

Energieeffizientes Beleuchtungssystem für den Menschen durch innovative Komponentenoptimierung und Tageslichtintegration

LessIsMore

J. Weninger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

30/2023

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

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser 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/>

Energieeffizientes Beleuchtungssystem für den Menschen durch innovative Komponentenoptimierung und Tageslichtintegration

LessIsMore

Dipl. Ing. Johannes Weninger
Bartenbach GmbH

Aldrans, Februar 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

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

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	6
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	10
4	Projekthalt	12
4.1.	Evaluierung des aktuellen Standes	12
4.1.1.	Stand der Beleuchtungsindustrie	12
4.1.2.	Evaluierung technischer Komponenten	13
4.2.	Ausarbeitung der abgeleiteten Problemstellungen.....	14
4.2.1.	Entwicklung eines Leuchten-Funktionsmusters	14
4.2.2.	Entwicklung der integralen Steuerungslogik	15
4.3.	Energetische und wirkungsbezogene Evaluierung	17
4.3.1.	Evaluierung der Energieeffizienz	18
4.3.2.	Evaluierung der Lichtwirkungen	18
4.4.	Qualität der angewandten Methodik	20
5	Ergebnisse	21
5.1.	Erkenntnisse zum aktuellen Stand.....	21
5.1.1.	Potentiale integraler Beleuchtungssysteme.....	21
5.1.2.	Erkenntnisse zu technischen Komponenten	23
5.2.	Evaluierungsergebnisse	26
5.2.1.	Evaluierung der entwickelten Steuerungslogik	26
5.2.2.	Nicht-visuelle Wirkung von kurzzeitigen Lichtduschen	30
5.3.	Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms.....	32
6	Schlussfolgerungen	34
7	Ausblick und Empfehlungen	36
8	Verzeichnisse	38
9	Anhang	43
9.1.	Publikationszugriff	43
9.2.	Data Management Plan (DMP)	44
9.2.1.	Datendokumentation	44
9.2.2.	Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte	46
9.2.3.	Datenspeicherung und -erhalt.....	47
9.2.4.	Wiederverwendbarkeit der Daten.....	47

1 Kurzfassung

Auf den Gebäudesektor entfällt rund ein Drittel des weltweiten Energiebedarfs und damit auch ein entsprechend hoher Anteil an Treibhausgasemissionen. Da davon ein wesentlicher Beitrag dem Gewerk Kunstlicht mit Schwerpunkt auf gewerblichen Bauten zuzuschreiben ist und der Kunstlichteinsatz zudem mit den erforderlichen Kühllasten in Verbindung steht, erweist sich eine Effizienzsteigerung im Bereich der Beleuchtung als wesentlich für die Reduktion des weltweiten Energieverbrauchs.

Darüber hinaus besitzt Licht auch maßgeblichen Einfluss auf sowohl thermischen als auch visuellen Komfort und in modernen Lichtplanungen werden zudem häufig nicht-visuelle Effekte des Lichts angestrebt, welche kurzfristig zur verbesserten Konzentrationsfähigkeit und langfristig zu gesundheitlichen Aspekten wie der Stabilisierung des zirkadianen Rhythmus oder verbessertem Schlaf beitragen können.

In diesem Spannungsfeld erstellte Beleuchtungskonzepte sind jedoch nicht einfach zu definieren, da sich die Anforderungen der Einzelaspekte oftmals konträr zueinander darstellen. So gehen die zur Erbringung nicht-visueller Effekte erforderlichen Beleuchtungsstärken weit über die normativen Mindestvorgaben hinaus, können bei strikter Einhaltung auch zu negativem visuellem Komfort beitragen und weisen im Allgemeinen einen negativen Einfluss auf die energetische Bilanz des Gesamtsystems auf. Im Gegensatz dazu können jedoch langfristig gesundheitsförderliche Maßnahmen nicht erbracht werden, sollte sich das umgesetzte Konzept an den energetisch positiveren normativen Mindestvorgaben orientieren.

Mit der Vision zu einer nachhaltigeren und gesünderen Gesellschaft beitragen zu können, adressiert das Projekt LessIsMore diese Herausforderung mit dem Ziel der Entwicklung einer integralen Kunst- und Tageslichtsteuerung für energieeffiziente Human-centric Lighting-Beleuchtungslösungen. Die Entwicklung fokussierte dabei vorrangig auf die Reduktion bestehender Verluste, die aus einem unbedarften und ineffizienten Einsatz der einzelnen Beleuchtungskomponenten (Beleuchtungskonzept, LED-Treiber, Sensoren, Steuerung) resultieren bzw. auf eine vernachlässigte Integration von Tageslicht zurückzuführen sind.

Zur Erreichung dieses Ziels erfolgte die grundlegende Identifikation bestehender energetischer Potentiale mittels eines multimodalen Ansatzes, in welchem international bestehende Beleuchtungsplanungen evaluiert und grundlegende Systemkomponenten (Sensorik und Treiberbausteine) systematisch untersucht wurden. Aus den daraus resultierenden Erkenntnissen wurden anschließend Systemanforderungen abgeleitet, welche die Basis der weiterführenden, entwicklungsbezogenen Projektinhalte bildeten.

Da energetische und wirkbezogene Zielsetzungen grundsätzlich durch differente konfundierende Faktoren beeinflusst werden, erfolgten die anforderungsbezogenen Entwicklungen mit Hinblick auf applikationsrelevante Zielsetzungen in zwei unterschiedlichen Anwendungsfeldern. Einerseits wurden mittels zonierten Arbeitsplatzbeleuchtungssystemen nicht-visuelle Zielsetzungen derart adressiert, dass durch eine grundlegende Nutzernähe notwendige Beleuchtungsstärken äußerst energieeffizient umgesetzt werden konnten. Die diesbezüglichen Prototypen fokussierten dabei Personalisierungsstrategien und erforderten dementsprechend dezentralisierte

Steuerungskomponenten, welche direkt in den Beleuchtungen auf IKT-Basis integriert wurden. Andererseits wurde eine zentralisierte integrale Kunst- und Tageslichtsteuerungslogik entwickelt, welche im Bartenbach Living Lab implementiert wurde. Dies ermöglichte es in weiterer Folge, die energetische Effektivität der entwickelten Lösung unter realen Arbeitsbedingungen zu evaluieren. Dieser Ansatz erwies sich als unbedingt erforderlich, da die Effektivität von Beleuchtungssteuerungen im Allgemeinen maßgeblich von sowohl Nutzerindividualitäten (wie bspw. Arbeitsstruktur und Anwesenheiten am Arbeitsplatz) als auch der Variabilität von Umgebungsbedingungen (z.B. Wetterlage oder Tageslichtverfügbarkeit) beeinflusst wird.

Beide Entwicklungsansätze wurden abschließend im Rahmen einer strukturierten Laborstudie und longitudinalen Feldstudie evaluiert. Im Rahmen der Feldstudie erfolgte dabei ein umfangreiches Monitoring (mittels ca. 100 Sensoren) von gebäude- und personenbezogenen Kennwerten, welche eine anschließende Evaluierung der energetischen Performanz zu aktuell bestehenden Benchmark-Werten erlaubte. Die Laborstudie fokussierte dagegen mit einer Beteiligung von 58 Personen auf die systematische, wirkbezogene Evaluierung eines energetisch optimierten Steuerungsansatzes, bei welchem aktuelle Ansätze zur ganztägig erhöhten Lichtdosis durch kurzzeitige helle Lichtinterventionen ersetzt wurden. Aus Gründen von während der Studienphase bestehenden COVID-19 bezogenen Restriktionen, welche ein vermehrtes Auftreten von Home-Office Zeiten zur Folge hatten, konnte die ursprünglich angedachte Evaluierung der gesundheitlich-biologischen Lichtwirkung leider nicht umgesetzt werden.

In den durchgeführten Studien konnten sowohl die angestrebte energetische als auch wirkbezogene Effektivität der entwickelten Steuerungsansätze positiv evaluiert werden. Die Laborergebnisse bestätigten sowohl auf subjektiver (verringert empfundene Arbeitsbelastung und Müdigkeit) als auch objektiver Ebene (erhöhte Reaktionszeit) die nicht-visuelle Wirkung der kurzzeitigen Lichtinterventionen bei gleichbleibendem Ausbleiben von negativen Nebenwirkungen (asthenopische Beschwerden). Das Langzeitmonitoring des Bartenbach Living Labs konnte zudem auch die energetische positive Performanz der entwickelten integralen Steuerungslogik ausweisen, welche mit $4,74 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ im Vergleich zum Benchmark für energieeffiziente Beleuchtung ($10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) eine deutliche Wirkung aufzeigt. Ohne die entwickelte tageslichtabhängige Steuerung würde der berechnete Energiebedarf unter Berücksichtigung des erfassten Anwesenheitsprofils bei $16,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ liegen.

Die im Projekt LessIsMore erwarteten Ergebnisse konnten dementsprechend vollumfänglich erreicht werden. Dennoch erweisen sich reale Umsetzungen integraler Planungen nach wie vor als schwierig, da die Key Performance Indikatoren von Beleuchtungssystemen hochgradig von individuellen Nutzercharakteristiken abhängig sind, welche sich sogar in einigen Fällen über den eigentlichen Applikationsbereich hinaus erstrecken können. Die diesbezüglichen Zielkriterien erweisen sich deswegen heute aufgrund fehlenden Wissens als nach wie vor nicht eindeutig definierbar und wurden auch im vorliegenden Forschungsprojekt nicht adressiert. Als Ergebnis basieren aktuelle Beleuchtungsplanungen und -simulationen auf stark verallgemeinerten Annahmen zu Nutzerinformationen, welche die Adressierung energetischer Potentiale weiterhin beschränken.

Zukünftige Forschungsvorhaben, welche auf eine Entschlüsselung von Nutzercharakteristiken abzielen würden, könnten demnach einen erweiterten Beitrag zur Erzielung von umwelt- und klimapolitischen Zielen leisten.

2 Abstract

The building sector accounts for around one third of the world's energy requirements and thus also a correspondingly high proportion of greenhouse gas emissions. Since artificial lighting, with its focus on commercial buildings, accounts for a significant share of these emissions, and the use of artificial lighting is also linked to the necessary cooling loads, an increase in efficiency in the area of lighting is proving to be essential for reducing global energy consumption.

In addition, light also has a significant influence on both thermal and visual comfort, and in modern lighting designs, non-visual effects of light are frequently targeted, as they can contribute to improved concentration in the short term and to health aspects such as stabilization of the circadian rhythm or improved sleep in the long term.

However, lighting concepts created in this area of conflict are not easy to define, since the requirements of the individual aspects are often contrary to each other. For example, the illuminance levels required to provide non-visual effects go far beyond the normative minimum specifications, can also contribute to negative visual comfort if strictly adhered to, and generally have a negative impact on the energy balance of the overall system. In contrast, however, health-promoting measures cannot be provided in the long term should the implemented concept be based on the more positive normative minimum requirements in terms of energy.

With the vision of contributing to a more sustainable and healthier society, the LessIsMore project addresses this challenge with the goal of developing an integral artificial and daylighting control system for energy-efficient human-centric lighting solutions. The development focused primarily on the reduction of existing losses, which result from a careless and inefficient use of the individual lighting components (lighting concept, LED drivers, sensors, control) or are due to a neglected integration of daylight.

To achieve this goal, the fundamental identification of existing energetic potentials was carried out by means of a multimodal approach, in which internationally existing lighting designs were evaluated and basic system components (sensors and driver modules) were systematically investigated. The resulting findings were then used to derive system requirements, which formed the basis of the further development-related project content.

Since energetic and effect-related objectives are fundamentally influenced by different, conflicting factors, the requirements-related developments were carried out with regard to relevant objectives in two different fields of application. On the one hand, non-visual objectives were addressed by means of zoned workplace lighting systems in such a way that the necessary illuminance levels could be implemented in an extremely energy-efficient manner by means of a close user proximity. The relevant prototypes focused on personalization strategies and accordingly required decentralized control components that were directly integrated into the lighting systems on an ICT basis. On the other hand, a centralized integral artificial lighting and daylighting control logic was developed and implemented in the Bartenbach Living Lab. This subsequently made it possible to evaluate the energy effectiveness of the developed solution under real working conditions. This approach proved to be absolutely necessary, as the effectiveness of lighting controls is generally significantly influenced by

both user individualities (such as work structure and presence at the workplace) and the variability of environmental conditions (e.g. weather conditions or daylight availability).

Finally, both development approaches were evaluated within the framework of a structured laboratory study and a longitudinal field study. The field study involved extensive monitoring (by means of about 100 sensors) of building and personal parameters, which allowed a subsequent evaluation of the energy performance in relation to currently existing benchmark values. The laboratory study, on the other hand, with a participation of 58 persons, focused on the systematic, effect-related evaluation of an energetically optimized control approach, in which current approaches to all-day increased light dose were replaced by short-term bright light interventions. Due to COVID-19 related restrictions during the study phase, which resulted in an increased occurrence of home office days, the originally planned evaluation of the health-promoting biological light effect could unfortunately not be implemented.

In the studies conducted, both the intended energetic and effect-related effectiveness of the control approaches developed could be positively evaluated. The laboratory results confirmed both on a subjective level (reduced perceived workload and fatigue) and on an objective level (increased reaction time) the non-visual effect of the short-term light interventions with a constant absence of negative side effects (asthenopic complaints). The long-term monitoring of the Bartenbach Living Lab was also able to demonstrate the energetic positive performance of the developed integral control logic, which with 4.74 kWh/m²a shows a clear effect compared to the benchmark for energy-efficient lighting (10 kWh/m²a). Without the developed daylight-dependent control, the calculated energy demand would be 16.5 kWh/m²a, taking into account the recorded presence profiles.

Accordingly, the results expected in the LessIsMore project could be fully achieved. Nevertheless, real implementations of integral planning still prove to be difficult, since the key performance indicators of lighting systems are highly dependent on individual user characteristics, which in some cases may even extend beyond the actual application area. Therefore, the relevant target criteria are still not clearly definable due to a lack of knowledge and were not addressed in the present research project. As a result, current lighting designs and simulations are based on highly generalized assumptions about user information, which limit the addressing of energetic potentials.

Future research projects, which would aim at decoding user characteristics, could therefore make an extended contribution to achieving environmental and climate policy goals.

3 Ausgangslage

Auf den Gebäudesektor entfällt aktuell rund ein Drittel des weltweiten Energiebedarfs [1, 2], und damit auch ein entsprechend hoher Anteil an Treibhausgasemissionen [3]. Da davon ein wesentlicher Beitrag dem Gewerk Kunstlicht [4] mit Schwerpunkt auf gewerblichen Bauten [5] zuzuschreiben ist und der Kunstlichteinsatz zudem indirekt mit den erforderlichen Kühllasten [6] eines Gebäudes in Verbindung steht, erweisen sich Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Bereich der Beleuchtung als wesentlich für die Reduzierung des weltweiten Energieverbrauchs und der Erreichung internationaler umweltpolitischer Zielsetzungen.

Eine geeignete Maßnahme hierfür, stellt die effizientere Nutzung von Tageslicht dar. Studien zeigten in diesem Zusammenhang bereits die energetischen Vorteile von sowohl dynamisch gesteuerten Fassadensystemen [7], als auch integralen Tages- und Kunstlichtsteuerungen [8] auf. Der Fokus dieser Konzepte liegt hierbei darauf, das Kunstlicht derart zu steuern, dass nur mehr Beleuchtungsmengen bereitgestellt werden müssen, die zur Erreichung der normativen Mindestbeleuchtungsstärken notwendig sind. Theoretisch sind bei solchen tageslichtgekoppelten Kunstlichtsteuerungen im Vergleich zu unregulierten Kunstlichtsystemen in Abhängigkeit von Raumorientierung und Standort laut Studien energetische Einsparpotentiale von rund 30% zu erreichen [5, 9, 10, 11].

Zudem bieten gesteuerte Systeme weitere Vorteile. Manuelle Tageslichtverschattungssysteme bleiben häufig auch nach Entfall eines eigentlichen Störeinflusses (wie z.B. Blendung) geschlossen [12] und Kunstlicht oftmals unabhängig von Tageslicht oder Anwesenheit [13] eingeschaltet. Mittels Sensorik kann ein solches Systemverhalten deutlich reduziert werden. Studien [14, 15], zeigen in diesem Zusammenhang, dass bei Nutzung von Anwesenheitsinformation in automatischen Kunstlichtsteuerungen im Vergleich zu manuell gesteuerten Beleuchtungssystemen rund 30 bis 40 % der Energie eingespart werden könnten. Automatisierte Systeme helfen somit ein energetisch ungünstiges Nutzerverhalten zu vermeiden und stellen einen vielversprechenden Ansatz zur Erreichung von klimapolitischen Bestrebungen dar [5].

Um die vorangegangenen energetischen Einsparpotentiale bestmöglich abzurufen und gleichzeitig eine hohe Anwendbarkeit von Steuersystemen zu sichern, werden in der Gebäudetechnik heute vorwiegend automatisierte Logiken eingesetzt. Die Basis solcher Steuerlogiken stellen Führungsgrößen aus verallgemeinerten Parametern (wie z.B. normative Mindestbeleuchtungsstärke, allgemeingültige Nutzerkomfortkriterien oder generalisierte Nachlaufzeiten) dar. Da derartig allgemeine Rahmenparameter zwar im Mittel für alle Gebäude in einer definierten Applikation einen guten Näherungswert darstellen, häufig jedoch im Einzelfall nicht eine passende Abbildung der realen Anforderungen darstellen, wird den Gebäudenutzenden meist eine Option zur manuellen Übersteuerung der vordefinierten Logiken eingeräumt. Die Option zur manuellen Übersteuerung dient dazu eine höhere Akzeptanz für automatisierte Steuersysteme (oder genauer: für ein auftretendes Fehlverhalten der automatisierten Steuerungslogik) zu gewährleisten [16].

