

# Automatisiertes Behaglichkeitsmonitoring mit Hilfe von IoT-Technologien

Carlos Federico Chillón Geck

Institut für Digitales und Autonomes Bauen, Technische Universität Hamburg, Blohmstraße 15,  
21079 Hamburg

E-Mail: [carlos.chillon.geck@tuhh.de](mailto:carlos.chillon.geck@tuhh.de)

**Abstract:** Thermische Behaglichkeit ist zu einem Schlüsselement moderner und umweltfreundlicher Gebäudeplanung geworden. Üblicherweise wird die thermische Behaglichkeit entweder anhand von Umfragen in Papierform, die von den Gebäudenutzenden ausgefüllt werden, oder durch die Erfassung von Umgebungsdaten, die in mathematische Modelle wie das Predicted Mean Vote (PMV) einfließen, bewertet. Derzeit ist die Durchführung von digitalen Umfragen und manuellen Übertragungen der erhobenen Daten zwischen verschiedenen Software- und Datenformaten sehr zeitaufwändig, fehleranfällig und umständlich. Zudem führen sie oft zu Informationsverlusten. Um die genannten Nachteile zu beheben, wird in diesem Beitrag ein automatisiertes Behaglichkeitsmonitoringsystem vorgestellt, das mittels IoT-Technologien automatisch Daten für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit sammelt. Eine digitale Umfrage zur thermischen Behaglichkeit ergänzt die Umgebungsdaten mit Feedbacks der Gebäudenutzenden. Das automatisierte Behaglichkeitsmonitoringsystem wurde in einem Praxistest validiert, bei dem intelligente Sensorknoten kontinuierlich die Umgebungsdaten in einer Büroumgebung aufzeichnen, während die Gebäudenutzenden die digitale Umfrage zur thermischen Behaglichkeit ausfüllen. Die Ergebnisse des Praxistests und weitere Anwendungsfälle des Monitoringsystems sowie zukünftige Arbeiten werden am Ende des Beitrages diskutiert.

**Keywords:** Thermische Behaglichkeit, Internet of Things (IoT), Smart Building, drahtlose Sensornetzwerke, Gebäudeautomation

## 1 Einleitung

Die thermische Behaglichkeit, d.h. die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung, ist in den letzten Jahrzehnten zu einem wichtigen Forschungsgebiet geworden, was auf die zunehmende Bedeutung der allgemeinen Behaglichkeit für die Gebäudenutzenden zurückzuführen ist [1]. Obgleich die automatisierte Analyse von Umgebungsdaten für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit nützlich ist, liefern Umfragen unter den Gebäudenutzenden wertvolle Informationen für eine ganzheitlichere Bewertung. Traditionell wurden Umfragen zur thermischen Behaglichkeit manuell durchgeführt. Mit den Fortschritten in Sensor-, Monitoring- und IoT-Technologien [2] wurden in den letzten Jahren Werkzeuge bereitgestellt, mit denen das Feedback der Gebäudenutzenden in das Monitoring der thermischen Behaglichkeit einbezogen werden kann, sodass Studien, die nur die Umgebungsparameter in Innenräumen messen, überholt sind [3]. IoT-basierte, mobile Anwendungen und digitale Umfragen wurden implementiert, um Rückmeldungen zu thermischen Empfindungen und Präferenzen der Gebäudenutzenden zu erfassen [4]. Trotz der neuen IoT-gestützten Möglichkeiten zur Automatisierung von Erhebungen der thermischen Behaglichkeit [5] ist die Entwicklung einer Umfrage der thermischen Behaglichkeit, die aussagekräftige Daten sammelt, keine triviale Aufgabe [6]. Ein vollständig digitalisierter und automatisierter Arbeitsablauf, der sowohl Umgebungsdaten als auch Feedbacks von Gebäudenutzenden aus digitalen Umfragen zur thermischen Behaglichkeit integriert, würde den Datenverlust, den Aufwand und die Kosten für die zukünftige Bewertung der thermischen Behaglichkeit deutlich reduzieren.

