



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences



akademie
DER HOCHSCHULE BIBERACH

Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Integration dynamischer Verschattungssimulationen in die Gebäudeautomation

Softwaregestützte Umsetzung und Validierung eines Workflows
vom BIM-Modell bis zur operativen Steuerung.

Masterarbeit

Studiengang Gebäudeautomation

FH Münster - University of Applied Sciences

Niklas Wittkämper

Eingereicht am: 24.02.2026

Matrikelnummer: 1382664

Firma: Schneider Electric GmbH, Berlin

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Höttecke

Zweitgutachter: Matthias Meier

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Physikalische und geometrische Grundlagen	3
2.1.1	Sonnenbahnmechanik	3
2.1.2	Vergleich und Auswahl der Berechnungsverfahren	5
2.1.3	Geometrie der Verschattung	6
2.1.4	Klassifizierung steuerbarer Sonnenschutzsysteme	7
2.1.5	Bauphysikalische und lichttechnische Zielgrößen	8
2.2	Dynamische Jahresverschattung	8
2.3	Digitale Planungsmethoden (Datenformate?)	8
2.4	Standards der Gebäudeautomation	9
2.4.1	GEG	9
2.4.2	DIN V 18599	9
2.4.3	VDI 6011-1	9
2.4.4	DIN EN 17037	9
2.4.5	Weitere Normen	9
3	Anforderungsanalyse und Konzeption des Integrationsprozesses	11
3.1	Analyse der Ausgangssituation und Zieldefinition	11
3.2	Spezifikation der Datengrundlage (Input)	11
3.2.1	Analyse der BIM-Datengüte (IFC):	11
3.2.2	Analyse externer Geodaten	11
3.2.3	Georeferenzierung und Zeitbasis	13
3.3	Konzeption der Simulationslogik (Processing)	13
3.4	Definition der Systemarchitektur und Schnittstellen (Output)	13
4	Implementierung und Validierung des Proof of Concept	14
4.1	Import Umgebungsdaten	14
4.2	Import IFC	14
4.3	Positionierung der IFC im Modell	14
4.4	Die eigentliche Simulation	14
4.4.1	Zeitlicher Umfang und Auflösung	14
4.4.2	Überlegung zur räumlichen Auflösung	16
4.4.3	Möglichkeiten der Simulationsoptimierung	16
4.5	Validierung der Ergebnisse	16
5	Integration in die Gebäudeautomation	17
5.1	Datenstruktur und Schnittstellendefinition	17
5.2	Kommunikationsarchitektur und Datenübertragung	17
5.3	Steuerungsstrategie und Funktionslogik	17
6	Diskussion und Fazit	18

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	18
6.2 Grenzen des entwickelten Prozesses	18
6.3 Ausblick	18
6.4 KI-Disclaimer	18
A Literatur	19
B Glossar	20

Einleitung

1

1.1 Problemstellung

Die Steuerung automatisierter Fassadensysteme erfolgt in der heutigen Gebäudepraxis überwiegend reaktiv auf Basis lokaler Sensorik. Helligkeits- und Strahlungssensoren erfassen den Ist-Zustand der Umgebung, können jedoch komplexe geometrische Situationen wie den Schattenwurf durch Nachbarbebauung oder die Eigenverschattung der Fassade nur unzureichend abbilden. Dies führt im Betrieb häufig zu ineffizienten Fahrbewegungen der Behänge, die weder den visuellen Komfort noch den sommerlichen Wärmeschutz optimal bedienen.

Um diese Defizite auszugleichen, bieten moderne softwaregestützte Methoden die Möglichkeit, den Schattenwurf präzise vorauszuberechnen. Die praktische Anwendung scheitert jedoch derzeit an massiven Ineffizienzen innerhalb der digitalen Prozesskette, die sich sowohl in der Datenbeschaffung als auch in der Datenverwertung manifestieren.

Ein vorgelagertes Hindernis besteht in der mangelnden Simulationsfähigkeit der architektonischen Ausgangsdaten. Zwar liegen zunehmend digitale Bauwerksmodelle (BIM) vor, diese sind jedoch häufig für visuelle oder konstruktive Zwecke optimiert und entsprechen nicht den Anforderungen einer geometrischen Verschattungssimulation. Inkonsistente Geometrien, fehlende semantische Informationen oder ein unpassender Detaillierungsgrad (Level of Information Need) erzwingen eine zeitintensive manuelle Aufbereitung und Bereinigung der Modelle, bevor eine Berechnung überhaupt möglich ist.

Das nachgelagerte Problem betrifft die fehlende Prozessdefinition für die Datenintegration der Ergebnisse: Selbst wenn validierte Simulationsdaten vorliegen, existiert kein standardisierter Workflow, um diese ohne manuellen Mehraufwand direkt in die Steuerungslogik der Raumautomation zu überführen. Der derzeitige Engineering-Prozess sieht in der Regel nicht vor, dass die Simulationssoftware bereits das finale Datenformat für die Automationsstation bereitstellt.

Angesichts sinkender personeller Ressourcen im Engineering und der steigenden Notwendigkeit, Gebäude klimaresilient zu betreiben, stellen diese Medienbrüche an beiden Enden der Simulationsphase ein kritisches Hemmnis dar. Es ist daher notwendig, die Prozesskette ganzheitlich zu betrachten und Lösungen zu entwickeln, die den Datenfluss vom Gebäudemodell des Architekten bis hin zur Systemintegration der Verschattungsdaten durchgängig und aufwandsarm gestalten.

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Integration dynamischer Verschattungssimulationen in die Gebäudeautomation. Es soll ein strukturierter Workflow definiert werden, der den Informationsfluss von der digitalen Planung (BIM) bis zur operativen Steuerungsebene der Raumautomation automatisiert und standardisiert.

