

Mit Unterstützung von



Schlussbericht vom 31. März 2025

Praxistest Low-Cost Monitoring

Schlussbericht



Bild: Adobe Stock

Autoren

Olivier Steiger, Hochschule Luzern

Reto Marek, Hochschule Luzern

Diese Studie wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
1. Einleitung.....	9
1.1 Hintergrund	9
1.2 Ausgangslage	9
1.3 Projektziele und Vorgehen.....	10
1.4 Projektergebnisse	11
2. Einsatzszenarien («Use Cases»)	12
2.1 Vorgehen.....	12
2.2 Ergebnisse	12
2.2.1 IST-Aufnahme (Stand 2022).....	12
2.2.2 SOLL-Analyse	13
2.3 Zusammenfassung	14
2.4 Sinnvolle Nutzungsszenarien.....	14
3. Systemübersicht	15
3.1 Systemkomponenten (Top-Level).....	15
3.2 Datenfluss / Kommunikationswege.....	16
3.3 Daten und Messmittel	17
3.4 Konfigurations- und Metadatenverwaltung	18
3.5 Low-Cost Monitoring Software.....	18
4. Praxistests	22
4.1 Übersicht.....	22
4.2 Testgebäude	22
4.3 Auswertungen	22
4.3.1 Raum > Temperatur versus Feuchtigkeit	23
4.3.2 Raum > Temperatur-Reduktion Winter.....	24
4.3.3 Raum > Raumtemperatur vs. Aussentemperatur	24
4.3.4 Raum > Luftqualität.....	25

4.3.5	Wohnung > Elektrizität	26
4.3.6	Wohnung > Wohnungslüftung	28
4.3.7	Zentral > Heizkurvenoptimierung.....	30
4.3.8	Daten Explorer	31
4.3.9	Geräteübersicht	31
4.4	Erkenntnisse aus den Praxistests.....	31
4.4.1	Datenerfassung.....	32
4.4.2	Datenübermittlung.....	32
4.4.3	Software	33
4.4.4	Systemarchitektur	34
4.4.5	Allgemeines Fazit.....	34
5.	Low-Cost Monitoring: Praxiskonzept	35
5.1	Zielsetzung.....	35
5.2	Anwendungsbereiche	36
5.3	Betrachtete Konzepte	36
5.4	Gewählter Ansatz: lcm-Dienstleistungen	38
6.	Ausblick	39
7.	Danksagung	40

Zusammenfassung

In der Gebäudetechnik spielen Überwachung und Optimierung eine zentrale Rolle, um Energieeffizienz zu gewährleisten und unnötige Kosten zu vermeiden. Viele Gebäude, insbesondere ältere Gebäude ohne moderne Gebäudeautomation, werden jedoch ohne kontinuierliche Überwachung betrieben, wodurch ineffiziente Betriebsweisen oft unbemerkt bleiben. Eine technische Überwachung schafft zwar Abhilfe, ist aber mit hohen Installations- und Betriebskosten verbunden. Vor diesem Hintergrund entwickelte die Hochschule Luzern mit Unterstützung von EnergieSchweiz und weiteren Partnern das «Low-Cost Monitoring» (lcm), ein kostengünstiges Gebäudemonitoring-System auf der Basis von handelsüblichen Sensoren und einer Open-Source-Software. Ziel des Projektes war es, die Praxistauglichkeit dieses Systems zu testen, weiterzuentwickeln und ein Konzept für eine skalierbare, flexible und praxistaugliche Monitoring-Plattform auf Basis des lcm zu erarbeiten.

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst Einsatzszenarien für das Low-Cost-Monitoring definiert und durch Interviews mit Fachpersonen aus Energieberatung, Verwaltung und Industrie verfeinert. Die Gespräche ergaben, dass Monitoring in der Praxis derzeit nur selten eingesetzt wird, da bestehende Systeme entweder zu teuer oder zu kompliziert in der Anwendung sind. Insbesondere in Wohngebäuden fehlt oft ein einfaches, niederschwelliges Instrument zur Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs und zur Fehlererkennung («Troubleshooting»). Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden sinnvolle Einsatzszenarien für das lcm entwickelt, darunter die Erkennung ineffizienter Heizungssteuerungen, die Überwachung des Raumkomforts (Temperatur, Feuchte, Luftqualität), die Analyse von Stromverbrauch und Standby-Verlusten sowie die Optimierung von Wohnraumlüftungssystemen.

Ein zentraler Bestandteil des Projektes war die Durchführung von Praxistests in vier Wohngebäuden. Dabei wurden über einen Zeitraum von 15 Monaten verschiedene Messdaten erfasst und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass das System in der Lage ist, wertvolle Informationen zur Betriebsoptimierung zu liefern. So konnten beispielsweise ineffiziente Heizkurven und Lüftungseinstellungen sowie unnötiger Standby-Verbrauch identifiziert werden. Als entscheidend für die Akzeptanz erwies sich die Benutzerfreundlichkeit des Systems: Interessierte Laien benötigen eine einfache Visualisierung und Anleitung zur Nutzung der Daten.

Aus technischer Sicht lieferte das Projekt wertvolle Erkenntnisse über die Anforderungen an Hard- und Software für ein kostengünstiges Monitoring. Die ursprünglich lokal gehostete Softwarelösung wurde auf eine Cloud-Plattform migriert, um den Installationsaufwand zu minimieren und eine flexiblere Nutzung zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde die Integration neuer Sensoren, insbesondere LoRaWAN-Geräte, vorangetrieben. Die Tests zeigten jedoch auch Herausforderungen, wie die begrenzte Verfügbarkeit von LoRaWAN-Netzwerken in einigen Gebäuden, was den Einsatz zusätzlicher Gateways erforderlich machte. Ausserdem erwiesen sich einige Messmethoden als verbesserungswürdig, insbesondere für den Wasserverbrauch und die Überwachung von Wärmepumpen.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Konzept für eine skalierbare und flexible Monitoring-Plattform entwickelt. Anstatt das System als reine Do it yourself-Lösung bereitzustellen, entschied sich das Projektteam für ein Dienstleistungsmodell. Dabei bietet die Hochschule Luzern das System vorkonfiguriert an, so dass Gebäudebetreiber/-innen, Ingenieurbüros und Energieberater/-innen direkt auf die relevanten Daten zugreifen und diese auswerten können. Diese Entscheidung basiert auf der Erkenntnis, dass viele potenzielle Nutzer/-innen nicht über die technischen Kenntnisse verfügen, um das System selbst zu installieren und zu betreiben.

Insgesamt zeigt das Projekt, dass Low-Cost-Monitoring eine vielversprechende Möglichkeit bietet, die Energieeffizienz von Gebäuden zu verbessern, ohne aufwändige und teure Gebäudeautomationssysteme nachrüsten zu müssen. Die entwickelte Lösung ermöglicht ein flexibles und temporäres Monitoring, das sowohl für die Einregelungsüberwachung nach der Inbetriebnahme neuer Anlagen als auch für die gezielte Fehleranalyse geeignet ist. In Zukunft soll das System weiter optimiert werden, unter anderem durch eine Neuprogrammierung der Software in Python, um eine bessere Skalierbarkeit zu erreichen. Die Hochschule Luzern plant, die Dienstleistung in den nächsten 6 bis 12 Monaten auf dem Schweizer Markt einzuführen und weiterzuentwickeln, um eine breite Anwendung zu ermöglichen.

Sommaire

Dans le domaine de la technique du bâtiment, la surveillance et l'optimisation jouent un rôle essentiel pour garantir l'efficacité énergétique et éviter les coûts inutiles. Cependant, de nombreux bâtiments, en particulier les bâtiments anciens qui ne disposent pas d'un système d'automatisation moderne, sont exploités sans surveillance continue, ce qui fait qu'un fonctionnement inefficace passe souvent inaperçu. Une surveillance technique (*monitoring*) permet certes de remédier à cette situation, mais elle entraîne des coûts d'installation et d'exploitation élevés. Dans ce contexte, la Haute école de Lucerne a développé, avec le soutien de SuisseEnergie et d'autres partenaires, le « Low-Cost Monitoring » (lcm), un système de surveillance des bâtiments peu coûteux basé sur des capteurs disponibles dans le commerce et un logiciel open source. L'objectif du projet était de tester la faisabilité pratique de ce système, de le perfectionner et d'élaborer un concept de plateforme de surveillance évolutive, flexible et pratique basée sur le lcm.

Dans le cadre du projet, des scénarios d'application pour la surveillance à faible coût ont d'abord été définis, puis affinés à l'aide d'entretiens avec des experts en conseil énergétique, en administration et en industrie. Les discussions ont révélé que la surveillance n'est actuellement que rarement utilisée dans la pratique, car les systèmes existants sont soit trop coûteux, soit trop compliqués à utiliser. Dans les bâtiments résidentiels en particulier, il manque souvent un outil simple et accessible pour analyser et optimiser la consommation d'énergie et détecter les défauts. Sur la base de ces conclusions, des scénarios d'utilisation pertinents ont été développés pour le lcm, notamment la détection des systèmes de chauffage inefficaces, la surveillance du confort ambiant (température, humidité, qualité de l'air), l'analyse de la consommation d'électricité et des pertes en mode veille, ainsi que l'optimisation des systèmes de ventilation des locaux d'habitation.

La réalisation de tests pratiques dans quatre bâtiments résidentiels a constitué un élément central du projet. Diverses données de mesure ont été collectées et évaluées sur une période de 15 mois. Les résultats ont montré que le système est capable de fournir des informations précieuses pour l'optimisation du fonctionnement. Il a ainsi été possible d'identifier des courbes de chauffage et des réglages de ventilation inefficaces ainsi que des consommations en veille inutiles. La facilité d'utilisation du système s'est avérée déterminante pour son acceptation : les profanes intéressés ont besoin d'une visualisation simple et d'instructions pour utiliser les données.

D'un point de vue technique, le projet a fourni des informations précieuses sur les exigences en matière de matériel et de logiciels pour une surveillance rentable. La solution logicielle initialement hébergée localement a été migrée vers une plateforme cloud afin de minimiser les efforts d'installation et de permettre une utilisation plus flexible. En outre, l'intégration de nouveaux capteurs, en particulier des appareils LoRaWAN, a été poursuivie. Cependant, les tests ont également mis en évidence certains défis, tels que la disponibilité limitée des réseaux LoRaWAN dans certains bâtiments, ce qui a nécessité l'utilisation de passerelles supplémentaires. En outre, certaines méthodes de mesure se sont avérées perfectibles, en particulier pour la consommation d'eau chaude et la surveillance des pompes à chaleur.

Sur la base de ces résultats, un concept de plateforme de surveillance évolutive et flexible a été développé. Au lieu de proposer le système sous forme de solution à monter soi-même, l'on a opté pour un modèle de prestation de services. La Haute école de Lucerne propose le système préconfiguré, de sorte que les exploitants de bâtiments, les bureaux d'ingénieurs et les conseillers et conseillères en énergie peuvent accéder directement aux données pertinentes et les évaluer. Cette décision repose sur le constat que de nombreux utilisateurs et utilisatrices potentiels ne disposent pas des connaissances techniques nécessaires pour installer et exploiter le système eux-mêmes.

Dans l'ensemble, le projet montre que la surveillance à faible coût offre une possibilité prometteuse d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments sans avoir à installer des systèmes d'automatisation coûteux et complexes. La solution développée permet une surveillance flexible et temporaire, qui convient aussi bien au contrôle de régulation après la mise en service de nouvelles installations qu'à l'analyse ciblée des erreurs.

Sommario

Nella tecnica degli edifici, il monitoraggio e l'ottimizzazione svolgono un ruolo fondamentale per garantire l'efficienza energetica ed evitare costi superflui. Tuttavia, molti edifici, in particolare quelli più vecchi privi di un moderno sistema di automazione, vengono gestiti senza un monitoraggio continuo, per cui spesso i modi di funzionamento inefficienti passano inosservati. Il monitoraggio tecnico offre una soluzione, ma comporta elevati costi di installazione e funzionamento. In questo contesto, l'Università di Lucerna, con il sostegno di SvizzeraEnergia e altri partner, ha sviluppato il «Low-Cost Monitoring» (lcm), un sistema di monitoraggio degli edifici economico basato su sensori disponibili in commercio e un software open source. L'obiettivo del progetto era quello di testare la praticità di questo sistema, svilupparlo ulteriormente ed elaborare un concetto per una piattaforma di monitoraggio scalabile, flessibile e pratica basata sull'lcm. Nell'ambito del progetto sono stati inizialmente definiti scenari di applicazione per il monitoraggio a basso costo, che sono stati poi perfezionati attraverso interviste con esperti di consulenza energetica, amministrazione e industria. Dalle discussioni è emerso che il monitoraggio è attualmente utilizzato solo raramente nella pratica, poiché i sistemi esistenti sono troppo costosi o troppo complicati da utilizzare. Soprattutto negli edifici residenziali manca spesso uno strumento semplice e accessibile per l'analisi e l'ottimizzazione del consumo energetico e per il rilevamento dei guasti («troubleshooting»). Sulla base di queste conoscenze sono stati sviluppati scenari di applicazione significativi per l'lcm, tra cui il rilevamento di sistemi di controllo del riscaldamento inefficienti, il monitoraggio del comfort ambientale (temperatura, umidità, qualità dell'aria), l'analisi del consumo di energia elettrica e delle perdite in standby e l'ottimizzazione dei sistemi di ventilazione degli ambienti abitativi.

Una parte fondamentale del progetto è stata la realizzazione di test pratici in quattro edifici residenziali. Nel corso di un periodo di 15 mesi sono stati raccolti e valutati diversi dati di misurazione. I risultati hanno dimostrato che il sistema è in grado di fornire informazioni preziose per l'ottimizzazione del funzionamento. È stato così possibile identificare curve di riscaldamento e impostazioni di ventilazione inefficienti, nonché consumi in standby non necessari. La facilità d'uso del sistema si è rivelata fondamentale per la sua accettazione: gli utenti inesperti hanno bisogno di una visualizzazione semplice e di istruzioni per l'utilizzo dei dati.

Dal punto di vista tecnico, il progetto ha fornito preziose informazioni sui requisiti hardware e software per un monitoraggio economico. La soluzione software originariamente ospitata localmente è stata migrata su una piattaforma cloud per ridurre al minimo gli sforzi di installazione e consentire un utilizzo più flessibile. È stata inoltre promossa l'integrazione di nuovi sensori, in particolare dispositivi LoRaWAN. Tuttavia, i test hanno anche evidenziato alcune sfide, come la disponibilità limitata delle reti LoRaWAN in alcuni edifici, che ha reso necessario l'uso di gateway aggiuntivi. Inoltre, alcuni metodi di misurazione hanno dimostrato di essere migliorabili, in particolare per il consumo di acqua calda e il monitoraggio delle pompe di calore.

Sulla base di questi risultati è stato sviluppato un concetto per una piattaforma di monitoraggio scalabile e flessibile. Aniché fornire il sistema come soluzione fai-da-te, il team del progetto ha optato per un modello di servizio. L'Università di Lucerna offre il sistema preconfigurato, in modo che i gestori di edifici, gli studi di ingegneria e i consulenti energetici possano accedere direttamente ai dati rilevanti e valutarli. Questa decisione si basa sulla consapevolezza che molti potenziali utenti non dispongono delle conoscenze tecniche necessarie per installare e gestire il sistema autonomamente.

Nel complesso, il progetto dimostra che il monitoraggio a basso costo offre una possibilità promettente per migliorare l'efficienza energetica degli edifici senza dover installare sistemi di automazione costosi e complessi. La soluzione sviluppata consente un monitoraggio flessibile e temporaneo, adatto sia per il controllo della regolazione dopo la messa in funzione di nuovi impianti che per l'analisi mirata degli errori. In futuro, il sistema sarà ulteriormente ottimizzato, tra l'altro riprogrammando il software in Python per ottenere una migliore scalabilità. L'Università di Lucerna prevede di introdurre il servizio sul mercato svizzero nei prossimi 6-12 mesi e di svilupparlo ulteriormente per consentirne un'ampia applicazione.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
API	Application Programming Interface. Deutsch: Anwendungsschnittstelle
BFE	Schweizerisches Bundesamt für Energie
CSV	Comma-separated Values (Dateiformat)
CT	Current Transducer. Deutsch: Stromwandler
DB	Datenbank
DIY	Do it yourself. Deutsch: «Mach' es selbst»
EFH	Einfamilienhaus
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone
HSLU	Hochschule Luzern
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Netzwerkprotokoll)
IO	Input/Output. Deutsch: Ein- und Ausgang
IoT	Internet of Things. Deutsch: Internet der Dinge
KNX	Von: Konnex (Netzwerkprotokoll)
LAN	Local Area Network. Deutsch: Lokales Netzwerk
lcm	Low-Cost Monitoring
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network (Netzwerkprotokoll)
MFH	Mehrfamilienhaus
MQTT	Message Queueing Telemetry Transport (Netzwerkprotokoll)
OCR	Optical Character Recognition. Deutsch: optische Zeichenerkennung
PV	Photovoltaik
REST	Representational State Transfer (Netzwerkprotokoll)
SF	Spreading Factor. Deutsch: Spreizfaktor
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TTN	The Things Network
VOC	Volatile Organic Compounds. Deutsch: flüchtige organische Verbindungen
WAN	Wider Area Network. Deutsch: Weitverkehrsnetz
WLAN	Wireless LAN
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Gebäudetechnische Anlagen werden immer komplexer, laufen aber nach der Inbetriebnahme oft im Blindflug, d.h. ohne kontinuierliche Überwachung und Optimierung. Insbesondere in bestehenden Gebäuden ohne moderne Gebäudeautomation fehlen die technischen Möglichkeiten, den Betrieb zu analysieren und Ineffizienzen frühzeitig zu erkennen. Für Betriebsoptimierer/-innen, GEAK-Expert/-innen¹, Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen ist es aber wichtig, den Betrieb ihrer Anlagen besser zu verstehen, um Probleme gezielt und auf einer fundierten, quantitativen Basis beheben zu können. Nur so können unnötiger Energieverbrauch, damit verbundene Kosten und Treibhausgasemissionen sowie Anlagenausfälle vermieden werden.

Eine Lösung bietet das technische Monitoring, d.h. die Überwachung der gebäudetechnischen Anlagen mit technischen Mitteln. Dabei wird zwischen Gebäudemonitoring, Komfortmonitoring, Energiemonitoring und Anlagenmonitoring unterschieden. Das Gebäudemonitoring dient der Überwachung bauphysikalischer Zustände des Gebäudes, z.B. Ortung von Leckagen in Flachdächern, Feuchtemessung in Kellern. Das Behaglichkeitsmonitoring dient der Erfassung des Nutzerempfindens, z.B. Temperatur, Helligkeit, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration und des Nutzerverhaltens, z.B. Lüftungsverhalten (über Fensterkontakt) und Anwesenheit. Beim Energiemonitoring werden Energie- und Medienverbräuche überwacht, z.B. Strom- und Wärmeverbrauch sowie Gas-, Öl-, Holz- und Wasserverbrauch. Das Anlagenmonitoring dient der Erfassung und Analyse von Betriebszuständen technischer Anlagen, z.B. Filterüberwachung in Lüftungsanlagen, Volumenstromüberwachung in Heizungsverteilern.

Das technische Monitoring ist häufig mit erheblichem Aufwand und Kosten verbunden. Zum einen müssen die notwendigen Messeinrichtungen installiert werden, was insbesondere bei Energiezählern in der Regel die Unterbrechung von Strom- oder Wärmekreisläufen erfordert. Zum anderen muss die notwendige Infrastruktur zur Übertragung, Auswertung und Darstellung der Messdaten aufgebaut werden. Hierfür wird häufig eine Gebäudeautomation mit entsprechenden Bussystemen (z.B. Modbus, M-Bus) eingesetzt. Während diese Infrastruktur in vielen Neubauten vorhanden ist, ist die Nachrüstung bestehender Gebäude mit moderner Gebäudeautomation aufwändig und nur als dauerhafte Lösung sinnvoll. Schliesslich ist für die Interpretation der Messdaten (oft nur als Zeitreihen o.ä. dargestellt) Expertenwissen erforderlich.

Genau hier setzt das Low-Cost Monitoring der Hochschule Luzern an. Das innovative Tool ermöglicht eine niederschwellige und kostengünstige Analyse bestehender Anlagen - ganz ohne aufwändige Installationen. Es lässt sich einfach einrichten, schnell in Betrieb nehmen und liefert praxisrelevante Ergebnisse, die auch für interessierte Laien verständlich aufbereitet sind. So wird eine bedarfsgerechte Optimierung möglich, die nicht nur Energie spart, sondern auch einen nachhaltigen und effizienten Betrieb von Gebäuden sicherstellt.

