

# Systematische Identifikation und Quantifizierung der Einflussgrößen auf den Kunstlichtenergiebedarf

Sascha Hammes<sup>1</sup> und Johannes Weninger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen  
Österreich, 6020 Innsbruck, Technikerstraße 13

<sup>2</sup> Bartenbach GmbH, research and development  
Österreich, 6112 Wattens, Lindenstraße 1

## Zusammenfassung

Der Energy Performance Gap (EPG) stellt eine wesentliche Herausforderung in der Baubranche dar, da Energieeffizienzziele meist verfehlt werden. Eine Untersuchung der prägenden Abweichungen zwischen Planung und Betrieb ist daher essentiell. Zudem erweist sich neben der Identifikation der Einflussfaktoren auch eine belastbare Quantifizierung der Effekte als wesentlich, um Maßnahmen für eine verbesserte Planung und Simulation abzuleiten. Um die Einflussgrößen auf den EPG zu erfassen und zu gewichten, wurde ein Großraumbüro der Bartenbach GmbH herangezogen, für das Langzeit-Monitoringdaten von Arbeitsplatzbelegungen sowie lichttechnische, energetische und luftqualitätsbezogene Messwerte bestehen. Es wurde ein allgemeingültige Referenzmodell genutzt, um den Einfluss von Planungsannahmen unter identischen Randbedingungen zu untersuchen. Daraus wurden in Kombination mit dem Einsatz von High-Performance Computing multivariante Simulationen durchgeführt und ein synthetischer Datensatz erzeugt, der vielfältige Raumnutzungsszenarien und resultierende Kunstlichtenergieverbräuche abbildet. Die Abweichungen wurden mittels stochastischer Verfahren analysiert und tageszeitlich und saisonal bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass individuelle Nutzerdynamiken zentraler Treiber der EPG sind. Dies bietet Ansatzpunkte zur Verbesserung der Beleuchtungsplanung zur Reduzierung des EPG.

## 1 Einführung

### 1.1 Rationalitätsannahmen in der Planung und ihre praktische Tragfähigkeit

Rationalitätsannahmen in der Planung und Simulation stützen sich häufig auf vermeintlich robuste Eingaben. Zu diesen zählen insbesondere standardisierte Klimadatensätze (bspw. EPW [1]), generische Raumgestaltung (bspw. Objekte und deren Materialeigenschaften wie Reflexionsgrade) und normativ abgeleitete Nutzungsprofile (bspw. SIA [2]). Diese bilden die Grundlage, auf der Steuerungskonzepte spezifiziert und lichttechnische Leistungsindikatoren wie Energiebedarf, visueller Komfort und gesundheitswirksame Lichtdosen bestimmt werden. In der Praxis kollidieren diese Prämissen jedoch mit dynamischen Realitäten. Denn

projektabhängige Anwesenheitsdynamiken am Arbeitsplatz, heterogene Präferenzen und organisationsspezifische Sozialstrukturen wie die Möglichkeit flexibler Arbeitszeiten und Homeoffice erzeugen stochastische Belegungen, die allgemeingültige Modelle nicht adäquat abbilden [3], [4], [5]. Der Grad der realitätsnahen Abbildung von Nutzerverhalten, Wetterbedingungen und Raumgestaltung entscheidet dementsprechend über das Erreichen oder Verfehlen lichttechnischer Zielsetzungen [3], [4], [6], [7].

Steuerstrategien werden zudem häufig generisch geplant, bspw. zeitgesteuerte Tageslichtverschattungsstrategien mit optionaler Nutzerübersteuerung. Die dahinterstehenden Logikimplementierungen der Beleuchtungssysteme können zwar prinzipiell die geforderten Funktionen erfüllen, jedoch bewirken unzureichende Informationen und falsche Annahmen im Steuerungsdesignprozess meist eine eingeschränkte Systemfunktionalität im Betrieb, wodurch Potenziale in Energieeffizienz und Komfort beschränkt werden können [8]. Darüber hinaus fehlt oft die energetische Gegenüberstellung verschiedener Steuerungskonzepte, bspw. zonale vs. raumbezogene Steuerung, prädiktive vs. reaktive Strategien. So kann bereits in der Konzeption eine Limitierung erfolgen, indem suboptimale Strategien für lichttechnische Zielsetzungen gewählt werden und zugleich die Fähigkeit des Systems eingeschränkt wird, betriebliche Randbedingungen adäquat abzubilden. In der Folge können reale Anforderungen, die sich erst im Betrieb manifestieren, durch das gewählte Steuerungskonzept nicht hinreichend kompensiert werden, bspw. Verbesserung der Energieeffizienz bei hohen Belegungsdynamiken durch zonierte Beleuchtungskonzepte [9].