Um die technische Machbarkeit und den praktischen Nutzen dieses Ansatzes zu validieren, verfolgt die Arbeit folgende Teilziele:

1. **Analyse der Schnittstellen:** Identifikation der notwendigen Datenpunkte und Formate auf Basis der VDI 3814 (Gebäudeautomation) und IFC (Industry Foundation Classes).
2. **Entwicklung eines Proof of Concept (PoC):** Implementierung eines prototypischen Simulations-Workflows unter Verwendung von Open-Source-Technologien (Blender, Python). Dieser Prototyp soll demonstrieren, wie geometrische Verschattungsdaten automatisiert aus einem IFC-Modell extrahiert, berechnet und in ein maschinenlesbares Format für Automationsstationen überführt werden können.
3. **Ableitung von Handlungsempfehlungen:** Erstellung eines Leitfadens für Fachplaner und Systemintegratoren, der die notwendigen Datenanforderungen und Prüfschritte für die Inbetriebnahme beschreibt.

Die Arbeit schließt somit die Lücke zwischen theoretischem Simulationspotenzial und praktischer Anwendung, indem sie nicht nur das „Was“, sondern durch den softwaretechnischen Demonstrator auch das „Wie“ der Integration beantwortet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mit ki hier noch generieren

Theoretische Grundlagen

2

2.1 Physikalische und geometrische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die astronomischen und geometrischen Gesetzmäßigkeiten hergeleitet, die für die Berechnung des Schattenwurfs maßgeblich sind. Zudem erfolgt eine Klassifizierung der aktorischen Komponenten und der zu optimierenden Zielgrößen.

2.1.1 Sonnenbahnmechanik

Für eine exakte Verschattungssimulation muss die Position der Sonne bekannt sein. Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen für die Wahre Ortszeit, den Stundenwinkel sowie für Deklination, Höhenwinkel und Azimut dargelegt (siehe Abbildung 1).

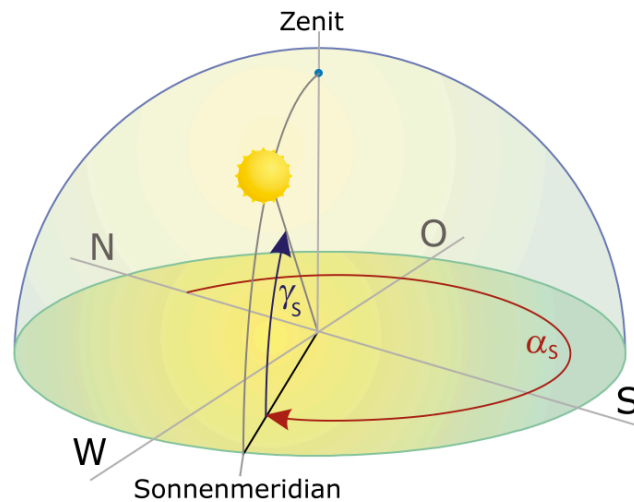


Abbildung 1 — Winkelbezeichnungen des Sonnenstandes [1]

Wahre Ortszeit

Wie Duffie und Beckman [2] herleiten, sind für die Berechnung der Wahren Ortszeit (t_{woz}) folgende Parameter notwendig:

- t_{std} : Gesetzliche Ortszeit (Local Standard Time) in Stunden.
- n : Tag des Jahres (1 bis 365).
- λ_{loc} : Geografischer Längengrad des Standorts (in Grad).
- λ_{std} : Bezugslängengrad der Zeitzone (z. B. 15° für MEZ).
- E : Zeitgleichung (Equation of Time) in Minuten.

Die Wahre Ortszeit berechnet sich wie folgt¹:

¹Vorzeichenkonvention gemäß ISO 6709 (Ost positiv). Duffie/Beckman verwenden hier invertierte Vorzeichen (West positiv).

$$t_{\text{WOZ}} = t_{\text{std}} + \frac{4 \cdot (\lambda_{\text{loc}} - \lambda_{\text{std}}) + E}{60} \quad (1)$$

Der Divisor 60 ist notwendig, um die Zeitkorrekturen (Minuten) in das Format der Basiszeit (Stunden) zu überführen. Die Zeitgleichung E (in Minuten) wird angenähert durch:

$$E = 229.18 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.040849 \sin(2B)) \quad (2)$$

mit dem Hilfswinkel B :

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (3)$$

Stundenwinkel (ω)

Um die zeitliche Komponente in die geometrische Berechnung einzuführen, wird die Wahre Ortszeit (t_{WOZ}) in den Stundenwinkel ω umgerechnet. Da die Erde sich um 15° pro Stunde dreht, gilt:

$$\omega = (t_{\text{WOZ}} - 12) \cdot 15^\circ \quad (4)$$

Dabei entspricht $\omega = 0^\circ$ dem solaren Mittag (Sonne exakt im Süden). Vormittagswerte sind negativ, Nachmittagswerte positiv.

Sonnendeklination (δ)

δ ist der Winkel zwischen der Verbindungslinie Erde-Sonne und der Äquatorebene. Sie beschreibt die Neigung der Erde in Relation zur Sonne und variiert im Jahresverlauf zwischen $-23,45^\circ$ und $+23,45^\circ$.

Für die Bestimmung der Sonnenposition wird das Berechnungsverfahren gemäß DIN EN 17037 (Tageslicht in Gebäuden) angewendet [3]. Ausgangsbasis für die Sonnendeklination δ ist die Tageszahl J (1 für 1. Januar bis 365 für 31. Dezember) und der daraus abgeleitete Jahreswinkel J' :

$$J' = 360^\circ \cdot \frac{J}{365} \quad (5)$$

Die Deklination $\delta(J)$ ergibt sich gemäß Gleichung D.3 der Norm:

$$\begin{aligned} \delta(J) = & 0.3948 \\ & -23.2559 \cdot \cos(J' + 9.1^\circ) \\ & -0.3915 \cdot \cos(2 \cdot J' + 5.4^\circ) \\ & -0.1764 \cdot \cos(3 \cdot J' + 26.0^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

Hinweis zur Implementierung: Die Koeffizienten liefern das Ergebnis in Grad. Für die geometrische Weiterverarbeitung im Simulationsmodell (siehe kapitel 5???) erfolgt eine Umrechnung in das Bogenmaß (Radiant).

Sonnenhöhenwinkel (γ_s)

Der Sonnenhöhenwinkel beschreibt den vertikalen Winkel zwischen der horizontalen Ebene und dem Mittelpunkt der Sonnenscheibe. Er ist maßgeblich für die effektive Einstrahlung auf Fassadenflächen sowie für die Berechnung der Schattenlängen.

