

BIM-basierte Umsetzung von Tages- und Kunstlichtsteuerungen (TwinLight)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 53/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

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

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien
Leitung (interimistisch): DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Jacob Schreck (ZUMTOBEL Lighting GmbH)

Sascha Hammes (Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen)

Philipp Zech (Universität Innsbruck, Institut für Informatik)

Robert Weitlaner (Hella Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH)

Wien, Innsbruck 2026. Stand: Juni 2026

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

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

Rechtlicher Hinweis

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

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

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

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

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract.....	10
3	Ausgangslage.....	12
	3.1. Bedeutung integraler Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen	12
	3.2. Facility Management und die Bedeutung kontinuierlicher Optimierung	13
	3.3. Herausforderungen bestehender Planungs- und Betriebsprozesse.....	13
	3.4. Building Information Modeling als Grundlage digitaler Informationskontinuität.....	14
	3.5. Digitale Zwillinge als Weiterentwicklung des BIM-Paradigmas.....	15
	3.6. Das Forschungsprojekt TwinLight	16
	3.7. Projektorganisation und Projektablauf.....	16
	3.8. Zielsetzung des vorliegenden Berichts.....	17
	3.9. Aufbau des Berichts	17
4	Projekthalt.....	18
	4.1. Anforderungen des Anwendungsfelds und theoretische Konzepte	18
	4.1.1. Literaturrecherche	19
	4.1.2. Marktstudie	20
	4.1.3. Erweiterte Marktstudie	23
	4.2. Ein Living Lab zur iterativen Entwicklung und für Anwenderstudien	25
5	Ergebnisse	27
	5.1. Steuerungsmodellierung in BIM	27
	5.2. Middleware	29
	5.3. Modellkontrolle	30
	5.4. Vom BIM zum Digitalen Zwilling	31
	5.5. Aufschlüsselung des Energy Performance Gap.....	32
	5.6. Kontinuierliche Optimierung	33
	5.7. Akzeptanzstudie.....	34
	5.8. Ergebnisse im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft	35
	5.9. Praktische Relevanz	36
6	Schlussfolgerungen	38
7	Ausblick und Empfehlungen	39
8	Verzeichnisse.....	40
9	Anhang.....	47
	9.1. Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts TwinLight.....	47
	9.1.1. Publikationen 2023.....	47
	9.1.2. Publikationen 2024.....	47

9.1.3. Publikationen 2025	48
9.1.4. Publikationen 2026	48
9.2. Data Management Plan (DMP)	50
9.2.1. Datenerstellung und Dokumentation	50
9.2.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte	51
9.2.3. Datenspeicherung und -erhalt	51
9.2.4. Wiederverwendbarkeit der Daten	51

1 Kurzfassung

Gebäude verursachen etwa ein Drittel des globalen Energieverbrauchs und ein Viertel der CO₂-Emissionen. Zudem entfallen in Nichtwohngebäuden 20 bis 30% des Gebäudeenergiebedarfs auf die Beleuchtung. Eine integrierte Planung und Regelung erschließt Tageslichtpotenziale, verbessert Komfort sowie lichttechnische Qualität und berücksichtigt Wechselwirkungen mit der thermischen Performance. Vereinfachte Nutzungsannahmen in der Planung und heterogene Nutzerpräferenzen und hohe Nutzerdynamiken führen häufig dazu, dass implementierte Steuerungen nicht selten von den intendierten Zielen abweichen. Post-Occupancy Evaluation stellen für das Facility Management eine Möglichkeit dar, Steuerungen nach Inbetriebnahme an reale Nutzungsmuster anzupassen. In der Praxis verhindern jedoch proprietäre Systemlandschaften und mangelnde Transparenz durch die Vielzahl an Schnittstellen zwischen Planung, Ausführung und Betrieb eine konsequente Umsetzung integraler Systeme.

Building Information Modeling (BIM) etabliert sich als interoperable, zentrale Informationsbasis (bspw. über IFC und gbXML) für Analysen, Simulation und FM-Anwendungen, bildet aber Regelungslogiken, Sensorik und dynamische Parameter noch unzureichend ab. Digitale Zwillinge (DT) erweitern BIM um bidirektionale Echtzeitdaten, ermöglichen Überwachung, adaptive Regelung, virtuelle und kontinuierliche Inbetriebnahmen und helfen, Performance Gaps zu reduzieren, vorausgesetzt Steuerungslogiken, Topologien und Schnittstellen sind als Single Source of Truth modelliert. Hier setzt das Forschungsprojekt TwinLight an, indem es die Entwicklung von Steuerungen in BIM ermöglicht, sie über eine bidirektionale Architektur mit Betriebsdaten koppelt, offene Schnittstellen und organisiert Zusammenarbeit etabliert sowie Datenmanagement und Inbetriebnahme nach Open-BIM-Prinzipien unter Einsatz domänenspezifischer Sprachen und Repositorien ermöglicht. Dadurch werden integrale Lichtstrategien praxistauglich, transparent und lebenszyklusfähig.

Eine projektbezogene Literaturrecherche von 57 relevanten Arbeiten führt auf, dass es die Erweiterung von BIM um dynamische Betriebsdaten, standardisierte Schnittstellen zu Energie- und Tageslichtsimulationen sowie durchgängige Workflows von der Modell- zur Implementierungsebene notwendig sind. Mangelnde Interoperabilität bleibt die Hauptbarriere. Beleuchtung ist in Forschung und DT-Anwendungen deutlich unterrepräsentiert, während HLK dominiert. Eine ergänzende Marktstudie (165 verwertbare Rückmeldungen) bestätigt, dass BIM als relevant wahrgenommen wird, Transparenz und bessere Zusammenarbeit bietet, aber häufig an Schnittstellen, Interoperabilität, Zeitaufwand und Qualifikationen scheitert. Nutzerbezogene Daten werden selten erfasst, wodurch Komfort- und Effizienzpotenziale ungenutzt bleiben. Kleine Unternehmen leiden unter Ressourcen- und Kompetenzengpässen, große Unternehmen an Schnittstellen und semantischen Inkonsistenzen. Open-BIM, modulare Systeme und gestufte Einführungen mit klaren Rollen und Lernprozessen werden über die Studien als empfohlene Maßnahmen abgeleitet.

TwinLight erweitert BIM gezielt um Funktionen für Modellierung, Parametrisierung und Auto-Inbetriebnahme von Gebäudeautomation und schafft so die Basis für Digitale Zwillinge. Kern ist eine grafische und textuelle domänenspezifische Sprache (DSL) in Revit samt Add-in. Steuerungskomponenten werden darüber als Revit-Familien mit eindeutiger ID und technischen Parametern platziert, topologisch verbunden, als 2D-Schemata und dot-Graphen exportiertierbar

gemacht. In der BIM-basierten Umgebung werden so Steuerungen konfiguriert, simuliert, validiert, optimiert und automatisiert auf das physische System übertragen. Integrierte Regeln prüfen Umsetzungen automatisch auf Konsistenz. Für die Modellkontrolle werden IFC-Modelle regelbasiert per semantischem Reasoning geprüft. Dabei werden nachvollziehbare Prüfberichte geliefert, wodurch Fehler vor der physischen Umsetzung abgefangen werden. Über die DSL werden Laufzeitartefakte generiert. Eine offene, konfigurierbare Middleware nutzt das angereicherte BIM-Modell als Single Source of Truth, erzeugt automatisch Konfigurationen, verbindet sich zu den physischen Steuerungskomponenten und realisiert bidirektionale Datenflüsse. Die Middleware-Architektur umfasst insbesondere CQRS, ein homogenes JSON-Datenmodell, InfluxDB für Zeitreihen und OAuth2. Indem aus dem Modell generierte Konfigurationen die Middleware speisen und Echtzeitdaten zurückkoppeln, wird mit der TwinLight-Systemarchitektur von BIM zum DT realisiert, welcher vollumfängliche Evaluierungen, kontinuierliche Systemoptimierungen und phasenübergreifende Nachvollziehbarkeit zwischen unterschiedlichen Stakeholdern zur Steuerung ermöglicht. Die Systemarchitektur wurde auf die Gewerke Tages- und Kunstlicht getestet. Eine generische Ausgestaltung der Tools und Workflows erlaubt jedoch eine Erweiterbarkeit auf andere Systeme.

Zur iterativen Entwicklung der TwinLight-Systemarchitektur und Evaluation der geschaffenen Workflows wurde ein Living Lab der Universität Innsbruck herangezogen, um Akzeptanz und Energieeffizienz unter Realbedingungen zu prüfen. Der gesamte Kommissionierungsworkflow, d.h. Validierung, Artefaktgenerierung und Initialisierung wurde an diesem realen Studiensetting erprobt. Eine TAM-Studie (n=23) ergab insgesamt positive Bewertungen, besonders für das Revit-Plugin und die DT-Interaktion; Schulung verbessert die wahrgenommene Bedienbarkeit.

2 Abstract

Buildings account for about one-third of global energy consumption and one-quarter of CO₂ emissions. Furthermore, lighting accounts for 20 to 30% of the energy demand in non-residential buildings. Integrated planning and control systems harness daylight potential, improve comfort and lighting quality, and take into account interactions with thermal performance. Simplified usage assumptions during the planning phase, combined with heterogeneous user preferences and high user dynamics, often result in implemented control systems deviating from their intended goals. Post-occupancy evaluations provide facility management with an opportunity to adapt control systems to actual usage patterns after commissioning. In practice, however, proprietary system architectures and a lack of transparency (due to the multitude of interfaces between design, construction, and operation) prevent the consistent implementation of integrated systems.

Building Information Modeling (BIM) is establishing itself as an interoperable, central information base (e.g., via IFC and gbXML) for analyses, simulations, and facility management applications; however, it still does not adequately represent control logic, sensor technology, and dynamic parameters. Digital twins (DT) extend BIM with bidirectional real-time data, enable monitoring, adaptive control, virtual and continuous commissioning, and help reduce performance gaps. This requires that control logic, topologies, and interfaces be modeled as a single source of truth. This is where the TwinLight research project comes in: it enables the development of control systems within BIM, links them to operational data via a bidirectional architecture, establishes open interfaces and organized collaboration, and facilitates data management and commissioning according to Open BIM principles using domain-specific languages and repositories. As a result, integrated lighting strategies become practical, transparent, and lifecycle-capable.

A project-based literature review of 57 relevant studies indicates that BIM must be expanded to include dynamic operational data, standardized interfaces for energy and daylight simulations, and end-to-end workflows from the model level to the implementation level. A lack of interoperability remains the main barrier. Lighting is significantly underrepresented in research and digital twin applications, while HVAC dominates. A complementary market study (165 usable responses) confirms that BIM is perceived as relevant and offers transparency and better collaboration, but often fails due to interface issues, interoperability problems, time constraints, and a lack of qualifications. User-related data is rarely collected, leaving potential for comfort and efficiency untapped. Small companies suffer from resource and expertise bottlenecks, while large companies struggle with interfaces and semantic inconsistencies. The studies identify Open BIM, modular systems, and phased implementations with clear roles and learning processes as recommended measures.

TwinLight specifically extends BIM with functions for modeling, parameterization, and automatic commissioning of building automation, thereby laying the foundation for digital twins. At its core is a graphical and textual domain-specific language (DSL) in Revit, complete with an add-in. Control components are placed via this DSL as Revit families with unique IDs and technical parameters, topologically connected, and made exportable as 2D schematics and dot graphs. In the BIM-based environment, control systems are thus configured, simulated, validated, optimized, and automatically transferred to the physical system. Integrated rules automatically check

implementations for consistency. For model verification, IFC models are checked using rule-based semantic reasoning. This process generates traceable inspection reports, enabling errors to be caught before physical implementation. Runtime artifacts are generated via the DSL. An open, configurable middleware uses the enriched BIM model as a single source of truth, automatically generates configurations, connects to the physical control components, and implements bidirectional data flows. The middleware architecture includes, in particular, CQRS, a homogeneous JSON data model, InfluxDB for time series, and OAuth2. By feeding configurations generated from the model into the middleware and providing real-time feedback, the TwinLight system architecture enables the transition from BIM to DT, facilitating comprehensive evaluations, continuous system optimization, and cross-phase traceability among different stakeholders for control purposes. The system architecture was tested for the natural and artificial lighting systems. However, the generic design of the tools and workflows allows for extensibility to other systems.

To support the iterative development of the TwinLight system architecture and the evaluation of the workflows created, a Living Lab at the University of Innsbruck was utilized to test acceptance and energy efficiency under real-world conditions. The entire order-picking workflow (validation, artifact generation, and initialization) was tested in this real-world study setting. A TAM study (n=23) yielded generally positive evaluations, particularly for the Revit plugin and DT interaction; training improves perceived usability.

3 Ausgangslage

3.1. Bedeutung integraler Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen

Die Anforderungen an moderne Gebäude haben sich in den vergangenen Jahrzehnten grundlegend verändert. Neben klassischen Zielgrößen wie Investitionskosten und Funktionalität stehen heute insbesondere Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Nutzerkomfort sowie die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Fokus von Planung, Errichtung und Betrieb. Diese Entwicklung ist vor allem auf die hohe Relevanz des Gebäudesektors für den globalen Energieverbrauch zurückzuführen. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Gebäude etwa ein Drittel des weltweiten Energieverbrauchs verursachen und gleichzeitig für rund ein Viertel der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich sind [1], [2], [3], [4]. Dabei entfallen 20-30% für die künstliche Beleuchtung auf Nicht-Wohngebäuden [5], [6]. Ein Großteil der Kosten und Emissionen eines Gebäudes resultieren aus der Betriebsphase, wodurch die kontinuierliche Optimierung der Gebäudeperformance über den gesamten Lebenszyklus an Bedeutung gewinnt [2], [5], [7], [8]. Vor diesem Hintergrund kommt der technischen Gebäudeausrüstung eine Schlüsselrolle bei der Sicherstellung von Energieeffizienzzielen zu. Beleuchtungssysteme beeinflussen nicht nur den Energiebedarf von Gebäuden, sondern wirken sich gleichzeitig auf visuelle und thermische Aspekte des Nutzerkomforts aus und auf Wohlbefinden, Aufmerksamkeit, Stimmung und Gesundheit der Gebäudenutzenden [6], [9], [10], [11], [12].

Da Tageslicht- und Kunstlichtsysteme beide gemeinsam die energetische Effizienz, den Nutzerkomfort sowie die lichttechnische Qualität eines Gebäudes bestimmen, sollten diese integrativ geplant und gesteuert werden. Eine isolierte Betrachtung einzelner Systeme kann dazu führen, dass vorhandene Tageslichtpotenziale nicht ausgeschöpft werden und dadurch unnötig hohe Energieverbräuche für Kunstlicht entstehen [6]. Darüber hinaus beeinflussen Tageslicht- und Kunstlichtsysteme auch andere Gewerke, insbesondere die thermische Gebäudeperformance und die Kühllast, sodass eine koordinierte Regelung aller Gewerke zusätzliche Energieeinsparungen ermöglicht [13]. Integrale Steuerungsstrategien schaffen daher die Voraussetzung, Energieeffizienz, visuelle und nichtvisuelle Komfortanforderungen sowie gebäudetechnische Wechselwirkungen ganzheitlich zu optimieren. Aus diesem Grund besteht ein wachsendes wissenschaftliches Interesse an der Integration von Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen sowie deren Einbettung in digitale Planungs- und Betriebsprozesse [14], [15], [16].

Trotz der bekannten Potenziale integraler Beleuchtungssteuerungen werden diese kaum in aktuellen Planungs- und Betriebsprozesse berücksichtigt und umgesetzt. Die in der Praxis vorherrschende Vielfalt proprietärer Systeme mit unterschiedlichen Protokollen und Programmierungsumgebungen führt zu mangelnder Interoperabilität und erschwert die integrale Zusammenführung von Gewerken. Doch nicht nur in diesem Kontext werden Potenziale durch proprietäre Systemvielfalt verschenkt.

In frühen Planungsphasen stützen sich Modelle häufig auf pauschale Belegungs- und Nutzungsannahmen, die die Dynamik realer Nutzerprofile nicht adäquat abbilden [17], [18]. Dies führt zu Abweichungen zwischen berechneter und tatsächlicher Performance, sogenannten Energy Performance Gaps (EPG), deren Hauptursache in der Unbestimmtheit und zeitlichen Variabilität des Nutzerverhaltens liegt [19], [20]. Es bedarf daher nachträglichen Anpassungen der Steuerung an reale Nutzungsmuster.

3.2. Facility Management und die Bedeutung kontinuierlicher Optimierung

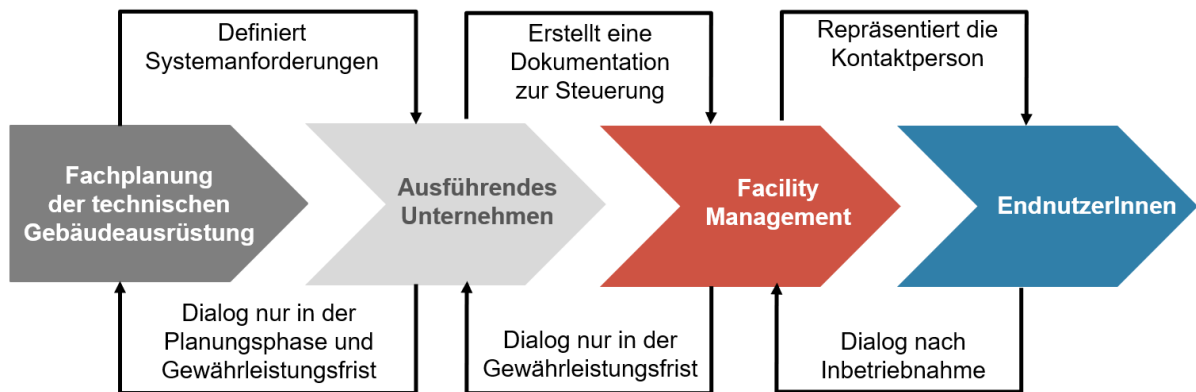
Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem Facility Management (FM) zu. Nach der Inbetriebnahme übernimmt das FM die Verantwortung für den Betrieb technischer Gebäudeanlagen und fungiert als zentrale Schnittstelle zwischen Gebäudeeigentümerschaft und Nutzenden. Gleichzeitig verfügt das FM über direkten Zugang zu Betriebsdaten, Nutzerfeedback und tatsächlichen Nutzungsmustern. Post Occupancy Evaluations (POE) bieten für das FM die Möglichkeit, diese Informationen systematisch auszuwerten und daraus Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten [21]. Praktisch werden die in Gebäudeautomationssystemen vorhandenen Betriebsdaten jedoch bislang nur begrenzt genutzt [22]. Die Ursache ist ebenfalls auf die Vielfalt proprietärer Systeme mit unterschiedlichen Programmierumgebungen zurückzuführen. Diese proprietäre Systemvielfalt erhöht die Komplexität so stark, dass eine umfassende Anwendungskenntnis aller Systeme praktisch nicht abdeckbar ist. Dadurch steigen Implementierungs- und Abstimmungsaufwände überproportional, was robuste, integrale Lösungen und einen effizienten Betrieb zusätzlich erschwert. Bereits erstellte Steuerlogiken lassen sich kaum zwischen Systemen übertragen, wodurch Inhalte projektweise neu programmiert werden müssen und eine kontinuierliche Weiterentwicklung behindert wird. Diese Fragmentierung limitiert zudem das nutzbare Systemportfolio, begünstigt suboptimale Systementscheidungen und erschwert Transparenz sowie Wissenstransfer über den Lebenszyklus bis in das FM. Diese fehlende Adaptionsmöglichkeit ist insbesondere deshalb problematisch, weil wesentliche Einflussgrößen auf die Systemperformance erst nach der Inbetriebnahme sichtbar werden [18], [19], [20]. Gleichzeitig variieren individuelle Präferenzen hinsichtlich Beleuchtungsstärke, Tageslichtnutzung und Blendungsschutz erheblich in Abhängigkeit von Alter, Tätigkeit, kulturellem Hintergrund und Nutzungsverhalten [23], [24]. Das Resultat sind Phasen eines ineffizienten Gebäudebetriebs, welcher durch EPGs sichtbar wird.

