

Von der Planung bis in den Betrieb: Durchgängiges Engineering von Beleuchtungssteuerungen

Jacob Schreck¹, Sascha Hammes², David Gesiler-Moroder², Philipp Zech³ und Bert Junghans¹

¹ Zumtobel Lighting GmbH, Atelier of Light

Österreich, 6850 Dornbirn, Schweizerstraße 30

² Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

Österreich, 6020 Innsbruck, Technikerstraße 13

³ Universität Innsbruck, Institut für Informatik

Österreich, 6020 Innsbruck, Technikerstraße 21a

Zusammenfassung

Steuerungen ermöglichen bedarfsgerechte und energieeffiziente Beleuchtungslösungen. Die Vielzahl unterschiedlicher involvierter Parteien im Steuerungsdesign und Umsetzungsprozess führt zu erhöhter Komplexität und Abstimmungsbedarf, wodurch die zielgerichtete Realisierung energieeffizienter Beleuchtungssteuerungen erschwert wird. Zusätzlich tragen zahlreiche Schnittstellen und Übergaben zwischen den Beteiligten dazu bei, dass Informationen verloren gehen oder verzögert weitergegeben werden, was eine fehlerfreie Umsetzung sowie die konsequente Ausrichtung auf Energieeffizienz weiter beeinträchtigt.

Im Projekt TwinLight wird zur Lösung dieses Dilemmas die Beleuchtungssteuerung vollständig in BIM implementiert. Ein BIM-basiertes Modellierungsumfeld bildet den durchgängigen Engineering-Prozess ab. Die im BIM abbildbaren Metadaten der Steuerungskomponenten werden zudem genutzt, um eine Middleware automatisiert zu konfigurieren. Die Middleware fungiert dabei als zentrale Kommunikationsschicht zwischen Gebäude und externen Anwendungen, überträgt Steuerungslogiken automatisiert auf die Hardware und ermöglicht die kontinuierliche Rückführung von Sensordaten ins Modell. Dadurch wird eine Transformation von BIM zum digitalen Zwilling realisiert. Ein ergänzendes offenes Framework auf Basis der Unreal Engine visualisiert die Gebäudestruktur, unterstützt umfassende Evaluierungen und Echtzeitinteraktionen mit dem physischen System.

Die Systemarchitektur schafft Transparenz zwischen Verantwortlichkeiten im Steuerungsdesign, reduziert bauseitige Aufwände durch automatisierte Inbetriebnahme und ermöglicht kontinuierliche Anpassungen an das reale Nutzerverhalten. Eine prototypische Anwendung in einem realen Büroraum belegt Effizienz- und Komfortgewinne. Workshops mit 26 Teilnehmenden bestätigen die Akzeptanz der entwickelten Tools.

1 Einführung

1.1 Bauablauf der technischen Gebäudeausrüstung

Die Baupraxis zeigt, dass von der konzeptionellen Planung bis zum Betrieb von Beleuchtungssteuerung meist mehrere Stakeholder involviert sind, von Fachplanenden, Elektroinstallationsunternehmen bis hin zum Facility Management. Die Fachplanung hat durch kollaborative Planungscoordination i.d.R. ein umfassendes Verständnis zum Gebäude und kann dies in den Steuerungsdesignprozess einfließen lassen, Ausführende Firmen hingegen setzen Beleuchtungssteuerungen meist auf Basis verfügbarer Ausschreibungsunterlagen um. Dadurch entstehen zwar funktionsfähige, aber oft suboptimal abgestimmte Steuerungen. Dies kann zu Abweichungen zwischen prognostizierten und realen Systemperformanzen führen, die in Form von Energy Performance Gaps (EPG) nachweisbar sind. Informationsverluste zwischen den einzelnen Bauphasen mindern zusätzlich die Leistungsfähigkeit von Steuerungen. Angesichts des hohen Energiebedarfs des Gebäudesektors von rund einem Drittel am weltweiten Bedarf [1], mit dem Gewerk Beleuchtung als einen der größten Verbraucher [2], erweisen sich Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz durch eine präzisere Planung und Umsetzung von Beleuchtungen und damit verbundener Steuerstrategien als immer wichtiger. Es braucht daher Lösungen, die das Steuerungsdesign durchgängig, modellbasiert und kollaborativ über alle Projektphasen hinweg abbilden, statt es fragmentiert aus Ausschreibungsunterlagen zu rekonstruieren. Zentral ist die nahtlose Überführung von Steuerungslogiken und -metadaten in ein einheitliches, semantisch reichhaltiges Gebäudeinformationsmodell, um Konsistenz, Testbarkeit und energieeffiziente Zielerreichung sicherzustellen.

