

Nachhaltigkeitsbewertungen durch IoT-gestützte Auswertung von Nutzerverhalten im Rahmen des as-used BIM

Maximilian Gehring¹  and Yunqing Luo¹

¹Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, Franziska-Braun-Straße 15, 64287 Darmstadt, Germany
E-mail(s): gehring@iib.tu-darmstadt.de

Abstract: Gebäude stellen einen wesentlichen Teil des weltweiten Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen dar, insbesondere während ihres Betriebs. Zur Beurteilung ihrer Nachhaltigkeit und Energieeffizienz werden verschiedene Verfahren wie das ESG-Rating angewendet, vor allem im Kontext des Asset Managements großer Gebäudeportfolios. Während der Planung wird der Energiebedarf eines Gebäudes geschätzt. Da viele Gebäude ineffizient betrieben werden, ist es von großem Interesse anhand des tatsächlichen Nutzerverhaltens eine genauere Bewertung der Nachhaltigkeit zu ermöglichen. Diese Forschung wird durch den vermehrten Einsatz von IoT-Technologie unterstützt, die eine Echtzeitdatenerfassung ermöglicht. Die Integration des Building Information Model (BIM) und IoT birgt jedoch technische und datenschutzrechtliche Herausforderungen. Besonders während der Betriebsphase bleiben Daten oft isoliert und können nicht nahtlos zwischen verschiedenen Systemen ausgetauscht werden. In diesem Kontext wird ein Konzept entwickelt, das darauf abzielt die Gebäudenachhaltigkeit basierend auf dem Nutzerverhalten innerhalb von BIM unter Verwendung von IoT-Sensordaten zu bewerten. Durch eine praktische Anwendung wird dieses Konzept veranschaulicht und trägt zur weiteren Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden bei.

Keywords: IoT, as-used BIM, Nachhaltigkeitsbewertung



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13490
© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

1 Einleitung

Mit der Corporate Sustainability Reporting Directive der EU sind ab 2025 Unternehmen verpflichtet neben der finanziellen Berichterstattung auch eine umfassende nichtfinanzielle Berichterstattung zu erstellen [1]. Durch diese Berichterstattung wird der Einfluss des unternehmerischen Handelns auf die Umwelt und die Gesellschaft beschrieben. Die Forderung nach einer solchen Berichterstattung spiegelt das steigende Interesse von Investoren und der Gesellschaft an sozialem Wohlergehen und der Umweltverträglichkeit des allgemeinen Handelns wider. Das gestiegene Interesse lässt sich auch auf Gebäude übertragen. So sind laut der Internationalen Energieagentur (IEA) Gebäude für 36 % des weltweiten Endenergieverbrauchs und fast 30-40 % der Kohlendioxidemissionen (CO₂)

verantwortlich [2]. Dabei fallen 66 % der Emissionen in der Betriebsphase des Lebenszyklus eines Gebäudes an, wodurch sie erheblich zum Klimawandel beitragen. Die Daten für die Berechnung des Energiebedarfs eines Gebäudes stammen i.d.R. aus der Planungsphase. 70 % der Gebäude werden jedoch nicht effizient betrieben [3]. Zusätzlich können sich Änderungen der Nutzung im Lebenszyklus eines Gebäudes auf den Energieverbrauch auswirken. Daher ist es wichtig zu untersuchen, wie anhand des tatsächlichen Nutzerverhaltens eine Nachhaltigkeitsbewertung genauer bestimmt werden kann. In diesem Zusammenhang wurde z.B. in der nationalen Verordnung des Vereinigten Königreichs über die Gesamtenergieeffizienz und die Kohlenstoffbilanzierung mehr Konsistenz der Gebäudeinformationen gefordert, um das CO₂-Emissionsziel zu erreichen [4].

Die manuelle Überwachung und Verwaltung des Energieverbrauchs kann ein zeitaufwändiger und fehleranfälliger Prozess sein. Aus diesem Grund wird die IoT-Technologie zunehmend eingesetzt, um Energieverbrauchs- und Nutzungsdaten eines Gebäudes in Echtzeit zu erfassen. Internet of Things (IoT) bezieht sich auf die Ausstattung alltäglicher physischer Objekte mit Informations- und Kommunikationstechnologien, sodass diese in ein Netzwerk integriert werden können [5]. Dabei besteht die Herausforderung die Sensordaten sinnvoll für das Gebäudemanagement aufzubereiten. In diesem Paper wird daher die Verknüpfung der Sensordaten mit Informationen aus dem Building Information Model (BIM) zu einer nachvollziehbaren und steuerbaren Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt.