Basierend auf dem geografischen Breitengrad φ , der zuvor berechneten Deklination δ und dem Stundenwinkel ω ergibt sich der Höhenwinkel aus der grundlegenden Gleichung der sphärischen Astronomie:

$$\sin(\gamma_s) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (7)$$

Durch Umstellung nach γ_s erhält man den expliziten Winkel:

$$\gamma_s = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (8)$$

Dabei gelten folgende Randbedingungen:

- $\gamma_s > 0^\circ$: Die Sonne steht über dem Horizont (Tag).
- $\gamma_s \leq 0^\circ$: Die Sonne steht unter dem Horizont (Nacht/Dämmerung).

Relevanz für die Simulation: In der Prozesskette (Kapitel 5) dient die Prüfung $\gamma_s > 0$ als erster Filter („Early Exit“). Ist der Wert negativ, muss kein aufwendiges Raycasting durchgeführt werden, da keine direkte Verschattung möglich ist.

Sonnenazimut (α_s)

Der Sonnenazimut beschreibt die horizontale Himmelsrichtung der Sonne. In Übereinstimmung mit der Norm DIN 5034-1 ist der Bezugspunkt die geografische Nordrichtung. Der Winkel wird im Uhrzeigersinn von 0° (Nord) bis 360° gemessen.

Die Berechnung erfolgt abhängig von der Wahren Ortszeit [1]:

$$\alpha_s = \begin{cases} 180^\circ - \arccos\left(\frac{\sin(\gamma_s) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\gamma_s) \cdot \cos(\varphi)}\right) & \text{für } t_{\text{WOZ}} \leq 12 \\ 180^\circ + \arccos\left(\frac{\sin(\gamma_s) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\gamma_s) \cdot \cos(\varphi)}\right) & \text{für } t_{\text{WOZ}} > 12 \end{cases} \quad (9)$$

Vorteil für die Simulation: Diese Definition (Nord = 0° , im Uhrzeigersinn) entspricht dem Koordinatensystem gängiger 3D-Software und GIS-Daten.

2.1.2 Vergleich und Auswahl der Berechnungsverfahren

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Formeln der DIN EN 17037 stellen die normative Grundlage für die Tageslichtplanung in Europa dar. Sie bieten eine für architektonische Entwürfe hinreichende Genauigkeit.

Für die Implementierung des Simulations-Prototyps (siehe Kapitel 4) wird jedoch auf den Algorithmus der **National Oceanic and Atmospheric Administration** (NOAA) zurückgegriffen. Dieser zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- **Höhere Präzision:** Während einfache Näherungen Fehler von bis zu 1° aufweisen können, minimiert der NOAA-Algorithmus (basierend auf den Arbeiten von Jean Meeus [4]) die Abweichungen auf unter $0,0001^\circ$.
- **Berücksichtigung atmosphärischer Effekte:** Der Algorithmus inkludiert Korrekturfaktoren für die atmosphärische Refraktion, was insbesondere bei flachen Sonnenständen (Morgen- und Abendstunden) für die Lamellennachführung in der Gebäudeautomation kritisch ist.

Auf eine detaillierte mathematische Herleitung der über 30 Korrekturterme des NOAA-Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet; die Berechnung folgt der dokumentierten Implementierung gemäß [5].

2.1.3 Geometrie der Verschattung

Nachdem die Position der Sonne bestimmt wurde, muss im nächsten Schritt geprüft werden, ob die direkte Sichtlinie zwischen einem betrachteten Punkt auf der Fassade (z. B. Fenstermittelpunkt) und der Sonne durch Hindernisse unterbrochen wird.

Der Sonnenvektor

Für die geometrische Simulation in 3D-Umgebungen ist die sphärische Darstellung (Winkel) oft unpraktisch. Stattdessen wird die Sonnenposition als normierter Richtungsvektor (S) im kartesischen Koordinatensystem definiert.

Unter der Annahme eines Z-up-Koordinatensystems (z. B. in IFC-Modellen üblich, Z zeigt zum Zenit, Y nach Norden) berechnet sich der Sonnenvektor aus Azimut α_s und Elevation γ_s :

$$(S) = \begin{pmatrix} \sin(\alpha_s) \cdot \cos(\gamma_s) \\ \cos(\alpha_s) \cdot \cos(\gamma_s) \\ \sin(\gamma_s) \end{pmatrix} \quad (10)$$

Dieser Vektor zeigt vom Ursprung zur Sonne. Für die Verschattungsberechnung wird der Vektor invertiert ($-(S)$), um die Einstrahlungsrichtung zu simulieren.

Klassifizierung der Verschattungstypen

Man unterscheidet in der Simulation zwei wesentliche Ursachen für den Schattenwurf:

- **Fremdverschattung:** Verursacht durch Objekte außerhalb der eigenen Gebäudehülle, wie Nachbarbebauung, Vegetation oder Topografie. Diese Geometrien sind im Betrieb statisch, müssen aber im digitalen Modell (IFC/CityGML) präzise abgebildet sein.
- **Eigenverschattung:** Verursacht durch die Gebäudegeometrie selbst, z. B. durch Fassadenvorsprünge, Balkone oder die Laibungstiefe des Fensters. Besonders die Laibungstiefe spielt bei steilen Sonnenständen eine kritische Rolle für das Vorausschauen des effektiven Lichteintrags.