In diesem Kontext resultieren manuelle Eingriffe vorwiegend aus Maßnahmen zur unmittelbaren Befriedigung von Bedürfnissen, welche in der allgemeinen Steuerung aufgrund fehlender Informationen nicht abgebildet wurden. Dies betrifft z.B. individuelle Präferenzen für Beleuchtungsstärke oder Farbtemperatur, welche sich in Abhängigkeit von Alter oder der Art der

Tätigkeit stark zwischen den Gebäudenutzenden unterscheiden können [17, 18]. Diese auf individueller Ebene unzureichende Abbildung von NutzerInnen durch verallgemeinerte Nutzermodelle kann dabei zu Eingriffen in das Steuerungssystem führen, welche langfristig orientierten Strategien zuwiderlaufen und diese störend beeinflussen [19]. Als eine mögliche Folge davon kann sich ein höherer Energiebedarf einstellen, als in der Planung ursprünglich kalkuliert wurde. In Applikationen mit diffusen Verantwortungsbereichen (wie z.B. Großraumbüros) ist es zudem möglich, dass sich solche Effekte aufgrund der raumbezogenen Beleuchtungskonzepte verstärken [20].

Aufgrund der Tatsache, dass viele der angesprochenen nutzerspezifischen Aspekte (wie z.B. Anwesenheitsmuster oder individuelle Präferenzen) aufgrund unzureichender oder nicht verfügbarer Informationen während der Entwurfs- und Planungsphase meist unberücksichtigt bleiben, erweisen sich in diesem Kontext nachträgliche Anpassung von Steuersystemen im laufenden Betrieb, d.h. in Form von erweiterten Inbetriebnahmen (Post-Occupancy Evaluierungen), zur Umsetzung von Maßnahmen für eine stärkere Nutzerzentrierung und bessere energetische Performanz als unumgänglich. Die Investition in moderne Beleuchtungstechnik und deren Steuerungstechnologien kann daher als eine der kosteneffektivsten Möglichkeiten angesehen werden, den Energiebedarf und die damit verbundenen Emissionen zu reduzieren.

Zudem erweisen sich erweiterte Inbetriebnahmen jedoch auch für die Evaluierung des über die energetischen Kennwerte meist weit hinausreichenden Beleuchtungskonzepts als von unschätzbarem Wert. Licht erweist sich nämlich nicht nur im Rahmen des Energiebedarfs [4] eines Gebäudes als relevant, sondern besitzt auch maßgeblichen Einfluss auf den sowohl thermischen als auch visuellen Komfort. Darüber hinaus werden in modernen Lichtplanungen häufig nicht-visuelle Effekte [9, 21] des Lichts angestrebt, welche kurzfristig zur Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit [22] und langfristig zu gesundheitlichen Aspekten wie der Stabilisierung des zirkadianen Rhythmus [23] oder verbessertem Schlaf [24] beitragen können.

Das in diesem multidimensionalen Spannungsfeld zu erstellende Beleuchtungskonzept ist jedoch nicht einfach zu definieren, da sich die Anforderungen der einzelnen Aspekte in vielen Fällen nicht nur nicht deckungsgleich, sondern sogar konträr zueinander darstellen. So gehen die zur Erbringung nicht-visueller Effekte erforderlichen Beleuchtungsstärken meist weit über die normativen Mindestvorgaben hinaus, können bei strikter Einhaltung auch zu negativem visuellem Komfort beitragen und weisen im Allgemeinen einen negativen Einfluss auf die energetische Bilanz des Gesamtsystems auf. Im Gegensatz dazu können jedoch langfristig gesundheitsförderliche Maßnahmen in nur geringem bis gar keinem Ausmaß erbracht werden, sollte sich das umgesetzte Konzept an den energetisch positiveren normativen Mindestvorgaben orientieren. Eine diesbezügliche Abwägung hat meist individuell, applikations- und projektspezifisch zu erfolgen und wird, da die wissenschaftliche Erkenntnislage über das Ausmaß der gegenseitigen Beeinflussung der Wirkfaktoren noch nicht ausreichend erforscht wurde, meist unter abgeschätzten Parametern oder empfundenen Erfahrungswerten getroffen. Eine Planungssicherheit hinsichtlich energetischer oder gesundheitlicher Potentiale von Beleuchtungssystemen ist demnach aktuell nicht gegeben.

4 Projektinhalt

Mit dem Ziel, eine integrale Kunst- und Tageslichtsteuerung zu entwickeln, welche neben der Erzielung nicht-visueller Lichteffekte und Förderung von gesundheitlichen Aspekten auch auf den energetisch optimierten Einsatz von Beleuchtungskomponenten abzielte, wurde im Rahmen des Projekts LessIsMore ein erster Schritt unternommen, um die Schwachstellen gegenwärtiger Beleuchtungssysteme zu beseitigen. Hierzu wurden innerhalb eines systematisch aufbauenden Projektablaufs auf Basis der Evaluierung des aktuellen Standes derzeit vorherrschende Probleme identifiziert, deren Einfluss quantifiziert und strategische Entwicklungsziele zur energetischen und wirkungsbezogenen Verbesserung bestehender Konzepte abgeleitet. Die dadurch definierten Problemstellungen wurden anschließend sowohl konzeptuell als auch technologisch ausgearbeitet, im Rahmen einer Realumgebung implementiert und mittels wissenschaftlicher Studien hinsichtlich der definierten Zielsetzungen evaluiert. Die in diesem Rahmen durchgeführten Tätigkeiten und angewandten Methoden werden nachfolgend verkürzt dargestellt. Nähere Beschreibungen können den jeweiligen projekt- und arbeitspaketspezifischen Berichten entnommen werden.

4.1. Evaluierung des aktuellen Standes

In der eingehenden Projektphase erfolgte auf Basis eines multimodalen Ansatzes eine ausführliche Evaluierung des aktuellen Standes der Beleuchtungsindustrie mittels umgesetzter Planungsprojekte. Darüber hinaus wurde mittels einer Evaluierung von zentralen technischen Steuerungsbauteilen und den maßgeblich beteiligten Sensortypen versucht, strategische Ansätze zur Verbesserung bestehender energetischer Schwächen abzuleiten, welche dann im weiteren Projektverlauf näher ausgearbeitet und in potenzielle Lösungsansätze überführt wurden.

4.1.1. Stand der Beleuchtungsindustrie

Zur Evaluierung des aktuell bestehenden Planungsstandes wurden insgesamt 12 Projekte herangezogen, bei deren Auswahl darauf geachtet wurde, dass die abgeleiteten Erkenntnisse sowohl unabhängig vom involvierten Planungsbüro als auch Projektstandort Gültigkeit besitzen. Um diesem Anspruch zu genügen, wurden zusätzlich zu Bartenbachs eigenen Planungsprojekten systematisch erhobene Informationen aus Projekten des Tasks 61: Integrated Solutions for Daylighting and Electric Lighting (<https://task61.iea-shc.org/>) des Solar Heating and Cooling Programmes der International Energy Agency zur Evaluierung herangezogen, an deren Erstellung auch Bartenbach als Konsortialpartner eine maßgebliche Beteiligung fand.

Von allen evaluierten Projekten wurden die energetischen und melanopischen Kennwerte aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen abgeleitet und, um eine erhöhte Vergleichbarkeit der einzelnen Projekte zu gewährleisten, auf derzeit gültige Standards normalisiert und mittels tageslichtbezogener Gebäudewerte relativiert.

Für die Bewertung des melanopischen Potentials wurden die Equivalent Melanopic Lux (EML) [25] herangezogen, welche die biologische Wirkung von Licht auf den Menschen mittels eines auf die ipRGC-Zellen anstatt auf die Zapfen gewichteten Berechnungsverfahrens und in Bezug auf die

vertikale Beleuchtungsstärke am Auge beschreiben. Tageslichtbezogene Kennwerte wurden je nach Verfügbarkeit mittels der Tageslichtautonomie (DA300 oder DA500) oder des Tageslichtfaktors berücksichtigt [26].

Die energetische Bewertung erfolgte mittels des Light Energy Numeric Indicator (LENI), dessen Berechnungsverfahren in der europäischen Norm EN 15193 für die „Energetische Bewertung von Gebäuden“ [27] beschrieben ist. Im Normalfall erhöht sich der berechnete LENI-Wert durch eine erhöhte Energieeffizienz der Beleuchtung, sowie dem Einsatz von tageszeitabhängigen Steuerungen oder Anwesenheitssensoren. Als Referenzwert zur Bestimmung der energetischen Einsparung wurde jeweils eine Standardinstallation ohne Tunable-White Technologie und Sensorik herangezogen.

4.1.2. Evaluierung technischer Komponenten

Sensorik

Die Evaluierung der Sensorik erfolgte mit Hinblick auf die beiden maßgeblich beteiligten Sensortypen zur Erfassung der Umgebungshelligkeit und Anwesenheit und mittels einer systematischen Onlinerecherche, bei welcher relevante Parameter aus produktspezifischen Datenblättern der jeweiligen Hersteller extrahiert wurden. Dabei wurde darauf geachtet, möglichst viele differenzierte Übertragungsprotokolle (z.B. Bluetooth, Wifi, EnOcean, KNX, usw.) zu beachten, um systematische Verzerrungen der Analysen zu vermeiden. Der durchschnittliche Kaufpreis der Produkte wurde anhand von diversen Online-Portalen bestimmt. Der durchschnittliche tägliche Verbrauch wurde entweder direkt anhand der Herstellerangaben berechnet oder bei Batteriebetrieb mittels der angegebenen durchschnittlichen Batterielebensdauer abgeleitet.

Auf Basis der abgeleiteten Kennwerte wurden anschließend zur näheren Abschätzung des langfristigen finanziellen Potentials der Sensorik innerhalb übergelagerter Steuerungen die Amortisationszeiten sowie das Einsparpotential nach 10 Jahren ermittelt. Da diese Kennwerte grundlegend sehr stark von sowohl den applikationsspezifischen Rahmenbedingungen wie z.B. Tageslichtverfügbarkeit oder Arbeitsplatzfrequentierung als auch den angewandten Steuerungslogiken abhängen, erfolgte die Ermittlung auf Basis realer Nutzungsdaten des Bartenbach F&E Gebäudes und im Rahmen verschiedener Sensorik-Szenarios, welche einem Referenzszenario gegenübergestellt und für den jeweiligen Best und Worst-Case evaluiert wurden.

LED-Treiber

Um den energetischen Einflussbereich von Treibern zu untersuchen, wurden drei LED-Treibermodelle mit verschiedenen Preis-Leistungs-Verhältnissen und Dimmverfahren (Kostengünstig: Sunricher, PWM gedimmt; Mittelklassig: Tridonic LCAI38, Amplituden gedimmt; Hochpreisig: Eldoled DualDrive 50, Hybrid gedimmt) ausgewählt und auf Basis von zwei unterschiedlichen Messreihen (Untersuchung 1: Lichtstromänderung bei konstanter Farbtemperatur; Untersuchung 2: konstanter Lichtstrom mit wechselnder Farbtemperatur) verglichen. Aufgrund der unterschiedlichen Auslegungen der untersuchten Treibermodelle wurden alle Messungen im Rahmen einer gleichmäßigen prozentuellen Auslastung der Geräte vorgenommen. Für die Untersuchungen wurden jeweils die elektrische Wirkleistung, der Leistungsfaktor, die Treibertemperatur sowie die elektrischen Ströme der Warmweiß- und Kaltweißkanäle bestimmt und in Bezug zur Steuervorgabe gesetzt. Aus diesen Werten konnten zudem die Scheinleistung und das Verhältnis der Lichtausbeute (lm/W) bestimmt werden.

4.2. Ausarbeitung der abgeleiteten Problemstellungen

Zum Erreichen der übergeordneten Projektziele war es erforderlich, den energiebezogenen als auch den nicht-visuellen und gesundheitsbezogenen Anforderungen sowohl im Rahmen der technischen Leuchtenentwicklung als auch der zugehörigen Steuerungskonzeption vollumfänglich zu genügen. Dies umfasste dabei neben dem Erzielen hoher vertikaler Beleuchtungsstärken am Auge der NutzerInnen zur Förderung gesundheitsbezogener Aspekte auch eine zeitlich aufgelöste Steuerung von Farbtemperatur, Intensität und Lichtverteilung mit Hinblick auf eine sowohl energetisch als auch wirkbezogene Optimierung. Da sich zudem aus abgeleiteten Erkenntnissen der eingehenden Ist-Stand Analysen auch eine auf der direkten Ansteuerung der einzelnen Lichtfarben basierende, erhöhte Kontrolle des LED-Treiberverhaltens als erforderlich erwies, erfolgte im Rahmen der technologischen Ausarbeitung der abgeleiteten Problemstellungen eine vollumfängliche Prototypisierung aller beteiligten Komponenten inkl. der Entwicklung einer zugehörigen Leuchten-Steuerungssoftware. Um den damit verbundenen Aufwänden innerhalb des vorgegebenen Projektrahmens gerecht werden zu können, erfolgten die diesbezüglichen Entwicklungen aufbauend auf Ergebnissen der vorangegangenen Forschungsprojekte Repro-light (<https://www.repro-light.eu/>) und MOSCOW (FFG-Nr. 870845).

4.2.1. Entwicklung eines Leuchten-Funktionsmusters

Im Rahmen der Leuchtenentwicklung wurde ein Konzept zur Personalisierung der Arbeitsplatzbeleuchtung verfolgt, welches es auf modularer Basis die Vielfältigkeit der applikationsspezifischen Anforderungen abzudecken vermag [28]. Durch Nutzung IT-bezogener Kommunikationsschnittstellen und Konzepte wurde darauf fokussiert einzelne Teilkomponenten frei kombinierbar zu gestalten, ohne dabei die Grundfunktionalität oder Einsatzzwecke der Leuchten zu beschränken. Dies ermöglicht es beispielsweise den Prototypen entweder als Teil der direkten Arbeitsplatzbeleuchtung auszubilden, im Nahfeld anzuordnen und direkt durch die NutzerInnen steuern zu lassen. Alternativ kann die gleiche Leuchte jedoch auch als allgemeines, deckenmontiertes Raumbeleuchtungselement eingesetzt werden, das einer Steuerung durch mehrere NutzerInnen unterliegt. In beiden Fällen wurde es ermöglicht, Sensoren anzukoppeln und wahlweise automatisierte Steuerungslogiken zu applizieren, welche z.B. eine übergeordnete Logik der planungsbezogenen, angedachten Raum- und Lichtnutzung abbildet.

Das verfolgte Konzept basiert dabei auf der Implementierung von sowohl neuen Bus-Systemen als auch Softwarearchitekturen, welche auf Basis von Mikroprozessortechnologien direkt in die Leuchte integriert wurden. Die Wahl des zu implementierenden Mikroprozessors ist dabei frei wählbar und kann je nach applikationsspezifischen Anforderungen in seiner Rechenleistung gewählt werden. Die Steuerungssoftware wurde davon unabhängig und übertragbar ausgebildet und erlaubt es mittels verschiedener Parametrisierung auf Basis einer Mikroservice-Architektur unterschiedliche Funktionalitäten bereitzustellen.

In Kombination mit speziellen optischen Elementen und der Möglichkeit zur Umsetzung hochgradig sensorgekoppelter Steuerungslogiken als Verbindung verschiedenster raumzonenbezogener Beleuchtungselemente wurden dadurch echtzeitorientierte, individualisierte Beleuchtungslösungen ermöglicht, welche im Sinne von Human-centric Lighting auf die unterschiedlichen Lichtbedürfnisse von NutzerInnen mit unterschiedlichen Aktivitäten, Aufgaben und Sehbedingungen optimal eingehen können.

Die Prototypen (**Abbildung 1**) bieten die Möglichkeit die lokalen vertikalen und horizontalen Arbeitsplatzflächen getrennt mit Tunable-White (2.200 – 5.300 K) und bis zu 6.000 lx (ca. 1.500 lx am Auge) zu beleuchten. Zudem ermöglicht die integrierte Einzelpunktansteuerung eine Änderung der Lichtverteilung auf beiden beleuchteten Flächen, welche auch die Bereitstellung von zonaler Beleuchtung mit verringerter Farbtemperatur (2.200 – 3.000 K) während des Abends ermöglicht.

Abbildung 1: Mit den Prototypen ausgestatteter Doppelarbeitsplatz in Bartenbachs Laborräumlichkeiten; Darstellung der veränderlichen Farbtemperatur der Rückwand von 2.200 K (links) bis 5.300 K (rechts)



Als Ergebnis konnten somit mittels der angesprochenen technologischen Komponenten alle Anforderungen hinsichtlich visueller und nicht-visueller Kenngrößen des Projekts LessIsMore vollumfänglich erfüllt werden.

4.2.2. Entwicklung der integralen Steuerungslogik

Da Beleuchtungskonzepte jedoch vorrangig auf Raumebene gedacht und entwickelt werden und dementsprechend energetische Zielsetzungen gegenüber wirkungsbezogenen Ansätzen von individuellen Arbeitsplatzbereichen losgelöst und gesamthaft angebracht werden müssen, erfolgte eine über die Arbeitsplatzbeleuchtung hinausreichende Entwicklung einer auf energetische Effizienz fokussierten Steuerungslogik. Da integrale Steuerungskonzepte in diesem Zusammenhang das größte Potential hinsichtlich Energie und Sehkomfort [29, 30] bieten und Tageslicht zudem einen direkten Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit [29] und Physiologie (z.B. die Vitamin D-Produktion) [21] besitzt, wurde bei der Entwicklung speziell auf tageslichtbezogene Parameter fokussiert, welche bei der arbeitsplatzbezogenen Prototypenentwicklung nur eine untergeordnete Rolle einnahmen.