Gleichzeitig steigen Aufwand und Kosten für nachträgliche Anpassungen mit zunehmendem zeitlichem Abstand zur Gebäudeerrichtung erheblich an. Nach Ablauf von Gewährleistungsfristen fehlen dem Facility Management häufig Informationen über ursprüngliche Planungsentscheidungen, implementierte Steuerlogiken oder proprietäre Systemstrukturen [25], [26]. Dies erschwert notwendige Optimierungen und führt dazu, dass vorhandene Potenziale für Energieeinsparungen und Komfortverbesserungen vielfach ungenutzt bleiben.

3.3. Herausforderungen bestehender Planungs- und Betriebsprozesse

Die Umsetzung von Gebäudesteuerungen erfolgt typischerweise in mehreren aufeinanderfolgenden Projektphasen unter Beteiligung zahlreicher Akteure aus Architektur, Fachplanung, ausführenden Unternehmen und Gebäudebetrieb [25], [26], [27], [28] – vgl. Abbildung 1. Aufgrund der hohen Komplexität moderner Gebäude entstehen dabei vielfältige Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Gewerken und Fachdisziplinen [29].

Abbildung 1: Prozessablaufkette zwischen den involvierten Projektbeteiligten. Bildquelle: [30], [31]



In der Praxis zeigt sich jedoch häufig eine Diskrepanz zwischen den Zielsetzungen der Fachplanung und der tatsächlichen Umsetzung durch ausführende Unternehmen. Während Fachplanende aufgrund ihres umfassenden Wissens über das Gebäudegesamtkonzept häufig komplexe und integrale Lösungsansätze verfolgen, basiert die Umsetzung durch ausführende Unternehmen primär auf Ausschreibungsunterlagen und funktionalen Mindestanforderungen. Die resultierenden Steuerungslogiken erfüllen zwar meist die ausgeschriebenen Funktionen, können jedoch hinsichtlich Energieeffizienz, Transparenz und Nutzerkomfort erheblich von den ursprünglichen Planungszielen abweichen [32].

Die wissenschaftliche Literatur identifiziert Informationsverluste zwischen Planung, Ausführung und Betrieb als wesentliche Ursache dieser Performance Gaps. Fedoruk et al. führen den Verlust von Informationen explizit als einen der Hauptgründe für die Entstehung solcher Diskrepanzen an. Gleichzeitig erschweren fehlende Transparenz und mangelnde Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen eine systematische Bewertung der umgesetzten Steuerungsstrategien [32].

3.4. Building Information Modeling als Grundlage digitaler Informationskontinuität

Building Information Modeling (BIM) hat sich als zentrale Methode des digitalen Informationsmanagements etabliert. BIM wird heute als eine der bedeutendsten Innovationen der Architektur-, Ingenieur- und Baubranche betrachtet [33]. Zahlreiche Staaten, darunter Österreich, Großbritannien, Frankreich und die Schweiz, haben BIM bereits als verpflichtende oder empfohlene Planungsmethode für öffentliche Bauprojekte etabliert [29], [34], [35].

Im Kern basiert BIM auf einem digitalen Gebäudemodell, das geometrische, topologische sowie technisch-funktionale Informationen miteinander verknüpft [36]. Darüber hinaus ermöglicht BIM die Integration zusätzlicher Dimensionen wie Zeit, Kosten, Nachhaltigkeit, Energie oder Wartung [37]. Das resultierende Gebäudemodell dient als zentrale Informationsquelle für sämtliche Projektbeteiligten und unterstützt die Zusammenarbeit über den gesamten Gebäudelebenszyklus hinweg [38], [39].

Die Literatur hebt insbesondere die hohe Dateninteroperabilität als entscheidenden Erfolgsfaktor hervor [29], [40]. Standards wie IFC und gbXML ermöglichen den Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Softwarelösungen und schaffen die Grundlage für modellbasierte Arbeitsprozesse. Gleichzeitig werden BIM-Modelle zunehmend als Grundlage für Energieanalysen, Gebäudesimulationen und Facility-Management-Anwendungen genutzt [41], [42].

Dennoch bestehen weiterhin erhebliche Defizite bei der Modellierung von Steuerungsfunktionen innerhalb bestehender BIM-Methoden. Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass insbesondere Regelungslogiken, Sensorik, Nutzerinteraktionen und dynamische Steuerungsparameter bislang nur unzureichend in BIM abgebildet werden. Gerade für integrale Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen stellt dies eine wesentliche Einschränkung dar [29].

3.5. Digitale Zwillinge als Weiterentwicklung des BIM-Paradigmas

Ein Digitaler Zwilling (DT, engl. Digital Twin) ist ein virtuelles Abbild eines physischen Systems, das über Datenflüsse mit Informationen zum physischen System gespeist wird und so den Zustand, das Verhalten und die Performance des realen Objekts widerspiegelt. Das Konzept stammt aus der industriellen Produktentwicklung und dem Systems Engineering, wo es zur durchgängigen Planung, Simulation, Überwachung und Optimierung komplexer cyber-physischer Systeme etabliert wurde [25], [28].

Wenn das statische, modellbasierte Abbild eines Bauwerks um laufzeitnahe Zustandsdaten, Ereignisse und Rückkopplungen aus dem Betrieb erweitert wird und entsteht ein bidirektionaler Informationsfluss zwischen virtuellem und physischem System. Voraussetzung dafür sind durchgängige Interoperabilität und die Abbildung der für den Betrieb relevanten Entitäten einschließlich Topologie, Parametern und Abhängigkeiten.

Durch Vorteile der Echtzeitvorhersage, Optimierung, Überwachung, Steuerung und verbesserte Entscheidungsfindung werden DTs im Gebäudebereich zunehmend als Schlüsseltechnologie für die Verbesserung von Planung, Simulation, Bauausführung und FM betrachtet [43]. Durch die Integration von Sensordaten, Machine-Learning-Verfahren und Echtzeitinformationen können sie den aktuellen Zustand eines Gebäudes nahezu in Echtzeit abbilden.

Steuerungen nehmen in diesem Übergang eine Schlüsselrolle ein, weil sie als operatives Nervensystem sämtliche Sensordaten, Aktorzustände und Regelparameter zusammenführen und dadurch den konsistenten Zugang zu Betriebsdaten ermöglichen. Wären Steuerungslogiken, Konnektivitäten und Konfigurationen vollständig in BIM modelliert, könnten diese Informationen als Single Source of Truth in den DT überführt werden und dort als Grundlage für Echtzeitüberwachung, adaptive Regelung und datengetriebene Optimierung dienen. DTs erweitern BIM-Modelle in diesem Ansatz um Echtzeitdaten, kontinuierliche Synchronisation und bidirektionalen Informationsaustausch zwischen physischer und virtueller Gebäudeinstanz [44]. Dies würde systematische POEs ermöglichen, darauf aufbauende virtuelle und kontinuierliche Inbetriebnahmen und die fortlaufende Validierung von Planungsannahmen unterstützen und so EPGs zu reduzieren. Gleichzeitig entstünde die Möglichkeit, tages- und kunstlichttechnische Strategien unter realen Nutzungsbedingungen zu kalibrieren und über den Lebenszyklus hinweg transparent nachzuführen. Für Tageslicht- und Kunstlichtsysteme ermöglichen DTs zudem die Bewertung von Betriebsdaten unter Einbezug von

Zusatzinformationen des Gebäudes, die in BIM hinterlegt sind (bspw. bauphysikalische Eigenschaften für thermische Betrachtungen oder Materialeigenschaften für lichttechnische Evaluierungen).

3.6. Das Forschungsprojekt TwinLight

Vor dem dargestellten Hintergrund widmet sich das Forschungsprojekt TwinLight der systematischen Analyse aktueller Forschungsarbeiten zur Integration von Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen in BIM-basierte Planungs- und Betriebsprozesse, der Modellierung von Steuerungsstrategien innerhalb von BIM, der Sicherstellung einer Transparenz zwischen Planung, Inbetriebnahme und Betrieb, die Schaffung einer Interoperabilität zur Umsetzung integraler Systeme sowie die Umsetzung Digitaler Zwillinge als Bindeglied zwischen virtueller Planung und realem Gebäudebetrieb um kontinuierliche Systemverbesserungen zu erzielen und EPGs zu reduzieren. Darüber hinaus werden bestehende Herausforderungen hinsichtlich Informationskontinuität, Nutzerintegration und automatisierter Inbetriebnahme untersucht [30].

TwinLight versteht das BIM-Modell dabei als Single Source of Truth und erweitert es um Steuerungslogiken, Parameter und Topologien, die über eine bidirektionale Kommunikationsarchitektur mit Betriebsdaten rückgekoppelt werden, um virtuelle und kontinuierliche Inbetriebnahmen sowie datengetriebene Optimierungen zu ermöglichen. Durch die Kombination aus modellbasierter Vorkonfiguration, offenen Schnittstellen und automatisierter Inbetriebnahme schafft TwinLight die Voraussetzungen, integrale Tages- und Kunstlichtstrategien praxistauglich zu implementieren, Transparenz für alle Stakeholder herzustellen und den energie- und komfortoptimierten Betrieb über den gesamten Lebenszyklus zu unterstützen. TwinLight organisiert die Zusammenarbeit zwischen Fachplanung, Systemintegratoren, Betreibern und FM so, dass das BIM-Modell als verbindliche Arbeitsgrundlage für Middleware, Inbetriebnahme und DT. Das Projekt folgt Leitlinien zu Datenmanagement, Interoperabilität und Open BIM und verankert dafür Modell-Repositories sowie domänenspezifische Sprachen (DSL, engl. Domain Specific Language), um Verantwortlichkeiten, Schnittstellen und Rückkopplungspfade über Planung, Inbetriebnahme und Betrieb hinweg klar zu regeln.

3.7. Projektorganisation und Projektablauf

Das Forschungsprojekt TwinLight wurde gemeinsam vom Projektkonsortium Zumtobel Lighting GmbH, Hella Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH sowie der Universität Innsbruck realisiert. Die Universität Innsbruck war durch den Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen sowie durch das Institut für Informatik vertreten. Der Durchführungszeitraum des Projekts umfasst die Zeit zwischen dem 01.10.2022 bis zum 31.03.2026 [30].

Das Projekt TwinLight (BIM-basierte Umsetzung von Tages- und Kunstlichtsteuerungen) wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter der FFG-Fördervertragsnummer 898708 im Programm „Stadt der Zukunft“ finanziell gefördert wird. „Stadt der Zukunft“ war ein Forschungs- und Technologieprogramm des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität Innovation und Technologie (BMK). Es wurde im Auftrag des BMK von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gemeinsam mit der Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH (AWS) und der Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT) abgewickelt.

3.8. Zielsetzung des vorliegenden Berichts

Ziel des FFG-Projektberichts ist es, die Integration von Tages- und Kunstlichtsteuerungen in BIM-basierte Planungs-, Inbetriebnahme- und Betriebsprozesse darzustellen und anhand eines konsistenten Informationsmodells Interoperabilität, Transparenz und Nachvollziehbarkeit über den Lebenszyklus zu sichern. Der Bericht soll insbesondere zeigen, wie Steuerungslogiken und Topologien in BIM modelliert und exportiert werden können und wie die Transformation von BIM zum DT erfolgt. Zudem werden Methoden präsentiert, die bei der datengetriebenen Optimierung unterstützen. Darüber hinaus adressiert der Projektbericht organisatorische und technische Hürden der Umsetzung, etwa fehlende Schnittstellen und Medienbrüche, und leitet daraus Vorgehensweisen für offene Standards, automatisierte Inbetriebnahmen und ein systematisches Datenmonitoring ab.

Der Projektbericht zielt neben der Nachvollziehbarkeit der gewählten Methodik auch auf eine strukturierte Dokumentation der erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse, um so den Wissenstransfer zu unterstützen. TwinLight ist darauf ausgelegt, über die Projektlaufzeit hinaus wirksam zu bleiben, indem offene Standards und modellbasierte Repositorien sowie wissenschaftliche Kommunikation gewählt wurden. Die präsentierten Projektergebnisse in diesem Bericht sollen auch der Ableitung weiterer Forschungs- und Umsetzungsmaßnahmen dienen.

3.9. Aufbau des Berichts

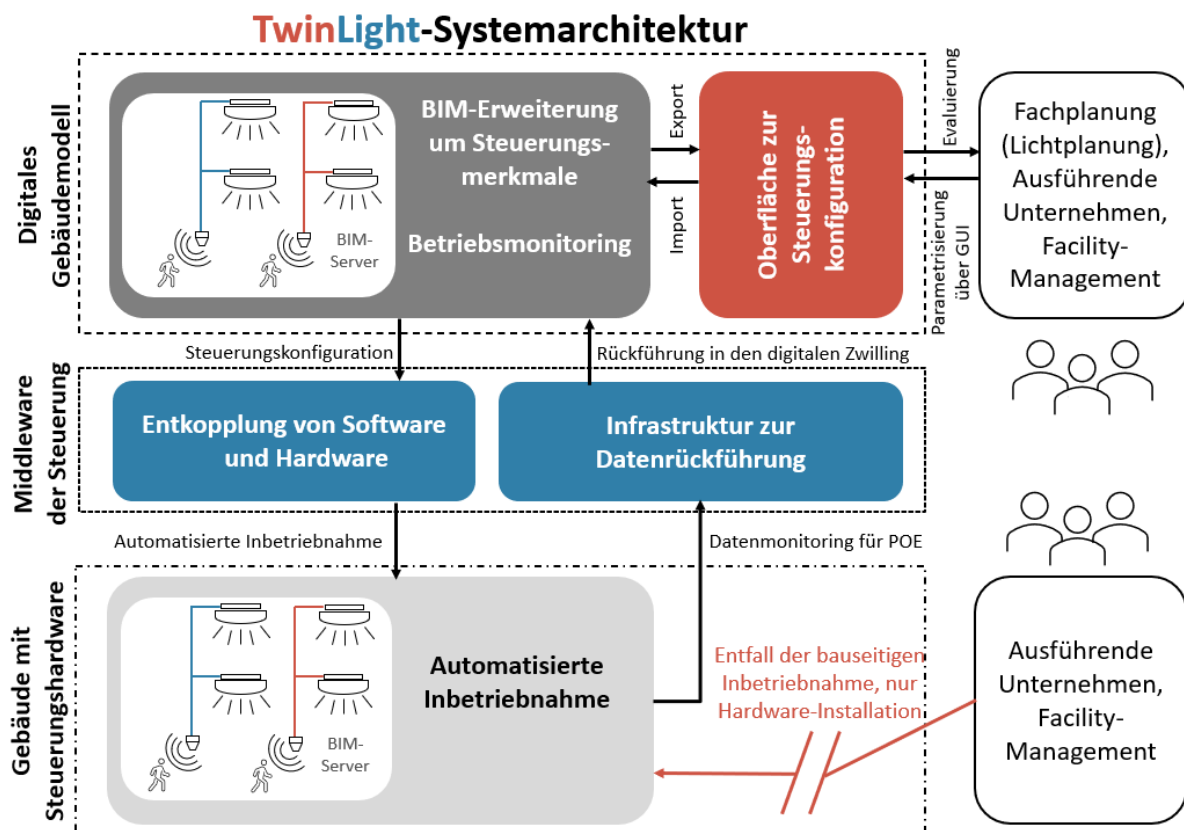
Während Kapitel 3 einleitend Stand der Technik und bestehende Herausforderungen adressierte, welche die Motivation zum Forschungsprojekt TwinLight bilden, widmet sich Kapitel 4 der Methodik, insbesondere der Erhebung von Anforderungen an die Systemarchitektur zur Modellierung von Steuerungslogiken in BIM. Das Kapitel 5 thematisiert die realisierten Tools und Workflows, die Implementierung und Anwendung der entwickelten Systemarchitektur an einem realen Büroraum. Dabei wird die Rolle Digitaler Zwillinge für Datenmonitoring herausgestellt, die Vorteile der automatisierten Inbetriebnahme und die Akzeptanzbewertung des TwinLight-Konzepts durch Branchenexperten. Kapitel 6 umfasst Schlussfolgerungen zum realisierten Projekt und Kapitel 7 gibt Ausblick auf künftige Forschungs- und Entwicklungsansätze, die auf TwinLight aufsetzen können. Ergänzend enthalten sind unter anderem Verzeichnisse, Anhänge und das verwendete Datenmanagementkonzept. Die Anhänge (Kapitel 9) umfassen zudem eine Übersicht aller wissenschaftlichen Publikationen, die im Rahmen des Forschungsprojekts TwinLight entstanden sind.

4 Projektinhalt

4.1. Anforderungen des Anwendungsfelds und theoretische Konzepte

Ausgehend von den zuvor herausgestellten Herausforderungen verfolgte das Forschungsprojekt TwinLight vier Hauptziele. Dazu zählte die Abbildung der Steuerungslogik im digitalen Gebäudemodell, um eine höhere Transparenz zwischen den Beteiligten im Steuerungsdesign zu sichern (1) eine offene Architektur zur Integration der Gewerke Tages- und Kunstlicht (2) die rückgekoppelte Erfassung von Energiedaten im DT für POE, um Optimierungspotenziale zu identifizieren (3) sowie die Trennung von Steuerungssoftware und -hardware via Middleware/APIs als Grundlage der DTs und für automatisierte Inbetriebnahmen (4). Die dazu erforderliche Systemarchitektur (Abbildung 2) umfasst den DT als Schnittstelle zu den Baubeteiligten sowie eine hardwareunabhängige, vollständig konfigurierbare Middleware, die Steuerungssoftware und Dateninfrastruktur bereitstellt. In der BIM-basierten Umgebung werden Steuerungen konfiguriert, per Simulation und Datenservices validiert, optimiert und automatisiert in Betrieb genommen. Die Entwicklung erfolgt iterativ mit Qualitätssicherung durch nutzerzentrierte Validierung, statische Code-Analyse und Prinzipien des Design Science, um wissenschaftliche Relevanz und Markttauglichkeit sicherzustellen.

Abbildung 2: Systemarchitektur TwinLights. Bildquelle: [30], [31]



4.1.1. Literaturrecherche

Es zeigt sich, dass Simulationswerkzeuge zwar in der Entwurfsphase prinzipiell verfügbar sind, deren Überführung in Bau und Betrieb jedoch meist unzureichend erfolgt, was in Interoperabilitätsprobleme und EPGs reduziert. Vor diesem Hintergrund wird argumentiert, dass BIM in Richtung eines voll integrierten DT entwickelt werden muss, um eine Informationskontinuität zu sichern. Aus diesem Grund erfolgte eine Untersuchung wissenschaftlicher Literatur zur Kopplung von BIM mit DTs zur Planung, Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung smarter Gebäude mit einem Schwerpunkt auf integrierten Steuerungen für Tageslicht und Kunstlicht. Methodisch erfolgte dies über eine systematische, Keyword-basierte Literatursuche in Web of Science und ScienceDirect für den Zeitraum 2015 bis 2023. Die resultierenden Artikel wurden auf Relevanz geprüft. Nach Entfernung von ungeeigneten Arbeiten und Duplikaten verblieben 57 Publikationen für die Detailanalyse. Die relevanten Daten wurden dabei aus den ausgewählten Studien extrahiert und in eine einheitliche Bewertungsstruktur überführt. Ergänzend wurde eine bibliometrische Auswertung mit VOSviewer durchgeführt, bei der Synonyme über eine Thesaurusdatei konsolidiert wurden, um thematische Cluster und Verknüpfungen sichtbar zu machen [29].

