

Low-Cost Gebäudemonitoring zum Selbermachen

Prof. Dr. Olivier Steiger
Institut für Gebäudetechnik und Energie
Hochschule Luzern, Technik & Architektur
Horw, Schweiz



Low-Cost Gebäudemonitoring zum Selbermachen

1. Einleitung

Technisches Monitoring ist der Oberbegriff für die systematische Erfassung und Überwachung von Zuständen und Prozessen mit technischen Mitteln [1]: Betriebszustände von technischen Anlagen, elektrische und thermische Energie, Wasser- und Brennstoffverbrauch, Raumkonditionierung, Nutzerverhalten, bauphysikalische Überwachung. Monitoring-Systeme sind für den energieeffizienten und komfortablen Betrieb von Gebäuden unerlässlich. Die Ziele sind vielfältig:

- Transparenz über Optimierungen in Planung und Betrieb schaffen;
- Ursachen für den Performance Gap ermitteln. D.h. Abweichungen der Ist-Verbrauchswerte von den Planungs- oder Soll-Werten;
- Gewünschte Gebäudeperformance sicherstellen und aufrechterhalten;
- Erfolg von Energieoptimierungsmaßnahmen überprüfen;
- Verlässliche Grundlagen für weitere Optimierungsschritte schaffen.

Heutige Monitoring-Lösungen sind aufgrund von Hardware-, Installations- und Wartungskosten oft ziemlich teuer. Gleichzeitig besteht ein Bedarf an kostengünstigen Überwachungssystemen, insbesondere für kleinere Gebäude.

In diesem Beitrag wird ein kostengünstiges Gebäudemonitoring-System vorgestellt, das auf offenen Technologien basiert. Alle Anleitungen und die Software zu dieser Lösung sind auf einer speziellen Website verfügbar [2]. Das System besteht aus mehreren handelsüblichen Messgeräten und einer Open-Source Software zur Datenaggregation und Visualisierung. Darüber hinaus wird eine detaillierte Anleitung für den Aufbau und die Nutzung des Systems bereitgestellt. Die Monitoring-Lösung erfasst den Energieverbrauch (Strom, Wasser, Wärme) und Raumkomfort-Werte (Raumtemperatur, Luftqualität, Luftfeuchtigkeit). Mit der neuen Lösung erhalten interessierte Personen / Institutionen / Verbände einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und den Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter. Der Zielpreis für die Hard- und Software, Installation, Datenübertragung und Visualisierung liegt deutlich unter CHF 1'000.-.

Dieser Artikel ist wie folgt gegliedert. Abschnitt 2 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Im Abschnitt 3 werden die Architektur und die Komponenten der vorgeschlagenen Lösung beschrieben. Im Abschnitt 4 werden erste Testergebnisse vorgestellt, die mit einer Prototyp-Implementierung erzielt wurden. Abschnitt 5 letztendlich schließt das Papier mit einem Ausblicken ab.

2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik im Hinblick auf kostengünstige Überwachungslösungen für das Gebäude untersucht. Neben der wissenschaftlichen Literatur wurden auch die verfügbaren Produkte und gemeinschaftliche Initiativen untersucht, da diese wertvolle Einblicke in die aktuelle Marktsituation bieten.

Kostengünstige Monitoring-Systeme wurden in mehreren Veröffentlichungen untersucht. In einem Beitrag [3] wird ein Energieverbrauchs-Messstecker beschrieben, der den Energieverbrauch von Haushaltsgeräten in Echtzeit überwacht und steuert. Der Entwurf basiert auf preiswerter, handelsüblicher Hardware für die Spannungs- und Strommessung. Eine ähnliche Lösung wird in [4] vorgestellt. In einer anderen Veröffentlichung [5] wird ein kostengünstiges, nicht-invasives System zur Überwachung des Energieverbrauchs im Haushalt vorgestellt. Das Design verwendet Open-Source Hardware auf der Basis der Arduino-Architektur und handelsübliche Sensoren für die Strommessung. In [6] wird ein echtzeitbasiertes Energieüberwachungssystem vorgeschlagen, das den Energieverbrauch in Haushalten misst und die Daten in die Cloud hochlädt. Die Stromverbrauchsdaten werden über die elektrische LED-Schnittstelle von herkömmlichen Stromzählern extrahiert. In [7] wird

ein IoT-Gerät vorgestellt, das zur Überwachung des Stromverbrauchs in einem Gebäude entwickelt wurde. Es besteht aus drei handelsüblichen Modulen, darunter ein elektrischer Energiesensor, ein Arduino Nano Mikrocontroller und ein kommerzielles Serial-to-WiFi Board. In [8] wird eine Softwareplattform für ein kostengünstiges, energieeffizientes und sicheres Gebäudeenergiemanagement und die Steuerung mehrerer Gebäude von einer Fernsteuerungszentrale über das Internet vorgeschlagen.

