

Schlussbericht, 30. September 2020

Bericht

Low-Cost Gebäudemonitoring System

Mit Unterstützung von



Autoren

Olivier Steiger, Institut für Gebäudetechnik und Energie, Hochschule Luzern

Reto Marek, Institut für Gebäudetechnik und Energie, Hochschule Luzern

Qualitätssicherung: Carina Gubler, Institut für Gebäudetechnik und Energie, Hochschule Luzern

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444, www.infoline.energieschweiz.ch

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch, twitter.com/energieschweiz

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung	6
Sommaire	6
Sommario	6
Einstieg: «Quick Start Guide»	7
1 Einleitung	8
1.1 Zusammenfassung des Projektvorhabens	8
1.2 Projektaufbau	8
1.3 Projektergebnisse	10
1.4 Zweck und Zielpublikum	10
2 Hintergrund	12
2.1.1 Stand der Technik	12
2.1.2 Zählerlandschaft Schweiz	13
3 Anforderungen	14
3.1.1 Zweck des Monitorings	14
3.1.2 Anforderungen	17
3.1.3 Abschätzung der Datenmenge	17
4 Monitoring Hardware	19
4.1.1 Systemarchitektur	19
4.1.2 Messstellen	21
4.1.3 Messmittel	22
5 Monitoring Software	24
5.1 Module	24
5.1.1 Übersicht	25
5.1.2 Room > Temp vs. Hum	27
5.1.3 Room > Room vs. Outside Temp	28
5.1.4 Room > Air Quality	28
5.1.5 Room > Temp Reduction	29

5.1.6	Flat > Electricity.....	30
5.1.7	Flat > Heating.....	30
5.1.8	Flat > Hot Water.....	31
5.1.9	Central > Heating Signature.....	31
5.1.10	Central > Heating Curve.....	32
5.2	Data explorer.....	32
5.3	Einstellungen und Konfiguration.....	33
6	Kostenzusammenstellung.....	34
7	Zusammenfassung und weitere Schritte.....	36
7.1	Zusammenfassung.....	36
7.2	Weitere Schritte.....	36
8	Danksagung.....	37

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface (DE: Anwendungsschnittstelle)
BFE	Bundesamt für Energie
CSV	Comma-Separated Values
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
TTN	The Things Network
PV	Photovoltaik
WAN	Wide Area Network
WP	Arbeitspaket (EN: Work Package)

Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde ein Low-Cost Gebäudemonitoring System auf der Basis von offenen Technologien entwickelt. Die Lösung besteht aus handelsüblichen Messmitteln zur Erfassung von Raumkomfort- und Zählerdaten, sowie aus einer Open-Source Software der Hochschule Luzern. Bei Bedarf kann das System beliebig erweitert werden, bspw. mit Messdaten zum Nutzerverhalten. Mit dem neuen System erhalten interessierten Stellen einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter. Der Preis für ein funktionsfähiges Monitoring liegt dabei deutlich unter CHF 1'000.-

Sommaire

Dans le cadre de ce projet, un système de surveillance des bâtiments à faible coût et basé sur des technologies ouvertes a été développé. La solution consiste en des équipements de mesure disponibles dans le commerce, ainsi qu'un logiciel *open source* développé par la Haute école spécialisée de Lucerne. Si nécessaire, le système peut être étendu en fonction des besoins, par exemple en incorporant des données sur le comportement des utilisateurs. Grâce à ce nouveau système, les partis intéressés obtiennent un aperçu simple et bon marché des paramètres relatifs à la consommation d'énergie et au confort de leurs bâtiments. Le prix d'un système complet et fonctionnel se situe nettement en dessous de 1'000.- francs suisses.

Sommario

In questo progetto è stato sviluppato un sistema di monitoraggio degli edifici a basso costo basato su tecnologie aperte. La soluzione consiste in un'apparecchiatura di misura disponibile in commercio per l'acquisizione del comfort della stanza e dei dati dei contatori, nonché in un software open source della Scuola Universitaria Professionale di Lucerna. Se necessario, il sistema può essere ampliato a piacere, ad esempio con dati di misura sul comportamento dell'utente. Con il nuovo sistema, le parti interessate possono ottenere una visione semplice ed economica dei parametri rilevanti per il consumo energetico e il comfort dei loro edifici. Il prezzo per un sistema di monitoraggio funzionale è notevolmente inferiore a CHF 1'000.-.

Einstieg: «Quick Start Guide»

Um den einfachen Einstieg in das Low-Cost Monitoring zu ermöglichen, ist unter <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/docs/quickStartGuide/> ein «Quick Start Guide» inkl. Beispieldaten zu finden (Abbildung 1). Damit wird der Anwender schrittweise durch die Installation und Konfiguration eines betriebsbereiten Monitoring-Systems geführt. Neben der Einführung sind auch weiterführende Angaben mit Links zur Software-Dokumentation enthalten.

Der Quick Start Guide ist in den Sprachen Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch zugänglich. Dem unerfahrenen Nutzer wird der Einstieg über den Quick Start Guide dringend empfohlen.

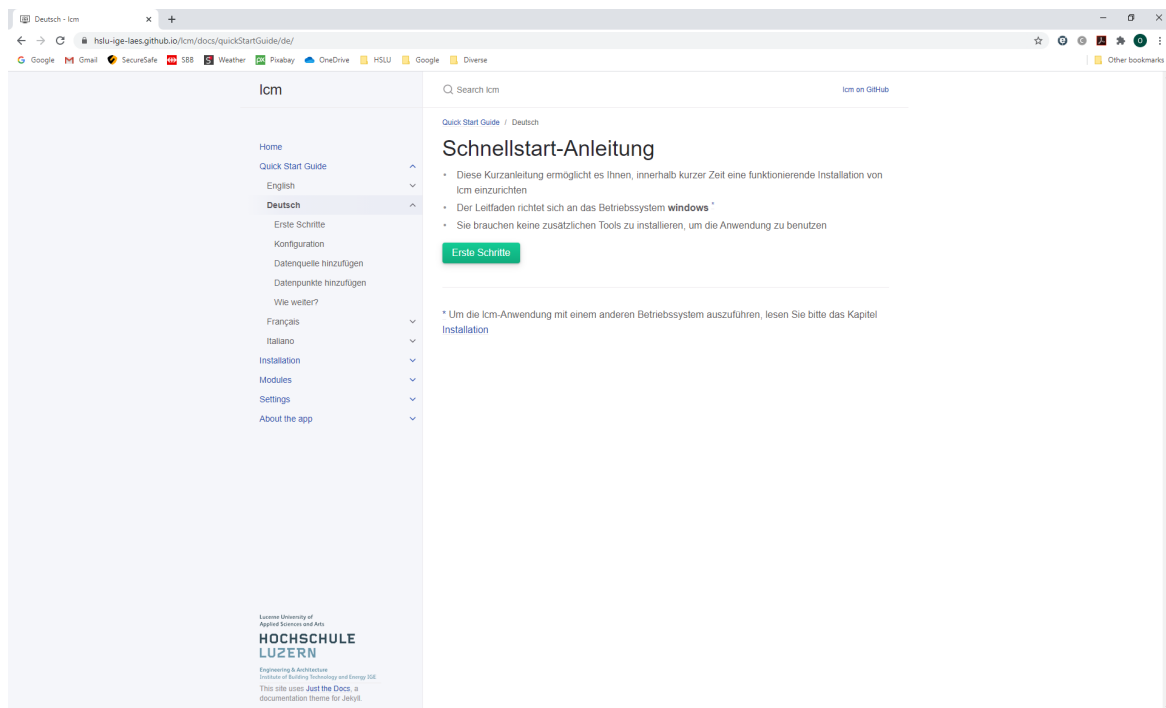


Abbildung 1. Der Quick Start Guide zur lcm Software ermöglicht einen raschen Einstieg in das Low-Cost Monitoring System. Quelle: Hochschule Luzern.

1 Einleitung

1.1 Zusammenfassung des Projektvorhabens

Für den energieeffizienten und komfortablen Betrieb von Gebäuden sind Monitoring Systeme unerlässlich. Im Idealfall soll das Monitoring nicht nur die Energieverbräuche wie z.B. Zählerstände von Strom¹, Gas, Wasser etc. erfassen, sondern auch eine minimale Aussage über das Benutzerverhalten ermöglichen. Nur aus der Kombination von Energieverbrauch und Nutzerverhalten lassen sich Erkenntnisse für die Planung und den Betrieb von Gebäuden ableiten. Ebenso sind die Hintergründe des oft vorhandenen Performance Gaps nur durch die Verbindung von Energie- und Nutzerdaten zu beleuchten.

Heutige Gebäudemonitoring-Lösungen sind oft verhältnismässig teuer bezüglich Hardware, Installation und Unterhalt. Gleichzeitig besteht, besonders für kleinere Bauten, ein Bedarf für preisgünstige Monitoring Systeme. Minergie beispielsweise ist auf der Suche nach Komplett-Lösungen (Messen – Speichern – Visualisieren), die deutlich weniger als CHF 1'000.- kosten.

Mit handelsüblicher Hardware und offener Software (Open-Source) sowie LoRaWAN-Netzwerken – bspw. Low-Power-Network (LPN) von Swisscom oder The Things Network – eröffnen sich neue Möglichkeiten für einfache und preisgünstige Monitoring Systeme. Die LoRaWAN-Technologie bietet die Möglichkeit, Daten aus dem Gebäude zu tiefsten Kosten und mit minimalem Installationsaufwand an eine Datenbank zu versenden und dann individuell auszuwerten.

Im vorliegenden Projekt wurde ein Low-Cost Gebäudemonitoring System auf der Basis von offenen Technologien entwickelt. Das System erfasst Energieverbräuche (Stromverbrauch, Wasserverbrauch, Wärme) und Raumkomfortdaten (Raumtemperatur, Raumluftqualität, Feuchte). Mit dem neuen System erhalten interessierte Personen / Stellen / Verbände einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter. Zielpreis (für Hardware und Software, Installation, Datenübertragung und einfache Datenauswertung): deutlich unter CHF 1'000.-

1.2 Projektaufbau

Im Projekt wurde folgendermassen vorgegangen:

- **Anforderungen** (WP1). In Zusammenarbeit mit Minergie wurden, basierend auf bisherigen Erfahrungen und Erkenntnissen, die Anforderungen an das Monitoring System und dessen Zweck im Detail festgelegt.
- **Stand der Technik** (WP2). Heute und in Zukunft verfügbare Komponenten (Sensoren, Computer, Netzwerk) und Open-Source Programme (zur Datenaufbereitung,

¹ Die Begriffe «Strom», «Stromverbrauch» und «Stromzähler» werden in diesem Dokument im umgangssprachlichen Sinne benutzt und bezeichnen die elektrische Energie bzw. deren Verbrauch und Messung.

Verarbeitung, Visualisierung, Speicherung) wurden begutachtet und im Hinblick auf das zu entwickelnde System bewertet.