Die Literatur verdeutlicht drei zentrale Herausforderungen: BIM muss als Single Source of Truth, um dynamische Betriebs- und Sensordaten erweitert werden (1), Standardisierte Schnittstellen zwischen BIM sowie Energie- und Tageslichtsimulationen müssen etabliert werden (2) und durchgängigen Workflows zur Ableitung, Implementierung und Inbetriebnahme von Steuerungslogiken aus digitalen Modellen müssen geschaffen werden (3). Zentrale Hürde, die alle Herausforderungen betrifft ist die mangelnde Interoperabilität. Offene Standards wie IFC werden daher in der Literatur als Lösungswege diskutiert. Ansätze wie cloudbasierte Common Data Environments, Ontologien und IFC2RDF werden ergänzt zu einem verbesserten Datenaustausch aufgeführt [29].

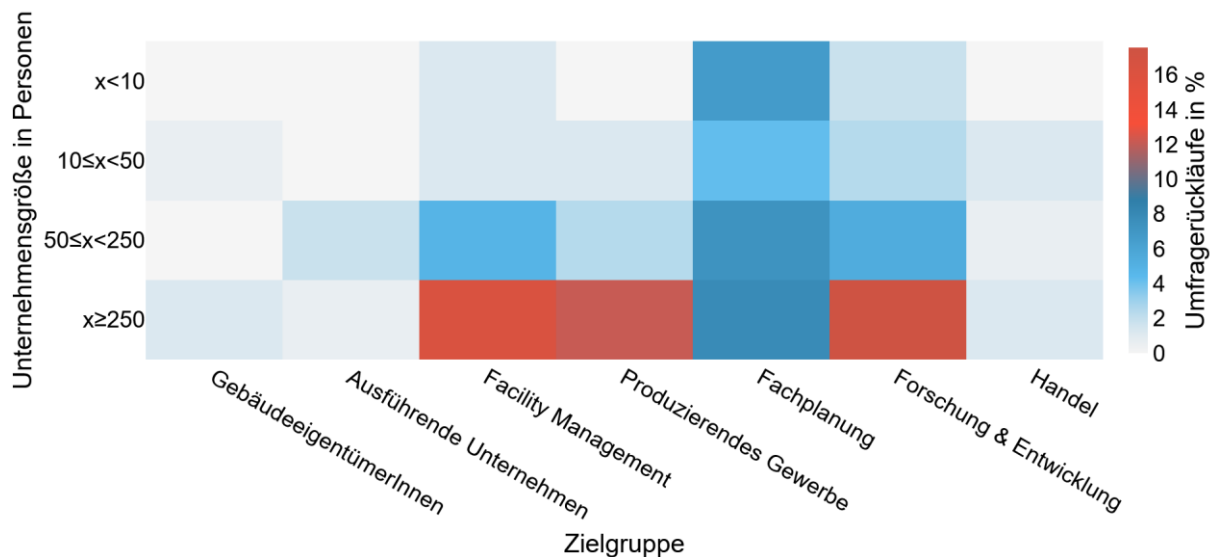
Die Ergebnisse der Literaturrecherche führen auf, dass die Abbildung gebäudetechnischer Systeme sich in der wissenschaftlichen Literatur auf die Bereiche Steuerung von Heizung, Lüftung und Klima (HLK), die Identifikation von Fehlern sowie die intelligente Brandschutzplanung und -koordination fokussiert [36], [40], [41], [45], [46], [47]. Währenddessen ist die Abbildung von Tageslicht und Kunstlicht in BIM und DTs noch im Anfangsstadium. Die bibliometrische Analyse bestätigt die Unterrepräsentation der Beleuchtung. Es bestehen zudem in der Netzwerkanalyse keine Verbindung zu anderen Clustern, was die gewerkspezifische Umsetzung widerspiegelt. Thematisch bilden sich Cluster um BIM, DT, FM, IoT, Monitoring und HLK. Insgesamt zeigt die bibliometrische Analyse einen starken Anstieg relevanter Publikationen in den Jahren 2022 und 2023 mit Fokus auf digitale Zwillinge, dynamische Datenerfassung, virtuelle Sensorik sowie prädiktive Regelung [29].

Daraus ergibt sich ein klarer Handlungsbedarf. Steuerungslogiken sollten explizit im BIM-Modell abgebildet, offene Datenmodelle und Middleware-Lösungen konsequent genutzt sowie DTs bidirektional mit Betriebsdaten verknüpft werden. Auf diese Weise kann die Umsetzung integraler Steuerungen unterstützt werden und darüber hinaus die bestehende Lücke zwischen Planung und Betrieb geschlossen werden, was Vorteile für die Energieeffizienz als auch für den Nutzerkomfort verspricht. Aktuelle Entwicklungen zeigen zudem, dass vielversprechende DT-Frameworks auf der Kombination von IoT-Technologien und datengetriebenen Modellen basieren (vgl. [48], [49]). Dies kann die Anreicherung des DT mit Betriebsdaten und damit die Evaluierungsmöglichkeiten der gebäudetechnischen Systeme verbessern [29].

4.1.2. Marktstudie

Über eine Marktrecherche wurde der aktuelle Stand der Digitalisierung im Bau und Gebäudebetrieb mit besonderem Fokus auf BIM, FM, DT und Beleuchtungssteuerungen untersucht. Die Befragung umfasste Teilnehmer:innen aus Forschung und Entwicklung (F&E), Fachplanung/Architektur, ausführenden Dienstleistungsunternehmen, Handel, produzierende Gewerbe, FM sowie Baueigentümer:innen. Die Umfrage wurde über mehrere Kanäle verbreitet. Dazu zählen die Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG) [50], die deutsche Gesellschaft für LichtTechnik und LichtGestaltung (LiTG) [51], die International Commission on Illuminance (CIE) [52], die Associazione Italiana di Illuminazione (AIDI) [53], die Facility Management Austria (FMA) [54], die International Facility Management Association (IFMA, Switzerland Chapter) [55] sowie die International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme (IEA SHC Task 70) [56]. Mailing Listen, Newsletter, Link-Platzierungen auf branchen-relevanten Homepages der genannten Kanäle wurden als Methoden gewählt. Die Umfrage wurde via LimeSurvey (version 3.22.4 + 200212) realisiert und war zwischen März und September 2023 zur Bearbeitung verfügbar. Die Teilnahme war freiwillig, ohne Vergütung und erfolgte ohne Erhebung personenbezogener Daten. Insgesamt ergaben sich 165 verwertbare Rückmeldungen (272 Teilnahmen). Die Mehrheit der Teilnehmenden arbeitete in großen Unternehmen mit internationalem Tätigkeitsbereich. Die meisten Teilnehmenden resultierten aus den Bereichen F&E, FM und Fachplanung (vgl. Abbildung 3). 51% der Rückmeldungen erfolgten aus Österreich, was auf die genutzten Kanäle zurückzuführen ist (Studiendetails in [26]).

Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Rückmeldungen nach Unternehmensgröße und Zielgruppe. Datenquelle: [26]



Etwa die Hälfte der Befragten stuft BIM als relevant oder sehr relevant für den Arbeitsalltag ein (Abbildung 4). Als wesentliche Vorteile werden eine höhere Transparenz im Planungs- und Bauprozess, eine effizientere Zusammenarbeit sowie eine bessere Verfügbarkeit von Informationen über den gesamten Gebäudelebenszyklus genannt. Gleichzeitig werden fehlende Schnittstellen, mangelnde Interoperabilität, hoher Zeitaufwand und unzureichend qualifiziertes Personal als wesentliche Hemmnisse einer breiten Einführung identifiziert (Abbildung 5). Diese Ergebnisse decken sich mit den in der Literatur beschriebenen Herausforderungen der Dateninteroperabilität zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen (siehe [29], [36], [40]).

Abbildung 4: BIM-Relevanz. Datenquelle: [26]

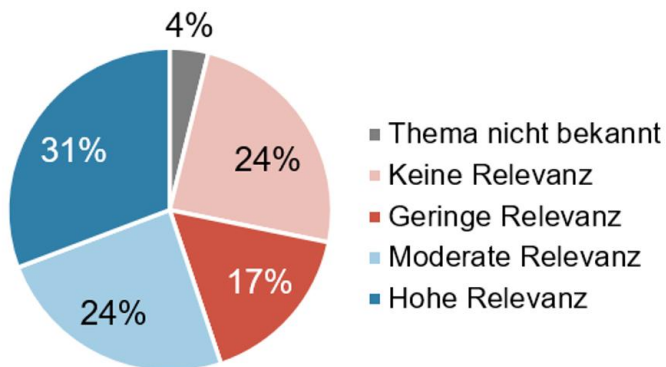


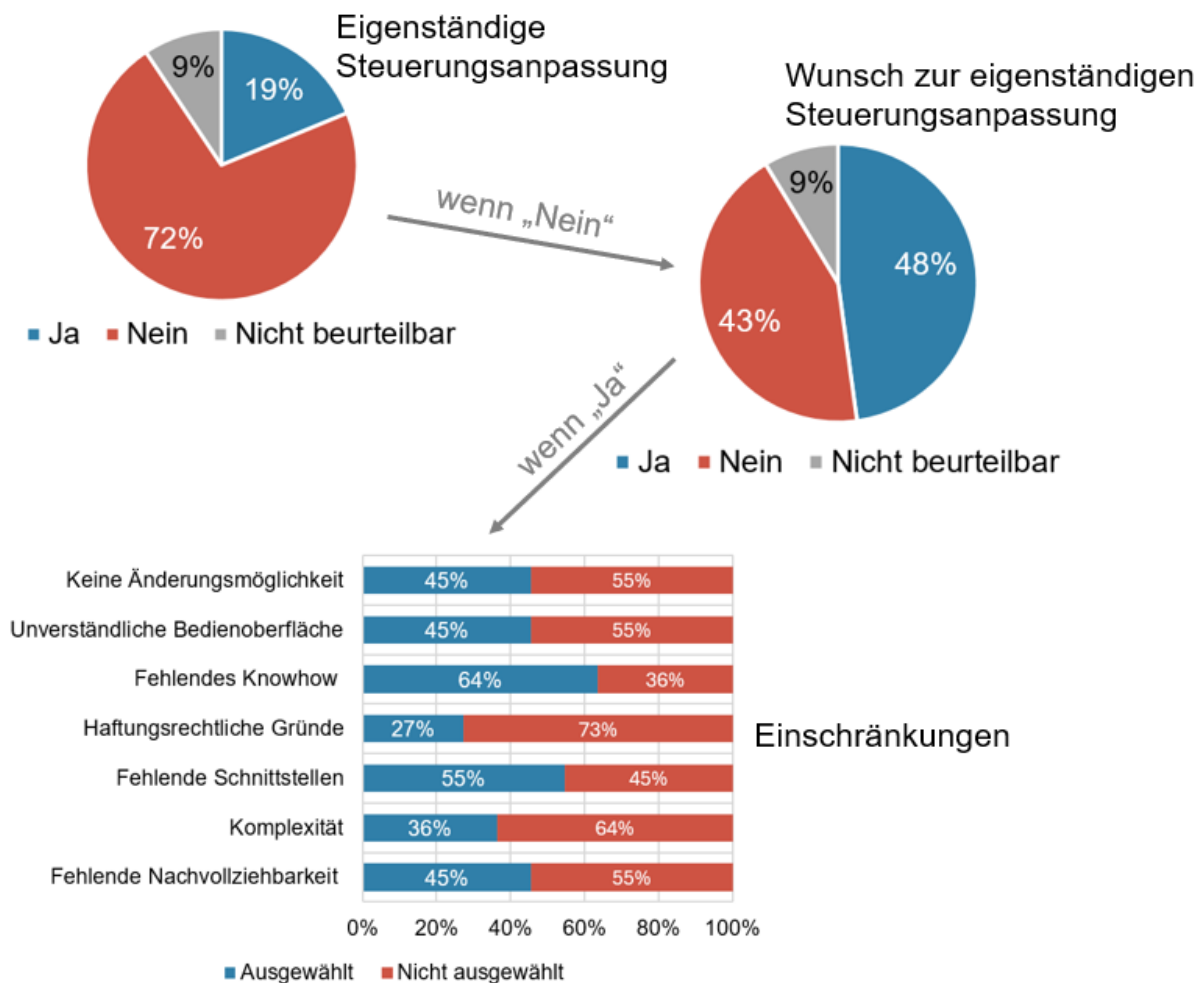
Abbildung 5: Vor- und Nachteile von BIM, aufgeschlüsselt nach den Zielgruppen Planung und Industrie. Datenquelle: [26]

PRO	Gründe für BIM	Planung	Industrie
	Wettbewerbsrelevanz	21%	23%
	Qualitätssicherung	20%	19%
	Transparenz/ bessere Projektkoordination	26%	27%
	Effizientere Planung / Produktverfolgung	28%	21%
	Thema nicht adressierbar	4%	6%
	Andere	1%	4%
CONTRA	Gründe gegen BIM	Planung	Industrie
	Einschränkungen der Funktionalität	8%	9%
	Fehlende Schnittstellen	17%	14%
	Keine Nachfrage	0%	6%
	Kostenaufwände	14%	15%
	Lücken im Systemablauf	11%	8%
	Unzureichendes Fachpersonal	20%	22%
	Unzureichende Komponentenabbildung	9%	9%
	Zeitaufwände	21%	17%

Auch im Bereich FM zeigt sich ein deutlicher Digitalisierungsbedarf. Zwar nutzen viele Organisationen bereits Computer-Aided Facility Management (CAFM), jedoch werden diese überwiegend für administrative Aufgaben und Wartungsplanung eingesetzt. Hoher Aufwand bei der Informationsbeschaffung, fehlende Verknüpfungen zwischen Planungs- und Betriebsdaten sowie mangelnde Schnittstellen zu anderen Softwarelösungen zählen zu den größten Herausforderungen. Die Befragten sehen daher großes Potenzial in einer stärkeren Integration von BIM und FM, um Wartungsprozesse, Fehlerdiagnosen und den Gebäudebetrieb effizienter zu gestalten. Ähnliche Potenziale werden auch in der Literatur durch BIM gestützte Verfahren zur Fehlererkennung und prädiktiven Wartung beschrieben (vgl. [40], [41]).

Ein weiterer Schwerpunkt der Marktstudie lag auf Steuerungssystemen. Die Ergebnisse zeigen, dass entsprechende Konzepte im Markt grundsätzlich positiv bewertet werden. In der Praxis beschränkt sich ihre Umsetzung jedoch häufig auf zonierte Regelungen und manuelle Übersteuerungsmöglichkeiten. Individuelle Nutzerinformationen wie Anwesenheit, Präferenzen oder Verhaltensmuster werden bislang nur eingeschränkt erfasst und ausgewertet. Gleichzeitig äußern sowohl Planer als auch FM den Wunsch nach einer stärkeren Integration nutzerbezogener Aspekte in technische Systeme, doch fehlen dazu oftmals die Möglichkeiten (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Rückmeldungen des Facility Managements zu den derzeitigen Möglichkeiten der eigenständigen Steuerungsanpassungen (links, oben), dem Wunsch zur eigenständigen Steuerungsanpassung (rechts, oben) sowie den Einschränkungen zur Steuerungsanpassung. Datenquelle: [26]



Die Umfrage führt weiter auf, dass vorhandenen Monitoringsysteme überwiegend Energieverbräuche, Klimadaten und Wetterinformationen erfassen. Nutzerbezogene Informationen wie Anwesenheitsdaten oder Beleuchtungsstärken werden dagegen nur selten erfasst. Dadurch bleiben Potenziale zur Optimierung von Energieeffizienz, Komfort und Gesundheit weitgehend ungenutzt. Für die Erfassung solcher Informationen werden in der Literatur unter anderem IoT-Systeme, implizite Datenerfassung über bestehende IT-Infrastrukturen sowie kamerabasierte Verfahren beschrieben [17], [26].

Die Marktrecherche identifiziert zudem Auto-Commissioning, automatisierte Fehlererkennung und die Nutzung von DTs als besonders relevante Zukunftsthemen. FM verfügen häufig nicht über ausreichende Möglichkeiten, Steuerungen nach der Inbetriebnahme anzupassen, obwohl hierfür ein klarer Bedarf besteht (vgl. Abbildung 6). Die Umfrage führt zudem auf, dass die Beteiligung der Planer häufig bereits mit der Übergabe des Gebäudes endet, wodurch wertvolle Betriebserfahrungen nicht in zukünftige Projekte zurückgeführt werden und Anreize für Phasen erweiterter Inbetriebnahmen limitiert werden. Als zentrale Entwicklungsfelder werden daher die Verknüpfung von BIM, DTs und POEs sowie verbesserte Interoperabilität, höhere Datenqualität und automatisierte Inbetriebnahmen identifiziert [26].

Abbildung 7: Rückmeldungen der Zielgruppe Fachplanung/Architektur zu den Bauphasen, über die eine aktive Involvierung besteht (pro Zeile eine Rückmeldung). Datenquelle: [26]

Architekturwettbewerb	Bedarfsplanung	Entwurfsplanung	Ausführungsplanung	Werkplanung	Ausschreibung und Vergabe	Projekt-/Bauüberwachung	Projektbetreuung, Gewährleistung	Keine Antwort
53%	42%	91%	60%	74%	74%	58%	26%	2%

4.1.3. Erweiterte Marktstudie

BIM verspricht Transparenz, Effizienz und integriertes Datenmanagement über den Lebenszyklus und wird dabei als sozio-technisches System verstanden, dessen Wert weniger in der Automatisierung, sondern im Orchestrieren von Arbeitsteilung, Wissensmobilisierung und transdisziplinärer Kooperation liegt [57], [58], [59], [60], [61]. Dennoch ist die Verbreitung und Implementierung von BIM erschwert [59], [62]. Insbesondere die Lichtplanung gilt als besonders anspruchsvoll, da bidirektionale Kopplungen zwischen BIM-Autorentools und Simulationssoftware fehlen und damit Informationsverluste, Mehrarbeit und Koordinationsfehler entstehen [63], [64], [65]. Die erweiterte Marktrecherche untersucht daher technische und organisatorische Barrieren der BIM Implementierung mit Fokus auf der Lichtplanung und leitet Lösungsstrategien ab [27].

Da die Ergebnisse der ersten Marktrecherche sehr aufschlussreich und umfangreich waren, erfolgte eine zweite Analyse (Ergebnisse in [27]). Diese wurde mit den Ergebnissen einer zweiten Umfrage der LiTG erweitert [66], [67], [68]. Der erste Fragebogen (4.1.2) wurde auf Teilnehmer:innen der Planung und F&E beschränkt, da der Fokus außerhalb vom Betrieb liegt. Daher wurde der Fragebogen auf 123 auswertbare Fälle reduziert wurde. Technische Aspekte wie Austauschformate, Schnittstellen und Softwareintegration werden über diese Umfrage adressiert. Der zweite Fragebogen fokussiert organisatorische Bedingungen wie Wissen, Akzeptanz, Investitionen und Lernprozesse und umfasste 72 valide Antworten. Die Auswertung kombinierte deskriptive Kennzahlen, Inferenzstatistik einschließlich χ^2 -Tests, Rangverfahren und logistische Regressionen sowie eine vergleichende Synthese beider Datensätze.