## **1.2 Von methodischen Limitationen zu operativen Ineffizienzen**

Heutige Kunstlichtplanungen werden primär technisch evaluiert und kaum hinsichtlich ihrer Leistungsindikatoren. Dadurch bleiben energetisch nachteilige Effekte aus fehlerhaften Annahmen oft unerkannt. Unterschätzte Variabilität in Belegungs- und Präferenzmodellen, vereinfachte Klimadaten und Geometriedetails sowie fehlende Variantenvergleiche erzeugen zunächst Prognosefehler. Im Betrieb offenbaren sie sich in einem höheren Kunstlichtenergiebedarf, verfehlte visuelle Komfortziele und unzureichende gesundheitswirksame Lichtdosen (vgl. [4], [6]). Die Folge sind Mehrkosten, unzufriedene Raumnutzer:innen und verfehlte Nachhaltigkeitsziele. Die Differenz zwischen dem tatsächlichen Energieverbrauch und den simulierten Prognosen wird als Energy Performance Gap (EPG) bezeichnet und stellt eine erhebliche Herausforderung in der Baubranche dar [10]. Beobachtete Differenzen um Faktoren bis zu 3 unterstreichen die begrenzte Prognosegüte und die inhärenten Unsicherheiten [11]. Ziel ist es daher die prägenden Einflussfaktoren zu identifizieren.

## **1.3 Ursachenanalyse planungsbedingter Ineffizienzen**

Das Nutzerverhalten wird als eines der wichtigsten Ursachen für den EPG identifiziert und ist daher bereits länger Fokus internationaler Forschungsaktivitäten (vgl. [3], [4], [5], [7], [11], [12]). Das Nutzerverhalten wird maßgeblich von arbeitsspezifischen Prozessen, physischen

Umweltfaktoren, sozialen Normen und psychologischen Faktoren geprägt [13]. Als weitere Ursachen für den EPG können insbesondere bauseitige Installationsfehler und Fehlfunktionen der technischen Anlagen ausgemacht werden [11]. In der Modellierung werden Spezifikationsunsicherheiten als wesentliche Fehlerursache ausgemacht [14]. Der EPG wird durch den systematischen Vergleich der prognostizierten Energiekennwerten mit gemessenen Verbrauchsdaten bestimmt. Essentielle Grundlage bilden dazu Monitoringdaten und Post-Occupancy Evaluation.

#### **1.4 Begrenzte Steuerbarkeit durch fehlende Quantifizierung**

Die Quantifizierung der Einflussfaktoren des EPG ist zentral, um Diskrepanzen zwischen berechneter und realer Energieeffizienz systematisch zu verstehen. Die Zuordnung und Gewichtung einzelner Einflussgrößen ist für die Ermittlung der maßgeblichen Faktoren, die zur Abweichung beitragen, unerlässlich. Erst durch diese Vorgehensweise wird ersichtlich, welche Faktoren signifikant zur Abweichung beitragen. Dies ermöglicht eine gezielte Verbesserung von Simulationsmodellen sowie eine realitätsnähere Abbildung des Gebäudebetriebs. Gleichzeitig schafft die Quantifizierung Transparenz hinsichtlich der bestehenden Unsicherheiten und unterstützt eine fundierte Entscheidungsfindung in der Planungs- und Betriebsphase. Langfristig trägt sie zur Erhöhung der Prognosegüte, zur Minimierung von Risiken und zur verlässlicheren Erreichung energetischer Zielsetzungen bei. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für eine evidenzbasierte Weiterentwicklung von Methoden der Leistungsbewertung. Bisher fehlt es an einer systematischen und quantitativen Bewertung der Wirkungsstärken und Wechselwirkungen unter realistischen Randbedingungen.

#### **1.5 Zielsetzung**

Ziel (Z) der Arbeit ist die integrierte Quantifizierung und Erklärung des EPG. Das Ausmaß des EPG wurde am Beispiel Beleuchtung bestimmt, indem unter Einsatz von High-Performance Computing (HPC) basierend auf realen Anwesenheitsmustern am Arbeitsplatz und dem Kunstlichteinsatz synthetische Nutzungsszenarien erstellt und untersucht wurden, insbesondere im Hinblick auf zeitliche Variation (Z1). Zur Verbesserung von Prognosen und Effizienz wurden Ausmaß und Ursachen des EPG durch systematische Berechnungen unterschiedlicher Nutzerkombinationen sowie unter Einsatz von Machine-Learning-Analysen bewertet, um Beiträge von Nutzerverhalten, Tageslicht, Zeit und räumlichen Bedingungen zu bestimmen (Z2). Darüber hinaus wurden Schlüsselfaktoren des Kunstlichtenergiebedarfs systematisch analysiert, quantifiziert und nach relativer Bedeutung klassifiziert, gestützt durch HPC-basierte multivariate Tageslicht- und Kunstlichtsimulationen mit Radiance (Z3).