1.2 Ausgangslage

Mit Unterstützung von EnergieSchweiz und weiteren Partnern hat die Hochschule Luzern in den Jahren 2019-2020 ein kostengünstiges Gebäudemonitoring-System auf Basis offener Technologien entwickelt. Die Lösung mit dem Namen «lcm – Low-Cost Monitoring» besteht aus handelsüblichen Messgeräten zur Erfassung von Raumkomfort und Zählerdaten sowie einer selbst entwickelten Open-Source-Software. Das System kann mit Hilfe einer Anleitung auch von Laien installiert und in Betrieb genommen werden. Die Kosten für ein funktionsfähiges Monitoring liegen deutlich unter CHF 1'000. Alle Projektergebnisse wurden auf der Plattform GitHub unter dem Link <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/> zusammengefasst.

¹ Der GEAK (Gebäudeenergieausweis der Kantone) ist in der Schweiz ein offizielles Instrument zur Beurteilung der Energieeffizienz von Gebäuden.

Diese erste Lösung ist ein Proof of Concept. Erste Versuche mit dieser Lösung haben gezeigt, dass die Inbetriebnahme für Laien teilweise zu kompliziert ist und Unterstützung erfordert. Zudem wurde die Lösung im ersten Projekt noch nicht an genutzten Gebäuden validiert. Daher wurde das lcm im vorliegenden Projekt in einer Reihe von Praxistests an bestehenden Wohngebäuden (Einfamilienhäuser EFH, Mehrfamilienhäuser MFH) validiert und technisch weiterentwickelt. Darüber hinaus wurde ein Konzept für eine praxistaugliche, flexible Low-Cost-Monitoring-Plattform entwickelt (Abbildung 1).

2019 – 2020 Entwicklung eines Low-Cost-Gebäudemonitoringsystems auf Basis offener Technologien durch die Hochschule Luzern (Proof of Concept)
Link: <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/>

2022 – 2025*	Folgeprojekt «Praxistest Low-Cost Monitoring»
	Projektziele
	<ol style="list-style-type: none">1. Einsatzgebiete und Nutzungsszenarien für das Low-Cost Monitoring verfeinern2. Praxistauglichkeit und Nutzbarkeit der bestehenden Lösung verbessern3. Architektur und Roadmap definieren für eine skalierbare, flexible und Community-basierte Low-Cost Monitoring Plattform
	Projektpartner
	<ul style="list-style-type: none">• EnergieSchweiz• Energiefachstellenkonferenz Nordwestschweiz• Kanton Luzern – Umwelt und Energie• Verein Minergie

Abbildung 1. Projektkontext: In den Jahren 2019-2020 wurde ein kostengünstiges Gebäudemonitoringsystem auf Basis offener Technologien entwickelt. Dieses wird in diesem Projekt verbessert, weiterentwickelt und in praktischen Anwendungen getestet.

1.3 Projektziele und Vorgehen

Das Projekt verfolgt drei Hauptziele:

1. Verfeinerung der Anwendungsbereiche und Einsatzszenarien für das Low-Cost Monitoring (d.h. Definition von Use Cases);
2. Verbesserung der Praxistauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit der bestehenden Lösung;
3. Definition eines Konzepts und einer Roadmap für eine skalierbare, flexible Low-Cost Monitoring Plattform.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden in einem ersten Schritt die Anwendungsbereiche und Einsatzszenarien für Low-Cost-Monitoring im Rahmen von Interviews verfeinert und erweitert. Diesbezüglich wurden im Vorgängerprojekt keine systematischen Erhebungen durchgeführt. Ziel war es, hier eine grössere Tiefe zu erreichen und damit den Mehrwert der Lösung zu erhöhen.

Anschliessend wurden die Anwendungsszenarien im Rahmen von Praxistests auf Basis der bestehenden Lösung umgesetzt. Die Gebäudenutzer/-innen erhielten direkten Zugriff auf die von der Hochschule Luzern aufbereiteten Daten ihres Gebäudes/Wohnung und konnten die Daten auf einer Plattform verfolgen. Basierend auf den Erkenntnissen der Praxistests wurde die Praxistauglichkeit und Nutzbarkeit der bestehenden Lösung verbessert. Insbesondere wurden zusätzliche anwendungsspezifische Datenauswertungsmodule entwickelt und implementiert.

Darauf aufbauend wurde ein Konzept (Architektur und Roadmap) für eine skalierbare und flexible Low-Cost Monitoring Plattform definiert. Das Konzept soll als Grundlage für Dienstleistungen dienen, die auf der entwickelten Lösung basieren und zukünftig von der Hochschule Luzern und/oder Partnern angeboten werden.

Die Projektergebnisse richten sich an Personen und Fachstellen, die ein niederschwelliges (d.h. anwendungsorientiertes, benutzerfreundliches und kostengünstiges) Gebäudemonitoring zur Optimierung der Energieeffizienz und des Komforts in bestehenden Wohngebäuden einsetzen wollen. Es handelt sich also um einen «Werkzeugkasten», mit dem einzelne Anlagen einfach und auch temporär untersucht und anschliessend optimiert werden können. Er richtet sich in erster Linie an Betriebsoptimierer/-innen, GEAK-Expert/-innen und Ingenieurbüros sowie an interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen.

1.4 Projektergebnisse

Folgende Projektergebnisse liegen vor:

- Zusammenstellung möglicher Einsatzszenarien für das Low-Cost-Monitoring (Kapitel 2)
- Weiterentwicklung des Low-Cost Monitorings (Hardware und Software). Die ursprüngliche Lösung wurde in folgenden Punkten weiterentwickelt:
 - HARDWARE: Einbindung zusätzlicher LoRaWAN-Sensoren. LoRaWAN steht für «Long Range Wide Area Network» und ist ein Funkkommunikationsprotokoll, das speziell für das Internet der Dinge (IoT) entwickelt wurde. Es ermöglicht Geräten, energieeffizient und drahtlos kleine Datenmengen über grosse Distanzen hinweg zu übertragen.
 - SOFTWARE: Migration von einer lokalen Lösung (ausgeführt auf einem Netzwerkspeicher der Hochschule Luzern) zu einer Cloud-Lösung (basierend auf den IoT-Plattformen Akenza und shinyapps.io).
 - SOFTWARE: Verbesserung des Workflows für die Integration der Messgeräte und die Einrichtung der entsprechenden Datenpunkte.
 - SOFTWARE: Implementierung zusätzlicher Module zur Auswertung der Messdaten.
 - SOFTWARE: Verbesserung und Ergänzung der Datenvisualisierung in bestehenden Modulen.
 - SOFTWARE: Verbesserung von Stabilität, Projekt-/Benutzermanagement und Benutzerfreundlichkeit.
 - SOFTWARE: Erweiterung, die es einem Benutzer/-in ermöglicht, mehrere Projekte mit mehreren Gebäuden anzuzeigen (im ersten Projekt war dies auf ein Gebäude beschränkt).
- Datensätze und entsprechende Auswertungen von vier verschiedenen Liegenschaften (insgesamt 13 Wohneinheiten). Messperiode: 15 Monate
- Konzept für eine praxistaugliche, flexible und kostengünstige Monitoring-Plattform. Diese soll zukünftig im Rahmen von Dienstleistungen der Hochschule Luzern eingesetzt werden.

2. Einsatzszenarien («Use Cases»)

2.1 Vorgehen

Im Rahmen von Interviews wurden die Anwendungsbereiche und Einsatzszenarien des Low-Cost Monitorings verfeinert und erweitert. Der Leitfaden für die Interviews findet sich in Anhang 1. Folgende Interviewpartner/-innen wurden befragt:

- Jules Gut, Teamleiter Energie, Amt für Umwelt und Energie (uwe), Kanton Luzern
- Bernd Sitzmann, Projektleiter und Energieberater, Renera AG (ehemals Energie Zukunft Schweiz)
- Pius Hüssler, Energieberater, Geschäftsleiter Nova Energie
- Elias Estermann, Geschäftsführer, OekoWatt AG
- Uli Spindler, Professor, Technische Hochschule Rosenheim
- Felix Hug, Geschäftsführer und Mitgründer, electrojoule AG
- Sabine von Stockar, Leiterin Bildung & Entwicklung, Mitglied der Geschäftsleitung, Verein Minergie
- Maximilian Schaffrinna, Projektleiter Monitoring und Elektrizität, Verein Minergie

Die Interviews wurden grösstenteils im Jahr 2022 durchgeführt. Als Grundlage für die Interviews diente die Zusammenstellung möglicher Nutzungsszenarien gemäss Anhang 2, in der die verschiedenen Massnahmen mit den entsprechenden Bewertungen und deren Zweck zusammenfassend dargestellt sind.

2.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Aussagen aus den Interviews sinngemäss und zusammenfassend wiedergegeben. Die Zuordnung der Aussagen zu einzelnen Personen und Organisationen (Unternehmen, Behörden, Verbände) wurde für die öffentliche Fassung dieses Berichts unkenntlich gemacht.

2.2.1 IST-Aufnahme (Stand 2022)

Einsatzgebiete des Monitorings

- Eine Organisation führt selbst kein Monitoring durch, berät und begleitet aber andere Organisationen in Energiefragen.
- Eine Organisation ist hauptsächlich in der Energieberatung von institutionellen Bauherrschaften tätig, bietet aber ein sehr breites Spektrum an Dienstleistungen an. Unter anderem wird ein niederschwelliges Monitoring für Photovoltaik-Solaranlagen (PV) und Wärmepumpen (WP) angeboten. Ziel ist es, bei Wärmepumpen festzustellen, ob die grundlegenden Parameter stimmen: Heizkurven, Heizgrenzen, Schwellenwerte der Heizleistung. Bei PV-Anlagen geht es vor allem um die Funktionsfähigkeit der Module und der Anlage.
- Bei einer Organisation ist die Energieberatung sehr gefragt und ein dominierendes Thema. Monitoring wird jedoch kaum eingesetzt. Stattdessen werden vorhandene Messdaten (z.B. Zählerdaten aus Abrechnungen) herangezogen und Begehungen vor Ort durchgeführt. Dabei werden u.a. sehr häufig falsch eingestellte Heizeinsätze bei Wärmepumpen erkannt.
- Bei einer Organisation ist das Thema LoRaWAN etwas eingeschlafen. Umso mehr wäre sie an einem einfachen Messkit wie dem Low-Cost-Monitoring interessiert. Die Energieberatung erfolgt heute hauptsächlich über Abrechnungen und Vor-Ort-Besuche.

Umsetzung

- Das Monitoring einer Organisation basiert auf den Low-Power WAN² Standards LoRaWAN und NB-IoT. Für das Monitoring von Wärmepumpen werden Vor-, Rücklauf- und Speichertemperaturen gemessen. Die Überwachung von PV-Anlagen soll in naher Zukunft realisiert werden.

² Ein WAN (Wide Area Network) ist ein Weitverkehrsnetz, also ein Computernetzwerk, das grosse geografische Distanzen überbrückt. Ein LPWAN (Low Power Wide Area Network) ist ein stromsparendes Weitverkehrsnetz, das speziell für Anwendungen im Bereich des Internets der Dinge (IoT) konzipiert ist.

- Eine andere Organisation sammelt mit selbst entwickelten Messgeräten alle relevanten Daten zur Optimierung von Heizungsanlagen. Die Daten werden im Minutentakt erfasst und über das Mobilfunknetz übertragen.

Handlungsfelder

- In Bezug auf die Liegenschaften einer Organisation hat das Thema Energie in der Vergangenheit nur eine untergeordnete Rolle gespielt. Mittlerweile hat sich dies jedoch geändert. Das primäre Handlungsfeld besteht darin, dass die Liegenschaften nicht optimal betrieben werden, sich aber niemand dafür zuständig fühlt. Dennoch werden Optimierungspotenziale bzw. Probleme (v.a. hinsichtlich des Komforts) von den Nutzenden erkannt und an die Organisation zurückgemeldet. Auch Schulungen zur Energieeffizienz werden zunehmend von Hausmeistern und Facility Managern besucht. Diese führen zu nachweisbaren Verbesserungen der Energieeffizienz (Grössenordnung 20-30%).
- In einer Organisation wird festgestellt, dass Privatpersonen einerseits wenig Interesse an Energieeffizienz und Betriebsoptimierung haben und andererseits schnell überfordert sind. Hier kann ein niederschwelliger und spielerischer Ansatz sehr wirksam sein. Umgekehrt sind bei Grossverbrau- chern die Expert/-innen in der Organisation vorhanden. Hier besteht kein Potenzial für Low-Cost- Ansätze.
- In einer Organisation wird ein Trend festgestellt, dass die Überwachung und Optimierung von Lie- genschaften auch gesetzlich vorgeschrieben werden soll. Dabei stehen vor allem einfache und schnell umsetzbare Massnahmen im Vordergrund. Ob dieser Trend nachhaltig sein wird, ist der- zeit schwer abzuschätzen.
- Aus Sicht einer Organisation stellt die Strommessung derzeit das grösste Handlungsfeld dar. Diese Daten werden ab 2027 für alle Liegenschaften in der Schweiz dank dem obligatorischen Smart Metering verfügbar sein. Damit wird auch das Bedürfnis nach einer Visualisierung der Da- ten in Echtzeit stark zunehmen. Sofern diese einfach und kundennah erfolgt, ist ein entsprechen- der Einspareffekt zu erwarten.
- In einer Organisation wurde festgestellt, dass das Thema Monitoring langfristig überflüssig wer- den könnte (zumindest auf der Ebene der Messgeräte), da die Komponenten zunehmend eigene Strommessungen und Visualisierungen ermöglichen. Z.B. Elektrofahrzeuge, PV-Anlagen (nicht aber Wärmepumpen).
- Nach Aussage einer Organisation sind Jahres- oder Monatswerte für die Betriebsoptimierung in der Regel ausreichend. Echtzeitdaten und Viertelstundenwerte bringen keinen Mehrwert.
- Gemäss einer Organisation wissen die meisten Personen, wie warm es in der eigenen Wohnung ist und benötigen kein Komfort-Monitoring («ein Thermometer reicht»). Unklar ist jedoch, wie die Menschen dazu gebracht werden können, die Raumtemperatur sinnvoll zu reduzieren. Weitere Behaglichkeitsfaktoren wie Luftqualität und Lärmemissionen der Lüftung sind vor allem bei moder- nen Bauten ein Thema. Solche Häuser werden oft unnötigerweise über die Fenster gelüftet.
- Im Bereich der Wärme stellt eine Organisation einige Probleme fest: Ungedämmte Heizungs- und Warmwasserleitungen, zu stark entfeuchtete Keller. Hier besteht Optimierungspotenzial. Es wurde auch festgestellt, dass es einfacher ist, Laien für das Stromsparen zu gewinnen als für das Sparen von Heizöl oder Gas.
- Nach Meinung einer Organisation wären Messungen bei Wärmenetzen notwendig, um z.B. die richtige Spitzenlast zu dimensionieren.

2.2.2 SOLL-Analyse

- Nach Angaben einer Organisation ist bei den meisten Gebäuden (Wohn- und Zweckbauten) eine Verbesserung der Energieeffizienz um 20-30% möglich. Dieses Potenzial kann jedoch aus ver- schiedenen Gründen nicht ausgeschöpft werden: Fachkräftemangel, geringes Interesse, fehlende Vorschriften, komplizierte Prozesse, fehlendes Fachwissen, hohe Kosten. Entsprechend wertvoll wären einfache und niederschwellige Ansätze zur Betriebsoptimierung. Sinnvoll wäre auch ein «Profi vor Ort», also eine energieaffine Person in grösseren Siedlungen. Denn das Thema muss kontinuierlich verfolgt und vorangetrieben werden.

- Für eine Organisation wäre es grundsätzlich sinnvoll, wenn mehr Gebäude ganzheitlich erfasst und optimiert werden könnten. Also nicht nur einzelne Systeme und Gewerke. Für die Interpretation der anfallenden Daten wären dann bessere Algorithmen notwendig. Allerdings stellt sich für die Organisation nach wie vor die Frage, ob sich der Laie überhaupt für das Thema Energie interessiert. Hier scheint vor allem die Raumtemperatur im Vordergrund zu stehen.
- Für eine Organisation ist die schnelle Umsetzung des Monitorings der grösste Wunsch. Allerdings wird ein Monitoring nur dann als sinnvoll erachtet, wenn auch Grossverbraucher vorhanden sind: WP, Elektromobilität. Wichtig wären auch Instrumente zur Einordnung des eigenen Verbrauchs: Benchmarks, Vergleich mit dem Gebäudebestand etc.
- Im Bereich des Wärmecontractings für Einfamilienhäuser wäre laut einer Organisation ein Messgerät wünschenswert, das jährliche Begehungen überflüssig macht. Der Funktionsumfang wurde nicht weiter definiert.
- Vision einer Organisation: Es soll einen jährlichen Bericht geben, der zusammenfasst, wie gut die Anlagen funktionieren und wie hoch das Einsparpotenzial ist.
- Nach Ansicht einer Organisation wird die Messung des Stromverbrauchs in Zukunft weniger relevant sein, da dies durch den Smart Meter abgedeckt wird.

2.3 Zusammenfassung

- Auch im Rahmen von Energieberatungen und Betriebsoptimierungen wird ein technisches Monitoring noch selten durchgeführt. Stattdessen werden hauptsächlich vorhandene Abrechnungsdaten und Vor-Ort-Begehungen als Grundlage verwendet.
- Für einzelne Anlagen gibt es bereits «Low-Cost-Monitoring»-Ansätze, z.B. basierend auf LoRa-WAN.
- Das Thema Energie spielte in der Vergangenheit eine untergeordnete Rolle. Hier zeichnet sich derzeit eine Trendwende ab. Ob diese von Dauer sein wird, bleibt abzuwarten.
- Privatpersonen / Laien sind mit dem Thema Energie in der Regel überfordert. Entsprechend wichtig sind niederschwellige, einfache und schnell umsetzbare Ansätze. Die Technik (Datenqualität, Echtzeitfähigkeit, Messmethode) ist dabei sekundär. Im Vordergrund stehen die erzielten Verbesserungen.

2.4 Sinnvolle Nutzungsszenarien

- Erkennen von nicht optimaler Parametrierung der Heizung: Heizkurve, Heizgrenze.
- Fehlerhafte Parametrierung von Warmwasser-Heizstäben erkennen.
- Bestimmung der Funktionsfähigkeit von PV-Anlagen.
- Verbesserung des Raumkomforts bei gleichbleibender Energieeffizienz.
- Visualisierung des Energieverbrauchs zur Bewusstseinsbildung.
- Überwachung und Verbesserung der Raumluftqualität, insbesondere ohne zusätzliche Fensterlüftung, z.B. in Klassenräumen.
- Reduzierung der Lärmemissionen der mechanischen Lüftung.
- Erkennung ungedämmter Heizungs- und Warmwasserrohre.
- «Gebäudecockpit»: ganzheitliche Darstellung der relevanten Gebäudeparameter und entsprechendes, einfaches Reporting («Ampeln» o.ä.).
- Benchmarking des eigenen Strom- und Energieverbrauchs.
- Optimierung der Raumtemperatur hinsichtlich Behaglichkeit vs. Energieverbrauch.

3. Systemübersicht

Das Low-Cost Monitoring System der Hochschule Luzern basiert auf der LoRaWAN-Technologie (Long Range Wide Area Network). Dabei handelt es sich um einen energieeffizienten Funkstandard für das Internet der Dinge (IoT), der speziell für die drahtlose Übertragung kleiner Datenmengen über grosse Distanzen entwickelt wurde. LoRaWAN ermöglicht die einfache Integration von Sensoren in Gebäuden, ohne dass eine bestehende Netzwerkinfrastruktur (z.B. Wireless LAN oder LAN³) benötigt wird. Die Sensoren kommunizieren direkt mit einem öffentlichen oder privaten Gateway, das mit dem Internet verbunden ist. So können auch Gebäude ohne Internetanschluss oder mit eingeschränkter Netzabdeckung zuverlässig überwacht werden. Ein wesentlicher Vorteil der LoRaWAN-Technologie ist der sehr geringe Stromverbrauch der Sensoren. Dadurch können batteriebetriebene Geräte über mehrere Jahre wartungsfrei betrieben werden. Weitere Vorteile sind:

- Kabellose Installation, daher keine Eingriffe in die Bausubstanz erforderlich.
- Grosse Reichweite, typischerweise mehrere Kilometer, auch über mehrere Stockwerke hinweg.
- Kosteneffizienz durch Nutzung öffentlicher Netzwerke wie z.B. «The Things Network» (TTN), das kostenlos zur Verfügung steht.
- Hohe Flexibilität, insbesondere bei temporären Installationen oder in bestehenden Gebäuden.