1.2 BIM und Steuerungen

Building Information Modeling (BIM) hat sich als dominantes Modellierungsparadigma im Bauwesen etabliert. Es bietet semantisch angereicherte, objektbasierte Gebäudemodelle und dient als kollaborative Plattform für Planung, Koordination, Simulation, Dokumentation und Betriebsunterstützung [3], [4]. Der offene IFC-Standard (Industry Foundation Classes) ermöglicht als objektorientiertes Datenaustauschformat die Interoperabilität über Werkzeuge und Phasen hinweg [5]. BIM-Tools ermöglichen den standardisierten Export von Geometrie und Metadaten für additive Anwendungen. Damit adressiert BIM die Anforderungen an Langlebigkeit, Informationsverfügbarkeit und Kollaboration in komplexen Bauprojekten und stellt eine zentrale Grundlage für datengestützte Prozesse dar [3], [4]. Auf dieser Grundlage rückt die modellbasierte Abbildung gebäudetechnischer Steuerungen in den Fokus, um die in BIM verankerte Datenbasis für ein phasenübergreifendes Steuerungsdesign nutzbar zu machen.

Steuerungen im Kontext von BIM ermöglichen ein durchgängiges und konsistentes Informationsmanagement über alle Projektphasen hinweg und fördern die integrale Betrachtung

der beteiligten Gewerke. Dadurch können Wechselwirkungen zwischen Beleuchtung, thermischen Lasten und Nutzerverhalten frühzeitig analysiert und Steuerungsstrategien fundierter auf Energieeffizienz und Komfort ausgerichtet werden. Gleichzeitig bildet BIM die Grundlage für digitale Zwillinge, womit Steuerungslogiken im Betrieb kontinuierlich überprüft, angepasst und hinsichtlich realer Nutzungsszenarien optimiert werden können.

1.3 Digitale Zwillinge

Digitale Zwillinge (engl.: digital twins, DT) integrieren statische Modelle mit Laufzeitdaten zu virtuellen Repräsentationen physischer Anlagen und ermöglichen Simulation, Analyse und Optimierung. Im Gebäudesektor versprechen sie geringere Betriebskosten, prädiktive Analysen, verbesserte Entscheidungsfindung und eine optimierte Zusammenarbeit über den gesamten Lebenszyklus [6]. In der Praxis bleibt die Verbreitung jedoch noch begrenzt. Haupthemmnisse sind fragmentierte Daten- und Modelllandschaften, domänenspezifische, voneinander abgekoppelte Entwicklungsprozesse sowie fehlende, standardisierte Integrationsmechanismen. Die manuelle Konfiguration von Geräteschnittstellen, semantischen Zuordnungen und Visualisierungsebenen skaliert mit Projektkomplexität und treibt damit Aufwand und Kosten über den wahrgenommenen Nutzen hinaus [6], [7], [8].

1.4 Problemstellung

Als Ausgangspunkt für DTs weist BIM jedoch wesentliche Lücken auf. So sind BIM-Modelle primär statisch und auf Entwurfs- und Bauphasen ausgerichtet. Native Mechanismen für die Echtzeit-Integration von Betriebsdaten, bidirektionale Kommunikation mit physischen Systemen und die Modellierung von Laufzeitaspekten, wie bspw. der Steuerungstopologie und -logik sind bislang nur unzureichend vorhanden [6]. Diese Diskrepanz zwischen planungszentriertem Informationsmodell und betriebsorientierten Anforderungen digitaler Systeme verhindert die durchgängige Synchronisierung mit Sensorik, die Echtzeitverarbeitung und -analyse sowie die Rückführung von Steuersignalen. Für das Gewerk Steuerung bleiben Modellierungsaspekte in BIM somit unvollständig. Um das Potenzial von DTs zu heben, sind erweiterbare, standardisierte Workflows erforderlich, die BIM-basierte Semantik um operative Strukturen und Laufzeitmodelle ergänzen, die Integration mit Gebäudetechnik systematisch unterstützen und Konfigurationsschritte weitgehend automatisieren. BIM kann dabei als kollaborative Basis dienen, während DT-spezifische Erweiterungen die Brücke zum Betrieb schlagen und Energieeffizienz, Komfort und Anpassungsfähigkeit im Lebenszyklus realisieren [9]. Der Einsatz einer Middleware-Architektur kann dabei eine zentrale Rolle einnehmen, indem diese die Entwurfssemantik in lauffähige Daten- und Steuerpfade übersetzt und zeitkritische Regelkreise synchronisiert. Viele vorhandene Lösungen bieten jedoch weder modellgetriebene Ableitungen aus Planungsartefakten noch robuste Semantik- und Governance-Mechanismen, was Nachvollziehbarkeit und verlässliche Echtzeitfähigkeit einschränkt. Es besteht daher Bedarf an einer offenen, skalierbaren und semantisch fundierten Middleware-Lösung.