- **Monitoring Hardware** (WP3). Es wurden Hardware-Komponenten ausgewählt und zu einem System zusammengefügt, welches den Anforderungen und dem beabsichtigten Zweck genügt.
- **Monitoring Software** (WP4). Die Software zur Aufbereitung, Verarbeitung, Visualisierung und Speicherung der Messdaten wurde implementiert. Dabei wurde ausschliesslich auf Open-Source Lösungen zurückgegriffen.
- **Dokumentation und Dissemination** (WP5). Die Projektergebnisse, insb. Anleitung zur Zusammenstellung und Nutzung des Monitoring Systems, wurden zu einer Projektdokumentation zusammengestellt. Diese soll über die Minergie-Webseite, weitere Fachstellen und Fachpublikationen / Referate verbreitet werden.
- **Bewertung am realen Objekt** (WP6 – allenfalls Subventionsvertrag 2 für das Jahr 2021). Die Tauglichkeit des Monitoring Systems und dessen Eigenschaften sollen an realen Objekten erprobt werden.

Die Meilensteine des Projekts gemäss Subventionsvertrag vom Bundesamt für Energie BFE sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Der entsprechende Projektablauf ist graphisch dargestellt in der Abbildung 2.

Nr.	Datum	Meilenstein
1	01.02.2019	Projektstart
2	31.05.2019	Anforderungen definiert (WP1 abgeschlossen)
3	31.05.2019	Stand der Technik bestimmt (WP2 abgeschlossen)
4	31.12.2019	Monitoring Hardware definiert (WP3 abgeschlossen)
5	30.06.2020	Monitoring Software implementiert (WP4 abgeschlossen)
6	30.09.2020	Evaluation durch Minergie abgeschlossen, Schlussbericht erstellt, Dissemination initiiert (WP5 abgeschlossen)

Tabelle 1. Meilensteine des Projekts gemäss Subventionsvertrag.

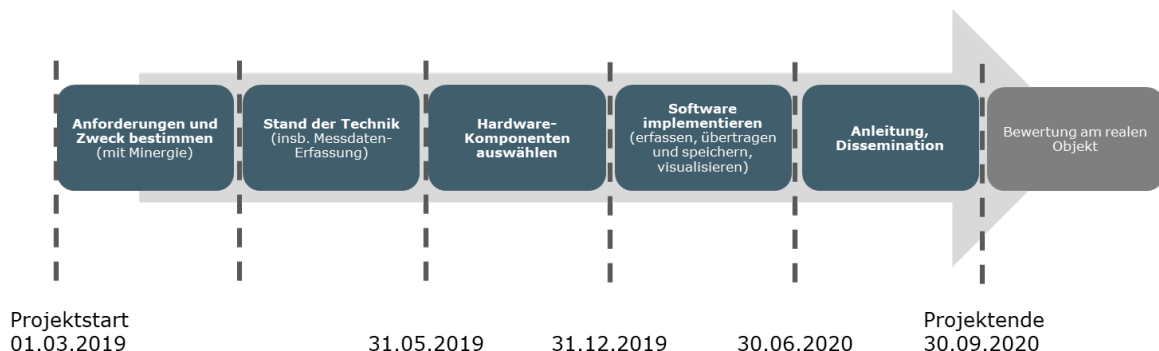


Abbildung 2. Projektablauf. Quelle: Hochschule Luzern.

1.3 Projektergebnisse

Folgende Projektergebnisse wurden erzielt:

- **Anleitung zur Zusammenstellung und Nutzung des Systems.** In der Anleitung wird Schritt für Schritt erklärt, wie die Komponenten zu bestellen, konfigurieren und zusammensetzen sind. Weiter wird die Installation und Nutzung der Open-Source Software, die ebenfalls Teil der Projektergebnisse ist, beschrieben.
- **Open-Source Software.** Zum Low-Cost Gebäudemonitoring System gehört eine Software zur Datenaufbereitung, Verarbeitung, Visualisierung und Speicherung. Diese nutzt ausschliesslich Open-Source Lösungen und wurde in der Programmiersprache R implementiert.
- **Webseite zur Dissemination der Projektergebnisse.** Die Anleitung, Software und Bewertungsergebnisse werden über eine Webseite frei zur Verfügung gestellt. Weiter sind Fachpublikationen und die Dissemination durch Minergie und weitere Fachstellen angedacht.
- **Schlussbericht.** Das vorliegende Dokument.

1.4 Zweck und Zielpublikum

Mit dem neuen Low-Cost Gebäudemonitoring System erhalten interessierten Personen / Stellen / Verbände einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter.

Dieser Vorgang ist beispielhaft dargestellt in der Abbildung 3. Dabei werden Raumtemperaturdaten als Funktion der Zeit über einen Zeitraum von einem Jahr dargestellt. Weiter wird die entsprechende Durchschnittstemperatur im Winterfall berechnet und visualisiert. Ebenfalls angezeigt wird die Zieltemperatur für den energetisch optimalen Betrieb (im Beispiel: 21°C). Aufgrund dieser Darstellung lassen sich Abweichungen zwischen der Zieltemperatur und den Messwerten mühelos erkennen und untersuchen. Die Messwerte entstammen hier einem LoRaWAN-Raumtemperatursensoren.

Das Low-Cost Gebäudemonitoring System richtet sich an folgende Zielgruppen:

- **Energieberater** (öffentlich und privat): Als Grundlage für Energiedienstleistungen, bspw. energetische Betriebsoptimierung
- **Gebäudeverantwortliche** (Städte, Genossenschaften, Liegenschaftsverwaltungen usw.): Zur Überwachung und Optimierung von Liegenschaften
- **Planer und Architekten:** Zur Qualitätskontrolle (insb. Erkennung von Performance-Gap), als Grundlage für weitere Planungen
- **Eigentümer.** Zur Überwachung und Optimierung der eigenen Liegenschaften

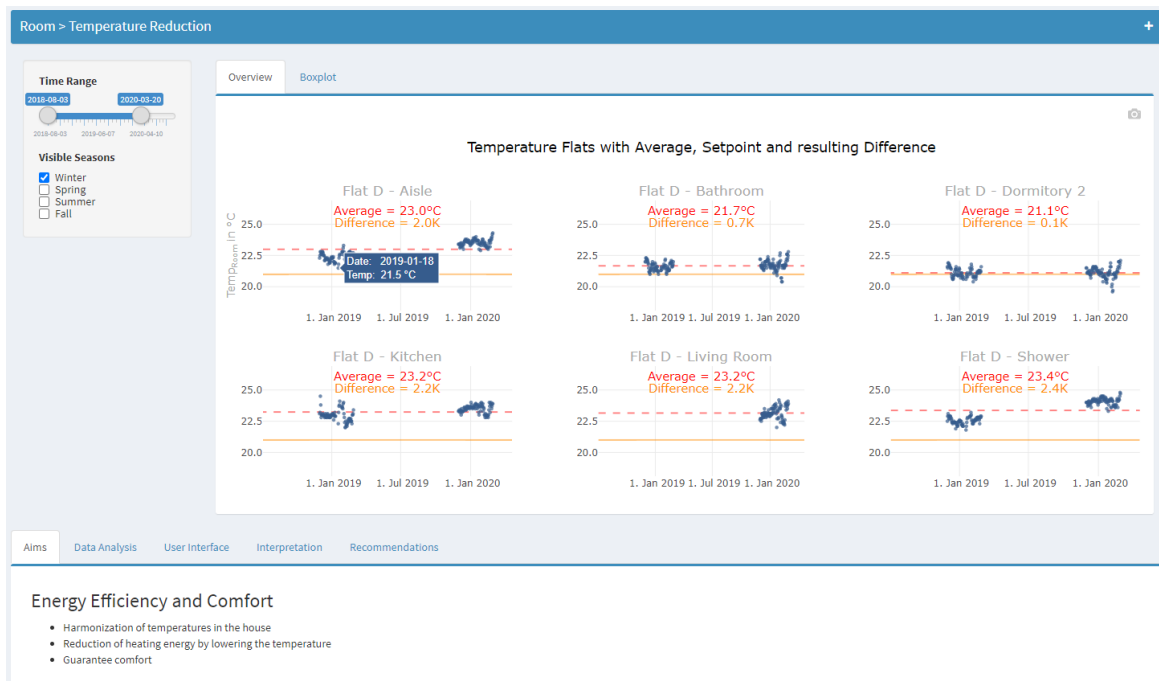


Abbildung 3. Darstellung und Analyse von Raumtemperaturdaten mit dem Low-Cost Gebäudemonitoring System. Folgende Werte werden dargestellt: (Blau) Raumtemperatur-Messwerte für unterschiedliche Räume; (Rote Linie, gestrichelt) Gemessene Durchschnittstemperatur im Winterfall; (Gelbe Linie) Zieltemperatur für den energetisch optimalen Betrieb; (Gelber Text) Abweichung zwischen der gemessenen Durchschnittstemperatur und der Zieltemperatur. Quelle: Hochschule Luzern.

2 Hintergrund

Im Rahmen der Recherche zum Stand der Technik wurden heute und in Zukunft verfügbare Komponenten (Sensoren, Computer, Netzwerk) und Open-Source Programme (zur Datenaufbereitung, Verarbeitung, Visualisierung, Speicherung) begutachtet und im Hinblick auf das zu entwickelnde System bewertet.

2.1.1 Stand der Technik

In einem ersten Arbeitsschritt wurde eine Literatur- und Produktesuche durchgeführt zu den Begriffen *Low Cost Energy Monitoring* und *Open Source Energy Monitoring* (inkl. Varianten der genannten Suchbegriffe). Folgende Ergebnisse sind erwähnenswert:

- https://www.smappee.com/be_en/homepage. Die Firma Smappee bietet mit Smappee Infinity ein System zur Erfassung von Produktions- und Verbrauchsdaten bis hin zum einzelnen Gerät. Insbesondere können Ströme von Erzeugern und Verbrauchern in Echtzeit erfasst und dargestellt werden. Das Gesamtsystem stellt keine Lösung dar für das Low-Cost Monitoring. Dafür sind die Betriebskosten zu hoch (Cloud), und es können keine thermischen Energien und Komfortwerte erfasst werden. Die Komponenten zur Messung von elektrischen Energien sind jedoch interessant.
- <https://openenergymonitor.org/>. Dabei handelt es sich um ein community-basiertes Projekt zur Erfassung von Strom, Temperatur und Feuchte mit Open-Source Hardware und Software. Grundlage dafür ist ein Raspberry Pi-basiertes Messsystem. Dieses kann um verschiedene Strom- und Komfort-Messsensoren sowie um eine Web-App zur Datenverarbeitung und Visualisierung erweitert werden.
- <http://www.babelbee.org/>. Dabei handelt es sich um ein «do it yourself» Energie-Messgerät mit entsprechender Open-Source Software. Der Erstellungsaufwand für die Elektronik ist hoch und damit nicht für das hiesige Projekt geeignet. Der Grundgedanke ist jedoch interessant. Es existieren weitere, ähnliche Projekte (siehe unten).
- <https://www.foobarflies.io/creating-a-simple-energy-monitor/>. Dabei handelt es sich um ein ähnliches Projekt wie babelbee. Als Rechenplattform wird ein Arduino-Controller eingesetzt, gemessen werden elektrische Ströme (direkt am Verteiler) sowie Raumtemperaturen.
- <https://z-wavealliance.org/>. Die Z-Wave Alliance betreibt einen weltweiten Standard für die drahtlose Vernetzung von IoT-Geräten, insb. Sensoren. Einsatzgebiet ist (vorwiegend) die Heimautomation. Verschiedene Hersteller bieten Sensoren an für den Z-Wave Standard, insb. auch zur Erfassung von Raumkomfort und elektrischen Strömen. Diese sollen hier verwendet werden.
- <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7835545>. Kostengünstige Monitoring Systeme wurden auch in verschiedenen, wissenschaftlichen Publikationen untersucht. Die Lösungen sind meist nicht praxistauglich oder auf einzelne Messwerte beschränkt. Sie bilden aber eine nützliche Grundlage für unsere eigenen Entwicklungen.