Im Folgenden werden die Systemarchitektur, die erfassten Daten, die eingesetzten Messgeräte und die eigentliche Monitoring Software zur Datenauswertung und Visualisierung beschrieben.

3.1 Systemkomponenten (Top-Level)

Das Monitoringsystem besteht aus mehreren funktionalen Komponenten, die entlang der gesamten Mess- und Auswertungskette angeordnet sind – von der physikalischen Erfassung der Messwerte über die drahtlose Datenübertragung bis hin zur Visualisierung in einer webbasierten Softwareanwendung. Die folgende Übersicht beschreibt die zentralen Systemkomponenten auf oberster Ebene und ihre jeweilige Rolle innerhalb der Systemarchitektur:

- **Sensoren** erfassen physikalische Messgrößen wie Temperatur, Feuchte, Stromverbrauch oder CO₂.
- **Gateways** empfangen die Funksignale der LoRaWAN-Sensoren und leiten die Daten ins Internet weiter.
- **Kommunikationsprotokolle** dienen der Datenübertragung zwischen den einzelnen Systemkomponenten (z.B. LoRaWAN, MQTT, Modbus).
- **Datenplattform** Zentrale Verwaltungs- und Integrationsplattform für Sensoren und Datenströme. Sie übernimmt die Dekodierung der Sensordaten, die Zuordnung von Metadaten (z.B. Gebäude, Raum, Gerätetyp) sowie die Bereitstellung der Daten für die weitere Auswertung.
- **Datenanalyseplattform** Anwendung zur automatisierten Vorverarbeitung und Strukturierung der eingehenden Rohdaten. Sie übernimmt Aufgaben wie Datenabfrage, Plausibilitätsprüfungen, Datenbereinigung, Aggregation von zeitlichen Messreihen sowie die Transformation in analyserelevante Formate.
- **Auswertungsplattform** Anwendung zur Auswertung und Visualisierung der Messdaten.
- **Nutzer/-innen** Personen oder Organisationen, die mit dem Monitoring-System arbeiten, z.B. Energieberater/-innen, Facility Manager/-innen, Gebäudeeigentümer/-innen oder Studierende. Sie nutzen die Software zur Analyse, Optimierung oder Dokumentation von Gebäudedaten.

³ Ein LAN (Local Area Network) ist ein lokales Netzwerk, das Geräte in einem begrenzten Bereich – beispielsweise in einem Haus, einem Büro, einem Schulgebäude oder auf einem Fabrikgelände – miteinander verbindet.

3.2 Datenfluss / Kommunikationswege

Die Architektur des Low-Cost Monitoring Systems der Hochschule Luzern ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Weg der Messdaten von der Erfassung bis zur Auswertung erfolgt in mehreren Schritten über verschiedene Plattformen und Kommunikationsprotokolle. Die folgende Beschreibung zeigt, wie die Daten durch das System fließen, welche Plattformen beteiligt sind und welche Kommunikationsmechanismen verwendet werden.

- **Datenaufnahme durch Sensoren** Die physikalischen Messgrößen (z.B. Temperatur, Feuchte, Energieverbrauch) werden durch batteriebetriebene Sensoren erfasst, die über das energieeffiziente Funkprotokoll LoRaWAN senden. Es können auch LoRaWAN-Geräte eingesetzt werden, die z.B. Modbus-Daten auslesen.
- **Übertragung über LoRaWAN** Die Datenpakete werden von den LoRaWAN-Geräten (Nodes) an ein LoRaWAN-Gateway weitergeleitet. In Gebieten mit unzureichender Netzabdeckung, insbesondere in ländlichen Regionen, werden bei Bedarf eigene LoRaWAN Gateways installiert, um eine stabile Kommunikation zu gewährleisten. Auch innerhalb von Gebäuden kann die Signalqualität stark variieren – zum Beispiel in abgeschirmten oder abgelegenen Räumen wie Kellern oder Technikzentralen. Auch in diesen Fällen ist die Installation eines zusätzlichen Gateways erforderlich. In städtischen Gebieten hingegen ist die Netzabdeckung von The Things Network in der Regel deutlich besser, so dass hier auf zusätzliche Gateways verzichtet werden kann.
- **Übertragung über The Things Network (TTN)** Das Gateway leitet die empfangenen Daten über das Internet via LAN, WLAN, 3G/4G an den Server von The Things Network weiter. Dort erfolgt die Entschlüsselung und Weiterleitung der Rohdaten an externe Anwendungen.
- **Datenzusammenführung in akenza.io** In der IoT-Plattform akenza.io werden die über LoRaWAN empfangenen Daten durch vordefinierte Payload Decoder interpretiert (Entschlüsselung der Bits und Bytes in menschenlesbare Daten), strukturiert und mit Metadaten (z.B. Gebäude, Raum, Datenpunkttyp) angereichert. Die Plattform ermöglicht (i) eine zentrale Verwaltung der Sensoren und erlaubt die Integration von Sensoren über andere LoRaWAN-Anbieter wie Swisscom, (ii) den Empfang von Daten über das MQTT-Protokoll, z.B. von SPS (speicherprogrammierbaren Steuerungen), Gebäudeleitsystemen, Energiezählern oder anderen IoT-Gateways und (iii) den Import von Daten über eine API⁴ (HTTP/REST), z.B. aus Datenbanken eines bestehenden Gebäudeleitsystems oder Energiemanagementsystems.
- **Datenabfrage durch lcm (Pull on demand)** Die Low-Cost Monitoring Software lcm ruft die aufbereiteten Daten bei Bedarf über eine API-Schnittstelle von akenza.io ab. Dabei handelt es sich um einen klassischen Pull-Mechanismus, bei dem lcm die Daten aktiv anfordert. Es findet keine direkte Datenübertragung in Echtzeit statt. Bereits angeforderte Daten werden nicht erneut angefordert, sondern nur das Delta. Es werden Rohdaten an die lcm-Anwendung übermittelt.
- **Datenvorverarbeitung in lcm** Innerhalb von lcm werden die abgefragten Messwerte gespeichert und einer automatisierten Datenvorverarbeitung unterzogen: Dazu gehören u.a. Datenbereinigung, Aggregation und einfache Plausibilitätsprüfungen (z.B. auf definierte Minimal- und Maximalwerte, Ausreissererkennung).
- **Visualisierung und Auswertung in lcm** Die bereinigten und strukturierten Daten werden schliesslich in lcm visualisiert und mit Hilfe von vordefinierten Modulen ausgewertet. Die Benutzeroberfläche ermöglicht eine interaktive Analyse ohne spezielle Fachkenntnisse.

⁴ Eine API (Application Programming Interface, auf Deutsch: Programmierschnittstelle) ist eine Schnittstelle, die es zwei Programmen oder Systemen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren.

Proof of Concept (Vorgängerprojekt)



Anpassungen im laufenden Projekt

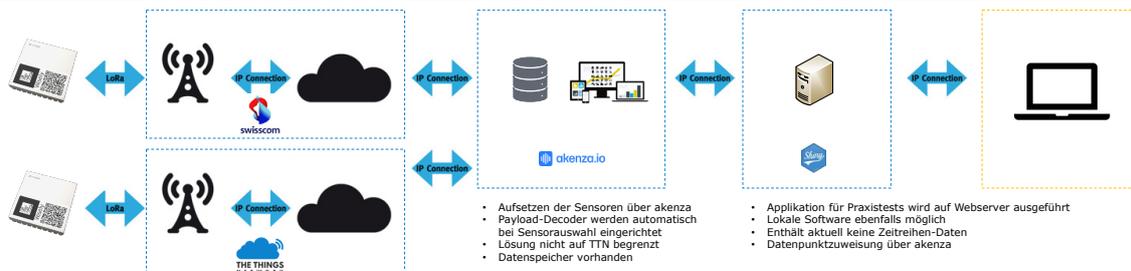


Abbildung 2. Architektur des Low-Cost Monitoring Systems der Hochschule Luzern.

3.3 Daten und Messmittel

Mit dem Low-Cost Monitoring System kann eine Vielzahl von Messdaten erfasst werden. Diese sind in Tabelle 1 übersichtlich dargestellt. Abhängig von den erfassten Messdaten können verschiedene Auswertungen durchgeführt werden, siehe Anhang 2. Zusätzlich sind in der Tabelle die Messgeräte aufgeführt, die zur Erfassung der jeweiligen Daten verwendet werden können. Die entsprechenden LoRaWAN-Produkte sind in Anhang 3 aufgeführt.

Daten	Messmittel
Stromproduktion und -verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Opto-Kopf für Zähler • Induktive Strommesszangen • CSV-Import • Gateway: M-Bus, Modbus (noch nicht umgesetzt)
Wärmeverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Opto-Kopf für Zähler • CSV-Import • Gateway: M-Bus, Modbus (noch nicht umgesetzt)
Raumkomfort	<ul style="list-style-type: none"> • Raumsensor • (CSV-Import)
Aussenklima	<ul style="list-style-type: none"> • Wetterstation • Aussensensoren für Temperatur und Feuchte • CSV-Import
Wasserverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Gateway: M-Bus, Modbus • Opto-Kopf für Zähler • CSV-Import
Stromaufnahme Wohnungslüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Induktive Strommesszangen • (Gateway: M-Bus, Modbus) • (Opto-Kopf für Zähler) • (CSV-Import)
Lufttemperaturen Wohnungslüftung (ZUL, ABL)	<ul style="list-style-type: none"> • Kanalfühler mit LoRaWAN Interface-Modul • (CSV-Import)
Filterverschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Differenzdrucksensor (noch nicht umgesetzt) • (CSV-Import)

Stromverbrauch Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> • Induktive Strommesszangen • (Gateway: M-Bus, Modbus) • (Opto-Kopf für Zähler) • (CSV-Import)
Überwachung Fenster und Türen	<ul style="list-style-type: none"> • LoRaWAN Tür- / Fensterkontakt • Konventioneller Tür- / Fensterkontakt mit LoRaWAN IO-Modul • (CSV-Import)

Tabelle 1. Low-Cost Monitoring: Erhobene Daten und entsprechende Messmittel. (): Die Messmittel in Klammern sind nur bedingt einsetzbar. Die entsprechenden LoRaWAN-Produkte sind in Anhang 3 aufgeführt.

3.4 Konfigurations- und Metadatenverwaltung

Eine manuelle Konfiguration der Sensoren innerhalb der lcm-Software ist nicht erforderlich. Die Zuordnung der Sensoren zu den jeweiligen Projekten, Gebäuden, Stockwerken und Räumen erfolgt vollständig über die IoT-Plattform akenza.io. Anhand dieser Metadaten erkennt lcm automatisch, welche Auswertemodule für das jeweilige Projekt relevant sind. So werden beispielsweise nur jene Module angezeigt, für die auch tatsächlich geeignete Messdaten vorliegen. Ist z.B. kein Stromzähler integriert, wird das Modul zur Analyse des Stromverbrauchs ausgeblendet. Dies erhöht die Benutzerfreundlichkeit und reduziert mögliche Fehlkonfigurationen.

Die Sensoren werden über akenza.io in das TTN LoRaWAN Netzwerk integriert und nicht direkt über die TTN Benutzeroberfläche verwaltet. Die eigentliche Registrierung der Sensoren erfolgt jedoch weiterhin im Hintergrund auf TTN, wodurch die Vorteile beider Systeme kombiniert werden und die Konfiguration nur auf einer Plattform erfolgt.

Wichtige Funktionen von akenza.io für das lcm-Projekt sind

- **Geräteverwaltung** Einfache Integration und Verwaltung von Sensoren unterschiedlicher Hersteller.
- **Metadatenverwaltung** Über Benutzerfelder können Metadaten wie Projekt, Gebäude, Raum, Standort und Gerätetyp zugeordnet werden. Dadurch entfällt die Konfiguration in der lcm-Anwendung.
- **Gerätebibliothek** Unterstützung vieler LoRaWAN Sensoren mit fertiger Payload-Verarbeitung.
- **Multi-Netzwerk Kompatibilität** Unterstützung von TTN, Swisscom, MQTT, HTTP, REST API.
- **Data Storage & Routing** Speicherung und Weiterleitung von Sensordaten an Zielsysteme wie z.B. eine externe Zeitreihen-Datenbank.
- **Dashboards** Schnell erstellbare Zeitreihendiagramme, die über einen öffentlich zugänglichen Link ohne Benutzerverwaltung einfach Dritten zur Verfügung gestellt werden können.
- **Alarmierung** Wöchentliche Berichte über Batteriestand der Sensoren und Signalqualität.

Die Plattform akenza.io bietet somit eine zentrale Umgebung für die Integration verschiedenster IoT-Komponenten, Gerätemanagement, Alarmierung, Datenverarbeitung, Datenpunktkonfiguration, Datenspeicherung und Weiterleitung.

3.5 Low-Cost Monitoring Software

Die Low-Cost-Gebäudemonitoring-Software «lcm» der Hochschule Luzern besteht aus verschiedenen Modulen und den dazugehörigen Konfigurations- und Hilfsfunktionen. Jedes Modul entspricht einer möglichen Auswertung der Monitoringdaten. Darüber hinaus bietet die Software alle notwendigen Konfigurationsfunktionen zur Einbindung der Messgeräte und zur Definition des überwachten Objektes. Die Software wurde in der Programmiersprache R entwickelt.

Die verfügbaren Module der Software lcm sind in Tabelle 2 übersichtlich zusammengestellt. Sie werden laufend weiterentwickelt und ergänzt. Die Benutzeroberfläche der Software wurde möglichst selbsterklärend gestaltet (Abbildung 3). Im linken Teil können das auszuwertende Projekt sowie die verschiedenen Module zur Auswertung der Messdaten ausgewählt werden. Im Zentrum des rechten Teils steht die Visualisierung der Messdaten mit den entsprechenden Auswahlmöglichkeiten (Gebäude, Wohnung, Raum, Zeitbereich, Jahreszeit). Darüber können einzelne Parameter für die Auswertung (z.B. Schwellwerte) angepasst werden. Im unteren Teil befinden sich die notwendigen Anleitungen zu den Modulen. Diese beschreiben einerseits den Zweck der einzelnen Module, andererseits die dafür erforderlichen Messdaten und die zur Verfügung stehenden Darstellungen. Darüber hinaus werden für jedes Modul Empfehlungen zur energetischen Betriebsoptimierung gegeben, die auf den Auswertungen des Moduls basieren.

Durch diese Struktur sind keine speziellen Kenntnisse über die einzelnen Datenreihen erforderlich. Es ist also kein Expertenwissen erforderlich, um Betriebszustände und Anomalien aus Zeitreihendaten zu erkennen. Stattdessen werden die Daten pro Modul so aufbereitet, dass die zu optimierenden Zustände direkt und ohne Vorkenntnisse ersichtlich sind. So werden z.B. bei der Raumkomfortanalyse (Modul Temperatur vs. Feuchte) die Daten in einem hx-Diagramm dargestellt, das den einzuhaltenden Komfortbereich als farbige Zone darstellt (Abbildung 4). Messwerte, die ausserhalb dieses Bereiches liegen, werden sofort erkannt und zugeordnet (räumlich, zeitlich). Falls der Benutzer oder die Benutzerin die angezeigte Visualisierung nicht versteht, kann er sich im unteren Teil unter «Benutzeroberfläche» und «Interpretation» das nötige Know-how zum Lesen und Interpretieren aneignen.

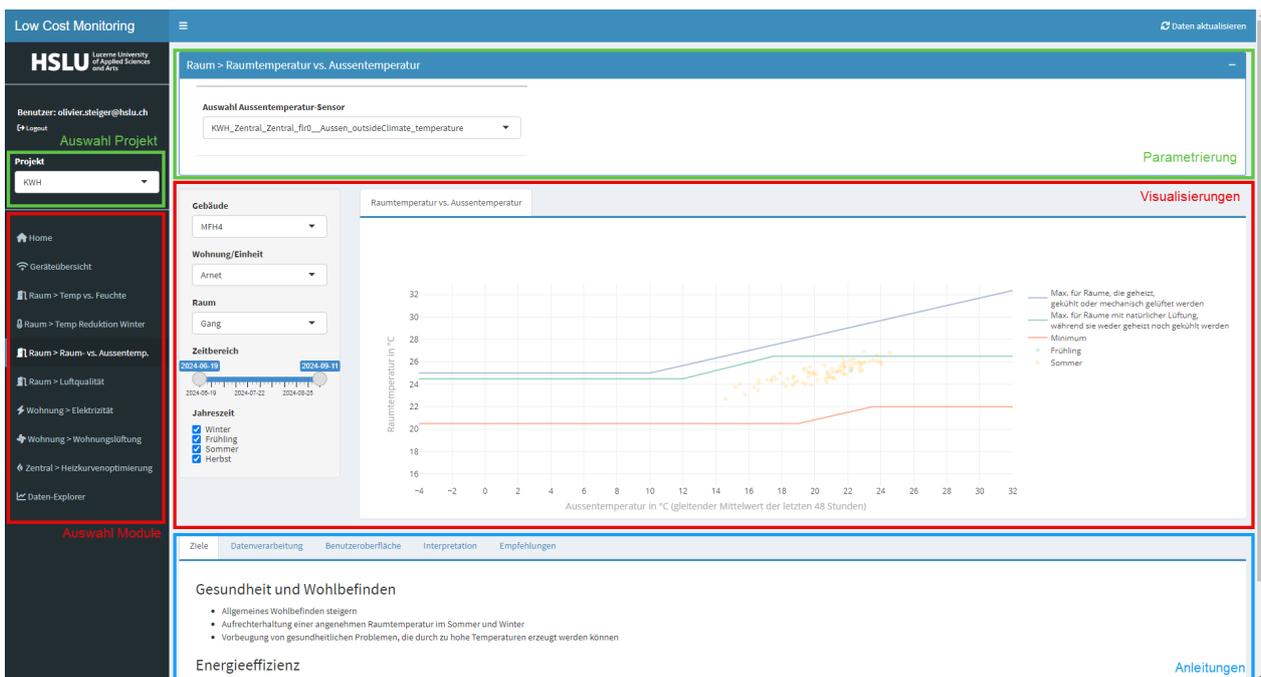


Abbildung 3. Benutzeroberfläche der Software lcm. Im linken Teil kann das auszuwertende Projekt sowie die verschiedenen Module zur Auswertung der Messdaten ausgewählt werden. Im Zentrum des rechten Teils steht die Visualisierung der Messdaten mit den entsprechenden Auswahlmöglichkeiten (Gebäude, Wohnung, Raum, Zeitbereich, Jahreszeit). Darüber können einzelne Parameter für die Auswertung (z.B. Schwellwerte) angepasst werden. Im unteren Teil befinden sich die notwendigen Anleitungen zu den Modulen.

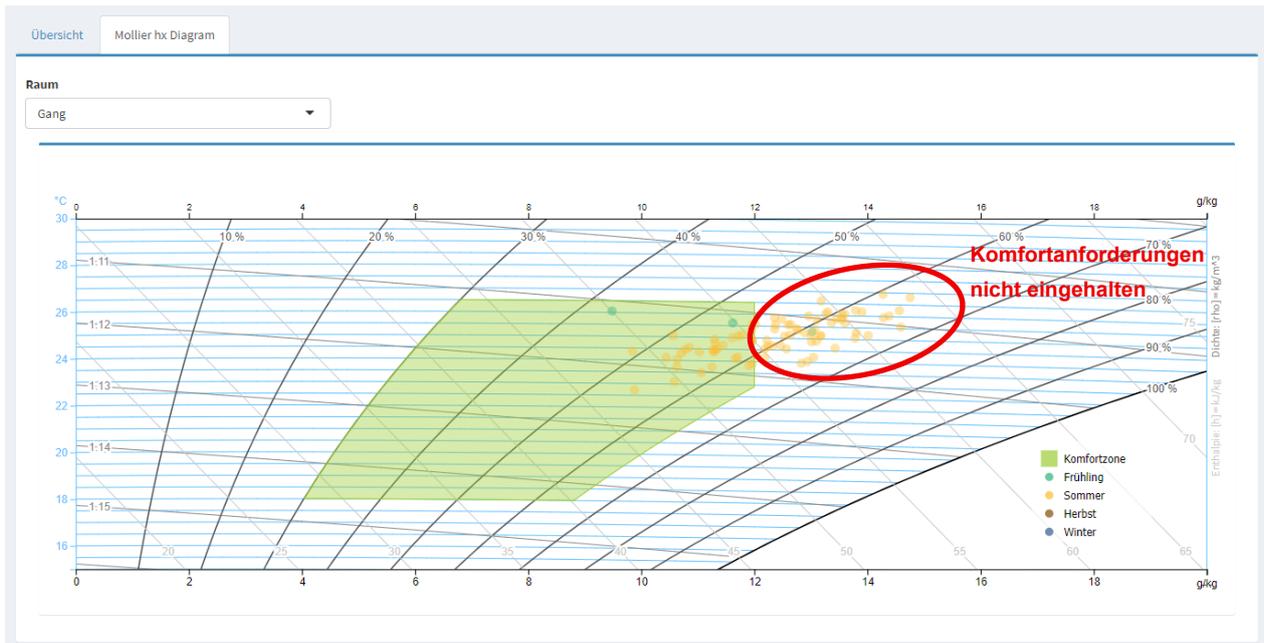


Abbildung 4. Bei der Raumkomfortanalyse (Modul «Raum > Temperatur versus Feuchte») werden die Daten in einem hX-Diagramm dargestellt. Dieses zeigt den einzuhaltenden Komfortbereich als farbige Zone. Datenpunkte ausserhalb dieses Bereichs deuten auf unbehagliche Komfortbedingungen hin. Das h-x-Diagramm (auch Mollier-Diagramm für feuchte Luft genannt) ist ein in der Klima-, Lüftungs- und Kältetechnik verwendetes technisches Diagramm zur Darstellung und Berechnung des Zustands von feuchter Luft. Es stellt die thermodynamischen Zustände feuchter Luft grafisch dar, indem es die Enthalpie (h) gegen den Wassergehalt (x) aufträgt.