1.5 Zielsetzung

Das Forschungsprojekt TwinLight [10] adressiert die Lücke zwischen planungszentrierten Modellen und betriebsorientierten Anforderungen digitaler Zwillinge für die Gewerke Kunst- und Tageslicht. TwinLight entwickelt ein BIM-basiertes Framework mit einer datenzentrierten Middleware für Tages- und Kunstlicht, das Steuerungsdesign, Inbetriebnahme und Betrieb über den gesamten Lebenszyklus integriert. Ziel ist ein transparenter, kollaborativer Workflow, der aus Planungsmodellen automatisch Konfigurationen ableitet, heterogene Protokolle (u.a. DALI, KNX) interoperabel macht und eine bidirektionale, echtzeitfähige Kopplung zwischen virtuellem und physischem Zwilling herstellt. So sollen Energieeffizienz, Nutzerkomfort und Nachvollziehbarkeit messbar gesteigert werden. TwinLight entkoppelt Steuerungslogik von proprietären Systemen durch eine offene, IP-basierte Architektur, unterstützt Qualitätsmanagement und schafft damit die Grundlage für skalierbare, wiederverwendbare Lösungen, die sich nahtlos in bestehende Gebäudeleittechnik integrieren lassen. Dieser Beitrag präsentiert die umgesetzte Systemarchitektur ausgehend von Anforderungen aus Praxis und Literatur. Zudem wurde das Konzept in einem realen Büroraum implementiert und die Tools durch Branchenexpert:innen evaluiert.

2 Anforderungen aus Literatur und Praxis

Hauer et al. adressieren in ihrer systematischen Literaturstudie die mangelnde Durchgängigkeit zwischen Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme für Steuerungen [6]. Die Studienergebnisse führen auf, dass einige DT-Ansätze zu den Gewerken Heizung, Lüftung und Klima (HLK) bestehen, während vergleichbare Konzepte für die Gewerke Kunst- und Tageslicht noch in frühen Entwicklungsphasen zu verorten sind. Haupthemmnisse werden in fehlenden Standards und Workflows zwischen BIM und Werkzeugen für das Design von Beleuchtungssteuerungen und damit verbundenen Sensornetzwerken ausgemacht. Die Literaturstudie betont den Bedarf an Standards, modellbasierten Prozessen und DT-gekoppelter, automatisierter Inbetriebnahmen, um EPGs zu reduzieren [6].

Die online-basierte Marktbefragung von Hammes et al. zu BIM und Steuerungen mit 165 Rückmeldungen von Expert:innen der Baubranche (Planung bis Betrieb) hebt die allgemein anerkannte Relevanz von BIM hervor, jedoch werden insbesondere mangelnde Interoperabilität, Zeitaufwand und mangelndes Fachpersonal als Herausforderungen festgestellt [8]. Die Möglichkeit Steuerungen nach Inbetriebnahme an reale Nutzungsmuster anzupassen, erweist sich i.d.R. als vorteilhaft für die Energieeffizienz [11]. Nachträgliche Steuerungsanpassungen sind jedoch meist mit hohen Arbeitsaufwänden verbunden, was insbesondere auf proprietäre Systemvielfalt und mangelnde Nachvollziehbarkeit im Steuerungsdesign zurückzuführen ist. Aus diesem Grund werden seitens der Marktrecherche die Konzepte der automatisierten Inbetriebnahme, kontinuierlicher Systemüberwachung und der Kopplung von BIM-basierten DTs mit Methoden der Nachnutzungsevaluierung und des Computer-aided Facility Managements als vielversprechende Lösungen herausgestellt. Für bessere

Energieeffizienz und Nutzerkomfort sollten Steuerungen und Sensorkonzepte daher früh in BIM abgebildet werden [8].

Eine fortführende Marktrecherche von Hammes et al. untersucht die technischen und organisatorischen Herausforderungen der BIM-Einführung in der Lichtbranche [12]. Fragmentierte Werkzeuglandschaft, unzureichende Interoperabilität und Datendurchgängigkeit werden als Einschränkungen herausgestellt, weshalb offene Standards, deklarative Modelltransformationen, Middleware und automatisierte Datenvalidierung eingeführt werden sollten. Neben technologischen Lösungen erfordert eine erfolgreiche BIM-Implementierung organisatorische Veränderungen und kontinuierliches Lernen. Individuelle Kompetenzen, strukturierter Wissensaustausch und die aktive Einbindung der Mitarbeitenden bestimmen die Lernfähigkeit einer Organisation. Die Arbeit mit BIM selbst kann diesen Prozess fördern, indem sie Wissen systematisiert und transparent macht und als gemeinsame Informationsbasis für eine nachhaltige Transformation dient. Weiter zeigt sich, dass geringes Wissen mit neutraler oder skeptischer Haltung korreliert, weshalb selbstgesteuertes Lernen mit qualitätsgesicherten [12] freien Ressourcen durch früh definierte BIM-Ziele im Unternehmen gestützt werden sollten.