2.1.2 Zählerlandschaft Schweiz

Im Projekt wird ein Monitoring System angestrebt, womit sich die wichtigsten, elektrischen und thermischen Energieflüsse auf möglichst kostengünstige Art erfassen lassen. Zusätzliche Sensoren und deren Installation und Inbetriebnahme sind, insb. bei thermischen Messwerten, aufwändig und teuer. Deshalb wurde zunächst die Absicht verfolgt, bestehende Messwerte von Strom- und Wärmezählern in das Monitoring einzulesen. Um die Umsetzbarkeit dieser Lösung zu bestimmen, muss zunächst verstanden werden, welche Zähler heute und in Zukunft im Einsatz stehen und welche Schnittstellen diese bieten. Dazu wurde, in Zusammenarbeit mit verschiedenen Energie-Versorgungsunternehmen und Verbänden (VSE, svw-asc), die «Zählerlandschaft Schweiz» erfasst.

Die Ergebnisse zu den thermischen Energiezählern und Wasserzählern sind pendent. Bei den elektrischen Zählern hat sich gezeigt, dass zahlreiche unterschiedliche Typen im Einsatz sind (von elektromechanisch bis Smart), und dass deren Schnittstellen – falls vorhanden – nicht einheitlich und meist nur dem EVU zugänglich sind. Zwar existieren Lösungen (optische Aufsätze, Kameras, M-Bus) zur Zählerauslesung, diese sind aber typenabhängig und i.d.R. aufwändig und teuer im Einsatz. Per 2027 werden in der Schweiz ausschliesslich Smart Meter eingesetzt. Auch dazu sind jedoch bisher die Eigenschaften, Schnittstellen und Zugriffsmöglichkeiten noch nicht im Detail bekannt. Voraussichtlich wird auch bei den Smart Metern keine einheitliche Lösung existieren.

Schlussfolgernd wurde entschieden, im Projekt die Energieflüsse mittels gesonderter Sensorik (induktive Messung für den Strom, nicht-invasive Wärmemessung oder Temperatur-Anlegefühler für die Wärme) zu erfassen.

3 Anforderungen

In Zusammenarbeit mit dem Verein Minergie® und basierend auf bisherigen Erfahrungen und Erkenntnissen, wurden die Anforderungen an das Monitoring System und dessen Zweck im Detail festgelegt.

3.1.1 Zweck des Monitorings

Als Grundlage zur Bestimmung des Zwecks des Low-Cost Monitoring Systems wurden zunächst unterschiedliche, technische Varianten in einer Variantenmatrix zusammengestellt (Abbildung 4). Bei der einfachsten Variante handelt es sich um die manuelle Ablesung von Zählerdaten. Bei der aufwändigsten *High-Cost Monitoring* Variante werden sämtliche Daten automatisiert erfasst, hochgeladen und in einem Dashboard dargestellt. Zu jeder Variante wurden zudem die erforderlichen, technischen Eigenschaften und Parameter bestimmt.

Darauf aufbauend wurden, in Zusammenarbeit mit Fachexperten von der Hochschule Luzern, mögliche Auswertungen von Monitoring-Messdaten bestimmt (d.h. Zweck der Messungen). Die Ergebnisse sind zusammengefasst in der Abbildung 5.

Letztendlich wurden für das Low-Cost Gebäudemonitoring System folgende Hauptziele definiert.

- Gebäudenutzer und -Eigentümer sollen ihren Verbrauch für die Gebäudenutzung kennen und die Möglichkeit haben, Auswirkungen ihres Verhaltens auf die wesentlichen Energieflüsse nachvollziehen zu können;
- Das Monitoring soll nützliche Grundlagen für die Betriebsoptimierung und für den Ersatz gebäudetechnischer Installationen liefern;
- Defekte / falsch eingestellte Haustechnik soll auf Grundlage des Monitorings erkannt werden;
- (Das Monitoring soll ein einfaches Benchmarking ermöglichen).

- Manuelle Ablesung**
- Handablesung, keine HW nötig
 - monatliche Datenerfassung über Zählerstände
 - kein Dashboard
 - manueller Upload auf externen Server
-> dort findet Auswertung und Visu statt
 - Ggf könnte nur eine Excel-Tabelle zum Eintragen mit Visu zur Verfügung gestellt werden

- Low-Cost minimum (Light oder Standard)**
- automatisierte Datenerfassung
 - minimale Anzahl Zähler
 - einfaches Dashboard für Messwerte
 - manueller Upload auf externen Server
-> dort findet Auswertung und Visu statt
 - lokale Anzeige bei Messfehlern

- Low-Cost maximum (Light oder Standard)**
- automatisierte Datenerfassung
 - grosse Anzahl an Messwerten
 - einfaches Dashboard für Messwerte
 - automatischer Upload auf externen Server
-> dort findet Auswertung und Visu statt
 - automatische Alarmierung bei Messfehlern

- High-Cost Monitoring**
- automatisierte Datenerfassung
 - grosse Anzahl an Messwerten
 - Dashboard für Messwerte und Reports
 - automatischer Upload auf externen Server
-> dort finden übergreifende Auswertungen statt
 - automatische Alarmierung bei Messfehlern

Low-Cost Monitoring - Variantenmatrix

Legende:
Vorschlag aus Studie hslu "Minergie: Grundlagen für ein Energie-Monitoring"

Dimension	Ausprägung							
Datenerfassung	Handablesung	Automatisiert						
Messintervall Strom	Jahr	Monat	Tag	1h	15min	häufiger als 15 min	"real-time"/COV	
Messintervall Wärmeverbrauch H & WW	Jahr	Monat	Tag	1h	15min	häufiger als 15 min	"real-time"/COV	
Messintervall Wärmeverbrauch thermische Solaranlage	Jahr	Monat	Tag	1h	15min	häufiger als 15 min	"real-time"/COV	
Messintervall Temp, Feuchte	keine	-	Mittelwert pro Tag	1h	15min	häufiger als 15 min	"real-time"/COV	
Datenspeicherung	keine	nur lokal	lokal und externer Server	nur externer Server				
Daten-Export an externen Server	keiner	manuell	automatisiert					
Daten-Export Intervall an externen Server	nie	jährlich	monatlich	täglich	15min	häufiger als 15 min	"real-time"/COV	
User-Feedback-Visualisierung	keine	Dashboard Messwerte	Dashboard mit vordefinierten einfachen Diagrammen	detaillierte Reports mit Diagrammen				
User-Feedback Art	Zählerstand am Zähler	Web-Page auf Logger	App auf Mobiltelefon	Web-Portal auf externem Server				
Alarmierung bei Messfehlern	keine	Fehler-Anzeige lokal	Alarmierung per E-Mail					

Abbildung 4. Variantenmatrix des Low-Cost Gebäudemonitoring Systems. Die Eigenschaften und Parameter der unterschiedlichen Varianten wurden farblich markiert. Quelle: Hochschule Luzern.

Komponenten / Datenpunkte / Daten	Analysen / Auswertungen
Basis - Stromproduktion- und verbrauch (kWh) <ul style="list-style-type: none"> - Stromverbrauch Haushalt - Strom +/- Photovoltaik - Stromverbrauch Wärmepumpe/Holzheizung - Stromverbrauch Warmwasser - Stromverbrauch Heizbänder für WW-Zirkulation - Stromverbrauch Elektroheizstab (Legionellenschaltung) - Strom +/- Ladestation für E-Fahrzeuge? - Strom +/- Gesamtzähler? 	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleich Planungsgrundlagen - Realität -> ist dies überhaupt erwünscht? - Vergleich zu Vorjahresmesswerten und mehrjährigen Mittelwerten - Analyse Eigenstromverbrauchsanteil im Monats/Jahresmittel - Tagesverbräuche Haushaltstrom (Mittelwerte) - Standby-Verlust-Abschätzung - Analyse Eigenstromverbrauch auf Lastprofil-Basis -> Lastprofil Tagesverbrauch inkl. Ertrag/Überschuss PV - Einschalthäufigkeit der WP betrachten - grössere periodisch erscheinende Verbraucher erkennen
Erweiterung - Wärmeverbrauch (kWh) <ul style="list-style-type: none"> - Wärmeverbrauch Heizung - Wärmeverbrauch Warmwasser - Wärmeproduktion der thermischen Solaranlage 	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleich Planungsgrundlagen - Realität - Vergleich zu Vorjahresmesswerten und mehrjährigen Mittelwerten -> "Klimabereinigung" möglich
Erweiterung - Raumkomfort <ul style="list-style-type: none"> - Raumtemperaturen - Raumluftfeuchte - CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Behaglichkeits-Betrachtungen (Minergie-Bauten sind oft zu trocken) - Hinweise für sommerlichen Wärmeschutz - Energie-Einsparpotential berechnen wenn Raumtemperaturen zu hoch sind. - ggf. Betrachtung ob sich Enthalpie-Wärmetauscher lohnen könnte im Lüftungsgerät
Erweiterung - Aussenklima <ul style="list-style-type: none"> - Aussen-Temperatur - Aussenluft-Feuchte - Sonnenstunden? Solarstrahlung W/m² ? 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse Einstellung Heizkurve/Heizgrenze - Analyse passive Energienutzung (Beschattung gut bedient?)
Erweiterung - Wasserverbrauch (m³) <ul style="list-style-type: none"> - Warmwasserverbrauch - Kaltwasserverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> - Lastgänge Wasserverbrauch pro Wohnung - Vergleich mit durchschnittlichem Verbrauch vergleichbarer Objekte/Haushalte - Sensibilisierung über Energie im Warmwasser - Beurteilung ob eingebauter Speicher vom Volumen her ausreichend ist
Erweiterung - Kontrollierte Wohnungslüftung <ul style="list-style-type: none"> - Volumenströme über Drehzahl oder Stromaufnahme - Lufttemperaturen (AUL, ZUL, ABL, FOL) - Filterverschmutzung 	<ul style="list-style-type: none"> - Betrachtung ob Zeitschaltprogramme richtig eingestellt sind. Präsenzinfo rausnehmen. - läuft Lüftung immer durch? - Volumenströme vergleichen mit Theorie/Antrag
Erweiterung - Stromverbrauch Beleuchtung <ul style="list-style-type: none"> - detaillierte Strommessungen 	
Erweiterung - Fensterkontakte? <ul style="list-style-type: none"> - Fensterkontakte 	

Abbildung 5. Mögliche Auswertungen von Gebäudemonitoring-Messdaten. Quelle: Hochschule Luzern.

3.1.2 Anforderungen

In Zusammenarbeit mit Minergie wurden folgende Anforderungen an das Low-Cost Gebäudemonitoring festgelegt.