## **2 Verwandte Arbeiten**

Ziel der Studie von Hammes et al. war es, die nutzerbedingten Anteile am Kunstlichtenergiebedarf in Bürogebäuden präzise zu quantifizieren und die Treiber des EPG zu

identifizieren und daraus Empfehlungen für Planung und Simulation abzuleiten [15]. Methodisch wurden dazu aus Realdaten von einem Großraumbüro mit zonaler Beleuchtungssteuerung via HPC 10,24 Millionen Monte Carlo Szenarien zu Nutzerpaarungen und Arbeitsplatzpositionen generiert und anschließend über statistischen Verfahren untersucht. Gegenüber einem modellbasierten Referenzansatz nach Norm ergab sich eine Abweichung von 38%. Als statistisch signifikant wurde der Einfluss der Anwesenheit am Morgen herausgestellt. Zudem erwiesen sich bestimmte Kombinationen an individuellen Anwesenheitsprofilen als stärker relevant als andere Kombinationen und standardisierte Belegungsmodelle insbesondere in Randzeiten des Tages als nur begrenzt geeignet [15].

Liang et al. adressieren das EPG in Gewerbebauten und fokussieren die Untersuchung neben technischen Aspekten auch auf organisatorische und nutzerbezogene Einflussfaktoren. Studiengrundlage bildet eine umfassende Befragung von Facility Managern (FM). Für Planung und Simulation identifizieren Liang et al. die explizite Modellierung von Reboundeffekten, die Abbildung dynamischer Belegungs- und Betriebsstrategien, der Einsatz von Monitoring und kontinuierlicher Systemanpassung an das reale Nutzerverhalten sowie Anreizsysteme für FM als geeignete Maßnahmen, um den EPG zu reduzieren [10].

Die Studie von Federuk et al. untersucht den realen EPG an einem Universitätsgebäude und nutzt eine kombinierte Analyse von Entwurfs- und Vertragsunterlagen, Messdaten sowie Befragungen. Die Ergebnisse identifizieren zentrale Hemmnisse in institutioneller und prozessualer Natur und nicht primär ökonomisch oder technisch. Daraus folgt die Notwendigkeit eines wirksamen Monitorings- und Steuerungssystems sowie durchgängiger Rückkopplung zwischen Entwurf, Bau und Betrieb. Als Maßnahmen zur Reduktion von EPG werden die Absicherung durch vertragliche Zuständigkeiten, Phasen erweiterter Inbetriebnahme und die kontinuierliche Aufnahme von Feedback betont [8].

### **3 Methodik**

#### **3.1 Empirische Evidenz als Grundlage**

Belastbare Messdaten aus dem Gebäudebetrieb bilden die zentrale Grundlage, um den EPG zu quantifizieren. Ohne eine fortlaufende Datenerhebung und -auswertung bleiben Abweichungen zwischen Planung und realem Betrieb oft unerkant oder werden falsch interpretiert, was die Ableitung wirksamer Optimierungsmaßnahmen erschwert. Die Bedeutung von messdatenbasierten Nachnutzungsbeurteilungen wird in diesem Zusammenhang in der Literatur mehrfach betont [11], [12], [14]. Auch die vorliegende Untersuchung stützt sich auf systematisches Monitoring als empirische Basis zur Verknüpfung von Nutzerverhalten, Tageslichtverfügbarkeit, Systemzuständen und resultierendem Energiebedarf. Monitoring erweist sich als unverzichtbar, um dynamische Muster, wie bspw. zeitvariable Belegung, tageslichtinduzierte Regeldynamik und/oder manuelle Übersteuerungen sichtbar zu machen und Regelstrategien evidenzbasiert zu optimieren [4], [9].

Messdaten, die im ehemaligen Großraumbüro (160 m<sup>2</sup>, im Regelfall 18 Personen, Abb. 1a) der Bartenbach GmbH in Aldrans, Österreich, im Zeitraum Feb. 2022 bis Jan. 2023 erhoben wurden, bilden die Datengrundlage für die nachfolgenden Betrachtungen (adressiert Z1 und Z2). Die Besonderheit ist, dass Tages- und Kunstlicht zoniert getrennt steuerbar sind. Das Kunstlicht wird im Automatikbetrieb in Abhängigkeit von Anwesenheit und Tageslichtverfügbarkeit geregelt. Dazu bestehen an jedem Arbeitsplatz PIR-Anwesenheitssensoren (15 min-Nachlaufzeit) und Beleuchtungsstärkesensoren (Zielwert: 500 lx). Die Messwerte der Sensorik und die Steuerbefehle an die Aktorik werden hochaufgelöst protokolliert und bilden die Basis für anschließende energetische Bewertungen. Im Studienobjekt besteht eine hohe Tageslichtverfügbarkeit ( $DA_{08-18, 500lx}=81,56\%$ ). Ein automatisiertes Verschattungssystem sowie ein statisches Tageslichtsystem begrenzen das Risiko von Blendung und Überhitzung, das mit den großen Verglasungsanteilen an Süd- und Nordfassade einhergeht. Für den Kunstlichtenergiebedarf erweisen sich die Einzelarbeitsplatzanwesenheiten der jeweiligen Zone und die zum Präsenzzeitpunkt verfügbare Tageslichtmenge als wesentlich (weitere Details zum Studienobjekt in [3], [4], [9]).

