

SECAI – Sustainable heating through Edge-Cloud-based AI systems

KI-gestützte Heizungsoptimierung
im Gebäudebestand:
Potenziale, Umsetzung und Wirkung



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Vorwort

Dieses Whitepaper gibt einen strukturierten Überblick über das Forschungsprojekt SECAI (Sustainable heating through Edge-Cloud-based AI systems) und dessen zentrale Erkenntnisse im Kontext der energieeffizienten Wärmeversorgung im Gebäudesektor. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie sich durch den Einsatz datengetriebener Technologien, insbesondere Künstlicher Intelligenz, reale Energieeinsparungen im Gebäudebestand erzielen lassen. Dabei werden sowohl technische Lösungsansätze als auch nutzerzentrierte Perspektiven berücksichtigt. Ziel ist es, die Potenziale, Herausforderungen und Erfolgsfaktoren intelligenter Heizsysteme aufzuzeigen und daraus übertragbare Erkenntnisse für die Praxis abzuleiten.

SECAI ist Teil des Technologieprogramms „Edge Datenwirtschaft“, das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert wird. Ziel des Programms ist es, innovative Datenökosysteme zu fördern, in denen Daten nicht ausschließlich zentral verarbeitet werden, sondern auch dezentral am Ort ihrer Entstehung. Dieser sogenannte Edge-Ansatz ermöglicht es, Daten effizienter zu nutzen, Latenzen zu reduzieren und gleichzeitig hohe Anforderungen an Datenschutz und Datensouveränität zu erfüllen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt SECAI ein Edge-Cloud-basiertes System zur KI-gestützten Heizungssteuerung in Mehrfamilienhäusern. Ziel ist es, den tatsächlichen Wärmebedarf präzise zu bestimmen und die Wärmeerzeugung entsprechend zu optimieren. Durch die Kombination aus lokaler Datenverarbeitung in den Wohnungen und übergreifender Analyse auf Gebäude- und Bestandsebene entsteht ein neuartiger Ansatz, der sowohl Energieverbrauch als auch CO₂-Emissionen signifikant reduzieren kann. Damit steht SECAI exemplarisch für eine neue Generation datengetriebener Anwendungen, die ökologische und ökonomische Ziele miteinander verbinden und gleichzeitig die Anforderungen eines sensiblen Anwendungsfeldes wie dem Wohnen berücksichtigen.

Autoren



Dr. Florian Remark
Strategion GmbH
Konsortialführer



Simon Binz
Strategion GmbH
Entwicklung KI-Architektur



Birgid Eberhardt
GSW Sigmaringen
Konzept für die Wohnungswirtschaft



Annette Hoppe
GSW Sigmaringen
Konzept für die Wohnungswirtschaft



Michael Jüdiges
wibutler
Smart-Heating-Konzept



Patrick Toddenroth
wibutler
Gebäudeautomatisierung



Dr. Maximilian Lowin
Goethe-Universität Frankfurt am Main
Erstellung Nudging-Konzept



Dr. Cristina Mihale Wilson
Goethe-Universität Frankfurt am Main
Durchführung Nudging-Studie



Dr. Simon Pukrop
DFKI – Smart Enterprise Engineering
Federated Learning und Datenschutzkonzept

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Autoren	3
1 Herausforderungen und Potenziale beim Heizen	5
2 Der SECAI-Ansatz: Intelligente Heizungssteuerung im Gebäudebestand....	7
2.1 Technische Grundlage der SECAI-Architektur	7
2.2 Dezentrales Lernen: Federated Learning im SECAI-System	8
2.3 KI-gestützte Heizoptimierung: Services und Anwendungslogik	9
2.4 Nudging als Brücke zwischen Technologie und Verhalten.....	11
3 Wirkung und Akzeptanz des SECAI-Ansatzes.....	13
3.1 Was Nutzende wirklich motiviert: Ergebnisse der Nutzerstudie	13
3.2 Energieeinsparung durch KI-gestützte Heizungssteuerung	16
4 Die Mieter-App als zentrales Artefakt: Umsetzung und Evaluation	18
4.1 Konzeption als Synthese theoretischer und empirischer Erkenntnisse	19
4.2 Funktionale Umsetzung der Wirkmechanismen in der App.....	19
4.3 Evaluation des App-Konzepts im Rahmen einer Studie	20
4.4 Einordnung in den SECAI-Ansatz	21
5 Erfolgsfaktoren	22

1 Herausforderungen und Potenziale beim Heizen

Die Transformation des Wärmesektors gehört zu den zentralen Herausforderungen auf dem Weg zu mehr Energieeffizienz und Klimaschutz. Ein besonders relevanter Hebel liegt im Gebäudebestand, denn ein erheblicher Anteil des Endenergieverbrauchs entfällt auf das Heizen privater Haushalte. Allein dieser Bereich macht rund 17 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs¹ aus und verdeutlicht damit die große ökologische Bedeutung effizienter Heizlösungen. Gleichzeitig entsteht hier ein enormes, bislang nur teilweise gehobenes Einsparpotenzial, das sowohl zur Reduktion von Emissionen als auch zur Entlastung von Energiesystemen beitragen kann.

Neben der ökologischen Dimension gewinnt auch die ökonomische Motivation zunehmend an Bedeutung. Steigende Energiepreise und regulatorische Anforderungen erhöhen den Druck auf die Wohnungswirtschaft, bestehende Gebäude zu modernisieren und effizienter zu betreiben. Für die Wohnungswirtschaft geht es dabei nicht nur um die Einhaltung von Vorgaben, sondern auch um wirtschaftliche Vorteile durch reduzierte Betriebskosten und eine langfristige Wertstabilität ihrer Immobilien. Gleichzeitig zeigt sich auf Seiten der Mietenden ein klares Bild. Eine große Mehrheit empfindet die Senkung der Heizkosten als wichtig oder sehr wichtig. In Befragungen liegt dieser Anteil bei über 80 Prozent. Damit ist die finanzielle Motivation ein zentraler Treiber für Veränderungen im Heizverhalten.