- Es sollen mindestens die folgenden Energieflüsse separat gemessen werden können:
 - Elektrische Energie ohne Wärmeerzeugung: Messung pro Nutzungseinheit gemäss Verrechnung durch Elektrizitätslieferant (Allgemeinstrom, Wohnungen, Läden etc.)
 - Endenergieverbrauch für Raumheizung und Wassererwärmung pro Heizsystem
 - Nutzenergie von Heizwärme und Warmwasser (je eine zentrale Messstelle) für das Gebäude
 - Kühlung / Klimatisierung bei Zweckbauten
 - Gebäudeeigene Energieproduktion (Photovoltaik, Solarthermie, Wärme-Kraft-Kopplung)
- Es muss ein Vergleich zu Vorjahresmesswerten und mehrjährigen Mittelwerten ermöglicht werden;
- Messungen der elektrischen Energie müssen mindestens Tages-Verbrauchsprofile abbilden;
- Die Messdaten müssen mindestens als Monats- und Jahresdaten ausgewiesen und in leicht verständlicher Form grafisch dargestellt werden;
- Die Visualisierung muss automatisch erfolgen oder in einfach zu handhabenden Abläufen machbar sein;
- Auf wichtige Rahmenbedingungen und Besonderheiten soll in der Visualisierung hingewiesen werden.

Die genannten Anforderungen entsprechen denjenigen des neuerstellten Minergie-Moduls Monitoring.

3.1.3 Abschätzung der Datenmenge

Zusätzlich zu den grundsätzlichen Anforderungen in Ziffer 3.1.2 wurde die Datenmenge abgeschätzt, welche durchschnittlich bzw. maximal beim Einsatz des Low-Cost Monitorings anfallen kann. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches Excel-Werkzeug entwickelt (Abbildung 6). Damit lässt sich nach der Eingabe der Raumanzahl, Zählerstruktur, Messintervalle und Messdauer die Gesamtmenge der anfallenden Messwerte berechnen.

Das Beispiel in der Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für ein kleineres Gebäude mit 20 Räumen und eine Messdauer von 3 Jahren. Dabei werden in jedem Raum die Raumtemperatur, Raumfeuchte und Raumluftqualität erfasst. Zusätzlich werden sieben Stromzähler (Allgemeinstrom plus elektrische Energie pro Wohnung), ein Aussentempersensor, zwei Wärmezähler (Erzeugung Heizung und Warmwasser) und ein Anlegefühler für die

Vorlauftemperatur am Heizkreis eingesetzt. Alle Werte werden im Viertelstundentakt erfasst. Über die gesamte Messdauer fallen ca. 7.5 Mio. Rohdatenwerte an. Dies entspricht, bei 32-bit Daten und ohne Zeitstempel sowie weitere Metadaten, einer Datenmenge von etwa 28 Megabyte. Solche Datenmengen können i.d.R. problemlos abgespeichert, dargestellt und verarbeitet werden.

Datenabschätzung Low Cost Monitoring					Räume	Anzahl	Werte pro Tag	Anzahl Jahre	3	15-Min	1h	Tag	Woche	Monat
Anzahl Räume	20				Temperatursensoren	20	1'920	2'102'400	28%	2'102'400	525'600	21'900	3'180	720
					Feuchtesensoren	20	1'920	2'102'400	28%	2'102'400	525'600	21'900	3'180	720
					CO2-Sensoren	20	1'920	2'102'400	28%	2'102'400	525'600	21'900	3'180	720
Intervalle	Minuten	Stunde	Tag		Stromzähler	7	672	735'840	10%	735'840	183'960	7'665	1'113	252
Raumsensoren	15	4	96		Aussentemperatur	1	96	105'120	1%	105'120	26'280	1'095	159	36
Stromzähler	15	4	96		Vorlauftemperatur	1	96	105'120	1%	105'120	26'280	1'095	159	36
Meteo-Sensoren	15	4	96		Wärmezähler	2	192	210'240	3%	210'240	52'560	2'190	318	72
Vorlauftemperatur	15	4	96											
Wärmezähler	15	4	96											
								7'463'520		7'463'520	1'865'880	77'745	11'289	2'556
Aggregationen	5 Jahre				Fazit									
15-min-Werte	175'200				- Rohdaten nur in einem speziellen Graph anzeigen, zu gross; oder für spezielle Analysen nach Bedarf									
1h-Werte	43'800				- In Diagrammen und Analysen unbedingt mit aggregierten Werten arbeiten									
Tageswerte	1'825				- die meisten Analysen kommen wohl mit Tagesaggregationen zurecht									
Wochenwerte	265				- Rohdaten eines Sensors können in einem csv-File gespeichert werden (5 Jahre, 15min -> 175'200 Wertepaare)									

Abbildung 6. Screenshot des Excel-Werkzeugs zur Abschätzung der anfallenden Datenmenge. Nach Eingabe der Raumanzahl, Zählerstruktur, Messintervalle und Messdauer lässt sich damit die Gesamtmenge der anfallenden Messwerte berechnen. Quelle: Hochschule Luzern.

4 Monitoring Hardware

In diesem Kapitel wird die Auswahl geeigneter Messmittel für das Low-Cost Gebäudemonitoring beschrieben. Zunächst wurde eine geeignete Systemarchitektur definiert. Danach wurden Messstellen und die entsprechenden Messmittel ausgewählt. Dabei stand jeweils der Zweck des Monitorings im Vordergrund (Ziffer 3.1.1).

4.1.1 Systemarchitektur

Monitoring Systeme können unterschiedliche Systemarchitekturen aufweisen (Abbildung 7). Bei der Variante «konventionell» werden die Energiemessgeräte lokal (d.h. innerhalb vom Gebäude / Areal) vernetzt, bspw. über Z-Wave, WLAN / MQTT, EnOcean oder M-Bus. Die Messdaten werden dabei ebenfalls lokal abgespeichert und müssen vor Ort abgeholt werden. Diese Variante bietet einen zuverlässigen Datenschutz, weil kein Zugang zu einem öffentlichen Netz stattfindet. Entsprechend aufwändig ist das Abholen der Daten. Bei der Variante «lokale Vernetzung» werden die Energiemessgeräte ebenfalls lokal vernetzt. Die Messdaten werden jedoch durch das Gateway in ein öffentliches Netz eingespeist und können fernausgelesen werden. Hier ist also der Cloud-Zugang (in Echtzeit) auf die aktuellen, erfassten Daten möglich. Bei der Variante «Vernetzung über Funk» werden die unterschiedlichen Sensoren direkt mit einem öffentlichen Netzwerk verbunden, bspw. LoRaWAN oder 4G / 5G. Es ist also nicht erforderlich, vor Ort ein Netzwerk aufzubauen, was i.d.R. die Inbetriebnahme stark vereinfacht. Umgekehrt muss die Netzabdeckung durch das öffentliche Netz gegeben sein.

Für das Low-Cost Monitoring wurde die Variante «Vernetzung über Funk» ausgewählt. Die Begründung dafür ist, dass (i) Nach der Inbetriebnahme keine weiteren Eingriffe vor Ort durchgeführt werden müssen (bspw. abholen der Messdaten); (ii) Die aktuellen Messdaten stetig über den Fernzugriff zur Verfügung stehen; (iii) Vor Ort kein Netzwerk aufgebaut bzw. kein bestehendes Netzwerk (bspw. WLAN) genutzt werden muss.

Die Architektur des Low-Cost Monitoring Systems ist in der Abbildung 8 dargestellt. Die Messwerte erreichen die Monitoring-Software (Kapitel 5) über drei verschiedene Pfade: (i) LoRaWAN; (ii) CSV-Datenfile; (iii) Direktzugriff auf eine Datenbank. Hauptpfad ist das Funknetz LoRaWAN. Die einzelnen Messmittel (Sensoren) werden direkt bzw. über ein lokales Gateway mit dem öffentlichen LoRaWAN-Netz «The Things Network» (TTN) verbunden. Die Nutzung von TTN ist kostenlos, die Einbindung der Messmittel einfach. Zudem bietet TTN einen Cloud-Messdatenspeicher mit einem Fassungsvermögen von sieben Tagen an. Damit wird der Datenverlust bei vorübergehendem Ausfall der Low-Cost Monitoring-Software vermieden. Der Datenverkehr innerhalb von TTN ist dargestellt in Abbildung 9.

Nebst der Verbindung über das LoRaWAN-Funknetz können die Messdaten auch direkt aus einer CSV-Datei oder aus einer Zeitreihendatenbank eingelesen werden. Damit wird bspw. der Import von EVU-Daten ermöglicht.

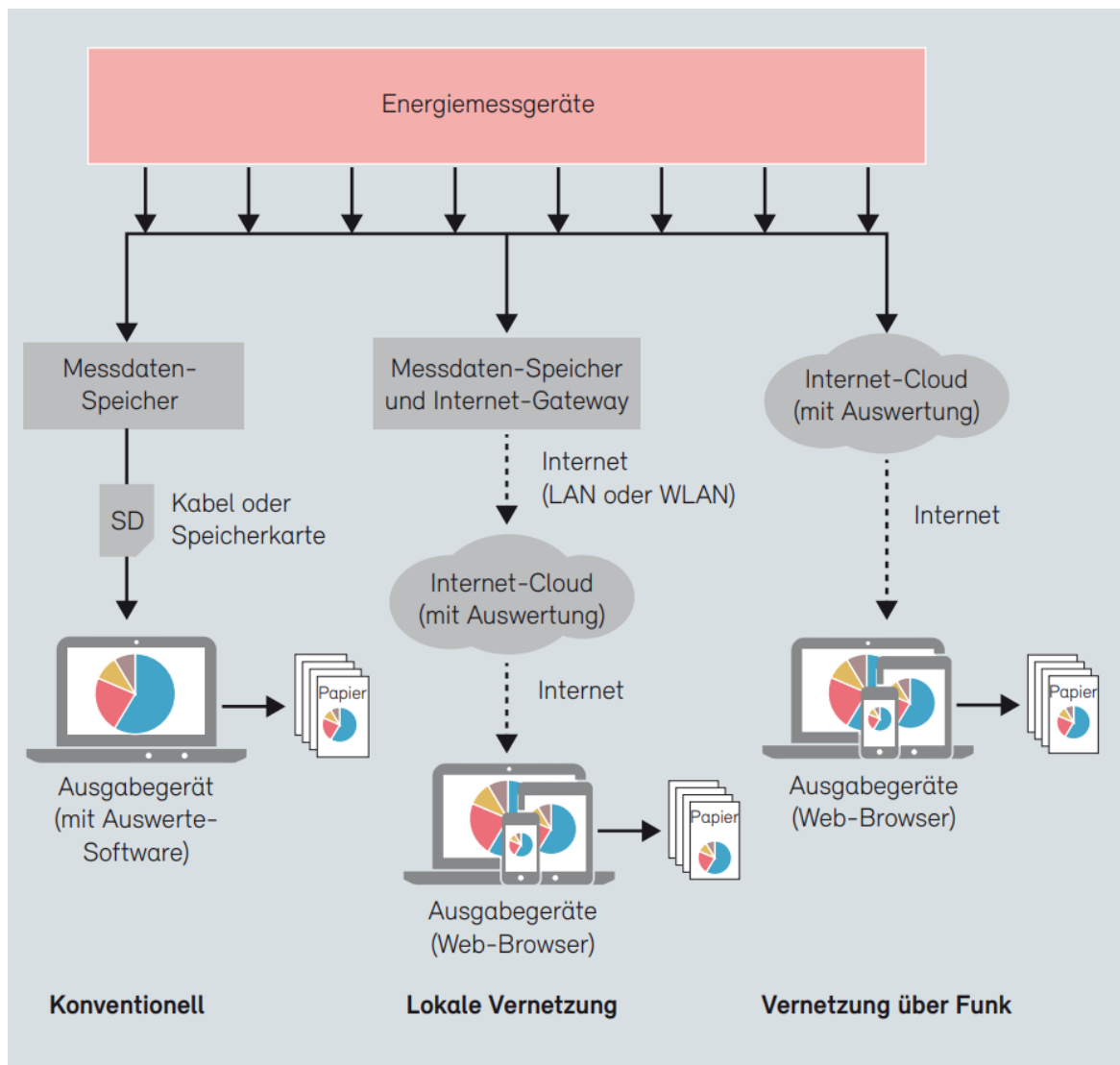


Abbildung 7. Unterschiedliche Systemarchitekturen für Monitoring Systeme. Konventionell: Daten werden vor Ort abgeholt. Lokale Vernetzung: Daten werden fernausgelesen; Netzwerk wird lokal aufgebaut. Vernetzung über Funk: Daten werden fernausgelesen; öffentliches Netzwerk wird genutzt (bspw. LoRaWAN). Quelle: Verein Minergie®.