In Anbetracht des Trends zu kosteneffizienter Hardware und der Beteiligung von Gebäudenutzenden am effektiven Monitoring der thermischen Behaglichkeit stellt dieser Beitrag ein automatisiertes *Behaglichkeitsmonitoringsystem* vor, das die Erfassung von Umgebungsdaten durch intelligente drahtlose Sensorknoten mit dem Feedback der Gebäudenutzende durch eine digitale Umfrage zur thermischen Behaglichkeit ergänzt. Die automatische Datenerfassung soll die Probleme verringern, die beim Austausch von Daten zwischen verschiedenen Software- und Datenformaten auftreten, was zu zeitaufwändigen, fehleranfälligen und mühsamen Aufgaben führt, die oft Informationsverluste zur Folge haben. Zunächst werden die Entwicklung der intelligenten drahtlosen Sensorknoten und die digitale Umfrage beschrieben. Daraufhin wird das Behaglichkeitsmonitoringsystem durch einen Praxistest in einer Büroumgebung validiert und die Ergebnisse der Umfrage und der Erfassung von Umgebungsdaten werden vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung der Studie und möglichen neuen Aspekten im Forschungsfeld der thermischen Behaglichkeit.

## 2 Entwicklung des automatisierten Behaglichkeitsmonitoringsystems

Das hier vorgestellte automatisierte Behaglichkeitsmonitoringsystem basiert auf einer vierschichtigen IoT-Architektur [7] und macht sich moderne Konzepte des Monitorings [8],

eingebetteter Systeme [9] und intelligenter Sensorik zunutze [10]. Das System umfasst eine thermische *Behaglichkeitsstation* und eine *digitale Umfrage* zu thermischer Behaglichkeit, die von Gebäudenutzenden ausgefüllt wird. Die Behaglichkeitsstation besteht aus einem drahtlosen Sensorknoten, der aus kosteneffizienten Hardwarekomponenten zusammengesetzt ist. Die Software, die in dieser Studie entwickelt wurde, integriert Echtzeit-Sensorik, eingebettete Datenverarbeitung und IoT-Konnektivität. Die Aufgabe des Systems ist es, die Erfassung von Umgebungsdaten zu automatisieren und sie mit der digitalen Umfrage zur thermischen Behaglichkeit zu ergänzen, um genügend Daten für eine effektivere Bewertung der thermischen Behaglichkeit erfassen zu können. In diesem Abschnitt wird die Systemarchitektur erläutert (2.1), gefolgt von einer Einführung in die Hardware- (2.2) und Softwarekomponenten (2.3) sowie Anmerkungen zur digitalen Umfrage (2.4).

## 2.1 Systemarchitektur

Die Architektur des Behaglichkeitsmonitoringsystems (Abbildung 1) besteht aus vier Schichten, (i) einer Anwendungsschicht, (ii) einer Verarbeitungsschicht, (iii) einer physischen Schicht und (iv) einer zusätzlichen Sicherheitsschicht, die im folgenden skizziert werden. Die Gebäudenutzenden interagieren mit der *Anwendungsschicht* über ein Dashboard, das in einer Webschnittstelle verwaltet wird. Das Dashboard bietet eine Echtzeit-Visualisierung der Umgebungsdaten und enthält die digitale Umfrage zur thermischen Behaglichkeit. Die *Verarbeitungsschicht* enthält einen mobilen Server auf der Basis eines Raspberry Pi. Der Raspberry Pi verwaltet die Backend-Dienste des Systems mit Hilfe des Node-RED-Entwicklungstools, das visuelle, flussbasierte Programmierung für die Entwicklung der Backend-Systemlogik bietet. Node-RED empfängt das Feedback der Gebäudenutzenden von der Anwendungsschicht und speichert die Ergebnisse der Umfrage sowie die Umgebungsdaten, die von der physischen Schicht erfasst werden. Die *physische Schicht* des automatisierten Behaglichkeitsmonitoringsystems besteht aus einem intelligenten drahtlosen Sensorknoten, der Daten aus dem Innenbereich sammelt, d.h. Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, mittlere Strahlungstemperatur (mean radiant temperature, MRT) und Luftgeschwindigkeit. Darüber hinaus verfügt der drahtlose Sensorknoten über die nötige Rechenkapazität, um die Rohdaten der Umgebung mit Hilfe eingebetteter Algorithmen zu verarbeiten. Die verarbeiteten Daten werden über eine http-Verbindung zur Datenspeicherung und Visualisierung an die Verarbeitungsschicht gesendet. Die *Sicherheitsschicht*, die Authentifizierungsdienste für den Datenschutz und die Sicherheit aller Schichten bereitstellt, verläuft transversal zu den anderen Schichten.