Zur Sicherstellung einer zielorientierten Lösungsfindung, wurde bei der Entwicklung ein iterativer Prozess genutzt, in welchem auf Basis von Realdaten des Bartenbach Living Labs zuerst Potentiale identifiziert und anschließend in eine integrale Steuerung überführt wurden. Im Living Lab befinden sich 28 Einzelarbeitsplätze in einem Großraumbüro mit 161,7 m² und eine direkt nach Süden ausgerichtete Fassade (**Abbildung 2**) sorgt in Kombination mit den nach Norden ausgerichteten Oberlichtern für ein hohes Tageslichtniveau (DA=82%, in Bezug auf die normative Beleuchtungsstärke von 500lx nach EN12464-1 und in Bezug auf eine tägliche Berechnungszeit von 08.00 bis 18.00 Uhr, ohne Berücksichtigung der Sommerzeit). Um direkten Eintrag von Sonnenlicht auf den Arbeitsplätzen zu vermeiden sind außenliegende, statische Tageslichtlamellen installiert, die in ihrer Dimension und

Ausrichtung an die geografische Lage des Studienobjekts optimiert sind. Darüber hinaus bestehen fensterseitig außenliegende und oberlichtseitig innenliegende teilautomatisierte Screens, die im Automatikbetrieb der Sonnenposition nachgeführt und in Abhängigkeit der äußeren Beleuchtungsstärke geschaltet werden können. Ein ausreichender Tageslichtbezug konnte dementsprechend bei der Steuerungsentwicklung sichergestellt werden.

Abbildung 2: Außenansicht der Südfassade des Bartenbach F&E Gebäudes in Aldrans, Österreich



Zur Erfassung der realen Gebäudenutzungs- und -performanceparameter wurden über 100 Sensoren (**Tabelle 1**) installiert, die über die Beleuchtungsstärke und Anwesenheit bis hin zu klimatechnischen Größen verschiedene Zustände überwachen und loggen. Alle sensorerfassten Werte werden über die Gebäudesteuerung, einer BECKHOFF-Steuerung (CX5140-0141) in CSV-Files gespeichert, welche im Rahmen eines Datenvorverarbeitungsprozesses automatisiert qualitativ gesichert, strukturiert und einem öffentlichkeitswirksamen Live-Monitoring zugeführt werden.

Auf Basis des Datenloggings und des darauf aufbauenden Monitorings wurden in weiterer Folge Verbesserungspotentiale zur Performancesteigerung der Steuerung unter den Aspekten der Energieeffizienz und Nutzerkomforts abgeleitet und in das bestehende Automatisierungssystem implementiert. Konkret wurden folgende Potentiale in die integrale Steuerungslogik aufgenommen:

- Verbesserung der Tageslicht-Durchschlagsmomente in denen Blendung auftritt und damit der Nutzerkomfort beeinträchtigt wird durch Anpassung der Steuerlogik, um Zeitfenster direkten Sonnendurchschlags zu vermeiden und die Übergangszeit zwischen manueller Übersteuerung und Rückkehr in den Automatikbetrieb zu verkürzen.
- Anpassung der Screensteuerung, um Überhitzungen und Auskühlung zu vermeiden und sowohl Arbeitsleistung und die Systemakzeptanz der NutzerInnen zu erhöhen.
- Anpassung der Zeitfenster zur thermisch bedingten Screenschließung, um den Sichtkontakt zu wahren und die allgemeine Systemakzeptanz zu erhöhen.
- Umsetzung einer auf Tageslicht bezogenen, zonierten Ansteuerung der Arbeitsplatzgruppen zur Begrenzung oder Erhöhung solarer Einträge im thermischen Kontext in Abgleich zu einem individuellen Auftreten von störenden Blendsituationen. Diesbezüglich positive Effekte auf

Energieeffizienz und Nutzerzufriedenheit durch eine zonierte Kunstlichtsteuerung konnten bereits im Rahmen vorangegangener Studien im Living Lab nachgewiesen werden [31].

Tabelle 1: Übersicht der installierten Sensortypen und zugehörigen Messgrößen

Messgröße	Sensortyp	Datenerfassungsrate
Anwesenheit auf Einzelarbeitsplatzebene	NodOn PIR-2-1-01	Auf Zustandsänderung
Anwesenheit auf Ebene der Arbeitsplatzzone	Thermokon RDI	Auf Zustandsänderung
Funktaster zur TL-/KL-Steuerung	EasySens Funkschalter 4-Kanal, Jung LS990	Auf Zustandsänderung
Fensteröffnungen	Thermokon SRW02	Auf Zustandsänderung
Beleuchtungsstärke, innen	Thermokon LDF+	Periodisch pro min
Beleuchtungsstärke, außen	Thermokon LI65+	Periodisch pro min
Temperatur, innen	Thermokon SR04 CO2	Periodisch pro min
Temperatur, außen	Thermokon AGS54	Periodisch pro min
Relative Luftfeuchtigkeit, innen	Thermokon SR04 CO2	Periodisch pro min
CO2-Konzentration	Thermokon SR04 CO2	Periodisch pro min
Windgeschwindigkeit	Warema Typ 3H	Periodisch pro min
Elektrische Energie	Eltako FWZ12-16A	Periodisch pro min

4.3. Energetische und wirkungsbezogene Evaluierung

In der abschließenden Projektphase wurden sowohl die eingesetzten Prototypen als auch die entwickelten integralen Steuerungskomponenten hinsichtlich energetischer und wirkungsbezogener Effekte im Rahmen einer systematischen Laborstudie und einer Feldstudie im Bartenbach Living Lab evaluiert. Im Fokus der Evaluierungen stand einerseits die energetische Effizienz der integralen Steuerungslogik im direkten Vergleich zu aktuellen Benchmarks energieeffizienter Beleuchtungen. Andererseits erfolgte die Evaluierung der nicht-visuellen Wirkung der Prototypen im Laborkontext. Die ursprünglich im Projektplan vorgesehene langzeitorientierte Bewertung von gesundheitsspezifischen Wirkungen unter realen Bedingungen konnte leider aufgrund der auf COVID-19 bezogenen Restriktionen und des damit einhergehenden Anstiegs von Homeoffice-Anteilen während der angedachten Feldstudienphase nicht umgesetzt werden.

4.3.1. Evaluierung der Energieeffizienz

Da energetische Performanzen von Beleuchtungssystemen grundsätzlich in starker Abhängigkeit zu Nutzerindividualitäten und -verhaltensweisen bzw. dynamisch veränderlichen Umgebungseinflüssen stehen, erfolgte die Evaluierung der Energieeffizienz der entwickelten Steuerungslogik mittels einer sogenannten Post Occupancy Evaluation. Hierbei werden zur Analyse notwendige Daten im Realbetrieb mittels Sensorik erhoben.

Die unterschiedlichen Messgrößen wurden dabei anhand einer zentralen Steuereinheit zusammengeführt, strukturiert gespeichert und zur Datenanalyse automatisiert vorverarbeitet und einheitlich aufbereitet. Die Analyse erfolgte unter einer integralen Betrachtung von Kunst- und Tageslicht, um reziproke Einflüsse von Wirkgrößen zu entschlüsseln, denn die energetische Optimierung einer Größe kann gleichzeitig zu einer Verschlechterung einer anderen führen, und zwar in einem Ausmaß, dass sich der Gebäudegesamtenenergiebedarf verschlechtert. Als Beispiel kann die Reduzierung des Kunstlichteinsatzes mittels Öffnung des Fassadensystems und großer Fensterflächen genannt werden, welcher im Sommer zu höheren Kühllasten und im Winter zu höheren Heizlasten führen kann. Zudem wurde das Nutzerverhalten (z.B. Blendschutz) in den Analysen berücksichtigt und visuelle und thermische Komfortkriterien analysiert.

4.3.2. Evaluierung der Lichtwirkungen

Um eine systematische Untersuchung der wirkbezogenen Effekte der Kunstlichtbeleuchtung zu ermöglichen, erfolgte diese im Rahmen einer Laborstudie unter Ausschluss von Tageslicht zur Vermeidung konfundierender lichtbezogener Effekte mit dem Fokus auf Müdigkeit, Stress und die wahrgenommene Arbeitsbelastung. Nachgewiesenermaßen hängen diese Parameter stark damit zusammen, inwieweit die Personen hinreichend hellem Licht ausgesetzt sind [32, 33, 34]. Allerdings führt allein mehr helles künstliches Licht am Arbeitsplatz in Winter und Frühling nicht zwangsweise zu positiven Ergebnissen und kann sich sogar negativ auswirken. Aus diesem Grund wurde in der durchgeführten Studie anstelle von langandauernden Expositionen die Auswirkung einer kurzen Lichtdusche („Lightshower“) auf mehrere nicht-visuelle Effekte hin untersucht. Diese ist zum einen energiesparender als eine durchgängig helle Beleuchtung und zum anderen wurden bereits aktivierende Effekte durch abrupte Lichtwechsel nachgewiesen [35].

An der Untersuchung nahmen 58 Personen teil, wovon sich 29 als männlich und 29 als weiblich identifizierten. Die Altersspanne umfasste 20 bis 50 Jahre mit einem Durchschnitt von $M = 28,40$ Jahren und einer Standardabweichung von $SD = 7,43$ Jahren. 34 Prozent der Teilnehmenden benötigten eine Sehhilfe. Keine der Versuchsperson litt unter Augenkrankheiten oder nahm Medikamente, beziehungsweise veränderte im vorangegangenen Monat ihre Medikation.

Die Studie wurde in den Räumlichkeiten der Bartenbach GmbH in Aldrans im Zeitraum von 15. März bis 29. Mai 2021 durchgeführt. In zwei identischen Laborräumen wurden Computerarbeitsplätze eingerichtet, an denen die Teilnehmenden an zwei aufeinander folgenden Tagen von morgens 7:00 Uhr bis mittags 12:30 Uhr verschiedene Tests und Fragebögen unter zwei verschiedenen Lichtbedingungen (Standard: $200 \text{ lx } E_h$, Lichtdusche $1360 \text{ lx } E_h$, **Tabelle 2**) absolvierten. Die Fenster der Testräume befanden sich in nord-östlicher Richtung und wurden mithilfe von Jalousien verdunkelt, womit der Einfall von Sonnenlicht auf ein Minimum reduziert wurde. Bei Einzelbelegung der Räume wurden stets die jeweils äußeren, weiter von den Fenstern entfernten, Arbeitsplätze besetzt.

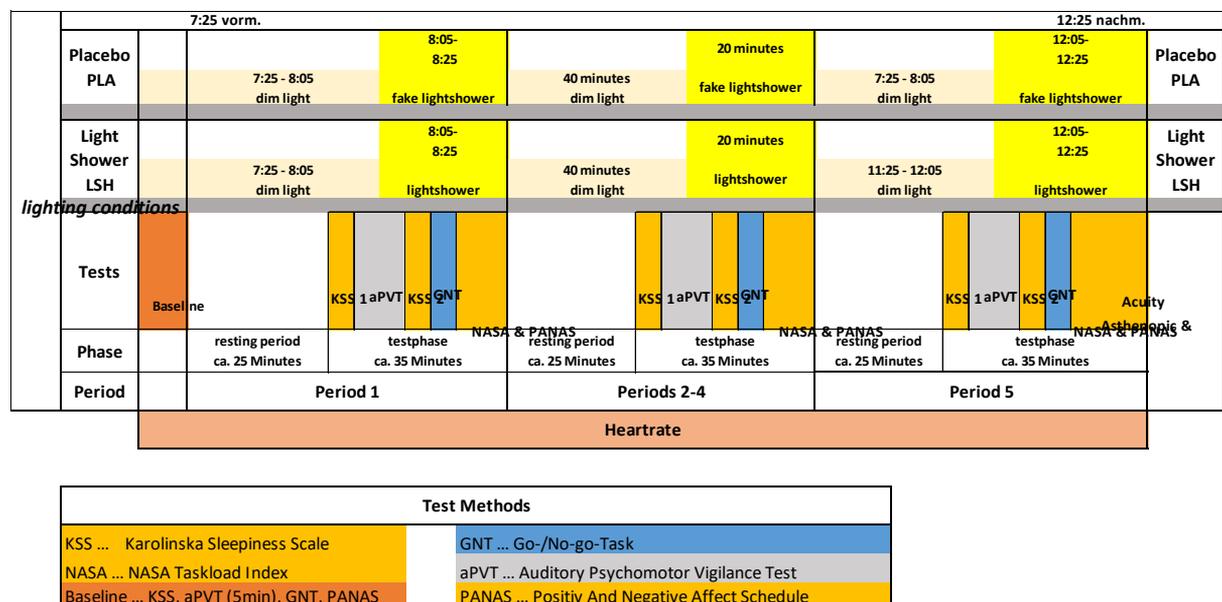
Tabelle 2: Kennwerte der zwei in der Laborstudie untersuchten Lichtbedingungen

Parameter	Standard	Lichtdusche
Eh (lx)	510	5500
Ev (lx)	200	1360
CCT (K)	4600	4000
Melanopic equivalent daylight illuminance D65 (lx)	235.06	897.82

Studiendesign

Am Morgen vor der Untersuchung füllten die Teilnehmenden den Schlafragebogen A aus, um ihre Schlafqualität zu dokumentieren. Die Versuchspersonen wurden am ersten Tag randomisiert einer Intervention zugeordnet und absolvierten am folgenden Tag entsprechend die Zweite (Abbildung 3). Vor dem eigentlichen Experiment absolvierten die Versuchspersonen eine Baselinetestung der Karolinska Sleepiness Scale (KSS), des Psychomotor Vigilance Tasks (aPVT), des Go/No-go Tasks (GNT) und der Positive and Negative Affect Schedules (PANAS), anschließend folgte die erste Ruhephase von 25 Minuten, während der sie die Möglichkeit hatten in aufgelegten Magazinen und Zeitungen zu lesen. Dies diente der Erholung der Teilnehmenden nach späteren Testphasen und sollte diese standardisieren.

Abbildung 3: Darstellung des Studiendesigns



Noch vor der Applikation der Lichtintervention füllten die ProbandInnen das erste Mal die KSS aus, anschließend setzten sie Kopfhörer auf und begannen mit dem auditiven PVT, während dem die Lichtdusche einsetzte. Diese begann nach fünf Testminuten des aPVT, welcher nahtlos noch weitere zehn Minuten fortgesetzt wurde. Anhand dieser fünfminütigen Blöcke erfolgte die Einteilung des

aPVT in drei Teile (Part A-C). Anschließend folgten während der Lichtdusche ein zweites Mal die KSS, der Go/No-go Task, der NASA-TLX sowie die PANAS.

Dieses Prozedere wiederholte sich fünf Mal, mit einer festgelegten Pause von 9:30 Uhr bis 9:45, während der die Teilnehmenden essen und den Raum für Toilettenpausen verlassen durften, Rauchen war in dieser Zeit nicht gestattet. Die letzte Intervention wurde um die Dauer des FrACT verlängert. Abschließend füllten die Versuchspersonen noch den Fragebogen zu asthenopischen Beschwerden aus. Während beider Bedingungen trugen die Teilnehmenden durchgehend ein EKG-Gerät. Um den Einfluss der Lichthistorie möglichst gering zu halten, wurde diese Studie am frühen Morgen durchgeführt und die Versuchspersonen wurden instruiert, an den Tagen vor der Untersuchung im Außenbereich Sonnenbrillen zu tragen.

4.4. Qualität der angewandten Methodik

Die im Rahmen der Projektbearbeitung von LessIsMore angewandten Methoden erwiesen sich als vollumfänglich zielführend und konnten maßgeblich zur übergeordneten Zielerreichung beitragen. Hinsichtlich der Evaluierung des Ist-Standes konnte dementsprechend ein ausreichendes Bild des aktuellen Planungsstandes abgeleitet werden, welches die bereits bei der Beantragung des Projekts angenommenen energetischen Potentiale integraler Beleuchtungssysteme bestätigte. Die differenzierte Marktrecherche zu den vorrangig mit Beleuchtungen in Verbindung stehenden Sensoren konnte darüber hinaus einen großen Beitrag zu den diesbezüglichen Potentialen und Einschränkungen leisten.

Hinsichtlich der anvisierten Entwicklungsziele eines integralen Steuerungssystems zur Erzielung energetisch und nicht-visuell positiver Wirkungen erwies sich auch die konzeptuelle Teilung des übergeordneten Ziels in verschiedene Steuerungskonzepte als nachhaltig positiv, da damit sowohl die erforderliche Evaluierung unter Realbedingungen als auch die Umsetzung einer innovativen Laborstudie ermöglicht wurden. Mit Hinblick auf die erzielten Ergebnisse erwiesen sich auch beide eingesetzten Evaluierungsmethoden als zielführend, da sie anwendungsnahe Resultate gewährleisteten und zu einem maßgeblichen Knowhow-Aufbau beitragen konnten. Im Speziellen konnte die mittels des Living Labs durchgeführte und longitudinal ausgelegte Feldstudie zur Evaluierung der energetischen Effizienz vielfältige Erkenntnisse zu Nutzerverhalten beisteuern, welche auch in weiterführenden, zukünftigen Forschungsvorhaben noch adressiert werden sollten. Ein Ergebnis, welches ohne den Bezug zu realen Umgebungskonditionen nicht hätte erzielt werden können.

Die einzige im Projekt hinzunehmende Einschränkung ergab sich bei der Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen der entwickelten Steuerungskomponente, da diese ein konstantes Langzeitmonitoring von Personen erfordert, welches unter den während der Projektlaufzeit auftretenden COVID-19 Regulierungen und den damit verbundenen Abwesenheiten leider nicht durchgeführt werden konnte.

5 Ergebnisse

Innerhalb des Projekts LessIsMore wurden die maßgeblichen Ergebnisse sowohl hinsichtlich der eingehenden Ist-Stand-Analyse als auch der projektabschließenden Evaluierungen erzielt. Im Folgenden werden die erzielten Erkenntnisse zur verbesserten Übersicht aufgabenbezogen aufgeschlüsselt.

5.1. Erkenntnisse zum aktuellen Stand

Die Ergebnisse mit Bezug zum aktuellen Stand von integralen Beleuchtungsplanungen und den damit verbundenen Komponenten wurden in der Projekteingangsphase erzielt und stellen dementsprechend neben einem grundsätzlichen Projektergebnis gleichzeitig Kernaspekte dar, welche in die weitere Projektbearbeitung und technische Entwicklung der Steuerungslogik aufgenommen wurden.

