

**Abschlussbericht 7. Energieforschungsprogramm:
Förderaufruf „Klimaneutrale Wärme und Kälte“ – Mikroprojekte**

Leverkusen, 28.06.2023

Forschungsvorhaben: 03ENM0030 Mikroprojekt: RetroKID – Energieeffizienzsteigerung von Bestandsgebäuden durch Retrofit mit autonomen Sensoren und KI-basierter Diagnosesoftware

Laufzeit: 01.10.2023-31.03.2024

Unternehmen:

Enerthing GmbH
An der Schusterinsel 3a
51379 Leverkusen
Germany

Bezug zum 7. Energieforschungsprogramm:

Förderaufruf: Klimaneutrale Wärme und Kälte
Förderformat: Mikroprojekte
Finanzierungstyp: 1



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

1. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	2
2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	3
3. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis.....	4
3.1 Automatisierte Systemidentifikation und Anomalieerkennung im Gebäudebetrieb	4
3.2 Hybride physikalisch-inspirierte thermische Gebäudemodellierung.....	4
3.3 Berechnungsverfahren	6
3.4 Ergebnisse.....	7
Enerthing Gebäude.....	8
Einzelhandelsgebäude.....	10
Bürogebäude	11
3.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen und Einsparpotential	13
4. Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes	13
5. Geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	15
6. Beitrag zu den zu den förderpolitischen Zielen.....	15
7. Fortschreibung des Verwertungsplanes – Verweis auf ein Anschlußvorhaben.....	15

1. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Heutzutage ist die Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz sowie des Nutzerkomforts auf Raumbene in Bestandsgebäuden oft nicht möglich, da es an zugänglichen Messwerten und geeigneten Analysemethoden fehlt. Dies liegt einerseits daran, dass die für solche Analysen erforderlichen Sensoren in den Räumen häufig nicht vorhanden sind und andererseits an der unzureichenden Integration von Sensor- und Aktorendaten auf Raumbene in zentrale Kommunikationsprotokolle der Gebäudeautomation. Während Cloud-basierte Lösungen und Dienstleistungen (z.B. Aedifion, Recogizer, Synavision, TÜV SÜD, mondas, GreenFusion, MeteoViva) bereits den Markt großer Gewerbegebäude mit modernen Gebäudeautomationssystemen erschlossen haben, mangelt es an kostengünstigen Lösungen für die Nachrüstung von Bestandsgebäuden mit nicht-invasiven und kosteneffizienten Messtechnologien. Auch nach Abschluss von Projekten konzentrieren sich die Anbieter von softwarebasierten Optimierungslösungen weiterhin auf große, bereits automatisierte Gebäude, wobei der Fokus stark auf der zentralen Anlagentechnik liegt. Es fehlen außerdem automatisierte Analysemethoden, um Räume hinsichtlich ihrer Nutzung, Energieeffizienz und des Komforts zu bewerten und daraus Rückschlüsse auf den Betrieb der Hauptversorgungsanlagen zu ziehen.

Zur Digitalisierung von Bestandsgebäuden kommen Sensoren für Temperatur, Feuchtigkeit, Präsenz und Luftqualität infrage. Bei Sanierungsprojekten werden in der Regel verkabelte

Sensoren eingesetzt, doch zur Reduzierung des Aufwands kommen häufig Funksensoren zum Einsatz, die größtenteils batteriebetrieben sind. Insbesondere für die Ausstattung einer großen Anzahl von Gebäuden ist der Batteriebetrieb aufgrund der notwendigen Batteriewechsel (meist alle zwei Jahre für Raumluftsensoren) jedoch unwirtschaftlich und wenig nachhaltig. Enerthing hat deshalb auf Basis eigens entwickelter Photovoltaiktechnologie energieautarke Funksensoren für die Gebäudedigitalisierung entwickelt. Mithilfe der LoRa-Funktechnologie können aufgrund der großen Funkreichweite auch weitläufige Gebäude ausgestattet werden. Städte und Kommunen bauen mittlerweile LoRaWAN-Funknetze auf, die zur Erfassung von Sensordaten genutzt werden können.

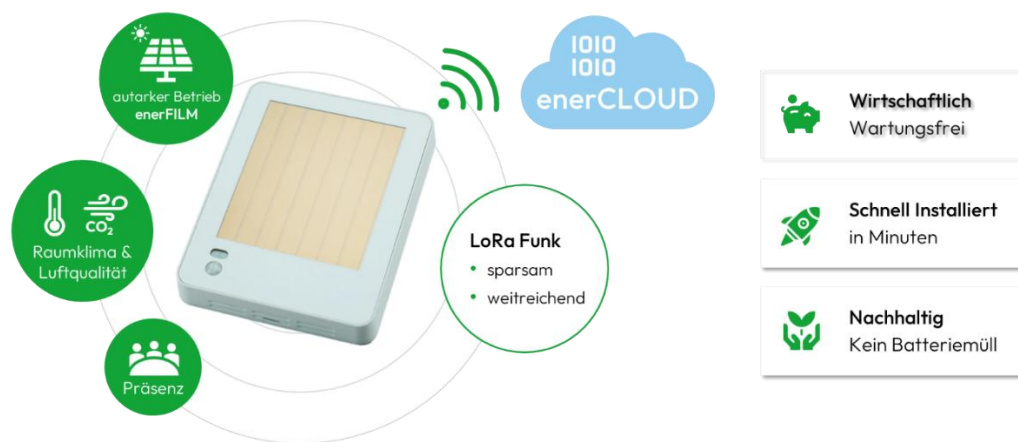


Abb. 1: Enerthing's energieautarker LoRaWAN Multisensor für den Gebäuderetrofit

Künstliche Intelligenz (KI) wird in der Gebäudeenergie-technik verwendet, um erfasste Daten gezielt auszuwerten, beispielsweise zur Vorhersage zukünftigen Verhaltens oder zur Fehlererkennung. Eine aktuelle Studie (Bode et al. 2020) zeigt jedoch die Herausforderungen der Anwendung von Algorithmen des Maschinellen Lernens (ML) auf reale Daten auf: Eine der größten Anforderungen typischer ML-Techniken ist die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen, gelabelten Daten. Fehlererkennungsmethoden erfordern beispielsweise eine genaue Kennzeichnung von Fehlern, was in der Praxis kaum möglich ist, da Fehler oft unbekannt oder nicht künstlich erzeugt werden können.

2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Unterauftrag ans ISE wurde erfolgreich abgeschlossen, allerdings thematisch wie folgt angepasst. Erste Tests mit Algorithmen des Maschinellen Lernens zeigten, dass die Datenverfügbarkeit und -qualität noch nicht ausreicht für einen vollständig automatisierten Einsatz von KI-Methoden. Hindernisse waren nicht vorhandene annotierte Trainingsdaten für einen Einsatz von Methoden des Überwachten Lernens (Bsp. Random Tree/Forest, Klassifikations-Neuronale Netze). Auch ein Einsatz von Methoden des Halb- bzw. Nichtüberwachten Lernens würde eine sehr große Menge an Trainingsdaten erfordern, die alle möglichen Betriebsszenarien abdecken. Aus diesem Grund wurde ein neuartiger hybrider sowohl auf Daten als auch physikalischen Modellwissen basierender Ansatz entwickelt. Dies erforderte zusätzliche Ressourcen, so dass an einer Übertragung des Algorithmus zur Fehleridentifikation von der dezentralen Zonenebene zur zentralen Gebäudeebene aus Zeitgründen nicht gearbeitet werden konnte. Trotzdem zeigen die Ergebnisse (siehe Kapitel 3) das große Potential dieser und weitergehender Arbeiten in der Anwendung von KI-Methoden zur Optimierung und Fehlerverbesserung im Gebäudebetrieb.

