf bestehender WiFi Infrastruktur basierendes System gezeigt, dass anhand der verbundenen Geräte (z.B. Smartphones) auf die Belegung eines Gebäudes Rückschlüsse zulässt und darauf aufbauend bedarfsgerechte Steuerung ermöglicht. Dieses Beispiel zeigt eindrücklich wie bestehende Infrastruktur für die Realisierung der Belegungserkennung eingesetzt werden kann. Der klar ableitbare Vorteil eines solchen Ansatzes ist, dass nahezu kein Installationsaufwand entsteht und somit kostengünstig umsetzbar ist. Der Ansatz der Wiederverwendung der WiFi Infrastruktur besitzt jedoch auch zwei sehr signifikante Nachteile. Erstens werden streng genommen nicht Personen erkannt, sondern nur die drahtlos verbundenen Geräte, d.h. Personen ohne aktives Gerät werden nicht erkannt. Zweitens ergibt sich der Nachteil, dass jeweils ein WiFi Access Point zumeist größere Areale abdeckt, wobei dadurch eine direkte Zuordnung der Belegung zu Bereichen im Gebäude nicht immer möglich ist. Die zweite Hauptkategorie bezieht sich auf Systeme für die neue Sensorik in das Gebäude eingebracht werden muss, wie z. B.: Kamerasysteme [3]. Obwohl diese Systeme in der Lage sind, detaillierte Belegungsdaten zu liefern, muss auch hier auf gravierende Nachteile hingewiesen werden, nämlich einerseits ein relativer hoher Installationsaufwand sowie, besonders hinsichtlich kamerabasierte Systeme, auf Bedenken hinsichtlich der Privatsphäre der Personen im Gebäude. Zusammenfassend kann somit gefolgert werden, dass einerseits unbestrittenermaßen die Bereitstellung von Belegungsinformationen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden eingesetzt werden kann, aber andererseits die Notwendigkeit besteht, diese Belegungsinformation mit kostengünstigen und unbedenklichen Technologien hinsichtlich der Privatsphäre zu generieren. Eine detailliertere Diskussion bestehender Ansätze wird in Kapitel 3.4. ausgeführt.

Aufbauend auf diesem Spannungsfeld, wurde im vorliegenden Sondierungsprojekt die vorhandene Beleuchtungsinfrastruktur als Basis eines Belegungserkennungssystems in den Fokus gerückt. Der wohl größte Vorteil besteht darin, dass das Beleuchtungssystem alle Bereiche des Gebäudes nahtlos abdeckt, wobei in Büro- oder Institutionsgebäuden klare behördliche Vorschriften, die die Platzierung

und die erforderlichen Beleuchtungsstärken innerhalb des Gebäudes vorschreiben, bestehen. Die dem avisierten System zugrundeliegende Technologie basiert auf der Erkennung von Personen durch die Messung der Intensität des reflektierten Lichts von der Person selbst mit Hilfe photosensitiver Elemente, wie z.B. Photodioden, bekannt unter dem Synonym Visible Light Sensing (VLS). In einer generellen Beschreibung kann VLS auch als eine Methode zur Ableitung von Informationen aus sichtbarem Licht, das von einem lichtempfindlichen Gerät erfasst wird, beschrieben werden. In [4] oder [5] werden erfolgreiche Anwendungen beispielsweise in der Überwachung von Anlagen oder der Gestensteuerung gezeigt.

Die Motivation dieses Projekts ist die Weiterentwicklung der Beleuchtungsinfrastruktur weg von der reinen Lichtquelle hin zur Plattform für die Realisierung unterschiedlicher Anwendungen. Durch die Demonstration der Belegungserkennung auf Basis des VLS soll das Potential aufgezeigt werden, welches dieser Ansatz insbesondere hinsichtlich Installationsaufwand und Sicherung der Privatsphäre bietet.

3.2. Forschungsfragen

Zur Realisierung eines robusten und zuverlässigen Belegungsinformationssystems auf Basis des VLS stellen sich mehrere Forschungsfragen, wobei sich diese sowohl in technische Machbarkeiten sowie wirtschaftliche Machbarkeiten unterscheiden lassen.

Auf technischer Seite standen drei wesentliche Forschungsfragen im Vordergrund. Aufgrund der Tatsache das die Erkennung von Personen durch die Messung der Intensität des reflektierten Lichts von der Person selbst, basiert, stellt die erwartbare große Variation der Reflektionen aufgrund unterschiedlicher Körpergrößen, Haaren sowie Bekleidung eine Herausforderung dar. Damit verknüpft ergab sich die Forschungsfrage ob ein genereller Ansatz gefunden werden kann der unabhängig von der Person bzw. dessen Größe, Bekleidung, Haare etc. eine zuverlässige Detektion und Auswertung ermöglicht.

Die zweite technische Forschungsfrage bestand darin, wie das System auf sich verändernde Lichtverhältnisse, zum Beispiel natürliches Sonnenlicht oder zusätzliche künstliche Beleuchtung, abgestimmt werden kann. Damit einhergehend muss auch die Betrachtung der Umgebung, wie zum Beispiel, Bodenmaterialien oder Möbelstücke, mitbetrachtet werden.

Die dritte technische Forschungsfrage bestand darin eine auf Powerline Kommunikation basierende Möglichkeit der Datenübermittlung vom avisierten Beleuchtungskörper zu einem übergeordneten System zu realisieren, wobei insbesondere die notwendige Datenrate im Vordergrund stand.

Auf wirtschaftlicher Seite wiederum standen die Integrationsmöglichkeiten in die bestehende Beleuchtungsinfrastruktur bzw. die Ermöglichung von Retrofit Ansätzen im Fokus, da nur mittels einfacher Nachrüstbarkeit hohe Installationskosten vermieden werden können und der Lösungsansatz auch wirtschaftlich realisierbar ist.

Zusammenfassend waren und sind die einzelnen Forschungsfragen eng miteinander verbunden, denn erst ein technisch ausgereiftes generell anwendbares System, das in unterschiedlichen Umgebungen und Szenarien zuverlässig eingesetzt werden kann, erlaubt die Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte. Im Gegensatz dazu muss die Lösung auch in wirtschaftlicher Hinsicht

insofern ausgereift sein, dass vor Allem in Konkurrenz zu bestehenden Systemen gewisse Vorteile erkennbar werden.

3.3. Zielsetzung des Projekts

Vorrangiges Projektziel war die Überprüfung der wirtschaftlichen und technischen Sinnhaftigkeit und die Umsetzbarkeit eines Ansatzes zur Generierung von Belegungsinformationen mittels in den Beleuchtungskörper integrierter photosensitiver Elemente, aufbauend auf der Technologie des Visible Light Sensing, zu demonstrieren. Analog zu den formulierten Forschungsfragen ergaben sich folgende zu erreichende Teilziele:

- Zuverlässige Erkennung unabhängig von Größe, Bekleidung, Haare etc. der Person
- Einsetzbarkeit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungen
- Ableitung der Gehgeschwindigkeit der Personen
- Möglichkeiten zur Kommunikation ohne zusätzlichen Installationsaufwand
- Integrationsmöglichkeiten bzw. Ermöglichung von Retrofit Ansätzen
- Bewertung der Machbarkeit des Ansatzes sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht
- Erstellung einer Bewertungsmatrix auf Basis der technischen und wirtschaftlichen Bewertung, um eine Stop/Go-Entscheidung für weitergehende Folgeprojekte abzuleiten

3.4. Stand des Wissens

Gebäude sind einer der größten Energieverbraucher weltweit und deshalb stellt das Ziel Gebäude energieeffizienter zu machen, eines der Schlüsselemente dar in dem Streben nachhaltige Entwicklungen zu fördern. Neben dem Nutzen erneuerbarer Energiequellen ist es unumgänglich auch am gezielt den Energieverbrauch in Gebäuden zu reduzieren, wobei jedoch weiterhin die Behaglichkeit der Personen im Gebäude weiterhin gewährleistet werden soll. In diesem Streben nach Reduktion des Energieverbrauchs besonders hinsichtlich des Betriebs von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage sind die bedarfsgerechte Steuerung dieser Systeme in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus gerückt. Einer der Schlüsselemente stellt dabei die Einbeziehung von Belegungsinformation dar, die das Potential haben zwischen 10% und 40% Energieeinsparung zu erzielen [6]. Diese Einsparungspotentiale sind dabei nicht nur auf die angeführten von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage beschränkt, sondern können auch entsprechend hinsichtlich von Beleuchtungsanlagen [7,8] realisiert werden, unter der Voraussetzung das die von einem etwaigen Belegungserkennungssystem bereitgestellten Informationen entsprechend berücksichtigt werden. Im Zuge dieser Entwicklungen werden heutzutage Belegungserkennungssysteme bereits in der Planungsphase von neu zu errichtenden Gebäuden mitgeplant und realisiert, wodurch die Installationskosten in den Hintergrund treten. Im Kontrast dazu ist jedoch die Realisierung solcher Belegungssysteme in Bestandsgebäuden mit einem nicht unerheblichen infrastrukturellen Aufwand assoziiert und steht so einem in Konflikt mit wirtschaftlichen Überlegungen. Außerdem sind einige der etablierten Technologien, allen voran kamerabasierte Systeme, mit Bedenken bezüglich der Privatsphäre behaftet und sind daher für die Belegungserkennung umstritten. Aufgrund der Tatsache das in Europa rund 75 Prozent der Gebäude 30 Jahre oder älter sind [9] ergibt sich die Notwendigkeit Belegungserkennungssysteme auch hinsichtlich ihrem Installationsaufwand zu hinterfragen bzw.

neue ressourcenschonende Ausprägungsformen zu entwickeln. Derzeit gängige Anwesenheits- und Belegungserkennungssysteme können sowohl aufgrund ihrer zugrundeliegenden Technologie als auch Methode in unterschiedliche Kategorien unterteilen, wie zum Beispiel in aktive Systeme, passive Systeme oder Umgebungssensoren, wobei sich diese Kategorisierung auf die zugrundeliegenden Hardwareaspekte stützt. Eine weitere Möglichkeit der Unterscheidung besteht in der Bewertung ob die zugrundeliegende Infrastruktur als bereits vorhanden angesehen werden kann oder neu in das Gebäude einzubringen ist, speziell hinsichtlich von Bestandsgebäuden. So können zum Beispiel WiFi basierte Systeme, aufgrund der großen Verbreitung von verfügbaren WiFi Netzen, auch in Bestandsgebäuden als System die auf bestehende Infrastruktur aufsetzen angesehen werden.