Das Raycasting-Verfahren

Zur Ermittlung des Verschattungsstatus wird in modernen Simulationstools das **Raycasting** (Strahlenverfolgung) eingesetzt. Dabei wird ein theoretischer Sehstrahl $R(t)$ vom Referenzpunkt P_0 (z. B. Fenstermitte) in Richtung der Sonne gesendet:

$$R(t) = P_0 + t \cdot (S) \quad \text{mit } t > 0 \quad (11)$$

Der Algorithmus prüft, ob dieser Strahl ein beliebiges Polygon der Umgebungsszene (Mesh) schneidet (Intersection Test).

$$S_{\text{status}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Schnittpunkt existiert (Schatten)} \\ 0 & \text{wenn kein Schnittpunkt existiert (Sonne)} \end{cases} \quad (12)$$

Für eine differenzierte Betrachtung (z. B. 50% verschattet) wird die Fensterfläche in ein Raster aus Sub-Punkten unterteilt (Sampling). Der Verschattungsgrad F_s ergibt sich dann aus dem Verhältnis der verschatteten Punkte n_{schatten} zur Gesamtpunktzahl N :

$$F_s = \frac{n_{\text{schatten}}}{N} \quad (13)$$

Raytracing und Reflexionen

Während das Raycasting primär die binäre Sichtbarkeit (Schatten/Sonne) prüft, erweitert das **Raytracing** dieses Prinzip um die rekursive Verfolgung von Lichtstrahlen nach deren Interaktion mit Oberflächen.

Dies ist relevant für die Simulation von:

- **Spiegelungen:** Zusätzlicher Energieeintrag durch reflektierende Glasfassaden gegenüberliegender Gebäude.
- **Diffuse Streuung:** Aufhellung von Räumen durch helle Umgebungsflächen.

Für die Gebäudeautomation stellt echtes Raytracing jedoch eine Herausforderung dar:

1. **Rechenaufwand:** Die Komplexität steigt mit der Anzahl der „Bounces“ (Lichtsprünge) exponentiell an.
2. **Datenqualität:** Für eine „korrekte Berechnung sind physikalische Materialparameter (Reflexionsgrad, Rauheit) im gesamten 3D-Modell notwendig, die in der Praxis oft fehlen (siehe Kapitel ???).

Abgrenzung für diese Arbeit: ??? Da der primäre Energieeintrag durch direkte Solarstrahlung erfolgt und die Datengrundlage für Reflexionseigenschaften in Standard-IFC-Modellen oft unzureichend ist, fokussiert sich der entwickelte Prozess (Kapitel 4) auf das geometrische **Raycasting**. Reflexionen werden als sekundärer Einflussfaktor betrachtet und im Ausblick (Kapitel 6) diskutiert.

2.1.4 Klassifizierung steuerbarer Sonnenschutzsysteme

- Systeme mit einem Freiheitsgrad (z. B. Rollläden, Screens): Variable Position h (0-100%).
- Systeme mit zwei Freiheitsgraden (z. B. Raffstore/Jalousien): Variablen Position h und Lamellenwinkel λ .

- Relevanz für die Automation: Je komplexer das System, desto wichtiger ist die präzise Simulation des Winkels.

2.1.5 Bauphysikalische und lichttechnische Zielgrößen

- Sommerlicher Wärmeschutz (Energieeintrag minimieren).
- Visueller Komfort (Blendung vermeiden).
- Tageslichtautonomie (Kunstlicht minimieren).
- Konfliktpotenzial: Erläuterung der konkurrierenden Ziele (z. B. Blendschutz vs. Tageslicht) und warum eine dynamische Simulation hier besser ist als eine starre Regelung.

2.2 Dynamische Jahresverschattung

Die Rolle von Verschattungssystemen in der Gebäudeautomation. Das Zusammenspiel von Energieeffizienz und Nutzerkomfort.

Jahresverschattung

Die Jahresverschattung bezeichnet die zeitabhängige Veränderung der solaren Exposition auf der Gebäudehülle im Verlauf eines meteorologischen Jahres. Sie ist das Resultat der Interaktion zwischen dem dynamischen Sonnenstand, der Gebäudeorientierung sowie der umgebenden Bebauung und Vegetation. Im Kontext der Gebäudeautomation definiert sie die zeitlichen und räumlichen Randbedingungen, unter denen ein variabler Sonnenschutz agieren muss.

Die Jahresverschattungssimulation bezeichnet ein simulationsgestütztes Verfahren zur Analyse und Steuerung des solaren Energie- und Lichteintrags in ein Gebäude über den Zeitraum eines vollständigen meteorologischen Jahres. Im Gegensatz zu statischen Verschattungselementen oder reinen Echtzeit-Helligkeitsregelungen basiert sie auf der zeitabhängigen Interaktion zwischen dem astronomischen Sonnenstand, der Gebäudegeometrie sowie der umgebenden Bebauung. Ziel ist die Ermittlung optimaler Positionierungsstrategien für variable Sonnenschutzsysteme, um ein Gleichgewicht zwischen der Minimierung thermischer Lasten (sommerlicher Wärmeschutz), der Maximierung solarer Gewinne (winterlicher Heizbedarf) und der Gewährleistung des visuellen Komforts (Blendfreiheit bei maximaler Tageslichtnutzung) sicherzustellen.

2.3 Digitale Planungsmethoden (Datenformate?)

Wenn früher vor allem Papierpläne zum Datenkommunikationsaustausch im Planungsprozess verwendet wurden, gibt es mittlerweile eine Vielzahl an digitalen Möglichkeiten. Etabliert über die letzten Jahrzehnte, haben sich vor allem 2D-Grundrissdateien, die z.B. im proprietären Austauschformat dwg zwischen Architekten und Ingenieuren geteilt wurden. Während diese Methode heutzutage noch weite Anwendung findet, greifen die auf 3D-Modellen basierenden Austauschformate weiter um sich. Bereits einfache 3D-Modelle bieten große Vorteile bei der Verständlichkeit und Dichte der übermittelnden geometrischen Informationen. Zusätzlich ist es möglich im Rahmen eines BIM-Modells semantische Daten mit zu übermitteln. Das hierfür

benutzte Austauschformat IFC bietet wichtige Funktionalitäten, um für die Verschattungssimulation relevante Daten zu teilen.