Die Ergebnisse führen auf, dass kleine Unternehmen vor allem Ressourcenengpässe und Qualifikationsdefizite aufweisen, große Unternehmen eher strukturelle Hürden bei Schnittstellen und Semantik. Vorteile werden in Transparenz und Projektcontrolling gesehen, variieren jedoch mit der Unternehmensgröße. Entwicklungsbedarfe betreffen vereinfachte Workflows, BIM kompatible Planungstools und mehr Transparenz zwischen Beteiligten. Die zeitliche Asynchronie der Beteiligung entlang der Leistungsphasen erzeugt Informationssilos und gefährdet die Kontinuität bis in den Betrieb. Integrierte Leistungen stützen sich bislang nur teilweise auf BIM Modelle und stoßen auf technische und logische Limitierungen sowie unklare Verantwortlichkeiten.

Die Ergebnisse der zweiten Umfrage führen auf, dass kleinere Unternehmen vor allem von Ressourcenengpässen, hohen Arbeits- und Kostenaufwänden und Qualifikationsdefiziten berichten, größere Unternehmen eher von strukturellen Hürden durch Schnittstellenintegration und semantische Inkonsistenzen (siehe hierzu Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10). Organisatorisch korrelieren Wissen und Haltung signifikant positiv. BIM ist nicht nur eine innovative Technologie, sondern auch ein umfassender Ansatz, dessen erfolgreiche Nutzung Training, etablierte Prozesse und eine unterstützende Kultur voraussetzt. Wirksamkeit zeigen in diesem Zusammenhang insbesondere Selbststudium und frei zugängliche Lernressourcen.

Abbildung 8: Gründe der Teilnehmer für die Nichtbeachtung des Themas BIM (Umfrage 2).
Datenquelle: [27]

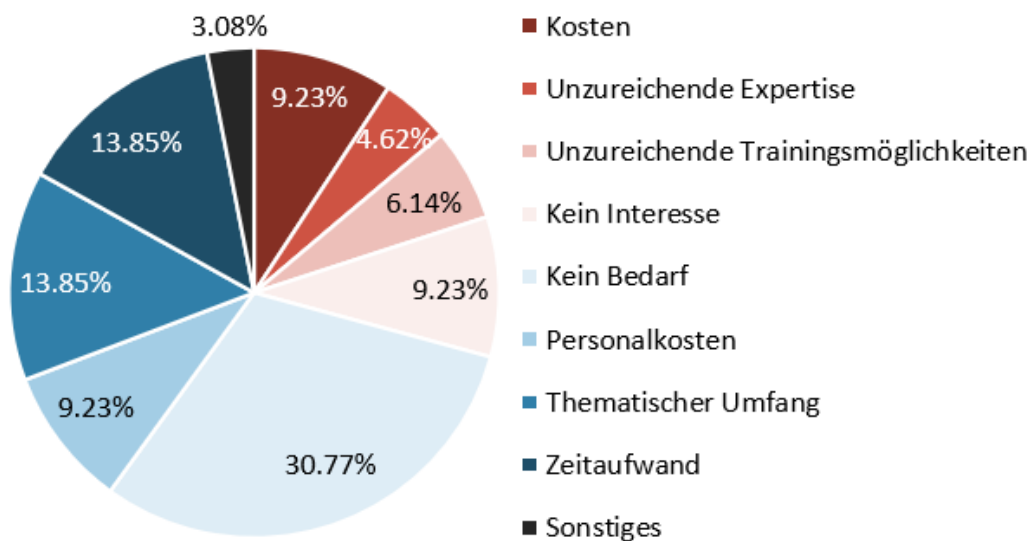


Abbildung 9: Übersicht des BIM-Schulungsangebots (Umfrage 2). Datenquelle: [27]

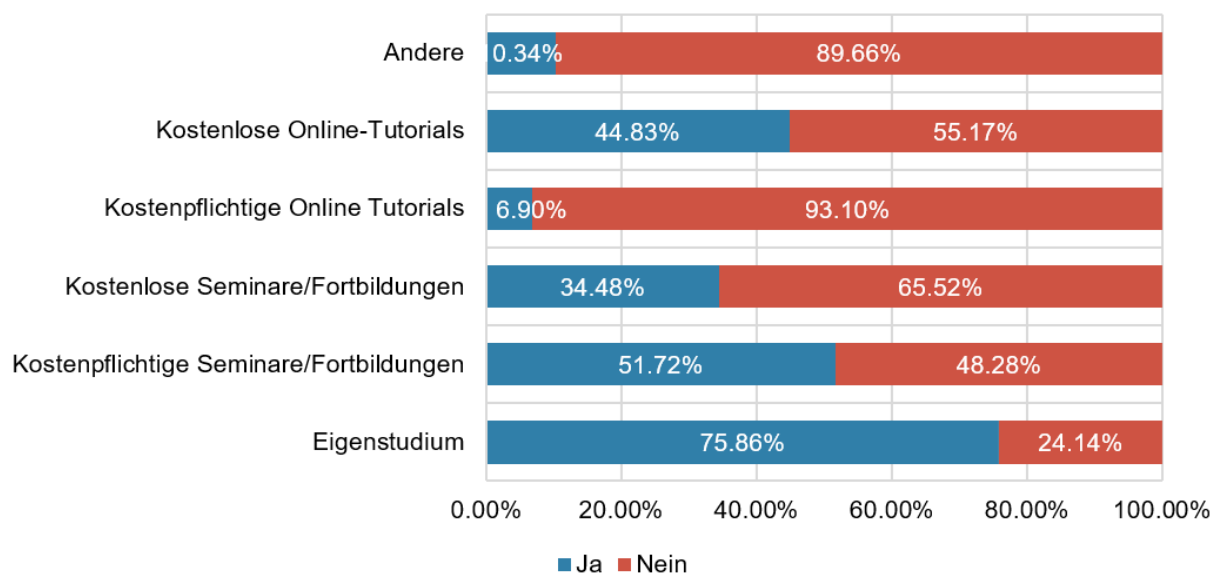
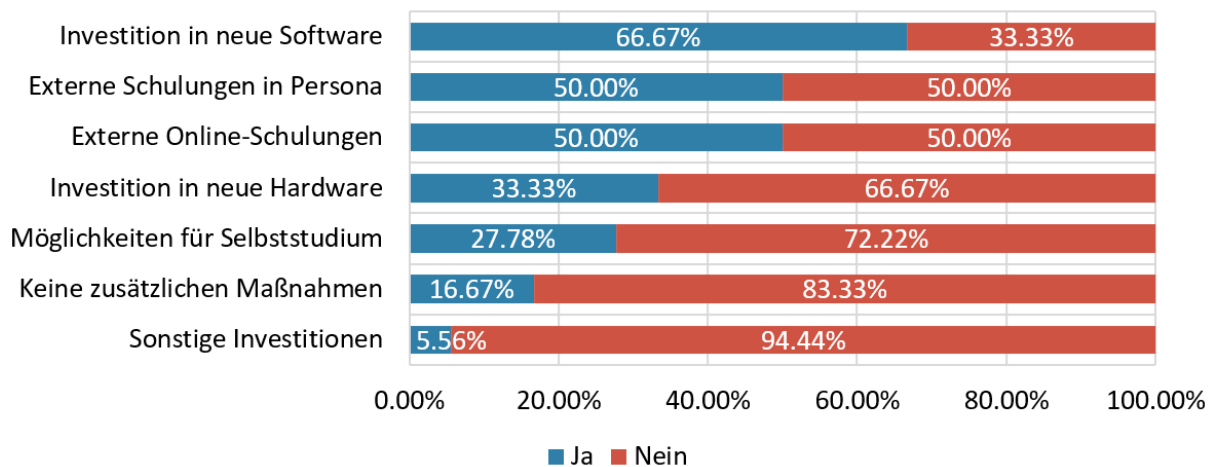


Abbildung 10: Maßnahmen zur Förderung der BIM-Implementierung (Umfrage 2). Datenquelle: [27]



Technisch werden offene, modulare Systeme, standardisierte Datenstrukturen und offene Schnittstellen empfohlen, da Open BIM-Frameworks als vielversprechende Lösung gelten [36]. Organisatorisch sind gestufte Einführungen, klare Verantwortlichkeiten, kontinuierliche Feedbackschleifen und organisationales Lernen erforderlich. Insgesamt kann BIM sein Potenzial nur entfalten, wenn technologische Innovation mit organisationaler Lernfähigkeit und kollaborativen Strukturen verknüpft wird, um die Lücke zwischen Anspruch und Praxis zu schließen. Die wahrgenommenen Vorteile konzentrieren sich auf Transparenz und Projektcontrolling und variieren signifikant mit der Unternehmensgröße, während die Hemmnisse von Ressourcenengpässen in kleineren Firmen bis zu Schnittstellen und Qualifikationsfragen in größeren Organisationen reichen. Der Befund, dass Wissen und Haltung eng zusammenhängen, unterstreicht die Relevanz gezielter Qualifizierung und organisationalen Lernens. Zukünftige Arbeiten sollten daher technische Interoperabilität, organisationales Lernen und kollaborative Governance konsequent koppeln, klare Rollen und Prozessstandards verankern und auf einer belastbaren Open BIM Infrastruktur aufsetzen, um die Übertragbarkeit in heterogenen Projektumgebungen zu sichern und die skalenwirksame Diffusion von BIM in der Lichtplanung zu beschleunigen (Details in [27]).

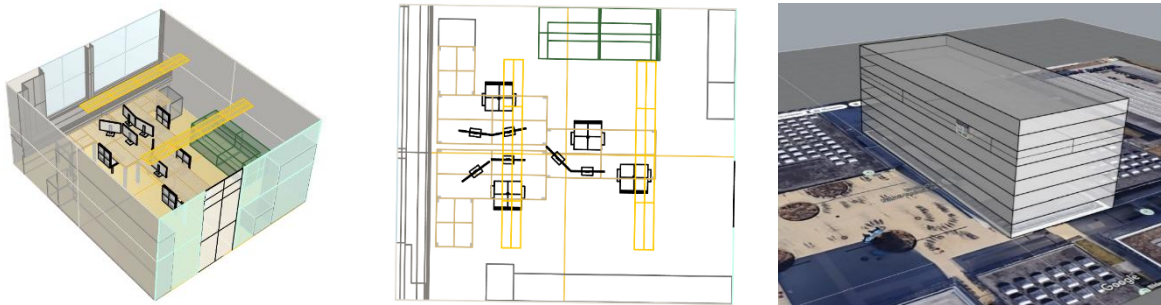
Workshops und Interviews, die im Rahmen von TwinLight organisiert wurden, bestätigten die Erkenntnisse aus Markt- und Literaturrecherche [30].

4.2. Ein Living Lab zur iterativen Entwicklung und für Anwenderstudien

Ausgehend von den Marktanforderungen erfolgte die Entwicklung der Systemarchitektur. Diese erfolgte in iterativen Prozessen am Beispiel eines realen Bürogebäudes. Dieses diente auch der abschließenden Akzeptanz- und Feldstudie. Grundlage bildet das Büroreferenzmodell des IEA Task 70 [56], [69], ein westorientiertes Gruppenbüro (26 m²) der Universität Innsbruck, welches als Living Lab umgesetzt wurde (Abbildung 12). Der Raum wurde in Rhinoceros 3D nach Bestandsplänen und Aufmaß modelliert. Für integrative, vollspektrale Simulationen wurden opake Materialien vor Ort mit einem Spectrolino vermessen. Transparente Materialien wurden mit LBNL Optics definiert. Die Westfassade umfasst Dreifachverglasung, außenliegenden Schutz und eine Jalousie, die in LBNL WINDOW parametrisiert und als BSDF über Schlitzwinkel von -85 bis +85 Grad erzeugt wurde. Zur Vermeidung von Blendung und Überhitzung besteht eine automatisierte Tageslichtsteuerung. Die

Kunstlichtanlage besteht aus vier deckenbündigen Leuchten mit je zwei T5 49 W Lampen Typ 840, insgesamt 98 W und 8620 lm. Eine tageslichtabhängige Regelung hält 500 lx mittlere Beleuchtungsstärke, fensternah mit stärkerer Dimmung. Zur Sicherung der Akzeptanz besteht stets die Möglichkeit einer manuellen Übersteuerung. Darüber hinaus erfolgt eine Steuerung des Kunstlichts in Abhängigkeit der Anwesenheit, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Die Anwesenheitserfassung erfolgt über Passiv-Infrarot Sensoren (PIR). Die PIR-Sensoren schalten nach 15 Minuten Abwesenheit das Kunstlicht aus; Decken Sensorik wurde bei der Inbetriebnahme kalibriert (weitere Details in [69]).

Abbildung 11: 3D-Modell eines Referenzbürraums: Ansicht (links), Grundriss (Mitte) und Gebäudeübersicht (rechts). Bildquelle: [69]

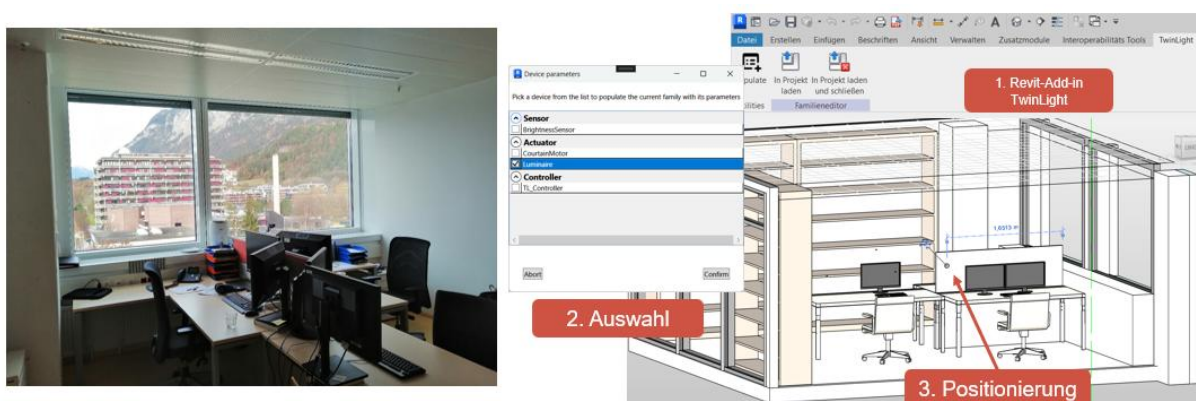


5 Ergebnisse

5.1. Steuerungsmodellierung in BIM

Ausgehend von den identifizierten Anforderungen aus Literatur- und Marktrecherche wurde in TwinLight ein durchgängiger Ansatz entwickelt, der BIM gezielt um Funktionen für die Modellierung, Parametrisierung und Inbetriebnahme von Gebäudeautomationssystemen erweitert und damit eine tragfähige Basis für DTs schafft. BIM liefert zwar den Standard für die geometrisch semantische Repräsentation von Bauwerksmodellen, jedoch bislang nur unzureichende Unterstützung für die Abbildung von Steuerungssystemen sowie für eine werkzeuggestützte, modellbasierte Auto Inbetriebnahme bietet [26], [29]. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird eine grafische domänenspezifische Sprache (DSL) direkt in Revit eingeführt, ergänzt um ein Add-In, das die modellbasierte Vorkonfiguration von Steuerungen erlaubt. Steuerungskomponenten wie Controller Sensoren und Aktoren werden als Revit Familien mit eindeutiger ID und technischen Parametern modelliert. Dazu zählen insbesondere Spannungsversorgung, Protokoll, Leitungsanforderungen, Kabeltyp, Kabelquerschnitt, Schutzklasse und Anschlussklemme. Die Komponenten werden am vorgesehenen Montageort platziert und über das TwinLight Add-In verknüpft (Abbildung 12). Zur besseren Unterscheidung dienen runde Symbole für Sensoren, rechteckige für Aktoren und rautenförmige für Controller, die perspektivisch durch technische Symbole ersetzt werden können.

Abbildung 12: TwinLight-Modellierungsrahmen zur Steuerungskonfiguration und Erstellung von Schemata. Bildquelle: [28]



Das Add-In bietet Funktionen für Import Informationsanreicherung Positionierung und Verbindung sowie für die Erstellung von Topologien auf Raum Etagen und Gebäudeebene. Die resultierenden Verbindungsstrukturen können als 2D-Topologiepläne ausgegeben und zusätzlich als dot-Dateien exportiert und mit GraphViz visualisiert werden (Abbildung 13). Integrierte Sicherheitsmaßnahmen im Add-In stellen gültige und konsistente Verknüpfungen sicher, verhindern doppelte Einträge und untersagen direkte Verbindungen zwischen Sensoren und Aktoren ohne beteiligten Steuerungsknoten. Das Add-In erlaubt die Erstellung von Controller im Rahmen übergeordneter Steuerkonzepte werden. Die Sichtbarkeit von Verbindungen kann räumlich und fachlich skaliert werden, um Lesbarkeit und Detailtiefe bedarfsgerecht zu steuern. Ergänzend steht eine textuelle DSL

für die Modellierung von Steuerungslogiken zur Verfügung (Abbildung 14). Aus ihr werden Laufzeitartefakte wie Skriptcode in Lua erzeugt und in Zielumgebungen übertragen (Details in [28], [70]).

Abbildung 13: Topologieexport über den TwinLight-Workflow. Bildquelle: [28]

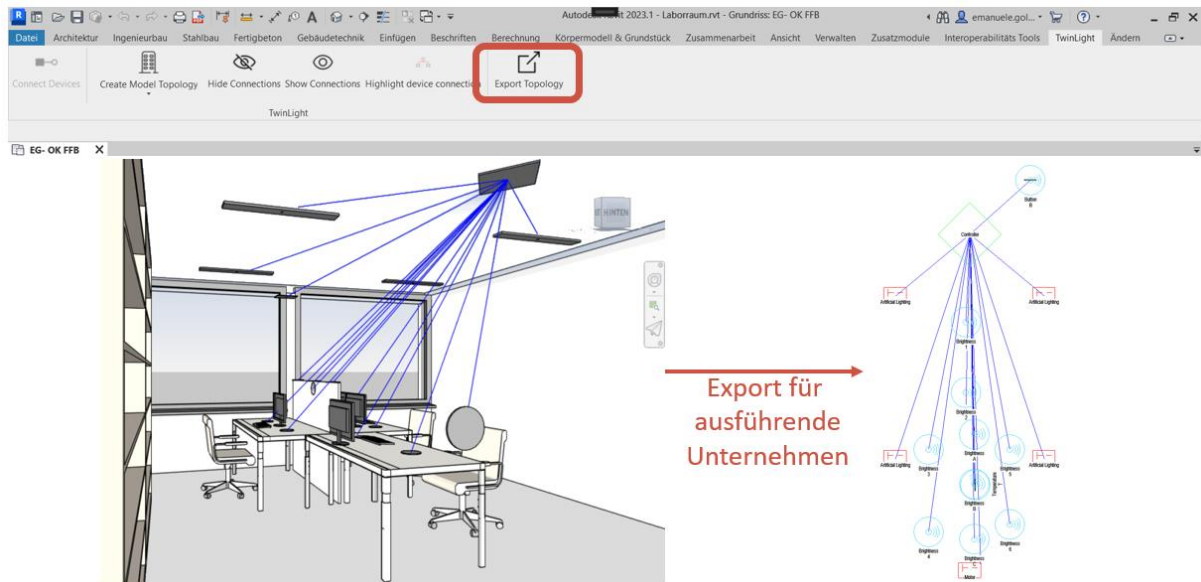


Abbildung 14: Steuerungsdesign mittels DSL. Bildquelle: [28]

```

1  Sensor occupancy_sensor {
2      is_on : Binary
3  }
4  Sensor illuminance_sensor {
5      illuminance : Analog lx
6  }
7
8  Actuator light_controller {
9      dimming_level : Analog lm
10 }
11
12 action "Increase lights dimming level if dark and someone is in the room"{
13     if occupancy_sensor->is_on is true and illuminance_sensor->illuminance < 500 then {
14         set light_controller->dimming_level to light_controller->dimming_level + 1
15     }
16     otherwise {
17         set light_controller->dimming_level to 0
18     }
19 }

```

Eine Middleware vermittelt zwischen modellbasierter Steuerungssoftware und der bauseitigen Hardware, entkoppelt Protokolle und dient als Brücke zur automatischen Inbetriebnahme sowie zur

späteren Wiederinbetriebnahme. Der herstellerneutrale Datenaustausch über IFC ermöglicht die kollaborative Bearbeitung durch Planende, Ausführende und Betreibende und unterstützt Rückkopplungen über den Lebenszyklus. Methodisch ist die Lösung als Design Science Artefakt ausgelegt und bis zu einem prototypischen Reifegrad umgesetzt. Der Modellierungsrahmen umfasst die Gerätespezifikation, Topologieansichten, die Extraktion von Verdrahtungsplänen als Grundlage der Installation und die Prüfung der Modellgültigkeit. Ein Revit-Plugin unterstützt die Erstellung von Topologien und die automatische Ableitung von 2D-Schemata. Eine erste Evaluation mit dem Technology Acceptance Model (TAM) zeigt, dass wahrgenommener Nutzen die Nutzung am stärksten beeinflusst, während Schulung die empfundene Bedienbarkeit signifikant verbessert. Die vorgeschlagene Erweiterung adressiert damit zentrale Anforderungen an die Vorkonfiguration, den kollaborativen Modellaustausch und die modellbasierte Auto Inbetriebnahme und liefert eine praktikable Grundlage, um DTs in Planung, Inbetriebnahme und Betrieb konsistent mit Steuerungsdaten zu verankern (Details in [28], [70]).