Hinsichtlich von WiFi basierten Belegungserkennungssystemen können zwei grundsätzliche Ansätze unterschieden werden. Einerseits sogenannte aktive Ansätze [2,10] bei denen entweder nach aktiven Geräten, wie z. B. Smartphones, gescannt wird um die Anzahl der Personen in der Nähe des WiFi-Zugangspunkts abzuleiten oder das System ermittelt die Empfangssignalstärke verschiedener Geräte, um daraus den Standort und die Anzahl der verbundenen Wi-Fi-Geräte abzuleiten. Wenn diese Informationen im Netzwerk der Access Points geteilt werden, ist eine umfassende Kartierung und Verfolgung dieser Geräte möglich. All diese Technologien funktionieren jedoch nur unter der Voraussetzung, dass jede Person ein solches Gerät bei sich trägt, da das System sonst ein Belegungsereignis nicht korrekt erkennen kann. Solche Ansätze können in einer bereits bestehenden Wi-Fi-Infrastruktur implementiert werden und reduzieren somit den infrastrukturellen Aufwand, jedoch ergeben sich in Bezug auf die Lokalisierungsgenauigkeit des Benutzers und die Abdeckung bestimmter Bereiche einige Nachteile. Da sich WiFi Signale durch Wände ausbreiten, ist die Bestimmung, ob sich ein von einem Zugangspunkt erkanntes Gerät in einem bestimmten Raum oder z. B. in einem nahegelegenen Flur befindet, nicht möglich. Darüber hinaus ist der Abdeckungsbereich von WiFi Systemen in der Regel so ausgelegt, dass bestimmte Bereiche wie Büros oder andere Bereiche, in denen sich die Benutzer typischerweise aufhalten, abgedeckt werden. Zum Beispiel werden Flure oder Treppenhäuser üblicherweise nicht als abgedeckte Bereiche betrachtet. Ein anderer Ansatz der die Wi-Fi-Infrastruktur nutzt sind andererseits Systeme messen die die durch Menschen verursachte Distorsion in den übertragenen Signalen zwischen zwei WiFi Zugangspunkten auswertet. Basierend darauf das Personen, die sich in oder in unmittelbarer Nähe der Verbindung zwischen zwei oder mehreren Access Points bewegen, verursachen messbare Störungen des ausgesendeten Signals im Hochfrequenzspektrum. In [11] wird ein derartiges System gezeigt, dass Person sowie deren Aktivität detektiert kann. Dieser Ansatz überwindet die Einschränkung, dass jede Person ein aktives Gerät tragen muss, und nutzt dennoch die vorhandene Infrastruktur, wobei die Nachteile hinsichtlich der Frage der Platzierung der WiFi Zugangspunkte bestehen bleibt.

Ein naheliegender Ansatz zur Determinierung der Belegung eines Gebäudes unter Zuhilfenahme bestehender Infrastruktur stellen Smart-Meter basierte Ansätze dar. Diese Systeme stellen einen Zusammenhang zwischen der Interaktion von Personen und dem Energieverbrauch des Gebäudes her, um darauf basierend dessen Belegung zu ermitteln. [12] zeigt anhand unterschiedlicher Algorithmen, dass bestimmte Merkmale des Stromverbrauchs zur Belegungserkennung verwendet werden können. In [13] wird ein Lösungsansatz gezeigt in dem unterschiedliche Geräte aufgrund ihres Stromverbrauchs in verschiedenen Zuständen modelliert wurden, um davon menschliche Aktivitäten aus dem Zustand der Geräte abzuleiten. Dieser Ansatz ist jedoch nicht anwendbar wenn die Personen kein elektrisches Gerät benutzen, dass mit einem Smart Meter verbunden ist und kann

somit nur eine grobe Abschätzung der Belegung in größeren Bereichen oder im gesamten Gebäude liefern.

Ebenfalls der Kategorie auf bestehender Infrastruktur aufsetzender Systeme ist der Ansatz CO₂ Sensoren zur Abschätzung der Belegung einzusetzen, da diese Sensoren, wenn noch nicht bereits vorhanden sehr einfach in bestehende Lüftungsanlagen eingebracht werden können. Grundlegend basieren diese Systeme darauf dass jeder Mensch beim Atmen CO₂ emittiert und durch die Überwachung von Änderungen der detektierten Konzentration auf eine Belegung zurückgeschlossen werden kann [14,15]. Da die von einem Menschen emittierte CO₂-Konzentration stark vom individuellen Zustand der Person und ihrer Aktivität abhängt, variieren jedoch die zugehörigen Raten sehr stark [16], wodurch sich teilweise Reaktionszeiten von bis zu 20 Minuten ergeben [17]. Weitere Faktoren die die Reaktionszeit stark beeinflussen sind die Luftmenge des zu überwachenden Bereichs oder anderweitiger Luftaustausch, z.B. das Öffnen eines Fensters, sowie Wetterbedingungen und Luftfeuchtigkeit. Deshalb kann auch hinsichtlich dieser Systeme festgehalten werden, dass eine grobe Abschätzung der Belegung möglich ist, jedoch mit teilweise langen Reaktionszeiten und Toleranzen.

Belegungserkennungsansätze die auf der Methode des Visible Light Sensing aufsetzen, müssen eindeutig zwischen verschiedenen Ausprägungen unterschieden werden. So wird zum Beispiel in [18] ein System gezeigt in dem photosensitive Elemente im Rahmen einer Tür platziert werden und aus den empfangenen Signalen 3D-Formen rekonstruiert werden können, wie zum Beispiel, wenn eine Person den Türrahmen durchquert. Offensichtlich kann die dazu notwendige Infrastruktur nicht als gegeben angesehen werden, weshalb an dieser Stelle nicht näher auf derartige Ausprägungen eingegangen wird. Visible Light Sensing basierte Systeme, bei denen Sender und Empfänger gemeinsam an einem Ort platziert sind, z. B.: in einem Beleuchtungskörper an der Decke, können hingegen als auf bestehende Infrastruktur (Beleuchtung) aufsetzende Systeme gefolgert werden, da zwar zumeist ein Austausch oder Adaptierung des Beleuchtungskörpers notwendig ist, jedoch die Grundinfrastruktur nicht verändert werden muss. In [19] wird solch ein Ansatz der Anwesenheitserkennung auf der Grundlage der Auswertung von Reflektionen des sichtbaren Lichts beschrieben. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Anwesenheitserkennung von Menschen erreicht werden kann durch Erfassung der Änderungen in den empfangenen Lichtintensitäten an einer Photodiode. Außerdem wurden umfangreiche Experimente durchgeführt, in denen der Einfluss unterschiedlicher Kleidung, Gehgeschwindigkeit und Platzierungen von Lichtquellen und Empfängern zu zeigen. Diese Arbeit zeigt, dass eine Person, die durch einen Korridor schreitet mit 100% korrekten Ergebnissen erkannt werden kann. Im Vergleich zu in diesem Projekt avisierten System werden jedoch die Einflüsse von Umgebungslichts oder mehrere Personen nicht untersucht. Darüber hinaus wird nicht der Ansatz verfolgt auch die Bewegungsrichtung der Personen abzuleiten, wobei insbesondere die Bestimmung der Bewegungsrichtung einen wesentlichen Parameter, zur Determinierung der Belegung darstellt. [20] stellt ein System vor, bei dem die Belegung eines Raums mittels 16 Beleuchtungskörper erweitert um Sensorfunktionen, in einem Raum von 5 m x 6 m abgeleitet werden kann. In dieser Arbeit dienen die LED basierten Beleuchtungskörper sowohl als Lichtquellen (Sender) als auch als Empfänger. Durch kooperative Auswertung dieser 16 Beleuchtungskörper wird eine korrekte Belegungserkennung von 90 % beschrieben. Im Gegensatz zum in diesem Projekt verfolgten Ansatz basierte dieses System auf der Erkennung von unbewegten Personen in einem Raum, sowie zum Beispiel die Einflüsse von Umgebungslichts ebenfalls nicht näher untersucht werden.

Wie eingangs beschrieben basieren derzeit gebräuchliche Belegungserkennungssysteme auf einer Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Technologien, wobei in vielen Fällen die dazu notwendige Sensorik, sowie Verkabelung größtenteils neu in ein Gebäude einzubringen sind. Dies umfasst unter anderem Systeme die auf Passiv-Infrarot-Sensoren [21], Ultraschallsensoren [22], Kontaktschaltern [23] oder Kameras [24] basieren. Unabhängig von der zugrundeliegenden eingesetzten Technologie ist mit derartigen Systemen eine hohe Genauigkeit der Belegungserkennung erreichbar, jedoch mit dem Nachteil das derartige Systeme nicht als Standardinfrastruktur in einem Gebäude angesehen werden können im Vergleich zur Beleuchtung.

Zusammenfassend zeigt die Vielzahl an unterschiedlichen Ansätzen die Aktualität des Themas der Belegungserkennung auf, wobei es erhebliche Unterschiede in der erreichbaren Auflösung der Belegungserkennung, der Komplexität sowie des erwartbaren Installationsaufwands gibt. Mit dem in diesem Projekt umgesetzten Ansatz kann eine Alternative aufgezeigt werden, die Belegungsinformation mit kostengünstigen und unbedenklichen Technologien hinsichtlich der Privatsphäre realisierbar macht.

4 Projektinhalt

4.1. Methodik

Das Projekt Vilipa folgte in seinem Ablauf einem stark iterativen Entwicklungskonzept aufgeteilt in mehrere Phasen. Der Fokus in der ersten Phase war die detaillierte Erarbeitung möglicher Konzepte zur Realisierung des avisierten Systems, sowie die frühe experimentelle Charakterisierung möglicher Komponenten und Herangehensweisen. Diese datengetriebene erste Entwicklungsstufe war ein entscheidender Vorteil hinsichtlich des Projektablaufs, da bereits sehr früh die technischen Problemstellungen und Anforderungen identifiziert werden konnten.