2 Grundlagen

2.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Nachhaltigkeitsbewertungen zielen darauf ab die Entwicklung der Gesellschaft zu beeinflussen. Dabei können unterschiedliche Aspekte der gesellschaftlichen Entwicklung betrachtet werden. Die Entwicklung von Technik trägt häufig zur Entstehung von Problemen bei, kann aber auch helfen diese zu lösen. Daraus resultiert die Motivation von Nachhaltigkeitsbetrachtungen und -bewertungen, um positive wie auch problematische Entwicklungen aufzuzeigen. So werden politische Entscheider sowie Individuen bei Investitionsentscheidungen bei der Betrachtung der Nachhaltigkeit eines Objektes (Unternehmen, Gebäude, Produkt) unterstützt [6]. In der Praxis gibt es diverse nationale und europäische Gesetze (z.B. EU-Taxonomie oder Lieferkettensorgfaltspflichtgesetz), die die Anwendung einer Nachhaltigkeitsbewertung vorschreiben. Ein bekanntes Verfahren ist das ESG-Rating. ESG steht für »Environmental, Social, Governance« und meint die Untersuchung der Nachhaltigkeit eines Objektes in den genannten Bereichen. Im Bereich Umwelt werden verschiedene Faktoren zur Nachhaltigkeitsbetrachtung herangezogen, u.a. Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und -effizienz, Abfallerzeugung und -bewirtschaftung. [7].

Ein wichtiger Faktor, auf dem in diesem Paper der Fokus liegt, ist die Betrachtung der Treibhausgasemissionen. Im Rahmen der CO₂-Bilanzierung wird dazu die Auswirkung verschiedener Treibhausgase (wie Methan, Distickstoffoxid und andere) auf den Klimawandel analysiert. Dazu wird die Auswirkung einer spezifischen Emission auf eine äquivalente Menge Kohlendioxid (CO₂) nach Volumen normiert und so mit Emissionen anderer Objekte vergleichbar gemacht [8]. In Deutschland stellt

das Umweltbundesamt mit ProBas [9] eine Datenbank zur Verfügung, die diese Informationen zu Treibhausgasemissionen beinhaltet. So findet man dort Daten zu den CO₂-Äquivalenten, die zur Herstellung eines Materials wie Aluminium, eines Lebensmittels wie Milch oder die Fahrt mit einem Pkw benötigt werden.

2.2 Bestehende Ansätze BIM und IoT Integration

Die aktuelle Forschung beschäftigt sich mit Ansätzen zur effizienten Steuerung von Gebäuden durch die Integration von IoT-Sensoren und -Geräten. So kann bspw. die Heizung und Lüftung automatisiert [10], die Beleuchtung intelligent gesteuert [11] oder die Anwesenheit erfasst und der Raumkomfort optimiert werden [12]. Die Bedienung solcher Gebäudesysteme ist durch den fehlenden räumlichen Kontext jedoch nicht intuitiv. Daher wird die Nutzung von BIM für das Management von intelligenten Gebäuden vorgeschlagen. Dadurch wird ein räumlicher Kontext für die Funktionsweise des Systems geschaffen und eine bessere Koordinierung und Steuerung von IoT-Sensoren und -Geräten ermöglicht [13]. Bei der Integration von BIM und IoT gibt es zwei Datenquellen zu berücksichtigen:

1. BIM dient als Datenbank für die Speicherung von Kontextinformationen, zu denen in erster Linie die Gebäudegeometrie, Beschreibungen von IoT-Geräten, statische Informationen und andere funktionale Gebäudedetails wie Raumzuweisungen, Wetterinformationen, Preise, Belegungsraten usw. gehören. Die kontextuellen Informationen können entweder in einem proprietären Modellformat oder im offenen IFC-Format gespeichert werden.
2. Von Sensoren gesammelte Zeitreihendaten, die in der Regel in einer separaten relationalen Datenbank gespeichert werden und mit Hilfe der Structured Query Language (SQL) effektiv abgefragt werden können.