3 Systemarchitektur

3.1 Steuerungsdesign in BIM

Es wurde eine domänenspezifische Sprache (engl.: domain specific language, DSL) einschließlich einer Modellierungsmethodik und einer auf Autodesk Revit basierenden Toolkette entwickelt, um Gebäudeleitsysteme modellbasiert für die automatische Inbetriebnahme vorzubereiten. Im Zentrum steht die formale Abbildung von Steuerungskomponenten wie Sensoren, Aktoren und Steuerungshardware einschließlich ihrer Parameter, Identifikatoren und Verbindungslogiken innerhalb des BIM-Modells. Die DSL wird als Metamodell in Eclipse Ecore spezifiziert, während die konkrete grafische Repräsentation durch Revit-Familien erfolgt. Dadurch wird eine konsistente Integration der Steuerungsmodellierung in das Gebäudemodell ermöglicht. Ein entwickeltes Revit-Plugin erweitert die Modellierungsumgebung um die automatisierte Generierung von Topologieansichten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen (Raum, Geschoss, Gesamtmodell) sowie um regelbasierte Validierungsmechanismen. Diese gewährleisten die semantische Korrektheit der Modellierung, insbesondere hinsichtlich zulässiger Verknüpfungen und vollständiger Parametrisierung. Der Datenaustausch erfolgt über das IFC-Format in einem zentralen BIM-Modell-Repository und ermöglicht eine bidirektionale Synchronisation zwischen Planung, Bauphysik und Betrieb. Auf Basis des angereicherten Modells werden automatisiert zweidimensionale Verdrahtungs- und Topologiepläne extrahiert und als Graph-Repräsentationen (Graphviz) bereitgestellt. Zur Umsetzung in die physische Gebäudeautomation transformiert ein Deployer die im Modell spezifizierten Komponenten, Parameter und Topologien in ausführbare Steuerungsartefakte. Diese werden automatisiert auf die Zielhardware übertragen, wodurch eine

durchgängige, modellbasierte Prozesskette von der Planung bis zur Inbetriebnahme realisiert wird (siehe Abb. 1, weitere Details in [13], [14]).

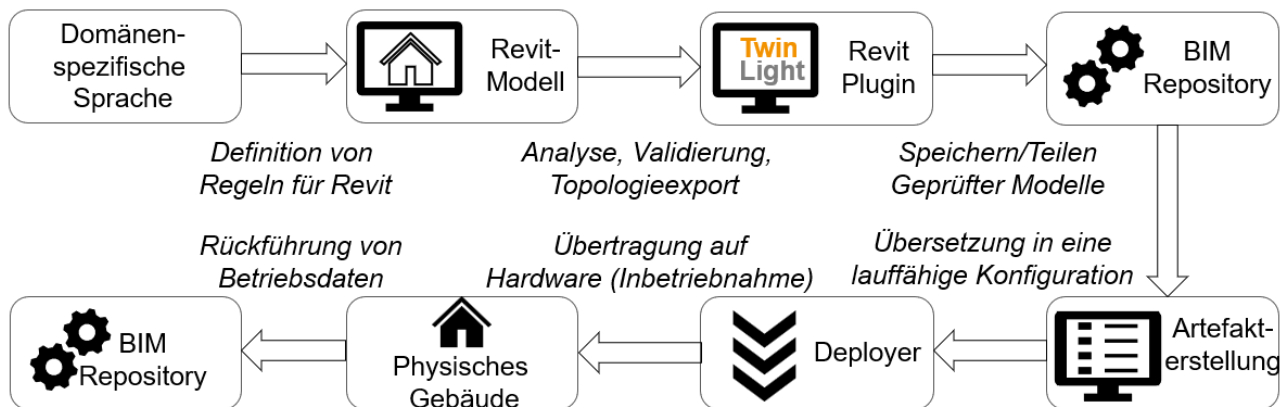


Abb. 1: Modellbasierter Workflow von der DSL-gestützten Revit-Modellierung über BIM-Validierung und Deployment bis zur automatischen Gebäudeinbetriebnahme mit Rückkopplung aus Betriebsdaten.

3.2 Die Middleware-Architektur

Die umgesetzte Middleware setzt auf eine modulare Systemarchitektur mit einem Datenverarbeiter, einem Injektionsvermittler (Injection Broker) und einem Datenspeicher, die über ein zentrales Kommunikationsmanagement verbunden sind, das Protokolldetails abstrahiert und eine einheitliche Nachrichtenoberfläche bereitstellt. Sensordaten werden über MQTT aufgenommen und in einer Zeitreihendatenhaltung persistiert, während ein Datenstromdienst diese Informationen mit geringer Latenz an externe Anwendungen verteilt und so hochfrequente Echtzeitverarbeitung und historische Analysen unterstützt. Ein Datenverarbeiter transformiert alle Eingänge in ein konsistentes internes Format auf Basis eines formalen Datenmodells, das mit JSON-Schema die Typen, Strukturen und die Semantik von Daten und Befehlen maschinenlesbar beschreibt, wodurch geräteübergreifende Interoperabilität erreicht wird. Zur Sicherung der Leistungsfähigkeit trennt die Architektur Lese- und Schreibpfade strikt nach dem Prinzip der Verantwortlichkeitstrennung für Befehle und Abfragen, mit einem dedizierten Abfrageprozessor für Auswertungen und einem Befehlsprozessor für die Verteilung von Steuerbefehlen, was die Echtzeitfähigkeit auch unter hoher Last stabilisiert. Konfigurationsartefakte werden aus BIM abgeleitet und als JSON sowie als YAML bereitgestellt, was die Inbetriebnahme beschleunigt und dynamische Anpassungen an Infrastrukturänderungen erlaubt, ergänzt durch eine rollenbasierte Zugriffskontrolle für sichere bidirektionale Datenflüsse in DTs (siehe Abb. 2, weitere Details in [9], [15]).