5.2. Middleware

Gebäude verfügen oft über eine Vielzahl proprietärer Steuerungssysteme mit unterschiedlichen Protokollen (z.B. DALI, KNX oder BACnet). Diese Heterogenität erschwert den nahtlosen Datenaustausch zwischen physischem Gebäude und DT erheblich. Bestehende Middleware-Lösungen sind entweder zu generisch oder zu proprietär und adressieren die spezifischen Anforderungen des Gebäudebetriebs nicht ausreichend.

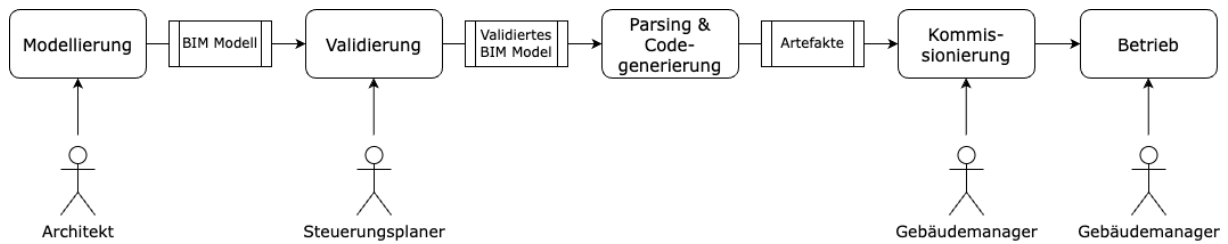
Im Rahmen von TwinLight wurde daher eine offene, konfigurierbare Middleware entwickelt, die das BIM-Modell als zentrale Betriebsgrundlage nutzt. Aus dem angereicherten BIM-Modell werden automatisch Konfigurationsartefakte erzeugt, mit denen die Middleware eigenständig Verbindungen zu Sensoren und Aktoren aufbaut, ohne dabei manuelle Programmierung vor Ort zu erfordern. Damit wird das BIM-Modell nicht nur in der Planung, sondern auch im Betrieb zur Single Source of Truth.

Die implementierte Middleware bildet die technische Schnittstelle zwischen dem BIM-Modell und den physischen Gebäudesteuerungssystemen. Sie ermöglicht den bidirektionalen Datenaustausch zwischen dem virtuellen und dem physischen Zwilling und automatisiert die Inbetriebnahme der Gebäudeautomation [71].

Die Architektur der Middleware folgt dabei einigen zentralen Entwurfsentscheidungen. Das Command-Query-Response-Separation-Pattern trennt lesende und schreibende Operationen. Eine dedizierte Datenplattform auf Basis von InfluxDB übernimmt Erfassung, Speicherung und Echtzeit-Streaming von Gebäudedaten. Ein homogenes Datenmodell auf JSON-Basis konvertiert heterogene Gerätedaten in eine einheitliche interne Repräsentation. Eine ergänzende Zugriffskontrolle wurde mit OAuth2 umgesetzt.

Der Inbetriebnahme-Workflow (Abbildung 15) umfasst drei Schritte: Validierung des BIM-Modells (1), automatische Generierung von Laufzeitartefakten (2) sowie Initialisierung der Middleware (3). Der gesamte Prozess wurde im Living Lab in ca. 17 Sekunden abgeschlossen — ein Aufwand, der manuell mehrere Tage erfordern würde.

Abbildung 15: Kommissionierungsworkflow. Bild adaptiert von: [71]



Die entwickelte Middleware schließt damit eine Lücke, die weder generische IoT-Plattformen noch gebäudespezifische Insellösungen bisher adressieren konnten. Die Lösung bietet eine automatisierte, modellgetriebene Kopplung von Planung und Betrieb über offene Standards. Dies reduziert Aufwände für die Inbetriebnahme, vermeidet Vendor Lock-in und schafft die Grundlage für kontinuierliche Optimierungen über den gesamten Gebäudelebenszyklus, von der ersten Inbetriebnahme bis hin zu datengetriebenen Anpassungen während des Gebäudebetriebs.

5.3. Modellkontrolle

Ein BIM-Modell, das als Single Source of Truth für Inbetriebnahme und Betrieb dienen soll, muss korrekt und vollständig sein. Fehlende Geräteparameter, inkonsistente Verknüpfungen oder unvollständige Steuerungsinformationen führen sonst zu Fehlern in der automatisierten Inbetriebnahme, welche im schlimmsten Fall erst nach der physischen Installation bemerkt werden. Eine automatisierte Modellprüfung vor der Inbetriebnahme erweist sich daher als vorteilhaft und vor allem sicherheitsrelevant.

Im Rahmen von TwinLight wurde dafür das Framework BIMReason entwickelt [72], [73]. BIMReason erwartet ein IFC-basiertes BIM-Modell sowie eine Regelspezifikation als Eingabe und prüft das Modell automatisiert gegen diese Spezifikation. Die Prüflogik basiert auf semantischem Reasoning mit Technologien des Semantic Web. Spezifikationen sind als eigenständige, austauschbare Artefakte definiert, was sowohl Transparenz als auch Wiederverwendbarkeit sicherstellt.

Das Prinzip lässt sich an einem konkreten Beispiel aus dem TwinLight-Kontext zeigen. Die folgende Regel prüft, ob allen Steuerungsgeräten im BIM-Modell eine eindeutige Geräteerkennung zugewiesen ist (Abbildung 16).

Abbildung 16: Beispielregeln zur Prüfung notwendig vorhandener Device. Bild adaptiert von: [72], [73]

```

[ check_device_id_missing :
    (?s rdf:type tl:Device)
    noValue(?s tl:hasDeviceID)
    -> (?s tl:check_device_ididentifier tl:FAIL) ]

[ check_device_id_present :
    (?s rdf:type tl:Device)
    (?s tl:hasDeviceID ?id)
    -> (?s tl:check_device_ididentifier tl:PASS) ]

```

Die erste Regel weist jedem Gerät ohne Kennung das Ergebnis FAIL zu, die zweite bestätigt korrekt parametrisierte Geräte mit PASS. Das Ergebnis ist ein Prüfbericht, der alle betroffenen Modellelemente eindeutig identifiziert. Analog lassen sich weitere Regeln definieren, bspw., der ob alle erforderlichen Protokollangaben vorhanden sind.

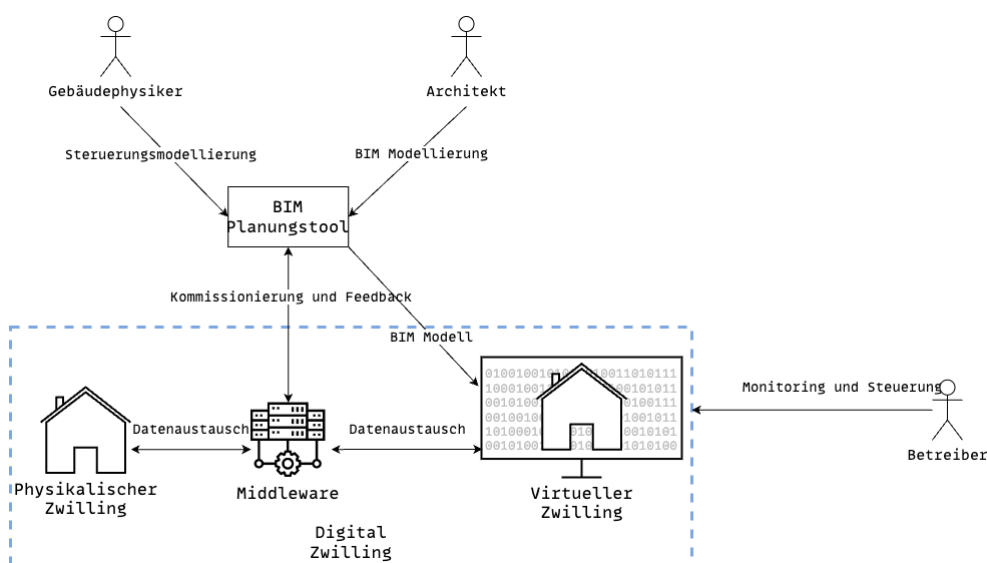
BIMReason ist direkt in den automatisierten Inbetriebnahme-Workflow von TwinLight eingebettet. Bevor Konfigurationsartefakte aus dem BIM-Modell generiert werden, prüft BIMReason, ob alle notwendigen Informationen vollständig und korrekt vorliegen. Fehler werden früh erkannt und können korrigiert werden, bevor sie sich in den physischen Betrieb fortpflanzen. Damit schließt die Modellkontrolle die Lücke zwischen modellbasierter Planung und zuverlässiger automatisierter Ausführung (weitere Details in [72], [73]).

5.4. Vom BIM zum Digitalen Zwilling

Das BIM-Modell bildet in TwinLight die Grundlage für den Digitalen Zwilling. Es enthält nicht nur geometrische und bauphysikalische Informationen, sondern auch die modellierten Steuerungskomponenten, deren Topologien und Konfigurationsparameter. Damit wird BIM zur verbindlichen Arbeitsgrundlage für alle Beteiligten – von der Fachplanung über die ausführenden Unternehmen bis zum Gebäudebetrieb [25].

Die Transformation von BIM zum DT erfolgt über die in Abbildung 17 dargestellte Systemarchitektur. Architekten und Gebäudephysiker arbeiten gemeinsam am BIM-Modell und integrieren die Steuerungsauslegung direkt in die Gebäudeplanung. Aus diesem angereicherten Modell werden automatisch Konfigurationsartefakte generiert, die die Middleware nutzt, um eine bidirektionale Verbindung mit dem physischen Gebäude herzustellen. Der DT entsteht dadurch nicht als separates System, sondern als konsequente Weiterentwicklung des BIM-Modells um Echtzeitdaten aus dem Betrieb.

Abbildung 17: Vom BIM-Modell zum Digitalen Zwilling. Bildquelle: [25]



Im laufenden Betrieb ermöglicht der Digitale Zwilling die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Betriebsdaten wie etwa Beleuchtungsstärken, Anwesenheitsmuster und Energieverbräuche.

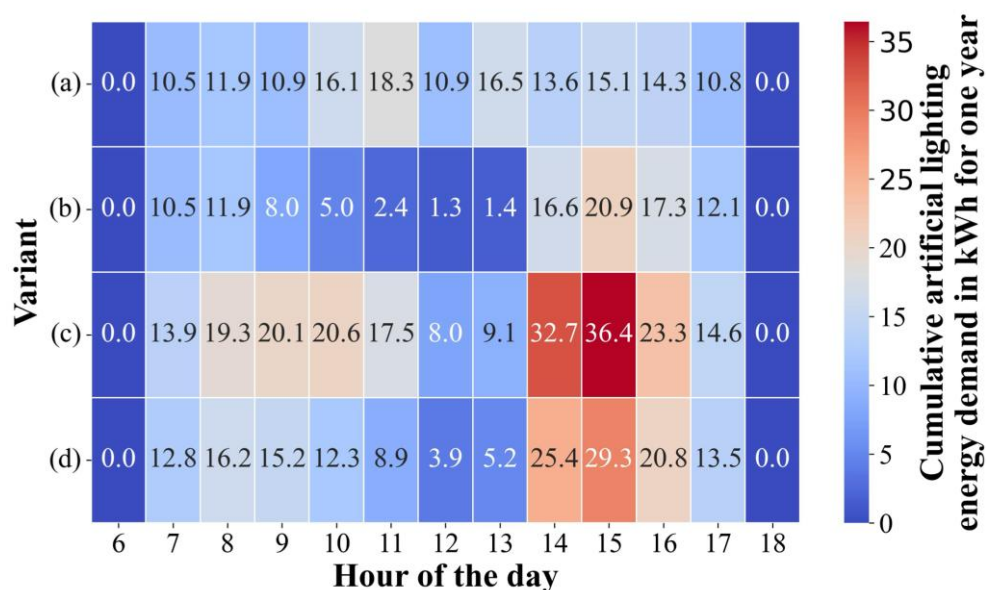
Diese Daten können genutzt werden, um Steuerungslogiken anzupassen, Simulationen zu kalibrieren und EPGs zu identifizieren. Änderungen an der Steuerung werden im BIM-Modell vorgenommen und über die automatisierte Inbetriebnahme direkt ins Gebäude übertragen, ohne aufwändige manuelle Eingriffe vor Ort.

5.5. Aufschlüsselung des Energy Performance Gap

Simulationen sind ein zentrales Werkzeug in der Gebäudeplanung. Sie ermöglichen eine frühe Bewertung von Energieeffizienz und Nutzerkomfort. Gleichzeitig ist bekannt, dass simulierte und reale Gebäudeperformance oft voneinander abweichen – der sogenannte Energy Performance Gap (EPG) [32], siehe hierzu auch Kapitel 3.1. Eine wesentliche Ursache liegt in den vereinfachten Annahmen früher Planungsphasen, etwa zu Materialeigenschaften, Verschattung oder Innenraumgestaltung.

Im Rahmen von TwinLight wurde am Beispiel des Living Labs untersucht, wie sich der Detaillierungsgrad des BIM-Modells auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Dazu wurden vier Varianten verglichen, die typische Planungsphasen abbilden: von einer vereinfachten Darstellung ohne Mobiliar (a) und mit Standardreflexionen (b) bis hin zu einem hochdetaillierten Modell mit Mobiliar und Standardreflexionen (c) und real gemessenen Materialeigenschaften (d) – Abbildung 18. Die Ergebnisse zeigen, dass der Energiebedarf für Kunstlicht je nach Variante zwischen 1,3 kWh/m²a und 36,4 kWh/m²a liegt. Die größten Abweichungen treten im Studienobjekt in den Nachmittagsstunden auf, wenn die Anwesenheitswahrscheinlichkeit hoch ist (Abbildung 18). Weitere Details in [74]

Abbildung 18: Kumulierter Kunstlicht-Energiebedarf der Jahressimulation über den Tagesverlauf für die vier Planungsvarianten. Bildquelle: [74]



Zur objektiven Quantifizierung dieser Lücke wurde ein neues Maß eingeführt, das auf dem Intersection-over-Union-Prinzip (IoU) aus der Bildverarbeitung basiert. Es vergleicht simulierte und reale Zeitreihendaten und ergibt einen Wert zwischen 0 und 1, wobei 1 eine vollständige Übereinstimmung bedeutet. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst hochdetaillierte Modelle noch

messbare Abweichungen aufweisen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Simulationsmodelle kontinuierlich mit Betriebsdaten aus dem DT zu kalibrieren [74].

5.6. Kontinuierliche Optimierung

Die kontinuierliche Inbetriebnahme stellt einen zentralen Ansatz dar, um den Energiebedarf von Gebäuden dauerhaft an reale Nutzungsmuster anzupassen und dadurch den Energieverbrauch sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren. Da die Betriebsphase den größten Anteil am Energiebedarf eines Gebäudes verursacht [75], liegt hier ein besonders großes Optimierungspotenzial. Grundlage der kontinuierlichen Inbetriebnahme ist das fortlaufende Monitoring technischer Anlagen und relevanter Umgebungsparameter. Durch die automatische Erfassung von Energieverbräuchen, Raumklimaparametern, Belegungsdaten und weiteren Betriebszuständen können Energieflüsse transparent gemacht und ineffiziente Betriebsweisen identifiziert werden. Die gewonnenen Daten ermöglichen sowohl ein wirksames Energiecontrolling als auch vorausschauende Wartungsstrategien im Sinne eines Predictive Maintenance.

Besonders deutlich wird der Nutzen bei der Anpassung von Anlagen an tatsächliche Nutzeranforderungen. Studien zeigen, dass durch kontinuierliche Echtzeitmessungen und die anschließende Optimierung gebäudetechnischer Systeme an reale Nutzungsmuster erhebliche Energieeinsparungen erreicht werden können [76], [77], [78], [79]. Die Überwachung von Anwesenheit ermöglicht beispielsweise eine bedarfsgerechte Anpassung der PIR-basierten Nachlaufzeiten. Im Studienobjekt, dem Living Lab der Universität Innsbruck (vgl. Kapitel 4.2 und [69]) zeigte eine Langzeitstudie, dass 32,99% der Kunstlichtbetriebszeiten bei einer Nachlaufzeit von 15 min (Industriestandard) ohne Anwesenheit erfolgten. Durch die Anpassung der PIR-basierten Steuerung an das individuelle Nutzerverhalten gemäß der Methode von Hammes et al. (siehe [78]) konnte die Nachlaufzeit auf 6 min reduziert werden ohne den Nutzerkomfort durch störende Falsch-Aus-Events zu beeinträchtigen. Die Anpassung der Nachlaufzeit führte zu einer Reduktion des Kunstlichtenergiebedarfs um rund 16% [80].

Für die erfolgreiche Umsetzung der kontinuierlichen Inbetriebnahme kommt BIM eine Schlüsselrolle zu. BIM ermöglicht die strukturierte Zusammenführung von Geometrie-, Anlagen-, Nutzungs- und Betriebsdaten in einem konsistenten digitalen Informationsmodell. Dadurch können technische Zusammenhänge ganzheitlich bewertet und Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Gewerken nachvollzogen werden. Auf dieser Grundlage können vollumfängliche Bewertungen des Gebäudebetriebs ermöglicht werden, die weit über isolierte Einzelanalysen hinausgehen. DTs verknüpfen das BIM-Modell mit Echtzeitdaten aus Sensoren, IoT-Systemen und Energiemonitoring-Plattformen. Die erfassten Daten eine belastbare Grundlage für strategische Investitionsentscheidungen und die Priorisierung von Effizienzmaßnahmen. Die kontinuierliche Inbetriebnahme wird somit zu einem datengetriebenen Prozess, bei dem BIM und DTs die Grundlage für transparente Entscheidungen, adaptive Regelstrategien und langfristige Energieeinsparungen bilden. Erfolge bereits umgesetzter Maßnahmen nachvollziehbar dokumentieren und kommunizieren. Dies erhöht die Akzeptanz bei Betreiber:innen, Nutzer:innen und Eigentümer:innen gleichermaßen und stärkt die Grundlage für einen nachhaltigen Gebäudebetrieb.