5.1.1. Potentiale integraler Beleuchtungssysteme

Die Ergebnisse der Evaluierung der 12 inkludierten Planungsprojekte (**Tabelle 3**) zeigen deutlich den energiesparenden Einfluss, den integrierte Sensorik auf die gesamthafte Energiebilanz ausüben kann. Speziell in Projekten, welche durch einen erhöhten Tageslichtbezug geprägt sind, erweist sich eine inkludierte, ans Tageslicht angepasste Kunstlichtstrategie als gewinnbringend (zwischen 10 und 60 % energetisches Einsparpotential). Durch Einsatz zusätzlicher Anwesenheitssensoren können diese in Abhängigkeit zur Objektnutzung noch gesteigert werden (bis zu 80 % Einsparung). Im Speziellen weisen hierbei Applikationen mit stark personen- und ortsabhängiger Ausprägung, wie z.B. Büroräumlichkeiten, ein erhöhtes Potential zu energetischen Einsparungen auf, wohingegen Anwendungsfelder mit starken Fluktuationen, wie z.B. Handel oder klinische Einrichtungen, aufgrund ihrer spezifischen Anforderungen das Einsparpotential minimieren. Dies wird auch dadurch verständlich, dass beispielsweise der Einzelhandel stark von optimal ausgeleuchteten Bereichen zur Aufmerksamkeitslenkung abhängig ist, auch wenn sich momentan keine relevante Käuferschicht in direktem Umfeld befindet.

Des Weiteren wird ersichtlich, dass sich Human-centric orientierte Beleuchtungskonzepte durchaus durch einen relevant höheren energetischen Verbrauch charakterisieren. Dieser kommt jedoch nur bei fehlendem sensorischem Einsatz direkt zum Tragen und kann durch ein passend gewähltes Sensorkonzept nicht nur minimiert, sondern sogar negiert werden. Es kann dementsprechend für die weiteren Untersuchungen angenommen werden, dass der Einsatz von Sensoren ihre energetische Mehrbelastung durchaus rechtfertigen und zu besseren und energieeffizienteren Systemen beitragen kann. Eine optimierte Steuerung von HCL-Anlagen vermag zudem zu diesem Ziel in erweitertem Umfang beizutragen.

Die grundsätzlich für das Projekt LessIsMore angenommenen Potentiale konnten damit im Rahmen der Evaluierung international umgesetzter Planungsprojekte vollumfänglich bestätigt werden.

Tabelle 3: Energetische und melanopische Kennwerte der evaluierten Planungsprojekte

Projekt	Typ	TL-Dimmung	Präsenzdetektion	CCT Bereich	Tageslichtautonomie	Tageslichtfaktor	LENI*** (Mess.)	LENI*** (Bench.)	LENI*** (Diff.)	EML****
Bartenbach F&E	Büro	ja	ja	2.200 K 5.000 K	82%*	4,0% - 6,0%	3,65	16,50	77,9%	1200 lx +/- 358 lx
Stephenson Garden	Pflegeheim	ja	ja	-	5,0% - 18,0%**	0,9% - 2,1%	5,84	6,75	13,5%	387 lx +/- 385 lx
Forum Sobral Pinto	Büro	nein	nein	6.500 K	0%**	-	16,84	16,84	0,0%	516 lx +/- 105 lx
Ministry of Mines and Energy	Büro	ja	nein	4.000 K	-	0,4% - 8,0%	17,23	18,93	9,0%	388 lx +/- 230 lx
University of Brasilia	Büro	nein	nein	4.000 K	-	3,9% - 12,2%	113,26	113,26	0,0%	200 lx
China Acad. of Building Research	Büro	ja	ja	3.300 K 5.000 K	-	-	6,15	24,60	75,0%	-
National Aquatics Center	Sportstätte	nein	nein	5.500 K	-	2,1% - 3,8%	60,00	150,00	60,0%	-
IKEA Kaarst	Handel	ja	nein	-	-	0,2% - 0,5%	40,30	41,40	2,7%	-
Slagelse Psychiatric Hospital	Krankenhaus	nein	nein	2.200 K 2.700 K	-	2,1%	17,10	17,10	0,0%	20 lx +/- 15 lx
Norconsult Headquarter	Büro	ja	nein	4.000 K	-	-	6,00	8,20	26,8%	-
IDOM Headquarter	Büro	ja	nein	4.000 K	29%*	1,0% - 5,0%	-	-	60,0%	-
The Spark	Büro	nein	nein	2.300 K 6.200 K	-	2,0%	22,43	14,80	-51,6%	680 lx +/- 332 lx

* DA500, ** DA300, *** Light Energy Numeric Indicator angegeben in kWh/m²y, **** Equivalent Melanopic Lux

5.1.2. Erkenntnisse zu technischen Komponenten

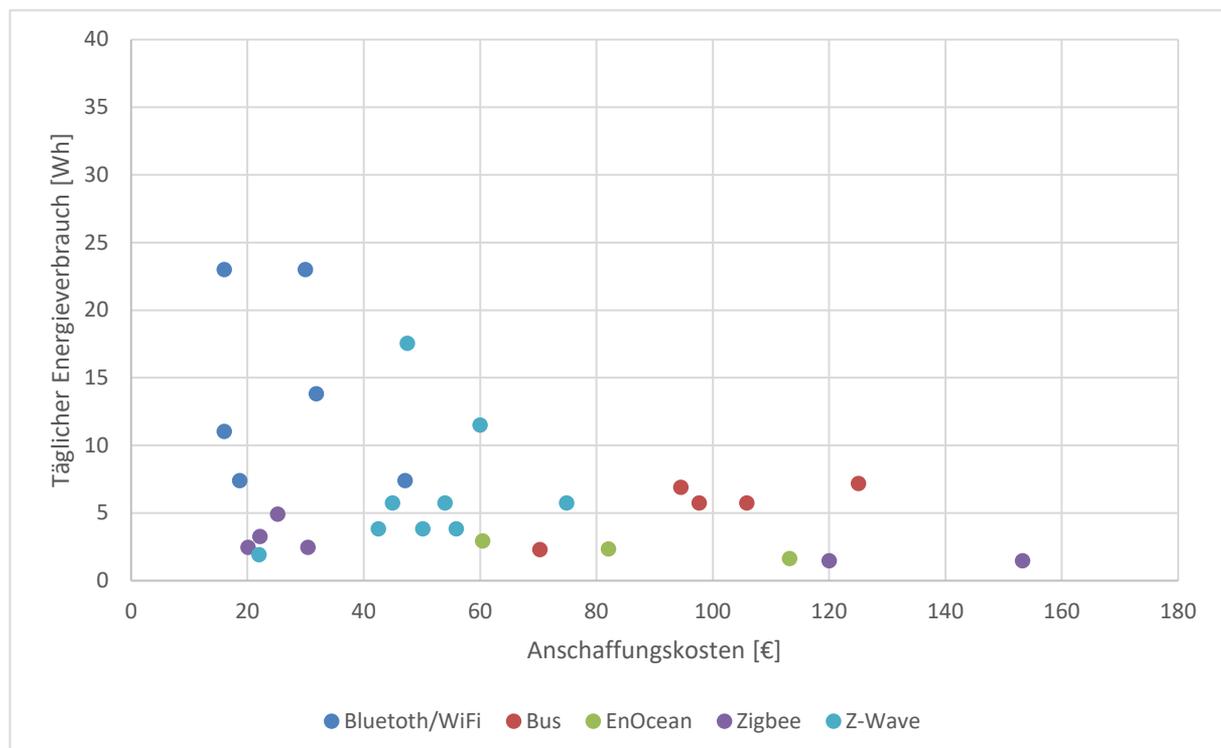
Neben den evaluierten Planungsprojekten wurden, wie bereits angemerkt, auch systematische Erhebungen zu maßgeblich eingesetzten Sensor- und Treiberkomponenten durchgeführt und darauf bezogene energetische Analysen durchgeführt. Zur applikationsnahen Abschätzung zum Potential hinsichtlich des Einsatzes von Sensorik wurden zudem Amortisationsberechnungen auf Basis von Realdaten des Bartenbach Living Labs durchgeführt. Treiberkomponenten wurden hinsichtlich ihrer Blindleistung beurteilt.

Energetischer Verbrauch und Anschaffungskosten von Sensoren

Die erhobenen Daten der Passiv-Infrarot und Helligkeitssensoren wurden nach den Übertragungsprotokollen gruppiert und mittels deskriptiver Statistiken analysiert. Die Ergebnisse zeigen für beide Typen eine ähnliche Struktur. Die Protokollgruppe Bluetooth/WiFi tritt durch deutlich erhöhte Verbrauchswerte mit großen Abweichungen auf und das Protokoll EnOcean als energetisch positiver hervor (vergleiche **Abbildung 4**). Bemerkenswert erweist sich jedoch die geringere Differenz des energiesparenden Übertragungsprotokolls EnOcean im Vergleich zu seinem Konkurrenten Zigbee, was direkt auf den grundsätzlich notwendigen Betriebsverbrauch und dem damit einhergehenden verringerten Einsparpotential bei der Datenübertragung zurückzuführen ist. Hinsichtlich der angeführten Kosten der untersuchten Produkte erweist sich hier die Gruppe Bluetooth/WiFi als deutlich kostengünstiger. Grundsätzlich ordnen sich die Produkte nach den Kosten größtenteils nach den Protokollen, was auf den vorrangigen Einfluss der in den Produkten integrierten Übertragungsprotokolle und ihre zugehörigen Bauteilkosten schließen lässt.

Über eine reine produktbezogene Analyse hinaus, wurden die erhobenen Daten als Grundlage der weiterführenden Amortisationsberechnungen genutzt.

Abbildung 4: Kosten/Verbrauchs-Diagramm der 29 in LessIsMore untersuchten PIR-Sensoren

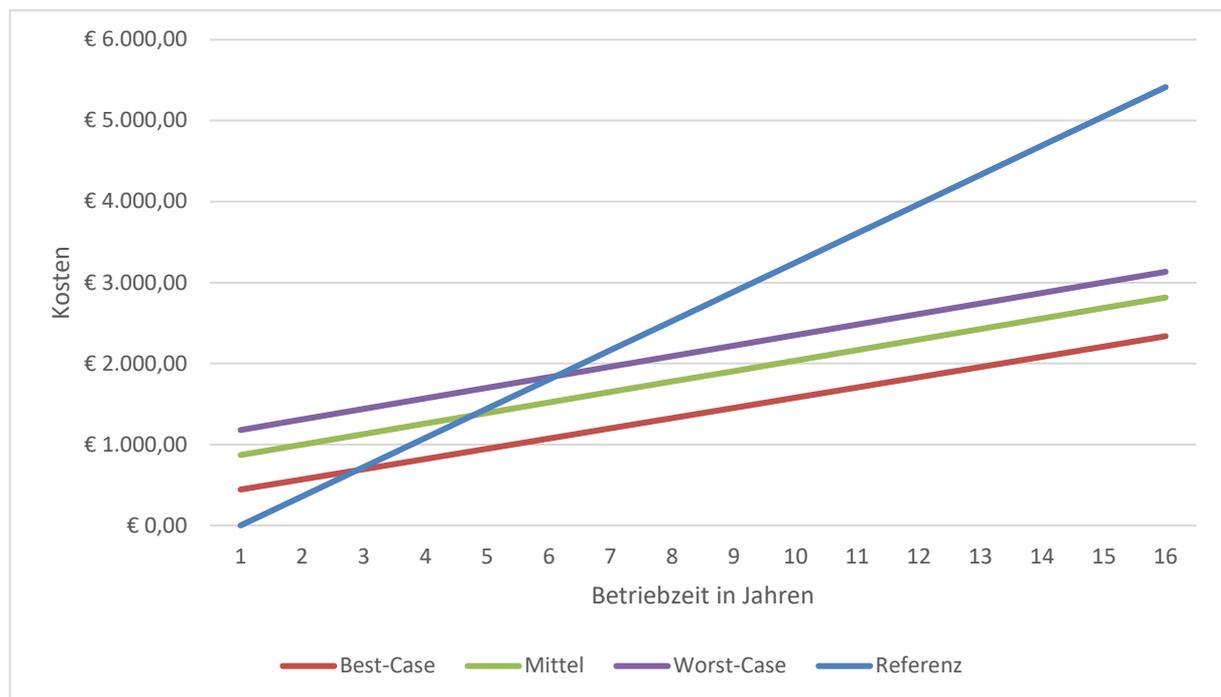


Amortisation und langfristig finanzielles Einsparpotential durch Sensorik

Zur näheren Abschätzung des langfristigen finanziellen Potentials der Sensorik innerhalb überlagelter Steuerungen wurden die Amortisationszeiten sowie das Einsparpotential nach 10 Jahren ermittelt. Da diese Kennwerte grundlegend sehr stark von sowohl den applikationsspezifischen Rahmenbedingungen wie z.B. Tageslichtverfügbarkeit oder Arbeitsplatzfrequentierung als auch den angewandten Steuerungslogiken abhängen, erfolgte die Ermittlung auf Basis realer Nutzungsdaten des Bartenbach Living Labs und im Rahmen verschiedener Sensorik-Szenarios.

Durch die Bildung der Szenarios konnten auf Basis einer jeweils reinen Anwesenheits- (Szenario 1) und Tageslichtsteuerung (Szenario 2) repräsentative Werte zu den einzelnen Sensortypen errechnet und im Rahmen einer kombinierten Steuerung (Szenario 3) gegenseitige Einflüsse aufgezeigt werden. Die einzelnen Szenarios wurden dabei einem Referenzszenario (manuelle Schaltung) gegenübergestellt und für den jeweiligen Best und Worst-Case evaluiert (**Abbildung 5**), welche die beste bzw. schlechteste Kosten/Verbrauchs-Relation der einzelnen Sensortypen repräsentieren. Diesbezügliche Relationen wurden auf Basis der 25 und 75 % Quantile (Mittlere 50 % der Produkte) erstellt, um eine repräsentativere Darstellung der aktuellen Marktlage zu erreichen. Für jedes Szenario wurde zudem eine mittlere Relation evaluiert.

Abbildung 5: Darstellung der Amortisationszeiten der Sensorik einer sowohl anwesenheitsbasierten als auch tageslichtangepassten Steuerung in Bezug auf eine rein manuelle Steuerung im Best bzw. Worst-Case Szenario



Zur verbesserten Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse werden die Resultate der Berechnungen vereinheitlicht in **Tabelle 4** für alle Szenarios und zugehörigen Fälle unten aufgelistet. Die angeführten Kosten beziehen sich dabei ausschließlich auf die eingesetzte Sensorik und vernachlässigen dementsprechend sowohl Kosten für allgemeine Komponenten, welche sich

zwischen den Szenarien nicht unterscheiden, als auch erhöhte Kosten, welche aus der Installation, Inbetriebnahme und Programmierung für die Sensoren resultieren können. Die energetischen Werte beziehen sich ausschließlich auf die Teilkomponenten Sensorik und Kunstlicht, wobei die technische Ausstattung der Kunstlichtbeleuchtung für alle Szenarien gleich angenommen wurde und dementsprechend allfällige Unterschiede in den energiebezogenen Spalten rein auf den Einfluss der Sensorik zurückzuführen sind.

Tabelle 4: Kosten, Verbräuche, Amortisationszeiten und langfristiges Einsparpotential des Referenzszenarios und der betrachteten Steuerungsszenarien

Szenario	Case	Komponentenkosten [€]	Jährlicher Verbrauch Sensorik [kWh]	Jährlicher Verbrauch Kunstlicht [kWh]	Break-even [Jahre]	Benchmark 10 Jahre Energie [kWh]	Benchmark 10 Jahre Kosten [€]
Manuell	-	0,00	0,00	2.211,61	-	-	-
Anwesenheit	Best	299,50	9,00	1.854,57	5,27	- 3.480,43	-268,51
	Mittel	596,89	24,73	1.854,57	11,01	- 3.323,13	+ 54,56
	Worst	820,20	27,00	1.854,57	15,23	-3.300,43	+ 281,57
Tageslicht	Best	144,11	3,53	1.145,74	0,83	-10.623,45	- 1.589,64
	Mittel	272,74	9,11	1.145,74	1,58	-10.567,61	- 1.451,90
	Worst	358,08	10,20	1.145,74	2,08	-10.556,71	- 1.364,77
Anwesenheit und Tageslicht	Best	443,61	12,53	761,03	1,89	-14.380,55	- 1.903,30
	Mittel	869,63	33,84	761,03	3,76	-14.167,41	- 1.442,49
	Worst	1.178,28	37,20	761,03	5,11	-14.133,81	- 1.128,36

In Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse erweist sich der Einsatz von Sensorik in künstlichen Beleuchtungsanlagen als ausgezeichnetes Mittel um die energetische Bilanz des Gesamtsystems signifikant zu verbessern. Bereits nur schlecht wirksame Sensorkonzepte wie das Szenario 1 erweisen sich gegenüber sensorfreien Installationen als deutlich effizienter. Dies ist einerseits den fast vernachlässigbaren Energieverbräuchen moderner Sensoren zuzuschreiben, andererseits jedoch auch in Bezug auf die deutlich höheren Verbräuche der künstlichen Beleuchtung zu sehen, welche es der Sensorik gestattet, sich bei nur geringsten Einsparungen bereits energetisch zu rechtfertigen.

Dennoch wird auf Basis der Untersuchungen auch deutlich, dass die energetische Bilanz in höchstem Maße zu dem eingebrachten Sensorkonzept in Abhängigkeit steht und dieses in enger Anlehnung an applikationsspezifische Rahmenbedingungen ausgearbeitet werden muss, um den höchstmöglichen Nutzen zu erzielen. Speziell im untersuchten Living Lab wird hier die Diskrepanz zwischen den eingesetzten Sensortypen in Verbindung zu den Gebäudeeigenschaften offensichtlich und die Anwesenheitssensoren erweisen sich in ihrer Wirksamkeit aufgrund der hohen Tageslichtverfügbarkeit deutlich reduziert.

Dies gilt es in Applikationen insofern zu beachten, als dass zusätzliche Systemkomponenten auch erhöhte Kosten in der Installation und Wartung verursachen, was in den angeführten Berechnungen noch vernachlässigt wurde. Speziell nicht beachtete Wartungskosten können hierbei schnell einen drastischen Einfluss auf die allgemeine Performanz ausüben, da finanzielle Einsparungen aufgrund des geringen Systemverbrauchs in Bezug auf Sensorik relativ gering auszufallen scheinen.