Der vom Fraunhofer ISE entwickelte Algorithmus wurde erfolgreich in die Cloud Lösung von enerthing integriert. Somit ist es nun möglich aktuelle Temperaturdaten der Gebäude zu analysieren und Zeitkonstanten zu extrahieren. Zukünftig sollen im Rahmen von Nachfolgeprojekten die KI-basierten Analysemethoden ausgeweitet werden. Um die vielfältigen Anforderungen der ganzheitlichen Diagnose auf den verschiedenen Ebenen (Raum, gesamtes Gebäude, TGA) gerecht zu werden, wird ein neuer dezentraler KI-Ansatz getestet, in dem kleine KI-Modelle für die einzelnen Räume trainiert wurden und auf deren Basis ein Inferenzmodell entwickelt wurde.

3. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

3.1 Automatisierte Systemidentifikation und Anomalieerkennung im Gebäudebetrieb

Die automatisierte Systemidentifikation basiert auf der Analyse von Messdaten sowie auf zusätzlichem Modellwissen, sofern dieses verfügbar ist. Durch den Einsatz fortschrittlicher Algorithmen und Techniken können die wesentlichen Parameter eines Gebäudes identifiziert werden. Dies umfasst unter anderem:

- Wärmetransmissionsverluste: Diese wichtigen Parameter liefern entscheidende Informationen über die Effizienz der Wärmedämmung und die allgemeine thermische Performance eines Gebäudes.
- Thermische Speicherkapazität des Gebäudes

Ein zentrales Ziel der Systemidentifikation ist die Erkennung von Anomalien im Gebäudebetrieb, die auf ineffizientes Verhalten hinweisen. Durch kontinuierliche Überwachung und Analyse der Betriebsdaten können solche Abweichungen frühzeitig identifiziert und adressiert werden. Zu den typischen Anomalien zählen:

- Ineffizientes Heiz- oder Kühlsystemverhalten
- Abweichungen im Energieverbrauch
- Nachtabsenkung
- Ineffizienzen Gebäudehülle
- Lüftungsverluste
- Nutzungsverhalten
- Hydraulischer Abgleich

Ein typisches Problem in der Anomalieerkennung ist das Fehlen ausreichend annotierter Daten, oft bedingt durch seltene oder unbekannte Fehler. Überwachte maschinelle Lernmethoden (Supervised ML) benötigen solche Daten, um effektiv zu trainieren. Unüberwachte Methoden (Unsupervised ML) sind nur bedingt einsetzbar, da sie keine klaren Anhaltspunkte haben, was normal oder anormal ist. Diese Einschränkungen erschweren die zuverlässige Erkennung von Anomalien in der Praxis. Aus diesem Grund verwenden wir einen innovativen hybriden Ansatz, der physikalisches Wissen mit datengetriebenen ML-Methoden vereint.

3.2 Hybride physikalisch-inspirierte thermische Gebäudemodellierung

Durch enerthings Raumsensorik kann erstmalig das zeitliche Temperaturverhalten von Bestandsgebäuden bis auf Raumebene erfasst werden. Unter Verwendung geeigneter Gebäudemodelle können relevante temperatur- und zum Teil auch nutzungs bereinigte Kennzahlen aus den Zeitreihen der Raumtemperaturen abgeleitet werden, die für eine weitere

ML-Pipeline basierend auf Diagnosemethoden des Maschinellen Lernens eingesetzt werden können. Im Rahmen des Projektes haben wir ein thermisches Gebäudemodell verwendet. Dabei werden die Wärmeverluste und Gewinne auf Raumebene betrachtet.

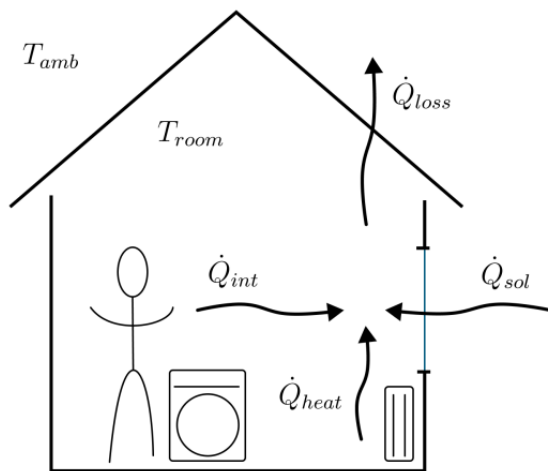


Abb.2: Wärmetransport in einem Gebäude unter Betrachtung unterschiedlicher Senken und Quellen

Vereinfacht dargestellt, kann das thermische Verhalten eines Gebäudes durch folgende Energieerhaltungsgleichung beschrieben werden:

$$\frac{dT_{room}}{dt} \cdot C = \dot{Q}_{gain} - \dot{Q}_{loss}$$

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R} \cdot (T_{room} - T_{amb})$$

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{Q}_{heat} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{sol}$$

R [K/W] stellt den thermischen Widerstand dar und ist der Kehrwert des Wärmetransmissionsverlustkoeffizienten ($H_t = 1/R$) (auch nach ENEV Transmissionswärmedurchgangskoeffizient oder Transmissionswärmeflusskoeffizient H_t genannt mit Einheit W/K). Dieser Wert für die gesamte Gebäudehülle bildet die gewichtete Summe der Transmissionsverluste aller Bauteile gegen Außenluft, Erdreich und durch angrenzende nicht beheizte Räume. Die Berechnung erfolgt durch die U-Werte der Bauteile. Der Transmissionswärmedurchgangskoeffizient für das gesamte Gebäude ergibt sich aus dem Wärmefluss, der bei einem Temperaturunterschied von 1 K durch die Gebäudehülle hindurchgeht. Die spezifischen U-Werte (bezogen auf die Bauteilfläche) werden in W/(m²K) angegeben und liegen beispielsweise für Fenster üblicherweise zwischen 0,7 (Tripel-Wärmeschutz-Verglasung) und 5 (Einfachverglasung). Je kleiner der U-Wert ist, desto besser ist die Dämmung. Zusätzlich können Lüftungswärmeverluste berücksichtigt werden, die wir aber vorerst vernachlässigen. Die Berechnung ergibt sich dann aus $H_{t,v} = H_t + H_v$ als Kennwert des gesamten Gebäudes bzw. einzelner Zonen.

$C = C_{wirk}$ [J/K] ist die thermische Kapazität oder Wärmekapazität des Gebäudes, also die thermische Speicherfähigkeit. Der Parameter C (in J/K = Ws/K) gibt an, wie viel Wärme die Gebäudehülle pro Temperaturänderung von 1 K speichern kann. Die DIN 4108-2 "Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz" unterscheidet die Qualität der Bauteile bezogen auf den anteiligen Sonneneintragskennwert nach drei Bauarten:

- leicht: $C_{wirk}/A_G < 50 \text{ Wh}/(\text{Km}^2)$

- mittel: C_{wirk}/A_G zwischen 50 Wh/(Km²) und 130 Wh/(Km²)
- schwer: $C_{\text{wirk}}/A_G > 130$ Wh/(Km²) (z.B. Stahlbetonbauteile)

Die Wärmekapazität beeinflusst nicht die Wärmeverluste sondern die Wärmespeicherfähigkeit. Für ein bestimmtes Gebäude mit einer bestimmten Außenfläche ist diese in vielen Fällen bekannt oder kann recht gut aus vorhandenen Informationen abgeschätzt werden (z.B. Energieausweis, Fassadenfotos). Die wichtigen Parameter sind ist der Wärmetransmissionsverlust des Gebäudes bzw. die Wärmetransmissionsverluste der einzelnen Zonen. Diese liefern entscheidende Informationen über die Effizienz der Wärmedämmung und die allgemeine thermische Performance eines Gebäudes, bzw. abnormales Verhalten einzelner Zonen. Zusammengesetzt ergeben der Wärmetransmissionsverlust, bzw. der thermische Widerstand, und die Wärmekapazität die charakteristische Zeitkonstante des Gebäudes $T = RC$ in Stunden oder Tagen, die das zeitliche Abkühlverhalten bzw. Aufheizverhalten charakterisiert. Diese kann wie folgt interpretiert werden: Wenn die Außentemperatur 0 Grad wäre, wäre das Gebäude nach T Tagen auf 1/3 der Ausgangsraumtemperatur abgekühlt.