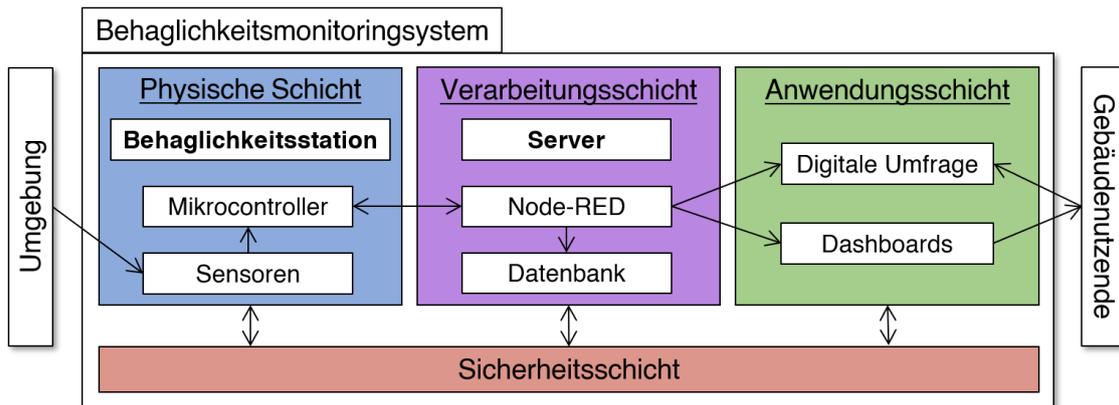


Abbildung 1: Vierschichtige IoT-Architektur des automatisierten Behaglichkeitsmonitoringsystems.

## 2.2 Hardwarekomponenten

Die Behaglichkeitsstation, als eine Komponente des Behaglichkeitsmonitoringsystems umfasst drei Sensoren, (1) einen kombinierten Sensor, der Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit misst, (2) einen Luftgeschwindigkeitssensor und (3) einen Lufttemperatursensor, der in einem schwarz lackierten Tischtennisball eingebaut wird, um ein Globe-Thermometer zu bilden, mit dem die mittlere Strahlungstemperatur berechnet wird. Ein Mikrocontroller des Typs ESP32 WROOM-32 sorgt für die Verarbeitung der Rohdaten der Umgebung und sendet die Daten in regelmäßigen Abständen über Wi-Fi an die Verarbeitungsschicht. Zum Schutz der Hardware und zur Wärmeisolierung der einzelnen Komponenten wurde ein 3D-gedrucktes Gehäuse gebaut. Alle Komponenten sind auf einer Leiterplatte verdrahtet und verlötet. Abbildung 2 zeigt die Hardwarekomponenten der in dieser Studie entwickelten kostengünstigen und intelligenten Behaglichkeitsstation. Die Komponenten wurden nach den folgenden Kriterien ausgewählt: Niedriger Preis, geringer Stromverbrauch, Genauigkeit, Größe und Funktionsfähigkeit bei 5 V.

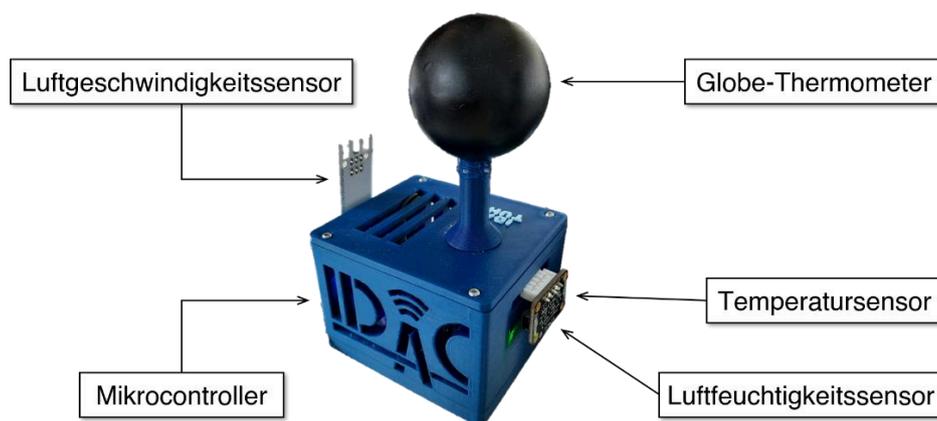


Abbildung 2: Die Behaglichkeitsstation.