Zu Beginn dieser experimentellen Charakterisierung wurden umfangreiche Messversuche durchgeführt. Der verwendete Testaufbau bzw. Sensorknoten bestand dabei aus einer LED als Lichtquelle und einer Photodiode als Empfänger. Diese Anordnung wurde in einem Laborraum mit einer Höhe von 2,85 m an der Decke installiert und sogenannte „Pass-by“ Experimente durchgeführt. „Pass-by“ bedeutet, dass sich eine Testperson unter der Anordnung in „normaler“ Gehgeschwindigkeit hindurchbewegt. Während dieses Vorgangs wurden die Ausgabewerte der Photodiode kontinuierlich aufgezeichnet und manuell ausgewertet. Im Zuge dieser Messversuche wurden unterschiedliche Szenarien abgebildet, d.h. es wurden die Versuch mit und ohne eingeschalteter zusätzlicher Raumbelichtung ausgeführt, sowie auch mit kleineren Teilstücken an unterschiedlichen Bodenbelägen. Ziel dieser ersten Charakterisierungen war es, die grundlegenden Parameter der zu erfassenden Reflektionen von Personen zu ermitteln. Insgesamt wurden diese Testreihen von 8 unterschiedlichen Personen durchgeführt, die sowohl in Körpergröße, Kopfbehaarung und Kleidung stark variierten. Abbildung 1 zeigt den Messaufbau bei Beibehaltung des „hellen“ vorhandenen Laborbodens, Abbildung 2 den Aufbau mit einem „dunklen Bodenbelag“.

Abbildung 1: „Pass-by“ Messaufbau mit „hellem“ Bodenbelag



Abbildung 2: „Pass-by“ Messaufbau mit „dunklem“ Bodenbelag



Wie ausgeführt, wurden mit Hilfe dieses Aufbaus die grundlegenden Eigenschaften und Anforderungen zur Detektion einer Person mittels reflektiertem Licht bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungen (Bodenmaterial) ermittelt. Diese umfangreichen Untersuchungen zeigten, dass wie erwartet die aufgezeichneten Ausgabewerte je nach Szenario und Testpersonen teilweise massiv voneinander abweichen. Exemplarisch dafür werden in Abbildung 3 und Abbildung 4 die Ausgabewerte derselben Testperson bei identen Umgebungszuständen gezeigt, wobei der einzige Unterschied zwischen Abbildung 3 und Abbildung 4 nur darin besteht, dass die Testperson die Oberbekleidung von hell auf dunkel wechselte.

Abbildung 3: Testperson mit heller Oberbekleidung

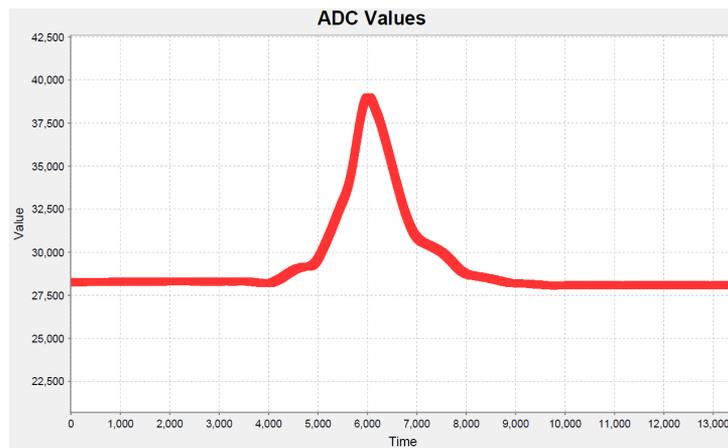
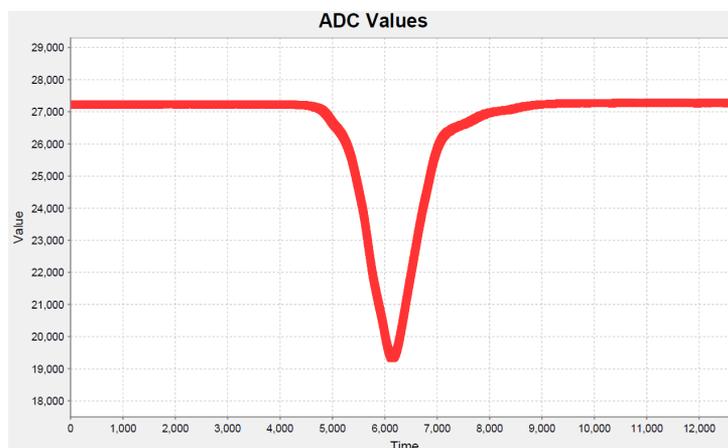


Abbildung 4: Testperson mit dunkler Oberbekleidung



Dieser Vergleich zeigt eindrücklich eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Detektion von Personen mittels reflektiertem sichtbarem Licht. In Abbildung 3 ist anhand der gemessenen Kurve gut ablesbar, wie die Person während der Bewegung unter der Photodiode mehr Licht als die Umgebung und hier vorrangig der Boden reflektiert. Dies wiederum verursacht im Vergleich zur Abwesenheit der Person am Beginn und am Ende des Signalverlaufs in Abbildung 3 höhere Ausgabewerte an der Photodiode. Abbildung 4 zeigt die aufgezeichneten Werte der identen Testperson jedoch mit „dunkler“ Oberbekleidung. Anhand dieses Kurvenverlaufs ist abzulesen, dass in diesem Fall die Person nicht mehr Licht reflektiert, sondern es im Grunde zur Abschattung der Reflektionen der Umgebung kommt, weshalb hier im Vergleich zur Abwesenheit der Person am Beginn des

Signalverlaufs geringere Messwerte aufgezeichnet wurden. Wichtig ist hier nochmals festzuhalten, dass im Vergleich zwischen Abbildung 3 und Abbildung 4 nur die Oberbekleidung der Testperson geändert wurde.

Diese Auswertungen wurden unter verschiedenen Lichtverhältnissen, Umgebungszuständen (Bodenmaterial) und von mehreren Testpersonen ausgeführt. In Anbetracht des Projektziels, einen generellen Ansatz zur Detektion von Personen und in weiterer Folge die Belegungserkennung unabhängig von den ambienten Lichtverhältnissen und Umgebungen zu realisieren, konnten basierend auf diesen ersten Testreihen folgende wichtige Anforderungen an den zu implementierenden Algorithmus herausgearbeitet werden:

- Erkennen der Person sowohl auf Basis von Reflektion als auch anhand von Verschattungseffekten
- Notwendigkeit der Einbeziehung der zeitlichen Änderungen in den Signalverläufen
- Unterscheidung zwischen der Präsenz und Absenz einer Person
- Vermeidung der Einbeziehung absoluter Werte

Im nächsten Schritt wurde der Messaufbau dahingehend erweitert, dass insgesamt drei der vorher beschriebenen Sensorknoten, bestehend aus einer LED und einer Photodiode, in einem Abstand von jeweils 50 cm installiert und die „Pass-by“ Experimente wiederholt wurden. Ziel dieses Messaufbaus war es, experimentell zu untersuchen, welcher Abstand zwischen den einzelnen Empfängern (Photodioden in den Sensorknoten) notwendig ist, um separierbare Kurvenverläufe an den jeweiligen Photodioden zu erhalten. Diese Separierbarkeit ist die wesentliche Grundvoraussetzung zur Ableitung der Bewegungsrichtung der Person, da durch eine Bestimmung der Sequenz der auftretenden Kurvenverläufe z.B. von Photodiode 1 zu Photodiode 3 oder vice versa die Bewegungsrichtung bestimmt werden kann. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die aufgezeichneten Spannungsverläufe an den jeweiligen Photodioden (farblich unterscheidbar) eines „Pass-by“ Experiments, wobei sich die Testperson zuerst von Photodiode 1 zu Photodiode 3 bewegte (3 Peaks um den Zeitpunkt $t = 0$ s) und danach in die umgekehrte Richtung (3 Peaks um den Zeitpunkt $t = 3$ s).

Abbildung 5: Spannungsverläufe an den drei Photodioden in Abstand von jeweils 50 cm bei „Pass-by“ einer Testperson

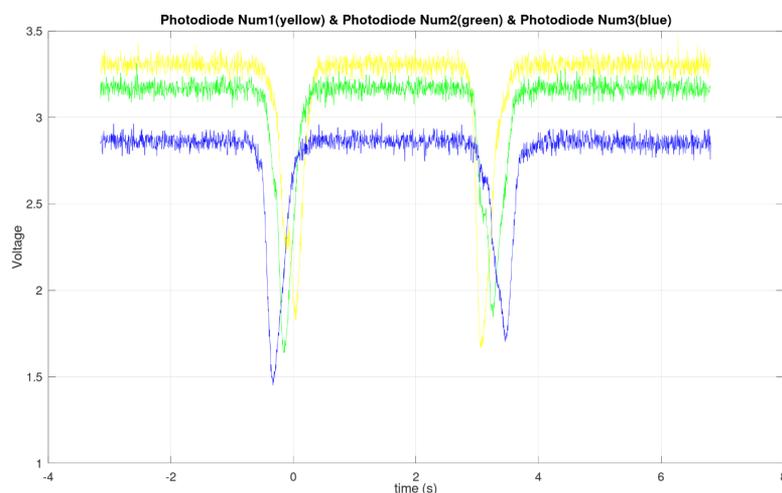
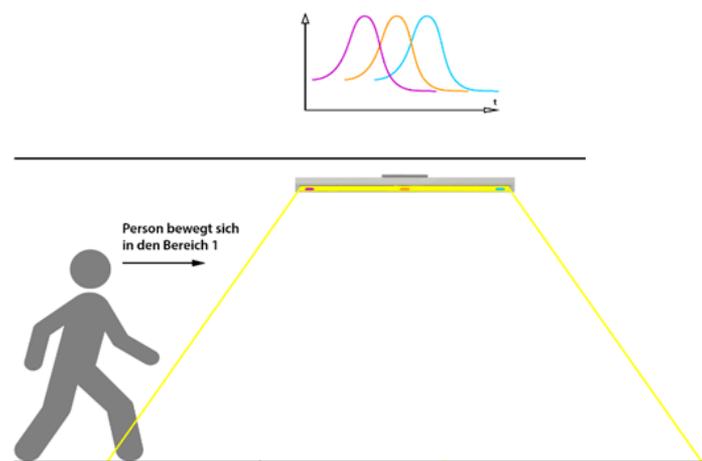


Abbildung 5 zeigt, dass die Kurvenverläufe eindeutig separierbar sind, insbesondere auch hinsichtlich der Scheitelwerte, wodurch sich die Möglichkeit ergibt, durch simple Bestimmung der Abfolge der Scheitelwerte die Bewegungsrichtung zu ermitteln.