Verschiedene gemeinschaftliche Initiativen haben sich ebenfalls kostengünstigen Überwachungslösungen für das Gebäude gewidmet. Der Open Energy Monitor [9] ist ein Gemeinschaftsprojekt zur Messung von Strom, Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit Open-Source Hardware und Software. Die Basis dafür ist ein Raspberry Pi-basiertes Messsystem. Das System kann durch verschiedene Strom- und Komfortmesssensoren sowie eine Web-App zur Datenverarbeitung und Visualisierung erweitert werden. Babelbee [10] ist ein quelloffener Do-it-yourself-Stromzähler mit zugehöriger Open-Source-Datenvisualisierungssoftware. Eine ähnliche, Arduino-basierte Lösung wurde von foobarflies [11] entwickelt. Schließlich bieten mehrere Unternehmen proprietäre Lösungen zur kostengünstigen Gebäudeüberwachung an.

Viele der genannten Lösungen sind auf elektrische Messungen beschränkt. Thermische Energie, Brennstoffverbrauch und Raumbedingungen werden nicht berücksichtigt. Auch ist es oft nicht möglich, vorhandene Messungen, z.B. von Energiezählern, in die Überwachung miteinzubeziehen. Schließlich werden die Monitoring-Daten im Allgemeinen als Zeitreihen (d.h. Rohdaten) zusammen mit einigen grundlegenden Statistiken wie Mittelwert, Standardabweichung und Histogrammen dargestellt. Neuere Studien haben jedoch gezeigt, dass in der Praxis oft komplexere und anwendungsorientierte Visualisierungen erwartet werden [12].

3. Systemübersicht

In diesem Abschnitt werden die Architektur und die Komponenten des vorgeschlagenen kostengünstigen Gebäudeüberwachungssystems beschrieben.

3.1. Architektur

Die Architektur des Low-Cost Gebäudemonitoring-Systems ist in der Abbildung 1 dargestellt. Die Überwachungsdaten stammen aus drei verschiedenen Quellen:

- **LoRaWAN-Sensoren.** Dies ist der bevorzugte Datenübertragungsweg. Er ermöglicht die Datenerfassung in (fast) Echtzeit, z.B. für viertelstündliche oder tägliche Werte. Die einzelnen Messgeräte (Sensoren) werden entweder direkt oder über ein lokales Gateway an das öffentliche LoRaWAN-Netz «The Things Network» (TTN) angeschlossen [13]. Die Nutzung von TTN ist kostenlos, die Integration neuer Messgeräte ist einfach. Außerdem bietet TTN einen Cloud-Speicher mit einer Kapazität von sieben Tagen. Dies verhindert Datenverluste im Falle eines vorübergehenden Ausfalls der «lcm»-Software.
- **CSV-Import.** Es ist auch möglich, Monitoring-Daten aus kommagetrennten Dateien (CSV) zu importieren. Dies wird häufig verwendet, um Messdaten von Energieversorgungsunternehmen oder Immobiliengesellschaften einzulesen.
- **Zeitreihen-Datenbank.** Schließlich ist es möglich, Daten aus einer influxDB-Zeitreihendatenbank [14] einzulesen. Diese wird typischerweise verwendet, um Daten aus Drittsystemen wie die Gebäudeautomation einzulesen.

Alle Daten werden dann mit der eigens entwickelten Software «lcm» gespeichert, aggregiert und visualisiert (Abschnitt 3.3).