Blind-Leistung aktueller LED-Treiber

Im Rahmen der durchgeführten Messreihen zur Bestimmung der Blindleistung wiesen alle drei untersuchten Treiber aus den verschiedenen Preissegmenten bei konstantem Lichtstrom in Abhängigkeit der Farbtemperatur (2.200 K bis 5.000 K) stets ein stabiles Verhalten auf. Die Performance zwischen Eldoled (hochpreisiges LED-Treiber-Modell) und Tridonic (Mittelpreissegment) erwies sich dabei als vergleichbar, bzw. wies das Tridonic-Modell gar höhere Lichtausbeuten bei einem geringeren Blindleistungsanteil auf. Das Sunricher-Modell wies hingegen in allen Untersuchungen die energetisch niedrigste Performanz auf. Der Eldoled-LED-Treiber wies jedoch im Dimm-Level-Bereich kleiner 20% die höchste Lichtausbeute (lm/W) auf.

Unter Beachtung eines integralen Steuerungskontextes bedeutet dies, dass zur Erhöhung der energetischen Effizienz von Treiberbausteinen, die Auswahl der Komponenten auf einer möglichst genauen Definition der Zielanwendung beruhen sollte. Besteht bspw. im Zielobjekt eine fixe Raumnutzungszeit, bei der stets ein hoher Tageslichteintrag gesichert ist und demnach nur wenig Kunstlicht ergänzt werden muss, ist der Eldoled-Treiber aufgrund seiner besseren Performance im unteren Dimm-Bereich zu präferieren. Bestehen in der Zielanwendung jedoch längere Phasen, in denen ein höherer KL-Bedarf angenommen werden kann, erweisen sich die performanten Ansteuerungsbereiche des Treibers als nicht adressierbar. Dementsprechend wäre der untersuchte Tridonic-Treiber aufgrund seiner geringeren Blindleistung in hohen Dimm-Bereichen zu bevorzugen.

5.2. Evaluierungsergebnisse

Hinsichtlich der konfundierenden Einflussfaktoren unterscheiden sich energetische und wirkbezogene Evaluierung maßgeblich. Während sich bei energiebezogenen Untersuchungen sowohl individuelles Nutzerverhalten (z.B. Arbeitsstrukturen oder Anwesenheiten am Arbeitsplatz) als auch Tageslichtverfügbarkeit zur möglichst applikationsnahen Abbildung der Realverbräuche als notwendig erweisen, zielen wirkbezogene Evaluierungen auf einen systematischen Ausschluss dieser verzerrenden Einflüsse ab. Diesbezüglich erfolgte im Rahmen des Projekts LessIsMore eine entkoppelte Evaluierung der beiden Zielkriterien. Zur Evaluierung der Energieeffizienz der entwickelten Steuerungslogik wurde das Bartenbach Living Lab herangezogen, welches eine Untersuchung innerhalb eines realen Arbeitskontextes gestattete. Die Evaluierung der nicht-visuellen Wirkung der eingesetzten Prototypen erfolgte dagegen im Rahmen einer kontrollierten Laborstudie unter Ausschluss von Tageslicht.

5.2.1. Evaluierung der entwickelten Steuerungslogik

Gewerkespezifische Energieverbräuche

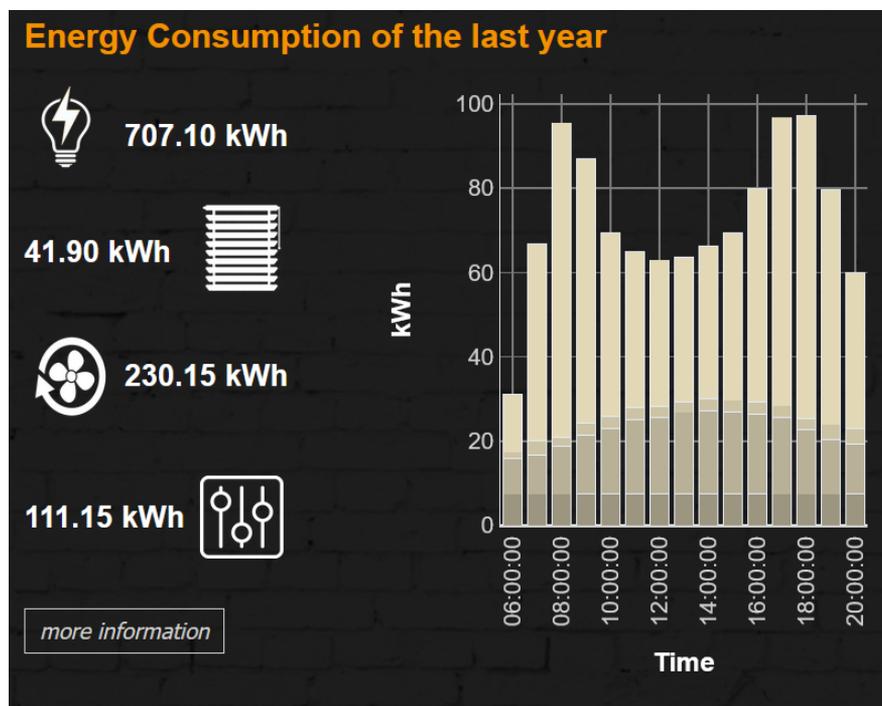
Erweiterte Untersuchungen zum Energiebedarf der einzelnen Gebäudeaktorik führt auf, dass sich je nach Gewerk unterschiedliche Effekte abzeichnen (**Abbildung 6**). Der Kunstlichteinsatz ist in den frühen Morgenstunden (06:00 Uhr-07:00 Uhr) und späten Abendstunden (19:00 Uhr-20:00 Uhr) sehr

gering, was auf die geringe Anwesenheit durch die Gleitzeitphase zurückzuführen ist. Innerhalb der Kernarbeitszeit von 08:00 Uhr bis 10:00 Uhr und von 15:00 Uhr bis 17:00 Uhr ist der Energiebedarf dagegen stark erhöht, da die 500 lx im Jahresdurchschnitt noch nicht vom Tageslicht vollständig gedeckt werden. Über die Mittagszeit werden im Jahresdurchschnitt hohe Beleuchtungsstärken einzig vom Tageslicht erzielt, was den Energiebedarf des Kunstlichts wieder absenken lässt.

Da im Bartenbach Living Lab der direkte Sonnendurchschlag durch statische Lichtschwerter an der Gebäudehülle prinzipiell vermieden wird, erweist sich der Energiebedarf des Tageslichtsystems als sehr gering. Zudem ist die Verteilung auf den Tag im Jahresdurchschnitt zu jeder Uhrzeit in einem ausgewogenen Verhältnis vorhanden, was im Wesentlichen auf die automatisierte Sonnenstandsnachführung der Screens zurückzuführen ist.

Der Energiebedarf des Lüftungssystems, welches sowohl zur Kühlung als auch zum Luftaustausch verwendet wird, steigt von den Morgenstunden zur Mittagszeit an und fällt zu den Abendstunden hin ab. Die Steuerlogiken wurden dabei an die Anwesenheit der NutzerInnen gekoppelt und korrelieren dementsprechend mit den geloggtten Anwesenheitsprofilen. Die Gebäudesteuerung samt Sensorik ist konstant über 24h und veranschlagt 1,09 kWh/m²a.

Abbildung 6: Tageszeitlicher Verlauf des Energiebedarfs im Bartenbach Living Lab (getrennt nach Gewerk (Kunstlichtsystem, Tageslichtsystem, Lüftung und Steuerung/Sensorik); Summiert über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)

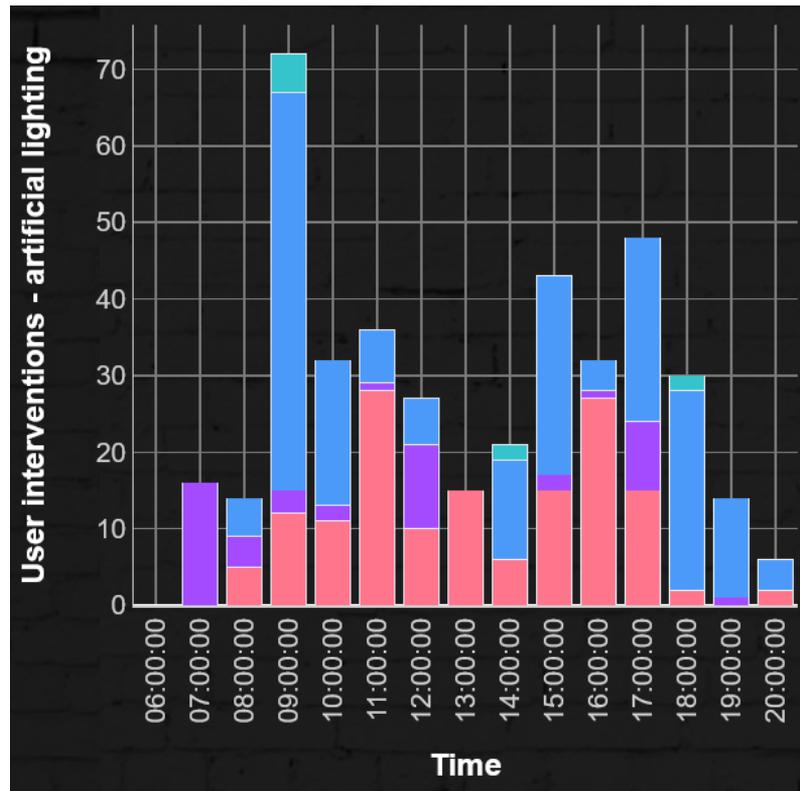


Nutzereingriffe

Zur besseren Abbildung von individuellen Lichtpräferenzen wurde eine personenbezogene Steuerbarkeit pro Kunstlichtzone umgesetzt. Analysen der Systemeingriffe ins Kunstlichtsystem führen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Beleuchtungszonen auf (**Abbildung 7**). Während in manchen Beleuchtungszonen kaum bis keine Nutzerinterventionen mit dem

Kunstlichtsystem verzeichnet werden, weisen andere zu bestimmten Zeiten gehäufte Systemeingriffe auf. Im Allgemeinen ergeben sich jedoch 0,156 Eingriffe pro Person und Tag ins Kunstlichtsystem, was für die Effektivität der Nutzerabbildung in der Steuerlogik spricht. Negative Effekte auf die energetische Systemperformanz, verursacht durch Systemeingriffe in angedachte Steuerlogiken, bleiben demnach im Studienobjekt durch die Zonierung und umgesetzte Logik aus.

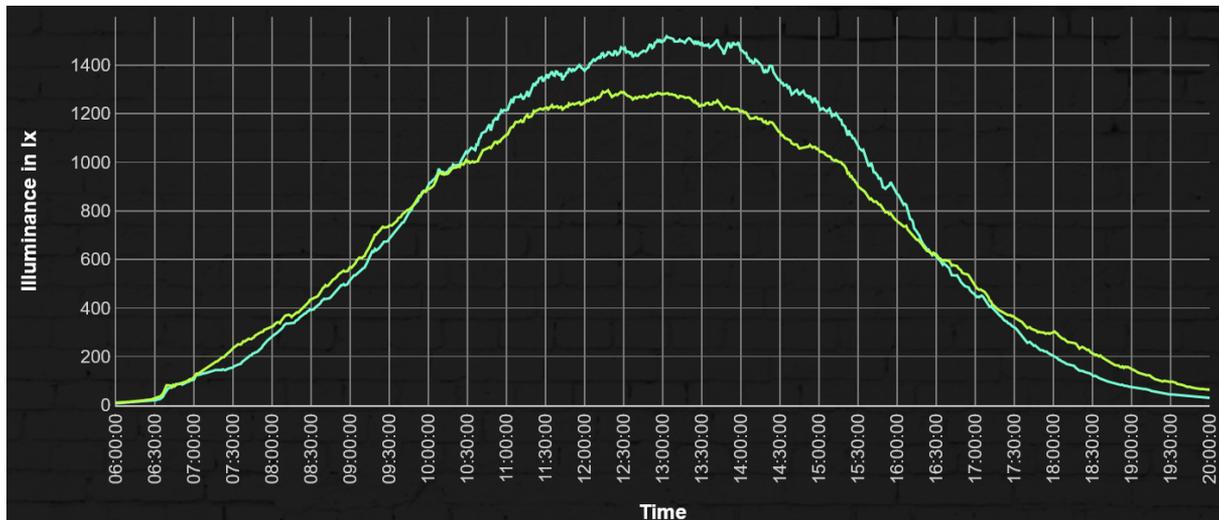
Abbildung 7: Tageszeitlicher Verlauf der Nutzereingriffe ins Kunstlichtsystem im Bartenbach Living Lab getrennt nach den einzelnen Beleuchtungszonen (Mittel über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)



Energetische Effizienz

Die Betrachtung des tageszeitlichen Verlaufs der Beleuchtungsstärke Bartenbach Living Lab (**Abbildung 8**) zeigt, dass oberlichtseitig wie fensterseitig die Vorgabe der normativen Beleuchtungsstärke von 500 lx (EN12464) zwischen 09:00 Uhr-17:00 Uhr erfüllt ist. Über die Mittagszeit (11:00 Uhr-15:00 Uhr) werden sogar tageslichtbasierte Beleuchtungsstärken über 1.000 lx erreicht. Daraus resultiert ein reduzierter Kunstlicheinsatz, der vornehmlich auf die Tageszeitrandbereiche (Gleitzeitphase der NutzerInnen) fällt (06:00 Uhr-09:00 Uhr und 17:00 Uhr-20:00 Uhr). Dies wird am tageszeitlichen Verlauf der Kunstlicht-Dimmung deutlich (**Abbildung 9**), welcher gegenläufig wie die gemessenen Beleuchtungsstärken verläuft, d.h. ab 08:00 Uhr bis etwa 10:30 Uhr sinkt der KL-Einsatz deutlich, bevor dieser in den Abendstunden (ab ca. 16:00 Uhr) wieder ansteigt. Trotz der hohen tageslichtbezogenen Beleuchtungsstärken wird über die Mittagszeit nicht als Mittel ein Kunstlicheinsatz von Null detektiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mittels manueller Übersteuerung vereinzelt höhere Beleuchtungsstärken eingestellt werden.

Abbildung 8: Tageszeitlicher Verlauf der horizontalen Beleuchtungsstärke im Bartenbach Living Lab (Mittel über alle Beleuchtungszone, getrennt nach Oberlichtseite (grün) und Fensterseite (türkis); Mittel über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)



Durch den reduzierten Kunstlichteinsatz ergibt sich, dass der Beleuchtungseinsatz mit rund 3,65 kWh/m²a (zzgl. 1,09 kWh/m²a für die Gebäudesteuerung) im Vergleich zum Benchmark für energieeffiziente Beleuchtung (10 kWh/m²a) sehr gering ist. Ohne tageslichtabhängige Steuerung liegt der Referenz-Energiebedarf unter Berücksichtigung der erfassten Anwesenheitsprofile bei 16,5 kWh/m²a. Ähnliche Überlegungen gelten für den Einfluss der Anwesenheitssensoren auf den Energiebedarf für das Kunstlicht. Das heißt die positiven Auswirkungen der Sensoren und der Steuerung auf den Energiebedarf der Beleuchtung überwiegen deutlich den technologiebezogenen Eigenenergiebedarf. Die gesteigerte Effizienz der entwickelten Steuerungslogik konnte demnach vollumfänglich nachgewiesen werden.

Abbildung 9: Tageszeitlicher Verlauf des Kunstlicht-Dimmung (Mittel über alle Beleuchtungszone, getrennt nach Oberlichtseite (grün) und Fensterseite (türkis); Mittel über den Betrachtungszeitraum 07.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)

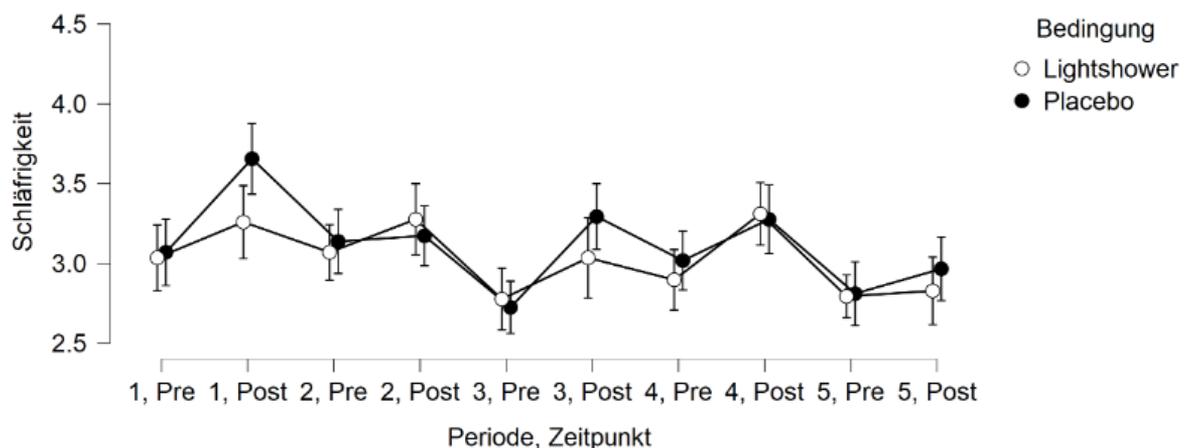


5.2.2. Nicht-visuelle Wirkung von kurzzeitigen Lichtduschen

Einzelerggebnisse der durchgeführten Testungen

Die Versuchspersonen reagierten während der Lichtdusche in beiden kognitiven Reaktionszeittests (PVT und GNT) in allen zeitlichen Perioden signifikant schneller (PVT: $F(1.000, 57.000) = 4.161, p = .046$; GNT: $F(1.000, 57.000) = 2.837, p = .036$) als während der Kontrollbedingung. Der Unterschied zwischen den zeitlichen Perioden war nicht signifikant ($F(2.905, 165.575) = 1.923, p = .130$). Dies wird auch auf subjektiver Ebene durch die Bewertung der individuell empfundenen Schläfrigkeit (KSS) bestätigt. Bei der deskriptiven Betrachtung der Prä- und Post-Messungen der einzelnen Perioden fällt auf, dass in der Post-Messung in beiden Interventionsbedingungen stets höhere Werte angegeben wurde (**Abbildung 10**). Die größte Differenz zwischen Lichtdusche und Kontrollbedingung findet sich in der Post-Messung in den Perioden 1 (Wilcoxon Test; $U = -2.405, p = .016$) und 3 (Wilcoxon Test; $U = -2.405, p = .022$) mit signifikant höherer Schläfrigkeit in der Kontrollbedingung über denen der Lichtduschenbedingung (siehe auch Abbildung 23).