Aufbauend auf diesen experimentell ermittelten Erkenntnissen wurde nachfolgend das Konzept der Labormuster entwickelt. Aufgrund der Tatsache, dass bereits ein Abstand von 50 cm zwischen den Empfängern zur Bestimmung der Bewegungsrichtung ausreicht, wurde das Labormuster dahingehend konzipiert, dass die drei Empfänger in einen kommerziell verfügbaren Beleuchtungskörper mit den „Standard“-Maßen von 120 cm Länge und 28 cm Breite integriert werden. Dieses Konzept ist in Abbildung 6 im Überblick graphisch dargestellt.

Abbildung 6: Graphische Darstellung des Konzepts zur Belegungserkennung mittels in den Beleuchtungskörper integrierter Empfänger



Der wesentlichste Vorteil dieses Konzepts ist, dass jeder Beleuchtungskörper eigenständig die Präsenz, die Bewegungsrichtung, die Gehgeschwindigkeit und davon abgeleitet die Belegung eines Bereichs ermitteln kann. Wie in Abbildung 6 dargestellt, wird die Belegung durch simples „Mitzählen“ wie viele Personen den Bereich betreten haben und wieder verlassen realisiert. Aufgrund der Tatsache, dass jeder Beleuchtungskörper eigenständig arbeitet ergibt sich der weitere Vorteil, dass nur ein sehr geringer Datenaustausch von dem Beleuchtungskörper zu einem übergeordneten System notwendig ist. Dies impliziert sowohl in wirtschaftlicher als auch in technischer Sicht einen Vorteil, da low-cost Ansätze im Bereich der Kommunikation dadurch ermöglicht werden.

Parallel zu den bisher beschriebenen Tätigkeiten folgte auch die Entwicklung der avisierten Powerline Kommunikation dem beschriebenen iterativen Ansatz. Beginnend mit einem umfangreichen Literaturupdate bezüglich eingesetzter Methoden und verfügbarer Komponenten in diesem Bereich wurde eine Vorauswahl getroffen und ein Konzept hinsichtlich des zu realisierenden Datenformats entworfen. Im nächsten Schritt der Realisierung wurden die ausgewählten Komponenten auf Basis eines MAX2990 des Herstellers Analog Devices im Labor in Betrieb genommen und experimentell charakterisiert. Diese experimentelle Charakterisierung zeigte, dass der notwendige Datendurchsatz erreicht werden kann und somit diese Komponente zur Kommunikation des Labormusters einsetzbar ist. Hinsichtlich des zu realisierenden Datenformats bzw. Netzwerkprotokolls ergab sich wie bereits beschrieben der Vorteil, dass die Verarbeitung der Daten im Beleuchtungskörper selbst durchgeführt

wird und im Endeffekt nur das Ergebnis des Algorithmus übertragen werden muss. Abbildung 7 zeigt das entworfene Protokoll mit den Startwörtern und den „Nutzdaten“.

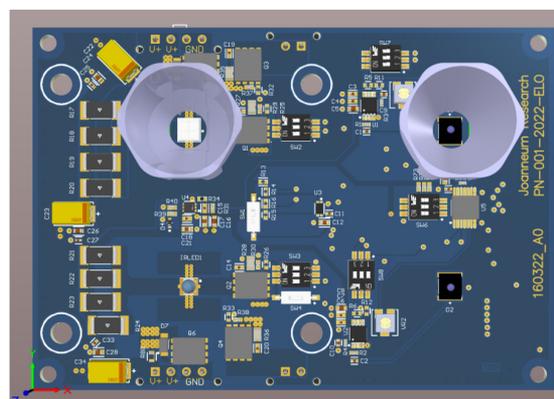
Abbildung 7: Netzwerkprotokoll zur Kommunikation des Beleuchtungskörpers

DATA 1 (Begin of Magic)	DATA 2	DATA 3	DATA 4	DATA 5	DATA 6	DATA 7	DATA 8 (End of Magic)
((= 0x28)	@ (= 0x40)	int Low-Byte	int High-Byte	L (=0x4C) R (=0x52)	S (=0x53) F (=0x46)	# (=0x23)) (=0x29)
Opening Bracket	start telegram	Integer Person counter in Area		Direction L = left to right R = Right to left	Speed S = Slow F = Fast	stop telegram	Closing bracket
8 Byte	8 Byte	16 Byte		8 Byte	8 Byte	8 Byte	8 Byte

Entsprechend der üblichen Herangehensweise beinhaltet das Protokoll sowohl ein „Magic“ Start und Endwort mit jeweils 8 Byte, einerseits zur Detektion des Beginns und des Endes der Übertragung eines Datenpakets sowie andererseits zur Fehlererkennung. Die im Datenpaket enthaltenen Nutzdaten sind die ermittelte Belegung im Bereich des Beleuchtungskörpers (siehe Abbildung 7, DATA 3 und DATA 4), sowie die Bewegungsrichtung der letzten erkannten Person (DATA 5) und deren festgestellte Geschwindigkeit unterteilt in zwei Kategorien (DATA 6 – Slow entspricht „normalem“ Gehen und Fast entspricht Laufen). Insgesamt sind für das gesamte Datenpaket nur 64 Byte notwendig.

Die nächsten Schritte des Entwicklungsprozesses waren das Design und die Fertigung der Sensorknoten zur Integration in das Labormuster, sowie die Algorithmusentwicklung. Das mittels Altium Designer erstellte Schaltungsdesign des Sensorknotens erfolgte dabei mit besonderem Augenmerk auf einen modularen Aufbau sowie mögliche Adaptierungen. Der entwickelte Sensorknoten besteht aus einer designten und schlussendlich gefertigten Leiterplatte (PCB), die als Hauptkomponente eine Photodiode vom Typ TEMD5510FX01 des Herstellers Vishay besitzt, sowie eine LED vom Typ LMZ7-QW50 des Herstellers Lumileds. Neben diesen Hauptkomponenten wurden der notwendige Transimpedanzverstärker (TIA) sowie andere periphere Komponenten und Schaltungen wie z.B. die Strom- und Spannungsversorgung integriert. Als Verarbeitungseinheit wurde ein NUCLEO-WB55RG Mikrocontroller ausgewählt. Abbildung 7 zeigt eine 3D Darstellung des entwickelten Sensorknotens.

Abbildung 8: 3D Ansicht des entwickelten Sensorknotens



Wie bereits angeführt, wurden zur hardwareseitigen Fertigstellung der Labormuster drei solcher Sensorknoten in einen kommerziell verfügbaren Beleuchtungskörper integriert. Dabei wurden die Ausgänge der TIA Stufen mit einem ebenfalls in das Labormuster integrierten Mikrocontroller (Nucleo) verbunden. Die Platzierung wurde entsprechend dem in Abbildung 6 gezeigten Konzept so

gewählt, dass 2 der Sensorplatinen an den Stirnseiten platziert sind und die dritte in der Mitte des Beleuchtungskörpers. Abbildung 9 zeigt eines dieser entsprechend fertiggestellten Labormuster.

Abbildung 9: Fertiggestelltes Labormuster

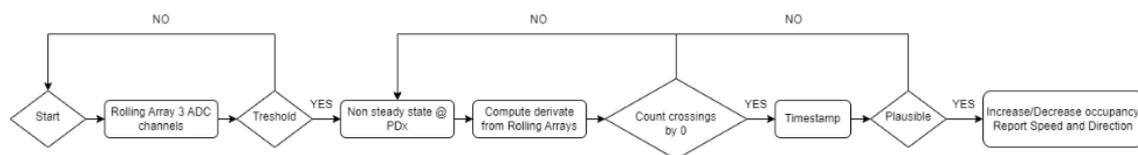


Entsprechend den herausgearbeiteten Anforderungen an den Algorithmus zur Präsenzdetection einer Person, der Determinierung der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit und davon abgeleitet die Bestimmung der Belegung eines Bereichs wurde der nachfolgend beschriebene Algorithmus konzipiert und implementiert.

Der implementierte Algorithmus zur Belegungserkennung wird auf dem Mikrocontroller des Labormusters ausgeführt und stützt sich im Wesentlichen auf folgenden Ablauf. Durch kontinuierliche Akquisition der Ausgabewerte der drei Photodioden wird ein gleitender Mittelwert je Photodiode gebildet. Dabei wird immer der jeweilige zeitlich vorangegangene Mittelwert abgespeichert. Mittels der Berechnung des Verhältnisses des aktuell berechneten Mittelwerts zum vorherigen Mittelwert wird eine Schwellwert-basierte Präsenzdetection durchgeführt, wobei der dabei angewendete Schwellwert mit 1 % gewählt wurde. D.h. sobald sich die Ausgabewerte der Photodioden um mehr als 1 % verändern, wird dies als Präsenz einer Person detektiert. Dieser auf einem relativen Wert basierende Schwellwert, erfüllt dabei die Anforderung, dass sowohl auf Basis von Reflektion als auch anhand von Verschattungseffekten die Präsenz einer Person detektiert wird, als auch implizit die Vermeidung der Einbeziehung absoluter Werte. Damit kann bereits gefolgert werden, dass die Belegungserkennung auch bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungen eingesetzt werden kann, da zum Beispiel stärkeres ambientes Licht zwar eine Änderung der Absolutwerte verursacht, jedoch der Schwellwert erst durch Präsenz einer Person überschritten wird. Einzige Ausnahme dazu sind sehr schnelle Änderungen der ambienten Lichtverhältnisse wie zum Beispiel das An- bzw. Ausschalten zusätzlicher künstlicher Beleuchtung. Dieser Sonderfall wurde im Algorithmus berücksichtigt und wird nachfolgend in diesem Abschnitt beschrieben. Nach erfolgreicher Präsenzdetection einer Person an einer der Photodioden werden die weiteren Schritte des Algorithmus ausgeführt. Dies ist zunächst die Spitzenwertdetektion auf Basis der Errechnung der ersten Ableitung der aufgezeichneten Werte, welche an den Extremstellen verschwindet (Wert 0). Wird ein solcher Nulldurchgang detektiert, wird der entsprechende Zeitpunkt mit der dazugehörigen Nummer der Photodiode abgespeichert. Durch simple Auswertung der Abfolge der abgespeicherten lokalen Extremwerte (Maxima/Minima) kann schlussendlich die Bewegungsrichtung bestimmt werden. Zusätzlich wird durch zeitliche Auswertung der Präsenz in Kombination mit der bekannten Länge des Beleuchtungskörpers die Geschwindigkeit der Person approximiert. Wie bereits ausgeführt, wird schlussendlich durch einfaches Zählen der Personen, die einen Bereich betreten (Bewegungsrichtung) und verlassen haben, die Belegung ermittelt.