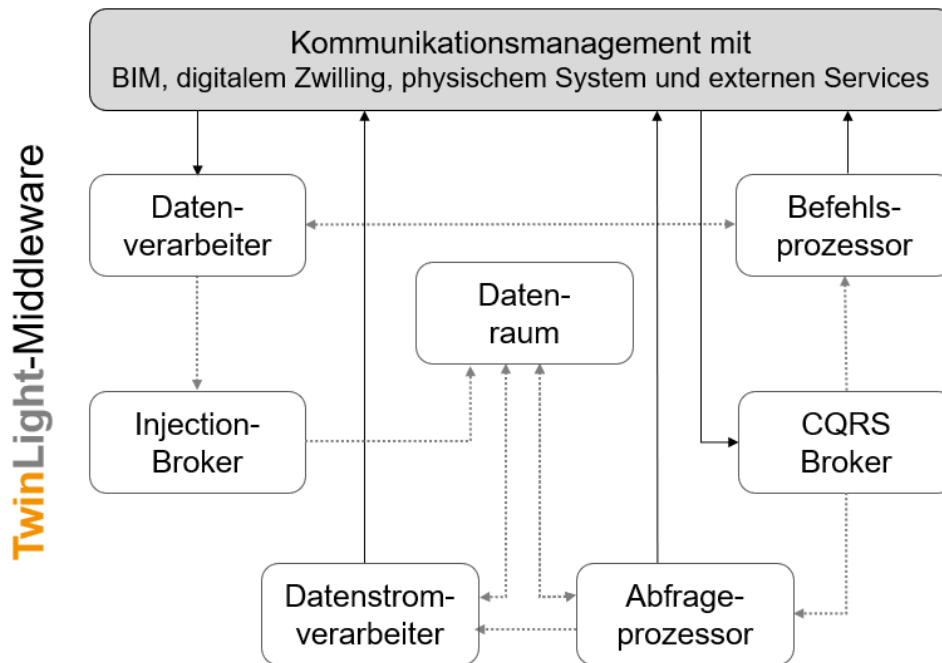


Abb. 2: Schematische Darstellung der Middleware-Architektur.

3.3 Von BIM zum Digitalen Zwilling

Während BIM primär als Informationsmodell für Planung und Dokumentation dient, entsteht durch die kontinuierliche Rückführung von Betriebs- und Sensordaten eine dynamische Abbildung des realen Gebäudes. Die Transformation von BIM zum DT verbindet somit das statische Planungsmodell mit einem bidirektionalen Datenfluss aus dem realen Gebäude und erschließt so Simulation, prädiktive Analytik, automatisiertes Inbetriebnehmen und kontinuierliche Optimierung. Dadurch können Abweichungen zwischen Planung und tatsächlichem Betrieb identifiziert und EPGs reduziert werden. Ein zentraler Mehrwert dieses Ansatzes liegt in der kontinuierlichen Inbetriebnahme und Optimierung der Steuerung, bei der Betriebsdaten zur Anpassung von Steuerungslogiken genutzt werden (bspw. Anpassung an reale Nutzungsmuster). Dies ermöglicht eine iterative Verbesserung der Gebäudeperformance über den gesamten Lebenszyklus hinweg sowie eine bessere Berücksichtigung personenbezogener Nutzungsmuster [9].

Diese Architektur erlaubt nicht nur Monitoring und Diagnose, sondern auch die Simulation und Validierung von Steuerungsanpassungen vor ihrer physischen Implementierung. Dadurch wird die Entscheidungsfähigkeit im Facility Management verbessert und der Gebäudebetrieb effizienter, transparenter und nachhaltiger gestaltet. Die Kopplung des DT mit der Unreal Engine erlaubt fotorealistische, interaktive 3D-Umgebung, in der Gebäudestrukturen und Systemzustände in Echtzeit abgebildet werden. Technisch erfolgt die Kopplung zwischen DT und Visualisierungsebene über die Middleware, die Zustands- und Ereignisdaten bereitstellt (vgl. Abb. 3). Die Unreal Engine konsumiert diese Daten über API-basierte

Kommunikationsschnittstellen und synchronisiert sie mit der virtuellen Szene, wodurch der aktuelle Systemzustand kontinuierlich visualisiert wird. Die Unreal Engine importiert dabei die Gebäudestruktur aus BIM, synchronisiert Geräte und Zustände über die Datenbank, bindet Programmierschnittstellen in Blueprints ein und erlaubt damit fotorealistische Echtzeitdarstellung, Interaktion und das Testen von Steuerungsanpassungen vor Umsetzung (weitere Details in [9], [16], [17]).