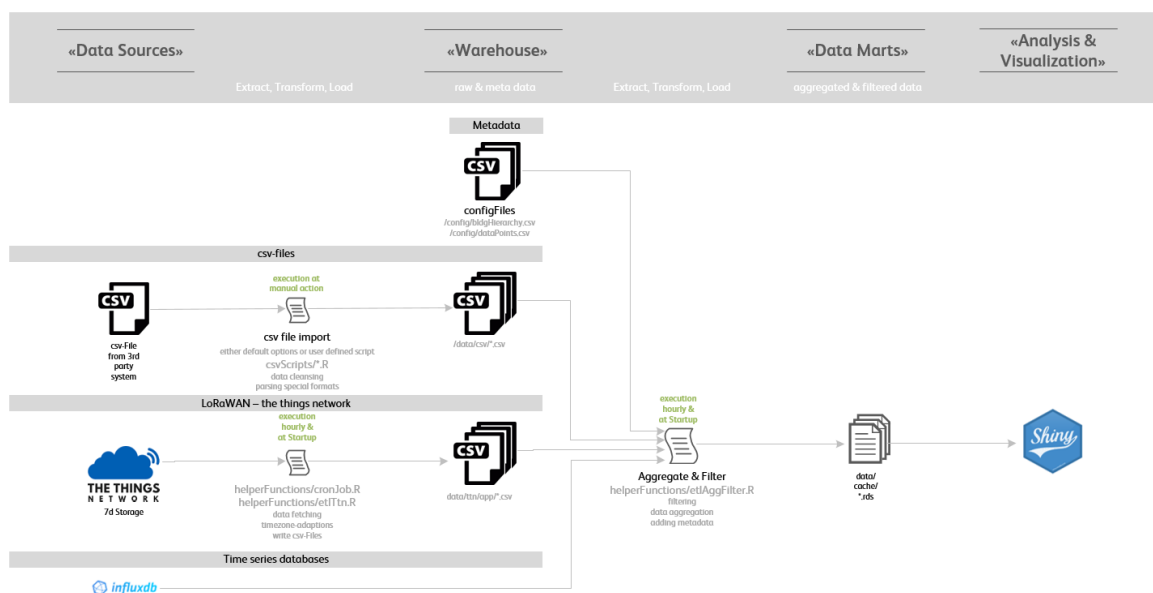


Abbildung 8. Architektur des Low-Cost Monitoring Systems. Die Messwerte erreichen die Monitoring-Software über drei verschiedene Pfade: (i) LoRaWAN; (ii) CSV-Datenfile; (iii) Direktzugriff auf eine Datenbank. Quelle: Hochschule Luzern.

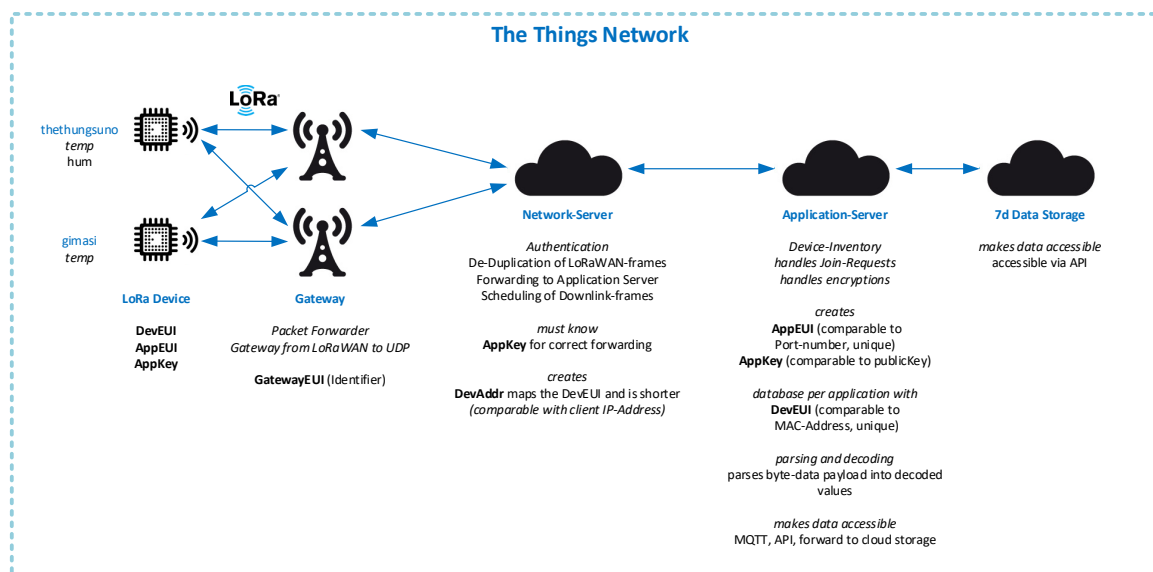


Abbildung 9. Datenverkehr innerhalb von The Things Network. Die einzelnen Messmittel werden über Gateways mit den öffentlichen TTN-Netzwerkserver verbunden. Dort werden die Daten ausgelesen, in ein einheitliches Format gebracht, weitergegeben an den Applikationsserver und letztendlich ausgegeben (bspw. an die Low-Cost Monitoring-Software) über eine API. Quelle: The Things Network.

4.1.2 Messstellen

Die Architektur des Low-Cost Gebäudemonitoring Systems (Ziffer 4.1.1) und die dazugehörige Software (Kapitel 5) lassen die Einbindung beliebiger Messstellen zu. Einzige Voraussetzung ist, dass die entsprechenden Messmittel bzw. Messdaten über LoRaWAN, CSV-Dateien und/oder eine Zeitreihen-Datenbank eingelesen werden können. Damit ist das Low-Cost Monitoring vom Prinzip her modular aufgebaut. D.h. es können nach Bedarf beliebige Messmittel und Messdaten hinzugefügt werden.

In der vorliegenden Implementierung des Low-Cost Monitoring Systems wurden die Messstellen entsprechend den für sinnvoll erachteten Auswertungen, hier bezeichnet als «Module» (Ziffer 5.1), festgelegt. Jedes Modul entspricht einer möglichen Auswertung der erfassten Monitoring-Daten. Die implementierten Module sind übersichtlich dargestellt in der Tabelle 2.

Folgende Messstellen sind für die implementierten Module erforderlich:

- Raumtemperatur (mind. in einem Raum, bspw. Wohnzimmer, Schlafzimmer)
- Raumfeuchte (mind. in einem Raum, bspw. Wohnzimmer, Schlafzimmer)
- Raumluftqualität CO₂ (mind. in einem Raum, bspw. Schlafzimmer)
- Aussentemperatur
- Stromverbrauch pro Wohnung / Einheit
- Wärmeverbrauch Heizung pro Wohnung / Einheit
- Verbrauch Warmwasser pro Wohnung / Einheit
- Energieverbrauch Zentralheizung
- Vorlauftemperatur Zentralheizung

Bei Bedarf können weitere Messstellen ins System integriert werden, beispielsweise:

- Allgemeinstrom
- Stromverbrauch Wärme- / Kälteerzeuger
- Stromproduktion Photovoltaik
- Wärme- / Kälteerzeugung Zentralheizung bzw. Kühlung
- Nutzerverhalten pro Raum (Präsenz, Fenster- und Türkontakt)

4.1.3 Messmittel

Anlässlich der Recherchen zum Stand der Technik (Ziffer 2.1.2) wurde festgestellt, dass die Messdaten i.d.R. nicht von bestehenden Strom- und Wärmemessgeräten abgegriffen werden können. Deshalb wurde beschlossen, das Low-Cost Monitoring System soweit als möglich autark aufzubauen. D.h. die erforderlichen Messdaten werden vor Ort über einfach zu installierende und drahtlos kommunizierende Messmittel erfasst.

Um die Kosten zu minimieren, werden wenn immer möglich nichtinvasive Messmittel eingesetzt (Abbildung 10). Dadurch wird der Aufwand für den Einbau gesenkt, weil dieser durch den Endnutzer vorgenommen werden kann und keine Strom- bzw. Wärme-Leitungen unterbrochen werden müssen. Für Strommessungen sind induktive Messfühler erhältlich. Diese können über die Protokolle MQTT (Smappee), Z-Wave (Aotec) oder LoRaWAN (Adeunis) ausgelesen werden. Für Raumbehaglichkeitsmessungen sind sowohl Sensoren erhältlich, welche die in der Gebäudeautomation gebräuchlichen Schnittstellen (0-10V, KNX, Modbus, LON usw.) unterstützen, wie auch drahtlose Sensoren, bspw. für LoRaWAN, EnOcean und Z-Wave.

Komplizierter ist der Sachverhalt bei der Wärmemessung. Zwar sind nichtinvasive Messmethoden möglich: Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturmessung mittels Anlegefühler (bspw. Avelon Thermosense), Durchflussmessung mit Ultraschall. Diese Methoden sind aber i.d.R. teuer und abhängig vom Wärmemedium, Rohrdurchmesser, Material usw. Zudem sind bisher wenig Produkte erhältlich für den gebäudetechnischen Einsatz.

In der vorliegenden Implementierung des Low-Cost Monitoring Systems werden folgende Messmittel eingesetzt:

- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Standard*
→ Raumtemperatur, Raumfeuchte
- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Carbonsense*
→ Raumtemperatur, Raumfeuchte, Raumluftqualität CO₂
- Klimasensor *Dragino – LHT65*
→ Aussentemperatur, Vorlauftemperatur Zentralheizung
- Impulszähler² *nke WATTECO – Flash'O*
→ Stromverbrauch pro Wohnung, Wärmeverbrauch Heizung pro Wohnung, Verbrauch Warmwasser pro Wohnung, Energieverbrauch Zentralheizung
- Datenimport aus CSV-Datei oder InfluxDB
→ Sämtliche Messgrößen können auch importiert werden

Detaillierte Angaben zu den eingesetzten Messmitteln sind online zu finden unter folgendem Link: <https://hslu-ige-laes.github.io/lora-devices-ttn/>.