Abbildung 10: Periodenbezogene Prä- und Postmessung der subjektiv empfundenen Schläfrigkeit mittels der Karolinska Sleepiness Scale (KSS; 7-Punkt Likert Skala)



Auch die Überprüfung der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung (NASA TLX) ergab, dass die Werte der Gesamtskala (ohne körperliche Belastung) während der Lichtduschenbedingung in allen zeitlichen Perioden unter denen der Kontrollbedingung (Durbin Test; $F(9, 512) = 2.036, p = .034$) liegen. Des Weiteren sinkt die subjektive Arbeitsbelastung in beiden Interventionsbedingungen mit zeitlichem Verlauf des Experiments, mit den niedrigsten Werten jeweils in der letzten Periode.

Bezüglich der Stimmung (PANAS) konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Lichtbedingungen identifiziert werden. Auch in Bezug auf auftretende Nebenwirkungen (Fragebogen zu asthenopischen Beschwerden) unterscheiden sich die Lichtbedingungen hinsichtlich des Gesamtwertes nicht ($t(42) = -.074, p = .941$). Nur in der Subskala Blendung trat ein signifikanter Unterschied auf ($t(42) = -2.412, p = .020$), vernachlässigbar gering ausgeprägt ist.

Limitationen

Für die vorliegende Untersuchung wurden mehrere Limitationen identifiziert.

Erstens wurde die Erhebung aufgrund der in Österreich geltenden Kontaktbeschränkungen von März bis Mai durchgeführt und nicht wie geplant in den Wintermonaten. Eine Durchführung in diesem Zeitraum würde eventuell zu stärkeren Effekten [36] führen und die praktische Relevanz erhöhen.

Des Weiteren klagten auch mehrere Personen nach der Untersuchung über die lange Dauer des Experiments sowie einen Motivationsverlust durch die Monotonie der Aufgaben. Für zukünftige Studien sollten Möglichkeiten gefunden werden die Motivation der ProbandInnen länger aufrechtzuerhalten oder deren Einfluss durch einen anderen Versuchsaufbau entsprechend zu begrenzen.

Ferner muss festgehalten werden, dass den Versuchspersonen Unterschiede zwischen den beiden Lichtbedingungen auffielen. Trotz diesen wahrgenommenen Unterschieden wussten die Teilnehmenden jedoch nicht, welche Intervention die Experimental- und welche die Kontrollbedingung darstellte. Dementsprechend ist eine Verzerrung durch die Erwartungshaltung der Versuchspersonen sehr unwahrscheinlich.

Fazit

Die durchgeführte Laborstudie zur Evaluierung der nicht-visuellen Wirkung ist unserer Kenntnis nach die erste Lichtinterventionsstudie mit einer aktiven Placebobedingung. Das Fehlen einer adäquaten Kontrollbedingung wurde in der Lichtforschung vielfach bemängelt und so konnte eine Erwartungshaltung der Versuchspersonen als Erklärung für gefundene Effekte bis heute nie eindeutig ausgeschlossen werden. Durch dieses neue Paradigma kann der psychologische Einfluss der Intervention nun vernachlässigt und die Effekte auf eine biologische Ursache zurückgeführt werden.

Die untersuchten Parameter implizieren verschiedene zugrundeliegende Wirkmechanismen für subjektive und objektive Parameter der Aufmerksamkeit. Subjektive Verbesserungen der Wachheit traten als Ergebnis eher kurzfristig nach einer Dishabituation auf, wenn die Sensibilisierung gegenüber einer hohen Lichtintensität maximal ist. Da sich die objektiven Parameter dagegen über den gesamten Verlauf der Untersuchung verbesserten, kann in Summe die höhere Lichtdosis für die erzielten positiven Effekte verantwortlich gemacht werden. Dies sollte in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden, um die bestmögliche Intervention für die Aktivierung der jeweiligen Domäne zu wählen. Für den Einsatz heller Lichtduschen mit der eingesetzten Beleuchtungstechnologie ist außerdem hervorzuheben, dass keine nennenswerten Nebenwirkungen auftraten und diese somit für die weitere Verwendung in Forschung und Praxis geeignet ist.

Die wichtigste Erkenntnis aus der vorliegenden Untersuchung ist jedoch der Nachweis nicht-visueller Lichteffekte auf subjektiver und objektiver Ebene am Tag. Die Versuchspersonen reagierten schneller in beiden kognitiven Leistungstests, fühlten sich kurzfristig wacher und nahmen die Belastung durch die gestellten Aufgaben als geringer war als in der weniger hellen Kontrollbedingung. Dies gelang trotz der recht hohen Beleuchtungsstärke, verglichen mit den in der bisherigen Forschung üblichen Intensitäten der Kontrollbedingungen von maximal einigen hundert Lux. Die gefundenen Effekte sind also eindeutig auf diesen Unterschied in den Beleuchtungsstärken und der somit etwa dreimal so hohen gesamten Lichtdosis zurückzuführen. Die nicht-visuelle Wirkung der in LessIsMore entwickelten Steuerungslogik zur Erbringung von lichtbezogenen Kurzeffekten konnte dementsprechend nachgewiesen werden.

5.3. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms

In den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU-27) entfällt rund 10% des Gebäudeenergiebedarfs auf die Beleuchtung, davon sind wiederum 21% dem tertiären Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung zuzuschreiben [37]. Zur Erreichung klima- und umweltpolitischer Zielsetzungen stehen daher in der Gebäudebranche zunehmend eine effizientere Ressourcennutzung, die Steigerung der Arbeitsproduktivität bei gleichzeitiger Senkung der Betriebskosten sowie einer Gewährleistung der Sicherheit der Arbeitnehmer im Fokus. Der Einsatz automatisierter Lichtsteuersysteme bietet hierbei das Potential, entscheidende Beiträge zu leisten, sollten die Energieeffizienz gesteigert und die Beleuchtungskosten gleichzeitig reduziert werden können.

Grundsätzlich gilt es heute als nachgewiesen, dass automatisierte Beleuchtungssteuerungen den Energiebedarf durch gezielte Schaltung von Kunstlicht- und Tageslichtaktoren in Abhängigkeit zu Nutzerpräsenz und Tageslichtverfügbarkeit reduzieren können. Eine sensorbasierte Zu- und Abschaltung in Abhängigkeit der Präsenz kann beispielsweise bereits Einsparungen von 20 bis 35 % [5] und tageslichtgesteuerte Systeme 30 bis 60 % erzielen [38]. Der Energieverbrauch von Beleuchtungssystemen ist dementsprechend stark von der gewählten Lichtsteuerung, der sensorischen Ausstattung und der implementierten Logik abhängig [6]. Zudem können mit effizienter Tageslichtnutzung durch Oberlichter, Fenster oder Lichtlenksystemen ebenfalls erhebliche Mengen an Energie eingespart werden [39]. Neben den direkten Energieeinsparungen vom Kunstlichtsystem, können sich zudem indirekte Energieeinsparung durch Reduzierung der Kühlleistung ergeben [6].

Derzeit werden die einzelnen Gewerke jedoch meist separat betrachtet und gesteuert. Mehrere Steuerungen können jedoch zu einem höheren Energiebedarf führen als eine einzelne Steuerung [38]. Dies liegt zum einen daran, dass mehrere Hardware-Komponenten mit Energie versorgt werden müssen, aber auch daran, dass Wechselwirkungen zwischen den Gewerken (Tageslicht, Kunstlicht, Heizung, Kühlung und Lüftung) nicht ausreichend beachtet werden [5]. Auch derzeitige Beleuchtungssteuerungen konzentrieren sich hauptsächlich auf Dynamiken zwischen den Gewerken Tages- und Kunstlicht und es findet kein Informationsaustausch zwischen verschiedenen Steuersystemen statt. Integrale Systeme bieten die Möglichkeit die Wechselwirkungen zu berücksichtigen und damit aktuell nicht adressierte Potentiale im Bereich Energieeffizienz abzurufen [30].

Zudem stehen passive solare Gewinne, die durch die Fassade übertragen werden, in direkter Abhängigkeit zur Größe der Glasflächen und der Ausrichtung der Glasflächen in Bezug zur Sonnenposition [40]. Da übermäßige Sonneneinstrahlung Blendung und Überhitzung verursachen kann, werden zur Vermeidung von Störeinflüssen grundsätzlich Fassadensysteme eingesetzt, welche jedoch die Möglichkeit des Sichtkontakts nach außen zur Erhaltung des Komforts bei gleichzeitiger Abschattung nicht unterbinden sollten. Es gilt demnach den solaren Eintrag durch geeignete Fassadensysteme und Fassadensteuerungen so zu regulieren, um im Sommer Kühllasten und im Winter den Heizbedarf zu reduzieren und gleichzeitig möglichst viel Tageslicht einzulassen, um den Kunstlichtbedarf zu reduzieren und den Komfort der NutzerInnen sicherzustellen. Die Tageslichtsteuerung nimmt daher in der integralen Systembetrachtung eine entscheidende Rolle ein, da das Gewerk Tageslicht einen maßgeblichen Einfluss auf die energetische Performanz der Gewerke Kunstlicht, Heizung und Klima hat [5].

Darüber hinaus erweisen sich effektivere Konzepte zur integralen Steuerung jedoch auch im Hinblick auf die Erhaltung der allgemeinen Gesundheit als ausschlaggebend. Menschen in Westeuropa verbringen heute ca. 90 Prozent des Tages in Innenräumen, wovon etwa ein Drittel auf den Arbeitsplatz entfällt. Besonders in den Wintermonaten haben Büroarbeitskräfte so an fünf von sieben Tagen demnach kaum Chancen auf eine natürliche Lichtexposition im Freien. Eine ausreichende Menge von biologisch wirksamem Licht erweist sich jedoch als unerlässlich für die Synchronisierung unseres inneren Rhythmus mit dem natürlichen Hell-Dunkel-Zyklus, der Gesundheit [41], der Stimmung [42] und wirkt sich außerdem positiv auf Aktivität und Aufmerksamkeit aus [32].

Die Kompensation des Mangels an Sonnenlicht mit künstlicher Beleuchtung erweist sich in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten von der Beeinflussung der Schlafqualität [43], über die Therapie von Depressionen [44] bis zur Steigerung der Aufmerksamkeit und kognitiven Leistung [45] als bestätigt. Gleichzeitig stehen biologisch wirksame Beleuchtungskonzepte jedoch energetischen Zielsetzungen diametral gegenüber. Eine Abschätzbarkeit gegenseitiger Wirkeinflüsse sowie eine darauf basierende Anforderungsdefinition erweisen sich heute noch aufgrund fehlenden Knowhows als schwierig umzusetzen. In der Folge basieren aktuelle Planungen meist auf Erfahrungswerten oder allgemeinen Annahmen, welche eine optimierte Steuerungslogik meist maßgeblich verfehlen.

Mit dem Ansatz einer tiefgreifenden gesamtheitlichen Betrachtung der verschiedenen Ansätze in Verbindung zu aktuellen Technologien und Konzepten zielte das Projekt LessIsMore darauf ab, zentrale Beiträge zu den übergeordneten Programmzielen von „Stadt der Zukunft“ beizusteuern. Sowohl Lebensqualität, Produktivität als auch der damit zusammenhängende Bedarf nach Energie und Ressourcen sind essentielle Themen für zukünftige Städte, welche innerhalb der Projektlaufzeit vollumfänglich adressiert werden konnten.

6 Schlussfolgerungen

Sowohl energetische Zielsetzungen als auch gesundheitliche Anforderungen stellen aktuell maßgebliche Planungskriterien im Kunst- und Tageslichtbereich dar. Auch wenn im Hinblick auf beide Kriterien bereits umfangreiche Ergebnisse aus internationalen Forschungsprojekten vorliegen, welche sowohl energetische Potentiale als auch gesundheitliche Wirkungen von Kunst- und Tageslichtsystemen bestätigen, erweisen sich planungsbezogene Umsetzungen integraler Systeme aufgrund der gegensätzlichen Zielvorgaben jedoch nach wie vor als schwierig.

Mit den im Projekt LessIsMore erzielten Ergebnissen konnte das Projektteam maßgebliches Knowhow zu integralen Systemen in Verbindung zu applikationsspezifischen Anforderungen erarbeiten und in die internationale Wissensbasis einfließen lassen. Dies betrifft sowohl spezifische Potentiale zur Erhöhung der Energieeffizienz unter Aufrechterhaltung melanopischer Wirkfaktoren als auch erweitertes Wissen zu konfundierenden Faktoren, welche bis heute noch keine ausreichende Beachtung finden und die Ausschöpfung der adressierten Potentiale vermindern. Das Projekt LessIsMore konnte dementsprechend nicht nur zu einer Erweiterung der aktuellen Wissensbasis, sondern auch zur Formulierung zukunftsorientierter Forschungsfragen beitragen.

Den im Projekt wirkungsbezogen positiv evaluierten, kurzen Lichtinterventionen kann in diesem Kontext ein spezieller Stellenwert zugeschrieben werden, da sie im Gegensatz zu derzeitigen Ansätzen, welche eine ganztägig erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke zur Erzielung nicht-visueller Wirkungen verfolgen, mittels kurzzeitiger Erhöhung der Helligkeit erstmals das Potential bieten, energetische und wirkbezogene Steuerungsansätze zu verbinden und zu einer nachhaltigen Lösung der diametralen Steuerungsansätze beizutragen. In weiterer Folge bedeutet dies, dass diesbezügliche, planungsbezogene Entscheidungen nicht länger notwendig sind und sowohl energieeffiziente als auch gesundheitsfördernde Beleuchtungslösungen umsetzbar werden. Aktuell erweist sich der diesbezügliche Wissenstand aber nach wie vor als zu gering, um eine eindeutige Empfehlung aussprechen zu können und es wird weitere Forschungsarbeiten in realen Umgebungen benötigen, um eine genauere Anforderungsdefinitionen zu erarbeiten.

Als Planungs-, Forschungs- und Entwicklungsunternehmen mit Bezug zu Kunst- und Tageslicht zielt Bartenbach immer darauf ab, die Forschungsergebnisse direkt in den Zielmarkt zu transferieren und in Anwendungen bereitzustellen. Die vorliegenden Projektergebnisse fließen dementsprechend maßgeblich in Zielsetzungen von Planungsvorhaben ein und können so zukünftig Arbeitnehmern und -gebern des adressierten, tertiären Sektors bereitgestellt werden. Die Ergebnisse des Projekts LessIsMore erweisen sich somit nicht nur zur Erreichung von österreichischen, europäischen und weltweiten Klima- und Umweltbestrebungen als relevant, sondern fokussieren zudem auf die gesundheitliche Förderung von Einzelpersonen und eine erhöhte Wirtschaftlichkeit von Unternehmen durch Verringerung des allgemeinen Energieverbrauchs.

Darüber hinaus adressieren die erreichten Ziele einen zentralen Wachstumsmarkt für die beleuchtungsnahe Industrie. Laut einer Marktstudie [46] sollte der globale Beleuchtungsmarkt bis zum Jahr 2020 ein geschätztes Volumen von € 82 Mrd. erreichen. Tatsächlich umfasst der Markt, angetrieben durch die steigenden Infrastrukturinvestitionen in den letzten Jahren, bereits ein weltweites Volumen von € 112 Mrd., mit der aktuellen Erwartung eines weiteren Wachstums im Prognosezeitraum 2023-2028 von 7,3 % [47]. Der Beleuchtungsmarkt wird bis 2028 voraussichtlich €

170 Mrd. erreichen. Mit ca. 18% des globalen Marktvolumens kann der potenzielle Markt für Bürobeleuchtung dahingehend für 2028 mit ca. € 30 Mrd. € beziffert werden. Dies entspricht einer Verdoppelung gegenüber den 2012 prognostizierten Annahmen [46].

Neben diesen wirtschaftlichen Verwertungen, welche durch die allgemeine Trägheit der Bauindustrie jedoch voraussichtlich erst nach einiger Zeit spürbare Änderungen nach sich ziehen werden, erfolgte die wissenschaftliche Verbreitung der Ergebnisse direkt nach dem eigentlichen Projektbearbeitungszeitraum mittels mehrerer Publikationen in internationalen Fachzeitschriften und peer-reviewed Journals sowie auf lichtbezogenen Kongressen und Fachtagungen [48, 49, 50, 51].

Darüber hinaus erwiesen sich die innerhalb des Projektes angesprochenen Inhalte wie bereits erwähnt nicht nur für die beleuchtungsnahe Industrie als relevant, sondern bieten durchaus das Potential im Rahmen einer integralen Betrachtung auch einen essentiellen Wert für andere steuerungsbezogene Gewerke darzustellen. Da das sensorisch aufgerüstete Living Lab mit dem angekoppelten Echtzeitdatenmonitoring diesbezüglich auch zur Erweiterung der Wissensbasis von beispielsweise Heizungs-, Lüftungs- und Klimasteuerungen und dementsprechend auf übergeordneter Ebene zu einer nachhaltigeren Gesellschaft beitragen kann, wurde nach dem Projektende beschlossen, Teilbereiche der erhobenen Daten in der maximal zur Verfügung stehenden Auflösung ohne Einschränkung öffentlich frei verfügbar zu machen. Die betroffenen Datensätze wurden in dieser Hinsicht mittels eines peer-reviewed Verfahrens wissenschaftlich publiziert, alle notwendigen Metainformationen bereitgestellt und die Verbreitung durch eine beschreibende Publikation im Journal „Data in Brief“ gefördert [52]. Die Datensätze können aktuell unter <https://doi.org/10.17632/jvg8dmm3xp.1> in einer Erstversion bezogen werden.