Modul	Zweck	Visualisierungen	Datenpunkt(e)	Messebene
Raum > Temperatur vs. Feuchte	Komfortanalyse bezüglich Feuchte und Temperatur (Überhitzung, Schimmelproblematik, trockene Luft im Winter)	-Übersicht Temperatur und Feuchte -Mollier hx-Diagramm	-Raumlufttemperatur in °C (Stundenwerte) -Luftfeuchtigkeit in %rF (Stundenwerte)	Raum
Raum > Temperatur-Reduktion Winter	Reduktion der Heizenergie durch Senkung der Raumtemperatur	-Zeitreihen -Boxplot	-Raumlufttemperatur in °C (Stundenwerte)	Raum
Raum > Raumtemperatur vs. Aussentemperatur	Reduktion der Überhitzungsstunden im Sommer und Winter	-Raum- vs. Aussentemperatur	-Raumlufttemperatur (Stundenwerte) -Aussentemperatur (Stundenwerte)	Raum
Raum > Luftqualität	Komfortanalyse bezüglich Raumluftqualität (oft problematisch in Schlafzimmern)	-Übersicht Luftqualitätsanalyse CO ₂ und VOC -Tagesansicht -Zeitreihen	-CO ₂ in ppm (Stundenwerte) -VOC Index (Stundenwerte)	Raum
Wohnung > Elektrizität	Analyse und Optimierung Stromverbrauch Untersuchung Standby-Verbrauch	-Übersicht Durchschnittliche Verbrauchswerte -Tagesansicht -Kalenderansicht -Verbrauchsprofile pro Jahreszeit und Wochentag	-Stromverbrauch pro Wohnung in kWh	Wohnung
Wohnung > Wohnungslüftung	Optimierung des Energieverbrauchs der Lüftung und Früherkennung von Lüftungsproblemen	-Lüftungsprofil als Heatmap -Kalenderansicht	-Leistung des Lüftungsgerätes in Watt (Stundenwerte)	Wohnung
Zentral > Heizkurvenoptimierung	Analyse und Optimierung der Heizkurve	-Zeitreihen Heizgruppe -Zeitreihen Räume -Heizkurve	-Raumlufttemperaturen in °C -Vor- und Rücklauftemperatur in °C -Aussentemperatur in °C	Gebäude
Daten Explorer	Explorer zur Visualisierung und Analyse der Rohdaten	-Zeitreihen (Rohdaten) -Verschiedene statistische Funktionen -Aggregation von Messdaten über verschiedene Zeitintervalle	-Alle erfassten Messdaten	-

Tabelle 2. Module der Low-Cost Monitoring Software. Jedes Modul entspricht möglichen Auswertungen der Monitoring-Daten und verfügt über eigene, zweckbestimmte Visualisierungen.

4. Praxistests

4.1 Übersicht

Die bestehende Low-Cost Monitoring-Lösung wurde im Rahmen von Praxistests in Wohngebäuden validiert, verfeinert und weiterentwickelt. Auf Basis der Erkenntnisse aus den Praxistests wird die Praxistauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit der bestehenden Lösung verbessert. Insbesondere werden zusätzliche anwendungsspezifische Datenauswertungsmodule entwickelt und implementiert.

4.2 Testgebäude

Die für die Praxistests verwendeten Testgebäude sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Es wurden zwei Einfamilienhäuser und zwei Mehrfamilienhäuser an unterschiedlichen Standorten verwendet. Die Messungen wurden zwischen November / Dezember 2023 und Februar 2025 durchgeführt⁵.

MFH Kleinwilhöhe 4, Horw	EFH, Rheinfelden	MFH, Köniz	EFH, Suhr (Messzeitraum: 4 Monate)
			
<ul style="list-style-type: none">- 3 Wohnungen in MFH, je ca. 120 m²- Eingeschossige Wohnungen- Überbauung mit 12 Häusern mit je 10 Wohnungen- Minergie-Standard- Kontr. Wohnungslüftungen mit WRG- Zentrale Holzsnitzelheizung 500kW- Pro Haus Warmwasser-Speicher ohne Elektroheizeinsatz- Pro Wohnung Durchfluss-Warmwasserzähler- Pro Haus Wärmezähler Warmwasser- Pro Wohnung Wärmezähler- Smartmeter umgerüstet	<ul style="list-style-type: none">- EFH mit 3 Stockwerken- 3 Schlafräume- Keine Wohnungslüftung- PV und Ladestation- Wärmepumpe- Wassererwärmer über WP, sep. Elektroheizeinsatz- Smartmeter umgerüstet	<ul style="list-style-type: none">- 1 Wohneinheit in Doppel-EFH- Keine Wohnungslüftung- Wärmepumpe- Wassererwärmer über WP, sep. Elektroheizeinsatz- Noch kein Smartmeter	<ul style="list-style-type: none">- EFH mit 3 Stockwerken und 7 Zimmern, davon 4 Schlafräume- Kontr. Wohnungslüftung mit WRG- Auslesung Verbrauch WP über SmartMe wäre möglich- WP Datenexport über heatpump24.com möglich- PV und Ladestation, Smartfox- Aussentemperatur über WP, Sonne scheint aber darauf- Wassererwärmer über WP, sep. Elektroheizeinsatz, Sicherung aber entfernt- Feuerherd in Küche, 2 Ster pro Jahr- Noch kein Smartmeter

Tabelle 3. Übersicht der Testgebäude für die Praxistests.

4.3 Auswertungen

Ausgangspunkt für die Praxistests ist die geeignete Auswahl der durchzuführenden Auswertungen der Messdaten. Die Auswertungen werden dann jeweils mit einem Modul der lcm-Software umgesetzt. Bei der Auswahl der Auswertungen wurden folgende Punkte berücksichtigt: (1) sinnvolle Einsatzszenarien gemäss Interviews (Kapitel 2.4); (2) bereits implementierte Auswertungsmodul (Tabelle 2); (3) Intuition und Expertise des Projektteams.

Die Übersicht über die möglichen Auswertungen (*Module*) findet sich in Tabelle 2. Auf die einzelnen Auswertungen wird im Folgenden näher eingegangen. Weitere Details zu den einzelnen Modulen und deren Anwendung zur energetischen Betriebsoptimierung finden sich in den Anleitungen, die in der Software lcm enthalten sind.

⁵ Ausnahme: Im EFH Suhr wurden die Messungen zwischen Dezember 2023 und April 2024 durchgeführt.

4.3.1 Raum > Temperatur versus Feuchtigkeit

Mit diesem Modul wird eine Behaglichkeitsanalyse hinsichtlich Temperatur und Feuchte in einzelnen Räumen durchgeführt. Abweichungen vom Behaglichkeitsbereich sind in der Regel auf falsche Einstellungen der Heizungs-, Lüftungs- und Sonnenschutzsysteme sowie auf unzureichendes Lüftungsverhalten zurückzuführen. Im Modul werden verschiedene Empfehlungen zur Optimierung der Einstellungen und des Nutzerverhaltens gegeben.

Um Probleme zu erkennen und Rückschlüsse auf deren Ursache zu ziehen, sind zwei Darstellungen möglich (Abbildung 5). Die Übersicht zeigt, ob die gemessenen Temperatur-/Feuchtwerte in einem noch behaglichen Bereich liegen. Das hx-Diagramm zeigt, ob einzelne Messwerte innerhalb eines vordefinierten und einstellbaren Behaglichkeitsbereiches liegen oder nicht. Die Messwerte können dann durch Auswahl mit der Maus zeitlich und räumlich verortet werden. So können Rückschlüsse auf die Ursache von Abweichungen gezogen werden.

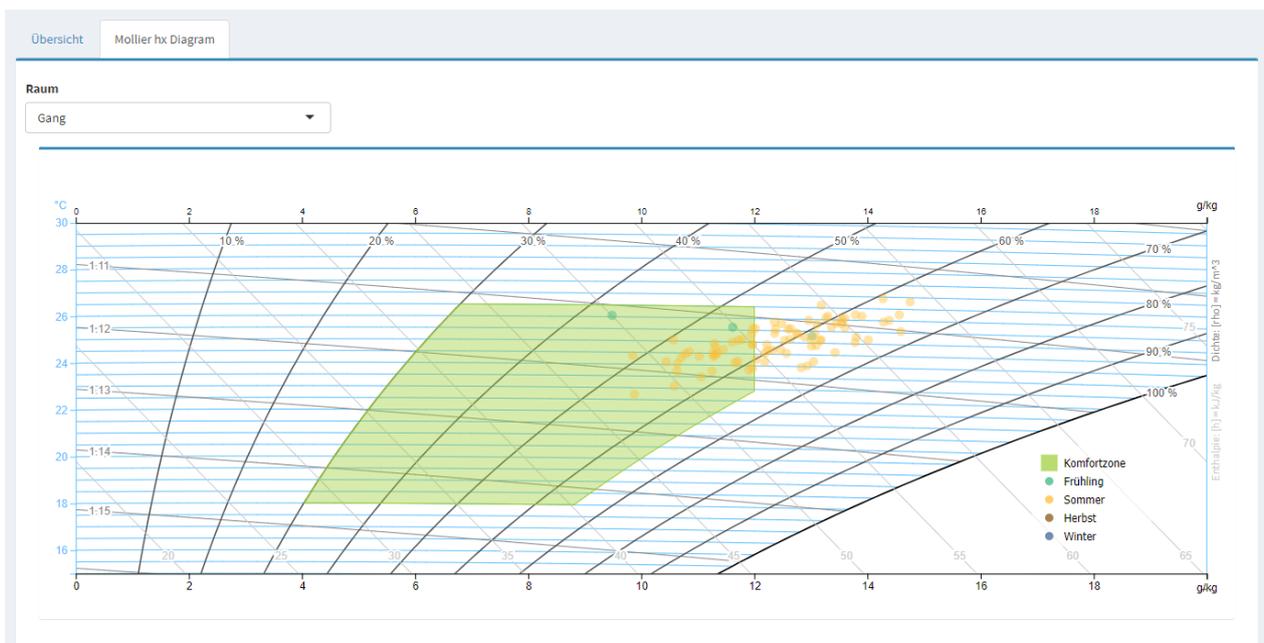
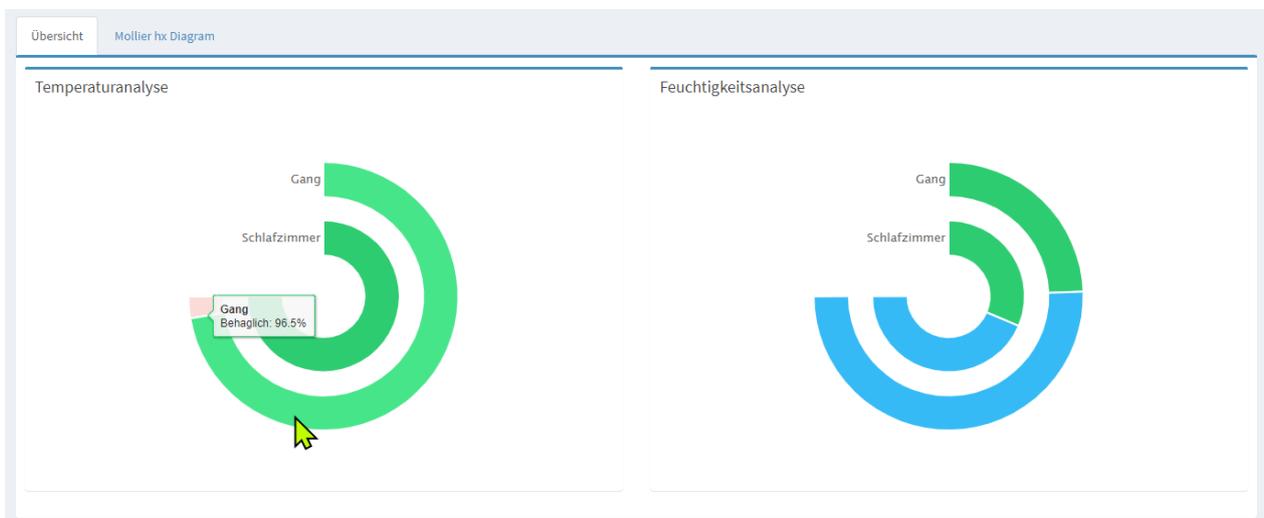


Abbildung 5. Visualisierungen im Modul Raum > Temperatur versus Feuchte. Oben: Die Übersicht zeigt pro Raum, wie viel Prozent der Messungen innerhalb des definierten Behaglichkeitsbereichs für Temperatur und Feuchte liegen. Unten: Im hx-Diagramm werden die einzelnen Messwerte bezogen auf einen definierten Behaglichkeitsbereich dargestellt.

4.3.2 Raum > Temperatur-Reduktion Winter

Dieses Modul ermöglicht die Optimierung der Raumtemperaturen in Bezug auf einen vorgegebenen und einstellbaren Heizsollwert. Ziel ist es, durch Absenkung der Temperaturen Heizenergie einzusparen und eine Überhitzung der Räume zu vermeiden. Diese Probleme können durch falsch eingestellte Raumthermostate, Heizkennlinien und schlecht abgeglichenen Fussbodenheizungsverteiler verursacht werden. Die einzelnen Ursachen sind in der Modulanleitung aufgeführt.

Um überhöhte Raumtemperaturen zu erkennen und zu erklären, stehen zwei Visualisierungen zur Verfügung (Abbildung 6). Die Übersicht zeigt für jeden Raum die Lage der einzelnen Messwerte und deren Mittelwert bezogen auf einen vordefinierten Sollwert. Die Boxplots zeigen statistische Informationen zu den Messdaten, ebenfalls bezogen auf den Sollwert. Ziel ist es, Massnahmen zur Anpassung der Messwerte an den Sollwert zu definieren.

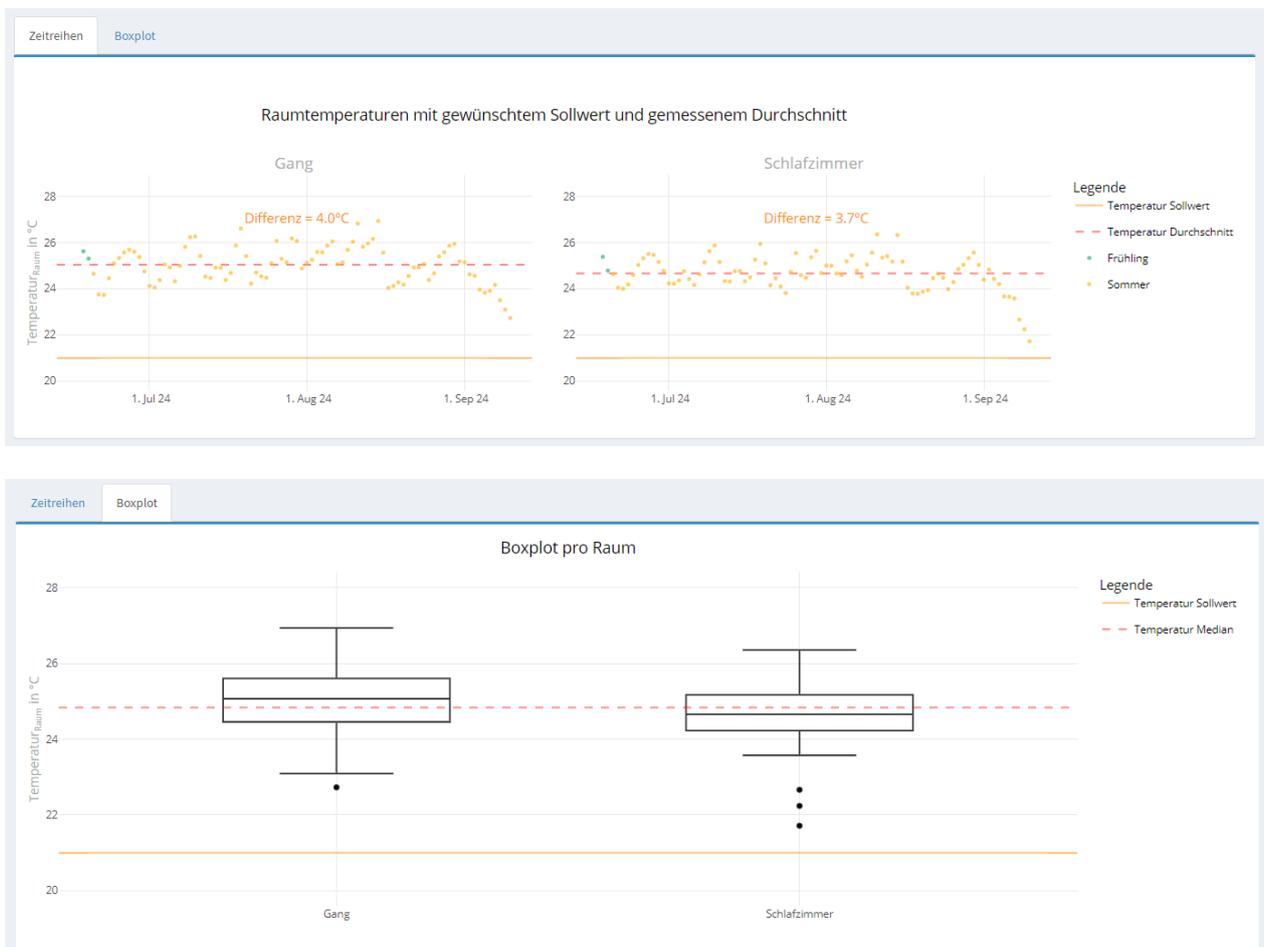


Abbildung 6. Visualisierungen im Modul Raum > Temperaturabsenkung Winter. Oben: Die Übersicht zeigt für jeden Raum die Lage der einzelnen Messdaten und deren Mittelwert in Bezug auf einen vordefinierten Sollwert. Unten: Die Boxplots zeigen statistische Informationen zu den Messdaten, ebenfalls bezogen auf die Sollwerte.

4.3.3 Raum > Raumtemperatur vs. Aussentemperatur

Ziel dieses Moduls ist die Aufrechterhaltung einer behaglichen Raumtemperatur im Sommer und Winter. Dazu wird die gemessene Raumtemperatur mit der Aussentemperatur in Beziehung gesetzt. Die Raumtemperaturen sollen immer innerhalb der Grenzwertkurve nach SIA 180:2014 liegen. Diese geben den zulässigen bzw. behaglichen Temperaturbereich für verschiedene Aussentemperaturen (d.h. Heiz- und Kühlfall) an. Mit dem Modul kann einerseits sichergestellt werden, dass der Komfortbereich gemäss Norm eingehalten wird. Andererseits kann die Heiz- bzw. Kühlenergie durch Absenken/Anheben der entsprechenden Raumtemperaturen minimiert werden.

Zur Einordnung der gemessenen Raumtemperaturen in die Grenzkurven nach SIA 180:2014 werden diese in Abhängigkeit der Aussentemperatur dargestellt (Abbildung 7). Ziel ist es, dass die Messwerte immer innerhalb der Grenzkurven und möglichst nahe am Minimum (Heizfall) bzw. Maximum (Kühlfall) liegen.