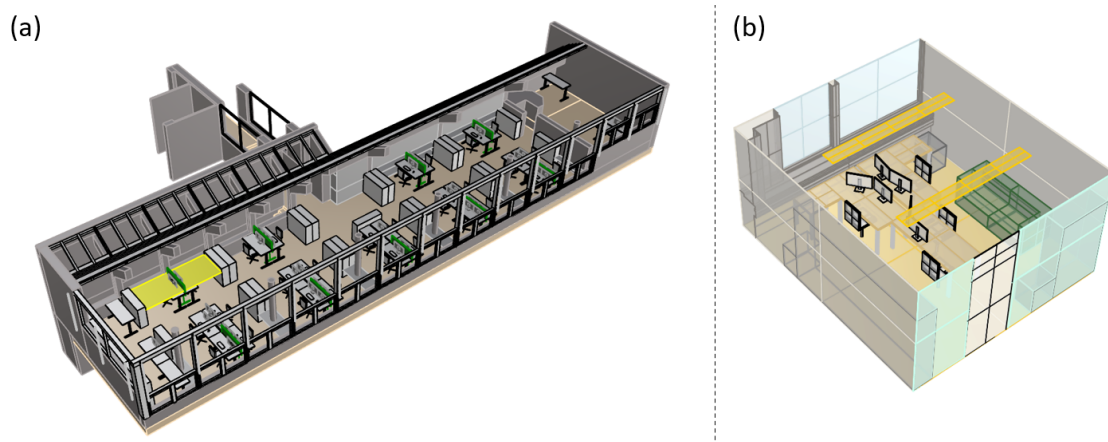


Abb. 1: Darstellung der beiden realen Studienobjekte als Gebäudemodell ((a) Großraumbüro der Bartenbach GmbH in Aldrans, Österreich und (b) Büroraum der Universität Innsbruck, Österreich).

Manche Analysen lassen sich nur mithilfe von Simulationen durchführen, da ausschließlich modellbasierte Ansätze einen konsistenten Vergleich unter identischen Randbedingungen ermöglichen. Simulationen schaffen eine kontrollierte Referenz, um Abweichungen zwischen Planung und Betrieb systematisch zu analysieren. Aus diesem Grund wird zu weiteren Untersuchungen des EPG ein allgemeingültiges Referenzmodell genutzt. Auf diese Weise soll der Einfluss von unterschiedlichen Planungsannahmen unter identischen Randbedingungen bewertet werden (Z3). Als Referenzmodell wird ein Büroraum der Universität Innsbruck, Österreich, herangezogen (26 m<sup>2</sup>, im Regelfall 2 Personen, Abb. 1b). Zwei westorientierte Fenster mit einem automatisch geregelten Closed-Cavity-System zur Vermeidung von Blendung und Überhitzung. Das Kunstlicht wird im Automatikbetrieb in

Abhängigkeit von Tageslichtverfügbarkeit und Anwesenheit gesteuert (Zielwert: 500 lx). Die Steuerung erlaubt einen Einzel- und Gruppenbetrieb der Leuchten.

### **3.2 Simulation multivariater Szenarien mittels High-Performance Computing**

Für die Analyse nutzerinduzierter Effekte wurde das Großraumbüro (Abb. 1a) mit zonierter Beleuchtung herangezogen und die kombinatorische Vielfalt der Nutzerpaarungen und deren Verteilung im Raum exploriert. Bei 18 Personen, die auf neun Beleuchtungszonen verteilt werden, entstehen 153 mögliche Paarungen, die über permutationsbasierten Raumzuweisung zu rund  $12.5 \cdot 10^{12}$  Kombinationen führen. Für 10,24 Mio. dieser Nutzerpaarungen in unterschiedlicher räumlicher Verteilung wurde über HPC ein synthetischer Datensatz des Kunstlichtenergiebedarfs erstellt und untersucht (Umsetzung: VSC-5 der Vienna Scientific Cluster, 770 Nodes, 128 Kerne, 60 000 Kernstunden, weitere Details zum Einsatz des HPC in [3], [15]). Die Ergebnisse bilden Grundlage für die gesetzten Studienziele Z1 und Z2. Auch wenn über Feldstudien essentielle Erkenntnisse zu den Ursachen des EPG erhoben werden können [8], [10], [11], finden die gewonnenen Ergebnisse oft Limitierung im Gebäudestandort, Fassadenausrichtung und Steuerstrategie, da meist nur ein Studienobjekt bewertet wird.