Änderungen des ambienten Lichts können in zwei Kategorien unterschieden werden, in kontinuierliche, langsame Veränderungen und in abrupte Lichtveränderungen. Langsame Veränderungen ergeben sich größtenteils durch natürliches Sonnenlicht, das sich zumeist langsam und kontinuierlich verändert, zum Beispiel aufgrund des Sonnenstands. Abrupte Änderungen ergeben sich, wenn zum Beispiel künstliche Lichtquellen in der Nähe des Labormusters ein- oder ausgeschaltet werden. Während langsame, kontinuierliche Änderungen implizit mittels der gleitenden Mittelwertberechnung kompensiert werden, wurde zur Kompensation des Sonderfalls von abrupten Änderungen eine Plausibilitätsüberprüfung in den Algorithmus integriert, in dem überprüft wird, ob es zu einer zeitgleichen Lichtveränderung an allen 3 Photodioden gekommen ist. Wird nun eine zeitgleiche Lichtveränderung festgestellt, schließt der Algorithmus selbständig, dass diese Veränderung nicht von einer Person stammen kann und verwirft diese Daten. Abbildung 10 fasst den Algorithmus im Überblick in graphischer Form zusammen.

Abbildung 10: Graphische Darstellung des implementierten Algorithmus



Nach Fertigstellung der Labormuster mit der integrierten Powerline Kommunikation wurden umfangreiche Experimente in unterschiedlichen Szenarien ausgeführt zur Validierung des implementierten Algorithmus sowie zur realen Demonstration der Einsetzbarkeit des Lösungsansatzes zur Visible Light basierte Belegungserkennung. Die Resultate dieser Experimente werden in Kapitel 5 beschrieben.

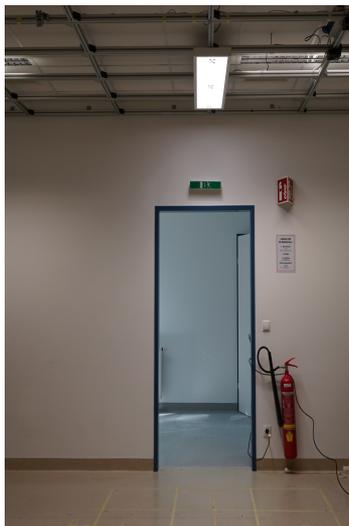
Während der Projektlaufzeit war die Forschung Burgenland, Abteilung Gebäudetechnik, mit ihrer umfangreichen Expertise im Bereich der Gebäudetechnik in beratender Funktion eingebunden. Im Rahmen von zwei Workshops, erster Workshop zu Beginn des Projekts und zweiter Workshop gegen Ende des Projekts, wurden die entworfenen Konzepte mit der Expertensicht von der Gebäudeseite beleuchtet und die schlussendlich erreichten Ergebnisse diskutiert. Eines der Projektziele war es, auf Basis des realisierten Lösungsansatzes sowie der Auswertung der erzielten experimentellen Ergebnisse eine SWOT Analyse hinsichtlich der Vor- und Nachteile sowohl von technischer als auch wirtschaftlicher Sicht durchzuführen. Die erstellte SWOT Matrizen werden ebenfalls in Kapitel 5 beschrieben.

Zusammenfassend kann berichtet werden, dass der verfolgte iterative Entwicklungszyklus mit einem starken Fokus auf den frühzeitig durchgeführten experimentellen Charakterisierungen wesentlich zur Erreichung der Projektziele beigetragen hat. Auf Basis dieser ersten Charakterisierungen konnten nicht nur die Anforderungen an den zu entwerfenden Algorithmus herausgearbeitet werden, sondern auch die Komponentenauswahl und das Realisierungskonzept der Labormuster datengetrieben durchgeführt werden.

5 Ergebnisse

Zur Validierung der technischen Machbarkeit und der avisierten Demonstration in unterschiedlichen Szenarien wurde mit Hilfe der erstellten Labormuster mit dem implementierten Algorithmus reale Versuche an drei unterschiedlichen Orten durchgeführt. Dabei standen in jedem der drei nachfolgend gezeigten Messaufbauten jeweils andere Aspekte im Fokus. Besonders hervorzuheben ist, dass der Algorithmus (Software) der Labormuster in allen durgeführten Szenarien ident eingesetzt wurde, d.h., dass keine Software Adaptierungen oder Kalibrationen für die drei einzelnen Anwendungsbereiche durchgeführt werden mussten. Dies unterstreicht die erfolgreiche Realisierung der Belegungserkennung auch bei veränderten Licht- und Umgebungsverhältnissen mit geringem Installationsaufwand und bei gleichzeitig uneingeschränkter Beleuchtung. Abbildung 11 zeigt den ersten Messaufbau, in welchem das Labormuster an der Decke des Eingangsbereiches eines Raums montiert wurde und der nachfolgend als „Raum“-Szenario bezeichnet wird.

Abbildung 11: Szenario „Raum“



Dieses „Raum“-Szenario, wurde so aufgebaut, dass es die Bestimmung der Belegung abbildet, wenn Personen einen Raum betreten, siehe Abbildung 11. Im ersten Testfall betrat eine Person (männlich, 180 cm Größe, schwarze lockige Haare), nachfolgend als TP1 bezeichnet, den Raum indem sie sich in einer geraden Linie direkt mittig unter der Leuchte bewegt und diesen danach wieder verlässt. Folglich sollte die Belegung des Raums zunächst 0 sein, sich dann auf 1 erhöhen, wenn TP1 unter dem Labormuster hindurchgegangen ist, und nach dem Verlassen des Raumes wieder auf 0 zurückgehen. Diese Abfolge wird im Folgenden als ein Durchlauf bezeichnet. Die Belegungserkennung wurde konsequenterweise nur dann als korrekt bewertet, wenn die Belegung während des gesamten Durchlaufs korrekt ermittelt wurde. Im ersten Testfall wurden von TP1 insgesamt 40 solcher Durchläufe in Abwesenheit des anderweitig vorhandenen Raumlichts, d.h. bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung durchgeführt. Des Weiteren wurden die Jalousien des Labors geschlossen, um Sonnenlicht zu blockieren, woraus folgt, dass das Labormuster die einzige aktive Lichtquelle war. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass bei allen 40 Durchgängen die Belegung, die Richtung und die Gehgeschwindigkeit korrekt ermittelt wurden. In Bezug auf die Gehgeschwindigkeit

ist zu beachten, dass diese von langsamen Gehen bis zum Laufen variiert wurde und die Bewertung auf einer subjektiven Einschätzung beruhte, ob die ermittelte Geschwindigkeit mit der ausgeführten Handlung übereinstimmt.

In einem zweiten Testfall wiederholte die gleiche Testperson die gleichen 40 Durchläufe bei eingeschaltetem Raumlicht (Leuchtstoffröhren). Um zu verdeutlichen, wie sich dies auf die Beleuchtungssituation auswirkt, wurden die Lux-Werte mit einem Handspektrometer an den gleichen Stellen mit und ohne Umgebungslicht gemessen. Zum Beispiel unter der linken, türseitigen Ecke des Labormusters ändert sich die gemessene Beleuchtungsstärke auf dem Boden von 511,2 Lux ohne das Umgebungslicht auf 997,2 Lux mit eingeschalteter Raumbelichtung. Obwohl, wie anhand dieser gemessenen Werte gezeigt, sich die Lichtverhältnisse gravierend verändert hatten, konnte auch bei diesen 40 durchgeführten Durchgängen wiederum die Belegung, die Richtung und die Gehgeschwindigkeit zu 100 % korrekt bestimmt werden. Dies bestätigt die korrekte Erkennung der Belegung unabhängig von den allgemeinen Lichtverhältnissen der Umgebung, was eines der Hauptziele im Projekt darstellt. Um die Robustheit des Algorithmus weiter zu untersuchen, wurden weitere Testfälle durchgeführt, bei denen sich die Testperson nicht zentriert unter dem Labormuster bewegt. In diesen Experimenten bewegte sich die Testperson TP1 sowohl um 40 cm versetzt nach links von der zentralen Linie als auch um 40 cm nach rechts versetzt unter dem Labormuster mit jeweils 20 Durchläufen, wobei die Raumbelichtung eingeschaltet war. Die diesbezüglichen Ergebnisse zeigen wieder eine zu 100 % korrekte Belegungs-Erkennung, auch wenn sich die Testperson nicht mittig unter dem Labormuster bewegt.

Zur experimentellen Verifizierung der Anwendbarkeit der Lösung in Bezug auf das Ziel, unabhängig von den Personen in Bezug auf Haare, Kleidung und Größe korrekte Ergebnisse zu generieren, wurde eine zweite Testperson hinzugezogen (männlich, 175 cm groß, kahlköpfig), die im Folgenden als TP2 bezeichnet wird. In diesen Testfällen betraten und verließen die beiden Probanden den Raum nacheinander und im Abstand von ca. 1 Meter. Dabei wurden die ersten 20 Durchläufe ohne Umgebungslicht und anschließend 20 Durchläufe bei vorhandener Raumbelichtung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass in 17 der 20 Durchläufe bzw. in 18 der 20 Durchläufe die Belegung, die Richtung und die Gehgeschwindigkeit korrekt bestimmt wurden. Die genauere Untersuchung der fehlerhaften Läufe zeigte, dass zwar die Bewegungsrichtung richtig, die Belegung aber um eine Person falsch bestimmt wurde. Das bedeutet, dass anstelle von 2 Personen, die den Raum betraten und verließen, nur 1 Person gezählt wurde. Diese Fehlzählung wurde dadurch verursacht, dass die 2 Testpersonen näher hintereinandergingen als im angestrebten Abstand von 1 m. Dennoch zeigen die Ergebnisse insgesamt eine zufriedenstellende Belegungsermittlung sowohl für die beiden unterschiedlichen Testpersonen als auch für Situationen mit und ohne Raumbelichtung.

Für das zweite Szenario wurde ein Labormuster in einem Korridor montiert, dieses Szenario wird nachfolgend als „Korridor“ bezeichnet. Abbildung 12 zeigt diesen Aufbau, wobei hier nochmals darauf hingewiesen werden soll, dass im Vergleich zum vorangegangenen Szenario weder die Hardware noch der Algorithmus des Labormusters verändert wurden.