Im Rahmen des Projekts wurde das Temperaturverhalten von drei verschiedenen Gebäuden mit jeweils weniger als zehn bzw. mehr als 100 Zonen/Räumen untersucht.

3.3 Berechnungsverfahren

Die Wärmeenergiegewinne in unserem Modell stammen hauptsächlich aus dem Raumheizungssystem des Gebäudes \dot{Q}_{heat} , insbesondere in kalten Wintermonaten oder in allgemein kalten Klimazonen. In warmen Klimazonen, in denen eine Raumheizung nicht oder nur in geringem Umfang erforderlich ist, ist die Sonneneinstrahlung die Hauptquelle der Wärmeenergiegewinne \dot{Q}_{sol} . Zusätzlich berücksichtigen wir die internen Energiegewinne \dot{Q}_{int} , die durch die Körperwärme der Bewohner oder die von elektrischen Geräten erzeugte Wärme entstehen.

Unter bestimmten Voraussetzungen lassen sich die beschriebenen Energiegewinne vernachlässigen und das vereinfachte Modell kann gelöst werden. In der Nacht werden keine solaren Gewinne erwartet ($\dot{Q}_{\text{sol}} = 0$). Vor allem Bürogebäude sind zu dieser Zeit unbewohnt, was die internen Wärmegegewinne, die durch Menschen und elektrische Geräte entstehen, weiter reduziert ($\dot{Q}_{\text{int}} \approx 0$). Außerdem gehen die meisten dieser Gebäude in die Nachtabsenkung, bei der das Heizsystem des Gebäudes eine niedrigere Komfortraumtemperatur anstrebt. Die Beheizung der Räume wird nicht vollständig eingestellt, um Schimmelbildung und schlechte Luftqualität zu vermeiden, aber es werden zunächst keine Wärmeenergiegewinne erwartet, wenn sich das Heizsystem an die reduzierte Komforttemperatur anpasst ($\dot{Q}_{\text{heat}} = 0$). Daher gibt es ein kurzes Zeitfenster, in dem keine Energiegewinne zu erwarten sind, welches durch die Belegungs- und Sonnenscheinzeiten sowie die Steuerung der Heizungsanlage des Gebäudes begrenzt ist.

Innerhalb dieses Zeitfensters gilt näherungsweise die folgende Differentialgleichung für die Entwicklung der Raumtemperatur T_{room} , deren Verhalten ausschließlich von der Außentemperatur T_{amb} und der Gebäude-Zeitkonstante RC bestimmt wird.

$$\frac{dT_{\text{room}}}{dt} = \frac{1}{RC} (T_{\text{amb}} - T_{\text{room}})$$

Diese Differentialgleichung lässt sich direkt lösen. Es ergibt sich eine Integralgleichung für die Entwicklung der Raumtemperatur mit freiem Parameter RC . Ein Least-Square Fit kann den besten Schätzwert für die Zeitkonstante auf Basis des tatsächlichen Temperatur-Verlaufs ermitteln.

$$T_{room}(t, RC) = e^{-\frac{t}{RC}} \cdot \left[T_{room}(0) + \int_0^t e^{\frac{\tau}{RC}} \cdot \frac{T_{amb}(\tau)}{RC} d\tau \right]$$

Um diese Methode weiterzuentwickeln wurde ein Algorithmus geschrieben, der den angestrebten nächtlichen Abfall bis zum Einsetzen der Gegen-Heiz-Phase automatisch identifizieren kann. Dazu werden zuerst nächtliche Beobachtungsgrenzen identifiziert, z.B. 18:00 bis 06:00. Diese Grenzen können sehr konservativ gesetzt werden, da sie nur als Filter für die Analyse dienen. In diesem Bereich wird nun der erste 3-stündige Zeitraum identifiziert, in dem die Raumtemperatur monoton abfällt. Dadurch wird gewährleistet, dass der gewünschte nächtliche Abfall selektiert wird. Um schlussendlich eine Verwischung der Zeitkonstante durch Einflüsse der Gegen-Heiz-Phase zu vermeiden, wird nur die erste Stunde des nächtlichen Abfalls tatsächlich für den Least-Square Fit verwendet. Schlussendlich wird eine weitere Bedingung an die Initialsteigung des Abfalls angelegt, die eine Links-Krümmung der Kurve gewährleistet. Dadurch wird die Trägheit des Heizsystems berücksichtigt, sowie zufällige Temperatursenkungen vor dem charakteristischen Abfall umgangen. Folgende Graphik verdeutlicht den erwünschten Abfall-Bereich sowie den automatisch ausgewählten Fit-Bereich.

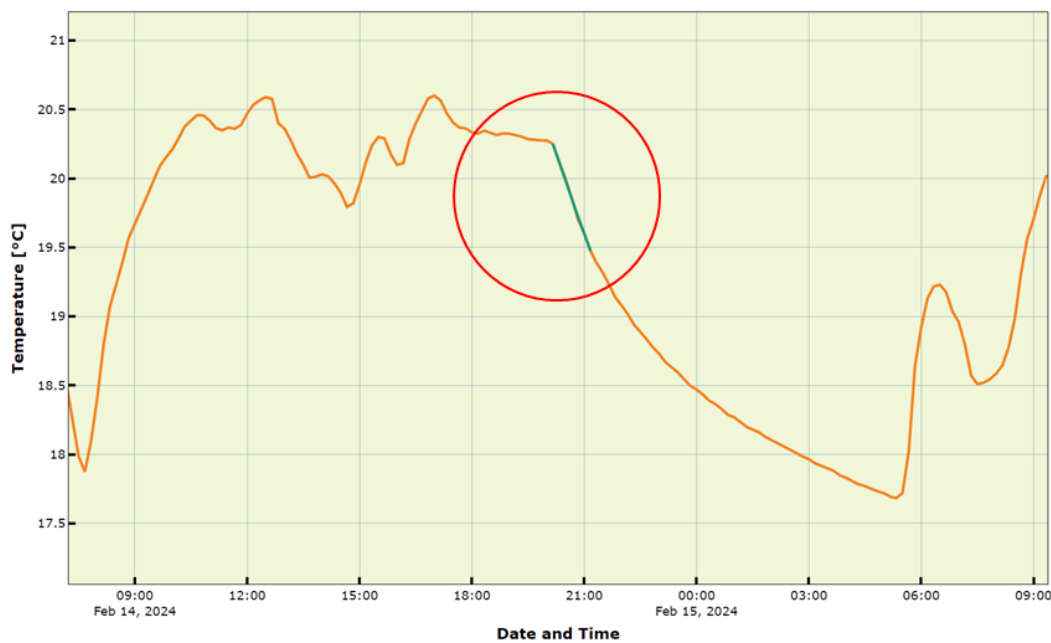


Abb.3: Temperaturabfall in einem Raum mit Fitfunktion.