## 2.3 Softwarekomponenten

Der ESP32-Mikrocontroller enthält ein eingebettetes Softwareprogramm, das es ermöglicht, Sensordaten zu sammeln sowie Daten vom Server zu senden und zu empfangen. Darüber hinaus berechnet das eingebettete Softwareprogramm den PMV-Index (Predicted Mean Vote), d. h. einen Index der thermischen Behaglichkeit, der die durchschnittliche thermische Behaglichkeit einer Gruppe von Personen in Innenräumen vorhersagt. Der Algorithmus zur Berechnung des PMV-Index ist in [1] beschrieben und wurde in dieser Studie in Arduino-Programmiersprache übersetzt und übertragen. Die Eingaben zur Berechnung des PMV-Index sind die von der Behaglichkeitsstation gemessenen Umgebungsparameter sowie zwei persönliche Parameter, die die Kleidung und Aktivität (z. B. Sitzen und Schreiben) der Gebäudenutzenden quantifizieren. Die Ausgabe des PMV-Index entspricht einem Wert auf der 7-Punkte-Skala des ASHRAE-55-Standards, wobei -3 für „extremes“ Kälteempfinden und +3 für „extremes“ Wärmeempfinden steht. Ein Index von 0 drückt die „optimale“ thermische Behaglichkeit aus.

Node-RED empfängt die Messungen der Umgebungsparametern und den PMV-Index und zeigt sie in Echtzeit in den Dashboards der Anwendungsschicht an. Gleichzeitig füllen die Gebäudenutzenden die Umfrage zur thermischen Behaglichkeit aus, die auf dem Dashboard angezeigt wird. Die Echtzeit-Diagramme und die digitale Umfrage, die zur Anwendungsschicht gehören, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die digitale Umfrage ist so konzipiert, dass die Datenerfassung maximiert und der Aufwand der Gebäudenutzenden beim Ausfüllen der Umfrage minimiert wird.

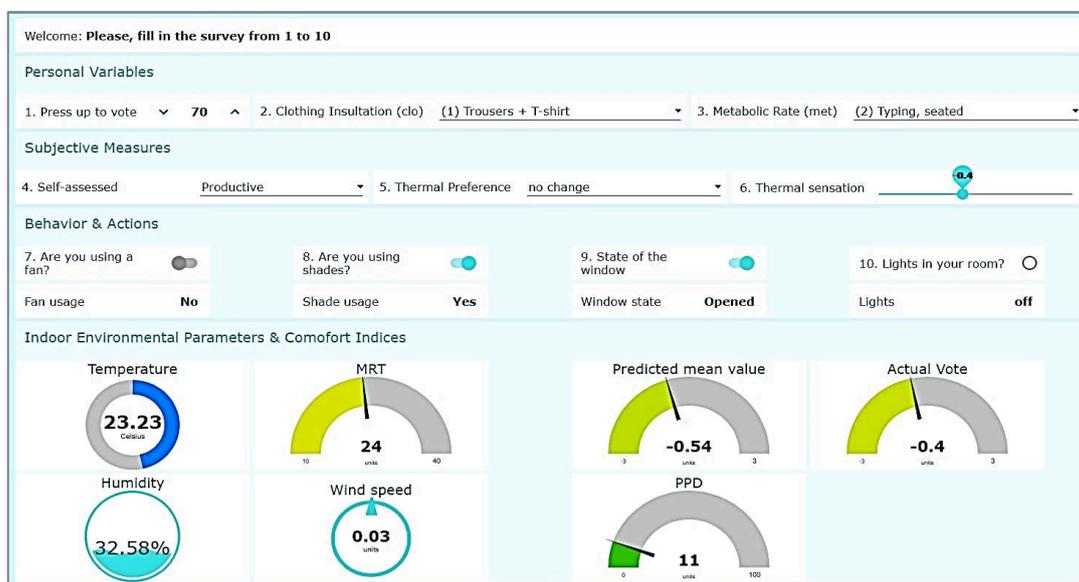


Abbildung 3: Dashboard mit Echtzeit-Visualisierung der Umgebungsparameter und digitale Umfrage.