5.7. Akzeptanzstudie

Die Funktionalität der entwickelten Lösung wurde mittels TAM evaluiert (TAM-Methodik in [81]). Die Rückmeldungen wurden über das Online-Umfragetool in LimeSurvey erhoben (Version 6.15.4). Die Teilnahme war freiwillig und ohne Vergütung. Es gingen 24 Rückmeldungen ein. 11 Teilnehmende waren aus der technischen Fachplanung, 4 aus dem Bereich F&E, 2 aus der Architektur, 7 Teilnehmende aus sonstigen Bereichen der Baubranche. Die Teilnehmenden waren von 12 unterschiedlichen Unternehmen. Die 24 Teilnehmenden können wie folgt nach Unternehmensgröße aufgliedert werden: 14 auf Großunternehmen, 2 auf mittlere Unternehmen, 5 auf Kleinunternehmen und 3 auf Kleinstunternehmen. Arbeitsstandort ist basierend über die gewählten Akquise-Kanäle überwiegend auf Österreich (13) und Deutschland (5) zurückzuführen. 3 Teilnehmende sind aus Serbien, 2 aus der Schweiz und 1 Person aus Italien. BIM Erfahrung lag bei 13 Teilnehmenden mit mehr als 5 Jahren vor, 9 Personen mit bis zu 5 Jahren und 2 Teilnehmende ohne Erfahrung. Die BIM Relevanz wurde bei 50% als sehr bis außerordentlich wichtig bewertet, 29,17% als mäßig und 20,83 als unwichtig bis wenig relevant [82].

Für die TAM konnten nur 23 Auswertungen herangezogen werden. Eine Rückmeldung wurde wegen Unvollständigkeit ausgeschlossen. Insgesamt zeigte sich eine leicht positive Bewertung der Konstrukte PU und PEOU. Die TQ wurde stärker positiv bewertet. Weder BIM-Erfahrung noch BIM Relevanz im Unternehmen standen in Zusammenhang mit der Bewertung von PU oder PEOU. Die systemspezifischen Funktionen wurden insgesamt moderat bis positiv bewertet, besonders das Revit-Plugin und die Interaktion mit dem digitalen Zwilling wurde positiv evaluiert (Abbildung 19 und Abbildung 20, weitere Details in [82]).

Abbildung 19: Boxplot der TAM-Konstrukte. Bildquelle: [82]

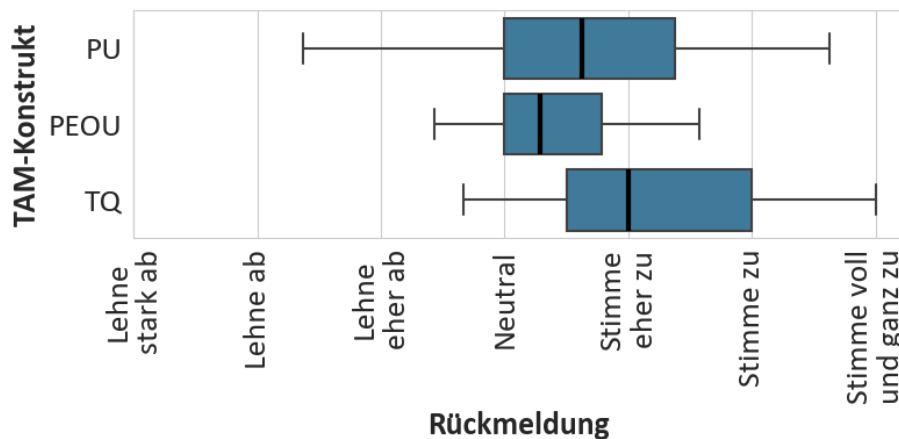
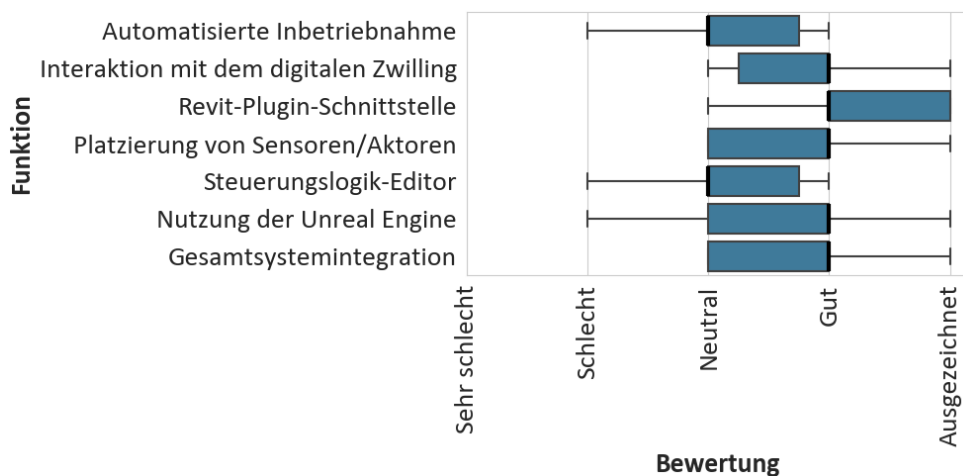


Abbildung 20: Boxplot der subjektiven Bewertung der systemspezifischen Funktionalität der umgesetzten Entwicklung. Bildquelle: [82]



5.8. Ergebnisse im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft

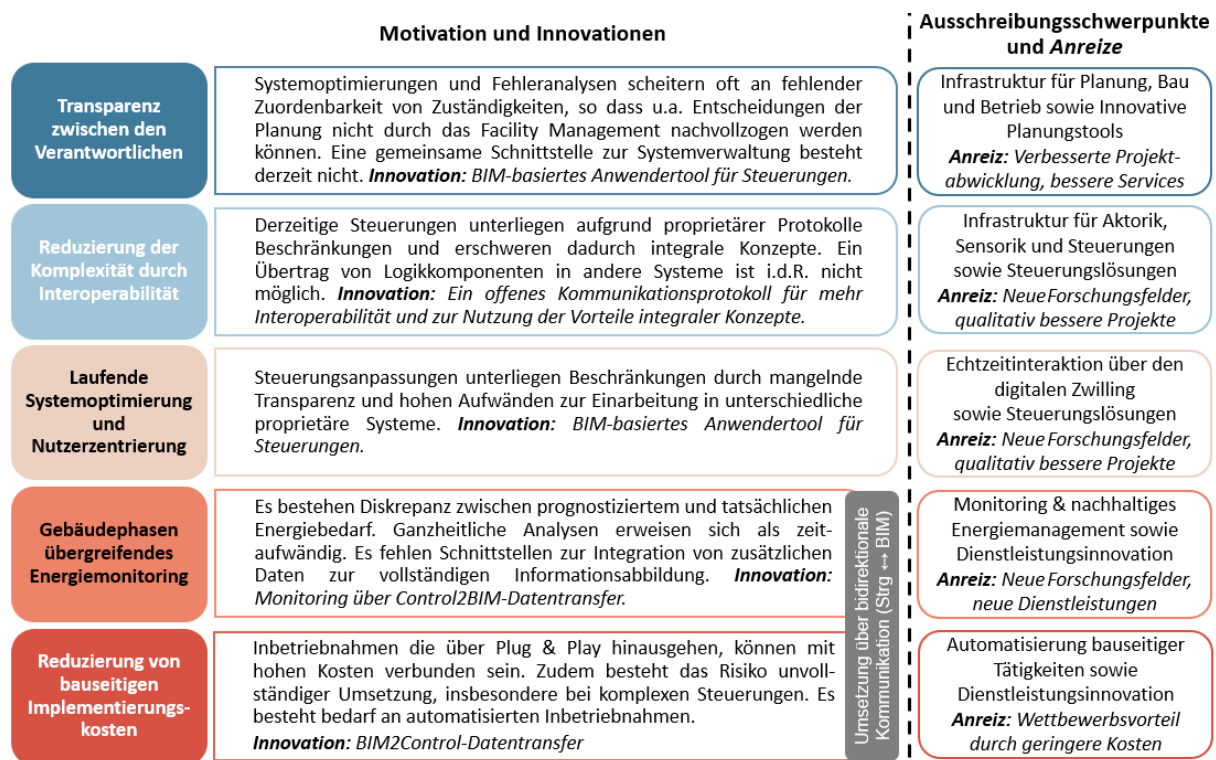
TwinLight adressiert die Ausschreibungsziele des Programms Stadt der Zukunft durch eine offene, modellgetriebene Systemarchitektur, die BIM, Simulation, Gebäudeautomation und DTs über alle Lebenszyklusphasen verbindet und so den Weg zu klimaneutralen Gebäuden und Quartieren ebnet. Die explizite Modellierung von Steuerungslogiken, Sensorik und Aktorik in BIM sowie die herstellernerneutrale Middleware ermöglichen energieeffiziente, ressourcenschonende Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Tages- und Kunstlicht werden integrativ geplant, automatisch in Betrieb genommen und datenbasiert optimiert. Das reduziert den Kunstlichtenergiebedarf, mindert sommerliche Kühllasten durch intelligente Steuerung des Tageslichtbegrenzungssystems und steigert die Gebäudequalität bei geringsten Emissionen. Für den Bestand schafft die Trennung von Software und Hardware mit offenen Protokollen kostengünstige Nachrüstlösungen. Auto-Commissioning senkt Zeit- und Fehlerrisiken und erhöht die Wirtschaftlichkeit der Sanierung.

Technologisch deckt TwinLight wesentliche Aspekte der TGA ab. Dazu zählen standardisierte Datenmodelle, interoperable Schnittstellen (IFC, JSON), Zeitreihenplattformen und Sicherheitsmechanismen für den Echtzeitbetrieb. Der geschaffene Digitale Zwilling dient als operative Plattform für Monitoring, POE, prädiktive Optimierung und kontinuierliche Inbetriebnahme, wodurch Energieflüsse transparent werden und Lasten bedarfsgerecht flexibilisiert werden können, etwa durch belegungs- und tageslichtadaptive Strategien.

TwinLight adressiert zudem die Weiterentwicklung intelligenter Technologien, indem Datenmanagement (Erfassung, Analyse, Archivierung), technische Hardware und IoT-Infrastruktur mit integrierten Planungs-, Simulations- und Betriebsprozessen verbunden werden. Mit BIMReason wird die automatisierte Qualitätssicherung der Modelle vor Bau und Betrieb verankert, was Planungs- und Schnittstellenrisiken reduziert und Transparenz für alle Beteiligten schafft. Insgesamt liefert TwinLight belastbare, übertragbare Bausteine für die Baubranche, wodurch die Energie- und Ressourceneffizienz nachweislich gesteigert werden kann.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht Projektergebnisse im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft (Abbildung 22):

Abbildung 21: Motivation und Innovationsbedarf von TwinLight sowie deren Verortung in den Ausschreibungszielen des Programms Stadt der Zukunft.



5.9. Praktische Relevanz

Die Bauwirtschaft ist mit einem jährlichen Umsatz von über 1,3 Billionen Euro ein zentraler Wirtschaftsfaktor in Europa (rund 9,5 % des Bruttoinlandsprodukts der EU-Länder). Gleichzeitig steht die Branche vor Herausforderungen durch stärkere Digitalisierung und Nachhaltigkeit ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Building Information Modelling (BIM) gilt als Schlüsseltechnologie der Bauwirtschaft und etabliert sich nicht zuletzt durch gesetzliche Vorgaben zunehmend als internationaler Standard. Viele BIM-Prozesse scheitern jedoch derzeit an fehlender Interoperabilität und proprietären Systemgrenzen, wodurch Planung, Inbetriebnahme und Betrieb nur eingeschränkt durchgängig abgebildet werden können, mit negativen Konsequenzen auf die Wirtschaftlichkeit der Planung und Umsetzung von Bauprojekten. Zudem fehlen Erfolgskontrollen umgesetzter Konzepte für Planer:innen, da diese zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme kaum mehr involviert sind.

Die Zielgruppe TwinLights ist die gesamte internationale BIM-Szene, die das Ziel verfolgt, die notwendigen Services und offenen Schnittstellen mit klar definierten Konventionen für den BIM-Prozess im Sinne von Open BIM bereitzustellen. Damit wird der reibungslose Austausch zwischen Architektur, Fachplanung, Installation und Facility Management für das digitale Planen und Bauen der Zukunft gefördert.

TwinLight unterstützt die Koordination zwischen Elektro- und Lichtplaner:innen, der Industrie und Architektur durch systemoffene Ansätze sowie eine gemeinsame Anwenderschnittstelle. Dadurch werden proprietäre Schranken abgebaut, was die Planungssicherheit erhöht und eine gewerkeübergreifende Zusammenarbeit fördert. Interdisziplinäre Evaluierungen während aller Bauphasen sowie die Rückführung von Betriebsdaten sorgen für Erfolgskontrollen für die Planung und stärken die Innovations- und Entscheidungskompetenz der Beteiligten. BIM-Technologien, wie

TwinLight, ermöglichen nicht nur einen Wandel in Energie- und Bauprozesseffizienz, sondern schaffen neue Geschäftsfelder (bspw. Nachnutzungsevaluierung und Steuerungsdesign), die von einem neuen Publikum erschlossen werden können. Die Möglichkeit automatisierter Inbetriebnahmen soll nicht nur Fehlerrisiken minimieren, sondern auch insbesondere die bauseitigen Kosten reduzieren (5-10% der Installationskosten).

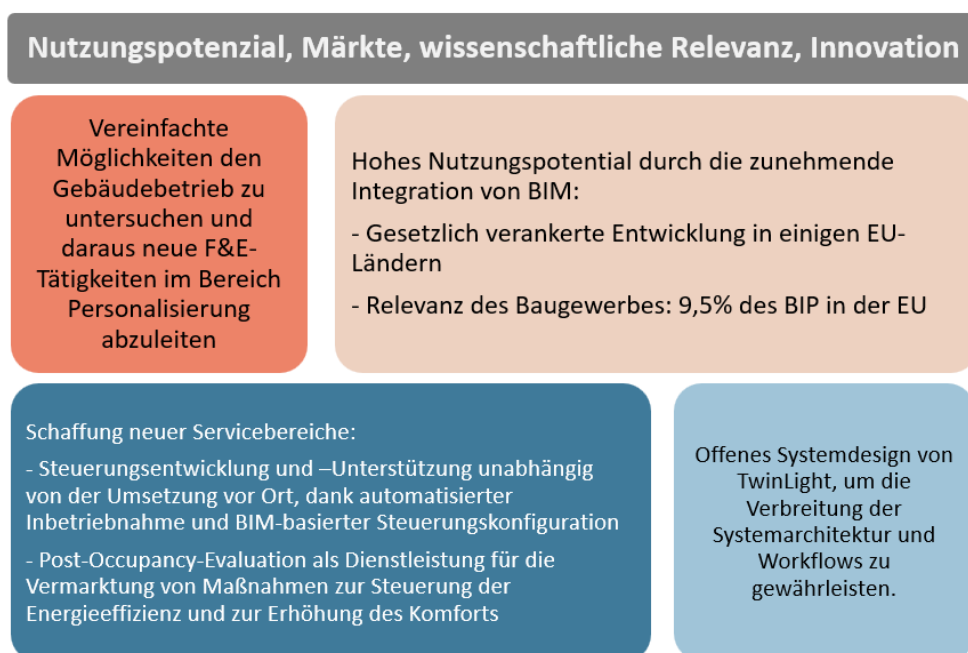
Mit TwinLight und der damit verbundenen allgemein zugängliche Entwicklungsumgebung werden laufende Systemanpassungen und Inbetriebnahmen effizienter und einfacher, was Vorteile reduzierter Arbeits- und Kostenaufwände sichert. Dadurch ist eine datengetriebene Optimierung von Energieverbrauch und Nutzerkomfort möglich, wovon Endanwender:innen profitieren.

Die Projektergebnisse bieten dem Konsortium insbesondere die Chance, integrative Planungsverfahren stärker ins Tagesgeschäft einzubinden. Neben dem Wissensaufbau auf dem Gebiet der integralen Steuerung wurden auch die technischen Kompetenzen für die zukunftssträchtige Verbindung von BIM und Beleuchtungssteuerungen ausgebaut. Zudem bietet das Projekt die Chance neue Geschäftsfelder zu erschließen durch die Möglichkeit energetischer und wirtschaftlicher Bewertung des laufenden Betriebes (Datenrückführung Control2BIM) im Rahmen einer Post-Occupancy-Evaluation können Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden, deren Nutzen und Verkaufsargument reduzierte Energiekosten und verbesserter Komfort sind.

Als BIM-basiertes Planungs- und Anwendertool für (Beleuchtungs-)Steuerungen bietet TwinLight einen durchgängigen Mehrwert entlang des gesamten Gebäudelebenszyklus im wirtschaftlich relevanten Bausektor, und zwar von der Planung über die Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb und zur Wartung. TwinLight stärkt damit nicht nur die Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten, sondern adressiert zugleich die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Bauwirtschaft in Österreich und legt den Grundstein für eine zukunftsfähige Bau- und Immobilienbranche.

Die nachfolgende Abbildung führt die ermittelten Potentiale zusammen (Abbildung 22):

Abbildung 22: TwinLight - Verwertungspotentiale, Märkte, Relevanz und Innovation.



6 Schlussfolgerungen

TwinLight demonstriert, dass integrale Tageslicht- und Kunstlichtsteuerungen nur dann ihr volles Potenzial entfalten, wenn Planung, Inbetriebnahme und Betrieb über ein konsistentes, offenes Informationsökosystem verbunden sind. Markt- und Literaturanalysen bestätigen den Bedarf an Interoperabilität, offene Standards, durchgängige Workflows und nutzerzentrierte Verfahren sind Voraussetzung, um EPGs zu verringern, Komfort sicherzustellen und Wissen über den Lebenszyklus zu bewahren. Daher schließt TwinLight zentrale Lücken zwischen BIM, Simulation und Gebäudeautomation, indem das Gewerk Steuerung vollumfänglich im digitalen Gebäudemodell verankert wird, mittels Middleware in den Betrieb überführt und Betriebsdaten über selbige rückgekoppelt werden. Dadurch wird BIM zum DT und zur belastbaren Single Source of Truth, die sowohl kollaborative Planung als auch Auto-Commissioning, Monitoring und kontinuierliche Optimierung unterstützt. Die entwickelte DSL und das Revit-Add-in machen Steuerungen sichtbar, überprüfbar und portierbar. Auf diese Weise werden Medienbrüche reduziert, Transparenz geschaffen und die Abstimmung zwischen Fachplanung, Ausführung und FM erleichtert.

Mit BIMReason steht eine regelbasierte Modellkontrolle bereit, die Vollständigkeit und Konsistenz vor der Inbetriebnahme sicherstellt und Fehler früh abfängt. Die offene, konfigurierbare Middleware überbrückt heterogene Protokolle, automatisiert die Inbetriebnahme in Sekunden und etabliert einen skalierbaren, sicheren Datenpfad für Echtzeit-Betriebsdaten. Im Studienobjekt TwinLights, dem Living Lab der Universität Innsbruck, wurde gezeigt, wie der Detaillierungsgrad des Modells den Kunstlichtenergiebedarf stark beeinflusst und wie IoU-basierte Metriken die Lücke zwischen Simulation und Realität objektiv quantifizieren. Die kontinuierliche Inbetriebnahme, gestützt durch DT-Daten, ermöglichte eine kontinuierliche Systemoptimierung. Die Anpassung der Steuerung an reale Nutzungsmuster verbessert die Energieeffizienz und reduziert EPGs. Gleichzeitig zeigt die TAM-Evaluation eine positive Akzeptanz der entwickelten Werkzeuge.