Der Least Square Fit wird für jeden gefundenen Bereich verwendet, um einen Wert für die Zeitkonstante für jede Nacht zu erhalten. Diese sind nützlich, um Anomalien festzustellen. Wenn die Zeitkonstante kleiner als gewöhnlich ausfällt, dann bedeutet das, dass das Gebäude übermäßig schnell an Temperatur verliert, z.B. durch Lüftungsverluste durch ein dauerhaft geöffnetes Fenster. Fällt die Zeitkonstante sehr groß aus, dann entspricht das nicht berücksichtigten Energiegewinnen, z.B. durch eine dauerhafte Beheizung am Wochenende.

3.4 Ergebnisse

Die beiden beschriebenen Methoden wurden jeweils auf drei Gebäude mit mehreren mit Sensoren ausgestatteten Zonen angewendet. Dabei resultieren Heatmaps, die die Zeitkonstanten $T = RC$ für jede Nacht und jede Zone des Gebäudes beinhalten. Auch die Verteilung dieser Zeitkonstanten wird dargestellt und diskutiert. Weiterhin wird für jede Zone ein bester Schätzwert für die Zeitkonstante mit einem kollektiven Least Square Fit ermittelt. Der Mittelwert über die verschiedenen Zonen führt zu einer finalen Bewertung des thermischen Verhaltens der drei Gebäude. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die kollektiven

Zeitkonstanten zusammengefasst. Da keine Planungsdaten der Gebäude vorlagen, stellen die berechneten Wärmeverlustkoeffizienten nur grobe Näherungen dar.

	Bürogebäude	Enerthing Gebäude	Einzelhandelsgebäude
Anzahl Zonen (nutzbar)	109	5	3
Zeitkonstante	60h	23h	17h
Geschätzte Wärmeverlustkoeffizient	3,3 W/K (unter Annahme $C_{\text{wirk}}=200 \text{ Wh/K}$)	4,3 W/K (bei $C_{\text{wirk}} = 100 \text{ Wh/K}$)	5,9 W/K (bei $C_{\text{wirk}} = 100 \text{ Wh/K}$)

Anmerkungen: Die kollektiven Zeitkonstanten ergeben sich aus dem Median der berechneten Zeitkonstanten für die einzelnen Zonen und Tage. Bei dem Bürogebäude ist die berechnete Zeitkonstante höher, da keine oder annähernd keine Nachtabsenkung erkennbar ist und die berechneten Zeitkonstanten deswegen insb. im Winter höher liegen aufgrund des nächtlichen Heizbetriebs. Ein deutlicher Peak der Verteilung findet bei $T=60\text{h}$ statt, siehe Abb. 6.. Um auch in dem Fall einer fehlenden Nachtabsenkung gute Ergebnisse zu erzielen, können Daten außerhalb der Heizperiode verwendet werden.

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die drei Gebäude grafisch dargestellt.

Enerthing Gebäude



Bürogebäude



Abb. 4: Referenzgebäude

Enerthing Gebäude

Für dieses Gebäude wurden 5 Sensoren ausgewertet. Die Temperaturkurven zeichnen sich vor allem durch häufiges Taktverhalten aus. Dennoch lassen sich viele Bereiche mit dem gewünschten Temperaturabfall finden und auswerten. Es kann deutlich eine Nachtabsenkung erkannt werden, die Heizung setzt ein, sobald die Temperatur in einen Bereich von 17°C bis 18°C gefallen ist.

Illustration of Room Temperature and Weather Data

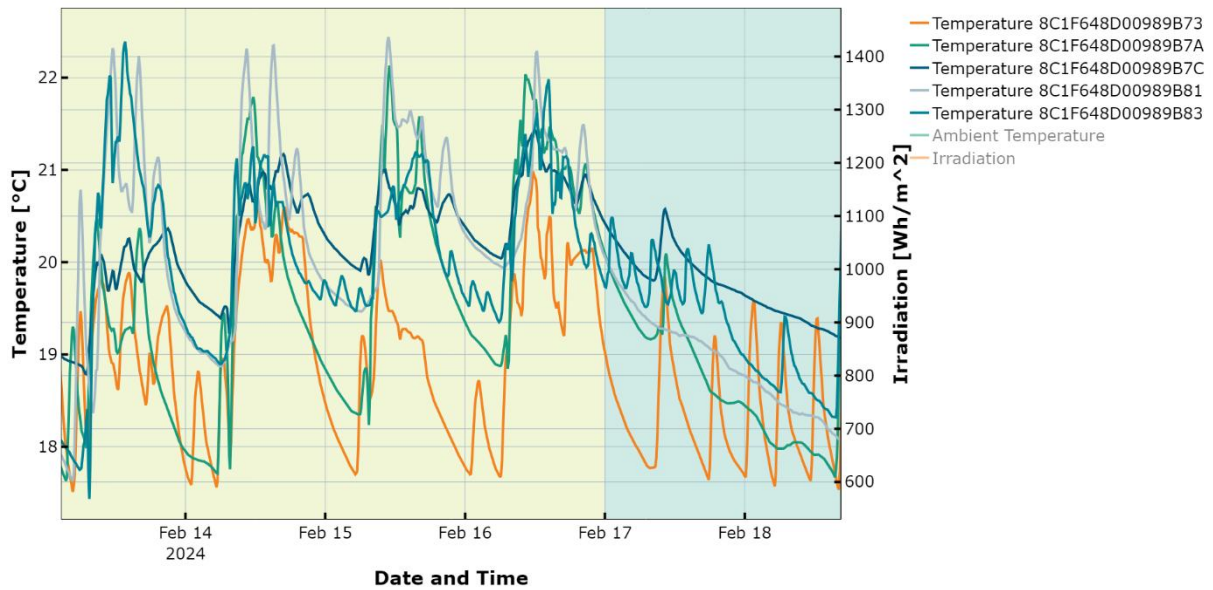
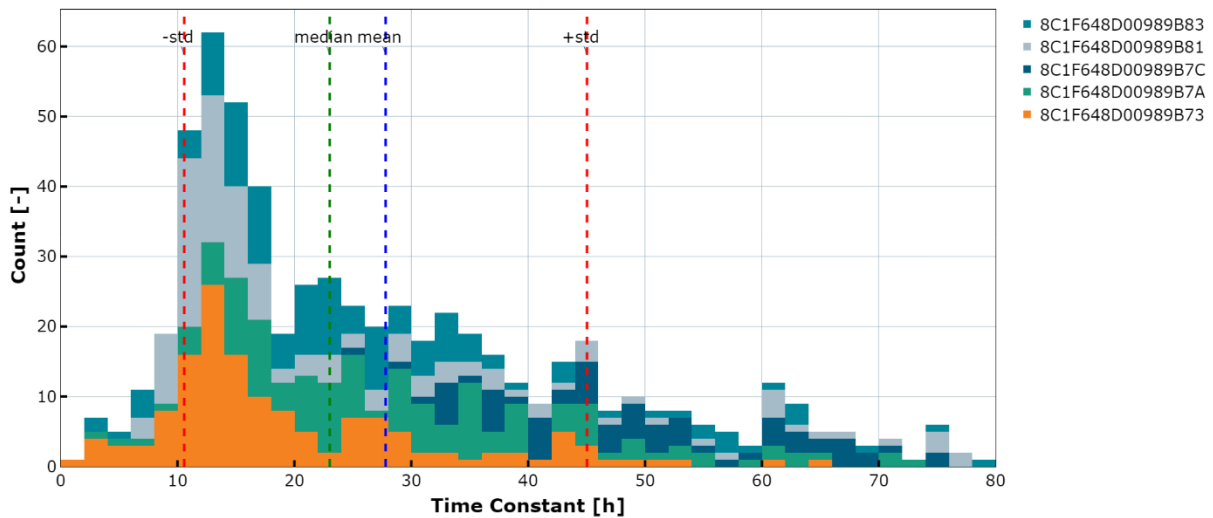


Abb. 5: Zeitlicher Temperaturverlauf des enerthing Gebäudes.