Für die systematische Variantenanalyse unter gleichen Randbedingungen wurden im gewählten Referenzraum (Abb. 1b) mehrere Simulationseingangsgrößen über das HPC-System LEO der Universität Innsbruck variiert, um deren Effekt auf den Kunstlichtenergiebedarf zu bestimmen (Z3). Dazu zählten Gebäudestandort, Klima, Fassadenausrichtung, Belegung, Zonierung und Steuerstrategie zur Vermeidung von Blendung (gesamt 7200 Szenarien). Die tageslichtseitige Basis bilden stündliche RADIANCE-Simulationen (EPW-Wetterdaten) mit horizontalen Messpunkten zur Ableitung des Kunstlichtenergiebedarfs und vertikale Messpunkte zur Bewertung der Blendung.

### **3.3 Statistische Methoden zur Ableitung belastbarer Zusammenhänge**

Die Analyse kombiniert stochastische Stichproben mit deskriptiven und inferenzstatistischen Verfahren zur Quantifizierung der Einflüsse auf den Kunstlichtenergiebedarf. Belegungsschemata aus HPC wurden zeitlich saisonal und positionsbezogen mit simulationsbasierten Referenzen verglichen. Abweichungen zwischen Simulation und Realität wurden getrennt nach Präsenz und Beleuchtungsstärke sowie in Kopplung analysiert (Z1). Zudem wurden Regressionsmodelle auf Basis histogrammbasiertem Gradient Boosting formuliert, mit einem 80 zu 20 stratifizierten Datensplit nach Nutzerpaarungen trainiert und hinsichtlich der Modellgüte  $R^2$  bewertet. Die Modelle wurden anschließend mit SHAP analysiert, um globale und lokale Beitragswerte der Einflussgrößen abzuleiten (Z2). Eine kombinierte deskriptive und inferenzstatistische Pipeline aus Boxplots multipler linearer Regression, einfaktorieller ANOVA, Random Forest und SHAP wurde in Python implementiert, um den Einfluss einzelner Merkmale auf den Energiebedarf zu quantifizieren (Z3). Ergänzende statistische Analysen erfolgten in JASP und Python (Z1-Z3).

## 4 Resultate

### 4.1 Identifikation relevanter Einflussgröße

Simulationsbasierte Annahmen mit standardisierten Belegungsmodellen (mit SIA [2]: 171,7 kWh) unterschätzen den realen Kunstlichtenergiebedarf (237,32 kWh) um rund 39%. Zur Identifikation zentraler Einflussgrößen auf den EPG wurden die 10,24 Mio. HPC Stichproben ausgewertet, deren Verteilung annähernd normal ist (Prüfung über Q-Q-Plot, Mittelwert und Standardabweichung:  $238,64 \pm 12,31$  kWh, Min.: 182,81 kWh, Max.: 284,69 kWh, Abb. 2a). Die größten Abweichungen resultieren aus Anwesenheiten und geringen Beleuchtungsstärken in den Morgen- und Abendstunden, wie sie häufig unter Gleitzeitregelung auftreten können (Abb. 2b & 2c). Während die standardisierten Simulationsannahmen in den Tagesrandzeiten vorwiegend unterschätzen, überschätzen diese zur Mittagszeit. Als weitere Ursachen der identifizierten Abweichungen werden stündliche Wetterdaten ausgemacht, die dynamischen Schwankungen und insbesondere Phasen geringer Beleuchtungsstärke unterschätzen, was höhere Anforderungen an die zeitliche Auflösung nahelegt (weitere Details in [3]).

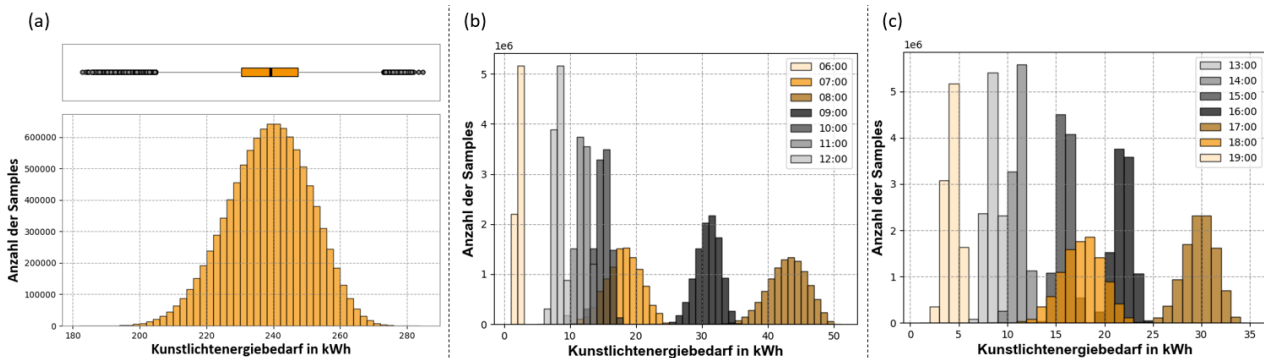


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Kunstlichtenergiebedarfs für 10,24 Mio. generierte Nutzerverteilungen über HPC (a) und zeitliche Verläufe für Nutzerverteilungen von 06:00 bis 12:00 Uhr (b) sowie 13:00 bis 19:00 Uhr (c). Originalbildquelle: [3].