Abbildung 12: Szenario „Korridor“



In diesem zweiten Szenario wurden die Testfälle des Szenarios „Raum“ wiederholt mit demselben Ablauf und durchgeführt von denselben Testpersonen TP1 und TP2. Der Fokus dieses Szenarios lag darauf, die Korrektheit der Belegungserkennung auch bei Vorhandensein von natürlichem Sonnenlicht und veränderten Umgebungen zu überprüfen (siehe Vergleich Abbildung 11 zu Abbildung 12). Die Auswertung der Resultate zeigte, dass die Ergebnisse nahezu identisch zu den Ergebnissen des Szenarios „Raum“ sind. Im Detail wurden die von TP1 allein durchgeführten Durchläufe zu 100 % korrekt erkannt sowie 19 korrekt bestimmte Belegungen von 20 Durchläufen mit TP1 und TP2 erhalten. Anhand dieser Ergebnisse konnte verifiziert werden, dass der realisierte Lösungsansatz wie geplant unabhängig von den Lichtverhältnissen sowie der Umgebung die Belegung korrekt bestimmt.

Im dritten Testszenario, nachfolgend mit „Labor“ bezeichnet, stand schlussendlich die Belegungserkennung von größeren Personengruppen (5 Personen) im Fokus. Abbildung 13 zeigt das entsprechende Szenario.

Abbildung 133: Szenario „Labor“



Die Versuche in diesem Szenario wurden so ausgeführt, dass sich die 5 Personen unter dem Labormuster in einer möglichst natürlichen Weise, d.h. weder exakt in Reihe noch hintereinander bewegten. In einem Versuchsdurchlauf bewegten sich die 5 Personen z.B. von der linken Seite des Labormusters nach rechts und danach wieder zurück. In der Beurteilung der Ergebnisse eines einzelnen Durchlaufs wurde dieser wieder nur dann als korrekt bewertet, wenn sowohl im ersten Schritt 5 Personen im Bereich erkannt wurden, als auch im zweiten Schritt die Personenzahl mit 0 angegeben wurde. Insgesamt wurden 10 solcher Durchläufe durchgeführt. Die Auswertung zeigte, dass die Belegung in allen 10 Durchläufen korrekt erkannt wurde.

Zusammenfassend konnte anhand der erzielten Ergebnisse in den Szenarien „Raum“, „Korridor“ und „Labor“ der Lösungsansatz anhand realer Ergebnisse validiert werden und somit die Zielsetzung der Demonstration der technischen Machbarkeit eines Belegungserkennungssystems durch die Verwendung der Visible Light Sensing Technologie erreicht werden. Im Zuge der umfangreichen Experimente wurden auch problematische Abläufe identifiziert. Dies betrifft Fälle, wenn sich Personen sehr eng nebeneinander bewegen, d.h. nur wenige Zentimeter Abstand zwischen den Personen besteht. In solchen Fällen überlagern sich die Reflektionen der einzelnen Personen, wodurch anstatt zwei Personen nur eine einzelne Person erkannt wird. Eine Gegenmaßnahme, um diese Problematik zu lösen, stellte eine stärkere Fokussierung der Photodioden dar, wodurch auch in diesen problematischen Situationen die genaue Personenanzahl detektierbar sein sollte.

Ein weiteres wichtiges Resultat dieses Projekts war die durchgeführte SWOT Analyse sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht. Diese SWOT Analyse wurden wie bereits erwähnt im Rahmen eines Workshops erstellt und diskutiert. Die durchgeführte Analyse mit den wichtigsten erarbeiteten Punkten sowohl im technischen als auch im wirtschaftlichen Bereich wird nachfolgend überblicksmässig ausgeführt. Im technischen Bereich liegen die Stärken in der Robustheit bzw. der Zuverlässigkeit des entwickelten Algorithmus sowie dem realisierten low-cost/low-complex Ansatzes. Die identifizierten Schwächen sind einerseits das bei sehr starkem direkten Sonnenlicht die photosensitiven Elemente den Sättigungszustand erreichen und andererseits bei zu wenig vorhandenem Licht (z.B.: Beleuchtung aus und kein ambientes Licht) die empfangenen Signale zu gering sind um die Funktion auszuführen. Auf Seiten der technischen Chancen wurden die Fusion und Integration des Lösungsansatzes mit anderen Ansätzen (z.B.: Infrarot basiert) und die Überführung in andere Anwendungsbereiche (z.B.: Outdoor) festgehalten. Die größten herausgearbeiteten Risiken wiederum sind der Wettbewerb mit bereits etablierten Technologien und Systemen, sowie das Langzeitverhalten über Monate und Jahre hinsichtlich der notwendigen Wartung. Tabelle 1 fasst die ausgearbeiteten Punkte der technischen Aspekte überblicksmässig zusammen.

Tabelle 1: SWOT Matrix aus technischer Sicht

Stärken	Schwächen
Zuverlässiger und robuster Algorithmus low-cost/low-complex Ansatzes	Direktes Sonnenlicht (bzw. sehr starkes ambientes Licht) Zu geringes Licht (Licht aus + zu wenig ambientes Licht)

Chancen	Risiken
Fusion mit anderer Komponenten (z.B.: IR) Überführung in andere Anwendungsbereiche	Wettbewerb mit etablierten Technologien bzw. Weiterentwicklung anderer Technologien Langzeitverhalten (Monate, Jahre) – Kalibration, Wartung

Hinsichtlich der wirtschaftlichen SWOT Analyse wurden folgende Hauptpunkte erarbeitet. Die wohl größte Stärke des Lösungsansatzes ist der Umstand das durchgängig low-cost/low-complex Komponenten eingesetzt wurden. Auf Seite der Schwächen wurde die notwendige Integration der photosensitiven Elemente in den Beleuchtungskörper als zusätzlicher Schritt im Rahmen der Produktion festgehalten. Die wirtschaftlichen Chancen können mit dem sehr niedrigen Installationsaufwand und dem uneingeschränkten Erhalt der Beleuchtung zusammengefasst werden. Auch aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich die Risiken, ähnlich der technischen Risiken, nämlich das der gezeigte Lösungsansatz im Wettbewerb zu etablierten Technologien steht sowie das derzeit noch nicht abschätzbare Langzeitverhalten zum Beispiel notwendige Wartungsintervalle etc. Tabelle 2 fasst diese Einschätzung aus wirtschaftlicher Sicht nunmehr zusammen

Tabelle 2: SWOT Matrix aus wirtschaftlicher Sicht

Stärken	Schwächen
low-cost/low-complex Komponenten geringer Installationsaufwand	Integration in Beleuchtungskörper mit Aufwand verbunden
Chancen	Risiken
Installationsaufwand sehr gering Beleuchtung bleibt erhalten	Wettbewerb mit etablierten Technologien bzw. Weiterentwicklung anderer Technologien Langzeitverhalten (Monate, Jahre) – Kalibration, Wartung

5.1. Relevanz im Hinblick auf die Ausschreibung

Die Ergebnisse adressieren folgende Ausschreibungsschwerpunkte des Programms „Stadt der Zukunft“ in besonderer Weise:

Streben nach höchster Gebäudequalität bei Neubau und Sanierung: Das realisierte System zeigt, dass mittels der zugrundeliegenden Technologie des Visible Light Sensing gemeinsam mit der umgesetzten höchst ressourcenschonenden Kommunikationsschnittstelle die Lichtinfrastruktur adaptiert werden kann, um ein kostengünstiges, ressourcenschonendes Belegungserkennungssystem

zu generieren, welches insbesondere für Bestandsgebäude eine kostengünstige Alternative ohne großen Installationsaufwand bietet.

Innovative Technologien zur Energiebereitstellung, -verteilung, -umwandlung, -flexibilisierung und -speicherung sowie zur Verbrauchsoptimierung: Das realisierte System zeigt, dass eine zuverlässige Belegungserkennung mittels einer Adaptierung der Beleuchtungsinfrastruktur umsetzbar ist und darauf aufbauend in Kooperation mit der Gebäudeleittechnik optimale Regelstrategien zur flexiblen Steuerung des Energieverbrauchs realisierbar werden.

Intelligente Technologien der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik zur Verbesserung der Energiebilanz unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus: Der umgesetzte Lösungsansatz stellt eine Möglichkeit für eine kostengünstige Methode zur Verbesserung der Energiebilanz dar. Die eingesetzten Komponenten können auch als äußerst langlebig und robust bewertet werden. Insbesondere wird durch die Technologie des Visible Light Sensing ein Messverfahren umgesetzt, das besonders in Hinblick auf Datenschutz und Privatsphäre große Vorteile gegenüber anderen Technologien besitzt. Daher kann auch mit erhöhter Akzeptanz der Benutzer gerechnet werden.

Konzepte und Lösungen für Low Tech-/Minimal Tech-Ansätze zur innovativen Umsetzung energieeffizienter, ressourcenschonender Gebäude und Quartiere: Die in diesem Projekt aufgezeigte Lösung basiert durchgehend auf Low-Cost/Low-Complex Komponenten und einem Low-Complex Algorithmus und adressiert diesen Ausschreibungsschwerpunkt damit in besonders optimaler Weise.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Erkenntnisse

Im Rahmen dieses Projekts konnte das Projektteam seine Expertise in der Anwendung der Technologie des Visible Light Sensing umfangreich vertiefen. Besonders anhand der durchgeführten experimentellen Charakterisierung der verwendeten Komponenten, als auch der im Zuge dieser Tätigkeiten aufgezeichneten Daten und deren Auswertung konnte das fachliche Know-How weiter vertieft werden. Dabei stellte zu Beginn das Finden einer einheitlichen Vorgehensweise hinsichtlich der stark variierenden Reflektionen der Testpersonen, je nach Körpergröße, Kopfbehaarung und Kleidung eine große Herausforderung dar, die dennoch schlussendlich gemeistert werden konnte. Auch die direkte Einbeziehung unterschiedlicher Lichtverhältnisse wie zum Beispiel Sonnenlicht stellte in dieser Form eine neue Herangehensweise dar, die ebenfalls dazu beitrug das das Know-How zum Umgang bzw. der Kompensation dieser Effekte weiter vertieft werden konnte und insbesondere für weiterführende Entwicklungen im Bereich des Visible Light Sensing auch abseits der Anwendung der Belegungserkennung von großer Bedeutung sein wird. Schlussendlich war auch die erzielte Integration in einen bestehenden Beleuchtungskörper von einem großen Erkenntnisgewinn geprägt, da hier Fähigkeiten in der mechanischen Bearbeitung und Integration der Materialien gebildet werden konnten die üblicherweise nicht in die Kernkompetenz der Projektmitarbeiter fällt.