Datenerfassung

LoRaWAN-Sensoren (über TTN) → Raumbedingungen, Zähler
 CSV-Import → Zähler, Daten von EVU
 Zeitserien-DB → Systeme von Drittanbietern

Datenübertragung

The Things Network
 Cloud-Speicher: 7 Tage

Datensammlung und Visualisierung

„lcm“-Software der Hochschule Luzern
 Maßgeschneiderte Visualisierung für verschiedene Gebäudeoptimierungen

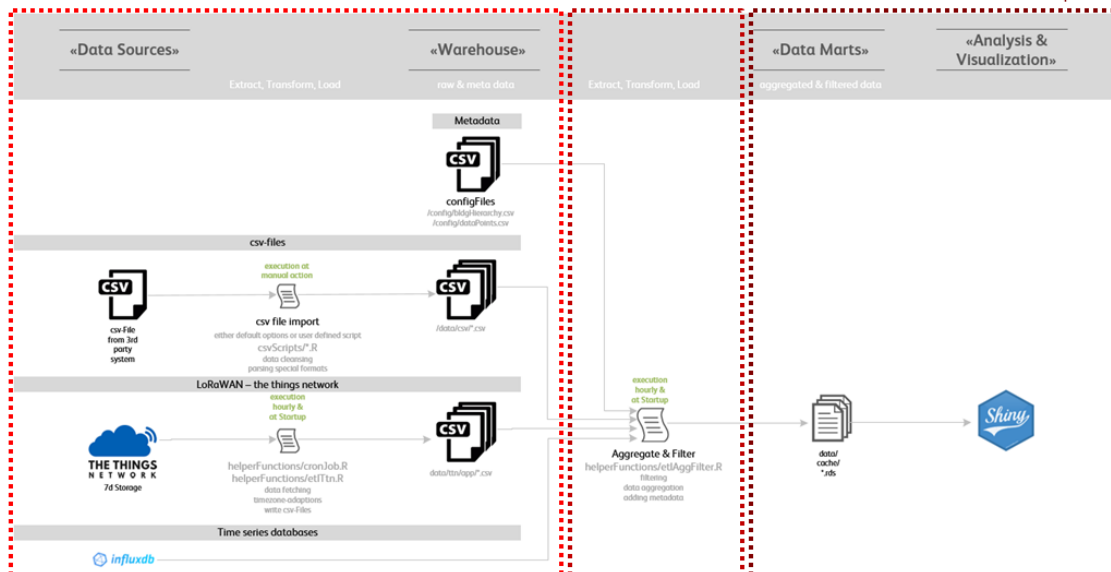


Abbildung 1: Architektur des Low-Cost Gebäudemonitoring-Systems. Die Überwachungsdaten stammen aus drei verschiedenen Quellen: (i) LoRaWAN-Sensoren; (ii) CSV-Import; (iii) Zeitreihendatenbank. Die Daten der LoRaWAN-Sensoren werden über The Things Network übertragen und in der TTN-Cloud für max. 7 Tage abgespeichert. Alle Daten werden mit der eigens entwickelten «lcm»-Software aggregiert und visualisiert.

3.2. Messgeräte

Messdaten können im Allgemeinen nicht direkt von bestehenden Strom- und Wärmezählern abgegriffen werden. Die Hauptgründe dafür sind, dass zahlreiche verschiedene Zählertypen im Einsatz sind (von elektromechanischen bis hin zum intelligenten Zähler) und dass ihre Kommunikationsschnittstellen – sofern vorhanden – nicht einheitlich und oft nur für die Versorgungsunternehmen zugänglich sind. Daher wurde beschlossen, das kostengünstige Überwachungssystem so autark wie möglich zu gestalten. Das bedeutet, dass die erforderlichen Messdaten vor Ort mit einfach zu installierenden, drahtlosen Messgeräten erfasst werden.

Um die Kosten zu minimieren werden, wann immer möglich, nicht-invasive Messgeräte verwendet. Dies senkt die Kosten für die Installation, da sie vom Endnutzer vorgenommen werden kann und keine Strom- oder Wasserleitungen unterbrochen werden müssen. Für die Strommessung stehen induktive Sonden zur Verfügung. Komplizierter ist die Situation bei der Wärmemessung. Hier sind nicht-invasive Messmethoden grundsätzlich möglich. Diese sind jedoch in der Regel teuer und hängen vom Wärmeträger, Rohrdurchmesser, Material usw. ab.

In der vorliegenden, prototypischen Implementierung des Low-Cost Gebäudemonitorings werden die folgenden Messgeräte unterstützt. Diese werden «out of the box», d.h. ohne weitere Kalibrierung, verwendet.

- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Standard* → Raumtemperatur, Feuchte
- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Carbonsense* → Raumtemperatur, Feuchte, Luftqualität (CO₂-Konzentration)
- Klimasensor *Dragino – LHT65* → Außentemperatur, Vorlauftemperatur der Zentralheizung
- Impulszähler *nke WATTECO – Flash'O* → wird zum Auslesen von alten Zählern verwendet. Z.B. Stromverbrauch, Wärmeverbrauch, Wasserverbrauch.