Konkret werden durch diesen Schritt folgende potenzielle Applikationen gefördert:

- Verbesserte Bewertung thermischer Komfortpräferenzen von NutzerInnen und Analyse der kausalen Zusammenhänge zwischen den klimatischen Außenbedingungen und dem Fensteröffnungsverhalten
- Bewertung von thermischen Auswirkungen in Gebäuden mit großen Fensterflächen, zum Beispiel zur Festlegung von Nachrüstungsstrategien
- Entwicklung von Vorhersagemodellen oder prädiktiven Steuerungsansätzen in Kombination zu Gebäudesimulationen
- Ableitung von Energieeinsparungspotentialen in anderen Gewerken und von Maßnahmen zur Verbesserung des Nutzerkomforts
- Entschlüsselung kausaler Beziehungen zwischen energetischen, visuellen und nicht-visuellen Vorteilen eines Bürogebäudes mit hohem Tageslichtanteil und dem Raumklima

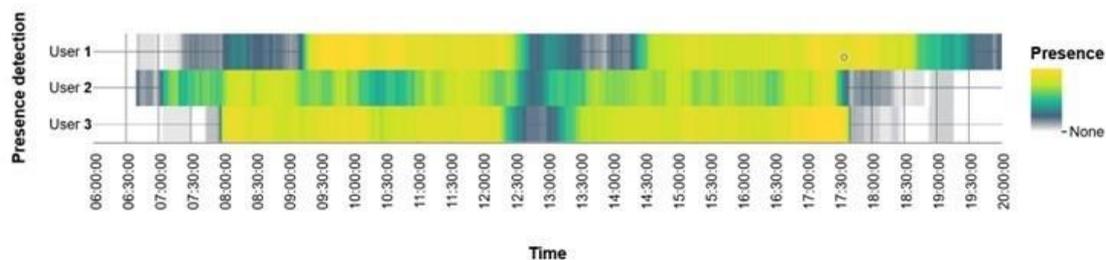
Die Umsetzung des Projekts LessIsMore ermöglichte dementsprechend nicht nur die zielführende Adressierung eines aktuell maßgeblichen wirtschaftlichen Wachstumsmarktes, sondern auch die Förderung differenzierter wissenschaftlicher Gebiete, deren Beteiligung sich an der Erzielung einer nachhaltigen Gesellschaft als unbedingt erforderlich erweist.

7 Ausblick und Empfehlungen

Trotz eines differenzierten internationalen Forschungsbestrebens und der innerhalb von LessIsMore erzielten Ergebnisse, erweist sich die wissenschaftliche Erkenntnislage über das Ausmaß der gegenseitigen Beeinflussung von energetischen und gesundheitlichen Wirkfaktoren als noch nicht ausreichend erforscht. Ein Umstand, der vorrangig darauf zurückzuführen ist, dass die zugehörigen Key Performance Indikatoren von Beleuchtungssystemen hochgradig von individuellen Nutzercharakteristiken (z.B. Beleuchtungspräferenzen [12, 13] und Arbeitsstrukturen [53], vergleiche auch **Abbildung 11**) abhängig sind und sich diese Abhängigkeiten sogar in einigen Fällen über den eigentlichen Applikationsbereich hinaus erstrecken können (z.B. Pausen- und Freizeitgestaltung bei der Erzielung der individuellen täglichen Lichtdosis). Die diesbezüglichen Zielkriterien erweisen sich deswegen heute aufgrund fehlenden Wissens als nach wie vor nicht eindeutig definierbar und wurden auch im vorliegenden Forschungsprojekt nicht adressiert.

Als Ergebnis basieren aktuelle Beleuchtungsplanungen und -simulationen vorwiegend auf stark verallgemeinerten Annahmen zu Nutzerinformationen [54], welche sich zwar zur wissenschaftlichen Vergleichbarkeit der Performance verschiedener Gebäude einer definierten Applikation als dienlich erweisen, im Einzelfall aber oftmals deutlich eine passende Abbildung der realen Anforderungen verfehlen. Die sich aus diesen fehlerhaften Annahmen ergebenden Performance Gaps können bspw. im Hinblick auf den Energieverbrauch eines Gebäudes bis zu 80 % [11, 55] betragen und stören somit die energetische Planbarkeit von Kunstlichtlösungen erheblich. Zudem bleibt die resultierende Diskrepanz aufgrund aktuell fehlender erweiterter Inbetriebnahmen (d.h. Evaluierungen auf Basis eines Systemmonitorings im laufenden Betrieb) weitestgehend unerkannt oder führt zu ressourcen- und kostenintensiven nachträglichen Anpassungen von Steuerungen im laufenden Betrieb, um die fehlerhaften Annahmen der Entwurfs- und Planungsphase auszugleichen.

Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Fragmentierung individueller Anwesenheiten am Arbeitsplatz; bei der Darstellung handelt es sich um Realdaten, die im Bartenbach Living Lab im Rahmen des Projekts LessIsMore erhoben wurden; aktuelle Simulationsmodelle nehmen vergleichend bspw. eine 100%-ige Anwesenheit zwischen 07:00 und 18:00 Uhr an [54]



Zudem erfolgen gesundheitsbezogene Bewertungen von Kunst- und Tageslichtlösungen aktuell nur unter Beachtung von innerhalb der Applikation erhaltenen Lichtdosen. Die Definition der notwendigen hohen vertikalen Beleuchtungsstärken zur Erzielung nicht-visueller Lichteffekte während des Tages ergibt sich demnach aus der zeitlichen Beschränkung und dem zugrundeliegenden Aspekt, dass dadurch mittels einer rezeptorischen Sättigung negativ wirkenden Lichteinflüssen zu kritischen Zeitpunkten (ca. 2 Stunden vor dem Schlafen) vorgebeugt werden kann (vgl. dazu auch [56]). Bis

heute besteht jedoch keine eindeutige Erkenntnis darüber, ob auf Basis realer Verhaltensmuster und Umgebungsbedingungen abendlich negativ einwirkende Faktoren auftreten oder in welchem Ausmaß diese in tagesbezogenen Beleuchtungssystemen berücksichtigt werden müssen.

Zur weiterführenden Optimierung von sowohl energetischen als auch gesundheitlichen Zielen, erweist es sich dementsprechend als erforderlich, eine umfassende Abbildung von nutzerbezogenen Parametern auf 24-stündiger Basis zu gewährleisten. Dies würde neben der Quantifizierung von gesundheitsbezogenen Ruhe-Aktivitäts-Zyklen und allgemeinem Schlafverhalten auch die qualitative Erhebung außerhalb der eigentlichen Applikationsbereiche erhaltenen Lichtdosen erlauben. Dadurch werden konfundierende Einflüsse auf die eigentlichen Zielkriterien moderner Beleuchtungsanlagen erstmals vollumfassend evaluierbar und die wechselseitigen Anforderungen von gesundheitsbezogenen und energetischen Zielgrößen können innerhalb von Planungsprozessen besser gegeneinander abgestimmt und multidimensional optimiert werden.

Zudem könnten diesbezüglich auch bis heute fehlende Abbildungen von Steuerungsprozessen in Simulationsumgebungen vorgenommen werden. Da im Normalfall im Rahmen von Planungsprozessen von Beleuchtungsanlagen nicht nur die Spezifikation in Bezug auf die Beleuchtungselemente vorgenommen, sondern auch eine grundlegende Anforderung an die Implementierung von Steuerungslogiken abgeleitet wird, erweist sich eine Beachtung von Steuerungsaspekten in Simulationsumgebungen als unbedingt erforderlich, um die energetische Performanz von Beleuchtungsanlagen ausreichend genau abschätzen zu können. Auf Basis aktueller verallgemeinerter Nutzerannahmen (z.B. 100% Anwesenheitswahrscheinlichkeit am Arbeitsplatz zwischen 07:00 und 20:00 Uhr [54]) erweisen sich diesbezügliche Abschätzungen jedoch nicht als nicht umsetzbar, da sie weder reale Anforderungen referenzieren noch eine ausreichende Dynamik aufweisen, um veränderungsbezogene Steuerungseffekte in Simulationsprozessen abzubilden. Als Resultat bleiben energetische und gesundheitliche Auswirkungen von Steuerungsstrategien, wie z.B. Veränderungen von Kunstlicht-Einschaltzeiten oder Dauer und Anzahl von Nachlaufzeiten, heute in Simulationsprozessen unbeachtet. Ein Aspekt, unter dem das Auftreten von aktuellen Performance Gaps aufgrund einer unzureichenden Realitätsnähe von aktuellen Simulationsprozessen deutlich wird.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mit den Prototypen ausgestatteter Doppelarbeitsplatz in Bartenbachs Laborräumlichkeiten; Darstellung der veränderlichen Farbtemperatur der Rückwand von 2.200 K (links) bis 5.300 K (rechts)	15
Abbildung 2: Außenansicht der Südfassade des Bartenbach F&E Gebäudes in Aldrans, Österreich ...	16
Abbildung 3: Darstellung des Studiendesigns	19
Abbildung 4: Kosten/Verbrauchs-Diagramm der 29 in LessIsMore untersuchten PIR-Sensoren	23
Abbildung 5: Darstellung der Amortisationszeiten der Sensorik einer sowohl anwesenheitsbasierten als auch tageslichtangepassten Steuerung in Bezug auf eine rein manuelle Steuerung im Best bzw. Worst-Case Szenario	24
Abbildung 6: Tageszeitlicher Verlauf des Energiebedarfs im Bartenbach Living Lab (getrennt nach Gewerk (Kunstlichtsystem, Tageslichtsystem, Lüftung und Steuerung/Sensorik); Summiert über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)	27
Abbildung 7: Tageszeitlicher Verlauf der Nutzereingriffe ins Kunstlichtsystem im Bartenbach Living Lab getrennt nach den einzelnen Beleuchtungszonen (Mittel über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)	28
Abbildung 8: Tageszeitlicher Verlauf der horizontalen Beleuchtungsstärke im Bartenbach Living Lab (Mittel über alle Beleuchtungszonen, getrennt nach Oberlichtseite (grün) und Fensterseite (türkis); Mittel über den Betrachtungszeitraum 01.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr).....	29
Abbildung 9: Tageszeitlicher Verlauf des Kunstlicht-Dimmung (Mittel über alle Beleuchtungszonen, getrennt nach Oberlichtseite (grün) und Fensterseite (türkis); Mittel über den Betrachtungszeitraum 07.2021-12.2021; Beschränkt auf die Uhrzeit 06:00 Uhr-20:00 Uhr)	29
Abbildung 10: Periodenbezogene Prä- und Postmessung der subjektiv empfundenen Schläfrigkeit mittels der Karolinska Sleepiness Scale (KSS; 7-Punkt Likert Skala).....	30
Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Fragmentierung individueller Anwesenheiten am Arbeitsplatz; bei der Darstellung handelt es sich um Realdaten, die im Bartenbach Living Lab im Rahmen des Projekts LessIsMore erhoben wurden; aktuelle Simulationsmodelle nehmen vergleichend bspw. eine 100%-ige Anwesenheit zwischen 07:00 und 18:00 Uhr an [54].....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der installierten Sensortypen und zugehörigen Messgrößen	17
Tabelle 2: Kennwerte der zwei in der Laborstudie untersuchten Lichtbedingungen	19
Tabelle 3: Energetische und melanopische Kennwerte der evaluierten Planungsprojekte	22
Tabelle 4: Kosten, Verbräuche, Amortisationszeiten und langfristiges Einsparpotential des Referenzszenarios und der betrachteten Steuerungsszenarien	25

Tabelle 5: Im Projekt LessIsMore genutzte, externe Daten	44
Tabelle 6: Im Projekt LessIsMore generierte Daten.....	44
Tabelle 7: Beschreibung der sensorisch erhobenen Messwerte des Bartenbach Living Labs in Bezug zu Gebäudeparametern.....	45
Tabelle 8: Beschreibung der sensorisch erhobenen Messwerte des Bartenbach Living Labs in Bezug zu Nutzerparametern.....	46

Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency: Technology Roadmap Energy Efficient Building Envelopes. International Energy Agency, Paris 2013.
- [2] Allouhi A., El Fouih Y., Kousksou T., Jamil A., Zeraoui Y., Mourad, Y.: Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. In: Journal of Cleaner production, 109, 118-130, 2015.
- [3] UN Environment Programme (UNEP): Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers. CEDEX, Paris 2009.
- [4] Halonen L., Tetri E.: Energy efficient electric lighting for buildings. In: IEA International Energy Agency ECBCS Energy Conservation in Buildings and Community Systems, 2010.
- [5] Dubois M. C., Blomsterberg Å.: Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. In: Energy and buildings, 43(10), 2572-2582, 2011.
- [6] Ryckaert W. R., Lootens C., Geldof J., Hanselaer P.: Criteria for energy efficient lighting in buildings. In: Energy and buildings, 42(3), 341-347, 2010.
- [7] Konstantoglou M., Tsangrassoulis A.: Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 268-283, 2016.
- [8] Rubinstein F., Siminovitch M., Verderber R.: Fifty percent energy savings with automatic lighting controls. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 29(4), 768-773, 1993.
- [9] Galasiu A. D., Atif M. R., MacDonald R. A.: Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls. In: Solar Energy, 76(5), 523-544, 2004.
- [10] Reinhart C. F.: Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. In: Solar Energy, 77(1), 15-28, 2004.
- [11] Roisin B., Bodart M., Deneyer A., D'herdt P.: Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. In: Energy and Buildings, 40(4), 514-523, 2008.
- [12] Rea M. S., Rutledge B., Maniccia D.: Beyond daylight dogma. In: Solar Energy, 77(1), 15-28, 1998.
- [13] Onaygıl S., Güler Ö.: Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul. In: Building and environment, 38(7), 973-977, 2003.
- [14] Galasiu A. D., Newsham G. R., Suvagau C., Sander D. M.: Energy saving lighting control systems for open-plan offices: a field study. In: Leukos, 4(1), 7-29, 2007.
- [15] von Neida B., Maniccia D., Tweed A.: An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, 30(2), 111-125, 2001.
- [16] Galasiu A. D., Veitch J. A.: Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review. In: Energy and buildings, 38(7), 728-742, 2006.
- [17] Juslén H. T., Wouters M. C. H. M., Tenner A. D.: Preferred task-lighting levels in an industrial work area without daylight. In: Lighting Research & Technology, 37(3), 219-231, 2005.

- [18] Love J. A.: Manual switching patterns in private offices. In: *International journal of lighting research and technology*, 30(1), 45-50, 1998.
- [19] Nagy Z., Hazas M., Frei M., Rossi D., Schlueter A.: *Illuminating adaptive comfort: dynamic lighting for the active occupant*. 2014.
- [20] Boyce P. R.: Observations of the manual switching of lighting. In: *Lighting Research & Technology*, 12(4), 195-205, 1980.
- [21] Webb A. R.: Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. In: *Energy and Buildings*, 38(7), 721-727, 2006.
- [22] Chellappa S. L., Steiner R., Blattner P., Oelhafen P., Götz T., Cajochen C.: Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?. In: *PloS one*, 6(1), e16429, 2011.
- [23] Figueiro M. G., Nagare R., Price L. L. A.: Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness. In: *Lighting Research & Technology*, 50(1), 38-62, 2018.
- [24] Santhi N., Ball D. M.: Applications in sleep: How light affects sleep. In: *Progress in Brain Research*, 253, 17-24, 2020.
- [25] International Well Building Institute: WELL Building Standard v2.
<https://v2.wellcertified.com/wellv2/en/overview> (abgerufen am 17. Februar 2023; 16:48).
- [26] Zürcher C., Frank T.: *Bauphysik: Bau & Energie*. vdf Hochschulverlag AG, Zürich 2018.
- [27] ÖNORM: EN 15193-1 - Energetische Bewertung von Gebäuden. Austrian Standards, Wien 2017.
- [28] Knoche S., Sejkora G., Chrobak J., Schuhmacher B., Cozzoni E., Canazei M., Pohl W.: D3.2: Interface specifications of the MLA. *Repro-light*, Aldrans 2020.
- [29] Xu L., Pan Y., Yao Y., Cai D., Huang Z., Linder N.: Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. In: *Energy and Buildings*, 138, 127-139, 2017.
- [30] Shen E., Hu J., Patel M.: Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies. In: *Building Environment*, 78, 155-170, 2014.
- [31] Hammes S., Weninger J., Canazei M., Pfluger R., Pohl, W.: Die Bedeutung von Nutzerzentrierung in automatisierten Beleuchtungssystemen. In: *Bauphysik*, 42 (5), 209-217, 2020.
- [32] Cajochen C.: Alerting effects of light. In: *Sleep medicine reviews*, 11(6), 453-464, 2007.
- [33] Kantermann T., Forstner S., Halle M., Schlangen L., Roenneberg T., Schmidt-Trucksäss A.: The stimulating effect of bright light on physical performance depends on internal time. In: *PLoS One*, 7(7), e40655, 2012.
- [34] Smolders K. C., De Kort Y. A., Cluitmans P. J. M.: A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. In: *Physiology & behavior*, 107(1), 7-16, 2012.
- [35] Kompier M. E., Smolders K. C., de Kort, Y. A.: A systematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios. In: *Building and Environment*, 186, 107326, 2020.
- [36] Huiberts L. M., Smolders K. C. H. J., De Kort, Y. A. W.: Seasonal and time-of-day variations in acute non-image forming effects of illuminance level on performance, physiology, and subjective well-being. In: *Chronobiology international*, 34(7), 827-844, 2017.
- [37] Bellia L., Fragliasso F., Pedace A.: Lighting Control Systems: Factors Affecting Energy Savings' Evaluation. In: *Energy Procedia*, 78, 2645-2650, 2015.
- [38] Chew I., Karunatilaka D., Tan C. P., Kalavally V.: Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future. In: *Energy and Buildings*, 149, 180-191, 2017.
- [39] Wang L., Li H., Zou X., Shen X.: Lighting system design based on a sensor network for energy savings in large industrial buildings. In: *Energy and Buildings*, 105, 226-235, 2015.