Abbildung 10. Nichtinvasive Messmittel für Gebäudemonitoring Systeme. Links: Induktive Strommessung. Mitte: Drahtloser Raumbehaglichkeitssensor. Rechts: Nichtinvasive Wärmemessung (Attrappe). Quellen: Smappee, Avelon Cetex.

² Der Impulszähler dient der Auslesung von bestehenden Zählern (Strom, Wärme, Wasser) über die LED-Schnittstelle.

5 Monitoring Software

Das Low-Cost Gebäudemonitoring System soll durch den Laien entsprechend einer Anleitung zusammengestellt und in Betrieb gesetzt werden können (Ziffer 1.1). Entsprechend müssen alle Arbeitsschritte einfach und eindeutig nachvollziehbar sein: Einkauf und Installation der Messgeräte, Herunterladen und Konfiguration der Software, Inbetriebnahme, Nutzung. Um dies sicherzustellen, wurde bereits zu Beginn des Projekts ein Software-Funktionsmuster erstellt und stetig weiterentwickelt.

Die daraus entstandene Low-Cost Gebäudemonitoring-Software «lcm» der Hochschule Luzern besteht aus unterschiedlichen Modulen und den dazugehörigen Konfigurations- und Hilfsfunktionen. Jedes Modul entspricht einer möglichen Auswertung der Monitoring-Daten (Tabelle 2). Zudem bietet die Software alle notwendigen Konfigurationsfunktionen zur Einbindung der Messmittel (Ziffer 4.1.3) und zur Definition des überwachten Objektes. Die Software wurde in der Programmiersprache R entwickelt und ist öffentlich zugänglich (inkl. Quellcode) über die Entwicklungsplattform GitHub.

In der Folge werden die Module und weitere Funktionen der lcm Software zusammenfassend beschrieben. Die detaillierte Software-Dokumentation mit weiteren Angaben ist online zu finden unter folgendem Link: <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/>.

5.1 Module

Die Struktur der lcm Gebäudemonitoring-Software sollte sich an deren Nutzung durch das Zielpublikum orientieren (Ziffer 1.4). Um dies zu erreichen, wurden die verschiedenen, möglichen Auswertungen der erfassten Monitoring-Daten unterschiedlichen «Modulen» zugewiesen. Jedes Modul entspricht damit einer möglichen Auswertung bzw. Nutzung der Daten. Die Module werden durch den Nutzer entsprechend dem beabsichtigten Zweck aufgerufen.

Der Aufbau der lcm Software ist in der Abbildung 11 ersichtlich. Links im Menu werden die unterschiedlichen Module sowie der Data Explorer und die Einstellungen der Software ausgewählt. Rechts im Hauptfenster werden die entsprechenden Auswertungen grafisch dargestellt, zusammen mit der Dokumentation und Hinweisen auf mögliche Optimierungsschritte.

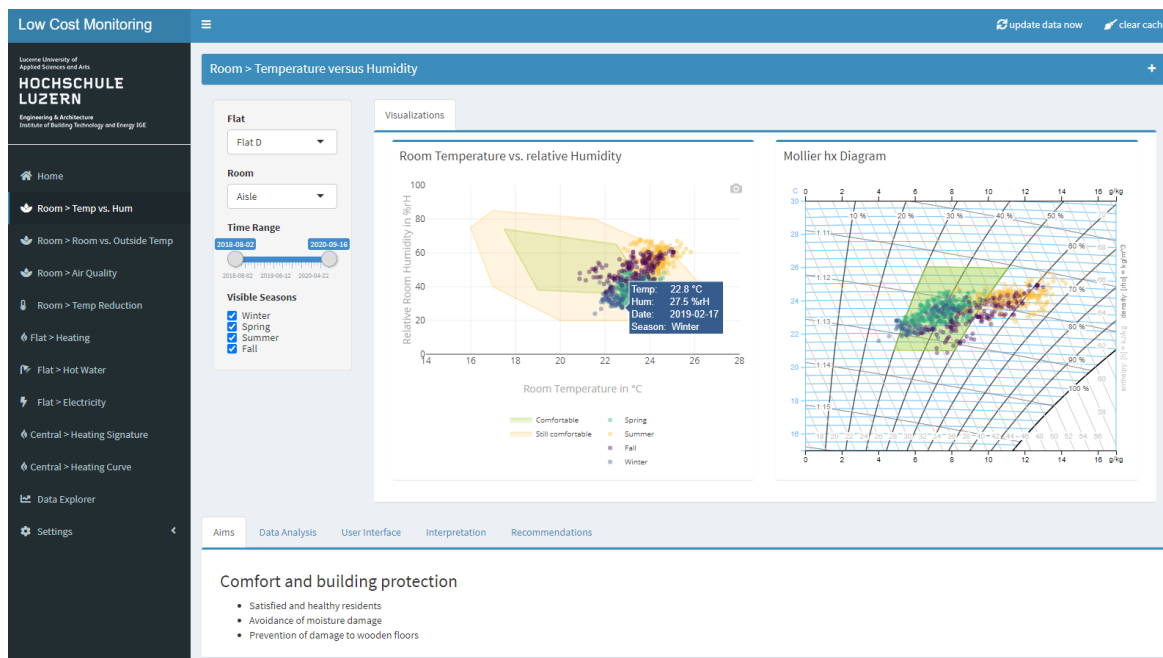


Abbildung 11. Screenshot der lcm Monitoring-Software der Hochschule Luzern. Links im Menu werden die unterschiedlichen Module sowie der Data Explorer und die Einstellungen der Software ausgewählt. Rechts im Hauptfenster werden die entsprechenden Auswertungen grafisch dargestellt, zusammen mit der Dokumentation und Hinweisen auf mögliche Optimierungsschritte. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.1 Übersicht

Alle Module des Low-Cost Monitoring Systems sind in der Tabelle 2 übersichtlich dargestellt. Jedes Modul wird in der Folge eingehender erläutert. Der vollständige Beschrieb der einzelnen Module ist der Software-Dokumentation zu entnehmen unter <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/>.

Modul	Zweck	Visualisierungen	Datenpunkt(e)	Messebene
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	Raum
Room > Room vs. Outside Temp	Reduktion der Überhitzungsstunden	-Raum- vs. Aussentemperatur	-Raumtemperatur -Aussentemperatur	Raum
Room > Air Quality	Komfortanalyse bezüglich Raumluftqualität (oft problematisch in Schlafzimmern)	-CO ₂ vs. Zeit -Untere und obere Quantile	-Raumluftqualität (CO ₂)	Raum
Room > Temp Reduction	Reduktion Heizenergie durch Senkung der Raumtemperatur	-Raumtemperatur vs. Zeit -Durchschnitt, Sollwert, Abweichung	-Raumtemperatur	Raum
Flat > Electricity	Analyse und Optimierung Stromverbrauch Untersuchung Standby-Verbrauch	-Tagesverbrauch vs. Zeit -Standby-Verbrauch	-Stromverbrauch Wohnung	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	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	Wohnung
Central > Heating Signature	Analyse der Gebäudesignatur Berechnung der effektiven Heizgrenze	-Signatur Heizung	-Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur	Gebäude
Central > Heating Curve	Analyse und Optimierung der Heizkurve	-Heizkurve (effektiv)	-Vorlauftemperatur Zentralheizung -Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur	Gebäude

Tabelle 2. Module des Low-Cost Monitoring Systems. Jedes Modul entspricht einer möglichen Auswertung der Monitoring-Daten und verfügt über eine eigene Visualisierung in der lcm Software. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.2 Room > Temp vs. Hum

Ziel dieses Moduls ist eine Komfortanalyse bezüglich Feuchte und Temperatur (Überhitzung, Schimmelproblematik, trockene Luft im Winter). Angezeigt wird die gemessene Luftfeuchte als Funktion der Raumtemperatur, sowie das Mollier-h,x-Diagramm (Abbildung 12). Letzteres beschreibt Zustandsänderungen feuchter Luft durch Erwärmung, Befeuchtung, Entfeuchtung, Kühlung und Mischung verschiedener Luftmengen.



Abbildung 12. Modul Room > Temp vs. Hum (Screenshot). Mit diesem Modul wird eine Komfortanalyse bezüglich Feuchte und Temperatur vorgenommen. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.3 Room > Room vs. Outside Temp

Mit diesem Modul werden Überhitzungsstunden sichtbar gemacht und können entsprechend reduziert werden (Abbildung 13).



Abbildung 13. Modul Room > Room vs. Outside Temp (Screenshot). Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.4 Room > Air Quality

Mit diesem Modul wird eine Komfortanalyse bezüglich der Raumluftqualität durchgeführt. Diese ist insb. in mechanisch belüfteten Wohnzimmern oft problematisch. Visualisiert werden die aggregierte Luftqualität als Funktion der Zeit sowie ein vorangestellter Grenzwert (Abbildung 14).

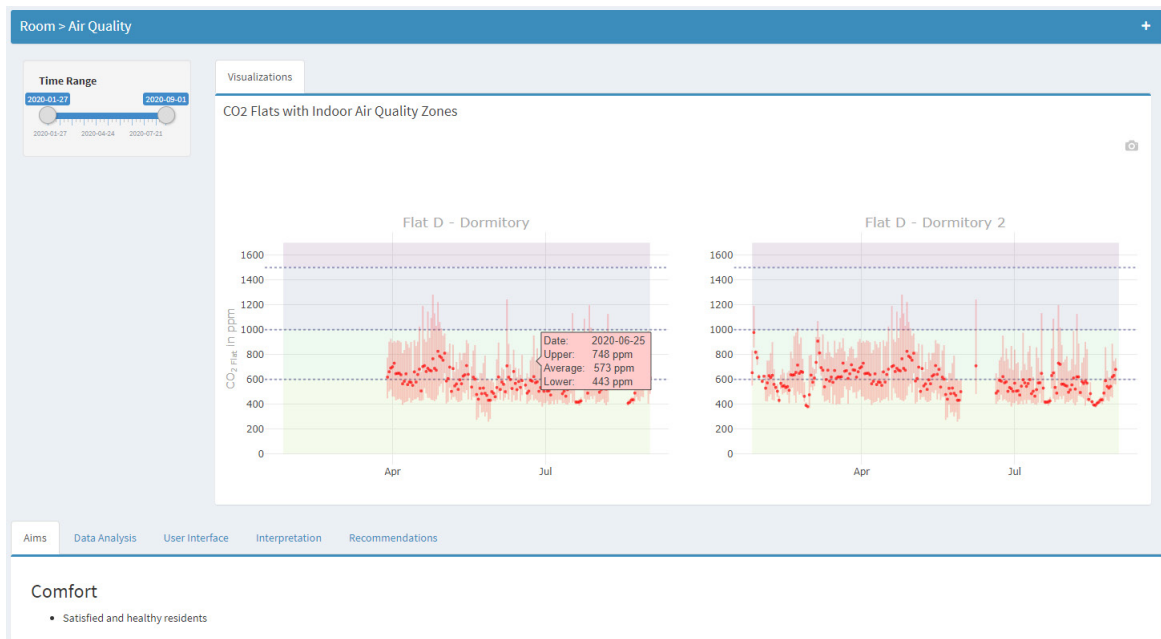


Abbildung 14. Modul Room > Air Quality (Screenshot). Mit diesem Modul wird eine Komfortanalyse bezüglich der Raumluftqualität durchgeführt. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.5 Room > Temp Reduction

Mit diesem Modul wird die tatsächliche Raumtemperatur überwacht mit dem Ziel, diese einem vorgegebenen Sollwert anzugleichen, bspw. gemäss SIA 380/1. Angezeigt werden jeweils die Durchschnittstemperatur Winter, der Sollwert sowie die Differenz zwischen diesen Werten. Ebenfalls angezeigt werden die aggregierten Messwerte als Funktion der Zeit (Abbildung 15).