3.3. Monitoring Software

Die maßgeschneiderte Monitoring-Software «lcm» der Hochschule Luzern besteht aus mehreren Datenauswertungsmodulen und Konfigurationsfunktionen. Jedes Modul führt eine andere Auswertung der Monitoring-Daten durch. D.h. jedes Modul ist auf unterschiedliche Anwendungen oder Optimierungsmaßnahmen ausgerichtet. Eine Übersicht aller verfügbaren Module ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Darüber hinaus stellt die «lcm»-Software Konfigurationsfunktionen für die Integration der Messgeräte (Abschnitt 3.2) und die Definition des zu überwachenden Gebäudes zur Verfügung. Die Software wurde in der Programmiersprache R entwickelt und ist öffentlich zugänglich (inkl. Quellcode) auf der Entwicklungsplattform GitHub [15].

Tabelle 1: Übersicht über die Datenauswertungsmodule der Monitoring-Software «lcm».

Modul	Zweck	Visualisierungen	Datenpunkt(e)
Room > Temp vs. Hum	Komfortanalyse bezüglich Feuchte und Temperatur (Überhitzung, Schimmelproblematik, trockene Luft im Winter)	-Luftfeuchte vs. Raumtemperatur -Mollier-h,x-Diagramm	-Raumtemperatur -Relative Raumfeuchte
Room > Room vs. Outside Temp	Reduktion der Überhitzungstunden	-Raum- vs. Aussentemperatur	-Raumtemperatur -Aussentemperatur
Room > Air Quality	Komfortanalyse bezüglich Raumluftqualität (oft problematisch in Schlafzimmern)	-CO ₂ vs. Zeit -Untere und obere Quantile	-Raumluftqualität (CO ₂)
Room > Temp Reduction	Reduktion Heizenergie durch Senkung der Raumtemperatur	-Raumtemperatur vs. Zeit -Durchschnitt, Sollwert, Abweichung	-Raumtemperatur
Flat > Electricity	Analyse und Optimierung Stromverbrauch Untersuchung Standby-Verbrauch	-Tagesverbrauch vs. Zeit -Standby-Verbrauch	-Stromverbrauch Wohnung
Flat > Heating	Analyse und Optimierung Heizenergie-Verbrauch Umrechnung in kWh/m ²	-Relative Heizenergie Gebäude pro Jahr bzw. Monat -Relative Heizenergie Wohnung pro Jahr bzw. Monat	-Heizwärmeverbrauch Wohnung
Flat > Hot Water	Analyse und Optimierung Warmwasser-Verbrauch Umrechnung in Liter pro Person und Tag	-Warmwasserverbrauch Gebäude pro Jahr bzw. Monat	-WW-Verbrauch Wohnung
Central > Heating Signature	Analyse der Gebäudesignatur Berechnung der effektiven Heizgrenze	-Signatur Heizung	-Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur
Central > Heating Curve	Analyse und Optimierung der Heizkurve	-Heizkurve (effektiv)	-Vorlauftemperatur Zentralheizung -Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur

4. Ergebnisse

Bisher wurde das Low-Cost Gebäudemonitoring nur mit anonymisierten Daten aus einem einzigen Mehrfamilienhaus getestet. Das Gebäude befindet sich in der Zentralschweiz und besteht aus vier Wohnungen. Jede Wohnung wird von einer Familie bewohnt. Die Testdaten entsprechen einer Messperiode von zwei Jahren. Eine Live-Demo des Systems mit den oben erwähnten Daten ist online verfügbar [16].

Ein beispielhafter Screenshot der «lcm»-GUI ist in der Abbildung 2 zu sehen. Der Screenshot zeigt Überwachungsdaten aus der Wohnung A. Diese werden mit dem Datenauswertungsmodul «Room > Temp vs. Hum» dargestellt. Alle verfügbaren Module sind im linken Teil der GUI zugänglich. In der Hauptanzeige werden die Daten in zwei Diagrammen dargestellt: Raumtemperatur vs. relative Feuchte und Mollier-h,x-Diagramm. Der grüne Bereich definiert Temperatur-Feuchtigkeits-Paare, die als angenehm empfunden werden («Komfortzone»).