Die Herausforderung besteht darin diese beiden Datenquellen sinnvoll miteinander zu verknüpfen. Im folgenden sind bestehende Ansätze aufgelistet:

Tabelle 1: Bestehende Ansätze zur Verknüpfung von BIM und IoT

Technischer Ansatz	Beschreibung	Literatur
Verknüpfung zweier Datenbanken	Übertragung der Daten aus dem BIM in eine (relationale) Datenbank mithilfe einer API (z.B. Revit DB Link) und Verknüpfung der Sensordaten und der BIM-Daten mithilfe eines vorher definierten Datenschemas.	[14]
Abfragesprache für BIM bzw. IFC Datenschema	Entwicklung einer eigenen Abfragesprache, um Daten direkt aus dem BIM, welches z.B. im IFC-Format vorliegt, abfragen zu können.	[15]
Nutzung von Semantic Web Technologien	Die Daten werden mittels Ontologien z.B. Resource Description Framework (RDF) und Onto-Sensor verknüpft. Dazu müssen die Daten zunächst entsprechend umgewandelt werden. Mit einer Abfragesprache (z.B. SPARQL) können die verknüpften Daten ausgelesen werden.	[16], [17]

Ebenso gibt es bereits proprietäre Lösungen, die es ermöglichen Sensordaten in die BIM-Modelle der dazugehörigen proprietären Autorensoftware zu integrieren. Ein Beispiel dafür ist Autodesk Tandem [18].

3 Nutzerbasierte Nachhaltigkeitsbewertung

3.1 Entwickeltes Konzept

Für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden soll das tatsächliche Nutzerverhalten verwendet werden. Dazu wird das Nutzerverhalten von IoT-Sensoren erfasst und anschließend mithilfe von gebäudebezogenen Informationen aus dem BIM die Nachhaltigkeitsbewertung angepasst. In diesem Paper wird beispielhaft die Auswirkung des Nutzerverhaltens auf die Treibhausgasemissionen durch die Heizung betrachtet. Dazu wird Sensorik, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Gebäude misst, verwendet. Die Sensordaten werden dazu in eine NoSQL-Datenbank eingelesen und räumlich verortet (siehe Abbildung 1). Eine »Not Only SQL«-Datenbank (NoSQL) folgt einem nicht-relationalen Ansatz und benötigt daher keine festgelegten Tabellenschemata.

Bei der Berechnung des Wärmeenergiebedarfs eines spezifischen Raumes nach der DIN V 18599 wird die Differenz aus Außentemperatur und die standardisierte Raumsolltemperatur verwendet. Durch die Nutzung der erfassten Temperaturdaten kann somit eine nutzungsorientierte Berechnung des Wärmeenergiebedarfs erfolgen. Basierend auf dem Energiebedarf können anschließend mit einem heizungsspezifischen Emissionsfaktor die Emissionswerte für die Nachhaltigkeitsermittlung festgestellt werden.