Weiter zeigt sich, dass bestimmte Nutzerkombinationen in den Randbereichen niedriger und hoher Energiebedarfe (Abb. 1a) überproportional häufig auftreten und damit eine zentrale Rolle für die Ausprägung des Energieverbrauchs spielen. Besonders in den Morgen- und Abendstunden zeigen sich deutliche Unterschiede in der Präsenzstruktur. Statistische Tests bestätigen signifikante Effekte der Profiltypen sowie eine Abhängigkeit mit den Tageszeiten, insbesondere im Morgenbereich (zweifaktorielle ANOVA,  $F(14, 120)=1.98$ ,  $p<,05$ ,  $\omega^2=,03$ ). Insgesamt zeigt sich, dass die zeitliche und kombinatorische Verteilung von Nutzerverhalten eine wesentliche Einflussgröße auf den EPG darstellt (weitere Details in [15]).

## 4.2 Quantifizierung relevanter Einflussgrößen

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen zeigen, dass der Kunstlichtenergiebedarf maßgeblich durch nutzungsbezogene und räumliche Einflussfaktoren geprägt wird. Besonders die Anwesenheitsdauer am Arbeitsplatz erweist sich als dominante Ursache. Auch die Lage der Nutzerpaarung innerhalb des Gebäudes beeinflusst den Verbrauch deutlich. Im ausgewählten Großraumbüro bestehen deutliche Unterschiede zwischen südlich- und nördlich-orientierten Beleuchtungszonen. Dies ist insbesondere auf die Steuerstrategie zur Blendvermeidung zurückzuführen. Die Arbeitsplätze an der Südfassade werden eher geschlossen als jene entlang der nordseitigen Oberlichter.

Im Vergleich zwischen realem Betrieb und Simulation zeigen sich strukturelle Ähnlichkeiten hinsichtlich der relevanten Einflussfaktoren, jedoch auch deutliche Unterschiede in deren Gewichtung. Insbesondere werden nutzungsbezogene Faktoren in simulationsbasierten Annahmen teilweise anders bewertet als im realen Betrieb. Dies führt dazu, dass Simulationen die tatsächlichen Verbrauchszusammenhänge nur eingeschränkt abbilden können.

Die Analyse der Abweichungen zwischen simuliertem und realem Verbrauch verdeutlicht, dass der EPG überwiegend durch Differenzen in den Nutzungsannahmen erklärt wird. Vor allem falsch eingeschätzte Anwesenheitszeiten tragen wesentlich zu den beobachteten Abweichungen bei, während andere Einflussgrößen eine untergeordnete Rolle spielen.

Die entwickelten Modelle zeigen insgesamt eine hohe Leistungsfähigkeit bei der Abbildung des Energieverbrauchs sowohl im realen Betrieb als auch unter simulierten Bedingungen ( $R^2 > 0,95$ ). Gleichzeitig wird deutlich, dass die Übertragbarkeit von Simulationsannahmen auf reale Verbrauchsdaten eingeschränkt ist ( $R^2 = 0,72$ ), während die Ursachen des EPG durch die betrachteten Einflussgrößen weitgehend erklärbar sind (weitere Details in [7]).

Für die Variation an Simulationsannahmen zeigen die statistischen Auswertungen, dass mehrere Eingangsparameter den Kunstlichtenergiebedarf signifikant beeinflussen. Gebäudestandort, Nutzerverteilung im Raum und Belegungsmuster weisen die größten signifikanten Einflüsse mit hoher Effektstärke auf (ANOVA, jeweils  $p < ,001$  und  $\eta^2 \geq 0,20$ ). Einen weniger ausgeprägten doch dennoch signifikanten Effekt haben Zonierung und Fassadenorientierung (jeweils  $p < ,001$ ,  $\eta^2 \geq 0,08$ ). Kein signifikanter Effekt konnte für den HPC-gestützten Simulationsvergleich für die Steuerstrategie des Verschattungssystem identifiziert werden ( $p = ,35$ ). Insgesamt überwiegen saisonale und nutzerbezogene Einflüsse gegenüber Steuerungsstrategien (siehe Abb. 3 und Abb. 4).