Mit dieser Darstellung lassen sich Messungen, die außerhalb des angestrebten Komfortbereichs liegen, leicht erkennen. Ähnlich wie bei den anderen Modulen ist es möglich, die Daten übersichtlich und zielgerichtet zu visualisieren. Darüber hinaus gibt die Software Empfehlungen für die Interpretation der Messdaten und mögliche Optimierungsmaßnahmen. Zu beachten ist, dass diese Empfehlungen statisch sind und die tatsächlichen Messungen nicht berücksichtigen.

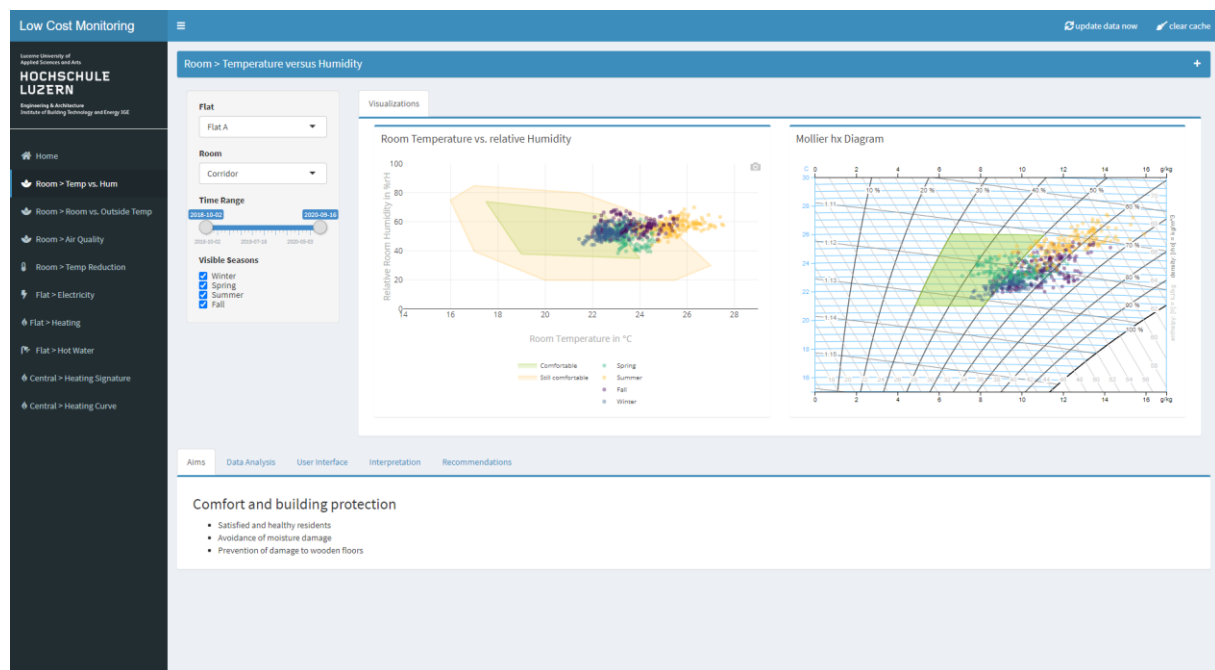


Abbildung 2: Screenshot der Überwachungssoftware «lcm». Der Screenshot zeigt Monitoring-Daten aus einer einzelnen Wohnung. Diese werden mit dem Datenauswertungsmodul «Room > Temp vs. Hum» visualisiert. Alle Module sind auf der linken Seite zugänglich. In der Hauptanzeige werden die Daten in zwei Diagrammen dargestellt: Raumtemperatur vs. relative Feuchte (links); Mollier-h,x-Diagramm (rechts). Der Komfortbereich wird als grüne Fläche dargestellt. Auf der linken und oberen Seite der Diagramme können verschiedene Parameter eingestellt werden. Am unteren Rand werden Empfehlungen zur Interpretation der Messdaten und mögliche Optimierungsmaßnahmen gegeben.

5. Schlussfolgerungen und zukünftige Arbeiten

Das beschriebene Low-Cost Gebäudemonitoring-System bietet eine niedrighschwellige Möglichkeit, Überwachungsdaten zielgerichtet zu sammeln und zu visualisieren. Es stellt eine flexible Lösung dar die es erlaubt, rasch Dinge auszuprobieren und zu prototypisieren, d.h. die Monitoring-Lösung an die eigenen Wünsche und Anwendungen anzupassen. Außerdem ist die Lösung dafür vorgesehen, von Laien (z.B. dem Endnutzer) gemäß der auf der Projektwebsite bereitgestellten Anleitung zusammengebaut und in Betrieb genommen zu werden [1]. Die Zusammenstellung des Systems durch die Hochschule Luzern ist also nicht erforderlich und auch nicht vorgesehen.