## 2.4 Digitale Umfrage

Die Umfrage besteht aus drei Arten von Messungen und sammelt eine Reihe von Parametern, die in [6] vorgeschlagen werden. Erstens werden persönliche Variablen von den Gebäudenutzenden erfasst, z.B. Kleidung und Aktivität, die für die korrekte Berechnung des PMV-Indexes benötigt werden. Zweitens wird das Verhalten der Gebäudenutzenden in der Umfrage erfasst; so können die Gebäudenutzenden beispielsweise das Öffnen und Schließen der Fenster und den Zustand der Jalousien aktualisieren. Schließlich werden subjektive Messwerte erfasst, wie z.B. die Bewertung des thermischen Empfindens, d.h. wie die Gebäudenutzenden sich auf der 7-Punkte-Skala für thermische Behaglichkeit fühlen und wie sie selbst ihre Produktivität einschätzen. Demzufolge werden die Umgebungsdaten und die Ergebnisse der Umfrage zusammengeführt und in einer Datei gespeichert. Für jede neue Datenzeile in der Datei wird ein Zeitstempel hinzugefügt, sodass ein Datensatz entsteht, der für weitere Anwendungen analysiert werden kann.

## 3 Praxistest

Zur Validierung des Behaglichkeitsmonitoringsystems wurde ein Praxistest in Büroräumen durchgeführt. Die Validierung zielt darauf ab, die Leistung des Systems unter realen Bedingungen zu bestimmen, d.h. welches die Reaktion der Gebäudenutzenden auf die Untersuchung der thermischen Behaglichkeit ist und wie effektiv die intelligente drahtlose Behaglichkeitsstation die Umgebungsdaten erfasst und den PMV-Index berechnet. Anschließend wird der PMV-Index mit dem Feedback der Gebäudenutzenden zum thermischen Empfinden während des Praxistests verglichen.

Der Praxistest wurde in den Monaten April und Mai 2022 durchgeführt. Im Praxistest wurden in fünf Büros des Instituts für Digitales und Autonomes Bauen der Technischen Universität Hamburg fünf intelligente Behaglichkeitsstationen platziert, die im Abstand von 5 Sekunden Messungen von Umgebungsparametern durchführten. Zusätzlich wurde jeder Person ein Dashboard zugewiesen, um die digitale Umfrage ausfüllen und das Echtzeit-Dashboard mit den Umgebungsdaten visualisieren zu können. Der Server empfängt die Messungen der Umgebung, aktualisiert die Dashboards und speichert die Daten in formatierten Dateien. Abbildung 4 zeigt die gemessenen Lufttemperaturen aller Behaglichkeitsstationen (CS01 bis CS05) über den Verlauf eines Arbeitstages. Durch das vorübergehende Öffnen der Fenster im Raum sinkt die Lufttemperatur während des Beobachtungszeitraums erheblich. Durch das Aufzeichnen der Daten ist es außerdem möglich, Sensorfehler zu erkennen, wie z.B. bei der Behaglichkeitsstation Nummer 2 (CS02). Die frühzeitige Erkennung von Sensorfehlern ist wichtig, um aussagekräftige Ergebnisse bei der Bewertung der thermischen Behaglichkeit zu erhalten und Informationsverluste zu vermeiden.