Wichtigkeit der Heizkostensenkung

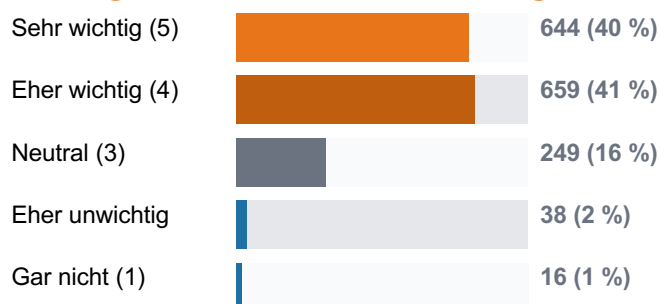


Abbildung 1: Skala 1–5; 81 % empfinden Heizkostensenkung als wichtig oder sehr wichtig².

Auch aus Nutzersicht sind die Voraussetzungen für neue Lösungen vielversprechend. Eine im Projekt erhobene Studie² zeigt, dass ein signifikanter Anteil der Mietenden grundsätzliches Interesse an intelligenten Heizlösungen hat, auch wenn diese bislang nur in einem kleinen Teil der Haushalte tatsächlich eingesetzt werden. Gleichzeitig besteht eine deutliche Lücke zwischen dem Wunsch nach Einsparungen und dem tatsächlichen Verhalten. Viele Menschen regulieren ihre Heizung regelmäßig manuell, ohne dass dies zu einem effizienten Betrieb führt. Dieses Spannungsfeld zwischen hoher Motivation und begrenzter Umsetzung ist ein zentraler Ausgangspunkt für innovative Ansätze.

¹ Umweltbundesamt, Energieverbrauch privater Haushalte, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#hchster-anteil-am-energieverbrauch-zum-heizen>, abgerufen am 11.05.2026

² Mihale-Wilson, Cristina, and Maximilian Lowin. "One Size Doesn't Fit All: User-Centered Design for AI-Driven Smart Heating Solutions—Bridging Sustainability, Acceptance, and Digital Inclusion." *INFORMATIK 2025*. Gesellschaft für Informatik eV, 2025.

Parallel befinden sich technologische Möglichkeiten in der Entwicklung, die eine datenbasierte, vorausschauende Steuerung von Heizprozessen ermöglichen sollen. Durch die Kombination aus lokaler Datenverarbeitung in den Wohnungen und zentraler Analyse lassen sich zukünftig sowohl individuelle Bedürfnisse berücksichtigen als auch gebäudeübergreifende Optimierungen realisieren. Damit sind erstmals die Voraussetzungen gegeben, Heizsysteme nicht nur digital auszustatten, sondern aktiv und bedarfsgerecht zu steuern.

Trotz dieser günstigen Ausgangslage existieren bislang kaum einsetzbare oder gar skalierbare Lösungen für die Wohnungswirtschaft. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Technische Heterogenität, fehlende Standardisierung und die oftmals begrenzte Digitalisierung bestehender Anlagen im zentralen Heizungskeller erschweren eine flächendeckende Umsetzung. Hinzu kommen hohe Anforderungen an Datenschutz und Datensouveränität, die insbesondere im privaten Wohnumfeld eine zentrale Rolle spielen. Auch organisatorische Herausforderungen innerhalb der Wohnungswirtschaft sowie die Einbindung der Mietenden können erhebliche Hürden darstellen.

SECAI setzt genau an dieser Stelle an. Der im Projekt entwickelte Ansatz verbindet technologische Innovation mit den Anforderungen des Mietmarktes und den Bedürfnissen der Nutzenden. Es wurde ein System entwickelt, das Energieeinsparungen ermöglicht, ohne zusätzliche Komplexität oder Verhaltensänderungen zu erzwingen. Erste Ergebnisse zeigen, dass durch eine bedarfsgeführte und datenbasierte Steuerung signifikante Einsparpotenziale realisiert werden können. Damit liefert SECAI einen vielversprechenden Ansatz, um ökologische und ökonomische Ziele im Wärmesektor gleichzeitig zu erreichen.

2 Der SECAI-Ansatz: Intelligente Heizungssteuerung im Gebäudebestand

SECAI verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung von Heizsystemen in Mehrfamilienhäusern. Im Zentrum steht die Idee, Heizen nicht länger isoliert auf Ebene einzelner Wohnungen oder technischer Komponenten zu betrachten, sondern als vernetztes System aus Gebäudetechnik, Nutzungsverhalten und datengetriebenen Services. Ziel ist es, den tatsächlichen Wärmebedarf präzise zu erfassen und die Bereitstellung von Wärme dynamisch daran anzupassen. Dabei verbindet SECAI technologische Innovation mit einem klar nutzerzentrierten Ansatz.

2.1 Technische Grundlage der SECAI-Architektur

Die technische Grundlage von SECAI bildet eine mehrstufige Architektur, die sich über vier verschiedene Ebenen erstreckt. Auf der untersten Ebene, der Nano-Ebene, befinden sich Sensoren und Aktoren innerhalb der Wohnungen. Konkret wird jeder Raum mit digitalen Thermostaten sowie Sensoren zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ausgestattet. Diese erfassen kontinuierlich den aktuellen Zustand der Raumumgebung und ermöglichen gleichzeitig eine direkte, dezentrale Steuerung der Heizkörper.

Auf Wohnungsebene, der Mikro-Ebene, werden diese Daten durch ein lokales System gebündelt und vorverarbeitet. Dieses sogenannte Edge-System übernimmt zentrale Aufgaben der Datenverarbeitung direkt vor Ort. Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass sensible Daten die Wohnung nicht verlassen. Gleichzeitig bleibt das System auch bei temporärer Trennung vom Internet funktionsfähig, da wesentliche Steuerungslogiken lokal ausgeführt werden. Auf dieser Ebene werden zudem erste Modelle zur Bestimmung des individuellen Wärmebedarfs der jeweiligen Wohnung berechnet und damit die Rechenlast verteilt.