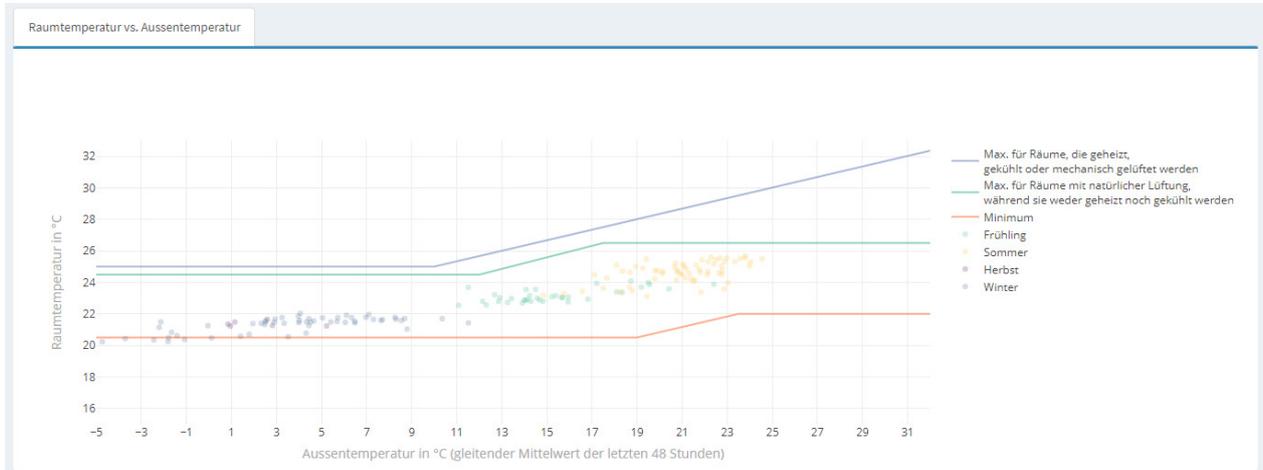


Abbildung 7. Visualisierung im Modul Raum > Raumtemperatur vs. Aussentemperatur. Die einzelnen Raumtemperaturmessungen werden in Bezug zur Aussentemperatur (gemessen oder aus Meteodaten) gesetzt. Die Messungen müssen immer innerhalb der Grenzwertkurve nach SIA 180:2014 liegen.

4.3.4 Raum > Luftqualität

Ziel dieses Moduls ist die Sicherstellung einer guten Luftqualität. Zu diesem Zweck werden zwei Messgrößen berücksichtigt: Die CO₂-Konzentration und der VOC-Index. Die CO₂-Konzentration ist ein Indikator für die Luftqualität und die Frischluftzufuhr, wobei höhere Werte auf eine unzureichende Belüftung hinweisen können, die zu Ermüdungs- und Konzentrationsschwierigkeiten führen kann. Der VOC-Index misst die Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) in der Luft, die aus verschiedenen Quellen wie Farben, Reinigungsmitteln oder Baumaterialien stammen. Hohe VOC-Werte können die Luftqualität beeinträchtigen und gesundheitsschädlich sein, da viele VOC reizend oder potenziell giftig sind. Das Modul dient auch zur Optimierung der mechanischen Lüftung. Dabei soll der Luftvolumenstrom (und damit der Energieverbrauch) nur so hoch eingestellt werden, dass immer (gerade) eine gute Luftqualität gewährleistet ist.

Zur Beurteilung der Luftqualität stehen drei Visualisierungen zur Verfügung (Abbildung 8). Die Übersicht zeigt, wie viel Prozent der Zeit die gemessene Luftqualität gut, ausreichend oder mangelhaft war. Die Tageswerte ermöglichen eine zeitliche Einordnung der Luftqualität. Mit Hilfe von Zeitreihen kann die Luftqualität zusätzlich detailliert untersucht werden.

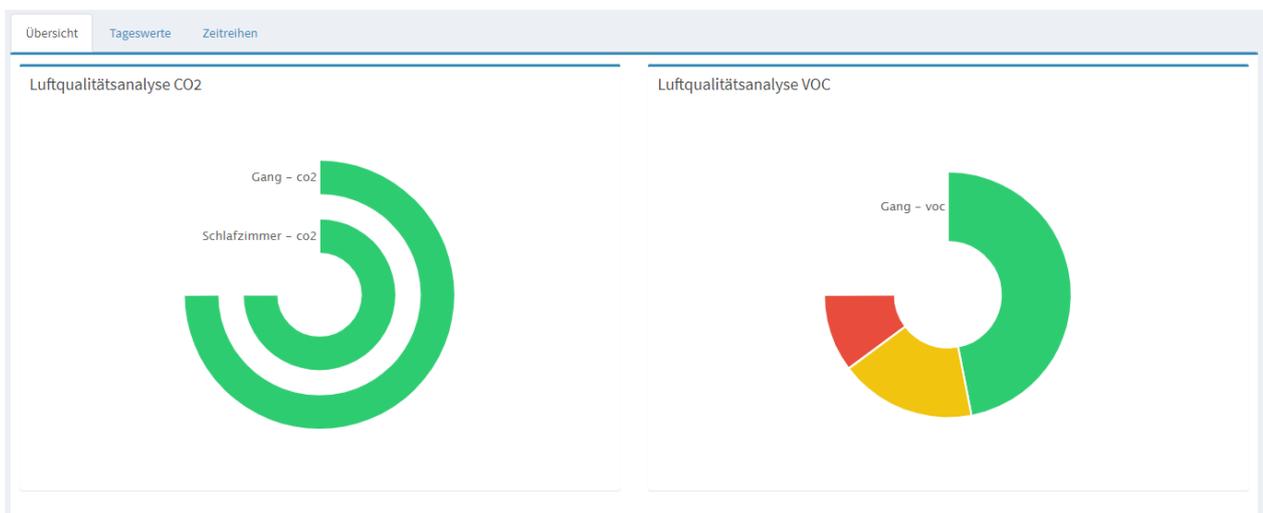




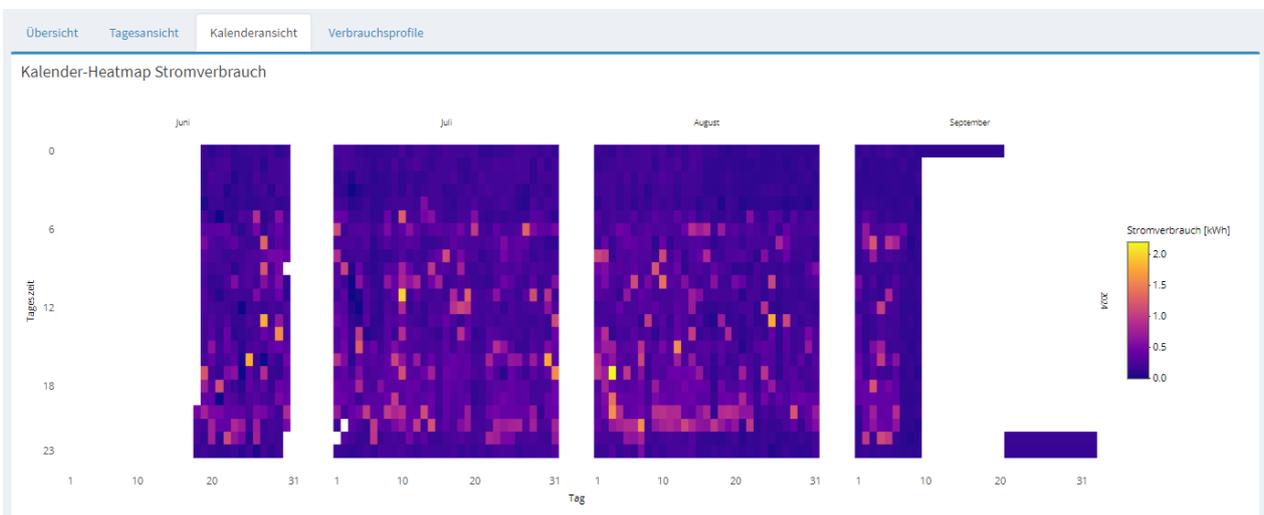
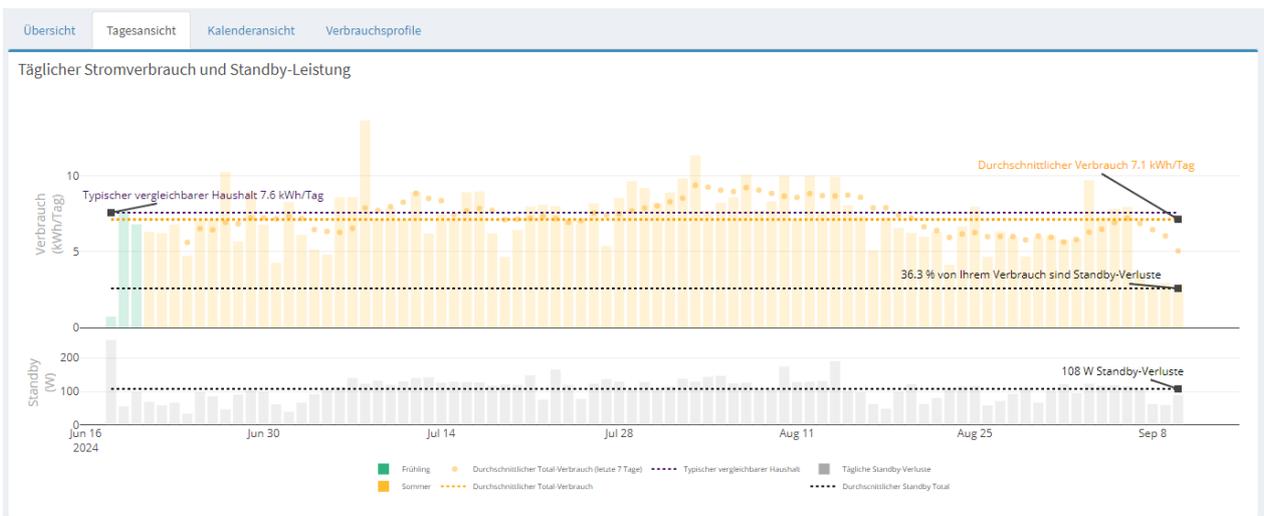
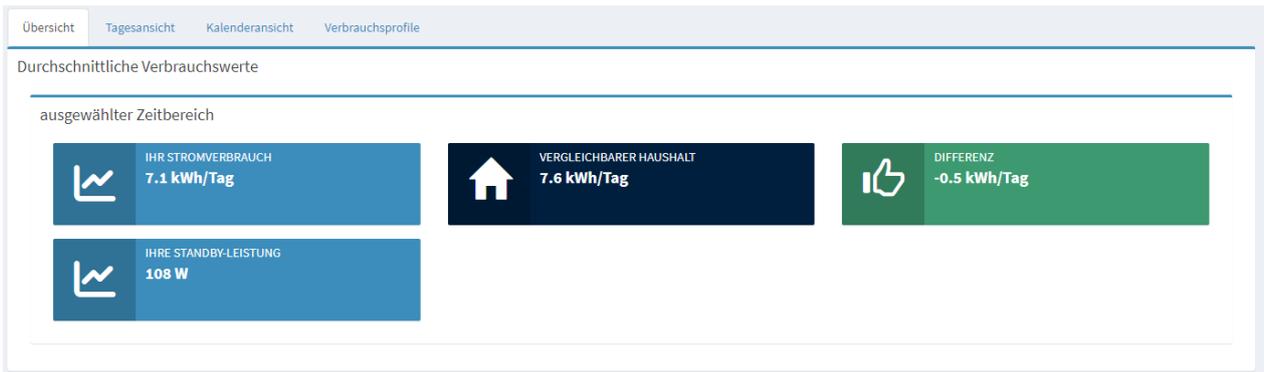
Abbildung 8. Visualisierungen im Modul Raum > Luftqualität. Oben: Die Übersicht zeigt, wie viel Prozent der Zeit die gemessene Luftqualität gut, ausreichend oder ungenügend war. Als Messgrößen dienen die CO₂-Konzentration und der VOC-Index. Mitte: Die Tageswerte erlauben eine zeitliche Einordnung der Luftqualität. Unten: Mit Hilfe von Zeitreihen kann die Luftqualität detailliert untersucht werden.

4.3.5 Wohnung > Elektrizität

In diesem Modul wird der Stromverbrauch einzelner Wohnungen untersucht. Ziel ist es, den Stromverbrauch und insbesondere die Standby-Verluste zu reduzieren. Diese Aufgabe ist relativ schwierig, da in der Regel nur der Gesamtstromverbrauch gemessen wird und dieser keine einfachen Rückschlüsse auf einzelne Verbraucher zulässt. Dennoch lassen sich Auffälligkeiten erkennen, die dann durch eine tiefergehende Analyse, z.B. mit induktiven Stromzählern oder Smart Plugs, ergänzt werden können.

Für die Analyse des Stromverbrauchs stehen vier Visualisierungen zur Verfügung (Abbildung 9). In der Übersicht wird der gemessene Stromverbrauch für den gewählten Zeitraum berechnet und mit dem Verbrauch eines Referenzhaushaltes verglichen. Die Berechnung des Vergleichshaushaltes basiert auf den Voreinstellungen und stammt aus einer Studie des Schweizerischen Bundesamtes für Energie BFE⁶. Zusätzlich wird der Standby-Verbrauch berechnet. Als Schätzwert wird das tägliche Minimum des Stromverbrauchs verwendet. Die Tagesansicht gibt einen einfachen Überblick über die Zeitreihe pro Wohnung. Dabei wird zwischen dem Gesamtverbrauch und dem Standby-Verbrauch unterschieden. Die Kalenderansicht erzeugt eine Heatmap des stündlichen Stromverbrauchs. Die Verbrauchsprofile sind Tagesprofile nach Jahreszeit und Wochentag. Die schwarze Linie stellt den stündlichen Mittelwert dar, die grauen Flächen die stündlichen Minimal-/Maximalwerte.

⁶ Quelle: Nipkov, J. (2013). Typischer Haushalt-Stromverbrauch. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE).



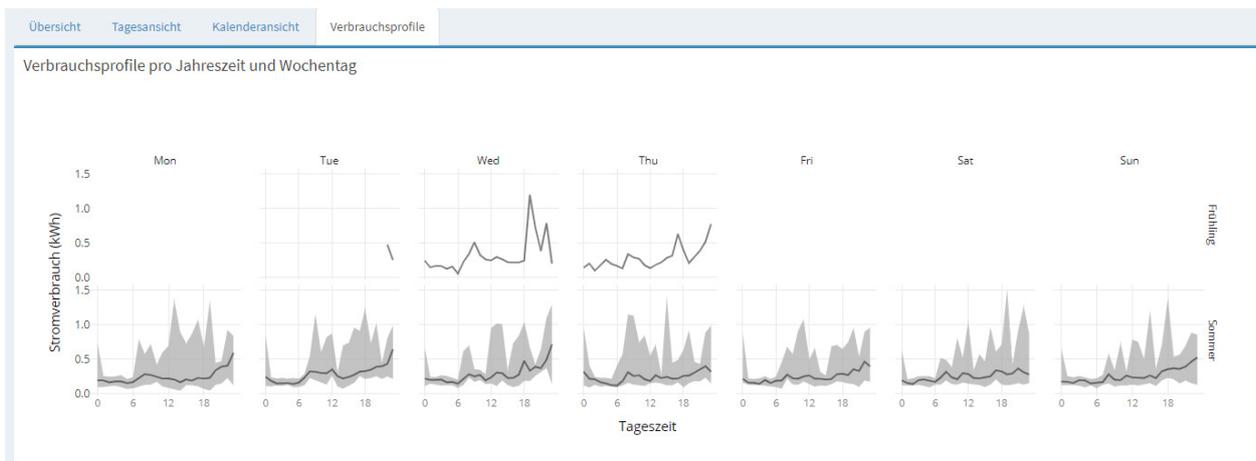
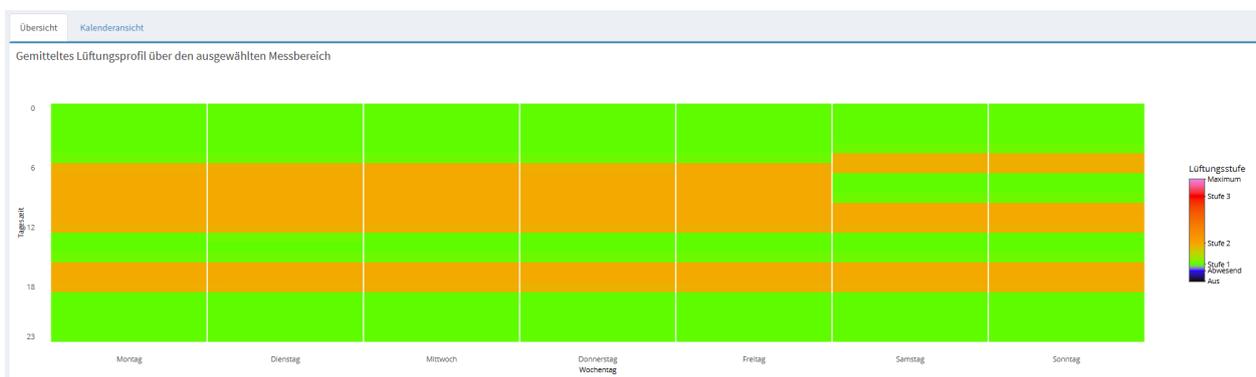


Abbildung 9. Visualisierungen im Modul Wohnung > Elektrizität. Oben: In der Übersicht wird der gemessene Stromverbrauch für den gewählten Zeitraum berechnet und mit dem Verbrauch einer vergleichbaren Wohnung verglichen. Der Standby-Verbrauch wird ebenfalls berechnet. Mitte oben: Die Tagesansicht gibt einen einfachen Überblick über die Zeitreihendaten pro Wohnung. Dabei wird zwischen dem Gesamtverbrauch und dem Standby-Verbrauch unterschieden. Mitte unten: Die Kalenderansicht erzeugt eine Heatmap des stündlichen Stromverbrauchs. Unten: Die Verbrauchsprofile sind Tagesprofile nach Jahreszeit und Wochentag. Die schwarze Linie stellt den stündlichen Mittelwert dar, die grauen Flächen die stündlichen Minimal-/Maximalwerte (q5/q95).

4.3.6 Wohnung > Wohnungslüftung

In diesem Modul wird untersucht, ob die Einstellungen der mechanischen Lüftung dem tatsächlichen Bedarf entsprechen (d.h. ob der zeitliche Verlauf der Lüftungsstufen mit der Nutzung übereinstimmt). Zur Bestimmung der Lüftungsstufe wird die Stromaufnahme der Wohnungslüftung induktiv oder mit einem Smart Plug gemessen. Ziel ist es, den Lüftungsbetrieb an den Bedarf anzupassen und so den Energieverbrauch zu minimieren.

Hierzu stehen zwei Auswertungen zur Verfügung (Abbildung 10 und Abbildung 11). In der Übersicht wird die «typische» Lüftungsstufe zu verschiedenen Tageszeiten und Wochentagen als Heatmap dargestellt. So kann auf einen Blick das eingestellte Lüftungsprofil (z.B. Zeitprogramm oder Präsenzsteuerung) erkannt werden. Für eine detailliertere Analyse steht die Kalenderansicht zur Verfügung. Dort wird nicht die gemittelte, sondern die tatsächlich gemessene Lüftungsstufe dargestellt.



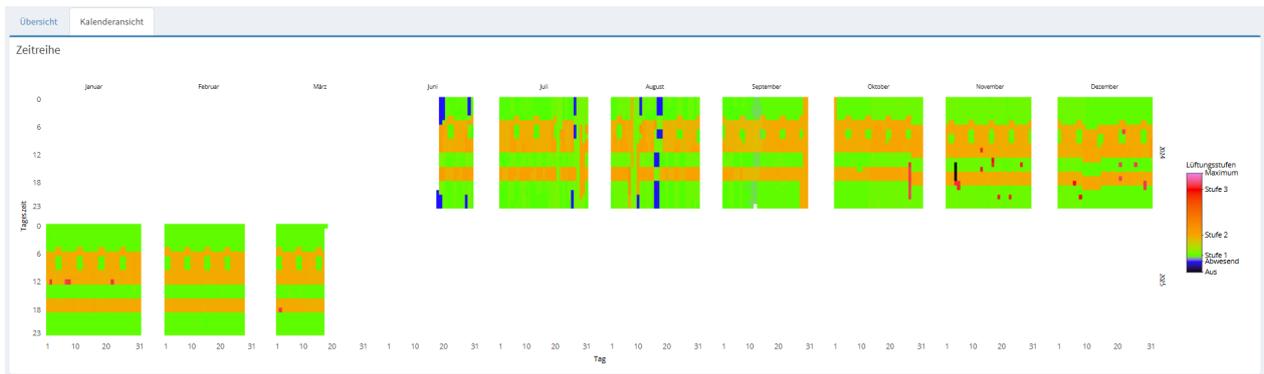


Abbildung 10. Visualisierungen im Modul Wohnung > Wohnungslüftung. Oben: Die Übersicht zeigt das gemittelte Lüftungsprofil in einer Heatmap. Dargestellt sind die «mittleren» Lüftungsstufen im Verlauf einer Woche. Die Kalenderansicht ermöglicht eine detaillierte Analyse der Lüftungsstufen. Es wird deutlich, dass die Lüftung generell zu hoch, zeitgesteuert und nur selten auf Minimalstufe läuft (Bewohner stellen bei Abwesenheit nicht auf Minimalstufe).