2.4 Standards der Gebäudeautomation

2.4.1 GEG

Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG) § 14 Sommerlicher Wärmeschutz

(1) Ein Gebäude ist so zu errichten, dass der Sonneneintrag durch einen ausreichenden baulichen sommerlichen Wärmeschutz nach den anerkannten Regeln der Technik begrenzt wird. Bei der Ermittlung eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes nach den Absätzen 2 und 3 bleiben die öffentlich-rechtlichen Vorschriften über die erforderliche Tageslichtversorgung unberührt. (2) Ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz nach Absatz 1 liegt vor, wenn die Anforderungen nach DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8 eingehalten werden und die rechnerisch ermittelten Werte des Sonnenenergieeintrags über transparente Bauteile in Gebäude (Sonneneintragskennwert) die in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.3.3 festgelegten Anforderungswerte nicht überschreiten. Der Sonneneintragskennwert des zu errichtenden Gebäudes ist nach dem in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.3.2 genannten Verfahren zu bestimmen. (3) Ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz nach Absatz 1 liegt auch vor, wenn mit einem Berechnungsverfahren nach DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.4 (Simulationsrechnung) gezeigt werden kann, dass unter den dort genannten Randbedingungen die für den Standort des Gebäudes in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.4 Tabelle 9 angegebenen Übertemperatur-Gradstunden nicht überschritten werden. (4) Wird bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung die Berechnung nach Absatz 3 durchgeführt, sind bauliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 4.3 insoweit vorzusehen, wie sich die Investitionen für diese baulichen Maßnahmen innerhalb deren üblicher Nutzungsdauer durch die Einsparung von Energie zur Kühlung unter Zugrundelegung der im Gebäude installierten Anlagen zur Kühlung erwirtschaften lassen. (5) Auf Berechnungen nach den Absätzen 2 bis 4 kann unter den Voraussetzungen des Abschnitts 8.2.2 der DIN 4108-2: 2013-02 verzichtet werden.

2.4.2 DIN V 18599

hier bezug auf die automatisierungsgrade nehmen

2.4.3 VDI 6011-1

2.4.4 DIN EN 17037

2.4.5 Weitere Normen

DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung

Relevanz: Diese Norm ist der Standard für die Bewertung des thermischen Komforts.

Kernpunkte: Sie definiert Indizes wie den PMV (Predicted Mean Vote) und den PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), um die thermische Behaglichkeit zu quantifizieren. Die Jahresverschattung hat einen direkten Einfluss darauf, indem sie den Strahlungseintrag durch die Sonne und damit die operative Temperatur im Raum steuert.

DIN EN 14501: Abschlüsse und Jalousien - Thermischer und visueller Komfort - Leistungs- und Klassifizierungseigenschaften

Relevanz: Dies ist die wichtigste Produktnorm für Sonnenschutz. Sie definiert, wie die Leistung von Jalousien, Rollläden etc. gemessen und in Leistungsklassen eingeteilt wird.

Kernpunkte: Sie klassifiziert Produkte anhand von Kennwerten wie:

Thermischer Komfort: Energiedurchlassgrad (g-Wert), der angibt, wie viel Sonnenenergie durch das Fenster-Sonnenschutz-System ins Rauminnere gelangt.

Visueller Komfort: Lichttransmissionsgrad (τ_v), Blendschutz (Klassen 0-4), Sichtverbindung nach draußen. Die Datenblätter von Herstellern wie Warema, Somfy etc. basieren auf den Messverfahren dieser Norm.

Anforderungsanalyse und Konzeption des Integrationsprozesses

3.1 Analyse der Ausgangssituation und Zieldefinition

- **Defizite konventioneller Verschattungsstrategien:** Analyse der Einschränkungen heutiger Systeme, insbesondere die fehlende Berücksichtigung von Fremdverschattung durch Nachbargebäude.
- **Anforderungsprofil an das Gesamtsystem:** Definition funktionaler Anforderungen (wie Präzision und Grad der Automatisierbarkeit) sowie nicht-funktionaler Anforderungen (Recheneffizienz und Systemkompatibilität).

3.2 Spezifikation der Datengrundlage (Input)

3.2.1 Analyse der BIM-Datengüte (IFC):

Untersuchung der vorhandenen geometrischen Informationen und Identifikation fehlender Attribute, die für eine valide Simulation zwingend erforderlich sind.

- Gebäudedaten (ifc) sollte haben:
 - richtige labels für gebäudeteile (IFC-Window-Klasse)
 - Nur Fassadenelemente
 - Die Fensterflächen sollten richtig *Face Normals* (Flächenausrichtung)? für backwards Culling
 - Auch schräge Fenster sollten als IFC-Window-Klasse definiert werden
 - Das Gebäude sollte in der ifc-Datei bereits auf der richtigen Z-Höhe und nach Norden ausgerichtet sein
 - Die Fenster sollten Anlagenkennzeichnungsschlüssel (AKS) besitzen, der nach dem Schalenmodell [6] aufgebaut ist.

3.2.2 Analyse externer Geodaten

Die Qualität der Daten der umgebenden Gebäude, Topografie und Vegetation bestimmt die Genauigkeit der Verschattungssimulation maßgeblich. Ungenaue Gebäudekanten oder fehlende Dachaufbauten in der Nachbarbebauung führen zwangsläufig zu fehlerhaften Schlag Schatten auf der betrachteten Fassade. Meistens werden diese Datensätze in georeferenzierten Koordinatensystemen (z. B. UTM oder Gauß-Krüger) bereitgestellt, was eine Transformation in das lokale System des Gebäudemodells (BIM) erfordert.

Die Auswahl des geeigneten Datenanbieters für das Referenzprojekt erfolgt anhand folgender Kriterien:

- **Verfügbarkeit und Abdeckung:** Zunächst muss geprüft werden, welcher Anbieter Daten für den spezifischen Standort in der erforderlichen Dichte bereitstellt. Während globale Anbieter oft flächendeckende, aber detailarme Daten liefern, bieten kommunale Geoportale

(z. B. Katasterämter) oft präzisere Datensätze an. Zu beachten sind hierbei lizenzrechtliche und technische Einschränkungen: So sind beispielsweise die photogrammetrischen 3D-Tiles der Google Maps Platform in der EU derzeit nur eingeschränkt für Simulationszwecke nutzbar [7].