Die Verteilung an Zeitkonstanten ist sehr breit gestreut und stark abhängig von der Gebäude-Zone. Jedoch lässt sich ein Maximum bei 10h bis 20h erkennen, was auf eine eher schlechte Dämmung hindeutet. Um Ausreißer zu entfernen sind Zeitkonstanten mit werten von über 80h nicht dargestellt.

Time Constant Distribution



Time Constant Results per Night and Zone

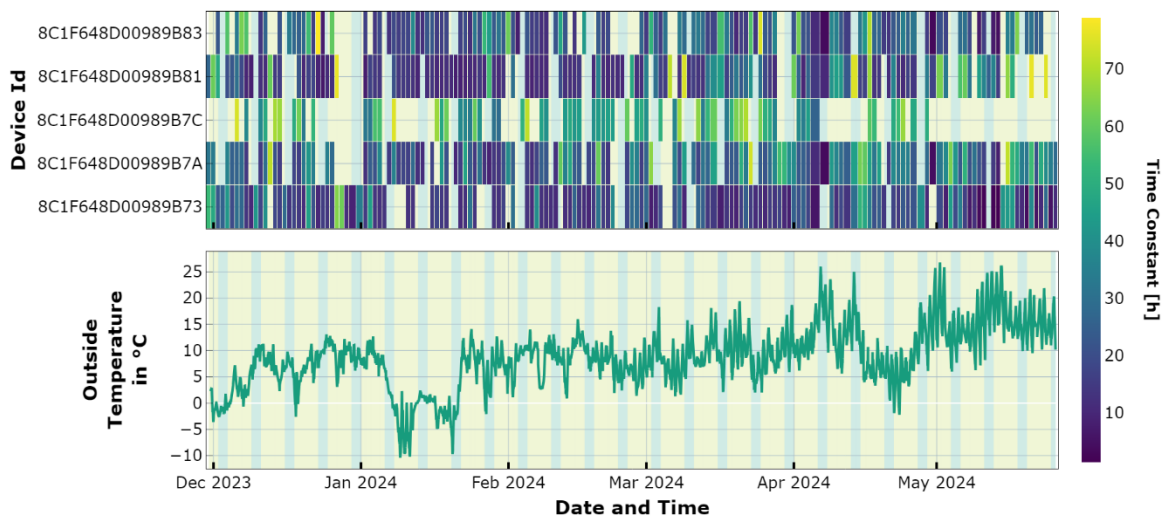


Abb. 6. Darstellung der Zeitkonstanten des enerthing Gebäudes

Einzelhandelsgebäude

Für dieses Gebäude wurden 3 Sensoren ausgewertet. Die Temperaturkurven sind gut verständlich und zeigen täglich einen charakteristischen Abfall. Es kann ebenfalls deutlich eine Nachtabsenkung erkannt werden, vor allem am Wochenende sorgt die Gegenheizung für eine annähernd konstante Temperatur um 18°C.

Illustration of Room Temperature and Weather Data

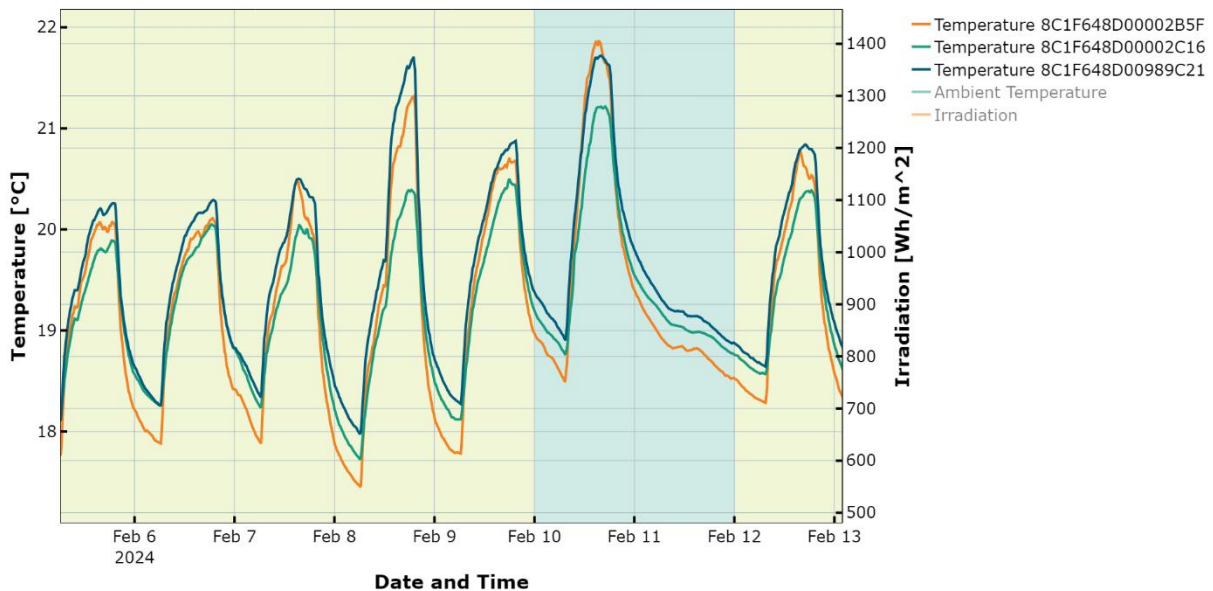


Abb. 7: Temperaturverhalten eines Einzelhandelsgebäudes.

Auch hier lässt sich eine starke Abhängigkeit der betrachteten Gebäudezonen erkennen. Zwei Zonen sind ähnlich gut gedämmt wie das Enerthing Gebäude und liegen bei Zeitkonstanten von 10h bis 20h, in einer anderen Zone werden Zeitkonstanten von ca. 30h Stunden gemessen, was auf eine bessere Dämmung hindeutet. In der Heatmap fallen vor allem die Wochenenden durch höhere Zeitkonstanten auf, da dort konstant gegengeheizt wird und somit

eine bessere Dämmung simuliert. Um Ausreißer zu entfernen sind Zeitkonstanten mit werten von über 50h nicht dargestellt.