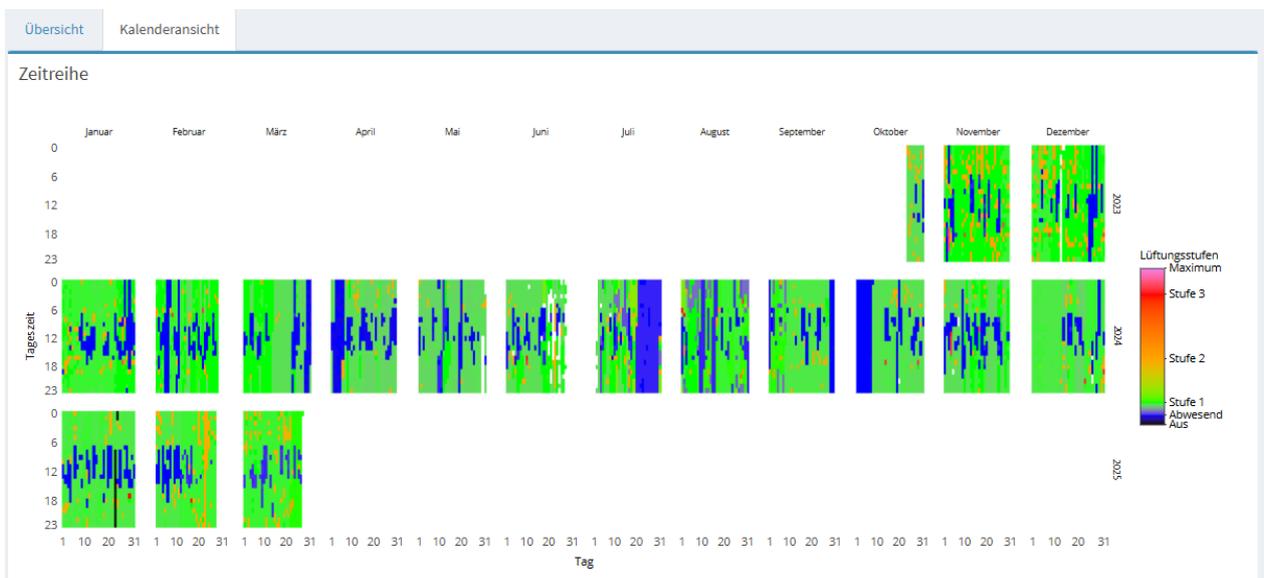
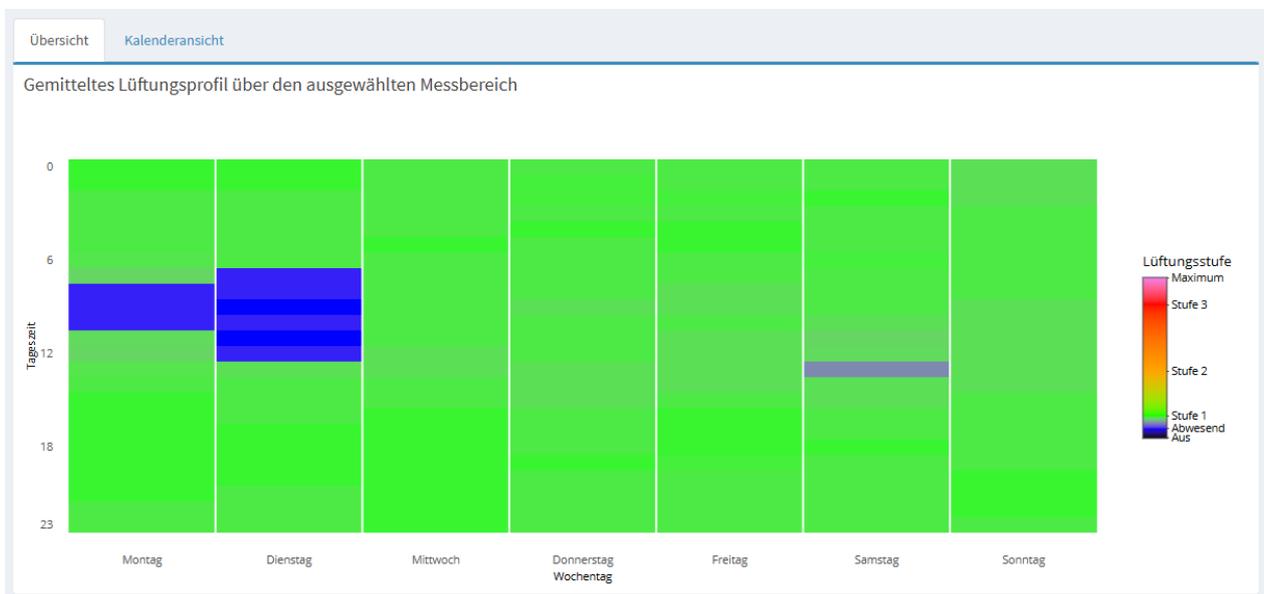


Abbildung 11. Visualisierungen im Modul Wohnung > Wohnungslüftung. Beispiel mit CO₂-gesteuerter Wohnungslüftung, die bei Abwesenheit automatisch reduziert wird.

4.3.7 Zentral > Heizkurvenoptimierung

Die eingestellte Heizkurve hat massgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch der Heizung. Die Heizkurve bestimmt, wie stark die Vorlauftemperatur des Heizsystems in Abhängigkeit von der Aussentemperatur geregelt wird. Eine steilere Heizkurve führt bei kalter Witterung zu höheren Vorlauftemperaturen und damit zu einem höheren Energieverbrauch. Eine flachere Kurve senkt die Vorlauftemperatur, was zwar den Energieverbrauch senkt, aber möglicherweise nicht ausreicht, um das Gebäude ausreichend zu beheizen. Die richtige Einstellung der Heizkurve ist daher entscheidend, um den Energieverbrauch zu optimieren und gleichzeitig ein behagliches Raumklima zu gewährleisten. Dieses Modul ermittelt anhand der gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen (bzw. der entsprechenden Temperaturdifferenz) und der Aussentemperaturen, wo die Heizgrenze liegt und wann die Heizung in Betrieb ist (was z.B. im Sommer meist unerwünscht ist) – siehe Abbildung 12 und Abbildung 13.



Abbildung 12. Visualisierungen im Modul Zentral > Heizkurvenoptimierung. Diagramm oben: Heizgruppenvorlauf- und Rücklauftemperaturen, Mitte: Aussentemperaturen (Sensormesswert, gemittelt, gemittelt und gedämpft), unten: Raumtemperaturen. Rot markiert sind Bereiche, in denen die Heizung aktiv war. In diesem Fall wurde im Sommer geheizt und danach die Heizgrenze angepasst.

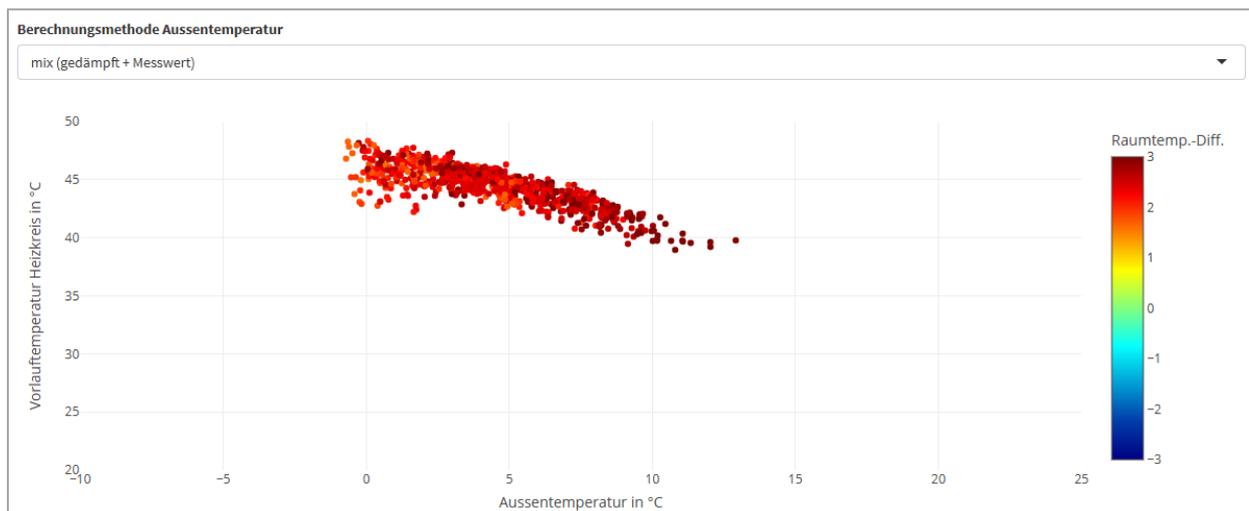


Abbildung 13. Visualisierungen im Modul Zentral > Heizkurvenoptimierung: Heizkurve anhand der gemessenen Vorlauftemperaturen während der Heizphasen. Die Farbkodierung zeigt, um wieviel Kelvin die gemittelte Raumtemperatur zu diesen Zeitpunkten über oder unter einem einstellbaren Raumtemperatur-Sollwert lag. Dies kann für die Optimierung der Heizkurve sehr hilfreich sein.

4.3.8 Daten Explorer

Während die einzelnen Module die notwendigen Grundlagen für individuelle Auswertungen und Optimierungen liefern, steht für die allgemeine Betrachtung und Analyse einzelner Messdatenreihen ein Datenexplorer zur Verfügung (Abbildung 14). Dieser ermöglicht die Darstellung von Messdatenreihen sowie Aggregationen nach verschiedenen Zeitintervallen und statistische Auswertungen. Ein Export in eine csv- oder Excel-Datei ist möglich.

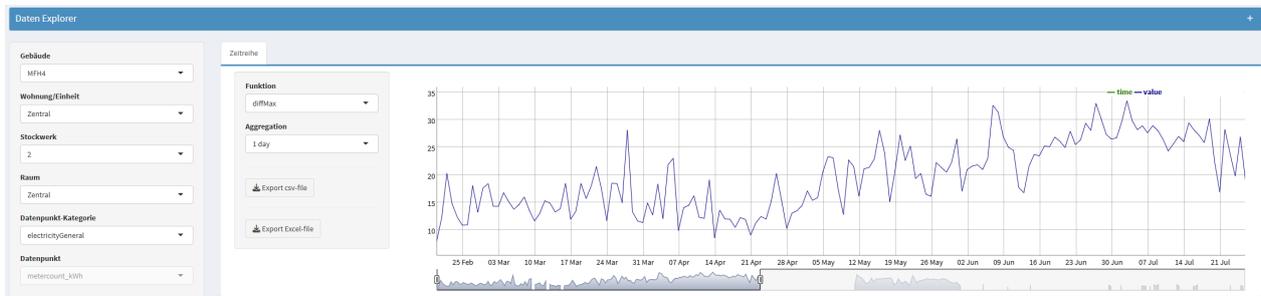


Abbildung 14. Der Datenexplorer ermöglicht die Darstellung der einzelnen Messreihen als Zeitreihe. Darüber hinaus sind Aggregationen und statistische Auswertungen möglich.

4.3.9 Geräteübersicht

Die Geräteübersicht gibt einen Überblick über die installierten Geräte und deren letzte Messwerte (Abbildung 15).

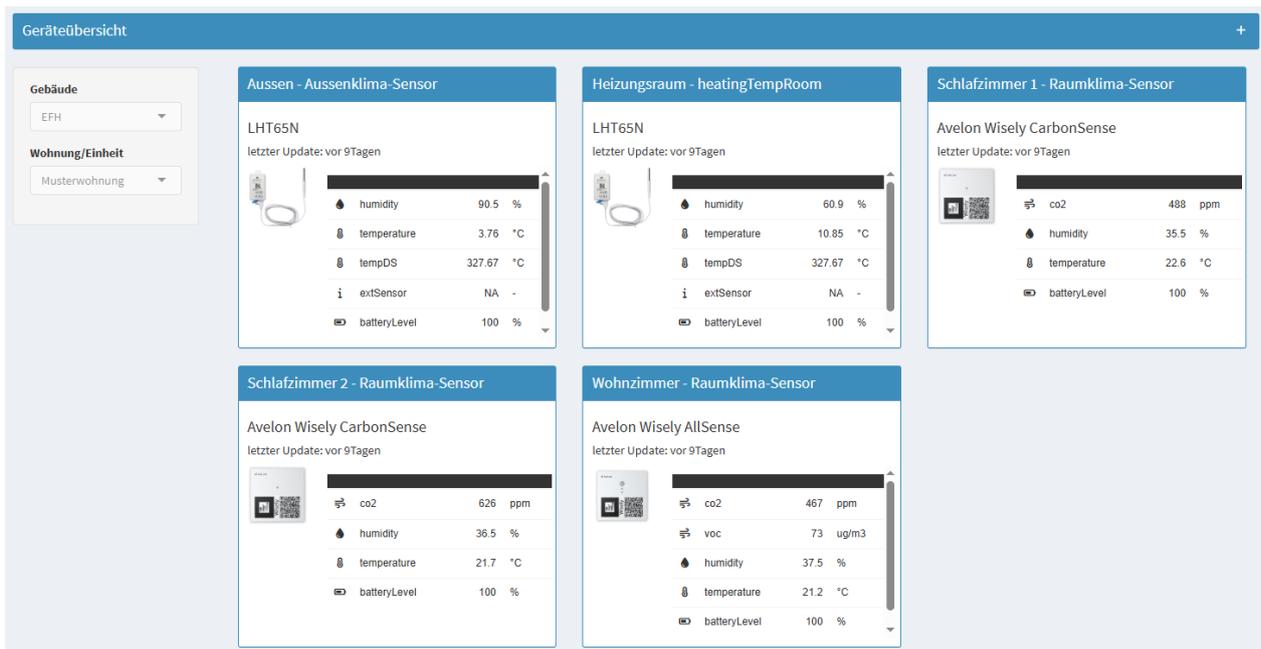


Abbildung 15. Geräteübersicht, filterbar nach Gebäude und Wohnung.

4.4 Erkenntnisse aus den Praxistests

Die Praxistests von Icm erstreckten sich (nach der Systementwicklung) über einen Zeitraum von einem Jahr und umfassten die Phasen Planung, Installation, Inbetriebnahme und Betrieb der Lösung. Die Tests werden bis zum Projektende fortgeführt und dann abgebaut. Aus diesen Praxistests konnten zahlreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Diese werden im Folgenden stichwortartig und thematisch geordnet zusammengefasst.

4.4.1 Datenerfassung

- Die Auslesung von konventionellen Ferraris-Stromzählern mit Drehscheibe ist sehr schwierig (nur «Bastellösungen» verfügbar, z.B. optische Auslesung mit OCR⁷).
- Für die Installation von induktiven Stromzählern mit CT-Klemmen (d.h. Stromwandlern) ist ein Elektriker oder eine Elektrikerin erforderlich (Zugang zum Schaltschrank, Anschluss der Spannungsmessung).
- Daten von Smart Metern (sofern vorhanden) können aus einer CSV-Datei importiert oder direkt über eine geeignete Schnittstelle (z.B. REST-API) eingelesen werden, sofern der Energieversorger diese zur Verfügung stellt. Letzteres setzt jedoch die Implementierung entsprechender Software-Treiber voraus und muss fallweise umgesetzt werden.
- Daten von Wärmepumpen sind oft schwer zugänglich. Offene Schnittstellen sind jedoch zunehmend verfügbar.
- Daten zum Warmwasserverbrauch sind schwer zugänglich:
 - Die Zähler sind bereits durch Modbus-Master für die Abrechnung belegt oder
 - es sind keine Zähler vorhanden oder
 - die Zähleranzeigen sind schlecht lesbar (Tests mit OCR-Lesung erwiesen sich als unbrauchbar).
 - Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde der Einsatz eines nicht-invasiven Low-Cost Ultraschall-Durchflussmessers (Clamp-On) mit zwei Rohranlegetemperaturfühlern zur Volumenstrommessung untersucht. Das Modbus-System wurde über ein Mikrocontroller-Board in ein LoRaWAN-Netzwerk integriert. Das Ergebnis zeigte jedoch eine unzureichende Messgenauigkeit.
 - Es wurden Tests mit Sensoren der Firma Droople durchgeführt, die LoRaWAN Flügelradsensoren für einzelne Zapfstellen anbietet. Das System funktioniert gut, die Installation ist jedoch zeitaufwendig (Installation unter dem Waschbecken pro Zapfstelle, je ein Flügelradsensor für Warm- und Kaltwasser inkl. Temperaturen). Einbindung über TTN oder Swisscom nicht möglich. Droople stellt ein eigenes LoRaWAN Gateway zur Verfügung. Die Daten können nur via API von Droople abgeholt werden.
 - Ausser der Nachrüstung eines eigenen Wärme-/Durchflusszählers wurde bisher keine kostengünstige und praktikable Lösung gefunden.

4.4.2 Datenübermittlung

- LoRaWAN-Empfang über The Things Network war in allen Testgebäuden schlecht → lokales Gateway war in allen Testgebäuden erforderlich. Ein lokales Gateway ist ein Gerät, das LoRa-Funksignale von Sensoren in seiner Umgebung empfängt und anschliessend an ein öffentliches Netzwerk (zum Beispiel The Things Network) bzw. über das Internet an zentrale Netzwerkservers weiterleitet.

Der Spreading Factor (SF) in LoRaWAN beschreibt, wie lange ein Datenpaket auf einer bestimmten Frequenz übertragen wird. Höhere Werte (z.B. SF12) ermöglichen eine grössere Reichweite, verlängern aber die Übertragungszeit und verbrauchen mehr Energie, während niedrigere Werte (z.B. SF7) eine kürzere Übertragungszeit und eine höhere Datenrate bieten. Ein hoher Spreading Factor deutet auf eine schwächere Verbindung hin, während ein niedriger SF auf eine gute Signalqualität und Nähe zum Gateway hinweist. Da The Things Network (TTN) eine maximale Airtime pro Tag vorgibt (Fair Use Policy), sollten möglichst niedrige SF-Werte verwendet werden, um die Netzwerkauslastung zu minimieren und eine zuverlässige Kommunikation zu gewährleisten.

- Bewertung der Spreading Factors pro Projekt:

Projekt	Spreading Factor (SF)	Bewertung Empfang
MFH's Horw	Meist SF 7, einige SF 8-9	Gut bis sehr gut
EFH Rheinfelden	Meist SF 7, einige SF 9-12	Gut, mit vereinzelt schwachen Signalen (SF12)

⁷ OCR steht für Optical Character Recognition (optische Zeichenerkennung). Mithilfe dieser Technologie kann gedruckter oder handgeschriebener Text aus Bildern, Scans oder PDF-Dokumenten in bearbeitbaren digitalen Text umgewandelt werden.