Insgesamt belegt TwinLight, dass die Kombination aus modellbasierter Vorkonfiguration, semantischer Qualitätsprüfung, offener Middleware und DT-gestützter Rückkopplung eine praxistaugliche, skalierbare Grundlage für integrale Lichtstrategien schafft. TwinLight stärkt die Entscheidungsfähigkeit aller Stakeholder, verkürzt Inbetriebnahmezeiten, reduziert Vendor Lock-in, erhöht Transparenz und eröffnet einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess, der Energieeffizienz, Nutzerkomfort und betriebliche Resilienz gleichermaßen adressiert. Damit liefert TwinLight einen belastbaren, übertragbaren Ansatz, um digitale Methoden vom Entwurf bis in den Betrieb wirksam zu machen und die Kluft zwischen Anspruch und gelebter Praxis messbar zu schließen.

7 Ausblick und Empfehlungen

Aufbauend auf den Ergebnissen von TwinLight eröffnen sich mehrere Entwicklungsachsen, um Wirksamkeit und Skalierung in heterogenen Projektlandschaften zu erhöhen. Technisch steht die Vertiefung der Interoperabilität im Vordergrund, d.h. IFC-basierte Erweiterungen für Steuerungslogiken, Ontologien und IFC2RDF-Pipelines sollten konsolidiert werden, um Semantik, Topologien und Parametrisierung domänenübergreifend verlustarm auszutauschen. Eine engere Kopplung von BIM-Autorentools und Simulationsumgebungen mit standardisierten Schnittstellen für Tageslicht-, Energie- und Komfortsimulationen ist ebenso prioritär wie die Integration von virtueller Sensorik, Edge-Computing und robusten Cybersecurity-Konzepten.

Inhaltlich sollte die Integration über Beleuchtung hinausgehen und HLK, Verschattung, Photovoltaik, Speicher und Lastmanagement zu ganzheitlichen, netzdienlichen Strategien zusammenführen. Die Systemarchitektur und alle damit verbundenen Tools wurden generisch ausgestaltet, dass eine Erweiterbarkeit auf andere Systeme gegeben ist. Die Steuerungsmodellierung in BIM kann und sollte künftig um Konzepte des Reinforcement Learnings, Modellprädiktive Regelung und Transfer Learning erweitert und erprobt werden. Nutzerzentrierung bleibt ein Schlüsselfeld. Privacy-by-Design, erklärbare Algorithmen, transparente Opt-in-Prozesse und Präferenzmodelle sind nötig, um Akzeptanz und Wirkung zu steigern.

Organisatorisch gilt es, offene Modell-Repositoryn und verbindliche Rollen-, Prozess- und Governance-Standards zu etablieren, damit Informationskontinuität vom Entwurf bis ins FM dauerhaft gelingt. Skalierbare Schulungsprogramme, frei verfügbare Lernressourcen und Best-Practice-Bibliotheken können Qualifikationslücken schließen, wie die Marktrecherchen aufführten.

Wirtschaftlich empfiehlt sich die Verankerung von Lebenszykluskosten und CO₂-Bilanzen, um Investitionen in Interoperabilität, Auto-Commissioning und DT-Betriebsmodelle belastbar zu rechtfertigen. So kann TwinLight von einer praxiserprobten Lösung zu einem industrieweiten Referenzrahmen reifen, der Energieeffizienz, Komfort und Resilienz im Gebäudebetrieb dauerhaft verbindet.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessablaufkette zwischen den involvierten Projektbeteiligten. Bildquelle: [30], [31]	14
Abbildung 2: Systemarchitektur TwinLights. Bildquelle: [30], [31]	18
Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Rückmeldungen nach Unternehmensgröße und Zielgruppe. Datenquelle: [26]	20
Abbildung 4: BIM-Relevanz. Datenquelle: [26]	21
Abbildung 5: Vor- und Nachteile von BIM, aufgeschlüsselt nach den Zielgruppen Planung und Industrie. Datenquelle: [26]	21
Abbildung 6: Rückmeldungen des Facility Managements zu den derzeitigen Möglichkeiten der eigenständigen Steuerungsanpassungen (links, oben), dem Wunsch zur eigenständigen Steuerungsanpassung (rechts, oben) sowie den Einschränkungen zur Steuerungsanpassung. Datenquelle: [26]	22
Abbildung 7: Rückmeldungen der Zielgruppe Fachplanung/Architektur zu den Bauphasen, über die eine aktive Involvierung besteht (pro Zeile eine Rückmeldung). Datenquelle: [26]	23
Abbildung 8: Gründe der Teilnehmer für die Nichtbeachtung des Themas BIM (Umfrage 2). Datenquelle: [27]	24
Abbildung 9: Übersicht des BIM-Schulungsangebots (Umfrage 2). Datenquelle: [27]	24
Abbildung 10: Maßnahmen zur Förderung der BIM-Implementierung (Umfrage 2). Datenquelle: [27]	25
Abbildung 11: 3D-Modell eines Referenzbüroraums: Ansicht (links), Grundriss (Mitte) und Gebäudeübersicht (rechts). Bildquelle: [69]	26
Abbildung 12: TwinLight-Modellierungsrahmen zur Steuerungskonfiguration und Erstellung von Schemata. Bildquelle: [28]	27
Abbildung 13: Topologieexport über den TwinLight-Workflow. Bildquelle: [28]	28
Abbildung 14: Steuerungsdesign mittels DSL. Bildquelle: [28]	28
Abbildung 15: Kommissionierungsworkflow. Bild adaptiert von: [71]	30
Abbildung 16: Beispielregeln zur Prüfung notwendig vorhandener Device. Bild adaptiert von: [72], [73]	30
Abbildung 17: Vom BIM-Modell zum Digitalen Zwilling. Bildquelle: [25]	31
Abbildung 18: Kumulierter Kunstlicht-Energiebedarf der Jahressimulation über den Tagesverlauf für die vier Planungsvarianten. Bildquelle: [74]	32
Abbildung 19: Boxplot der TAM-Konstrukte. Bildquelle: [82]	34
Abbildung 20: Boxplot der subjektiven Bewertung der systemspezifischen Funktionalität der umgesetzten Entwicklung. Bildquelle: [82]	35
Abbildung 21: Motivation und Innovationsbedarf von TwinLight sowie deren Verortung in den Ausschreibungszielen des Programms Stadt der Zukunft.	36
Abbildung 22: TwinLight - Verwertungspotentiale, Märkte, Relevanz und Innovation.	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel für die Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert werden 50

Literaturverzeichnis

- [1] G. Diraco, A. Leone, und P. Siciliano, „People occupancy detection and profiling with 3D depth sensors for building energy management“, *Energy and Buildings*, Bd. 92, S. 246–266, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.043.
- [2] M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, J. F. Coronel, I. R. Maestre, und D. Yan, „A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers“, *Energy Reports*, Bd. 8, S. 626–637, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.280.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP), „2022 Global Status Report for Buildings and Construction - Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector“. UNEP Nairobi, 2022. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41133/Building_Construction_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [4] United Nations Environment Programme—Sustainable Buildings and Climate Initiative (UNEP-SBCI), „Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers“. 2009. Zugegriffen: 29. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32152>
- [5] P. Principi und R. Fioretti, „A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 83, S. 96–107, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.031.
- [6] M.-C. Dubois und Å. Blomsterberg, „Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review“, *Energy and Buildings*, Bd. 43, Nr. 10, S. 2572–2582, Okt. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.07.001.
- [7] H. Albu, D. Beu, T. Rus, R. Moldovan, F. Domnița, und S. Vilčeková, „Life cycle assessment of LED luminaire and impact on lighting installation – A case study“, *Alexandria Engineering Journal*, Bd. 80, S. 282–293, Okt. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.08.068.
- [8] L. Tähkämö und L. Halonen, „Life cycle assessment of road lighting luminaires – Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 93, S. 234–242, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.025.
- [9] M. A. ul Haq u. a., „A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 33, S. 268–279, Mai 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.090.
- [10] L. Bellia, I. Acosta, M. Á. Campano, und F. Fragliasso, „Impact of daylight saving time on lighting energy consumption and on the biological clock for occupants in office buildings“, *Solar Energy*, Bd. 211, S. 1347–1364, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.072.
- [11] J. M. Zeitzer, D. Dijk, R. E. Kronauer, E. N. Brown, und C. A. Czeisler, „Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression“, *The Journal of Physiology*, Bd. 526, Nr. 3, Art. Nr. 3, Aug. 2000, doi: 10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x.
- [12] V. Leichtfried u. a., „Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance“, *Applied Ergonomics*, Bd. 46, S. 54–59, Jän. 2015, doi: 10.1016/j.apergo.2014.07.001.
- [13] W. R. Ryckaert, C. Lootens, J. Geldof, und P. Hanselaer, „Criteria for energy efficient lighting in buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.012.
- [14] L. Bellia und F. Fragliasso, „Evaluating performance of daylight-linked building controls during preliminary design“, *Automation in Construction*, Bd. 93, S. 293–314, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.026.

- [15] G. S. Odiyur Vathanam u. a., „A Review on Effective Use of Daylight Harvesting Using Intelligent Lighting Control Systems for Sustainable Office Buildings in India“, *Sustainability*, Bd. 13, Nr. 9, S. 4973, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13094973.
- [16] D. Plörer, S. Hammes, M. Hauer, V. Van Karsbergen, und R. Pfluger, „Control Strategies for Daylight and Artificial Lighting in Office Buildings—A Bibliometrically Assisted Review“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 13, S. 3852, Juni 2021, doi: 10.3390/en14133852.
- [17] S. Hammes u. a., „Concepts of user-centred lighting controls for office applications: A systematic literature review“, *Building and Environment*, Bd. 254, S. 111321, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111321.
- [18] S. Hammes, M. Hauer, D. Geisler-Moroder, J. Weninger, R. Pfluger, und W. Pohl, „The impact of occupancy patterns on artificial light energy demand - simulation and post-occupancy-evaluation“, in *Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA*, Bruges, Belgium: IBPSA, Sep. 2021, S. 3536–3543. doi: 10.26868/25222708.2021.30508.
- [19] D. Cali, T. Osterhage, R. Streblow, und D. Müller, „Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test“, *Energy and Buildings*, Bd. 127, S. 1146–1158, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.020.
- [20] H. Yoshino, T. Hong, und N. Nord, „IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods“, *Energy and Buildings*, Bd. 152, S. 124–136, Okt. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038.
- [21] W. F. E. Preiser, „Post-occupancy evaluation: how to make buildings work better“, *Facilities*, Bd. 13, Nr. 11, Art. Nr. 11, Nov. 1995, doi: 10.1108/02632779510097787.
- [22] H. B. Gunay, W. Shen, und G. Newsham, „Data analytics to improve building performance: A critical review“, *Automation in Construction*, Bd. 97, S. 96–109, Jän. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.10.020.
- [23] H. Juslén, M. Wouters, und A. Tenner, „Preferred task-lighting levels in an industrial work area without daylight“, *Lighting Research & Technology*, Bd. 37, Nr. 3, Art. Nr. 3, Sep. 2005, doi: 10.1191/1365782805li138oa.
- [24] S. Fotios und C. Cheal, „Stimulus range bias explains the outcome of preferred-illuminance adjustments“, *Lighting Research & Technology*, Bd. 42, Nr. 4, Art. Nr. 4, Dez. 2010, doi: 10.1177/1477153509356018.
- [25] P. Zech, S. Hammes, E. Goldin, D. Geisler-Moroder, R. Breu, und R. Pfluger, „From BIM to Digital Twin: A transformation process through advanced control modeling and automated commissioning using daylight and artificial lighting as examples“, *Energy and Buildings*, Bd. 329, S. 115184, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115184.
- [26] S. Hammes, D. Geisler-Moroder, J. Weninger, P. Zech, und R. Pfluger, „Market demands vs. scientific realities: A comparative analysis in the context of BIM-based and user-centred lighting control“, *Developments in the Built Environment*, Bd. 19, S. 100526, Okt. 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100526.
- [27] S. Hammes u. a., „Technical and organizational barriers and solution strategies for the implementation of BIM: An empirical study with a focus on the lighting sector“, *Results in Engineering*, Bd. 29, S. 108520, März 2026, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108520.
- [28] S. Hammes, P. Zech, D. Geisler-Moroder, E. Goldin, und R. Pfluger, „Konzepte zur BIM-basierten Konfiguration und Parametrisierung von Beleuchtungssteuerungen abgeleitet aus Literatur- und Marktrecherchen“, gehalten auf der BauSim Conference 2024, Sep. 2024. doi: 10.26868/29761662.2024.7.
- [29] M. Hauer u. a., „Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems“, *Buildings*, Bd. 14, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2024, doi: 10.3390/buildings14030805.
- [30] J. Beiter, „TwinLight - BIM-based implementation of daylight and artificial lighting controls“, Nachhaltig Wirtschaften. Zugriffen: 21. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/sdz/projects/twinlight.php>
- [31] S. Hammes, P. Zech, D. Geisler-Moroder, E. Goldin, und R. Pfluger, „BIM und Beleuchtungssteuerungen – Entwicklung von Werkzeugen basierend auf Literatur- und

- Marktanalysen“, in *Tagungsband zum lichttechnischen Kongress 2024 der LTG*, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ltg.at/wp-content/uploads/2025/12/LTG2024_Kongress-2024_Langfassung_Hammes_.pdf
- [32] L. E. Fedoruk, R. J. Cole, J. B. Robinson, und A. Cayuela, „Learning from failure: understanding the anticipated–achieved building energy performance gap“, *Building Research & Information*, Bd. 43, Nr. 6, Art. Nr. 6, Nov. 2015, doi: 10.1080/09613218.2015.1036227.
 - [33] A. Elmualim und J. Gilder, „BIM: innovation in design management, influence and challenges of implementation“, *Architectural Engineering and Design Management*, Bd. 10, Nr. 3–4, S. 183–199, Juli 2014, doi: 10.1080/17452007.2013.821399.
 - [34] C. Panteli u. a., „Overview of BIM integration into the Construction Sector in European Member States and European Union Acquis“, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Bd. 410, Nr. 1, S. 012073, Jän. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012073.
 - [35] T. Umar, „Challenges of BIM implementation in GCC construction industry“, *ECAM*, Apr. 2021, doi: 10.1108/ECAM-11-2019-0608.
 - [36] A. Andriamamonjy, D. Saelens, und R. Klein, „A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 22, S. 513–527, März 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.12.021.
 - [37] X. Liu, X. Wang, G. Wright, J. Cheng, X. Li, und R. Liu, „A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS)“, *IJGI*, Bd. 6, Nr. 2, S. 53, Feb. 2017, doi: 10.3390/ijgi6020053.
 - [38] P. M. Bosch-Sijtsema, P. Gluch, und A. A. Sezer, „Professional development of the BIM actor role“, *Automation in Construction*, Bd. 97, S. 44–51, Jän. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.10.024.
 - [39] H. K. Biswas, T. Y. Sim, und S. L. Lau, „Impact of Building Information Modelling and Advanced Technologies in the AEC Industry: A Contemporary Review and Future Directions“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 82, S. 108165, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.108165.
 - [40] H. H. Hosamo, P. R. Svennevig, K. Svidt, D. Han, und H. K. Nielsen, „A Digital Twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics“, *Energy and Buildings*, Bd. 261, S. 111988, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111988.
 - [41] A. Golabchi, M. Akula, und V. Kamat, „Automated building information modeling for fault detection and diagnostics in commercial HVAC systems“, *F*, Bd. 34, Nr. 3/4, Art. Nr. 3/4, März 2016, doi: 10.1108/F-06-2014-0050.
 - [42] J. Miller, R. Pfluger, und M. H. Hauer, „Revit2DALEC: A BIM-based building energy performance simulation tool used during the early design stage for orientation and location optimization“, gehalten auf der 2023 Building Simulation Conference, Sep. 2023. doi: 10.26868/25222708.2023.1638.
 - [43] A. Rasheed, O. San, und T. Kvamsdal, „Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective“, *IEEE Access*, Bd. 8, S. 21980–22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
 - [44] M. Grieves und J. Vickers, „Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems“, in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, und A. Alves, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
 - [45] H. Alavi und N. Forcada, „User-Centric BIM-Based Framework for HVAC Root-Cause Detection“, *Energies*, Bd. 15, Nr. 10, S. 3674, Mai 2022, doi: 10.3390/en15103674.
 - [46] X. Zhou u. a., „CloudFAS: Cloud-based building fire alarm system using Building Information Modelling“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 53, S. 104571, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104571.
 - [47] L. Jiang, J. Shi, C. Wang, und Z. Pan, „Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies“, *Automation in Construction*, Bd. 147, S. 104728, März 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104728.

- [48] I. V. Lokshina, M. Greguš, und W. L. Thomas, „Application of Integrated Building Information Modeling, IoT and Blockchain Technologies in System Design of a Smart Building“, *Procedia Computer Science*, Bd. 160, S. 497–502, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.11.058.
- [49] V. Villa, B. Naticchia, G. Bruno, K. Aliev, P. Piantanida, und D. Antonelli, „IoT Open-Source Architecture for the Maintenance of Building Facilities“, *Applied Sciences*, Bd. 11, Nr. 12, S. 5374, Juni 2021, doi: 10.3390/app11125374.
- [50] Lichttechnische Gesellschaft Österreich (LTG), „LTG website“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ltg.at/>
- [51] Deutsche Gesellschaft für LichtTechnik+LichtGestaltung (LiTG), „LiTG website“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.litg.de/>
- [52] International Commission on Illumination (CIE), „CIE website“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://cie.co.at/>
- [53] Associazione Italiana di Illuminazione (AIDI), „AIDI website“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aidiluce.it/>
- [54] Facility Management Austria (FMA), „FMA website“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fma.or.at/>
- [55] International Facility Management Association (IFMA), Switzerland Chapter, „Website of the IFMA, Switzerland Chapter“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ifma.ch/de/>
- [56] International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme (IEA SHC), „Website of the IEA SHC Task 70 – Low Carbon, High Comfort Integrated Lighting“. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://task70.iea-shc.org/>
- [57] F. H. Abanda, A. Akintola, V. V. Tuhaise, und T. J.H.M, „BIM ontology for information management (BIM-OIM)“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 107, S. 112762, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112762.
- [58] Ž. Turk, „Ten questions concerning building information modelling“, *Building and Environment*, Bd. 107, S. 274–284, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.08.001.
- [59] K. Ullah, I. Lill, und E. Witt, „An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry: Benefits and Barriers“, in *10th Nordic Conference on Construction Economics and Organization*, I. Lill und E. Witt, Hrsg., Emerald Publishing Limited, 2019, S. 297–303. doi: 10.1108/S2516-285320190000002052.
- [60] M. Oraee, M. R. Hosseini, D. J. Edwards, H. Li, E. Papadonikolaki, und D. Cao, „Collaboration barriers in BIM-based construction networks: A conceptual model“, *International Journal of Project Management*, Bd. 37, Nr. 6, S. 839–854, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijproman.2019.05.004.
- [61] S. Azhar, „Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry“, *Leadership Manage. Eng.*, Bd. 11, Nr. 3, S. 241–252, Juli 2011, doi: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
- [62] L. Su, H. Yan, Y. Sun, D. Cao, und X. Luo, „Deciphering the trajectory and challenges of BIM research in China: A data-driven review of topics and innovation trends“, *Advanced Engineering Informatics*, Bd. 68, S. 103567, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.aei.2025.103567.
- [63] A. Ciccozzi, T. De Rubeis, D. Paoletti, und D. Ambrosini, „BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies“, *Energies*, Bd. 16, Nr. 23, S. 7845, Nov. 2023, doi: 10.3390/en16237845.
- [64] A. Ciccozzi, A. Santavicca, T. De Rubeis, und D. Ambrosini, „BIM-BEM interoperability for energy analysis: A comparative study of different strategies“, *Energy Reports*, Bd. 13, S. 4705–4718, Juni 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.04.027.
- [65] A. Leśniak, M. Górka, und I. Skrzypczak, „Barriers to BIM Implementation in Architecture, Construction, and Engineering Projects—The Polish Study“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 8, S. 2090, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082090.
- [66] J. Strohm, „Ein Leitfaden für BIM in der Tages- und Kunstlichtplanung“, in *TAGUNGSBAND zum 26. Europäischen Lichtkongress, LiTG, 31. Mar – 02. Apr 2025*, Oldenburg, Germany: Deutsche Gesellschaft für LichtTechnik und LichtGestaltung e.V. (LiTG), 2025, S. 523–539.