Auf Gebäudeebene, der Meso-Ebene, werden schließlich Informationen aus mehreren Wohnungen zusammengeführt, um Zusammenhänge zwischen einzelnen Nutzungseinheiten zu berücksichtigen. Beispielsweise können Wechselwirkungen wie Wärmeübertragungen zwischen Wohnungen oder unterschiedliche Nutzungsprofile berücksichtigt werden. Darüber hinaus besteht eine direkte Anbindung an die zentrale Heizungsanlage des Gebäudes über eine entsprechende Schnittstelle. Durch das Schließen des Regelkreises kann in Echtzeit auf die Regelung der Anlage zugegriffen und insbesondere die Heizkurvenparameter dynamisch angepasst werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Wärmeerzeugung nicht mehr nur auf statischen Annahmen basiert, sondern kontinuierlich an den tatsächlichen Bedarf im Gebäude angepasst wird.

Auf einer übergeordneten Ebene, der Makro-Ebene, können schließlich Erkenntnisse aus mehreren Gebäuden zusammengeführt werden, um allgemeine Muster zu identifizieren und systematisch zu nutzen. Diese Aggregation, etwa über eine Cloud-Infrastruktur, ermöglicht es, Optimierungsstrategien zu verallgemeinern und auf weitere Gebäude zu übertragen, wodurch Wohnungsunternehmen mit einer Vielzahl an Gebäuden Skaleneffekte im Betrieb und bei der Weiterentwicklung der Systeme entstehen.

2.2 Dezentrales Lernen: Federated Learning im SECAI-System

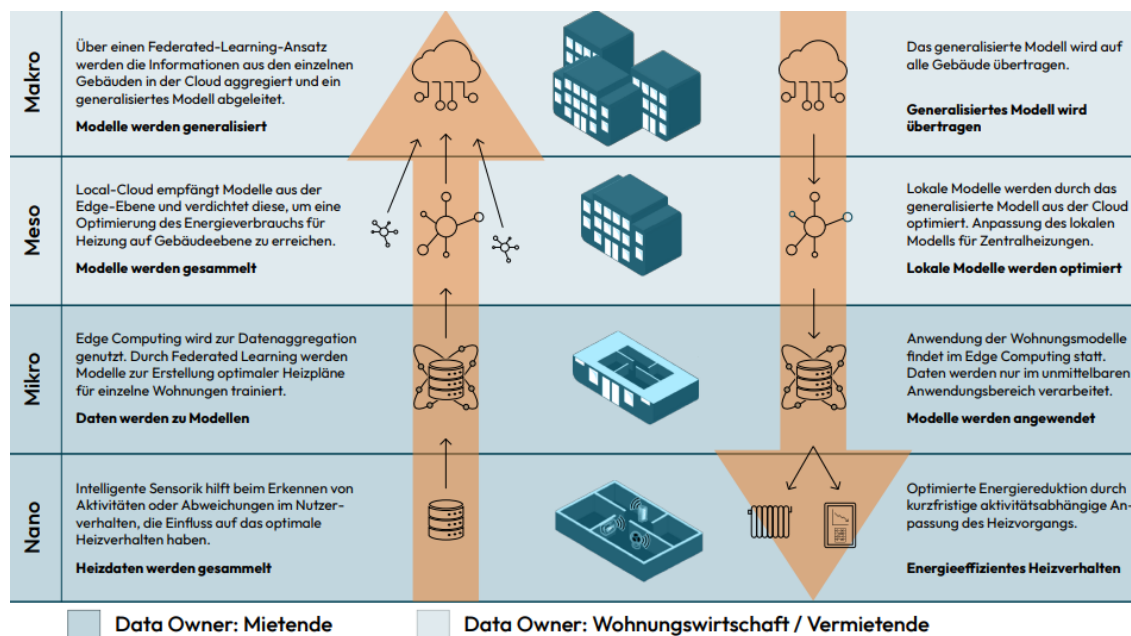


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Federated-Learning-Ansatzes in SECAI³. Lokale Modelle werden auf Edge-Ebene trainiert und über mehrere Ebenen hinweg aggregiert, ohne dass Rohdaten die Wohnungen verlassen.

SECAI orientiert sich konzeptionell an Prinzipien des Federated Learning, einem Ansatz des maschinellen Lernens, bei dem KI-Modelle direkt bei den jeweiligen Datenquellen trainiert werden, ohne dass die Daten zentral zusammengeführt werden müssen. Es werden dabei lediglich abstrahierte Informationen oder Modellparameter für übergreifende Optimierungen bereitgestellt, nachdem eine initiale Verarbeitung dezentral stattgefunden hat. Dadurch, dass ausschließlich Modellparameter zentral verarbeitet werden, die keinerlei Rückschlüsse auf das Verhalten und die Gewohnheiten von Mietenden zulassen, lassen sich Datenschutzerfordernisse besser berücksichtigen und Erkenntnisse über mehrere Einheiten hinweg dennoch nutzbar machen.

Im Kontext intelligenter Heizsysteme bietet dieser KI-Ansatz gleich mehrere Vorteile. Für eine präzise Bestimmung des tatsächlichen Wärmebedarfs einer Wohnung ist die kontinuierliche Auswertung hochaufgelöster Sensordaten entscheidend, beispielsweise von Raumtemperaturen, Luftfeuchtigkeit oder Nutzungs- und Heizmustern. Gleichzeitig handelt es sich dabei um sensible Informationen, aus denen potenziell Rückschlüsse auf Anwesenheit, Tagesabläufe oder Nutzungsverhalten gezogen werden könnten. Da die Privatsphäre im eigenen Wohnraum besonders schützenswert ist, gleichzeitig aber eine hohe Verbreitung des Systems für eine möglichst hohe Energieeinsparrate wichtig ist, verfolgt SECAI das Ziel, wohnungsbezogene Daten möglichst früh zu aggregieren und nur abstrahierte Informationen für weiterführende Optimierungen auf Gebäudeebene bereitzustellen. Statt detaillierter Einzelwerte werden beispielsweise aggregierte Wärmebedarfsinformationen genutzt, wodurch die Aussagekraft der Daten für technische Optimierungen erhalten bleibt, ohne sämtliche Rohinformationen zentral verfügbar zu machen.