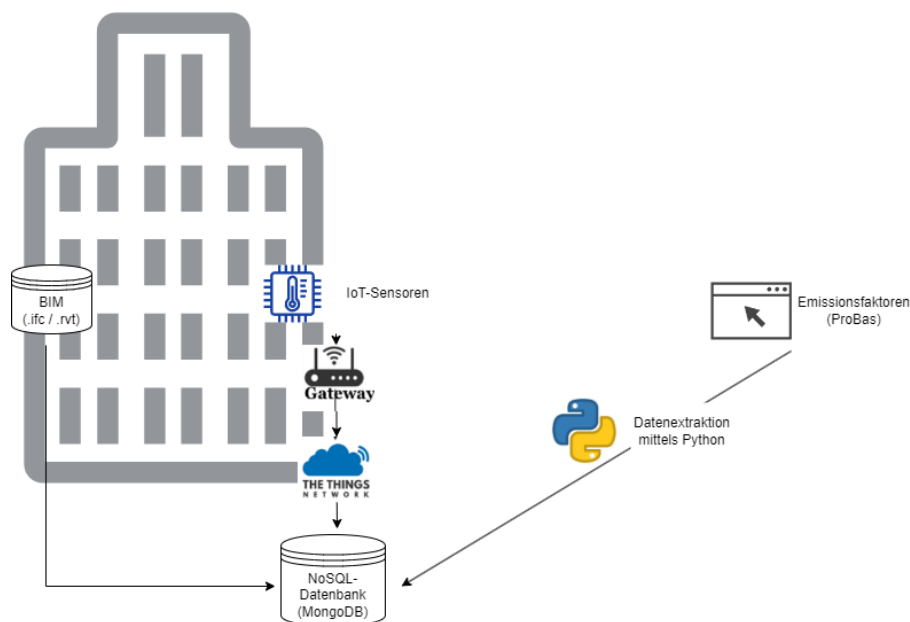


Abbildung 1: Konzept zur IoT-BIM Integration

Um den Wärmeenergiebedarf eines Raumes während der Betriebsphase zu berechnen, müssen folgende Informationen aus dem BIM extrahiert werden: Raumspezifische Details für jedes Stockwerk, einschließlich Raumnamen, eindeutige IDs, Raumfläche, Volumen und Komponenten der Raumhülle.

Zur Raumbühle gehören weiterhin die Fläche, das Volumen, die Materialien und die Dicke (für die Berechnung der U-Werte) von Wänden, Türen, Fenstern, Böden und Decken. Darüber hinaus ist es wichtig festzustellen, welche Räume eine Außenhülle haben und über Fenster verfügen. Diese Eigenschaften werden für die Berechnung der solaren Gewinne sowie den Wärmeverlust durch Lüftung und durch die Gebäudehülle benötigt. Die genannten Daten sind bereits im BIM vorhanden und werden mithilfe der proprietären Autorensoftware ausgelesen und ebenfalls in der NoSQL-Datenbank gespeichert.

Basierend auf den hinterlegten Daten können die Treibhausgasemissionen des aktuellen Heizverhaltens ermittelt und als Grundlage für eine angepasste Nachhaltigkeitsbewertung verwendet werden. Dazu werden Emissionsfaktoren aus Internetquellen importiert und ebenfalls in der NoSQL-Datenbank gespeichert.