- **Level of Detail (LOD):** Der Detaillierungsgrad der Gebäudegeometrie ist der kritischste Parameter für die Simulation. Gemäß dem Standard der *Open Geospatial Consortium (OGC)* für CityGML unterscheidet man:
 - **LOD1 (Blockmodell):** Das Gebäude wird als einfacher Kubus mit Flachdach dargestellt (Extrusion der Grundfläche). Dies ist für weit entfernte Verschattungsobjekte ausreichend, führt aber im Nahbereich zu Fehlern, da die tatsächliche Dachform ignoriert wird.
 - **LOD2 (Dachmodell):** Das Modell beinhaltet standardisierte Dachformen und grobe Dachaufbauten. Für die Verschattungssimulation stellt LOD 2 oft den optimalen Kompromiss aus Genauigkeit und Dateigröße dar, da die Schattenlänge durch die Dachfirsthöhe maßgeblich beeinflusst wird [8].
 - **LOD3 (3D Mesh)** Detaillierte Gebäudehüllen werden mit Auskragungen, Fensterlaibungen und Texturen modelliert. LOD3 bietet eine sehr hohe Genauigkeit, die jedoch einen negativen Einfluss auf die spätere Rechenleistung hat.

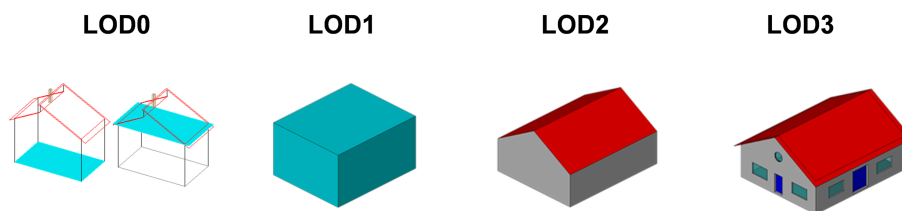


Abbildung 2 — LOD 1-3 [9]

- **Datenformat und Interoperabilität:** Für den Import in die Simulationsumgebung (Blender) ist das Format entscheidend.
 - *Semantische Formate:* **CityGML** oder **CityJSON** enthalten neben der Geometrie auch Attribute (Baujahr, Nutzung). Sie müssen jedoch oft erst geparkt (konvertiert) werden.
 - *Geometrische Formate:* **.obj**, **.gltf** oder **.fbx** enthalten reine 3D-Meshes. Diese lassen sich direkt und performant verarbeiten, verlieren aber oft den geodätischen Bezug.
- **Aktualität:** Die Daten müssen den aktuellen baulichen Bestand widerspiegeln. Insbesondere in dynamischen innerstädtischen Lagen (wie im Referenzprojekt Frankfurt) können veraltete Datensätze dazu führen, dass neu errichtete Hochhäuser in der Simulation fehlen und somit der Schattenwurf unterschätzt wird.
- **Kostenstruktur:** Es ist zwischen kostenpflichtigen kommerziellen Daten und Open-Data-Initiativen zu unterscheiden. Viele Bundesländer (darunter Hessen und NRW) stellen ihre 3D-Gebäudemodelle mittlerweile kostenfrei über Open-Data-Portale zur Verfügung, was die wirtschaftliche Hürde für die Integration in die Gebäudeautomation eliminiert.

überlegung zur auswahl der scene

- Gebäude im Norden vom Gebäude müssen nicht geladen werden, da sie nicht das Gebäude verschatten können
- bei sehr tiefliegender Sonne sind auch weit entfernte Gebäude relevant

- niedrige gebäude sind nur für die niedrigen etagen interessant (vielleicht simulationen so aufsplitten?)

3.2.3 Georeferenzierung und Zeitbasis

Definition der Anforderungen an die räumliche und zeitliche Einordnung, inklusive Koordinatensystemen und dem Handling von Zeitzonen.

3.3 Konzeption der Simulationslogik (Processing)

- **Methodenauswahl:** Begründung des gewählten geometrischen Raycasting-Verfahrens gegenüber alternativen Ansätzen wie Radiosity oder rein thermischen Simulationen.
- **Diskretisierungsstrategie:** Festlegung der zeitlichen Auflösung (Schrittweite der Jahres-simulation) sowie der räumlichen Abtastung (Sampling-Raster) der Fensterflächen zur Ermittlung von Teilverschattungen.

3.4 Definition der Systemarchitektur und Schnittstellen (Output)

- **Workflow-Design:** Erstellung einer schematischen Darstellung des gesamten Datenflusses, ausgehend von der digitalen Planung bis hin zur Ansteuerung der Aktoren.
- **Datenschnittstelle zur Automation:** Spezifikation des Exportformats (z. B. CSV-Struktur) und Festlegung der zu übergebenden Steuergrößen wie Verschattungsgrad und Status.
- **Mapping-Konzept:** Entwicklung einer Logik zur Verknüpfung der Simulationsergebnisse mit den physischen Datenpunkten der Gebäudeautomation (beispielsweise BACnet-Objekt-IDs).

Implementierung und Validierung des Proof of Concept 4

Das FOUR sind vier zusammenhängende Türme in der Innenstadt von Frankfurt am Main.

4.1 Import Umgebungsdaten

Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation

4.2 Import IFC

Da die oben genannten Punkte zum Teil nicht erfüllt werden, musste beim Import der FOUR-IFC-Datei noch folgendes gemacht werden:

-

4.3 Positionierung der IFC im Modell

Problem der Georeferenzierung. Ungenauigkeit. Vertex Snapping

- Schwierig höhe z richtig zu bekommen
- Bereinigung von Redundanzen im Kontextmodell (Bestehendes Gebäude aus OSM löschen)

4.4 Die eigentliche Simulation

Entweder mit Simulation im Hintergrund (anscheinend kaputt) oder mit Mathe Simulation
Mathe simulation mit Algorithmus zur Sonnenstandsberechnung nach NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

4.4.1 Zeitlicher Umfang und Auflösung

Zeitlicher Umfang: Es stellt sich die Frage, wie viele volle Kalenderjahre berechnet werden müssen, um den realen Sonnenverlauf hinreichend abzubilden. Der Umlauf der Erde um die Sonne unterliegt langperiodischen Schwankungen (Milanković-Zyklen) [10]. Diese sind für die Lebensdauer eines Gebäudes als nicht relevant anzusehen, weshalb der berechnete Sonnenverlauf für den Betrachtungszeitraum als statisch betrachtet werden kann.