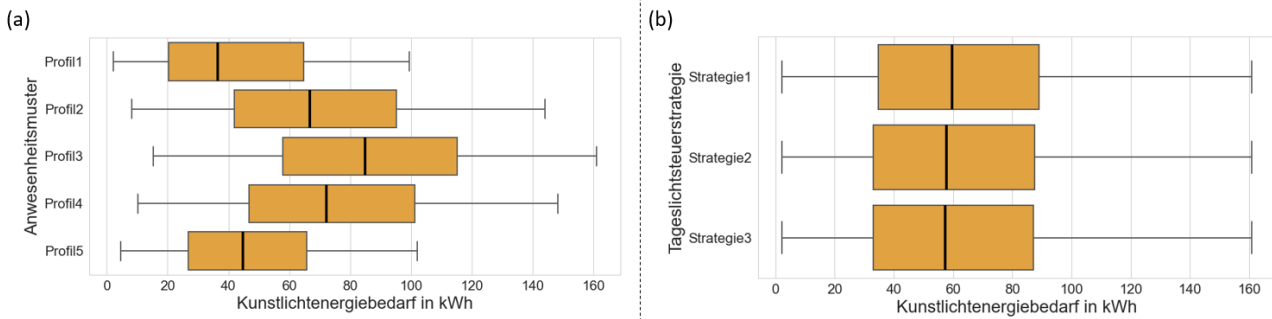


Abb. 3: Verteilung des Beleuchtungsenergiebedarfs nach Belegungsmuster (a) und nach Tageslichtsteuerstrategie (b).

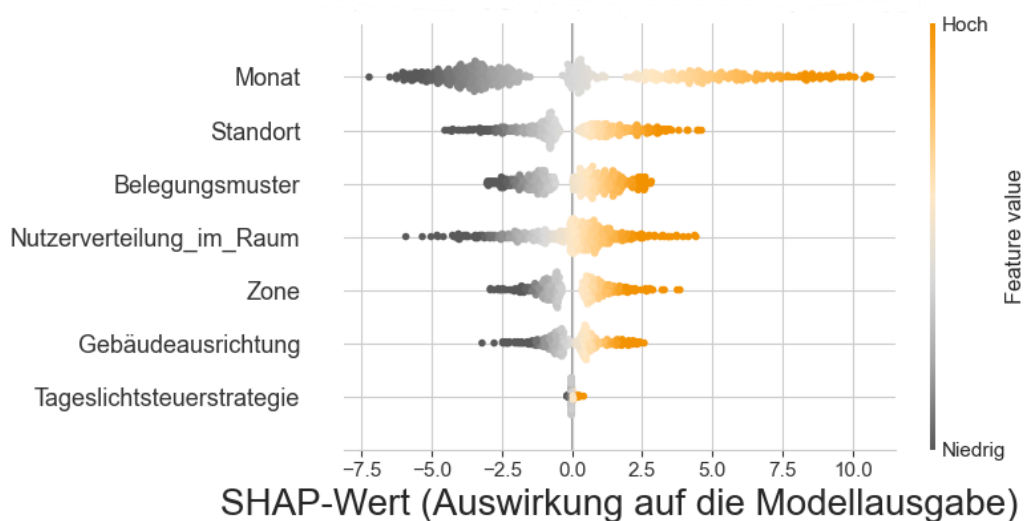


Abb. 4: SHAP-Plot zur Darstellung des Einflusses der gewählten Merkmale auf den Kunstlichtenergiebedarf.

## 5 Praktische Bedeutung für die Lichtplanung

Die Ergebnisse betonen eine grundlegende Verschiebung der Prioritäten in der Lichtplanung hin zu nutzerzentrierten und ortsspezifischen Planungsprozessen. Eine zentrale Erkenntnis betrifft die Notwendigkeit zur stärkeren Berücksichtigung von Anwesenheitsmustern. Denn insbesondere in den Tagesrandzeiten können diese einen maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf haben. Daraus folgt, dass Belegungsdynamik integraler Bestandteil der Planung werden muss, um EPG zu vermeiden. Da Anwesenheitsmuster in der frühen Planungsphase oftmals nicht bereitstehen, muss Planungsrationalität probabilistisch, kontextspezifisch und verifikationsfähig gedacht werden, inklusive Variantenvergleich, Unsicherheitsquantifizierung und messbasierten Rückkopplungen. Zudem sollten Tools nicht nur Einzelentwürfe berechnen, sondern gewichtete Konzeptvergleiche über

unterschiedliche Nutzungsprofile erlauben, um Entscheidungstransparenz und Robustheit in frühen Phasen zu erhöhen und Variantenprioritäten frühzeitig zu formulieren.