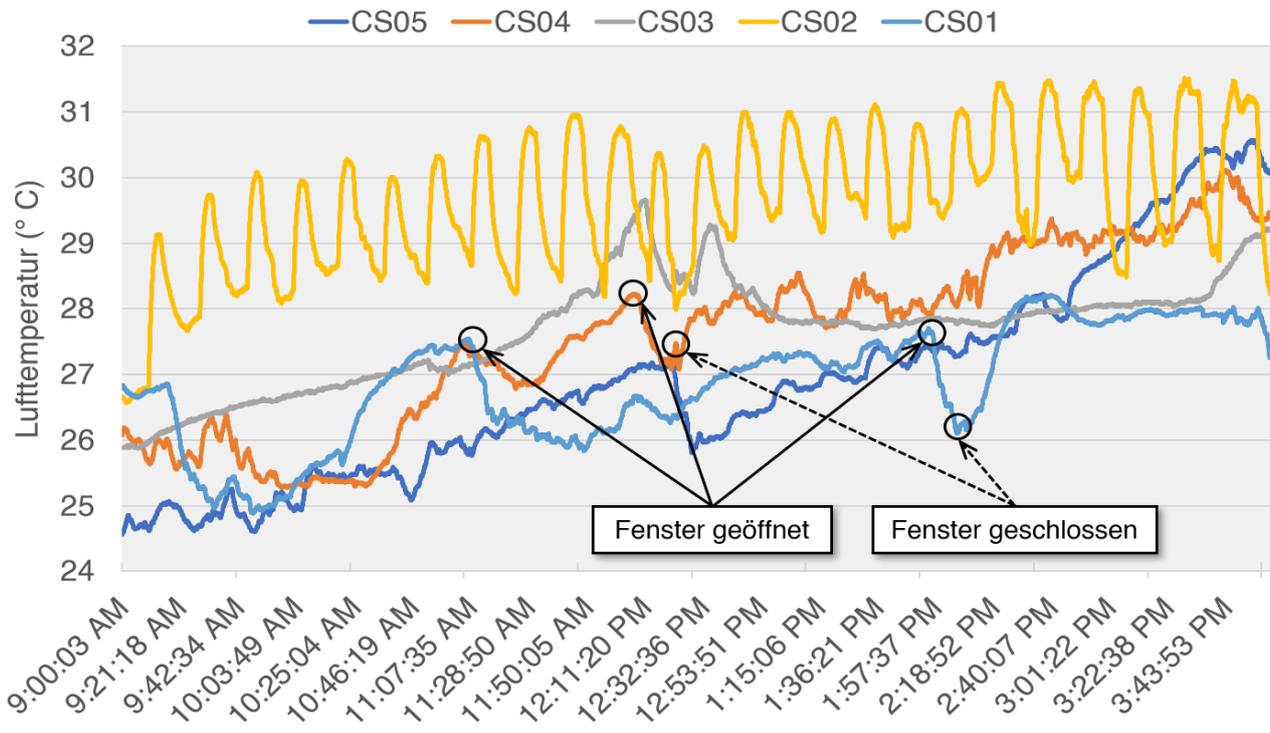


Abbildung 4: Messung der Lufttemperatur während eines Zeitraums des Praxistests.

Darüber hinaus bieten die Ergebnisse der Umfrage Informationen über die Interaktion der Gebäudenutzenden mit der Umgebung, z.B. wann Fenster geöffnet oder Jalousien geschlossen wurden und wie sich diese Veränderungen auf den PMV-Index und die Bewertung der thermischen Behaglichkeit auswirken. Die Beobachtungen können dazu beitragen, die Eignung von Indizes für die thermische Behaglichkeit, hier dem PMV-Index, in bestimmten Umgebungen zu untersuchen. Der Vergleich des kalkulierten PMV-Index und der subjektiv wahrgenommenen Behaglichkeit sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie aus den Ergebnissen der Tabelle hervorgeht, kann das System zur Validierung eines Modells der thermischen Behaglichkeit, wie z. B. des PMV-Modells, in einer bestimmten Umgebung und für bestimmte Gebäudenutzenden verwendet werden. Darüber hinaus können die gesammelten Daten dazu verwendet werden, persönliche Profile zu erstellen, die Präferenzen der Gebäudenutzenden enthalten, z. B. wie lange sie am Tag ein Fenster oder eine Jalousie geschlossen halten und wie sich dies auf ihr Wärmeempfinden auswirkt.

Tabelle 1: Vergleich des kalkulierten PMV-Index und der subjektiv wahrgenommenen Behaglichkeit.