3.2 Demonstrative Umsetzung

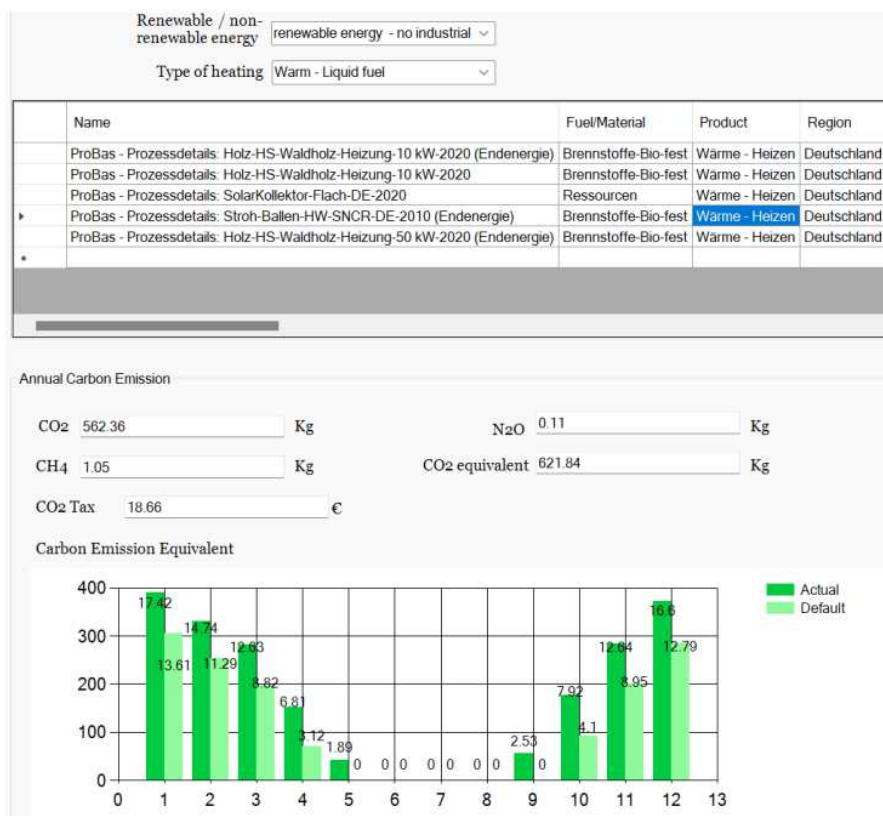


Abbildung 2: Grafische Nutzeroberfläche des Demonstrators

Um die technische Umsetzbarkeit nachzuweisen, wurde ein Demonstratorsystem entwickelt. Das Nutzerverhalten wird durch Temperatursensoren erfasst. Die Sensoren sind an einen Mikrocontroller vom Typ »Arduino Nano« mit LoRa-Modul angeschlossen. Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) ist ein stark verbreitetes Low Power Wide Area Network (LPWAN) zur Unterstützung von IoT-Geräten und -Diensten und ermöglicht den Transfer von kleinen Datenpaketen über große Reichweiten und mit geringem Energiebedarf im Vergleich zu Bluetooth oder Wi-Fi [19]. Daher eignet es sich zur Übertragung der Daten von IoT-Sensoren ohne Netzanschluss. Über den LoRaWAN Netzwerkserver

»The Things Stack« ist es möglich die Sensordaten zu empfangen und mittels »Message Queuing Telemetry Transport«-Protokoll (MQTT) an die eingesetzte Datenbank zu übergeben.

Da die eingesetzte NoSQL-Datenbank in der Lage sein muss sowohl die Gebäudedaten als auch die Zeitreihendaten effizient zu verwalten, wurde für die demonstrative Umsetzung MongoDB gewählt [20]. Mit einem Python-Skript wurden dort zusätzlich die Außentemperaturen aus der Online-Schnittstelle »Open Meteo« [21] und Emissionsfaktoren aus der Online-Datenbank ProBas [9] importiert.

Für die Autorensoftware Autodesk Revit [22] wurde ein Add-in programmiert. Mit dem Add-in werden die Gebäudedaten in die MongoDB übertragen sowie die Emissionswerte berechnet und visualisiert. Über die Benutzeroberfläche des Add-ins wird die Zuordnung der Sensoren zu Räumen ermöglicht und die tatsächlichen Emissionswerte werden den Emissionswerten, die sich aus dem Heizbedarf nach DIN-Norm (DIN V 18599) ergeben, gegenübergestellt (siehe Abbildung 2).

4 Fazit und Ausblick

Dieses Paper beleuchtet die Integration von IoT-Technologie und dem Building Information Model (BIM) zur Verbesserung der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden. Angesichts der steigenden Anforderungen an Unternehmen sowohl finanzielle als auch nicht-finanzielle Berichte zu erstellen, gewinnt die präzise Erfassung und Analyse des Energieverbrauchs in Gebäuden an Bedeutung.

Durch die demonstrative Umsetzung mit einem LoRaWAN-basierten Sensornetzwerk und der Verknüpfung dieser Daten mit einem BIM wird gezeigt, wie das Heizverhalten der Nutzer erfasst und analysiert werden kann. Mit diesen Informationen können Gebäudemanager und -betreiber fundierte Entscheidungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit ihrer Gebäude treffen. Insgesamt bietet die Integration von IoT und BIM eine vielversprechende Methode zur Optimierung des Gebäudemanagements und zur Förderung nachhaltiger Praktiken. Im nächsten Schritt gilt es weitere Sensoren zur Erfassung des Nutzerverhaltens zu integrieren und in einem Versuchsaufbau die erfassten Daten zu validieren.

Literatur

- [1] *Corporate sustainability reporting - European Commission*, en. Adresse: https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en (besucht am 25. 06. 2024).
- [2] *World Energy Outlook 2019 – Analysis*, en-GB, Nov. 2019. Adresse: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (besucht am 02. 07. 2024).
- [3] Z. Besenyői, »Towards a BIM-supported facility management knowledge management system for energy efficient building operations by rule-based code compliance checking«, en, 2022. Adresse: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/17260> (besucht am 02. 07. 2024).
- [4] I. Motawa und K. Carter, »Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings«, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Jg. 74, S. 419–428, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.015>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813004448>.