Die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten erweist sich dafür als entscheidend. Fein aufgelöste Wetterdaten und realitätsnahe Präsenzsensoren sind notwendig, da Modelle mit geringer Auflösung systematische Abweichungen erzeugen. Simulationen bilden reale Kausalitäten nur dann adäquat ab, wenn sie gegen Monitoringdaten kalibriert und hinsichtlich Nutzungssensitivitäten geprüft werden. Post-Occupancy Evaluations liefern die Grundlage für Nachjustierungen und die fortlaufende Verbesserung der Planungsannahmen. Ausschreibungen sollten Anforderungen an Datenerfassung, Datenqualität und Kalibrierung festlegen sowie Messkonzepte und Zielgrößen für Komfort und Energie definieren.

Planungsrationalität ist daher probabilistisch, kontextspezifisch und verifikationsfähig zu verstehen. Planungstools sollten gewichtete Konzeptvergleiche über unterschiedliche Nutzungsprofile ermöglichen.

## **6 Schlussfolgerung**

Die systematische Analyse und Quantifizierung der zugrunde liegenden Einflussfaktoren erlaubt eine präzisere Abbildung von Gebäudeleistungen und verbessert die Prognosesicherheit hinsichtlich energetischer Zielsetzungen. Eine gebäudespezifische Individualisierung der Simulationsannahmen ist erforderlich, jedoch in Bezug auf notwendige Daten bislang unzureichend geklärt.

Diese Untersuchung zeigt, dass der Energiebedarf für Kunstlicht maßgeblich durch zeitliche Variabilität, standortspezifische Rahmenbedingungen und nutzerbezogene Faktoren geprägt wird. High-Performance Computing unterstützt die robuste Variantenbildung und erleichtert evidenzbasierte Entscheidungen ohne unnötige Modellkomplexität. Perspektivisch sollten Standards und Planungstools zeit- und ortsabhängige sowie nutzerbezogene Einflüsse explizit abbilden, um die Übertragbarkeit zu erhöhen und die Planungssicherheit zu stärken. Insgesamt eröffnet die konsequente Integration von Nutzerverhalten, Ort und Datenqualität den Weg zu einer adaptiven Lichtplanung, die Energieeffizienz, Komfort und Betriebssicherheit verbessert und den EPG systematisch verringert.

## **Danksagung**

Diese Studie erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts Borealis [16], einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bartenbach GmbH, der Zumtobel Lighting GmbH, der HELLA Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH und der Universität Innsbruck, welches von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) finanziell unterstützt wird (Fördervertragsnummer 910225).

## Referenzen

- [1] M. F. Jentsch, A. S. Bahaj, und P. A. B. James, „Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files“, *Energy and Buildings*, Bd. 40, Nr. 12, S. 2148–2168, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.06.005.
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein - sia, „Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik“. sia, 2006.
- [3] S. Hammes, J. Weninger, P. Zech, und P. Gschwandtner, „Unraveling the energy performance gap: Understanding user-related factors affecting lighting energy consumption in office buildings“, gehalten auf der 2025 Building Simulation Conference, Aug. 2025. doi: 10.26868/25222708.2025.1923.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. Weninger und S. Hammes, „Behavioral Aspects of Real and Simulated Energy Consumption in Artificial Lighting Systems of Office Buildings“, *Ybl Journal of Built Environment*, Bd. 10, Nr. 1, S. 143, Nov. 2025, doi: 10.12700/jbe-2025-0014.
- [8] 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.
- [9] S. Hammes, J. Weninger, M. Canazei, R. Pfluger, und W. Pohl, „Die Bedeutung von Nutzerzentrierung in automatisierten Beleuchtungssystemen“, *Bauphysik*, Bd. 42, Nr. 5, Art. Nr. 5, Okt. 2020, doi: 10.1002/bapi.202000010.
- [10] J. Liang, Y. Qiu, und M. Hu, „Mind the energy performance gap: Evidence from green commercial buildings“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 141, S. 364–377, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.021.
- [11] 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.
- [12] P. X. W. Zou und M. Alam, „Closing the building energy performance gap through component level analysis and stakeholder collaborations“, *Energy and Buildings*, Bd. 224, S. 110276, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110276.
- [13] V. Fabi, R. V. Andersen, S. Corgnati, und B. W. Olesen, „Occupants’ window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models“,

- Building and Environment, Bd. 58, S. 188–198, Dez. 2012, doi: 10.1016/j.build-env.2012.07.009.
- [14] C. Van Dronkelaar, M. Dowson, C. Spataru, und D. Mumovic, „A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings“, Front. Mech. Eng., Bd. 1, Jan. 2016, doi: 10.3389/fmech.2015.00017.
- [15] S. Hammes, J. Weninger, P. Gschwandtner, und P. Zech, „Achieving a deeper understanding of user-related influences on artificial lighting energy demand using high-performance computing“, in In G. Pernigotto, Bd. I. Ballarini, bu,press, 2025, S. 371–378. doi: 10.13124/9788860462022\_46.
- [16] FFG - Die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, „Borealis - Self-learning building controls for a greener and healthier society“. Zugegriffen: 23. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/5121377>