³ Kortum, Henrik, et al. "SECAI—Sustainable Heating through Edge-Cloud-based AI Systems." *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 60.4 (2023): 850-871.

Die Umsetzung eines vollständig dezentralen Federated-Learning-Ansatzes bringt im Gebäudekontext jedoch praktische Herausforderungen mit sich. Insbesondere die Verarbeitung komplexer KI-Modelle direkt auf den lokalen Edge-Geräten ist aufgrund begrenzter Hardware-Ressourcen sowie der hohen Anforderungen an Stabilität und Echtzeitfähigkeit nur eingeschränkt möglich. Die eingesetzten Systeme müssen gleichzeitig Sensordaten erfassen, die lokale Steuerung der Heizkörper gewährleisten und zuverlässig im laufenden Betrieb funktionieren. Vor allem im Bestand mit heterogener Infrastruktur ergeben sich daraus erhöhte Anforderungen an Robustheit und Wartbarkeit.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde der zugrunde liegende Ansatz konzeptionell und methodisch weiterentwickelt. Zur Ermöglichung einer zeitnahen prototypischen Erprobung sowie zur Ausschöpfung erweiterter Rechenkapazitäten wurde der intendierte dezentrale Verarbeitungsansatz in einer initialen Implementierungsphase über eine Cloud-basierte Infrastruktur abgebildet. Hierbei erfolgte die Verarbeitung der Daten, auf Grundlage der ausdrücklichen Zustimmung der beteiligten Mietparteien, in einer logisch dezentralisierten Struktur innerhalb der Cloud-Umgebung.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, erfolgt die Verarbeitung weiterhin entlang der mehrstufigen SECAI-Architektur. Auf der Nano-Ebene werden kontinuierlich Heiz- und Nutzungsdaten innerhalb der Wohnungen erfasst. Diese Informationen werden auf der Mikro-Ebene zu wohnungsbezogenen Modellen und aggregierten Wärmebedarfswerten verarbeitet, die beispielsweise als Grundlage für individuelle Heizempfehlungen dienen. Auf Gebäudeebene werden diese Informationen anschließend zusammengeführt, um gebäudespezifische Optimierungen der Wärmeherzeugung zu ermöglichen. Über mehrere Gebäude hinweg können daraus zusätzlich übergreifende Muster und Optimierungsstrategien abgeleitet werden.

Durch diesen Ansatz verbindet SECAI datengetriebene Optimierung mit den Anforderungen des Wohnungsmarktes. Gleichzeitig zeigen die Projekterfahrungen, dass insbesondere hybride Architekturen, die lokale Vorverarbeitung mit zentralen KI-Komponenten kombinieren, derzeit einen praktikablen Weg darstellen, um leistungsfähige und datenschutzfreundliche Heizsysteme im Gebäudebestand umzusetzen.

2.3 KI-gestützte Heizoptimierung: Services und Anwendungslogik

Auf Basis dieser Architektur ermöglicht SECAI eine grundlegende Veränderung der Heizungssteuerung. Klassische Systeme orientieren sich primär an statischen Parametern wie Außentemperaturen oder festen Heizkurven. Der tatsächliche Bedarf innerhalb eines Gebäudes, anhand realer Verbrauchsdaten, wird dabei nur unzureichend berücksichtigt.

SECAI setzt hingegen auf eine bedarfsorientierte Steuerung. Durch die kontinuierliche Analyse von Nutzungsdaten, Umgebungsbedingungen und Gebäudeeigenschaften wird der reale Wärmebedarf dynamisch ermittelt. Auf dieser Grundlage können Vorschläge für Heizprofile erstellt werden, die sowohl auf Ebene einzelner Wohnungen als auch für das gesamte Gebäude optimiert sind. Diese Anpassungen erfolgen nicht statisch, sondern reagieren laufend auf Veränderungen im Verhalten oder in den äußeren Bedingungen.