Da das kalendarische Jahr vom astronomischen Sonnenjahr (ca. 365,24 Tage [11]) abweicht, wird diese Differenz alle vier Jahre durch ein Schaltjahr korrigiert. Die hieraus resultierende zeitliche Verschiebung des Sonnenstandes am selben Kalendertag ist für einen simulierten Schattenwurf in Abbildung 3 dargestellt. Da es sich bei den räumlichen Abweichungen lediglich um wenige Zentimeter handelt, ist es ausreichend, die Simulation auf ein einzelnes Referenzjahr zu beschränken.

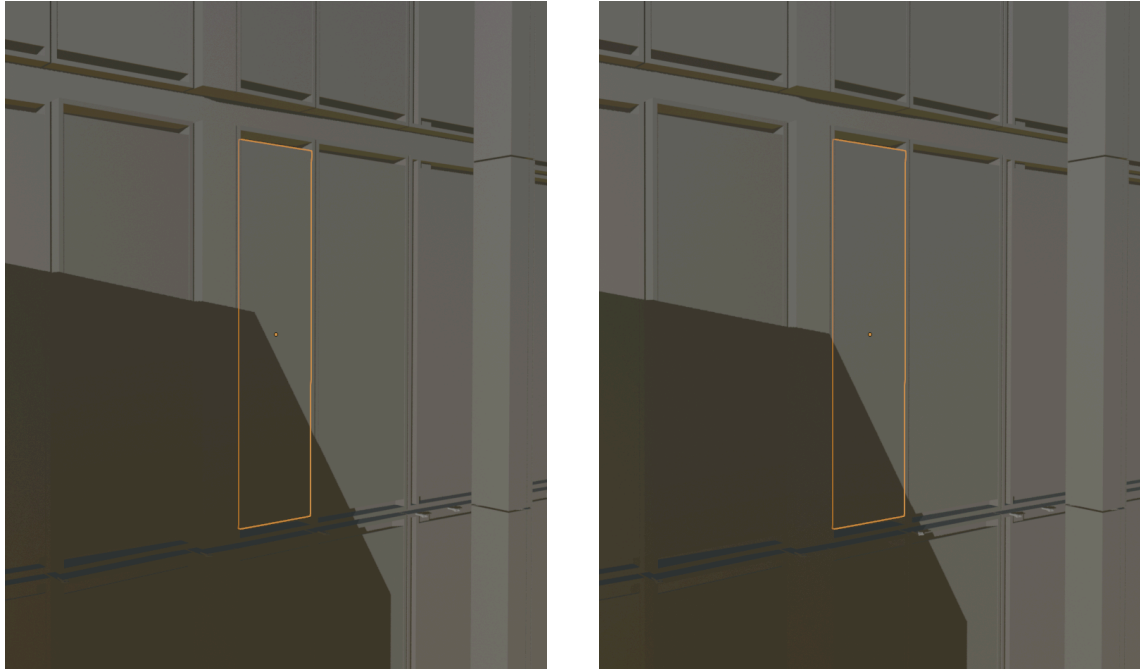
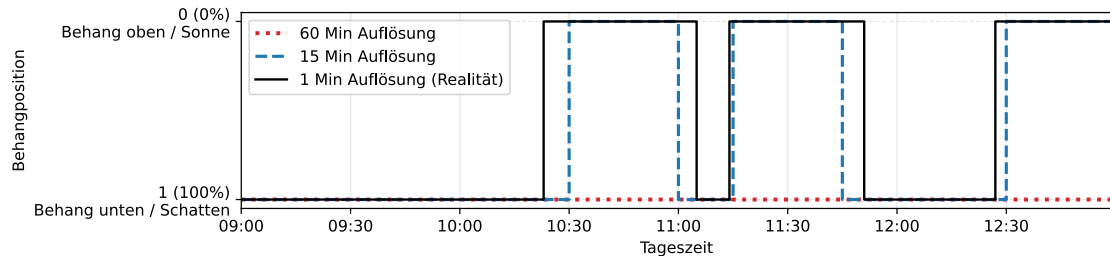


Abbildung 3 — Links: Schattenwurf am 01.03.2027 um 9:00;
Rechts: Schattenwurf am 01.03.2028 (Schaltjahr) um 9:00

Zeitliche Auflösung Für die Simulation wurde eine 15-Minütige Auflösung gewählt. Eine höhere Auflösung garantiert für den Nutzer einen geringfügig höheren Komfort indem in manchen Fällen erst später Verschattet werden würde



Zeitliche Auflösung: Die Wahl der Diskretisierungsschrittweite für die Datenausgabe hat maßgeblichen Einfluss auf die Tageslichtautonomie des Gebäudes. Da die Verschattung eine binäre Steuerungsfreigabe (Schatten oder Sonne) für den Blendschutz darstellt, muss bei einer Reduktion der Datenauflösung zwingend eine Worst-Case-Annahme getroffen werden: Fällt innerhalb eines Simulationsintervalls auch nur für eine Minute ein Schlagschatten auf das Fenster, muss der Sonnenschutz für das gesamte Intervall geschlossen werden, um temporäre Blendung auszuschließen.

fig-zeitliche-aufloesung veranschaulicht diesen Effekt am Beispiel echter Simulationsdaten eines Referenzfensters. In der Realität (1-Minuten-Auflösung) verlässt der Schatten das Fenster um 10:23 Uhr. Bei einer groben stündlichen Diskretisierung (60 Minuten) hält die Automationsstation den Behang jedoch unnötigerweise bis 11:00 Uhr geschlossen, was zu 37 Minuten Verlust an natürlichem Tageslicht führt.

Besonders gravierend wirkt sich eine zu grobe Abtastung bei kurzen Verschattungsereignissen aus, wie sie durch schmale Bauteile (z. B. Masten oder Schornsteine der Nachbarbebauung)

entstehen. Die reale Verschattung von 11:05 bis 11:14 Uhr zwingt das System im 60-Minuten-Raster dazu, den Behang von 11:00 bis 12:00 Uhr zu schließen.