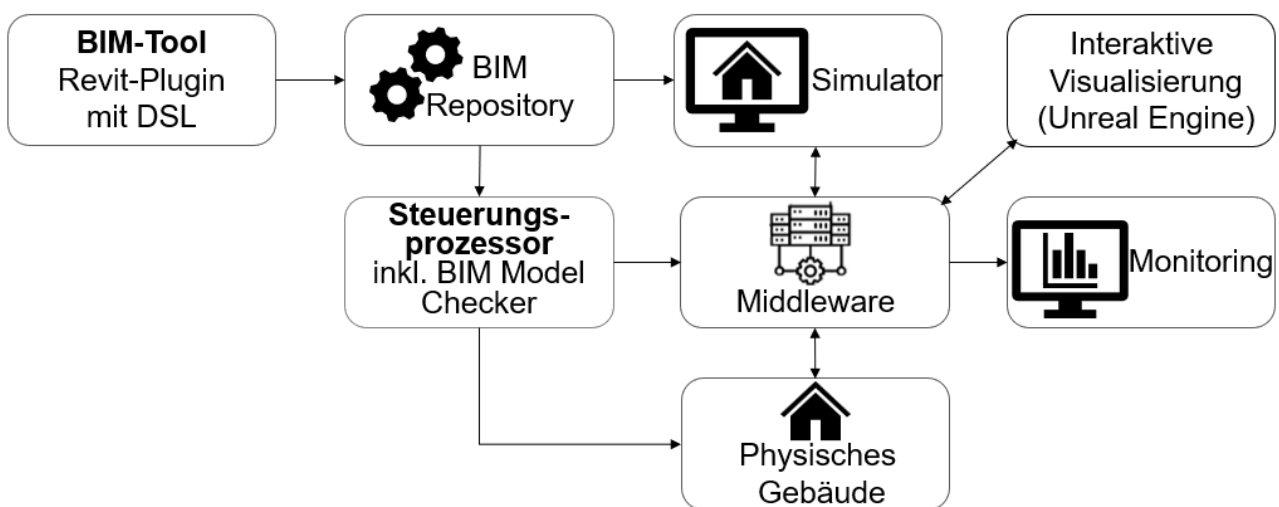


Abb. 3: Schematische Darstellung der TwinLight Systemarchitektur. Originalbildquelle: [16].

4 Realbetrieb und Überprüfung der Technologieakzeptanz

4.1 Betrieb im Living Lab

In der Praxis basiert das Steuerungsdesign in der Entwurfsphase auf Annahmen zu Nutzerverhalten und Nutzungsprofilen, die häufig nicht mit dem realen Betrieb übereinstimmen. Diese Abweichungen führen zu Energieineffizienzen und EPGs, da insbesondere dynamische Einflussfaktoren wie Anwesenheit, Arbeitsorganisation oder Raumbelegung nur unzureichend abgebildet werden [11]. Im Zentrum des TwinLight-Ansatzes steht daher der Übergang von einer statischen, planungsbasierten Steuerung hin zu einem kontinuierlich adaptiven Betriebs- und Optimierungsprozess. Über die vorgestellte Integration einer DSL und einer gemeinsamen Modellierungsebene werden alle Stakeholder in einen konsistenten Konfigurations- und Kommunikationsprozess eingebunden. Dadurch wird die Steuerungslogik direkt im BIM-Modell verankert und transparent als dynamisch anpassbare Systembeschreibung verfügbar gemacht [13].

Die präsentierte Middleware-basierte Kopplung zwischen physischem Gebäude und digitalem Zwilling ermöglicht eine konsistente Synchronisation aller Betriebszustände. Änderungen an der Steuerungslogik können direkt im BIM-Modell vorgenommen, validiert und

automatisiert in das reale System überführt werden. Ergänzend unterstützt eine grafische Monitoring- und Visualisierungsebene die transparente Analyse und Bewertung der Systemzustände. Im Betrieb ermöglicht die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Sensordaten eine laufende Bewertung der Systemperformanz. Diese Daten werden genutzt, um tatsächliche Nutzungsbedingungen mit den ursprünglich angenommenen Parametern abzugleichen und Steuerungsstrategien iterativ anzupassen. Damit wird ein Prozess der kontinuierlichen Inbetriebnahme etabliert, das klassische einmalige Commissioning-Prozesse ersetzt und in einen permanenten Optimierungszyklus überführt [9]. Insgesamt entsteht ein geschlossener, datengetriebener Workflow, der Planung, Betrieb und Optimierung integriert und damit eine kontinuierliche, nachvollziehbare und energieeffiziente Gebäudeinbetriebnahme ermöglicht.