MFH Köniz	SF 7	Gut
-----------	------	-----

- Bewertung des Spreading Factors pro Gerätetyp / Sensor:

Gerätetyp/Sensor	Spreading Factor (SF)	Empfang
Adeunis analog	Meist SF 7	Gut
Avelon Wisely AllSense	Meist SF 7, einige SF 9	Gut
Avelon Wisely CarbonSense	Meist SF 7, einige SF 12	Gemischt (SF12 = schwach)
Avelon Wisely Standard	Meist SF 7	Gut
Dragino LTC2	Meist SF 7	Gut
Dragino LDS02	Meist SF 7	Gut
Dragino LHT65n	Meist SF 7	Gut
Milesight WS52X	Meist SF 7	Gut
Netvox R718N3	SF 12	Schwach, nur 1 Gerät
nke Wattedco flashO	Meist SF 7	Gut

- Keines der getesteten Geräte lieferte grundsätzlich schlechte Ergebnisse. Alle Sensoren mit hohen Spreading Factors (SF12) befanden sich entweder in grosser Entfernung vom Gateway oder waren installationsbedingt ungünstig platziert, z.B. in der Nähe von elektrischen Geräten oder metallischen Oberflächen. In Bereichen mit guter Platzierung und geringem Abstand zum Gateway wurden durchweg niedrige Spreading Factors (SF7-SF9) erreicht.
- Es ist zu beachten, dass die Sensoren von Avelon zwar alle 10 Minuten Messwerte erfassen, diese aber nur einmal pro Stunde gebündelt übertragen. Durch diese Methode wird die Anzahl der gesendeten Telegramme reduziert und somit der sogenannte Payload-Overhead minimiert. Dies führt zu einer effizienteren Nutzung der verfügbaren Airtime und trägt zur Schonung der Netzkapazität bei. Damit relativiert sich der SF 12, den einige Geräte anlagenbedingt erreichen.
- Empfehlungen für die Platzierung von LoRaWAN-Sensoren:
 - Sichtverbindung zum Gateway bevorzugen, Hindernisse wie Betonwände und Stahlkonstruktionen vermeiden.
 - Falls messtechnisch nicht relevant, Sensor erhöht montieren, um Störungen durch Möbel zu reduzieren.
 - Mindestabstand zu Metall und Elektronik einhalten (min. 50 cm), um Reflexionen und Störungen zu minimieren.
 - Ausrichtung der Antenne beachten, externe Antennen vertikal ausrichten.
- Empfehlungen für die Platzierung von LoRaWAN-Gateways:
 - Hoch und zentral platzieren, idealerweise an der Decke.
 - Wenn die Sensoren über mehrere Stockwerke verteilt sind, empfiehlt sich eine Platzierung im mittleren Stockwerk.
 - Wenn das Gateway eine externe Antenne besitzt, sollte diese vertikal ausgerichtet sein.
 - Kabelverlängerungen für die Antennen des Gateways sollten vermieden werden, da sie zu erheblichen Signalverlusten und Dämpfungen führen.
 - Mindestabstand von 1-2m zu Störquellen wie WLAN-Routern oder Servern einhalten.
 - Antennenausrichtung optimieren, um die Signalabdeckung zu verbessern.
 - Signalabdeckung testen, um problematische Empfangsbereiche zu erkennen.

4.4.3 Software

- Akenza IoT-Plattform
 - Die Akenza Zeitreihenhistorie ist nicht als permanente Datenbank gedacht/geeignet. Die Akenza-Lösung geht davon aus, dass die Daten an eine externe Datenbank weitergeleitet werden.
 - Die API ist nicht für das Low-Cost Monitoring geeignet: komplizierte Abfragen sind erforderlich, um einen Überblick über die Datenpunkte und deren Metadaten zu erhalten.

- API-Aufrufe sind begrenzt, daher ist Batch-Verarbeitung notwendig, wenn viele Daten abgefragt werden.
- Der Export nach InfluxDB ist möglich, erlaubt aber derzeit kein Metadaten-Tagging → ungeeignet.
- Icm-Software
 - Erkennung von Ausreissern und Datenbereinigung erforderlich (ein Aussentemperatur-sensor funktionierte nicht zuverlässig).
 - Zu überprüfen: Periodische Aktualisierung der Anwendung vs. DB-Abfragen in Echtzeit (wenn schnell genug).
- Programmiersprache
 - Die Wahl von R Shiny als Programmiersprache erwies sich als nicht nachhaltig.
 - Geeignet für erste Prototypen / Fast Prototyping, aber nicht für Produktionsumgebungen.
 - Hat sich im Projektverlauf als ungeeignet für Feldtest herausgestellt: shinyapps.io teuer, nur externe Datenbank möglich da Session-basiert, Benutzerverwaltung durch Opensource-Variante nicht unterstützt, Benutzerverwaltung in bezahlter Version zu umständlich.
 - Shinyapps unterstützt standardmässig keine Mehrsprachigkeit. Daher ist es schwierig, Mehrsprachigkeit zu implementieren.
 - Shinyapps.io bietet eine Benutzerverwaltung, die Open Source Server von Shinyapps nicht. Es müsste ein eigener Shiny-Server eingerichtet und betrieben werden.

4.4.4 Systemarchitektur

- Für die Aggregation der LoRaWAN-Daten standen grundsätzlich zwei Plattformen zur Verfügung: The Things Network ([Link](#)) und Akenza ([Link](#)). Für dieses Projekt wurde Akenza ausgewählt, da hier Payload Decoder für verschiedene LoRaWAN-Geräte vordefiniert sind und ein Datenschema inkl. vordefinierter Geräte mit den sogenannten Payload Decodern existiert. Dadurch wird der Initialisierungsaufwand für die Messinfrastruktur (insbesondere bei der Integration neuer Sensoren) deutlich reduziert.
- Die Datenbank soll zukünftig auf einem eigenen Server gehostet werden, da Akenza nicht für die Speicherung von Daten ausgelegt ist (dito The Things Network).
- Die Frage der Metadaten ist noch nicht zufriedenstellend gelöst.
- Es ist zu beachten, dass die Sensoren in verschiedenen Räumen platziert werden können und es dem Benutzer/-in möglich sein muss, die Sensoren z.B. einem anderen Raum zuzuweisen.

4.4.5 Allgemeines Fazit

- Die Umsetzung eines Low-Cost-Monitorings ist nach wie vor aufwändig und scheitert teilweise an der Erhebung der notwendigen Daten. Insbesondere der Zugang zu Energiedaten ist oft beschwerlich, da entweder gar keine Messungen vorhanden sind (das heisst, es müssen zusätzlich Messmittel eingebaut werden) oder die Daten nicht einfach zugänglich sind. Das heisst, es müssen Software-Treiber geschrieben und Bewilligungen (z.B. vom Energieversorger) eingeholt werden. Deshalb erachten die Autoren das Angebot des Icm als Dienstleistung für gangbarer als die ursprünglich angedachte «Do-it-yourself-Lösung» – siehe Kapitel 5.4.
- Mit der geringen Anzahl an Gebäuden sind die Aussagen aus den Praxistests nicht wirklich repräsentativ. Dies liegt auch daran, dass die Beispielgebäude durch energieaffine Personen genutzt werden. Diese bilden nicht unbedingt die Bedürfnisse und Interessen einer breiteren Nutzerschaft ab. Im Rahmen der angedachten LCM-Dienstleistungen sollen nun «echte» Praxiserfahrungen gesammelt werden.

5. Low-Cost Monitoring: Praxiskonzept

5.1 Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel des Projektes war es, Konzepte für eine skalierbare, flexible und kostengünstige Monitoring-Plattform zu entwickeln. Diese sollen den Übergang vom aktuellen Prototypen zu einer marktfähigen Lösung ermöglichen. Ziel ist es, dass die lcm-Lösung breit eingesetzt werden kann und die entsprechenden Zielgruppen bei der Untersuchung und Optimierung von Gebäuden unterstützt (Abbildung 16). Als Zielgruppen stehen Betriebsoptimierer, GEAK-Expert/-innen, Ingenieurbüros, interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen im Vordergrund. Der Fokus liegt auf Wohngebäuden, insbesondere im Bestand.

Das Low-Cost-Monitoring unterscheidet sich in entscheidenden Punkten vom (permanenten) technischen Monitoring – siehe Abbildung 17. Das technische Monitoring ist in der Regel fest installiert und verwendet Messmittel, die eine Installation erfordern, z.B. Strom- und Wärmezähler oder Gebäudeautomation. Damit ist eine dauerhafte Aufrechterhaltung des Betriebsoptimums möglich (Langzeitmonitoring). Im Gegensatz dazu werden beim Low-Cost-Monitoring Messmittel eingesetzt, die keinen Einbau erfordern, z.B. Messköpfe für Zähler, Stromwandler und Smart Plugs. Diese Messmittel sind in der Regel weniger zuverlässig und genau, können aber mit geringem Aufwand eingesetzt und nachgerüstet werden. Das Low-Cost Monitoring ist daher ideal für Kurzzeitmessungen (wenige Tage bis 2 Jahre).



Abbildung 16. Mit Hilfe von Monitoringsystemen können eine Reihe von Fragen zum Gebäude beantwortet werden. Die Antworten liefern wiederum die Grundlage für die Optimierung des Gebäudebetriebs. Bild: Adobe Stock, bearbeitet.

Technisches Monitoring

- Energiemonitoring: Messungen mit Zählern
→ Betriebsunterbrechung für Installation
- Anlagen & Behaglichkeitsmonitoring: Daten aus der Gebäudeautomation
→ Bei Altbauten oft nicht vorhanden
- Gebäudemonitoring (z.B. Leckagen): häufig nicht vorhanden
- Erfordert in der Regel ein lokales Netzwerk (z.B. Modbus, KNX)

Ideal für: **Dauerhafte Aufrechterhaltung des Betriebsoptimums** (Langzeitmonitoring)

Low-Cost Monitoring

- Messung mit nichtinvasiven Messmitteln und Datenimport: Zählerkopf, Stromwandler, Smart Plugs, EVU-Daten
→ Keine Betriebsunterbrechung
- Kommunikation über LoRaWAN
→ Kein lokales Netzwerk erforderlich (aber manchmal Gateways)
- Für „interessierte Laien“ verständliche Visualisierungen der Messdaten

Ideal für: **Einregulierungsmonitoring (1. und 2. Betriebsjahr), Troubleshooting**

Abbildung 17. Das Low Cost Monitoring unterscheidet sich in der Umsetzung und Zielsetzung von einem (permanenten) technischen Monitoring. Aus technischer Sicht ist Low Cost Monitoring den IoT-Lösungen zuzuordnen.

5.2 Anwendungsbereiche

Aus den Eigenschaften des Low-Cost-Monitoring ergeben sich folgende Anwendungsbereiche, die mit den hier beschriebenen Konzepten adressiert werden:

- **Einregulierungsmonitoring (Ingenieurbüros).** Das Einregulierungsmonitoring stellt sicher, dass die Anlage nach der Inbetriebnahme (typischerweise innerhalb der ersten 2 Betriebsjahre) korrekt eingestellt ist: Überprüfung, ob die geplanten Sollwerte erreicht werden, Optimierung der Betriebsparameter hinsichtlich Energieeffizienz und Wirkungsgrad, Dokumentation für spätere Wartungen und Nachjustierungen. Dauer: 1-2 Jahre.
- **Temporäres Monitoring (Betriebsoptimierer, GEAK-Expert/-innen, interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen).** Ein temporäres Gebäudemonitoring dient dazu, den Betrieb und die Effizienz eines Gebäudes über einen begrenzten Zeitraum zu analysieren. Dabei werden relevante Messdaten erfasst, um Schwachstellen zu identifizieren, Optimierungspotenziale aufzuzeigen und fundierte Entscheidungen für den zukünftigen Betrieb zu treffen. Typische Einsatzgebiete sind die Identifikation von Energieeinsparpotenzialen ohne permanente Messinfrastruktur in Bestandsgebäuden, die Überprüfung der Einhaltung von Planungswerten nach Inbetriebnahme in Neubauten ohne permanentes Monitoring / Gebäudeautomation, die Bewertung der Effizienzsteigerung nach Modernisierungsmassnahmen und die Sicherstellung eines optimalen Raumklimas für Mitarbeiter und Kunden in Büro- und Gewerbeimmobilien. Dauer: einige Monate bis 2 Jahre.
- **Troubleshooting (Betriebsoptimierer, interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen).** Das Low-Cost Monitoring kann auch zur gezielten und zeitlich begrenzten Untersuchung einzelner Anlagen eingesetzt werden. Zum Beispiel zur Fehlersuche bei Solar- oder Heizungsanlagen. Dazu wird das lcm kurzzeitig installiert und die Daten zur Fehler- und Ursachensuche verwendet. Dauer: einige Tage bis einige Monate.

5.3 Betrachtete Konzepte

Im Projekt wurden verschiedene Konzepte für eine skalierbare, flexible und kostengünstige Monitoring-Plattform untersucht (und teilweise umgesetzt). Diese unterscheiden sich im Ansatz (Do it yourself DIY, Dienstleistung, kommerzielles Produkt inkl. Support) und in der Umsetzung (eigene Plattform, bestehende Plattform(en), Umsetzung durch Industriepartner). Die betrachteten Konzepte sind in Tabelle 4 dargestellt.

	Beschreibung	Vor- und Nachteile	Praxistauglichkeit
Do it yourself (DIY), Custom	Ursprüngliches Low Cost Monitoring Konzept als DIY-Lösung. Kommerziell erhältliche LoRaWAN-Sensoren werden mit einer eigenen lcm-Software zur Datenvisualisierung und Projektverwaltung kombiniert. Die Datenübertragung erfolgt über das Open-Source-Netzwerk The Things Network (TTN). Die entsprechende Monitoring-Lösung wird vom Endnutzer anhand einer Anleitung zusammengestellt, installiert und betrieben. Die Anleitung und die lcm-Software werden von der HSLU über eine Website zur Verfügung gestellt.	+ Kostengünstig in der Anschaffung + Lösung vollständig im Besitz und unter Kontrolle des Endnutzers - Installation und Inbetriebnahme für die meisten Nutzer zu komplex - Beschränkung auf LoRaWAN-Sensoren (ohne Datenimport) erschwert Einbindung von Wärmepumpe und Zählern - Mögliche Auswertungen eingeschränkt durch verfügbare LoRaWAN-Sensordaten (v.a. Raumkomfort) - Kein Support	Nicht geeignet (zu komplex für Endnutzer, kein Support)
Do it yourself mit kommerziellen IoT-Plattformen	Anstelle von TTN und eigenen Datenbanken wird eine kommerzielle IoT-Plattform (z.B. Akenza, ThingsBoard) für die Datenübertragung, den Datenimport und das Warehousing verwendet. Dies vereinfacht die Verwaltung der Messgeräte und Daten. Für die Visualisierung kann anstelle der proprietären lcm-Software auch Software auf Basis offener Plattformen (z.B. Home Assistant, OpenHAB) verwendet werden. Dies erhöht die Verbreitung der Lösung in bestehenden Communities und ermöglicht ein professionelles Anwender- und Projektmanagement. Das Handbuch und die lcm-Software werden von der HSLU über eine Website zur Verfügung gestellt. Die IoT-Plattform wird vom Endnutzer bestellt und gewartet.	+ Datenimport von Energieversorgern o.ä. möglich --> Zusätzliche Auswertungen (z.B. Energieverbrauch, Heizkurvenoptimierung) + Vereinfachtes Messmittel- und Datenmanagement + Professionelles Anwender- und Projektmanagement - Zusätzliche Lizenzkosten für IoT-Plattform - Für einige Nutzer noch zu komplex - Kein Support	Nicht geeignet (zu komplex für Endnutzer, kein Support)
Dienstleistung	Das Low-Cost Monitoring wird nicht als selbst zusammenzustellende Lösung, sondern als Dienstleistung der Hochschule Luzern angeboten. Dabei wird (vorerst) auf die bestehende Plattform bestehend aus LoRaWAN-Sensoren, IoT-Plattform inkl. Datenimport (für EVU-Daten) und der Software lcm für Visualisierung und Projektmanagement zurückgegriffen. Die Integration (und teilweise Installation) der Messgeräte, die Projekterstellung sowie die Wartung und Weiterentwicklung der Plattform erfolgt durch die HSLU. Die Endnutzer greifen direkt über die Software lcm auf ihre Daten zu und werten diese selbst aus.	+ Prinzipiell beliebige Einbindung von LoRaWAN-Sensoren, Datenimport und ggf. weiteren Messmitteln + Installation und Inbetriebnahme inkl. Support durch HSLU --> kein technisches Know-how beim Endnutzer erforderlich + Support im laufenden Betrieb möglich - Kosten der Dienstleistung: Diese werden auf Anfrage von der Hochschule Luzern mitgeteilt. - Technologie hat Prototyp-, nicht Produktqualität --> eingeschränkte Zuverlässigkeit und Cybersicherheit	Geeignet (Endnutzer benötigt kein technisches Know-how)
Produkt	Das Low Cost Monitoring oder Teile davon (insbesondere die Visualisierung) werden von einem Industriepartner als Produkt angeboten oder in eigene Lösungen integriert. Die entsprechende Produktentwicklung erfolgt durch den Partner unter Begleitung der HSLU. Bisher konnte noch kein Industriepartner für das Projekt gewonnen werden.	+ Produktqualität --> hohe Zuverlässigkeit und Cybersicherheit + Professioneller Support und Weiterentwicklung - Preis, Rentabilität müssen geklärt werden	Bedingt geeignet (Kosten wahrscheinlich zu hoch)

Tabelle 4. Betrachtete Konzepte für eine skalierbare, flexible und kostengünstige Monitoring-Plattform.

5.4 Gewählter Ansatz: lcm-Dienstleistungen

Aufgrund der durchgeführten Analyse (Tabelle 4) wurde in Absprache mit EnergieSchweiz entschieden, den Dienstleistungsansatz weiterzuverfolgen. Dieser hat sich als praktikabler Kompromiss zwischen der ursprünglich angedachten Do it yourself-Lösung (DIY) und einer kompletten Produktentwicklung durch einen Industriepartner erwiesen.

Der DIY-Ansatz ist ohne ausreichendes technisches Know-how nicht umsetzbar. Dieses ist beim Endanwender (insbesondere Betriebsoptimierer, GEAK-Expert/-innen, interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen) in der Regel nicht vorhanden. Dies würde einen Support erfordern, der im DIY-Modell nicht geleistet werden kann. Umgekehrt erfordert eine Produktentwicklung eine grundlegende Neuentwicklung der Lösung und ein komplettes Serviceangebot. Dies ist mit hohen Kosten und langen Entwicklungszeiten verbunden, die für die angestrebten Anwendungsbereiche (Kapitel 5.2) nicht geeignet sind.

Die lcm-Dienstleistung der Hochschule Luzern soll nun mit einem Zeithorizont von 6-12 Monaten auf dem Schweizer Markt eingeführt werden. Dazu werden folgende Schritte unternommen:

- Konkretisierung des Dienstleistungsangebots: Preisgestaltung, Inklusivleistungen.
- Bekanntmachung des Dienstleistungsangebots bei den Zielgruppen: Betriebsoptimierer, GEAK-Expert/-innen, Ingenieurbüros, interessierte Bauherrschaften und Gebäudebetreiber/-innen.
- Konsolidierung der bestehenden Lösung: Fehlerbehebung, Bereinigung der Benutzeroberfläche.
- Beschaffung und Integration der notwendigen Messinstrumente.
- Aufsetzen und Durchführen von Kundenprojekten inkl. Support.
- Laufende Weiterentwicklung der Lösung.

Im Rahmen der lcm-Dienstleistungen erhält der Auftraggeber eine vorkonfigurierte Monitoringlösung, bestehend aus den für die gewählten Auswertungen erforderlichen Messgeräten und Datenimporten sowie der entsprechend konfigurierten lcm-Software. D.h. die gewählten Auswertungen (Kapitel 4.3) stehen im Projekt zur Verfügung und werden mit den erforderlichen Daten aus den Messgeräten bzw. Datenimporten befüllt.

Die Messmittel werden, wenn möglich, vom Auftraggeber nach Vorgaben der Hochschule Luzern (HSLU) installiert (z.B. Raumkomfortsensoren). Ist dies nicht möglich, übernimmt die HSLU die Installation (z.B. Zählerköpfe). Der Import von EVU- (z.B. Energiemessungen) und Gerätedaten (z.B. Wärmepumpe) erfolgt durch die HSLU. Die Datenauswertung anhand der Visualisierungen und die daraus resultierenden Optimierungen werden vom Kunden durchgeführt. Die HSLU kann diese Arbeiten bei Bedarf unterstützen.

HINWEIS

Die für die lcm-Dienstleistungen nötigen Grundlagen wurden im Rahmen eines von EnergieSchweiz subventionierten Projekts entwickelt. Diese Grundlagen sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst. Sie sind Open Source und werden von der Hochschule Luzern kostenlos bereitgestellt. Alle Grundlagen aus dem Projekt dürfen von weiteren Anbietern ebenfalls kostenlos genutzt und weiterentwickelt werden.

Kontakt: Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE, Hochschule Luzern
Email: olivier.steiger@hslu.ch oder technik-architektur@hslu.ch

6. Ausblick

Die bestehende Lösung soll ab sofort gewartet, weiterentwickelt und im Rahmen von Dienstleistungen eingesetzt werden (Kapitel 5). Darüber hinaus sollte die Lösung in Zukunft vom heutigen Proof of Concept zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt werden, wenn sie noch breiter eingesetzt werden soll. Dies erfordert voraussichtlich eine Neuprogrammierung (z.B. in der Programmiersprache Python), eine angepasste Systemarchitektur (z.B. Verwendung einer eigenen Zeitreihendatenbank) und den Vertrieb über geeignete Organisationen (z.B. Partnerfirmen). Diese Schritte sind – bei entsprechender Nachfrage – in Absprache mit EnergieSchweiz und den anderen Projektpartnern zu planen.