Eine Diskretisierung im 15-Minuten-Raster erweist sich hierbei als optimaler Kompromiss. Einerseits nähert sich die Steuerkurve dem realen Schattenverlauf ausreichend exakt an, um den visuellen Komfort bei hoher Tageslichtautonomie zu wahren. Andererseits entspricht dieses Intervall der in der Gebäudeautomation (BACnet) üblichen Taktung für Zeitpläne (Schedules) und begrenzt die zu speichernde Datenmenge in der SPS auf speichereffiziente 35.040 Datenpunkte pro Jahr (bei einem booleschen Wert pro Fenster).

4.4.2 Überlegung zur räumlichen Auflösung

4.4.3 Möglichkeiten der Simulationsoptimierung

- Ohne Optimierung (760s)
- Zusammenfügen von umliegenden Objekten 786s (Optimierungspotenzial bei $-3,4\%$)
- löschen von 80% der kleinen Häuser 764s
- Mathe-Skript 793s
- Mathe Skript mit Normalenoptimierung: 408s
- „+Winkel: 434s

4.5 Validierung der Ergebnisse

- Über webcam (installiert auf dem nexttower (137m hoch) am Thurn-und-Taxis-Platz 21.06.25; 9:15
 - das validiert vor allem auch den mathematischen code im skript
- Vorort mit Helligkeitssensoren in Fenstern? - Optional, wenn noch zeit ist

Integration in die Gebäudeautomation 5

In diesem Kapitel wird das Konzept zur technischen Überführung der Simulationsergebnisse in die operative Steuerungsebene dargelegt. Ziel ist es, die in Kapitel 4 generierten Datenströme so aufzubereiten und zu übertragen, dass sie von Standard-Automationsstationen verarbeitet werden können.

5.1 Datenstruktur und Schnittstellendefinition

- **Generierung maschinenlesbarer Formate:** Festlegung der Exportparameter zur Erzeugung von CSV- oder JSON-Dateien, die eine effiziente Parsbarkeit auf ressourcenbeschränkten Automationsstationen (SPS) ermöglichen.
- **Mapping von Simulations-IDs auf BACnet-Objekte:** Entwicklung einer Zuordnungsmatrix, um die im Modell verwendeten Fenster-IDs eindeutig mit den entsprechenden BACnet-Objektinstanzen (z. B. **Analog Output** für den Verschattungsgrad) zu verknüpfen.

5.2 Kommunikationsarchitektur und Datenübertragung

- **Konzepte zum Datei-Import auf DDC-Ebene:** Untersuchung verschiedener Übertragungswege wie der lokale Import via SD-Karte oder die automatisierte Bereitstellung mittels FTP/SFTP direkt in das Dateisystem der Automationsstation.
- **Konnektivität und Cloud-Anbindung:** Diskussion moderner IoT-Schnittstellen (wie MQTT oder REST-API) für eine dynamische Datenaktualisierung in Cloud-basierten Managementsystemen.

5.3 Steuerungsstrategie und Funktionslogik

- **Entwurf eines Funktionsbausteins:** Konzeption der Programmlogik (z. B. in Anlehnung an IEC 61131-3) zum zyklischen Auslesen und Interpretieren der tabellarischen Verschattungsdaten.
- Die geometrische Simulation dient lediglich als Freigabe- oder Blockade-Bedingung (Enable/Disable)
- **Fallback-Strategien und Übersteuerung:** Definition von Sicherheitslogiken bei Datenverlust (z. B. Rückfall auf lokale Helligkeitssensoren) sowie Regelungen zur Priorisierung manueller Benutzereingaben gegenüber den Simulationsvorgaben.

Diskussion und Fazit

6

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.2 Grenzen des entwickelten Prozesses

6.3 Ausblick

6.4 KI-Disclaimer

- Gemini 2.5 Pro Deep Research: Recherche für Marktanalyse; Vorschläge für Technologiestack der Anwendung
- Gemini 3.0 Pro: Sparringpartner, Recherche, Entwicklung der Forschungsfrage, Generierung von Ideen
- Perplexity AI: Recherche zu Normen und technischen Grundlagen

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die endgültige Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit, die kritische Reflexion und die Interpretation der Ergebnisse beim Autor/der Autorin dieser Arbeit liegt.

Die KI diene lediglich als Werkzeug und nicht als Ersatz für das kritische und analytische Denken des Forschenden.

A Literatur

- [1] V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*, 13., updated edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2025. doi: 10.3139/9783446484665.
- [2] J. A. Duffie und W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Aufl. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] „Tageslicht in Gebäuden“, Nr. DIN EN 17037. Mai 2022.
- [4] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, 2nd Aufl. Richmond, Virginia: Willmann-Bell, 1998.
- [5] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), „General Solar Position Calculations“, technical report, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF>
- [6] „Gebäudeautomation (GA) - Grundlagen“, Nr. VDI 3814 Blatt 1. Januar 2019.
- [7] Google, „Map Tiles API adjustments for European Economic Area (EEA) customers | Google Maps Platform | Google for Developers — developers.google.com“. 2025.
- [8] H. V. für Bodenmanagement und Geoinformation, „Dreidimensionale Gebäudeinformationen“.
- [9] O. G. Consortium, „OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard — docs.ogc.org“. 2022.
- [10] D. Wetterdienst, „Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Thema des Tages - Die Milankovič-Zyklen — dwd.de“. 2024.
- [11] O. of Astronomy for Education, „IAU Office of Astronomy for Education — astro4edu.org“.

B Glossar

AKS – Anlagenkennzeichnungsschlüssel 11

g-Wert – Energiedurchlassgrad 10

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Integration dynamischer Verschattungssimulationen in die Gebäudeautomation

enthält unternehmensinterne bzw. vertrauliche Informationen der Schneider Electric GmbH, ist deshalb mit einem Sperrvermerk versehen und wird ausschließlich zu Prüfungszwecken im Studiengang Gebäudeautomation der FH Münster - University of Applied Sciences vorgelegt.

Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungsprozesses und des Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anders lautende Genehmigung der Ausbildungsstätte (Schneider Electric GmbH) vorliegt.

Berlin 24.02.2026

Niklas Wittkämper

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Berlin 24.02.2026

Niklas Wittkämper