Die entwickelte Systemarchitektur mit zentraler Middleware wurde in einem 22 m² großen Büroraum der Universität Innsbruck unter realen Bedingungen implementiert und getestet. Das Studienobjekt verfügt über eine adaptive Tages- und Kunstlichtsteuerung und ein umfassendes Sensornetzwerk, welches zeitlich hochaufgelöst die Beleuchtungsstärke, die Anwesenheit und raumklimatische Parameter wie Lufttemperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration erfasst, speichert und dem DT bereitstellt. Der Raum inklusive Sensorik und Steuerung ist vollständig in BIM modelliert und in Revit umgesetzt, wobei das Sensornetz modular aufgebaut und erweiterbar ist. Die Abbildung von rund 40 Datenpunkte im Studienobjekt betont die Skalierbarkeit der umgesetzten Systemarchitektur. Die Datenerhebung im Studienobjekt erfolgt pseudonymisiert und unter freiwilliger Zustimmung der teilnehmenden Personen.

Im Studienobjekt wurde ein Lasttest der Middleware am realen Beleuchtungssystem mit einem Intervall von 250 ms durchgeführt. Dabei ergab sich eine mittlere Gesamtreaktionszeit von $11,63 \pm 8,16$ ms, wovon $5,18 \pm 5,23$ ms auf die physische Gerätereaktionszeit entfallen. Die Middleware verarbeitet Aktualisierungen bis 10 ms zuverlässig und effizient. Dies zeigt, dass das System auch unter hoher Last eine nahezu echtzeitfähige Reaktionsfähigkeit gewährleistet und damit für dynamische Regelungsaufgaben im Gebäudebetrieb geeignet ist. Gleichzeitig unterstreicht die geringe Latenz die Eignung der Architektur für zeitkritische Anwendungen wie adaptive Lichtsteuerung und kontinuierliche Betriebsoptimierung (vgl. [15]).

4.2 Anwenderstudien

Zwischen August und Oktober 2025 wurde in firmenspezifischen Workshops die Funktionen der umgesetzten Middleware-Architektur am vorgestellten Studienobjekt demonstriert. 24 Fachkräfte aus der Gebäudetechnik nahmen an den Workshops teil, freiwillig und ohne Vergütung. Die Teilnehmenden bewerteten die Entwicklung eines Steuerungsnetzwerks, samt Logik, den automatisierten Export von Steuerungstopologien und -logik (automatisierte Inbetriebnahme) und die interaktive Visualisierungsumgebung in der Unreal Engine (vgl. [15]).

Die quantitative Bewertung erfolgte auf Basis des Technologieakzeptanzmodells (TAM, siehe [18]) über das Online-Umfragetool LimeSurvey. Da eine Umfrage frühzeitig abgebrochen wurde, standen 23 gültigen Rückmeldungen für die TAM-Analyse zur Verfügung. Erfasst wurden die wahrgenommene Nützlichkeit, die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit sowie zusätzlich die Trainingsqualität. Die BIM-Erfahrung unter den Teilnehmenden lag überwiegend bei mehr als 5 Jahren, und die Relevanz von BIM wurde mehrheitlich hoch eingeschätzt. Die Mediane lagen über dem neutralen Skalenmittelpunkt (1–7, 1: Lehne stark ab, 7: Stimme voll und ganz zu). Für die wahrgenommene Nützlichkeit ergab sich ein Median von 4,62 (Interquartilsbereich (IQR25 – IQR75): 4,00 – 5,38), für die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit 4,29 (4,00 – 4,79) und für die Trainingsqualität 5,00 (4,50 – 6,00), mit größerer Streuung bei Nützlichkeit und Trainingsqualität (vgl. Abb. 4). Systemspezifische Funktionen wurden moderat bis positiv bewertet, besonders die Revit-Plugin-Schnittstelle und die Interaktion mit dem DT (vgl. [15]).

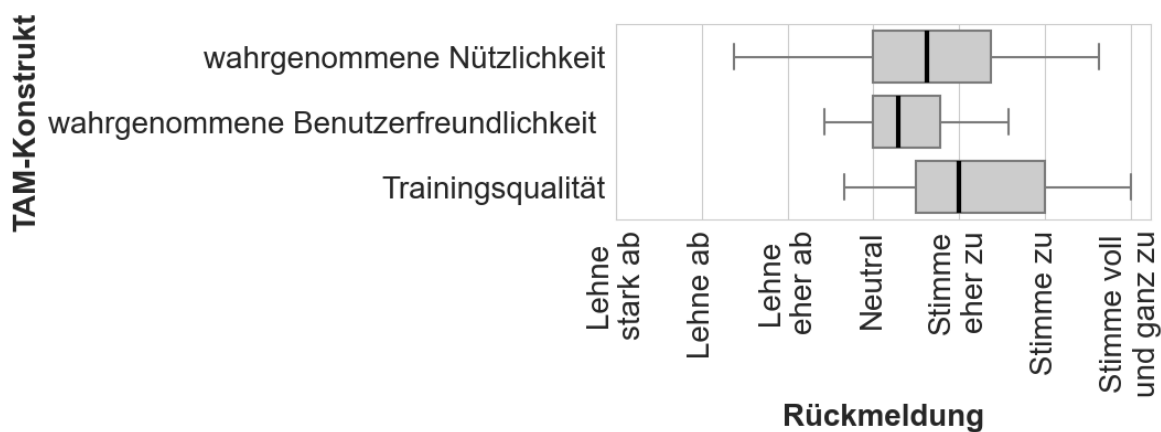


Abb. 4: Boxplot der TAM-Konstrukte basierend auf 23 gültigen Rückmeldungen. Originalbildquelle: [15].