Es ist jedoch zu beachten, dass die vorgeschlagene Lösung bisher nur ein frühes Prototypenstadium erreicht hat und in mehrfacher Hinsicht weiterentwickelt werden muss. Zunächst sollte das System mit einer größeren Anzahl von Gebäuden validiert werden. Auf diese Weise lassen sich wertvolle praktische Erfahrungen sammeln und die Lösung entsprechend verfeinern. Außerdem müssen Softwarefehler beseitigt, die Dokumentation weiterentwickelt und zusätzliche Funktionen hinzugefügt werden, z.B. die Unterstützung von Projekten mit mehreren Gebäuden.

Zusätzlich zu den oben genannten Punkten sollen in Zukunft einige weitere, grundlegende Herausforderungen angegangen werden:

- Automatische Plausibilitätsprüfung und Fehlerkorrektur der Monitoring-Daten;
- Implementierung von zusätzlichen Modulen zur Datenauswertung. Z.B. Optimierung von Kühl- und Lüftungsanlagen;
- Automatische Dateninterpretation, z.B. durch maschinelle Lernverfahren;
- Generierung von fallspezifischen Optimierungsempfehlungen;
- Erweiterte Visualisierungen, z.B. abgeleitet aus früheren Arbeiten [12].

6. Danksagung

Die Autoren möchten sich bei folgenden Personen und Institutionen für die großzügige Unterstützung herzlich bedanken: Bundesamt für Energie, Verein Minergie, Energiekonferenz der Kantone der Nordwestschweiz, Kanton Luzern, Ökozentrum Langenbruck.

7. Literaturverzeichnis

- [1] AMEV, «Technisches Monitoring 2020 – Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung», Empfehlung Nr. 158, 2020.
- [2] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring», <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/> (accessed: 29.04.2021).
- [3] S. Sohaib, I. Sarwar, M. H. Iftikhar and A. Mahmood, "A low cost smart energy monitoring and control system for smart buildings," 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2016.0598.
- [4] T. M. Serrano, L. C. P. da Silva, L. Pereira, F. Andreoli, T. Ji and F. Fruett, "A Low-cost Smart Plug with Power Quality and Energy Analyzer Features," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST.2019.8849112.
- [5] A. Ravishankar, A. Vignesh, V. Vel, Dhiwaakar Purusothaman S R R and V. Vijayaraghavan, "Low-cost non-intrusive residential energy monitoring system," 2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2014, pp. 130-134, doi: 10.1109/SusTech.2014.7046232.
- [6] A. Baruah, P. R. Borah and D. Chatterjee, "Low-Cost Power Monitoring System," 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 2019, pp. 318-321, doi: 10.1109/PEEIC47157.2019.8976807.
- [7] S. Wasoontarajaroen, K. Pawasan and V. Chamnanphrai, "Development of an IoT device for monitoring electrical energy consumption," 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICITEED.2017.8250475.
- [8] H. Yoon, Y. Jeong, W. Park, J. Han, C. Choi and I. Lee, "A distributed platform for low-cost, energy-efficient, and secure building energy management and control," ICTC 2011, 2011, pp. 274-275, doi: 10.1109/ICTC.2011.6082596.
- [9] The OpenEnergyMonitor project, «OpenEnergyMonitor», <https://openenergymonitor.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [10] Babelbee Project, «Babelbee», <http://www.babelbee.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [11] Eric & Cyril, «foobarflies», <https://www.foobarflies.io/creating-a-simple-energy-monitor/> (accessed: 29.04.2021).
- [12] R. Marek *et al.*, «EVISU: Energievisualisierung Bottom-Up», project report Nr. SI/501815, Swiss Federal Office of Energy, 2020.
- [13] The Things Industries, «Building a global open LoRaWAN network», <https://www.thethingsnetwork.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [14] Influxdata, «Act in Time. Build on InfluxDB.», <https://www.influxdata.com/> (accessed: 29.04.2021).
- [15] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring. GitHub repository», <https://github.com/hslu-ige-laes/lcm> (accessed: 29.04.2021).
- [16] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring. Live demo», <https://hslu-ige-laes.shinyapps.io/lowcostmonitoring/> (accessed: 29.04.2021).