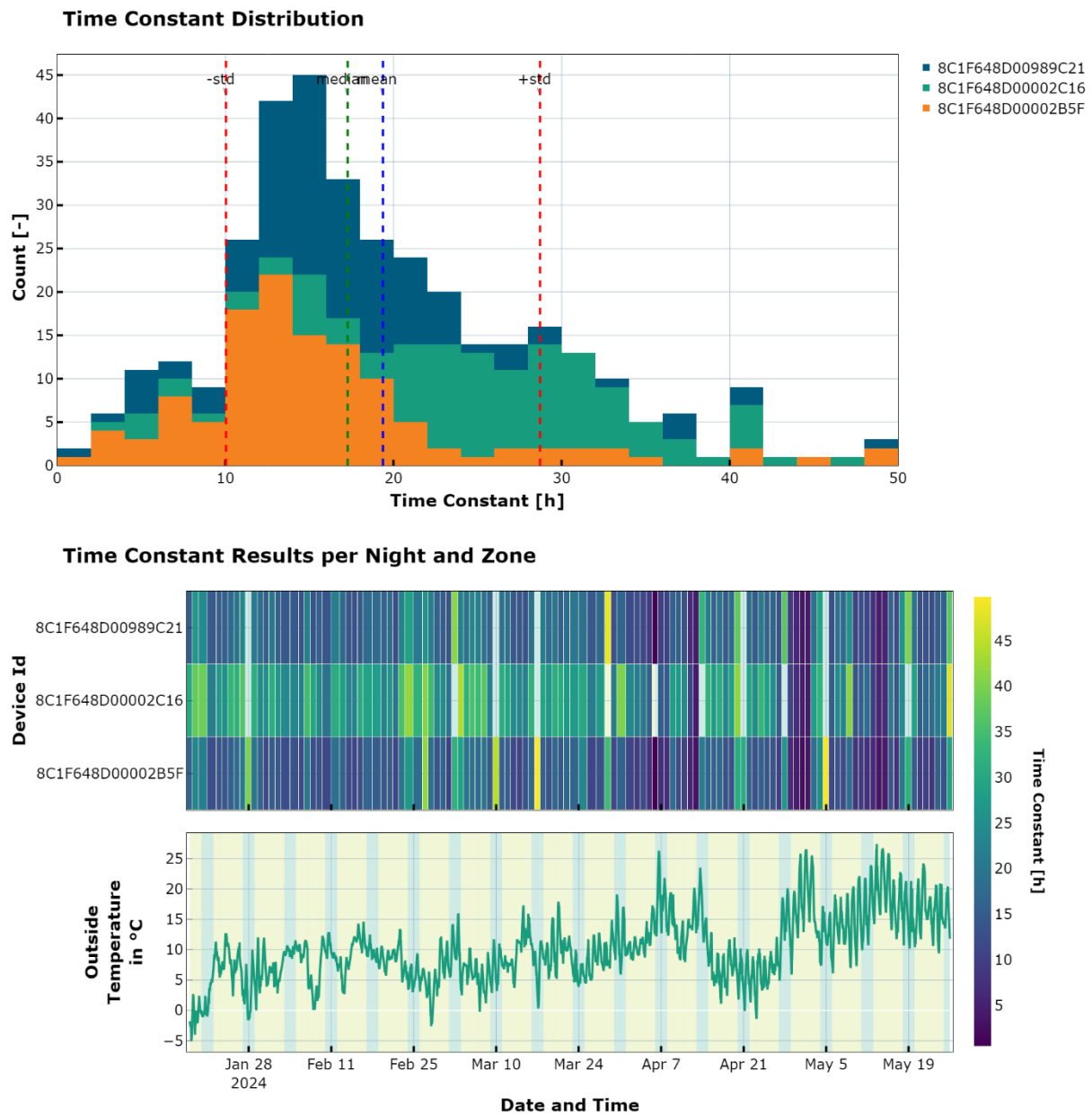


Abb. 8: Zeitkonstanten eines Einzelhandelsgebäudes

Bürogebäude

Für dieses Gebäude wurden 108 Sensoren ausgewertet. Damit besitzt es den größten Datenbestand. Die Temperaturkurven zeigen ein weitaus weniger auffälliges Verhalten als für die anderen Gebäude. Das liegt zum einen daran, dass das Gebäude moderner und besser gedämmt ist und zum anderen das keine ausgeprägte Nachtabsenkung erkennbar ist. Die Temperaturen fallen nachts nur um wenige °C ab (korreliert mit der Außentemperatur), scheinen jedoch vom Heizsystem stabil gehalten zu werden.

Illustration of Temperature Data and Weather Data

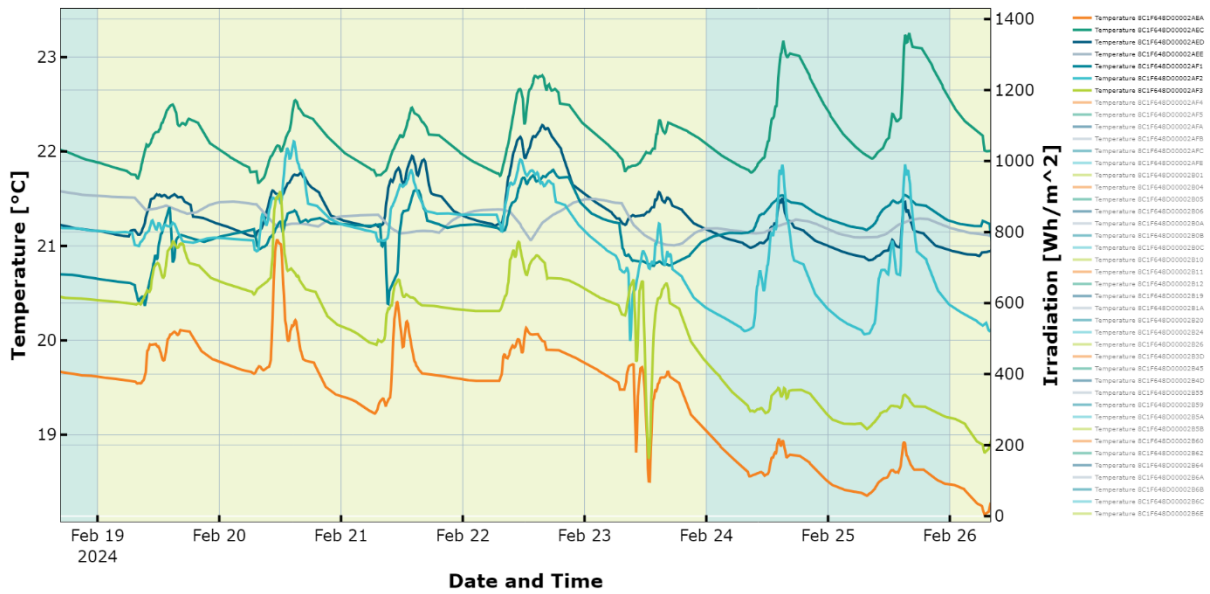
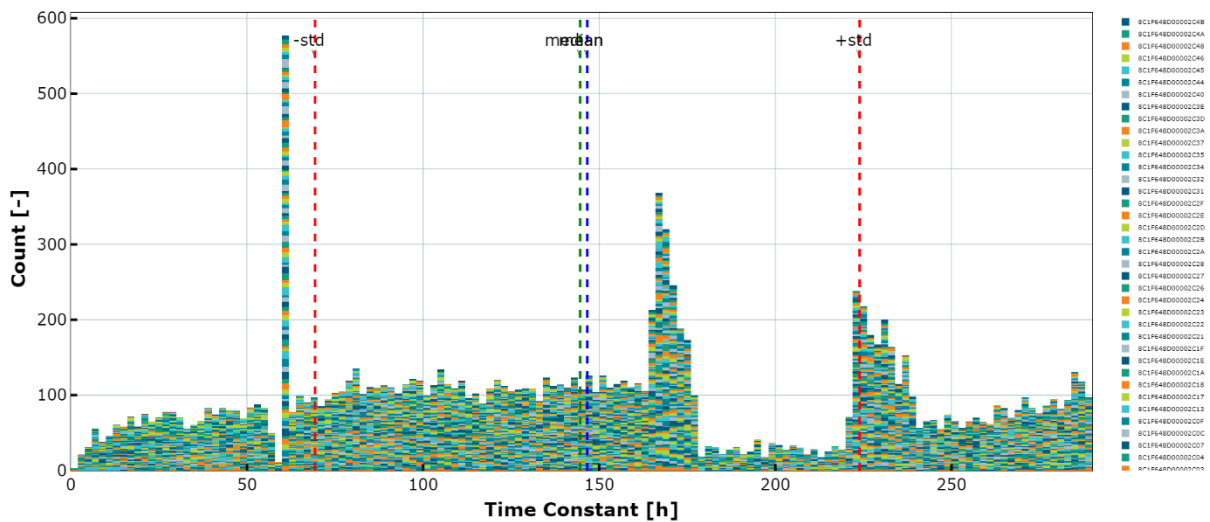


Abb. 9: Temperaturverhalten eines Bürogebäudes.