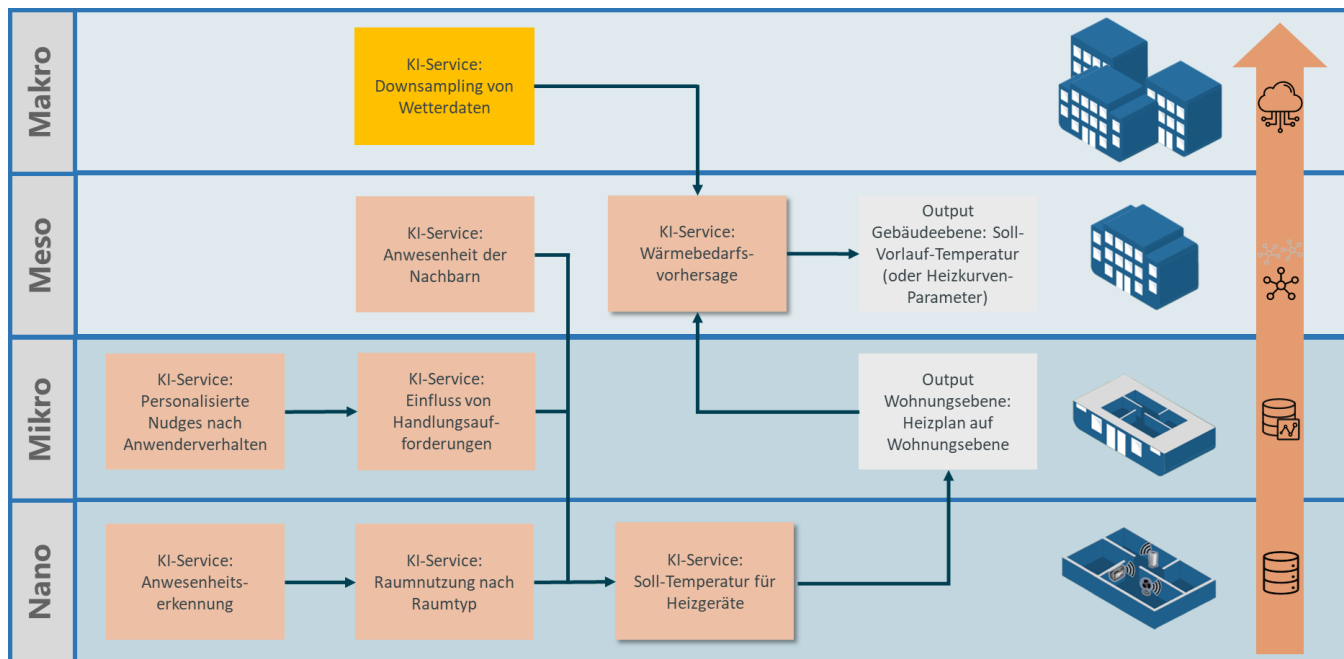


Abbildung 3: Übersicht der KI-Services entlang der vier Ebenen der SECAI-Architektur. Die Abbildung zeigt, wie KI-Services und deren Outputs auf Raum-, Wohnungs-, Gebäude- und Bestandsebene miteinander interagieren und gemeinsam zur Erstellung individueller Heizpläne sowie zur gebäudeweiten Wärmebedarfsvorhersage beitragen.

Darüber hinaus bildet diese Datenbasis die Grundlage für weiterführende KI-Services, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die KI-Services folgen der mehrstufigen Logik der SECAI-Architektur und bauen systematisch aufeinander auf. Auf der Nano-Ebene beginnt die Verarbeitung mit einer Anwesenheitserkennung, durch die festgestellt wird, ob sich Personen in einem Raum aufhalten. Darauf aufbauend wird die Raumnutzung nach Raumtyp modelliert, sodass beispielsweise zwischen Wohn-, Schlaf- oder Arbeitsräumen unterschieden werden kann. Ergänzend wird eine Soll-Temperatur für Heizgeräte berechnet, die den aktuellen Nutzungskontext berücksichtigt. Auf der Mikro-Ebene werden diese Informationen weiterverarbeitet. Hier kommen personalisierte Handlungsempfehlungen, sogenannte Nudges (vgl. Kapitel 2.4), auf Basis des Anwenderverhaltens zum Einsatz, die auf individuelle Gewohnheiten abgestimmt sind sowie Modelle zum Einfluss von Handlungsaufforderungen, die untersuchen, wie Nutzende auf Empfehlungen reagieren.

Die einzelnen Services folgen dabei einer modularen Bausteinlogik. Je nach Datenverfügbarkeit und Anwendungsfall können unterschiedliche Ausprägungen dieser Bausteine genutzt werden. So ist es möglich, für einzelne Komponenten spezifische KI-Modelle zu trainieren, wenn ausreichend Daten vorliegen. Alternativ können vereinfachte Annahmen oder heuristische Regeln eingesetzt werden, um auch bei begrenzter Datenlage funktionsfähige Lösungen bereitzustellen. In Szenarien mit entsprechender Zustimmung der Nutzenden können zudem aktuelle Echtzeitdaten direkt in die Modelle einfließen und so eine besonders präzise und adaptive Steuerung ermöglichen. Diese flexible Kombination aus datengetriebenen und regelbasierten Ansätzen erlaubt eine schrittweise Skalierung und Anpassung des Systems an unterschiedliche technische und regulatorische Rahmenbedingungen. Das zentrale Ergebnis auf dieser Ebene ist der Heizplan auf Wohnungsebene, der als konkreter Steuerungsausgang dient und festlegt, wann und wie stark einzelne Räume beheizt werden sollen.

Auf Gebäudeebene wird die Perspektive erweitert und die Daten mehrerer Wohnungen zusammengeführt. Hier fließt unter anderem der KI-Service zur Berücksichtigung der Anwesenheit der

Nachbarn ein, um Wechselwirkungen zwischen Wohnungen abzubilden. Der zentrale Service dieser Ebene ist die Wärmebedarfsvorhersage, die auf Basis der aggregierten Daten ein dynamisches Modell des gesamten Gebäudes erstellt. Dieses Modell prognostiziert den tatsächlichen Wärmebedarf und bildet die Grundlage für die Optimierung der zentralen Heizungsanlage. Auf Makro-Ebene werden zusätzlich externe Einflussfaktoren integriert, beispielsweise durch das Downsampling von Wetterdaten, um relevante Umweltinformationen effizient in die Modelle einzubinden. Das Ergebnis dieser mehrstufigen Verarbeitung ist ein zentraler Steuerungsimpuls auf Gebäudeebene: die Anpassung der Soll-Vorlauftemperatur beziehungsweise der Heizkurvenparameter. Diese werden kontinuierlich auf Basis des lernenden Gebäudemodells optimiert, sodass die Wärmeerzeugung exakt an den realen Bedarf angepasst werden kann.

2.4 Nudging als Brücke zwischen Technologie und Verhalten

Ein wesentliches Merkmal des SECAI-Ansatzes ist die Einbeziehung der Nutzenden. Technologische Optimierung allein reicht nicht aus, um das volle Einsparpotenzial zu realisieren. Ein erheblicher Anteil des Energieverbrauchs wird durch individuelles Verhalten und individuelle Präferenzen beeinflusst.

SECAI integriert daher gezielt Mechanismen zur Verhaltensbeeinflussung, sogenannte Nudges. Dabei handelt es sich um Ansätze, die Nutzende zu energieeffizientem Verhalten anregen, ohne ihre Entscheidungsfreiheit einzuschränken. Diese Impulse können sowohl analog, etwa in Form von Flyern oder Aushängen, als auch digital implementiert werden. In SECAI werden beide Ansätze verfolgt: Leicht verständliche Materialien vermitteln analoge Impulse zum richtigen Heizen, während digitale Impulse über Schnittstellen bereitgestellt werden und auf individuellen Nutzungsmustern sowie berechneten Optimierungspotenzialen basieren.