5 Schlussfolgerung

Die in TwinLight umgesetzte Systemarchitektur führt auf, wie durch eine konsequente Integration von Steuerungssystemen in BIM ein durchgängiger, effizienter und kollaborativer Planungs- und Betriebsprozess im Gebäudesektor realisiert werden kann. Im Zentrum steht ein offener, BIM-basierter Workflow, der alle Projektbeteiligten über eine gemeinsame Schnittstelle verbindet und dadurch Informationsverluste sowie Medienbrüche entscheidend reduziert. Die automatisierte Generierung von Steuerungslogik, Verdrahtungsplänen und Inbetriebnahme kann Fehlerquellen und Arbeitsaufwände signifikant reduzieren, was durch die Rückmeldungen der Branchenexpert:innen über die TAM bestätigt wird. Ein wesentlicher Mehrwert liegt in der bidirektionalen Verknüpfung von Planung und Betrieb. Durch die Rückführung von Betriebsdaten in das BIM-Modell entsteht ein digitaler Zwilling, der kontinuierliche Optimierungen ermöglicht und erstmals echte Erfolgskontrollen von

Planungsentscheidungen erlaubt. Dies schafft die Grundlage für datengetriebene Verbesserungen von Energieeffizienz und Nutzerkomfort. Darüber hinaus fördert TwinLight durch offene Schnittstellen und systemunabhängige Ansätze die gewerkeübergreifende Zusammenarbeit und erhöht die Planungssicherheit. Insgesamt etablieren die vorgestellten Entwicklungen einen zukunftsweisenden Ansatz für integrale Steuerungskonzepte über den gesamten Gebäudelebenszyklus hinweg und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung, Effizienzsteigerung und nachhaltigen Transformation der Bau- und Immobilienbranche.

Danksagung

Diese Studie erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts TwinLight [10], einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Zumtobel Lighting GmbH, der HELLA Sonnen- und Wetzschutztechnik GmbH und der Universität Innsbruck, das von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) finanziell unterstützt wurde (Fördervertragsnummer 898708).

Referenzen

- [1] 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>
- [2] 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.
- [3] U. Isikdag und J. Underwood, „Two design patterns for facilitating Building Information Model-based synchronous collaboration“, *Automation in Construction*, Bd. 19, Nr. 5, S. 544–553, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.006.
- [4] 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.
- [5] buildingSMART, „IDS—Information Delivery Specification“. Zugegriffen: 14. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://technical.buildingsmart.org/projects/information-delivery-specification-ids/>
- [6] 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.
- [7] P. Zech, T. Clark, und R. Breu, „An Empirical Analysis of Digital Twin Adoption“, gehalten auf der Hawaii International Conference on System Sciences, 2025. doi: 10.24251/HICSS.2025.748.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] J. Beiter, „TwinLight - BIM-based implementation of daylight and artificial lighting controls“, *Nachhaltig Wirtschaften*. Zugegriffen: 21. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/sdz/projects/twinlight.php>
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] P. Zech, E. Goldin, S. Hammes, D.-G. 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*, Angers, France: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2024, S. 121–128. doi: 10.5220/0012554000003690.
- [14] P. Zech u. a., „An Ecosystem of DSMLs for Building Commissioning“, in *2025 ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*, Grand Rapids, MI, USA: IEEE, Okt. 2025, S. 12–23. doi: 10.1109/MODELS67397.2025.00008.
- [15] S. Hammes, P. Zech, und E. Goldin, „Middleware zur Kopplung physischer Systeme mit digitalen Zwillingen: Konzept und Technologieakzeptanzbewertung“, in *Tagungsband der Bauphysiktag 2026*, 18.-19. März 2026, Kaiserslautern, Deutschland, 2026, S. 38–43.
- [16] S. Hammes u. a., „BIM and Digital Twins: A Synergetic Approach to Continuously Improving Energy Efficiency and Comfort“, in *Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress - CLIMA 2025*, Bd. 788, C. Zilio, F. Busato, L. Mazzarella, und M. Noro, Hrsg., in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 788. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, S. 1504–1513. doi: 10.1007/978-3-032-10546-2_144.
- [17] P. Zech, S. Senoner, E. Goldin, C. Zallinger, S. Hammes, und J. Michael, „Model-driven Digital Twins for AECO“, in *2025 ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, Grand Rapids, MI, USA: IEEE, Okt. 2025, S. 224–235. doi: 10.1109/MODELS-C68889.2025.00040.
- [18] 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.