Darüber hinaus sind weitere Funktionserweiterungen möglich. Folgende Erweiterungen sind für die Zukunft geplant:

- **Überwachung des Warmwasser-Heizeinsatzes** Die Interviews haben gezeigt, dass der Heizeinsatz für die Warmwasserbereitung bei Wärmepumpensystemen oft nicht optimal eingestellt bzw. parametrierbar ist. Dadurch erfolgt die Brauchwassererwärmung teilweise rein elektrisch, obwohl Wärme aus der Wärmepumpe zur Verfügung stünde. Mit diesem Modul soll die Parametrierung der Warmwasser-Erwärmung überwacht und angepasst werden.
- **Optimierung des Warmwasserverbrauchs** Mit diesem Modul soll der WW-Verbrauch überwacht, visualisiert und durch Sensibilisierung der Nutzer/-innen reduziert werden. Im Wohnbau ist der WW-Verbrauch neben der Heizung (und ggf. Elektromobilität) der grösste Energieverbraucher. Er sollte entsprechend überwacht und optimiert werden.
- **Überprüfung der Legionellenschaltung** Durch Messung der Warmwasseraustrittstemperaturen mit Anlegefühlern kann überprüft werden, ob die Legionellenschaltung in den geforderten Zeitintervallen und Temperaturen funktioniert.
- **Gebäudecockpit** Gesamtdarstellung der relevanten Gebäudeparameter und entsprechendes, einfaches Reporting («Ampeln» o.ä.). Dies ist in der vorhandenen Software für die einzelnen Auswertungen bereits ansatzweise enthalten.
- **Analyse Allgemestrom** Analog zum Modul Wohnung > Elektrizität soll der allgemeine Stromverbrauch (Treppenhaus, Parkplatz etc.) untersucht werden. Dies kann insbesondere unter Berücksichtigung von Verbrauchsdaten (z.B. von Präsenzmeldern) erfolgen. So kann festgestellt werden, ob der Allgemestromverbrauch dem Bedarf entspricht. Zusätzlich können ungeplante Stromverbraucher (z.B. für Elektromobilität) identifiziert werden.
- **Vorher-Nachher-Vergleich** Eine wichtige Funktion des Icm-Tools ist die Betriebsoptimierung. Um die Wirksamkeit von Optimierungsmassnahmen beurteilen zu können, ist ein Vergleich der Messungen vor und nach der Umsetzung der Massnahmen erforderlich. Dieser Vergleich kann anhand eines Stichtages innerhalb der Icm-Software erfolgen.
- **Übersicht Batteriestand** Für die Messungen werden hauptsächlich drahtlose LoRaWAN-Sensoren eingesetzt. Deren Batterien müssen selten, aber regelmässig ausgetauscht werden. Um dies sicherzustellen, ist eine übersichtliche Darstellung der Batteriestände pro Projekt / Gebäude hilfreich.
- **Alarmierung** Das System soll per E-Mail informieren, wenn Sensoren keine Batterie mehr haben oder längere Zeit keine Daten gesendet haben. Zusätzlich sollen relevante Alarme und Benachrichtigungen in der Icm-Software übersichtlich dargestellt und verwaltet werden.
- **Plausibilisierung von Messdaten** Um sicherzustellen, dass die Messungen die Realität im Gebäude korrekt wiedergeben, sind Plausibilisierungsmechanismen erforderlich. Damit wird überprüft, ob die gelieferten Messdaten überhaupt ankommen und glaubwürdig sind. Idealerweise erfolgt diese Überprüfung vollautomatisch.

7. Danksagung

Das Projektteam bedankt sich herzlich bei allen Organisationen für die grosszügige Unterstützung:

- EnergieSchweiz
- Energiefachstellenkonferenz Nordwestschweiz
- Kanton Luzern, Amt für Umwelt und Energie
- Verein Minergie

Herzlichen Dank an alle Projektpartner für die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit!

Anhang 1. Leitfaden für die Interviews

Ausgangslage und Ziel der Interviews

In Zusammenarbeit mit EnergieSchweiz und verschiedenen Wirtschaftspartnern entwickelt die Hochschule Luzern ein kostengünstiges Gebäudemonitoring-System zum Selbermachen ([Link](#)). Das System besteht aus handelsüblichen Messgeräten und einer Open-Source Software für die Datenaggregation und Visualisierung. Darüber hinaus wird eine detaillierte Anleitung für den Aufbau und die Nutzung des Systems bereitgestellt. Mit dieser neuartigen Lösung soll die niederschwellige Überwachung des Energieverbrauchs und des Komforts von Wohngebäuden ermöglicht werden. Damit erhalten Gebäudebetreiber/-innen, Facility Manager/-innen und Eigentümer/-innen auf einfache Weise Daten für die Optimierung von Bestandesbauten.

Im Rahmen von Interviews sollen die Bedürfnisse und Wünsche an ein Gebäudemonitoring im Allgemeinen, und der Bedarf nach und die Anforderungen an ein Low-Cost Monitoring insbesondere, eruiert werden. Das vorliegende Dokument enthält einen Leitfaden zu den Interviews.

IST-Aufnahme

Werden bei Ihnen bereits technische Monitoring-Lösungen eingesetzt?

- Falls ja
 - Zu welchem Zweck? Bspw. Nebenkostenabrechnung / ZEV, Energiemonitoring, energetische Betriebsoptimierung (eBO), Eigenverbrauchsoptimierung (EVO), Anlagenüberwachung, Gebäudeüberwachung, Behaglichkeitsüberwachung / Optimierung
 - Was wird gemessen? Wie oft und in welcher Genauigkeit?
 - Wie werden die Daten erfasst? Bspw. Kundenseitiges Messsystem mit Fernzugriff, Ableseung vor Ort, Daten aus der Gebäudeautomation, Datenimport von Energieversorgungsunternehmen EVU, Daten von Komponenten (bspw. Wärmepumpe, Wechselrichter)
 - In welchen Gebäuden wird gemessen? Bspw. Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), Hotels, Bürogebäude, Schulen, Hallen
 - Wie werden die Daten ausgewertet? Bspw. Händisch durch Laien, Händisch durch Fachpersonen, Händisch durch Energieberater, Vollautomatisch
- Falls nein
 - Steht der zukünftige Einsatz eines technischen Monitorings aktuell zur Diskussion?
 - Welche sonstigen Lösungen / Grundlagen werden verwendet für die eBO, EVO, Anlagenüberwachung usw.?

Handlungsfelder: Welche Probleme sind in Ihrer Erfahrung im Gebäude prioritär zu lösen, bez. Energieverbrauch, Sicherheit, Komfort, Betriebssicherheit?

Welche Mängel treffen Sie in Ihrer Berufspraxis besonders häufig an, insb. in Bezug auf die Gebäudetechnik?

Wie werden diese Mängel heute erkannt?

SOLL-Analyse

Wenn Sie an das Thema der Betriebsoptimierung denken: Was fehlt Ihnen heute?

Wofür wünschen Sie sich / benötigen Sie ein technisches Monitoring?

Welche Eigenschaften soll dieses aufweisen? In Bezug auf die Kosten, Einsatzgebiete, Kommunikationstechnologie, Nutzerschnittstelle(n) usw.

Erwarten Sie im Vergleich zum IST-Zustand (siehe oben) in den kommenden 1-3 Jahren signifikante Änderungen?

PAINS: Wie stark plagen Sie folgenden Probleme heute

- Monitoring = Datenfriedhof
- Sinn und Zweck eines Monitorings ist unbekannt
- Monitoring-Lösungen sind zu teuer
- Einbau der Messmittel ist zu umständlich / teuer
- Inbetriebnahme ist zu umständlich / teuer
- Daten sind nicht in Echtzeit verfügbar
- Zeitintervall zwischen den Messungen ist zu lang (Elektro, Wärme, Wasser)
- Messwerte sind fehlerhaft
- Fehlerhafte Messwerte werden nicht erkannt
- Darstellung der Messwerte ist nicht aussagekräftig
- Betriebsoptimierungsmassnahmen können nicht abgeleitet werden
- Zu viel Handarbeit ist erforderlich
- Gewünschte Daten sind nicht zugänglich
- Es dauert zu lange, bis die eBO-Ergebnisse vorliegen

WUNSCH: Welche Wünsche hegen Sie in Bezug auf das Monitoring

- Eierlegende Wollmilchsau: Eine Lösung für alles (pain: teuer)
- Low-Cost Monitoring: Möglichst billige Lösung (pain: Abstriche bei Funktionalität und Support)
- Rundum-Sorglospaket: Bestellen, einbauen lassen, vergessen (pain: teuer, unflexibel)
- DIY-Lösung: Selbst zusammensetzen und betreiben nach Anleitung (pain: Abstriche bei Support, Knowhow erforderlich)
- Zertifizierte Lösung: Einheitliche, geprüfte und absolut zuverlässige Messlösung
- Status quo: Ich habe alles, was ich benötige (pain: vielleicht doch nicht...)

Offenes Gespräch (unstructured interview)

Anhang 2. Technisches Monitoring: Mögliche Einsatzszenarien

Komponenten / Datenpunkte / Daten	Analysen / Auswertungen	Nutzen
Stromverbrauch und -erzeugung HLK <ul style="list-style-type: none"> - Stromverbrauch/-erzeugung Gesamtzähler - Stromverbrauch/-erzeugung Ladestationen für Elektrofahrzeuge - Stromverbrauch allgemein - Stromverbrauch Wohnungen - Stromerzeugung Photovoltaik - Stromverbrauch Wärmepumpe/Holzheizung - Stromverbrauch Warmwasser - Stromverbrauch Heizbänder für Warmwasserzirkulation - Stromverbrauch Elektroheizstab - Stromverbrauch Kühlung - Stromverbrauch Legionellenschaltung - Stromverbrauch einzelner elektrischer Geräte (Umwälzpumpen usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Soll-Ist-Vergleich (Planwerte vs. Messungen) - Vergleich mit Vorjahreswerten und langjährigen Mittelwerten - Vergleich mit ähnlichen Gebäuden - Analyse des Eigenstromverbrauchs - Täglicher Hausstrombedarf (Mittelwerte, Min/Max) - Abschätzung der Standby-Verluste - Analyse der Schalthäufigkeit der Wärmepumpe - Identifikation von (periodischen) Grossverbrauchern 	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Differenz zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch (Performance Gap) - Alterung der Anlagen, Bedarf an Betriebsoptimierung, Auswirkungen von Sanierungen ermitteln - Eigenstromverbrauch optimieren, Kosten senken - Abweichungen vom "typischen" Verbrauch ermitteln - Standby-Verluste minimieren, Stromfresser identifizieren - Lastprofil Tagesverbrauch inkl. Ertrag/Überschuss PV erstellen - Wärmepumpen optimal betreiben, Takten vermeiden - Einstellungen optimieren (z.B. Zeitschaltprogramme) - Nebenkostenabrechnung (Heizung, Kühlung) - Datengrundlage für Nachhaltigkeitsberichte
Stromverbrauch Beleuchtung <ul style="list-style-type: none"> - Stromverbrauch pro Leuchte / Gruppe 	<ul style="list-style-type: none"> - Soll-Ist-Vergleich (Planwerte vs. Messwerte) - Vergleich mit Vorjahreswerten und langjährigen Mittelwerten - Abschätzung der Standby-Verluste 	<ul style="list-style-type: none"> - Ineffiziente Vorschaltgeräte erkennen - Ineffizientes Nutzerverhalten identifizieren - Einstellungen optimieren (z.B. Zeitschaltprogramme) - Nebenkostenabrechnung (Allgemeinbeleuchtung)
Wärmeverbrauch und -erzeugung <ul style="list-style-type: none"> - Wärmeverbrauch Heizung / Kühlung - Wärmeverbrauch Warmwasser - Wärmeerzeugung Solarthermie 	<ul style="list-style-type: none"> - Soll-Ist-Vergleich (Planwerte vs. Messwerte) - Vergleich mit Vorjahreswerten und langjährigen Mittelwerten 	<ul style="list-style-type: none"> - Performance Gap ermitteln - Bewertung von Sanierungsmassnahmen (witterungsbereinigt) - Nebenkostenabrechnung (Wärme, Kälte)
Medienverbrauch <ul style="list-style-type: none"> - Füllstand Öltank, Holzlager - Verbrauch Gas / Öl / Holz 	<ul style="list-style-type: none"> - Zustand (momentan) - Verlauf (Tag, Woche usw.) - Vergleich mit Vorjahreswerten und langjährigen Mittelwerten 	<ul style="list-style-type: none"> - Speichervolumen optimieren - Verbrauch optimieren - Datengrundlage für Nachhaltigkeitsberichte
Raumkomfort <ul style="list-style-type: none"> - Raumtemperaturen - Raumluftfeuchtigkeit - CO₂ - VOC 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermische Behaglichkeit (Momentanwert, Mittelwert, Min/Max) - Luftqualität (Momentanwert, Mittelwert, Min/Max) - Lüftung, Luftwechsel (Momentanwert, Mittelwert, Min/Max) 	<ul style="list-style-type: none"> - Behaglichkeit ermitteln (z.B. für Nachweise) und optimieren - Sommerlichen Wärmeschutz optimieren - Energieeinsparpotential berechnen (z.B. Absenkung der Raumtemperatur bei gleicher Behaglichkeit) - Prüfung, ob Enthalpiewärmetauscher oder Befeuchter im Lüftungsgerät erforderlich ist - Einhaltung der Raumluftqualität überprüfen
Aussenklima <ul style="list-style-type: none"> - Aussentemperatur - Aussenluftfeuchtigkeit - Sonnenstunden, Sonnenscheindauer 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse Heizkurveneinstellung / Heizgrenze - Analyse passive Energienutzung 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierung von Sonnenschutz, Tageslichtlenkung - Witterungsbereinigung von Messungen
Wasserverbrauch <ul style="list-style-type: none"> - Warmwasserverbrauch - Kaltwasserverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> - Lastgänge Wasserverbrauch pro Wohnung - Vergleich mit Durchschnittsverbrauch vergleichbarer Objekte/Haushalte 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierung des Speichervolumens - Sensibilisierung für den individuellen (Warm-)Wasserverbrauch - Nebenkostenabrechnung (Wasserverbrauch)
Mechanische Lüftung <ul style="list-style-type: none"> - Volumenströme (über Drehzahl oder Stromaufnahme) - Lufttemperaturen (AUL, ZUL, ABL, FOL) - Filterverschmutzung 	<ul style="list-style-type: none"> - Volumenströme mit Theorie/Planung vergleichen - Betriebszeiten der Lüftung ermitteln - Filterverschmutzung erkennen 	<ul style="list-style-type: none"> - Performance Gap ermitteln - Richtige Einstellung von Zeitschaltprogrammen, Anwesenheitserkennung prüfen - Alarmierung, vorausschauende Wartung
Fenster und Türen <ul style="list-style-type: none"> - Fensterkontakte - Türkontakte 	<ul style="list-style-type: none"> - Zustand (momentan) - Verlauf (Tag, Woche usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungsverhalten untersuchen - Sensibilisierung der Nutzer
Raumbelegung <ul style="list-style-type: none"> - Präsenz - Anzahl Personen 	<ul style="list-style-type: none"> - Zustand (momentan) - Verlauf (Tag, Woche usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung von Anwesenheit bzw. Raumbelegung bei der Steuerung - Planungsgrundlage für Nutzungsänderungen
Bauphysikalische Verhältnisse <ul style="list-style-type: none"> - Leckagen (Dach, Fensterrahmen, Türrahmen, Fassaden, Sanitär- und Heizungsanlagen) - Feuchtigkeit (Wände, Fassaden, Fussböden, Fensterbänke) - Wasserstand (Keller) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zustand (momentan) - Verlauf (Tag, Woche usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bauschäden erkennen und vermeiden

Anhang 3. LoRaWAN-Messmittel

	Hersteller	Typ	Beschreibung	Sensoren	Preis CHF (indikativ)	Link
	miromico	miro In-sight	Raumsensor -> spannend da miromico auch den Avelon Wisely entwickelt hat -> preislich im gleichen Range wie Avelon, jedoch ohne Avelon Cloud	Temp, rH Temp, rH, CO2 Temp, rH, CO2, VOC	82 144 205	https://miromico.ch/miro-insight
	miromico	miro Alarm	Audio-Visuelles Alarm Gerät	Sound, LED		https://miromico.ch/miro-alarm
	Lobaro	EDL21	electricity meter bridge	"EDL21"-compatible - The meter outputs over its infrared "INFO" interface a serial protocol conforming to the Smart Meter Language Protocol 1.04 (SML)	auf Anfrage	https://doc.lobaro.com/doc/lorawan-devices/edl21-electricity-meter-bridge-lorawan

	Alpha-Omega Technology	Klax 2.0	SML Optokopf für moderne Stromzähler		154	https://iot-shop.de/shop/product/klax-2-0-lorawan-sml-optokopf-fur-moderne-stromzahler-4365?category=18#attr=2873,2882,2874,2879,2875,2876,2880,2877,2878,2881,3067 TTN Decoder https://github.com/TobleMiner/ttn-klax
	mcf88	MCF-LW13MIO	Multi I/O module		340	https://www.mcf88.it/prodotto/mcf-lw13mio/
	ewattch	Squid	Messzangen-Strommessung			https://ewattch.com/squid-lora-sous-comptage-electrique/

	mcf88	MCF-LWWS00	Wetterstation	Temp, rH, Rain, Dewpoint, barometric pressure, windspeed, winddirection, solar radiation, pm1, pm2.5., pm10	2'700	https://semtech.force.com/ldp/ldp_catalogDetail?searchText=&Category=Hardware&id=a0o4400000Kseb7AAB&retUrlPage=%2Fldp%2Fldp_catalogResult%3FCategory%3DHardware%26is-Back%3D0
	mcf88	MCF-LW06420	4-20mA/0-10V Interface	2x 4-20mA 2x 0-10V	280	https://semtech.force.com/ldp/ldp_catalogDetail?searchText=&Category=Hardware&id=a0o4400000L1krAAD&retUrlPage=%2Fldp%2Fldp_catalogResult%3FCategory%3DHardware%26is-Back%3D0
	mcf88	MCF-LW13IO	Actuator and Input	1x 230V Input 1x 230V 8A Output	130	https://lora-alliance.org/lora_products/mcf-lw13io/
	mcf88	MCF-LW06485	RS485 interface	Interface is a Modbus Master and can read/write registers	195	https://semtech.force.com/ldp/ldp_catalogDetail?searchText=&Category=Hardware&id=a0o4400000L1kwAAD&retUrlPage=%2Fldp%2Fldp_catalogResult%3FCategory%3DHardware%26is-Back%3D0

	Netvox	R712	Temp, rH	Temperature and Humidity Sensor -> Speziell ist, dass Strahlungsschutz/Gehäuse inkl ist	100	https://www.thethingsnetwork.org/marketplace/product/r712
	Comtac	LoRa Lighting Bridge		Remote LoRaWAN/DALI Gateway		https://www.thethingsnetwork.org/marketplace/product/loralighting-bridge
	Comtac	Cluey		konfigurierbarer Controller		https://www.comtac.ch/de/produkte/lor/cluey/index.html
	Ellenex	PDT2-L		Differential pressure transmitter (gas)		https://market.thingpark.com/ellenex-lorawan-differential-pressure-transmitter-pdt2-l-us915.html
	Seed Studio	SenseCAP		LoRaWAN Wireless Barometric Pressure Sensor (OBSOLETE!)		https://www.distrelec.ch/en/sense-cap-lorawan-wireless-barometric-pressure-sensor-915mhz-seeed-studio-114991733/p/30215436?&cq_src=google_ads&cq_cmp=18320642092&cq_c

					on=&cq_term=&cq_med=pla&cq_plac=&cq_net=x&cq_pos=&cq_plt=gp&gclsrc=aw.ds&gclid=Cj0KCQjwy5maBhD-dARI-sAMxrkw250HG_Ad_pYD7FiesnctAN5JhyLEbOT0eN-c2Aiiyzgsk-BaSm5m34aAoEvEALw_wcB&gclsrc=aw.ds
	ELSYS	EMS Door		Raumsensor Tür/Fenster LoRa WAN	https://www.reichelt.com/ch/de/raumsensor-tuer-fenster-lora-wan-elsys-ems-door-p275436.html?PROVID=2808&gclid=Cj0KCQjwy5maBhD-dARI-sAMxrkw2RfK7SEC4LiZJuAvXhzg7KxmpdQZalYrN2mSkQsEFvSJAW7wyKwO-caAnEIEALw_wcB