Abbildung 15. Modul Room > Temp Reduction (Screenshot). Mit diesem Modul wird die tatsächliche Raumtemperatur überwacht mit dem Ziel, diese einem vorgegebenen Sollwert anzugleichen. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.6 Flat > Electricity

Mit diesem Modul wird der Heizenergieverbrauch pro Wohnung untersucht. Angezeigt werden der Tagesverbrauch als Funktion der Zeit, sowie der geschätzte Standby-Verbrauch (Abbildung 16).

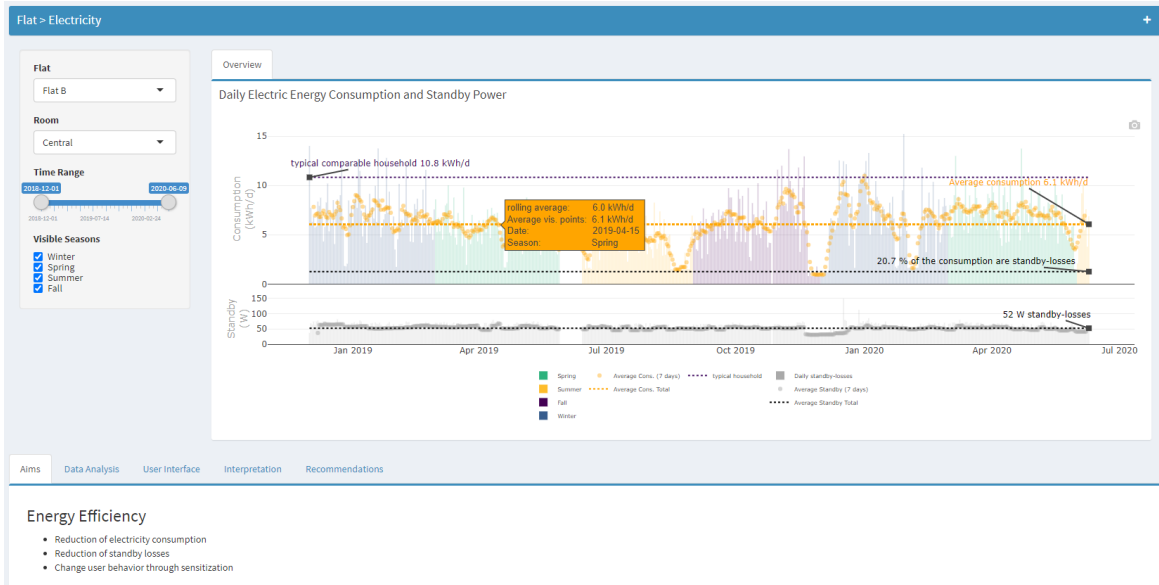


Abbildung 16. Modul Flat > Electricity (Screenshot). Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.7 Flat > Heating

Mit diesem Modul wird der Heizenergieverbrauch pro Wohnung untersucht. Angezeigt werden der Durchschnittsverbrauch pro Jahr und Wohnung (Abbildung 17), sowie der Durchschnittsverbrauch als Funktion der Zeit.



Abbildung 17. Modul Flat > Heating (Screenshot). Mit diesem Modul wird der Heizenergieverbrauch pro Wohnung untersucht. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.8 Flat > Hot Water

Mit diesem Modul wird der (Warm-) Wasserverbrauch pro Wohnung untersucht. Folgende Visualisierungen sind vorhanden: (i) Durchschnittsverbrauch pro Person, Jahr und Wohnung (Abbildung 18); (ii) Durchschnittsverbrauch als Funktion der Zeit, pro Jahr und Wohnung.

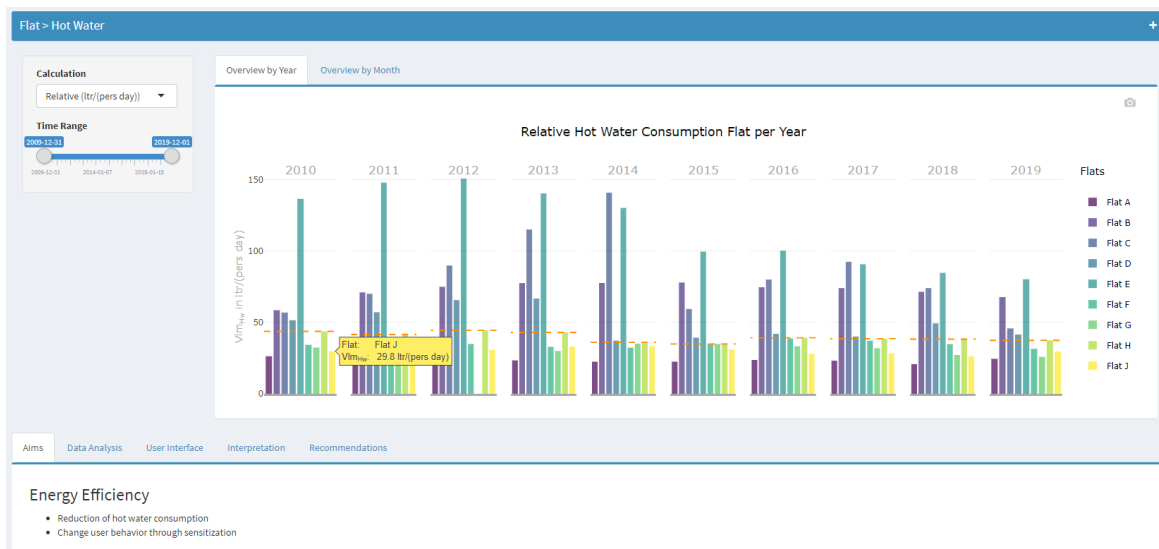


Abbildung 18. Modul Flat > Hot Water (Screenshot). Mit diesem Modul wird der (Warm-) Wasserverbrauch pro Wohnung untersucht. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.9 Central > Heating Signature

Mit diesem Modul wird die effektive Heizgrenze des untersuchten Gebäudes bestimmt. Dazu wird der Heizenergieverbrauch als Funktion der Aussentemperatur dargestellt. Die entsprechende Regressionslinie gibt die effektive Heizgrenze an, d.h. die Aussentemperatur, für die keine Heizenergie mehr benötigt wird (Abbildung 19).

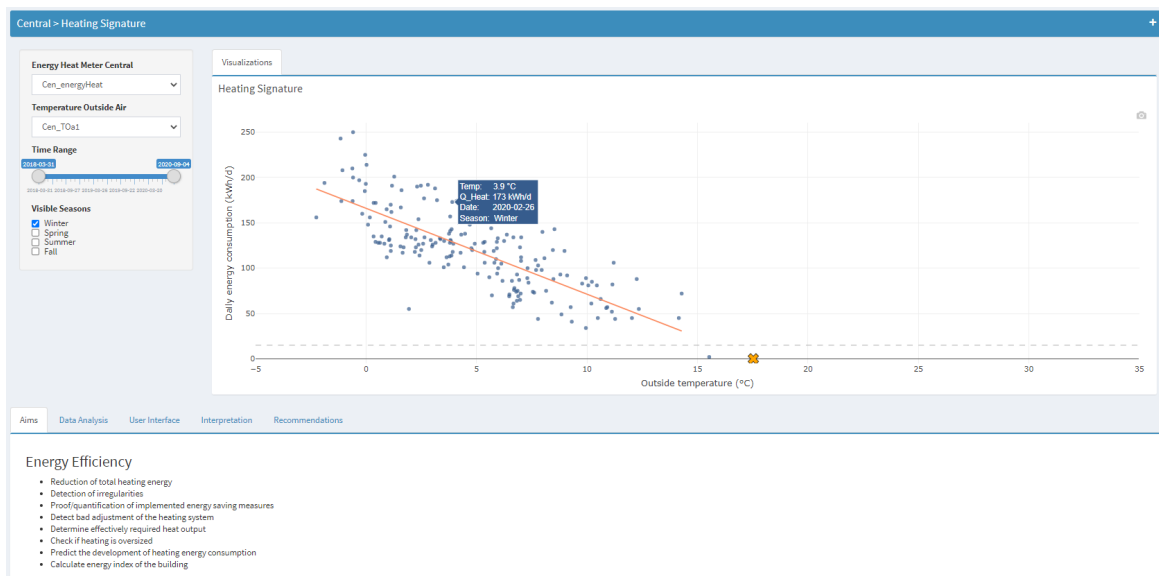


Abbildung 19. Modul Central > Heating Signature (Screenshot). Mit diesem Modul wird die effektive Heizgrenze des untersuchten Gebäudes bestimmt. Quelle: Hochschule Luzern.

5.1.10 Central > Heating Curve

Mit diesem Modul wird die effektive Heizkurve bestimmt (aufgrund der gemessenen Vorlauftemperatur) und untersucht (Abbildung 20).

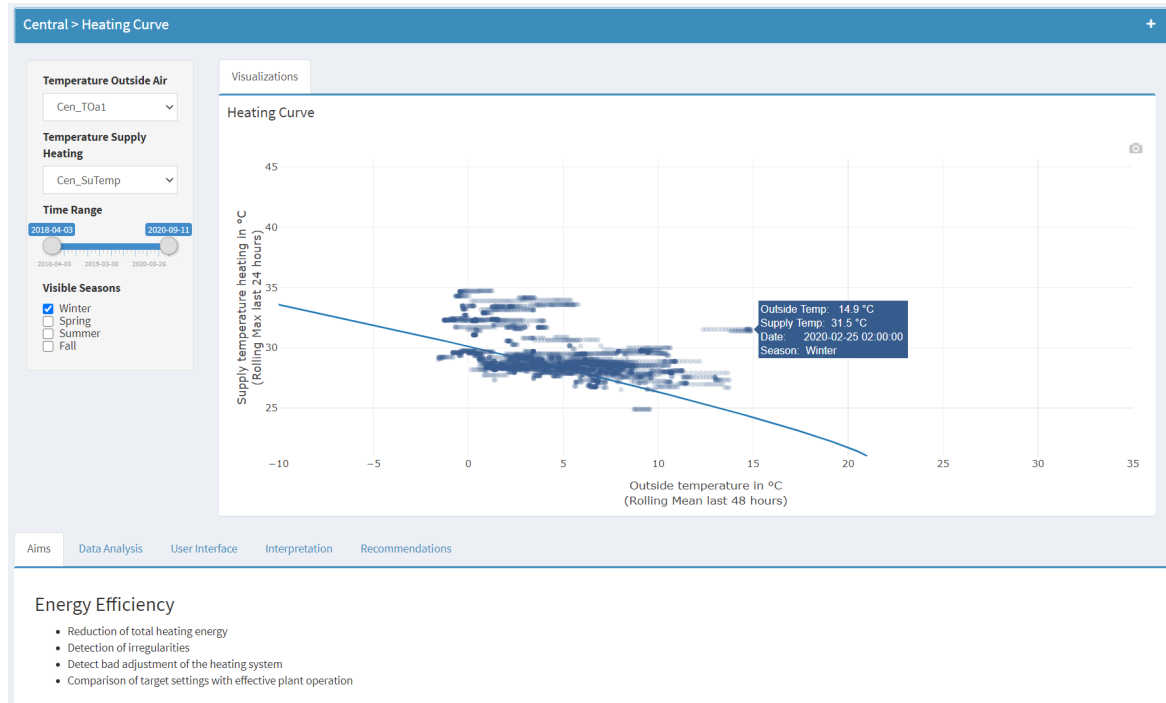


Abbildung 20. Modul Central > Heating Curve (Screenshot). Mit diesem Modul wird die effektive Heizkurve bestimmt.