Die gemessenen Zeitkonstanten sind erneut sehr breit gestreut und nehmen generell größere Werte an. Dazu muss gesagt werden, dass die fehlende Nachtabsenkung in die Bestimmung der Zeitkonstante einfließt. Die Energiegewinne durch die Heizung werden in der Berechnung nicht berücksichtigt und sorgen demnach für sehr hohe Werte. Ein deutliches Maximum tritt bei einer Zeitkonstante von 60h auf, was der tatsächlichen Zeitkonstante des Gebäudes entspricht. Dieses Ergebnis deutet auf eine bessere Dämmung hin und lässt sich gut mit dem modernen Bürogebäude in Verbindung bringen. Um Ausreißer zu entfernen sind Zeitkonstanten mit Werten von über 290h nicht dargestellt.

Time Constant Distribution



Verteilung Zeitkonstanten aller Räume

Time Constant Results per Night and Zone

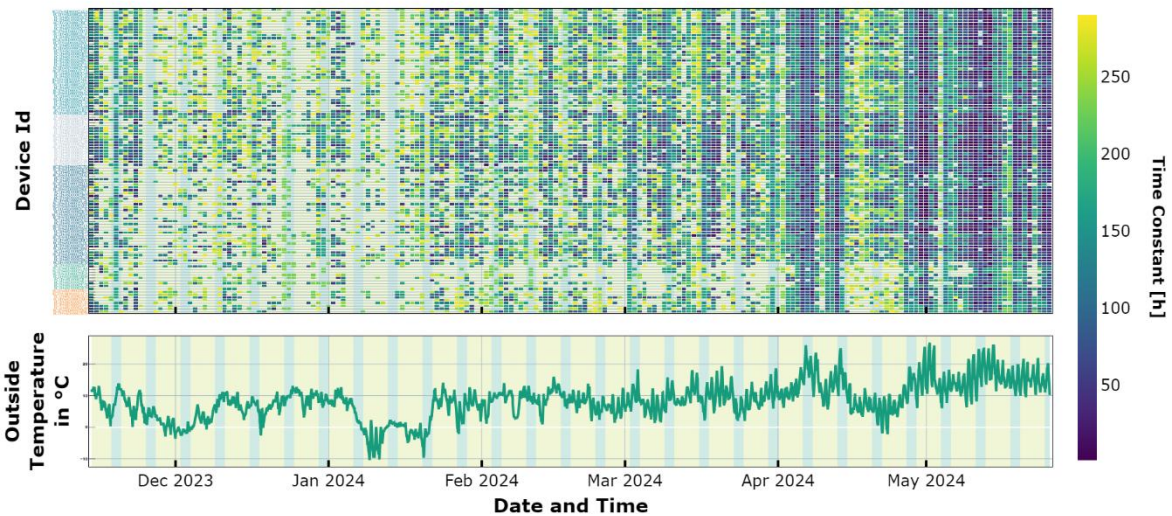


Abb. 10: Zeitkonstanten eines Bürogebäudes.

3.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen und Einsparpotential

Auf Basis der identifizierten Parameter und Anomalien können dedizierte Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um die Energieeffizienz zu steigern und Einsparpotentiale zu realisieren. Ein Prototyp für diese Analyse und Empfehlungserstellung befindet sich in der Entwicklung. Zu den spezifischen Empfehlungen zählen:

- **Nachtabenkung:** Optimierung der Heizungssteuerung während der Nachtstunden, um den Energieverbrauch zu reduzieren.
- **Ineffizienzen der Gebäudehülle:** Identifikation und Behebung von Schwachstellen in der Wärmedämmung.
- **Lüftungsverluste:** Minimierung der Energieverluste durch optimierte Lüftungsstrategien.
- **Nutzungsverhalten:** Anpassung des Gebäudemanagements an das tatsächliche Nutzerverhalten zur Steigerung der Effizienz.
- **Hydraulischer Abgleich:** Verbesserung der Wärmeverteilung im Gebäude durch einen optimalen hydraulischen Abgleich des Heizsystems.

Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes zu verbessern und die Betriebskosten zu senken. Durch die Kombination von Datenanalyse und modellbasierten Ansätzen können maßgeschneiderte Lösungen für spezifische Gebäude entwickelt werden.

4. Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes

Aufgrund des hohen Anteils von Bestandsgebäuden an den CO₂-Emissionen rücken diese bei klimarelevanten Maßnahmen immer stärker in den Fokus von Eigentümern und Nutzern. Durch einen einfachen und skalierbaren Retrofit mittels Sensoren wird die Grundlage für eine effektive Optimierung sowohl des Betriebs als auch des Sanierungsfahrplans geschaffen. Der im Rahmen des Mikroprojekts entwickelte analytische Ansatz zur ganzheitlichen, datenbasierten Optimierung von Gebäudebeständen ist nach unserer Kenntnis einzigartig.

Der Einfluss des Nutzerverhaltens auf Energieverluste kann beispielsweise durch die zeitliche Variation der Energieverluste auf Raumebene identifiziert werden – etwa bei ineffizientem

Kipplüften. Eine Veränderung der ermittelten Zeitkonstanten in Abhängigkeit von der Position innerhalb des Gebäudes könnte zudem auf eine unzureichende Dämmung an einer Gebäudeseite hinweisen.

Solche Analysen sollen in weiteren Untersuchungen auf Basis größerer Datenmengen durchgeführt werden. Die beispielhaften Ergebnisse, die im Rahmen des Projekts erzielt wurden, werden im Zuge der Geschäftsentwicklung interessierten Kunden präsentiert. Auf Basis der Kundenrückmeldungen werden detailliertere Anforderungen an den Leistungsumfang des zukünftigen Produkts formuliert.

Zusammenfassend sollen hier die zentralen Frage des Projektes beantwortet werden:

1. Was sind die Anforderungen an die Messdaten (Datentypen (Temp, Feuchte, Luftdruck, Licht, CO₂ Konzentration, Präsenz), Messfrequenz und Messorte) die sich aus den Fragestellungen zur Optimierung ergeben?

Es hat sich gezeigt, dass die Temperaturdaten mit einer 15-Minutigen Erfassung eine sehr gute Basis für die Analyse des Thermischen Verhaltens des Raumes und des Gebäudes darstellen. Sowohl die hohe Sensordichte mit mehr als 100 Sensoren im betrachteten Bürogebäude, als auch die geringe Dichte im Einzelhandelsgebäude lieferten für die jeweilige Anwendung gute Ergebnisse. Soll in Bürogebäuden eine Aussage über das Nutzerverhalten getroffen werden ist eine hohe Sensordichte von 1 Sensor auf ca. 150m² erforderlich. Sind große Flächen der Immobilie nicht durch Räume unterteilt, genügt eine geringe Sensordichte. Daten zu Feuchte, Luftdruck, Licht und CO₂ Konzentration wurden im Rahmen des Projektes noch nicht analysiert.

2. Wie lassen sich Anomalien im Betrieb der Gebäudeleittechnik auf Basis der dezentralen, raumbasierten ML Modelle identifizieren (Analyse eines Inferenzmodells)?

Eine fehlende Nachtabsenkung kann beispielsweise anhand nicht plausibler Temperaturkonstanten identifizieren.

3. Welche Erkenntnisse lassen sich in Hinblick auf die Effizienzsteigerungspotenziale aus den Analyseergebnissen auf Raum- und Gebäudeebene ableiten?

Die ermittelten Zeitkonstanten auf Raum und Gebäudeebene ermöglichen es, den Einfluss des Nutzerverhaltens und den Einfluss der Gebäudehülle voneinander zu trennen. Das Nutzerverhalten spiegelt sich in einer Variation der Zeitkonstanten auf Raumebene wieder.