Im Kontext von SECAI wurden diese Mechanismen systematisch untersucht. In standardisierten Online-Studien mit 1606 Teilnehmenden wurden Akzeptanzfaktoren, Systemanforderungen und insbesondere Nudging-Potenziale für KI-gestützte Heizsysteme analysiert. Ziel war es zu verstehen, welche Arten von Empfehlungen tatsächlich zu Verhaltensänderungen führen und unter welchen Bedingungen diese von Nutzenden akzeptiert werden.



Abbildung 4: Nudging durch das SECAI-Interaktionssystem

Im Projekt wurden fünf Nudging-Strategien als besonders sinnvoll für den Anwendungsfall intelligenter Heizungssteuerung erachtet: Feedback, Social Norms, Defaults, Framing und Goal-Setting. Dabei zeigte sich, dass deren potenzielle Wirkung stark vom Anwendungskontext, von den Persönlichkeitsmerkmalen der Nutzenden sowie davon abhängt, ob die Heizkosten von den Bewohnenden selbst getragen werden. Insbesondere im Mietkontext, in dem finanzielle Anreize nicht immer unmittelbar oder vollständig bei den Mietenden ankommen, ist davon auszugehen, dass nicht-monetäre Nudges allein nur begrenzte Wirkung entfalten. Für SECAI ergab sich daraus die Anforderung, Nudging nicht isoliert als rein kommunikative Maßnahme zu verstehen, sondern eng mit konkreten Steuerungsfunktionen, individuellen Verbrauchsinformationen und nachvollziehbaren Einsparpotenzialen zu verknüpfen.

Darauf aufbauend werden im Projekt konkrete Nudging-Methoden umgesetzt und hinsichtlich ihrer Wirkung auf Energieeinsparungen untersucht. Über ein speziell entwickeltes Interaktionssystem werden verschiedene Formen von Nudges direkt an Endnutzende ausgespielt. Dazu zählen optimierte, an das individuelle Verhalten angepasste Heizpläne sowie voreingestellte Heizpläne als einfache Einstiegslösung. Ergänzend werden kontextbezogene Hinweise bereitgestellt, beispielsweise Nachrichten bei dauerhaft hohen Raumtemperaturen von über 24 Grad, Hinweise bei fehlender Nachtabsenkung oder Benachrichtigungen, wenn ein ineffizientes Verhalten wie Heizen bei geöffnetem Fenster erkannt wird.

3 Wirkung und Akzeptanz des SECAI-Ansatzes

3.1 Was Nutzende wirklich motiviert: Ergebnisse der Nutzerstudie

Die Ergebnisse einer Nutzerstudie² zeigen zunächst ein deutliches Spannungsfeld zwischen hoher Motivation zur Energieeinsparung und ineffizientem tatsächlichem Verhalten. So geben 81 % der befragten Mietenden an, dass ihnen die Senkung der Heizkosten wichtig oder sehr wichtig ist, gleichzeitig regulieren jedoch über die Hälfte ihre Heizung täglich oder sogar mehrmals täglich manuell. Dieses Verhalten deutet auf fehlende Automatisierung und ineffiziente Steuerungslogiken hin. Ergänzend informieren sich 56 % der Befragten selten oder nie aktiv über optimales Heizen, während gleichzeitig nur rund ein Drittel mit der Energieeffizienz ihrer Wohnsituation zufrieden ist. Insgesamt zeigt sich damit eine klare „Intention-Behavior-Gap“, also eine Lücke zwischen dem Wunsch nach Einsparung und der tatsächlichen Umsetzung im Alltag.

Wichtigkeit der Heizkostensenkung

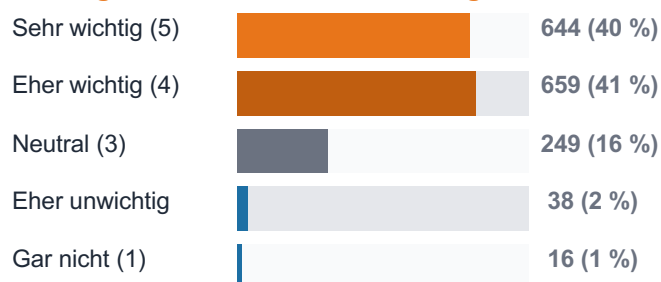


Abbildung 5: Skala 1–5; 81 % empfinden Heizkostensenkung als wichtig oder sehr wichtig.

Manuelle Temperaturregulierung

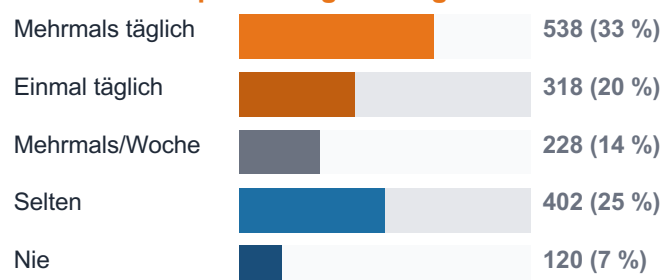


Abbildung 6: 53 % regulieren täglich oder mehrmals täglich manuell.

Ein weiterer zentraler Befund betrifft die strukturellen Rahmenbedingungen im Mietmarkt. Die große Mehrheit der Haushalte verfügt über keine zentrale Heizungssteuerung und steuert ihre Heizkörper einzeln². Gleichzeitig ist die Verbreitung von Smart-Home-Technologien mit lediglich 13,7 % gering, obwohl 36,9 % grundsätzliches Interesse daran zeigen. Diese Kombination aus geringer Ausstattung und latentem Interesse deutet darauf hin, dass kein Akzeptanzproblem vorliegt, sondern vielmehr eine Umsetzungslücke besteht. Hinzu kommt eine geringe Investitionsbereitschaft, die eng mit der Einkommensstruktur der Stichprobe zusammenhängt. Daraus ergibt sich eine klare Implikation für die Skalierung: Lösungen müssen einfach nachrüstbar, kostengünstig und idealerweise über die Wohnungswirtschaft verteilbar sein.