- [40] Kuhn T. E.: State of the art of advanced solar control devices for buildings. In: *Solar Energy*, 154, 112-133, 2017.
- [41] Fahey C. D., Zee, P. C.: Circadian rhythm sleep disorders and phototherapy. In: *Psychiatric Clinics*, 29(4), 989-1007, 2006.
- [42] Vandewalle G., Maquet P., Dijk D. J.: Light as a modulator of cognitive brain function. In: *Trends in cognitive sciences*, 13(10), 429-438, 2009.
- [43] Figueiro M. G., Steverson B., Heerwagen J., Kampschroer K., Hunter C. M., Gonzales K., Rea M. S.: The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. In: *Sleep Health*, 3(3), 204-215, 2017.
- [44] Terman M.: Evolving applications of light therapy. In: *Sleep medicine reviews*, 11(6), 497-507, 2007.
- [45] Souman J. L., Tinga A. M., Te Pas S. F., Van Ee R., Vlaskamp, B. N.: Acute alerting effects of light: A systematic literature review. In: *Behavioural brain research*, 337, 228-239, 2018.
- [46] Baumgartner T., Wunderlich F., Jaunich A., Sato T., Bundy G., Grießmann N., Kowalski J., Burghardt S., Hanebrink J.: *Lighting the Way: Perspectives on the Global Lighting Market*. McKinsey & Company, Inc., New York City, 2012.
- [47] Expert Market Research: *Global Lighting Market Outlook*. <https://www.expertmarketresearch.com/reports/lighting-market> (abgerufen am 17. Februar 2023; 16:51).
- [48] Weninger J., Canazei M., Pohl W.: Effects of a Personalizable Workplace Lighting Concept on Acceptance, Usability, and Cognitive Performance. In: *Proceedings of the LuxEuropa 2022 European Lighting Conference, September 20-22, 2022, Prague, Czech Republic*, 348-354, 2022.
- [49] Weninger J., Pohl W.: Potenziale nutzerzentrierter Beleuchtungskonzepte: Die Vorteile und Möglichkeiten personalisierter Arbeitsplatzbeleuchtungen. In: *LICHT 5/2022*, 66-72, Richard Pflaum Verlag, München 2022.
- [50] Hammes S., Weninger J., Pfluger R., Pohl W.: Take the Right Seat: The Influence of Occupancy Schemes on Performance Indicators of Lighting in Open Plan Offices. In: *Energies* 2022, 15, 3378, 2022.
- [51] Pohl W., Dick M., Hubel N., Canazei M., Weninger J.: Wirkung einer personalisierten Beleuchtung mit „Lichtdusche“. In: *baua Bericht zum 11. Symposium Licht und Gesundheit*, 40-47, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund 2022.
- [52] Hammes S., Weninger J.: Measurement data on the window opening behavior and climate in a strongly daylit office building. In: *Data in Brief*, 46, 108794, 2023.
- [53] Hammes S., Hauer M., Geisler-Moroder D., Weninger J., Pfluger R., Pohl W.: The Impact of Occupancy Patternson Artificial Light Energy Demand-Simulation and Post-Occupancy-Evaluation. In: *Proceedings of the Building Simulation 2021 Conference, Bruges, Belgium*, 2021.
- [54] SIA Merkblatt: *Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich 2021.
- [55] Van Dronkelaar C., Dowson M., Burman E., Spataru C., Mumovic D.: A review of the energy performance gap and its underlying causes in non-domestic buildings. In: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1, 17, 2016.
- [56] DIN/TS 67600: *Ergänzende Kriterien für die Lichtplanung und Lichtenwendung in Hinblick auf nichtvisuelle Wirkungen von Licht*. 2022.

Abkürzungsverzeichnis

aPVT	auditory Psychomotor Vigilance Tasks
bspw.	beispielsweise
ca.	circa
CSV	Comma Separated Values
d.h.	das heißt
DA	Daylight Autonomy
E_h	horizontale Beleuchtungsstärke
EKG	Elektrokardiogramm
EML	Equivalent Melanopic Lux
FrACT	Freiburg Visual Acuity Test
GNT	Go / No-go Tasks
HCL	Human-centric Lighting
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
inkl.	inklusive
ipRGC	intrinsic photosensitive Retinal Ganglion Cells
IT	Informationstechnik
KL	Kunstlicht
KSS	Karolinska Sleepiness Scale
LED	Light-emitting diode
LENI	Light Energy Numeric Indicator
min	Minute
Mrd.	Milliarden
NASA-TLX	NASA Task Load Index
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
PWM	Pulsweitenmodulation
TL	Tageslicht
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

9 Anhang

9.1. Publikationszugriff

Zur Erhöhung der allgemeinen Projektreichweite und Sinne einer frei verfügbaren Wissenschaft wurden die im Projekt LessIsMore getätigten wissenschaftlichen Publikationen vorrangig unter dem Open Access Format durchgeführt. Die meisten publizierten Ergebnisse stehen demzufolge frei zur Verfügung und können unter folgenden Orten abgerufen werden:

- Hammes, S., Weninger, J., Pfluger, R. & Pohl, W. (2022): Take the Right Seat: The Influence of Occupancy Schemes on Performance Indicators of Lighting in Open Plan Offices. In: *Energies* 2022, 15, 3378. <https://doi.org/10.3390/en15093378>
Inhalt: Systematische Untersuchung zu individuellem Anwesenheitsverhalten am Arbeitsplatz als konfundierender Einflussfaktor auf die primären Key Performance Indikatoren Energieverbrauch und erhaltene Lichtdosis im Bartenbach Living Lab
Typ: Peer-reviewed Publikation
- Pohl, W., Dick, M., Hubel, N., Canazei, M. & Weninger, J. (2022): Wirkung einer personalisierten Beleuchtung mit „Lichtdusche“. In: *baua Bericht zum 11. Symposium Licht und Gesundheit*, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, pp. 40-47. <https://doi.org/10.21934/baua:bericht20220316>
Inhalt: Ergebnispublikation zur in LessIsMore durchgeführten Laborstudie zur Evaluierung der nicht-visuellen Wirkung von kurzzeitigen Lichtinterventionen mit hohen Helligkeiten auf subjektive und objektive und Arbeitsleistung
Typ: Conference Proceeding
- Hammes, S. & Weninger, J. (2023): Measurement data on the window opening behavior and climate in a strongly daylight office building. In: *Data in Brief*, 46, 108794. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30508>
Inhalt: Vollständige Beschreibung der innerhalb von LessIsMore im Bartenbach Living Lab erhobenen und veröffentlichten Daten zu verschiedenen Umgebungs- und Gebäudeperformanceparametern
Typ: Peer-reviewed Publikation

Zudem wurden neben Ergebnissen auch erhobene Teildatensätze zu Innen- und Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeiten und manuellen Fensteröffnungen veröffentlicht und unter der Lizenz CC BY 4.0 auf der Plattform Mendeley Data frei zur Verfügung gestellt.

- Hammes, S. & Weninger, J. (2022): Measurement data on the window opening behavior and climate in a strongly daylight office building. Mendeley Data, V1. <https://doi.org/10.17632/jvg8dmm3xp.1>
Inhalt: Hochaufgelöster, 2-jähriger Teildatensatz zu Umgebungs- und Gebäudeperformanceparametern im Living Lab
Typ: Datenpublikation

9.2. Data Management Plan (DMP)

Im Rahmen des Projekts LesslsMore wurden verschiedene Daten aus anderen Projekten genutzt oder innerhalb des Projektes generiert. Grundsätzlich folgt das Projekt dabei bei der weiterführenden Verwertung der generierten Daten den „FAIR“-Prinzipien und damit dem Ziel, die Daten frei zur Verfügung zu stellen. Dennoch werden einige Datensätze aus Gründen der weiteren internen Verwertung nicht oder nur unter besonderen Einschränkungen geteilt.

9.2.1. Datendokumentation

Extern verwendete Daten

Im Rahmen der Bewertung von energetischen Potentialen anhand des aktuellen Ist-Standes von umgesetzten Beleuchtungsplanungen wurden Informationen aus Projekten des Tasks 61: Integrated Solutions for Daylighting and Electric Lighting (<https://task61.iea-shc.org/>) des Solar Heating and Cooling Programmes der International Energy Agency herangezogen. Darüber hinaus wurden keine externen Quellen genutzt.

Tabelle 5: Im Projekt LesslsMore genutzte, externe Daten

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
Fact-Sheets von umgesetzten Projekten mit Bezug zu Kunst- und Tageslicht	Text / Numerisch	Kurzinformationen und KPIs (Energie und Licht)	IEA Task 61	öffentlich	https://task61.iea-shc.org/publications

Innerhalb des Projekts generierte Daten

In LesslsMore wurden Daten vorrangig im Rahmen der abschließenden Evaluierungen generiert. Dies betrifft sowohl die durchgeführte strukturierte Laborstudie, als auch das umgesetzte Gebäudemonitoring im Bartenbach Living Lab. Diesbezüglich werden folgende Datensätze adressiert:

Tabelle 6: Im Projekt LesslsMore generierte Daten

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
LAB_FRAG	Fragebogenergebnisse der Laborstudie	Numerisch	Bewertung auf einer Likert-Skala	Bartenbach	nicht öffentlich
LAB_EKG	Elektrokardiogramm der Laborstudie	Numerisch	EKG-Daten	Bartenbach	nicht öffentlich
LIV_GEB	Monitoring von Gebäudeparametern im Living Lab	Numerisch	Sensorwerte	Bartenbach	teilweise öffentlich
LIV_NUTZ	Nutzermonitoring im Living Lab	Numerisch	Sensorwerte	Bartenbach	teilweise öffentlich

Daten der Laborstudie wurden einmalig unter Probandenbeteiligung generiert. Da psychologische Laboruntersuchungen zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Validität und Reproduzierbarkeit nur mit international angesehenen und validierten Testverfahren durchgeführt werden, ist eine über das jeweilig eingesetzte Testverfahren (z.B. PANAS, KSS, etc.) hinausreichende Datenbeschreibung nicht notwendig. Alle Probanden unterzeichneten vor der Teilnahme eine Einwilligungserklärung, welche eine Aufklärung über die Art der erhobenen Daten, den Verarbeitungszweck und die zur Einsicht berechtigten Personen beinhaltet. Eine über die eigentliche Laborstudie hinausreichende und weiterführende Verwertung oder Publikation der diesbezüglich erhobenen Rohdaten ist deshalb grundsätzlich nicht vorgesehen.

Das im Bartenbach Living Lab umgesetzte Monitoring erfolgt mittels der zentralen Gebäudesteuerung und der installierten Sensorik auf Gebäudeebene. Ein Bezug auf individuelle Personen ist dementsprechend ausgeschlossen. Die Speicherung der Sensorwerte erfolgt in Bezug zu Gebäudeparametern (z.B. Beleuchtungsstärke, Temperatur) periodisch einmal pro Minute. Sensorerfasste Nutzerinformationen (z.B. Eingriffe in die Steuerung, Anwesenheiten am Arbeitsplatz) erfolgen bei Zustandsänderung. Alle Sensorwerte werden mittels der zentralen Steuereinheit erfasst und strukturiert in tagesbezogenen .csv Files gespeichert. Zugriffe auf die Daten sind nur technischen Verantwortlichen ermöglicht. Eine vollständige Beschreibung des Loggings und Vorverarbeitungsprozesses kann auch [52] entnommen werden. Teile dieser Daten können unter <https://doi.org/10.17632/jvg8dmm3xp.1> frei bezogen werden.

Tabelle 7: Beschreibung der sensorisch erhobenen Messwerte des Bartenbach Living Labs in Bezug zu Gebäudeparametern

Attribut	Beschreibung
LIV_GEB	Gebäudebezogene Sensormesswerte des Bartenbach Living Labs
Zusammenfassung	Periodische Messungen des Innen- und Außenklimas sowie von Helligkeiten im Bartenbach Living Lab; erhobene Werte werden zeitlich im Rahmen der automatisierten Steuerlogik verwertet
Einheit	°C, lx, % RH, km/h
Zeitintervall	Pro Minute
Zeitraum und Referenzjahr	2021 - laufend
Institution	Bartenbach GmbH (www.bartenbach.com)
Kontakt	johannes.weninger@bartenbach.com
Mitwirkende und Rolle	Johannes Weninger (Teamleiter Forschung)
Methodik	Sensorisch erfasste Rohdaten, welche mittels der zentralen Steuereinheit in lokalen, tagesbezogenen .csv Dateien gespeichert werden
Datenvervollständigung	Fehlende Daten werden nicht vervollständigt
Kommentar	Eine vollständige Beschreibung der Daten/Methoden steht auch unter https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30508 zur Verfügung.
Erstellungsdatum	Die Daten werden fortlaufend erzeugt und täglich automatisiert upgedated.
Datentyp	.csv (Comma Separated Values)
Zugang	Daten zu Innen- und Außenklima wurden öffentlich verfügbar gemacht. Beleuchtungsrelevante Kenngrößen (z.B. Helligkeiten innen und außen) werden aus Gründen der erhöhten internen Verwertbarkeit und des damit einhergehenden Knowhow-Vorsprungs nicht veröffentlicht.

Tabelle 8: Beschreibung der sensorisch erhobenen Messwerte des Bartenbach Living Labs in Bezug zu Nutzerparametern

Attribut	Beschreibung
LIV_NUTZ	Nutzerbezogene Sensormesswerte des Bartenbach Living Labs
Zusammenfassung	Auf Statusänderung bezogene Messungen der Anwesenheit am Arbeitsplatz, des Eingriffs in die Systemsteuerung sowie der manuellen Öffnung von Fenstern; erhobene Werte werden nicht nutzer- sondern zonenbezogen erfasst und im Rahmen der automatisierten Steuerlogik verwertet
Einheit	bool
Zeitintervall	auf Zustandsänderung
Zeitraum und Referenzjahr	2021 - laufend
Institution	Bartenbach GmbH (www.bartenbach.com)
Kontakt	johannes.weninger@bartenbach.com
Mitwirkende und Rolle	Johannes Weninger (Teamleiter Forschung)
Methodik	Sensorisch erfasste Rohdaten, welche mittels der zentralen Steuereinheit in lokalen, tagesbezogenen .csv Dateien gespeichert werden
Datenvervollständigung	Fehlende Daten werden nicht vervollständigt
Kommentar	Eine vollständige Beschreibung der Daten/Methoden steht auch unter https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30508 zur Verfügung.
Erstellungsdatum	Die Daten werden fortlaufend erzeugt und täglich automatisiert upgedated.
Datentyp	.csv (Comma Separated Values)
Zugang	Daten mit Bezug zu Innen- und Außenklima (Öffnung von Fenstern) wurden öffentlich verfügbar gemacht Beleuchtungsrelevante Kenngrößen (z.B. Anwesenheiten und Nutzereingriffe) werden aus Gründen der erhöhten internen Verwertbarkeit und des damit einhergehenden Knowhow-Vorsprungs nicht veröffentlicht

9.2.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Sowohl die im Rahmen der Laborstudie als auch innerhalb des laufenden Gebäudemonitorings erhobenen, nutzerbezogenen Daten wurden rechtlich mittels personenbezogenen Einwilligungserklärungen abgesichert. Alle Studienteilnehmer wurden vor der Datenerhebung über ihre Rechte, insbesondere über das Recht zur Rückwirkenden Datenlöschung, aufgeklärt. Alle Datenerhebungen folgen jeweilig der DSGVO in der aktuell gültigen Fassung.

Alle Daten der Laborstudie wurden nach bzw. während der Erhebung vollständig anonymisiert. Daten, welche im Rahmen des Gebäudemonitorings des Bartenbach Living Labs aufgenommen werden, können grundsätzlich durch ihren Bezug auf Arbeitsplatzzonen grundsätzlich nicht auf Einzelpersonen zurückgeführt werden.

Darüber hinausreichend bestehen keine ethisch bedenklichen Aspekte.

9.2.3. Datenspeicherung und -erhalt

Alle Daten werden passwortgeschützt abgelegt. Ein Zugriff auf die Rohdaten, insbesondere den zugehörigen Anonymisierungslisten, ist grundsätzlich durch IT-basierte Sicherheitsmaßnahmen (Ordnerbezogene Zugriffsrechte) nur unbedingt zur Datenverarbeitung notwendigem Personal gestattet.

Alle Daten werden regelmäßig im Rahmen der allgemeinen Systemwartung des Unternehmens einmal täglich auf Backupservern rückgesichert.

9.2.4. Wiederverwendbarkeit der Daten

Da die Verarbeitung der innerhalb der Laborstudie erhobenen Rohdaten im Sinne der DSGVO im Rahmen der Einwilligungserklärung auf unbedingt zur Verarbeitung notwendiges Personal beschränkt wurde, erweist sich eine diesbezügliche Verbreitung als ausgeschlossen. Eine darüber hinausreichende Verbreitung von vorverarbeiteten und anonymisierten Daten wird jedoch im Rahmen von peer-reviewed Publikationen angestrebt.

Die erarbeiteten Monitoring-Daten mit Bezug zu Innen- und Außenklima (Gebäude- und Nutzerbezogen) wurden bereits öffentlich verfügbar gemacht und einer weiteren Verbreitung zugeführt. Eine die Daten beschreibende Publikation wurde im peer-reviewed Verfahren getätigt und kann auf Open Access Basis frei bezogen werden. Darüber hinausreichende Datensätze mit Bezug zu beleuchtungsrelevanten Informationen (bspw. Beleuchtungsstärken innen und außen, Anwesenheiten am Arbeitsplatz, Eingriffe in die Systemsteuerung) werden aus Gründen der Erhöhten Verwertbarkeit des Unternehmens und des damit einhergehenden vergrößerten Marktpotentials nicht öffentlich verfügbar gemacht und einer weiterführenden internen Verwertung zugeführt.

Unabhängig davon steht die Möglichkeit zur Anfrage der innerhalb von LessIsMore generierten, nicht sensible Datensätze in rohem bzw. vorverarbeitetem Format zur Verfügung.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)