- [5] K. Sorri, N. Mustafee und M. Seppänen, »Revisiting IoT definitions: A framework towards comprehensive use«, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 179, S. 121–1623, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121623>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016252200155X>.
- [6] J. Kopfmüller, »Nachhaltigkeitsbewertung«, in *Handbuch Technikethik*, A. Grunwald und R. Hillerbrand, Hrsg. Stuttgart: J.B. Metzler, 2021, S. 482–487. DOI: 10.1007/978-3-476-04901-8_92. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-476-04901-8_92.
- [7] F. Mneimneh, M. Al Kodsí, M. Chamoun, M. Basharoush und S. Ramakrishna, »How Can Green Energy Technology Innovations Improve the Carbon-Related Environmental Dimension of ESG Rating?«, *Circular Economy and Sustainability*, Jg. 3, Nr. 4, S. 2183–2199, Dez. 2023. DOI: 10.1007/s43615-023-00261-6. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00261-6>.
- [8] K. Balakrishnan, J. E. Core und R. S. Verdi, »The relation between reporting quality and financing and investment: Evidence from changes in financing capacity«, *Journal of Accounting Research*, Jg. 52, Nr. 1, S. 1–36, 2014.
- [9] Umweltbundesamt, *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente*, 2024. Adresse: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/> (besucht am 03. 07. 2024).
- [10] M. Feldmeier und J. A. Paradiso, »Personalized HVAC control system«, in *2010 Internet of Things (IOT)*, 2010, S. 1–8. DOI: 10.1109/IOT.2010.5678444.
- [11] M. Jia, A. Komeily, Y. Wang und R. S. Srinivasan, »Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications«, *Automation in Construction*, Jg. 101, S. 111–126, 2019.
- [12] J. Scott, A. Bernheim Brush, J. Krumm u. a., »PreHeat: controlling home heating using occupancy prediction«, in *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, 2011, S. 281–290.
- [13] J. Louis und K. Rashid, »Utilizing building information models as operating systems for smart homes«, in *Proceedings of the Workshop on Human-Habitat for Health (H3): Human-Habitat Multimodal Interaction for Promoting Health and Well-Being in the Internet of Things Era*, Ser. H3 '18, Boulder, Colorado: Association for Computing Machinery, 2018. DOI: 10.1145/3279963.3281658. Adresse: <https://doi.org/10.1145/3279963.3281658>.
- [14] M. Arslan, Z. Riaz, A. Kiani und S. Azhar, »Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction H&S management«, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Jg. 19, S. 72–91, Juni 2014.
- [15] M. Alves, P. Carreira und A. A. Costa, »BIMSL: A generic approach to the integration of building information models with real-time sensor data«, *Automation in Construction*, Jg. 84, S. 304–314, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.005>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516303648>.

- [16] E. Curry, J. O'Donnell, E. Corry, S. Hasan, M. Keane und S. O'Riain, »Linking building data in the cloud: Integrating cross-domain building data using linked data«, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 27, Nr. 2, S. 206–219, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.003>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034612000961>.
- [17] M. Dibley, H. Li, Y. Rezgui und J. Miles, »An ontology framework for intelligent sensor-based building monitoring«, *Automation in Construction*, Jg. 28, S. 1–14, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.018>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580512001124>.
- [18] *Homepage*, en-US. Adresse: <https://intandem.autodesk.com/> (besucht am 29. 05. 2024).
- [19] *The Arduino Guide to LoRa® and LoRaWAN® | Arduino Documentation*. Adresse: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/lorawan-101/> (besucht am 03. 07. 2024).
- [20] *MongoDB: Die Datenplattform Für Entwickler*, de. Adresse: <https://www.mongodb.com/de-de> (besucht am 22. 05. 2024).
- [21] *Homepage*, en-US. Adresse: <https://open-meteo.com/> (besucht am 29. 05. 2024).
- [22] *Autodesk Revit | Preise ansehen & offizielle Revit-Software kaufen*, de-DE. Adresse: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview> (besucht am 05. 07. 2024).