Smart-Home-Ausstattung heute

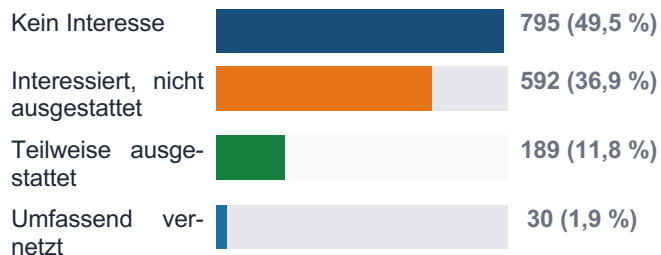


Abbildung 7: Smart-Home-Ausstattungsgrad (n = 1.606). Nur 13,7 % sind ausgestattet, 36,9 % sind interessiert.

Investitionsbereitschaft

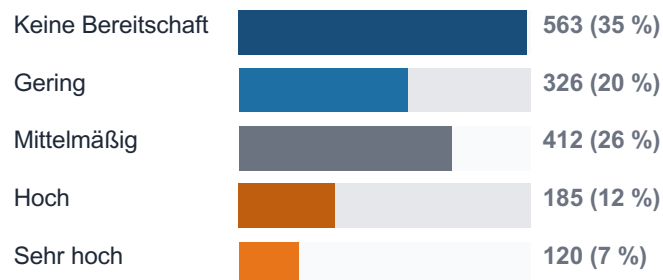


Abbildung 8: 55 % zeigen geringe oder keine Investitionsbereitschaft.

Im Hinblick auf Systemdesign und Nutzerinteraktion zeigen die Ergebnisse ein konsistentes Präferenzmuster. Der wichtigste Treiber für Akzeptanz ist die konkrete Kosteneinsparung, gefolgt von Zuverlässigkeit, Transparenz und Komfort². Besonders hervorzuheben ist die Präferenz für hybride Steuerungsmodelle: 47 % der Befragten wünschen sich eine Kombination aus automatischer Optimierung und jederzeit möglicher manueller Kontrolle. Dieses sogenannte Kontrollparadox zeigt, dass Automatisierung nur dann akzeptiert wird, wenn Nutzende das Gefühl behalten, eingreifen zu können. Parallel dazu wird deutlich, dass Empfehlungen nicht nur gegeben, sondern erklärt werden müssen: 54 % bevorzugen detaillierte Begründungen. Transparenz ist somit kein optionales Feature, sondern eine zentrale Voraussetzung für Akzeptanz.

Steuerungsmodell-Präferenz

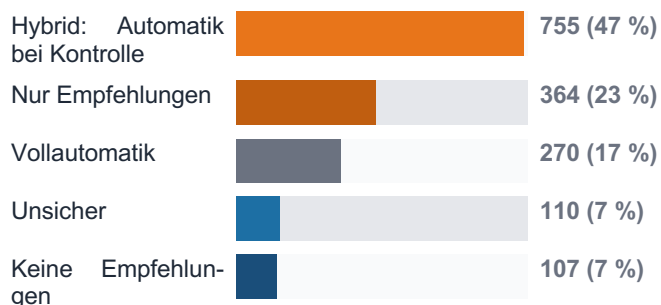


Abbildung 9: Steuerungspräferenz. Das Hybrid-Modell dominiert altersgruppenübergreifend.

Präferierter Empfehlungsstil

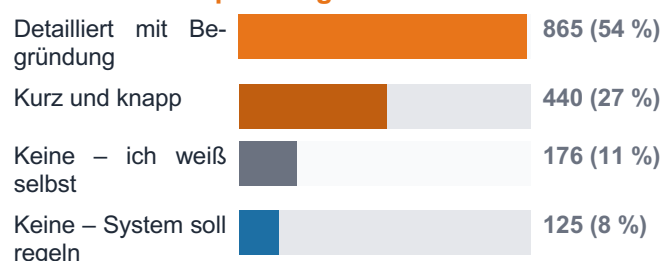


Abbildung 10: 54 % präferieren detaillierte Begründungen; zusammen 81 % möchten irgendeinen Empfehlungstyp.

Die Analyse der Nudging-Potenziale liefert besonders klare und handlungsrelevante Ergebnisse. Finanzielle Anreize in Form von konkreten Einsparungen stellen mit Abstand den stärksten Verhaltenshebel dar². Botschaften wie „Spare bis zu 20 % Heizkosten“ erzielen die höchsten Zustimmungswerte und wirken über alle Zielgruppen hinweg stabil. Demgegenüber schneiden klassische Nudging-Ansätze wie sozialer Vergleich oder CO₂-basierte Argumentation deutlich schwächer ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Heizverhalten als privates Verhalten wahrgenommen wird und kaum soziale Sichtbarkeit besitzt. Auch langfristige Einsparungen sind weniger wirksam als kurzfristige, unmittelbar verständliche Vorteile, was auf einen starken Gegenwartsfokus der Nutzenden hinweist.