- [67] J. Strohm, „BIM in der Tages- und Kunstlichtplanung“, Sep. 2025, doi: 10.5281/ZENODO.17169465.
- [68] J. Strohm, „Branchen-Bestandsaufnahme zu BIM in der Tages- und Kunstlichtplanung (Stand 06/07 2024)“, Sep. 2025, doi: 10.5281/ZENODO.17169374.
- [69] D. Geisler-Moroder u. a., „Reference Models for Comparing Simulation Tools to Evaluate Low-Carbon High-Comfort Integrated Lighting“, *Int Sustain Ener Conf Proc*, Bd. 2, Mai 2026, doi: 10.52825/isec.v2i.3364.
- [70] P. Zech, E. Goldin, S. Hammes, D. Geisler-Moroder, R. Pfluger, und R. Breu, „Model-Based Auto-Commissioning of Building Control Systems“, in *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2024)*, Angers, France, 2024.
- [71] P. Zech, C. Zallinger, P. Pobitzer, E. Goldin, S. Hammes, und R. Pfluger, „A middleware for commissioning building digital twins“, *Results in Engineering*, Bd. 31, S. 111436, Sep. 2026, doi: 10.1016/j.rineng.2026.111436.
- [72] P. Zech, P. Burger, S. Hammes, D. Geisler-Moroder, und R. Breu, „BIMReason: Validating BIM model correctness“, *Bauphysik*, Bd. 46, Nr. 6, S. 332–339, Dez. 2024, doi: 10.1002/bapi.202400035.
- [73] P. Zech, P. Burger, S. Hammes, D. Geisler-Moroder, und R. Breu, „BIMReason - Validating BIM Model Correctness“, gehalten auf der BauSim Conference 2024, Sep. 2024. doi: 10.26868/29761662.2024.8.
- [74] P. Zech, S. Hammes, D. Geisler-Moroder, M. Hauer, R. Pfluger, und R. Breu, „Quantifying the Simulation-Reality Gap in Building Simulations“, gehalten auf der 2025 Building Simulation Conference, Aug. 2025. doi: 10.26868/25222708.2025.1189.
- [75] L. Tähkämö, M. Bazzana, G. Zissis, M. Puolakka, und L. Halonen, „Life cycle assessment of a fluorescent lamp luminaire used in industry – a case study“, *Lighting Research & Technology*, Bd. 46, Nr. 4, S. 453–464, Aug. 2014, doi: 10.1177/1477153513480518.
- [76] S. Hammes, J. Weninger, und P. Zech, „Closer to Realtime: A Comparison of Machine Learning Methods to Reduce Artificial Switch-Off Times“, in *2024 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS24)*, Eindhoven, Netherlands: IEEE, Nov. 2024, S. 1–4. doi: 10.1109/LS2463127.2024.10881955.
- [77] S. Hammes, J. Weninger, R. Pfluger, und W. Pohl, „Take the Right Seat: The Influence of Occupancy Schemes on Performance Indicators of Lighting in Open Plan Offices“, *Energies*, Bd. 15, Nr. 9, S. 3378, Mai 2022, doi: 10.3390/en15093378.
- [78] S. Hammes, J. Weninger, D. Geisler-Moroder, R. Pfluger, und W. Pohl, „Reduzierung des Kunstlicheinsatzes durch Anpassung der Nachlaufzeit an individuelle Anwesenheitsmuster“, *Bauphysik*, Bd. 43, Nr. 1, Art. Nr. 1, Feb. 2021, doi: 10.1002/bapi.202000039.
- [79] S. Hammes und J. Weninger, „Optimizing User Distributions in Open-Plan Offices for Communication and Their Implications for Energy Demand and Light Doses: A Living Lab Case Study“, *Buildings*, Bd. 15, Nr. 19, S. 3458, Sep. 2025, doi: 10.3390/buildings15193458.
- [80] S. Hammes, P. Zech, C. Zallinger, D. Geisler-Moroder, E. Goldin, und R. Pfluger, „Kollaboratives Lichtsteuerungsdesign in BIM, automatisierte Inbetriebnahmen und Unreal Engine gestützter digitaler Zwilling – Ergebnisse aus einer Laborstudie“, in *LICHT 2025 – TAGUNGSBAND zum 26. Europäischen Lichtkongress, Deutsche Gesellschaft für LichtTechnik und LichtGestaltung e.V. (LiTG)*, Oldenburg, Germany, 2026, S. 540–551. [Online]. Verfügbar unter: https://www.litg.de/LICHT2025/LICHT2025_Tagungsband.pdf
- [81] F. D. Davis, „Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology“, *MIS Quarterly*, Bd. 13, Nr. 3, S. 319–340, Sep. 1989, doi: 10.2307/249008.
- [82] S. Hammes, P. Zech, und E. Goldin, „Middleware zur Kopplung physischer Systeme mit digitalen Zwillingen: Konzept und Technologieakzeptanzbewertung“, in *Tagungsband der Bauphysiktage 2026 - Kaiserslautern, Deutschland*, 2026, S. 38–43. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bauphysiktage-kl.de/programm>

Abkürzungsverzeichnis

AWS	Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH
BIM	Building Information Modeling
BMK	Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität Innovation und Technologie
CAFM	Computer-Aided Facility Management
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
DSL	Domänenspezifische Sprachen (engl. Domain Specific Language)
DT	Digitaler Zwilling (engl. Digital Twin)
EPG	Energy Performance Gap
F&E	Forschung und Entwicklung
FFG	Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft
FM	Facility Management
HLK	Heizung, Lüftung und Klima
IFC	Industry Foundation Class
IoT	Internet of Things
IoU	Intersection-over-Union
ÖGUT	Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik
PIR	Passiv-Infrarot Sensoren
PEOU	wahrgenommener Benutzerfreundlichkeit (engl. Perceived Ease Of Use)
POE	Post-Occupancy Evaluation
PU	wahrgenommenen Nützlichkeit (engl. Perceived Usefulness)
TAM	Technologieakzeptanzmodell (engl. Technology Acceptance Model)
TQ	Schulungsqualität (engl. Training Quality)

9 Anhang

9.1. Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts TwinLight

9.1.1. Publikationen 2023

- Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Schreck, J.; Pfluger, R.; Weitlaner, R.; Zech, P. (2023) TwinLight – BIM-basierte Umsetzung von Tages- und Kunstlichtsteuerungen. Posterbeitrag. LICHT 2023, 25. Europäischen Lichtkongress, Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG), 26-29 März, 2023, Salzburg, Österreich.

9.1.2. Publikationen 2024

- Hauer, M.; Hammes, S.; Zech, P.; Geisler-Moroder, D.; Plörer, D.; Miller, J.; van Karsbergen, V.; Pfluger, R. (2024) Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems. Buildings, 14(3), 805. <https://doi.org/10.3390/buildings14030805>
- Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Weninger, J.; Zech, P.; Pfluger, R. (2024) Market demands vs. scientific realities: A comparative analysis in the context of BIM-based and user-centred lighting control. Developments in the Built Environment, 19, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100526>
- Zech, P.; Goldin, E.; Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Pfluger, R.; Breu, R. (2024) Model-Based Auto-Commissioning of Building Control Systems. Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 2: ICEIS; ISBN 978-989-758-692-7; ISSN 2184-4992, SciTePress, pp. 121-128. <https://doi.org/10.5220/0012554000003690>
- Hammes, S.; Zech, P.; Geisler-Moroder, D.; Goldin, E.; Pfluger, R. (2024) Konzepte zur BIM-basierten Konfiguration und Parametrisierung von Beleuchtungssteuerungen abgeleitet aus Literatur- und Marktrecherchen. Proceedings of BauSim Conference 2024: 10th Conference of IBPSA-Germany and Austria, Vienna, Austria, Sept. 23-26, 2024, pp. 48-55. <https://doi.org/10.26868/29761662.2024.7>
- Zech, P.; Burger, P.; Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Breu, R. (2024) BIMReason - Validating BIM Model Correctness. Proceedings of BauSim Conference 2024: 10th Conference of IBPSA-Germany and Austria, Vienna, Austria, Sept. 23-26, 2024, pp. 56-63. <https://doi.org/10.26868/29761662.2024.8>
- Zech, P.; Burger, P.; Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Breu, R. (2024) BIMReason: Validating BIM model correctness. Bauphysik, 46(6), pp. 332-339. <https://doi.org/10.1002/bapi.202400035>
- Hammes, S.; Zech, P.; Geisler-Moroder, D.; Goldin, E.; Pfluger, R. (2024) BIM und Beleuchtungssteuerungen – Entwicklung von Werkzeugen basierend auf Literatur- und Marktanalysen. Lichttechnischer Kongress 2024 & 100 Jahre LTG, Lichttechnische

Gesellschaft Österreichs (LTG), Andau, Österreich, Jun. 04.-05., 2024. https://ltg.at/wp-content/uploads/2025/12/LTG2024_Kongress-2024_Langfassung_Hammes_.pdf

9.1.3. Publikationen 2025

- Zech, P.; Hammes, S.; Goldin, E.; Geisler-Moroder, D.; Breu, R.; Pfluger, R. (2025) From BIM to Digital Twin: A transformation process through advanced control modeling and automated commissioning using daylight and artificial lighting as examples. Energy and Buildings, 329, pp. 115184. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115184>
- Hammes, S.; Zech, P.; Zallinger, C.; Geisler-Moroder, D.; Goldin, E.; Pfluger, R. (2025) Kollaboratives Lichtsteuerungsdesign in BIM, automatisierte Inbetriebnahmen und Unreal Engine gestützter digitaler Zwilling – Ergebnisse aus einer Laborstudie. LICHT 2025 – TAGUNGSBAND zum 26. Europäischen Lichtkongress, Deutsche Gesellschaft für LichtTechnik und LichtGestaltung e.V. (LiTG), 31.03.-02.04.2025, Oldenburg, Deutschland. pp. 540-551. https://www.litg.de/LICHT2025/LICHT2025_Tagungsband.pdf
- Geisler-Moroder, D.; Hammes, S.; Hauer, M.; Pfluger, R. (2025) Licht für energieeffiziente Gebäude: Forschungsprojekte an der Universität Innsbruck. Lichttechnischer Kongress 2025, Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG), Innsbruck, Österreich, Mai 20.-21., 2025. https://ltg.at/wp-content/uploads/2025/05/D02_Greisler-Moroder-David.pdf
- P. Zech, Artifacts for MODELS'25 Paper: An Ecosystem of DSMLs for Building Commissioning, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16738343>
- Zech, P.; Goldin, E.; Zallinger, C.; Hammes, S.; Pobitzer, P.; Michael, J.; Breu, R. (2025) An Ecosystem of DSMLs for Building Commissioning. ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS), Grand Rapids, MI, USA, 5.-10. October 2025, pp. 12-23. <https://doi.org/10.1109/MODELS67397.2025.00008>
- Zech, P.; Senoner, S.; Goldin, E.; Zallinger, C.; Hammes, S.; Michael, J. (2025) Model-driven Digital Twins for AECO. 2025 ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C), Grand Rapids, MI, USA, 2025, pp. 224-235. <https://doi.org/10.1109/MODELS-C68889.2025.00040>
- Zech, P.; Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Hauer, M.; Pfluger, R.; Breu, R. (2025) Quantifying the Simulation-Reality Gap in Building Simulations. Building Simulation Conference Papers Vol. 18, Proceedings of the 18th IBPSA Conference Brisbane, Australia, Aug. 24-27. <https://doi.org/10.26868/25222708.2025.1189>

9.1.4. Publikationen 2026

- Schreck, J.; Hammes, S.; Geisler-Moroder, D.; Zech, P.; Junghans, B. (2026) Von der Planung bis in den Betrieb: Durchgängiges Engineering von Beleuchtungssteuerungen. Langfassungen zum lichttechnischen Kongress 2026 LTG, Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG), Tulln a. d. Donau, Österreich, Mai, 19.-20., 2026, pp. 1-12. <https://ltg.at/wp-content/uploads/2026/05/Schreck-Jacob-Kongress-2026-Langfassung.pdf>
- Hammes, S.; Strohm, J.; Geisler-Moroder, D.; Weninger, J.; Miller, J.; Hauer, M.; Zech, P.; Wambsganß, M.; Pfluger, R. (2026) Technical and organizational barriers and solution

strategies for the implementation of BIM: An empirical study with a focus on the lighting sector. Results in Engineering, 29, pp. 108520. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108520>

- Hammes, S.; Zech, P.; Geisler-Moroder, D.; Weninger, J.; Steindl, G.; Hauer, M.; Miller, J.; Pfluger, R. (2026) Ten questions concerning building information modeling (BIM): Energy-efficiency in de-sign, construction, and operation. Building and Environment 296, pp. 114497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114497>
- Zech, P.; Burger, P.; Wald, L.; Pobitzer, P.; Hammes, S.; Michael, J. (2026) A Hybrid Query Language for Digital Twins. In: Cappiello, C., Hartig, O., Sellami, M., Ouni, A. (eds) Cooperative Information Systems. CoopIS 2025. Lecture Notes in Computer Science, vol 15535. Springer, Cham. pp 662–672. https://doi.org/10.1007/978-3-032-15538-2_43
- Hammes, S.; Zech, P.; Goldin, E. (2026) Middleware zur Kopplung physischer Systeme mit digitalen Zwillingen: Konzept und Technologieakzeptanzbewertung. Tagungsband der Bauphysiktage 2026, Kaiserslautern, Deutschland, 18.-19. März 2026. pp 38-43.
- Hammes, S.; Zech, P.; Piha, R.; Zallinger, C.; Senoner, S.; Goldin, E.; Pfluger, R. (2026) BIM and Digital Twins: A Synergetic Approach to Continuously Improving Energy Efficiency and Comfort. In: Zilio, C., Busato, F., Mazzarella, L., Noro, M. (eds) Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress - CLIMA 2025. CLIMA 2025. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 788. Springer. pp 1504-1513. https://doi.org/10.1007/978-3-032-10546-2_144
- Zech, P.; Zallinger, C.; Pobitzer, P.; Goldin, E.; Hammes, S.; Pfluger, R. (2026) A middleware for commissioning building digital twins. Results in Engineering 31, pp. 111436. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111436>

9.2. Data Management Plan (DMP)

9.2.1. Datenerstellung und Dokumentation

Im Rahmen von TwinLight wurden verschiedene Daten erhoben, verarbeitet und erzeugt. Ein dazugehöriger Datenmanagementplan beschreibt dabei die organisatorischen und technischen Maßnahmen für deren Verwaltung über den gesamten Projektlebenszyklus hinweg und gewährleistet die Einhaltung relevanter rechtlicher, ethischer und förderbezogener Anforderungen. Im Forschungsprojekt TwinLight wurden insbesondere Daten in der Literatur- und Marktrecherche sowie im Rahmen der Anwendungsstudien im Living Lab generiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispiel für die Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert werden

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
LITERATUR	Kernaussagen der analysierten Literaturquellen	Numerisch, Text	Auswertematrix	Universität Innsbruck	Teilweise öffentlich
UMFRAGE	Fragebogen zu BIM und Beleuchtungssteuerungen	Numerisch, Text	Likert-Skala, Einfachauswahl, Mehrfachauswahl, Freitext	Universität Innsbruck	Teilweise öffentlich
LOGGING	Monitoring von Gebäude- und Nutzerparametern im Studienobjekt	Numerisch	Sensorwerte	Universität Innsbruck	Teilweise öffentlich
AKZEPTANZ	Fragebogenergebnisse der Akzeptanzstudie nach TAM	Numerisch, Text	Likert-Skala, Einfachauswahl, Mehrfachauswahl, Freitext	Universität Innsbruck	Teilweise öffentlich

Im Studienobjekt bestehen zahlreiche Sensoren. Dazu zählen pro Arbeitsplatz und auf Raumebene Beleuchtungsstärkesensoren, Raumklimasensoren (CO₂-Konzentration, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) und Passiv-Infrarot-Sensoren. Dies ermöglicht die Beleuchtung in Abhängigkeit von Anwesenheit und Tageslichtverfügbarkeit zu steuern. Zudem sind diese Daten Grundlage für lichttechnische und energetische Evaluierungen. Ein Bezug auf individuelle Personen ist durch die PIR-Technologie und die Zuweisung auf Raumbereiche ausgeschlossen. Die Betriebsdaten werden über Einplatinen-Computer (Raspberry Pi) an eine Datenbank (InfluxDB) gesendet. Die Speicherung der Sensorwerte erfolgt für Anwesenheitsdaten auf Zustandsänderung und für die thermischen und visuellen Raumparameter periodisch zwischen 10 Sekunden und einer Minute.

Alle Leuchten lassen sich individuell ansteuern und dimmen. Die Betriebszustände werden über die Gebäudesteuerung geloggt. Gleiches gilt für Eingriffe in die Steuerung. Diese Informationen werden

auf Zustandsänderung über ein KNX-IP-Gateway der Gebäudesteuerung erhoben und in die Datenbank gespeichert (InfluxDB). Zugriffe auf die Daten sind nur technischen Verantwortlichen ermöglicht.

9.2.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Alle Teilnehmenden wurden vor der Datenerhebung umfassend informiert, insbesondere über das Recht zur Datenlöschung, und erteilten ihre Einwilligung gemäß Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO). Die erhobenen Daten wurden anonymisiert bzw. pseudonymisiert. Dadurch ist eine Identifizierung einzelner Personen sowie eine Zuordnung der Daten zu bestimmten Individuen ausgeschlossen bzw. nur unter streng kontrollierten Bedingungen möglich. Aus der Durchführung des Projekts ergeben sich keine erkennbaren ethischen Risiken oder Bedenken.

9.2.3. Datenspeicherung und -erhalt

Zum Schutz der erhobenen Daten werden diese ausschließlich in gesicherten, passwortgeschützten Speicherumgebungen abgelegt. Der Zugang zu den Daten erfolgt nach dem Prinzip der Erforderlichkeit und ist durch technische sowie organisatorische Maßnahmen geregelt. Insbesondere der Zugriff auf Rohdaten und die zugehörigen Anonymisierungs-/Pseudonymisierungsschlüssel ist auf jene Projektmitarbeitenden beschränkt, die diese Informationen für die Durchführung, Verarbeitung oder Auswertung der Daten benötigen. Die Vergabe der Zugriffsrechte erfolgt rollenbasiert und wird regelmäßig überprüft, um einen angemessenen Schutz der Daten während der gesamten Projektlaufzeit sicherzustellen.

9.2.4. Wiederverwendbarkeit der Daten

Die Verarbeitung der erhobenen Rohdaten ist gemäß DSGVO auf autorisiertes, unmittelbar beteiligtes Personal beschränkt, wodurch eine Weitergabe ausgeschlossen ist. Eine Veröffentlichung erfolgt ausschließlich in aggregierter und anonymisierter/pseudonymisierter Form im Kontext von wissenschaftlichen Publikationen. Die im Gebäudemonitoring erhobenen Daten wurden in diesem Zusammenhang in aufbereiteter Form öffentlich zugänglich gemacht und wissenschaftlich beschrieben.