Quelle: Hochschule Luzern.

5.2 Data explorer

Zusätzlich zu den verschiedenen Modulen (Ziffer 5.1) ist ein Data explorer vorhanden zur Anzeige und Untersuchung der erfassten Rohdaten (Abbildung 21). Diese werden als Zeitreihe angezeigt und können zeitlich eingeschränkt werden. Zudem werden verschiedene, statistische Werte berechnet und angezeigt.

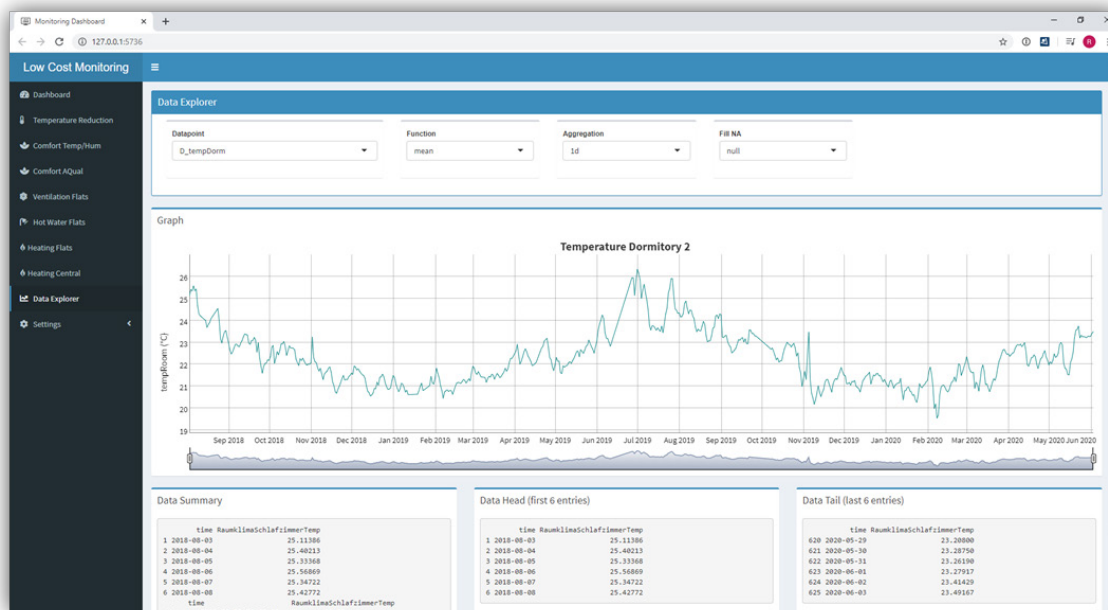


Abbildung 21. Mit dem Data explorer werden die Rohdaten angezeigt und untersucht. Quelle: Hochschule Luzern.

5.3 Einstellungen und Konfiguration

Ebenfalls Bestandteil der lcm Software sind verschiedene Konfigurationstools, u.A. zum Abbilden der Gebäudestruktur und für die Zuweisung der entsprechenden Messpunkte und Messmittel. Detaillierte Angaben zu den unterschiedlichen Einstellungen und zur Konfiguration des Low-Cost Monitoring Systems sind der Software-Dokumentation zu entnehmen unter <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/>.

6 Kostenzusammenstellung

Eine der wesentlichen Anforderungen an das Low-Cost Monitoring System war, dass eine Komplett-Lösung (Messen – Speichern – Visualisieren) fertig installiert deutlich weniger als CHF 1'000.- kosten darf, um ökonomisch sinnvoll zu sein und auf Akzeptanz zu stossen (Ziffer 1.1).

In der Tabelle 3 sind sämtliche Materialkosten zusammengestellt, welche im Zusammenhang mit der vorliegenden Lösung anfallen. Der Totalpreis wurde beispielhaft für eine 4½-Zimmer Wohnung berechnet. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen: (i) Alle Software-Module werden verwendet (Ziffer 5); (ii) Sämtliche Zählerwerte für Strom, Wärme, Wasser sind von Drittanbietern verfügbar und werden über CSV-Dateien eingelesen (*best case*). Wenn einzelne Zähler vor Ort über den LED-Lesekopf nke WATTECO Flash'O eingelesen werden müssen, erhöhen sich die Kosten entsprechend.

Zusätzlich zu den genannten Materialkosten fallen Kosten an für die Zusammenstellung, Inbetriebnahme und Wartung des Low-Cost Gebäudemonitoring Systems. Diese Kosten sind system- und nutzerabhängig. Es ist schätzungsweise mit folgenden Aufwänden zu rechnen pro Wohnung (unverbindliche Angaben):

- Bestellung der Messgeräte: 1 Stunde
- Installation der Messgeräte vor Ort: ½-Stunde plus An- und Abreise
- Download, Konfiguration und Inbetriebnahme der lcm-Software: 3 Stunden
- **AUFWAND TOTAL: 4.5 Stunden** (bei erstmaliger Durchführung)

Artikel	Zweck	Anzahl	Stückpreis ³ (<10 Stück)	Preis TOTAL 4½-Zimmer Wohnung
Avelon – Wisely Standard	Messung von Raumtemperatur, Feuchte, Luftdruck	1x pro Raum (ausser Master-Bedroom)	CHF 88.- (Stand 05.09.2020)	CHF 264.-
Avelon – Wisely Carbonsense	Messung von Raumtemperatur, Feuchte, CO ₂ , Luftdruck	1x pro Master-Bedroom	CHF 263.- (Stand 14.07.2020)	CHF 263.-
Dragino – LHT65	Messung der Aussentemperatur	1x pro Gebäude	CHF 50.- (Stand 15.07.2020)	CHF 50.-

³ Unverbindliche Preisangaben. Quellen: Herstellerangaben, Internet.

nke WATTECO – Flash'O	Auslesung Energiezähler (Strom, Wasser, Gas, Wärme) über LED-Schnittstelle	1x pro Zähler vor Ort	CHF 183.- (Stand 15.07.2020)	CHF 0.-
Import CSV	Import von Wasser, Wärme, Elektrozählern	1x pro Zähler von Drittanbieter	CHF 0.-	CHF 0.-
Datenhosting The Things Network (TTN)	Sämtliche Messdaten werden in TTN während 7 Tagen abgespeichert	1x pro Gebäude	CHF 0.-	CHF 0.-
Icm-Software der Hochschule Luzern	Software zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Visualisierung der Messdaten	1x pro Gebäude	CHF 0.-	CHF 0.-
TOTAL				CHF 577.-

Tabelle 3. Zusammenstellung der Materialkosten für das Low-Cost Monitoring. Der Totalpreis wurde beispielhaft für eine 4½-Zimmer Wohnung berechnet. Annahmen: Alle Software-Module werden verwendet; (ii) Sämtliche Zählerwerte sind von Drittanbietern verfügbar und werden über CSV-Dateien eingelesen. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Artikeln sind online zu finden unter folgendem Link: <https://hslu-ige-laes.github.io/lora-devices-ttn/>.

7 Zusammenfassung und weitere Schritte

7.1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde ein Low-Cost Gebäudemonitoring System auf der Basis von offenen Technologien entwickelt. Das System erfasst Energieverbräuche und Raumkomfortdaten. Bei Bedarf kann das System zudem beliebig erweitert werden, bspw. mit Messdaten zum Nutzerverhalten. Dazu sind, neben der Einbindung von LoRaWAN-Sensoren, auch der Datenimport über CSV-Dateien und InfluxDB-Zeitreihendatenbanken möglich.

Die erarbeitete Lösung besteht aus handelsüblichen Messmitteln zur Erfassung von Raumkomfort- und Zählerdaten, sowie aus einer Open-Source Software der Hochschule Luzern. Letztere ist öffentlich zugänglich über die Entwicklungsplattform GitHub und kann durch die Community nach Bedarf weiterentwickelt und kostenlos weitergegeben werden.

Mit dem neuen System erhalten interessierten Personen / Stellen / Verbände einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter. Der Preis für ein funktionsfähiges Monitoring liegt dabei deutlich unter CHF 1'000.-

7.2 Weitere Schritte

Die erreichten Ergebnisse lassen sich in zahlreichen Punkten weiterentwickeln und noch genauer auf die Bedürfnisse der Zielgruppen abstimmen. Mögliche, weitere Schritte sind:

- Validierung des Low-Cost Gebäudemonitoring Systems am realen Objekt
- Automatische Bereinigung bzw. Plausibilisierung der erfassten Monitoring-Daten
- Erweiterung durch weitere Module, bspw. zur Untersuchung von mechanischen Lüftungsanlagen
- Implementierung von *vorher* / *nachher* Vergleichsmöglichkeiten zur Überprüfung der eingeleiteten Massnahmen
- Beseitigung von Bugs in der Icm Software und Dokumentation

8 Danksagung

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich bei folgenden Personen und Institutionen für ihre grosszügige Unterstützung.

Beim Schweizerischen Bundesamt für Energie / Adrian Grossenbacher (Bereichsleiter Gebäude) für die Förderung und freundliche Begleitung des Projekts.

Beim Verein Minergie / Robert Minovsky (Leiter Technik und Entwicklung) für die finanzielle und ideelle Unterstützung sowie die Begleitung des Projekts und für das Hosting des Low-Cost Monitoring Systems.

Bei der Energiefachstellenkonferenz der Nordwestschweizer Kantone AG, BE, BL, BS, SO / Pius Hüsler (Sekretär) sowie beim Kanton Luzern / Jules Gut (Teamleiter Energie) für die grosszügige, finanzielle Unterstützung.

Beim Ökozentrum Langenbruck / Michael Sattler (Projektleiter) für die gemeinsame Ideenentwicklung und Projektbegleitung.

Bei Carina Gubler und Said Ahsaine von der Hochschule Luzern für die Überprüfung des vorliegenden Berichts und der lcm Software.

Bei allen Projektbeteiligten für ihre wertvollen Beiträge und die freundliche Zusammenarbeit.