PMV-Index	Bewertung der Behaglichkeit	Differenz	Fenster	Jalousie
0,73	0,90	0,17	Geschlossen	Geschlossen
0,53	1,10	0,57	Geschlossen	Geöffnet
0,79	0,40	0,39	Geschlossen	Geschlossen

-0,43	0,10	0,53	Geöffnet	Geöffnet
0,37	0,50	0,13	Geöffnet	Geschlossen
1,02	1,00	0,02	Geschlossen	Geöffnet

## 4 Fazit

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung eines automatisierten Behaglichkeitsmonitoringsystems auf der Grundlage einer vierschichtigen IoT-Architektur. Der Entwurf des Behaglichkeitsmonitoringsystems und die Verwendung der eingesetzten Tools zielen darauf ab, die Geschwindigkeit und Genauigkeit der Datenerfassung zu erhöhen, die durch manuelle Erhebungen verursachten Fehler zu reduzieren und sicherzustellen, dass etwaige Fehler im Behaglichkeitsmonitoringsystem durch visuelle Inspektionen der Echtzeit-Dashboards erkannt werden, bevor ein bedeutender Datenverlust auftritt. Zur Validierung des Behaglichkeitsmonitoringsystems wurde ein Praxistest durchgeführt. Die Ergebnisse des Praxistests zeigen, dass das System kontinuierlich und zuverlässig Daten zur thermischen Behaglichkeit erfasst. Die Verwendung des Systems soll der Forschung im Gebäudesektor helfen, die Interaktion zwischen Menschen und Gebäuden sowie das Wohlbefinden der Gebäudenutzenden weiter zu untersuchen. In zukünftigen Forschungsarbeiten ist geplant, das Behaglichkeitsmonitoringsystem über Actorik mit Kontrollsystemen wie z.B. Luftbefeuchtern zu koppeln, um die Möglichkeiten der Gebäudeautomatisierung zu erweitern und damit insgesamt die Behaglichkeit in Innenräumen verbessern zu können.

## Referenzen

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 55, 2017. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.
- [2] Smarsly, K. & Petryna, Y., 2014. A Decentralized Approach towards Autonomous Fault Detection in Wireless Structural Health Monitoring Systems. In: Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM) 2014. Nantes, France, 07/08/2014.
- [3] V. Tomat, A. P. Ramallo-González, and A. F. Skarmeta Gómez, 2020. A Comprehensive Survey about Thermal Comfort under the IoT Paradigm: Is Crowdsensing the New Horizon? *Sensors* 20(16), 4647.
- [4] A. Sanguinetti, M. Pritoni, K. Salmon, A. Meier, and J. Morejohn, 2017. Upscaling participatory thermal sensing: Lessons from an interdisciplinary case study at University of California for improving campus efficiency and comfort. *Energy Research & Social Science*, 32(2017), pp. 44-54.

- [5] T. Parkinson, A. Parkinson, and R. de Dear, 2019. Continuous IEQ monitoring system: Context and development. *Building Environment*, 149, pp. 15–25.
- [6] F. Nicol, M. Humphreys, and S. Roaf, 2012. *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice* (1st ed.). London, UK: Routledge.
- [7] Peralta, J. & Smarsly, K., 2021. Internet of Things frameworks for smart city applications – a systematic review. In: *Proceedings of the 2021 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering (I3CE)*. Orlando, FL, USA, 09/14/2021.
- [8] D. Legatiuk and Smarsly, K., 2018. An abstract approach towards modeling intelligent structural systems. In: *Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*. Manchester, United Kingdom, 07/10/2018.
- [9] K. Dragos and K. Smarsly, K., 2017. Decentralized infrastructure health monitoring using embedded computing in wireless sensor networks. In: Sextos, A. & Manolis, G. D. (eds.). *Dynamic Response of Infrastructure to Environmentally Induced Loads*. Pp. 183-201. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG
- [10] Dragos, K. & Smarsly, K., 2016. A hybrid system identification methodology for wireless structural health monitoring systems based on dynamic substructuring. In: *Proceedings of the SPIE Smart Structures/NDE Conference: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. Las Vegas, NV, USA, 03/24/2016.