Auch im Themengebiet der Powerline Kommunikation konnte die vorhandene Expertise im Rahmen dieses Forschungsprojekts erheblich vertieft werden. Beginnend mit dem umfangreichen Literaturupdate und der Komponentenauswahl konnte ein umfassender Überblick zu diesem Thema erarbeitet werden. Die in weiterer Folge durchgeführte Inbetriebnahme und Implementierung des Kommunikationsprotokolls ermöglichte es anhand der praktischen Realisierung entsprechendes Know-How aufzubauen und zu vertiefen.

Die Einbeziehung der Forschung Burgenland, Abteilung Gebäudetechnik, mit beratenden Tätigkeiten während der Projektlaufzeit ermöglichte es dem Projektteam auch die Sichtweise der Experten in Sachen Gebäuden und Gebäudesteuerung einerseits zu verstehen und andererseits Herausforderungen und Lösungsansätze aus diesem Blickwinkel zu bewerten. Besonders die sehr kollegiale Zusammenarbeit und der gegenseitige Know-How Transfer wird ein wesentlicher Bestandteil für zukünftige Projekte sein, da es unabdingbar sein in Zukunft ein Gebäude mit einem gesamtheitlichen Ansatz zu betrachten und nicht mehr eingeschränkt auf einzelne Gewerke oder Infrastrukturen wie die Beleuchtung.

6.2. Weiterführende Tätigkeiten & Zielgruppen

Die Projektergebnisse wurden bei Besuchen oder auch in Online Meetings potentiellen Industriepartnern vorgestellt. Insbesondere bei Besuchen der JOANNEUM RESEARCH am Standort Pinkafeld als auch der Technischen Universität Graz war die direkte Demonstration anhand der erstellten Labormuster besonders eindrücklich. Die dabei „live“ demonstrierte Unabhängigkeit des realisierten Lösungsansatzes von den ambienten Lichtverhältnissen sowie von der Größe, Kleidung etc. der Personen rief ein besonders positives Feedback hervor und wurde einhellig als einer der

maßgeblichen Vorteile hinsichtlich der Transformation beschrieben, da anderweitig die generelle Anwendbarkeit nicht gegeben wäre. Besonders interessant in dieser Hinsicht waren auch die von den Partnern skizzierten möglichen Anwendungen abseits des Gebäudes, wie zum Beispiel die Adaptierung des Lösungsansatzes zur Anwendung im Outdoor Bereich. Auf Basis der gezeigten und demonstrierten Projektergebnisse konnten bereits mit mehreren Industriepartnern aufgeteilt in einem breiten Branchenmix weiterführende vielversprechende Projektanbahnungsgespräche geführt werden. Dieser Umstand zeigt das die Technologie des Visible Light Sensing als kostengünstiger und unbedenklicher Lösungsansatz für eine große Zielgruppe interessant ist. Dabei sind einerseits natürlich die Hersteller und Integratoren aus der Beleuchtungsindustrie zu nennen, denn gerade in diesem Industriezweig besteht ein großes Interesse daran, die Beleuchtung weiterzuentwickeln um nicht nur eine Lichtquelle zu sein, sondern eine Plattform zur Realisierung übergeordneter Funktionen wie zum Beispiel der in diesem Projekt realisierten Belegungserkennung. Andererseits ergeben sich auch aus Sicht der Gebäudetechnik und Gebäudebetreiber interessante Anknüpfungspunkte da wie bereits ausgeführt die Reduktion des Energieverbrauchs einen besonderen Stellenwert einnimmt. Der realisierte Ansatz der Belegungserkennung kann dabei zu einem wichtigen Baustein einer gesamtheitlichen Lösung werden. Ein wesentlicher Punkt, nämlich die Wahrung der Privatsphäre im Vergleich zu kamerabasierten Methoden traf dabei auf eine große positive Resonanz. Die weitere Betonung dieses Aspekts bei der gezeigten Lösung wird zukünftig vom Projektteam weiter vorangetrieben werden, da aus den vielfältig geführten Gesprächen ein besonderer Bedarf an solchen Lösungen artikuliert wurde.

6.3. Rechtliche Hürden

Aus derzeitiger Sicht können keine rechtlichen Hürden zur Implementierung eines Belegungserkennungssystems auf Basis des Visible Light Sensing ausgemacht werden. Insbesondere der Umstand das ein kommerziell verfügbarer Beleuchtungskörper als Basis des Labormusters verwendet wurde unterstreicht das auch hinsichtlich der rechtlichen Vorschriften und Normen im Beleuchtungsbereich keine rechtlichen Hürden zu erwarten sind.

7 Ausblick und Empfehlungen

Einer der Fokuspunkte der weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird die Untersuchung der in Kapitel 5 beschriebenen problematischen Situation sein, insbesondere, wenn Personen sich sehr nahe aneinander bewegen. Hierbei wird die Optimierung der Platzierung der photosensitiven Elemente weiter untersucht werden.

Die Fusion der Technologie des Visible Light Sensing mit anderen Sensoren und Herangehensweisen stellt einen weiteren wichtigen Punkt für zukünftige Entwicklungsarbeiten dar, da insbesondere damit auch weitere Funktionen realisierbar werden.

Mit der Vision das jeder Beleuchtungskörper in einem Gebäude auch Belegungsinformationen bereitstellen kann ergibt sich auch die Notwendigkeit die Steuerung der Gebäude hinsichtlich des bedarfsgerechten Einsatzes der Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage Systeme neu zu bewerten und neue potentiell noch energieeffizientere Steuerungsalgorithmen zu entwickeln.

Derzeit herrscht im Bereich der Gebäude bzw. Gebäudetechnik nach wie vor ein sehr starkes Denken in Gewerken bzw. Zuständigkeiten vor, d.h. die Beleuchtung wird unabhängig von der Klimakontrolle gesehen usw. Auch die vorhandenen Schnittstellen sowohl aus Hardware als auch Softwaresicht beschränken sich zumeist auf einige wenige Funktionen ohne die Möglichkeit das Gebäude durchgängig zu erfassen. Hier wird es einerseits zur Ermöglichung optimierter Abläufe dringend notwendig werden dieses Bereichsdenken aufzugeben und gezielt nach Synergien zu suchen, wie zum Beispiel der Integration der Belegungserkennung in die Beleuchtungsinfrastruktur. Andererseits müssen aber auch der Komfort des Benutzers im Gebäude in den Vordergrund gerückt werden, da nur eine Herangehensweise die den Komfort berücksichtigt wird im Endeffekt auch die nötige Benutzerakzeptanz erreichen und die damit verbundenen Vorteile ausspielen können. Aus diesem Spannungsfeld ist auch die Empfehlung abzuleiten hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen für den Benutzer problematische Rahmenbedingungen wie zum Beispiel dauerhafte kamerabasierte Überwachung kritisch zu hinterfragen.

Die Potentiale der in diesem Projekt gezeigten Machbarkeit der Belegungserkennung auf Basis des Visible Light Sensing sind enorm, da die Beleuchtung im gesamten Gebäude vorhanden bzw. vorgeschrieben ist und somit als ideale Plattform dienen kann. Einer der wichtigsten nächsten Schritte wird es sein diesen Ansatz in größerem Maßstab auszurollen und vor Allem hinsichtlich des Langzeitverhaltens zu untersuchen und darzustellen. Insgesamt ist davon auszugehen dass sich die Rolle der Beleuchtung in einem Gebäude in Zukunft wesentlich wandeln wird, da auch andere Technologien wie zum Beispiel die auf sichtbaren Licht basierte drahtlose Datenkommunikation (LiFi) immer mehr an Bedeutung gewinnen wird.

Zusammenfassend konnte mit der in diesem Projekt gezeigten Machbarkeit ein wesentlicher weiterer Schritt zur Realisierung in Sachen Energieverbrauch optimierter Gebäude gemacht werden, vor Allem auch hinsichtlich der Optimierung von Bestandsgebäuden.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: „Pass-by“ Messaufbau mit „hellem“ Bodenbelag	17
Abbildung 2: „Pass-by“ Messaufbau mit „dunklem“ Bodenbelag	17
Abbildung 3: Testperson mit heller Oberbekleidung	18
Abbildung 4: Testperson mit dunkler Oberbekleidung	18
Abbildung 5: Spannungsverläufe an den drei Photodioden in Abstand von jeweils 50 cm bei „Pass-by“ einer Testperson.....	19
Abbildung 6: Graphische Darstellung des Konzepts zur Belegungserkennung mittels in den Beleuchtungskörper integrierter Empfänger	20
Abbildung 7: Netzwerkprotokoll zur Kommunikation des Beleuchtungskörpers	21
Abbildung 8: 3D Ansicht des entwickelten Sensorknotens	21
Abbildung 9: Fertiggestelltes Labormuster	22
Abbildung 10: Graphische Darstellung des implementierten Algorithmus	23
Abbildung 11: Szenario „Raum“	24
Abbildung 12: Szenario „Korridor“	26
Abbildung 13: Szenario „Labor“	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SWOT Matrix aus technischer Sicht.....	27
Tabelle 2: SWOT Matrix aus wirtschaftlicher Sicht	28

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten> (abgerufen am 20. März 2023, 16:41)
- [2] Wang Wei, Xu Xiaodong, Wei His-Hsien, Ren Bin, Chen Jiayu: Modeling occupancy distribution in large building spaces for HVAC energy efficiency. Energy Procedia, vol. 152, pp. 1230-1235, 2018.
- [3] Hu Shushan, Wang Peng, Hoare Cathal, O'Donnell James: Building Occupancy Detection and Localization Using CCTV Camera and Deep Learning. IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 1, pp. 597-608, 2023.
- [4] Madane Kushal, Weiss Andreas Peter, Schantl Stefan, Leitgeb Erich: Machine Learning Assisted Visible Light Sensing of the Rotation of a Robotic Arm. IEEE Access, vol. 9, pp. 130721-130736, 2021.
- [5] Weiss Andreas Peter, Fragner Christian, Wenzl Franz Peter: A novel Approach for Human-System Interaction by Visible Light Sensing based Wrist Posture and Rotation Determination. 14th International Conference on Human System Interaction (HSI), pp. 1-6, Gdańsk Poland 2021.