Über einen längeren Zeitraum betrachtet spiegeln die Grenzwerte der Zeitkonstanten die Qualität der Dämmung und Wärmekapazität der Fassade auf Raumebene wieder. Aufgrund der örtlichen Auflösung mit einer größeren Anzahl von Sensoren kann auf die Qualität der Fassade abhängig von der Himmelsrichtung und der Etage geschlossen werden. Eine derartige Analyse soll in Nachfolgeprojekten erfolgen. Unter Berücksichtigung weiterer Parameter lässt sich zukünftig der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes und somit auch das Einsparpotenzial quantifizieren.

4. Wie kann die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte KI-Basierte Analysefunktion in ein Cloud-basiertes Produkt umgesetzt werden?

Durch Implementierung des vom Fraunhofer ISE entwickelten Algorithmus in enerthings Cloud Lösung konnte der erste Implementierungsschritt umgesetzt werden. Im Rahmen von Nachfolgeprojekten sollen weitere KI-basierte Analysen ergänzt werden.

5. Geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Ergebnisse der Untersuchungen sollen gemeinsam mit dem Unterauftragspartner Fraunhofer ISE veröffentlicht werden. In dieser Veröffentlichung wird entsprechen ein Bezug zu diesem Projekt hergestellt. Enerthing nutzt Veranstaltungen der Immobilienbranche (Real Estate Arena Hannover, Real Proptech Konferenz, Frankfurt) um Teilergebnisse des Projektes zu teilen und das Potenzial des Ansatzes zu demonstrieren.

6. Beitrag zu den zu den förderpolitischen Zielen

Übergeordnete Ziele sind das Erreichen der Netto-Treibhausneutralität bis 2045 und klimaneutrale Erzeugung von 50% der Wärme bis 2030. Neben den Maßnahmen der baulichen Sanierung durch Wärmedämmung und dem Einsatz regenerativer Energiequellen liegt ein hohes Einsparpotenzial von 20-30% in der Optimierung des Gebäudebetriebes mittels Digitalisierung. Dieses Einsparpotenzial soll im Rahmen dieses Mikroprojektes insbesondere beim ineffizienten Gebäudebestand durch die Digitalisierung auf Raumebene zugänglich gemacht werden. Durch Analyse und Weiterverarbeitung der von Raumklima, Luftqualität und Belegungsdaten soll ein optimaler Gebäudebetrieb umgesetzt werden.

Die digitale Optimierung des Gebäudebetriebs setzt derzeit an der zentralen Gebäudesteuerung an. Insbesondere im Bestand handelt es sich größtenteils um nicht vernetzte Heizungs- und Lüftungsanlagen unterschiedlicher Hersteller. Die Extraktion dieser Betriebsdaten stellt oftmals die erste Hürde dar. Für die Optimierung des Betriebs werden abgesehen von der Außentemperatur keine Raumklimadaten oder Belegungsdaten eingesetzt. Somit bleibt ein hohes Potenzial zur Energieeinsparung ungenutzt. Durch Enerthing's wartungsfreie und kabellose Retrofit Funksensorik ist erstmalig eine Lösung für den skalierbaren Retrofit kommerzieller Gebäude vorhanden. Konkurrierende Systeme erfordern langwierige Verkabelung. Funksysteme sind aufgrund der erforderlichen Batteriewechsels in kommerziellen Gebäuden nicht skalierbar. Mit dem von Enerthing implementierten LoRa Funkstandard in Kombination mit einem wartungsfreien Betrieb existiert erstmalig eine einfach zu skalierende Retrofit Lösung für die Digitalisierung des Gebäudebestandes auf Raumbasis. Diese Art von Daten ist zwar in modernen Neubauten verfügbar, im Bestand jedoch durchweg nicht vorhanden. Dies bringt Enerthing gegenüber Wettbewerbern in die Situation relevante Daten für die digitale energetische Optimierung zu erfassen und im Rahmen dieses Mikroprojektes zu analysieren.

7. Fortschreibung des Verwertungsplanes – Verweis auf ein Anschlußvorhaben

a) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Der Ansatz, das energetische Verhalten der Gebäudehülle und auch den Einfluss des Menschen auf den Energieverbrauch (Fensteröffnung/Lüftungsverhalten) auf der Basis von Messdaten zu erfassen ist, insbesondere in einer skalierbaren Umsetzung in Bestandsgebäuden, neu. Aufgrund des bereits vorhandenen Bedarfs der energetischen Bewertung der Gebäudestruktur sehen wir ein großes wirtschaftliches Potential für den erarbeiteten Lösungsansatz. Im Vergleich zu einer klassischen Analyse der Gebäudehülle anhand von Katalogdaten zu den jeweiligen Gebäudekomponenten (U-Werte von Fenstern, Fassade, Dach, etc.) ermöglicht die sensorische Erfassung des Gebäudeverhaltens auch die

reale bauliche Umsetzung (Wärmebrücken) und die Alterung der Komponenten mit zu berücksichtigen. Darüber hinaus erfolgt diese Überwachung kontinuierlich, sodass Verschlechterungen in der Gebäudehülle oder des Nutzerverhaltens sichtbar werden. Insbesondere für die energetische Optimierung eines Immobilienportfolios bestehend aus einer großen Anzahl von mehreren Hundert Gebäuden stellt eine derartige Lösung zur energetischen Bewertung sowohl der Gebäudehülle, als auch des Einflusses des Nutzers auch im kontinuierlichen Gebäudebetrieb eine große Hilfe dar. Die erarbeitete Lösung muss noch in das marktfähige Produkt integriert werden. Eine kommerzielle Nutzung erster wird voraussichtlich für das Ende 2024 anvisiert.

b) Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die erarbeitete Lösung zur Analyse von Temperaturdaten in Bezug auf das energetische Verhalten der Gebäudehülle und auch des Einflusses vom Nutzer kann mit weiteren Anwendern und Instituten genutzt werden. In der Energieberatung kann somit zukünftig anstelle einer aufwändigen vor Ort Erfassung und Berechnung eine sensorische Erfassung des Gebäudes angeboten werden. Auch für die Hersteller von Gebäudematerialien können die Daten für die weitere Produktentwicklung einen hohen Wert darstellen.

c) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Rahmen des Mikroprojektes wurden vielversprechende Grundlagen für eine Weiterentwicklung der Lösung geschaffen. In einem nächsten Schritt müssen die gewonnen und berechneten Daten zum thermischen Gebäudeverhalten gruppiert und analysiert werden.

Insbesondere unter Verwendung von KI-basierter Werkzeuge erwarten wir aus den Daten wertvolle Informationen zu gewinnen. Dies ist z.B. die Abgrenzung des Einflusses der Gebäudehülle vom Einfluss des menschlichen Verhaltens (Fensteröffnung, Dauerheizen) auf den Energieverbrauch. Werden eine Vielzahl von Sensoren eingesetzt, dann ist auch die gezielte Detektion von Schwachstellen in der Gebäudehülle möglich. Diese Art der Analyse muss noch in die Lösung integriert werden. Neben der Beschreibung der Isolierfähigkeit der Gebäudehülle stellt die Wirksamkeit des Wärmeschutzes durch solare Aufheizung im Sommer eine weitere Ausbaustufe dar. Die Erfassung des Ist-Zustandes die Erfassung der historischen Entwicklung der Dämmeigenschaften ist die Grundlage für prädiktive Ansätze. Über die Lebensdauer von Gebäuden können somit besser kostenoptimiert die entsprechenden Maßnahmen zur Sanierung umgesetzt werden.

Zusammenfassend sehen wir ein sehr hohes Potenzial für die wissenschaftliche und wirtschaftliche Entschlussfähigkeit.