- [6] Sun Kailai, Zhao Qianchuan, Zou Jianhong: A review of building occupancy measurement systems. *Energy and Buildings*, vol. 216, p. 109965, 2020.
- [7] De Bakker Christel, Aries Myriam, Kort Helianthe, Rosemann Alexander: Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review. *Building and Environment*, vol. 112, pp. 308-321, 2017.
- [8] Anand Prashant, Cheong David, Sekhar Chandra, Santamouris Mattheos, Kondepudi Sekhar: Energy saving estimation for plug and lighting load using occupancy analysis. *Renewable Energy*, vol. 143, pp. 1143-1161, 2019.
- [9] https://energy.ec.europa.eu/factsheets-country-eu-buildings-2016-pdfs_en (abgerufen am 20. März 2023, 16:43)
- [10] Chen Jiayu, Chen Hainan, Luo Xiaowei: Collecting building occupancy data of high resolution based on WiFi and BLE network. *Automation in Construction*, vol. 102, pp. 183-194, 2019.
- [11] Wang Yuxi, Wu Kaishun, Ni Lionel M.: WiFall: Device-Free Fall Detection by Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 581-594, 2017.
- [12] Razavi Rouzbeh, Gharipour Amin, Fleury Martin, Akpan Ikpe Justice: Occupancy detection of residential buildings using smart meter data: A large-scale study. *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 195-208, 2019.
- [13] Tang Guoming, Wu Kui, Lei Jingsheng, Xiao Weidong: The meter tells you are at home! Non-intrusive occupancy detection via load curve data. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 897-902, Miami, USA, 2015.
- [14] Zuraimi M. S., Pantazaras A., Chaturvedi K. A., Yang J. J., Tham K. W., Lee S. E.: Predicting occupancy counts using physical and statistical CO₂-based modeling methodologies. *Building and Environment*, vol. 123, pp. 517-528, 2017.
- [15] Jiang Chaoyang, Chen Zhenghua, Su Rong, Masood Mustafa Khalid, Soh Yeng Chai: Bayesian filtering for building occupancy estimation from carbon dioxide concentration. *Energy and Buildings*, vol. 206, p. 109566, 2020.
- [16] Jiang Chaoyang, Masood Mustafa Khalid, Soh Yeng Chai, Li Hua: Indoor occupancy estimation from carbon dioxide concentration. *Energy and Buildings*, vol. 131, pp. 132-141, 2016.
- [17] Brennan Colin, Taylor Graham W., Spachos Petros: Designing learned CO₂-based occupancy estimation in smart buildings. *IET Wireless Sensor Systems*, vol.8, no. 6, pp. 249-255, 2018.
- [18] Jarchlo Elnaz Alizadeh, Tang Xuan, Doroud Hossein, Gil Jimenez Victor P., Lin Bangjiang, Casari Paolo, Ghassemlooy Zabih: Li-Tect: 3-D Monitoring and Shape Detection Using Visible Light Sensors. *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 940-949, 2019.
- [19] Deprez Kenneth, Bastiaens Sander, Martens Luc, Joseph Wout, Plets David: Passive Visible Light Detection Of Humans. *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1902, 2020.
- [20] Yang Yanbing, Hao Jie, Luo Jun, Pan Sinno Jialin: CeilingSee: Device-free occupancy inference through lighting infrastructure based LED sensing. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 247-256, Kona USA 2017.
- [21] Lasla Nouredine, Doudou Messaoud, Djenouri Djamel, Ouadjaout Abdelraouf, Zizoua Cherif: Wireless energy efficient occupancy-monitoring system for smart buildings. *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 59, p. 101037, 2019.
- [22] Hammoud Abbass, Deriaz Michel, Konstantas Dimitri: UltraSense: A Self-Calibrating Ultrasound-Based Room Occupancy Sensing System. *Procedia Computer Science*, vol. 109, pp. 75-83, 2017.

- [23] Labeodan Timilehin, Zeiler Wim, Boxem Gert, Zhao Yang: Occupancy measurement in commercial office buildings for demand-driven control applications—A survey and detection system evaluation. *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 303-314, 2015.
- [24] Zou Jianhong, Zhao Qianchuan, Yang Wen, Wang Fulin: Occupancy detection in the office by analyzing surveillance videos and its application to building energy conservation. *Energy and Buildings*, vol. 152, pp. 385-398, 2017.

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
e.g.	example given
etc.	et cetera
LiFi	Light Fidelity
PCB	Printed circuit board
TIA	Transimpedanceamplifier
usw.	und so weiter
VLS	Visible Light Sensing
z.B.	zum Beispiel

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Im Projekt wurden digitale Messwerte von Sensoren bzw. Photodioden aufgezeichnet und in Form von Komma-separierten Dateien gesammelt, analysiert und ausgewertet. Zu Dokumentationszwecken wurden beschreibende Texte der durchgeführten Messversuche und sowie Abbildungen des Messaufbaus sowie teilweise während des Messaufbaus erstellt.

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die Daten bildeten die Grundlage für die Konzepterstellungen sowie der Ergebnisdokumentation sowie teilweise der Dissemination. Sämtliche Abbildungen die Personen zeigen wurden mit Einverständnis der jeweiligen Person angefertigt und mittels Bildbearbeitungssoftware anonymisiert, wobei grundsätzlich keine Verknüpfung mit persönlichen Daten hergestellt wurde und auch nicht abgespeichert.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Sämtliche Daten (Rohdaten, sowie angefertigte Dokumentationen etc.) wurden auf einem Server-Speicher abgespeichert, zu dem nur die beteiligten Projektpartner:innen Zugang hatten.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Sämtliche gesammelten Messwerte sowie Projektdokumentationen sind nicht öffentlich zugänglich und werden ausschließlich für eine Nutzung in gemeinsamen Publikationen vorgesehen.

Informationen für Ergebnisband (in deutscher Sprache)

ACHTUNG!

Die Ergebnisbände stellen abgeschlossene Projekte aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) vor und werden auf der Website <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/artikel/ergebnisbaende-stadt-der-zukunft.php> publiziert.

Kurzdarstellung des Projektes in den Ergebnisbänden von „Stadt der Zukunft“

Bitte um Ausfüllen folgender Informationen für die Aufnahme des Projekts in themenspezifische Ergebnisbände:

Visible light based Person and Group Detection in existing buildings - Vilipa

Synopsis: (Sprache: DEUTSCH, 250 bis 500 Zeichen inkl. Leerzeichen)

Zur Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden können Belegungserkennungssysteme einen großen Beitrag leisten. Dieses Projekt zeigt die Machbarkeit des Erkennens von Personen anhand der Reflexion von sichtbarem Licht, hervorgerufen durch die Person selbst, demonstriert, wobei die bestehende Beleuchtungsinfrastruktur zur Personenerkennung ohne Datenschutzbedenken eingesetzt werden kann. Der realisierte Ansatz ist sowohl kostengünstig als auch unaufwändig hinsichtlich der Installationskosten.

Projektbeschreibung:

Eines der Schlüsselemente zur Bekämpfung der Energie- und Klimakrise besteht darin den Betrieb von Gebäuden energieeffizienter zu gestalten, wofür technologische Innovationen in verschiedenen Bereichen notwendig sind. Zuverlässige Belegungsinformationen sind dabei ein wesentlicher Aspekt, für den bedarfsgerechten, energieeffizienten Betrieb von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage Systeme eines Gebäudes. Solche Systeme werden derzeit mit unterschiedlichen Technologien und Methoden eingesetzt, die jedoch in vielen Fällen einen umfangreichen Installationsaufwand verursachen.

Ausgehend von der Notwendigkeit zur Realisierung von Belegungsinformationssystemen mittels bestehender Infrastruktur, wurde in diesem Sondierungsprojekt die Erweiterung der Funktionen der Beleuchtungsinfrastruktur in den Fokus gerückt. Der verfolgte Ansatz zur Erkennung von Personen anhand der Reflexion von sichtbarem Licht, hervorgerufen durch die Person selbst, bekannt unter dem Synonym Visible Light Sensing, und der daraus abgeleiteten Belegungserkennung in Bereichen von Gebäuden stellt einen solchen innovativen Ansatz dar.

Projektziel war die Überprüfung Machbarkeit eines Ansatzes zur Generierung von Belegungsinformationen mittels in den Beleuchtungskörper integrierter photosensitiver Elemente, aufbauend auf der Technologie des Visible Light Sensings. Einer der Hauptaugenmerke lag dabei auf einer zuverlässigen Detektion von Personen, deren Bewegungsrichtung und Gehgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Umgebungszuständen. Um das geplante System auch von wirtschaftlicher Seite für den Einsatz in Bestandsgebäuden umsetzbar zu machen, bestand ein

weiterer Schwerpunkt des Projekts darin, die Kommunikation der Beleuchtungskörper zu ermöglichen, ohne der Notwendigkeit von zusätzlichem Installationsaufwand.

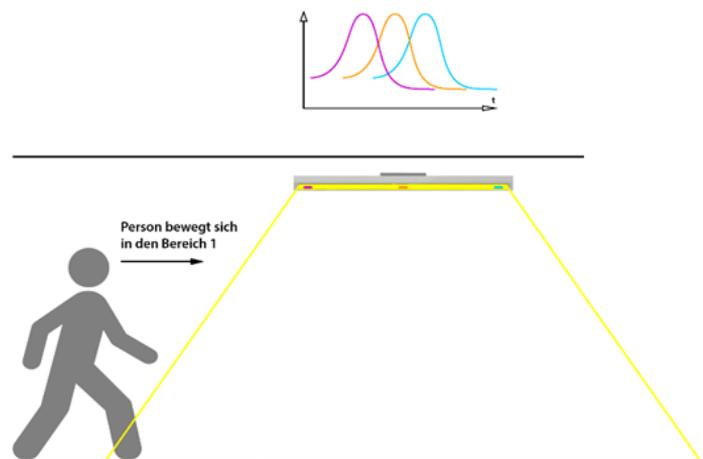
3 Keywords:

Belegungserkennung, Beleuchtung, Sensorik

Facts:

- Demonstration der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines Belegungserkennungssystems integriert in die Beleuchtungsinfrastruktur
- Zuverlässige Belegungserkennung unabhängig von der eingesetzten Umgebung und Testpersonen
- Durchgehender low-cost/low-complex Ansatz
- Minimaler Installationsaufwand auch hinsichtlich der Kommunikationsschnittstelle

Abbildungen:



Kontakt:

Projektleitung: DI Dr. Andreas Peter Weiss, JOANNEUM RESEARCH

Projektpartner:innen: Technische Universität Graz