Botschaft	Ø	Wirkung	Einordnung & Zielgruppe
Wenn du die Heizung auf 23 °C einstellst, steigen Kosten um 15 %	3,26		<i>Loss Framing direkt. Entgegen klassischer Prospect Theory kein klarer Vorteil gegenüber Gain Framing. Vorsichtig einsetzen.</i>
Mit der täglichen Energiespar-Challenge entwickelst du eine Routine	3,22		<i>Gamification. Mittelmäßig; nur bei 18- bis 34-Jährigen (Ø 3,06 – 3,28) relativ besser. Nicht als Massenansatz.</i>
Wenn du die Temperatur um 1 °C reduzierst, sinkt dein CO ₂ -Ausstoß um 200 kg/Jahr	3,20		<i>CO₂-Framing. Schwächer als finanzielle Argumente. Klimabewusste Gruppe reagiert deutlich besser (Ø 3,34 gegenüber Ø 2,46 bei Skeptikern).</i>
Wenn du weiter so heizt, könnten Kosten unnötig steigen	3,19		<i>Implizites Loss Framing. Kaum Vorteil gegenüber Gain Framing. Kann als Warnung irritieren.</i>
Indem du jetzt die Temperatur senkst, trägst du zum Klimaschutz bei	3,12		<i>CO₂-Appell mit Handlungsaufforderung. Besser als reines CO₂-Framing, aber immer noch deutlich unter finanziellen Botschaften.</i>
Setze Temperatur auf 19 °C (Empfehlung)	3,02		<i>Blanke Empfehlung ohne Begründung. Wirkt am schwächsten unter den aktionsbezogenen Nudges. Nie ohne Kontext verwenden.</i>
80 % der Haushalte in deiner Stadt nutzen Energieprogramme	2,66		<i>Social Proof. Konsistent schwächster Nudge über alle Altersgruppen (Ø 2,49 – 2,80). Heizen ist privat, nicht sozial sichtbar. Nicht einsetzen.</i>

Abbildung 11: Nudging-Ranking nach Motivationskraft (Ø 1–5; 5 = sehr motivierend; n = 1.606)². Farbgebung: Orange = hoch wirksam, Grau = mittel, Blau = schwach.

Zusätzlich zeigen sich differenzierte Effekte zwischen Zielgruppen. Während finanzielle Argumente universell wirken, gewinnen Komfortargumente insbesondere bei älteren Nutzenden an Bedeutung. Gamification hingegen zeigt insgesamt nur begrenzte Wirkung und eignet sich eher als optionales Zusatzfeature für jüngere Zielgruppen. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass erfolgreiche Verhaltensinterventionen im Heizkontext stark auf unmittelbaren, individuellen Nutzen ausgerichtet sein müssen und weniger auf abstrakte oder soziale Argumentationslinien setzen sollten.

3.2 Energieeinsparung durch KI-gestützte Heizungssteuerung

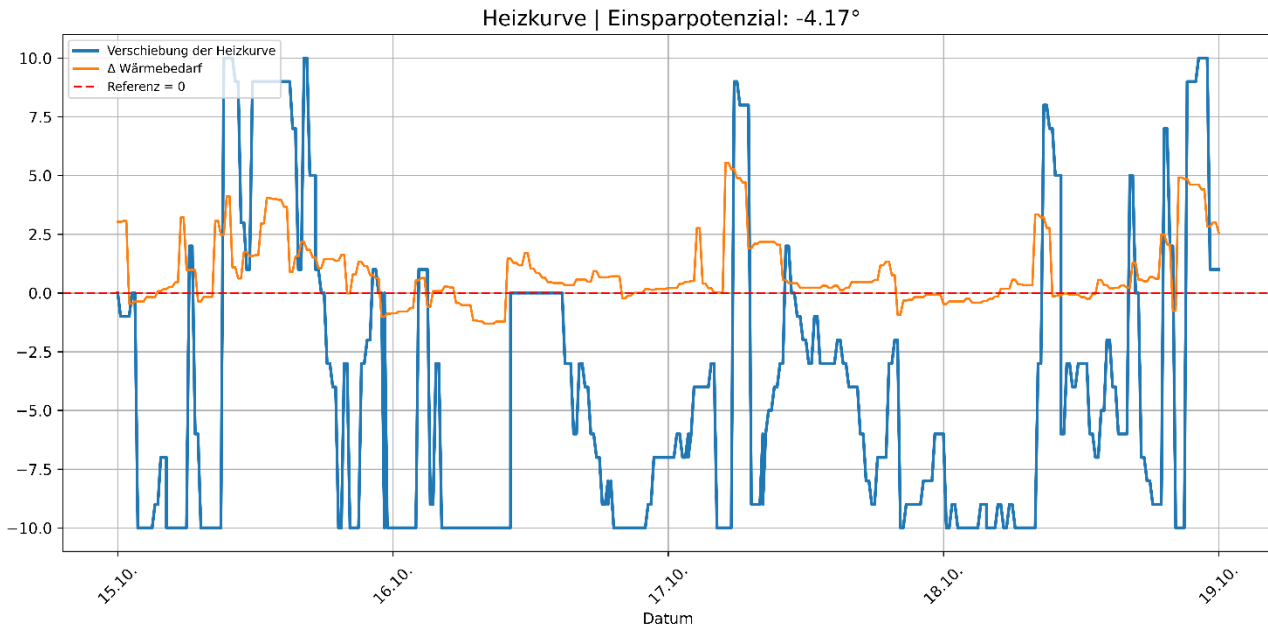


Abbildung 12: Reduktion der Vorlauftemperatur in SECAI. In Blau: Verschiebung der Soll-Vorlauftemperatur gegenüber einem statisch geregelten System. In Rot: Referenzwert ohne Verschiebung. In Orange: modellierter Wärmebedarf des Gebäudes.

Abbildung 12 zeigt exemplarisch die Wirkung des in Kapitel 2.3 beschriebenen Ansatzes auf die Regelung der Heizungsanlage. Durch die KI-gestützte Wärmebedarfsvorhersage und die darauf basierende dynamische Anpassung der Heizkurvenparameter kann die Soll-Vorlauftemperatur im Vergleich zu konventionellen, statisch geregelten Systemen signifikant reduziert werden. In den untersuchten Gebäuden liegt diese Reduktion typischerweise im Bereich von etwa 4 bis 6 °C, wobei die genaue Ausprägung stark von den jeweiligen Gebäudecharakteristika abhängt.

Die Absenkung der Vorlauftemperatur ist ein zentraler Hebel zur Reduktion des Energieverbrauchs, da sie direkt die Effizienz der Wärmeerzeugung beeinflusst. Gleichzeitig ist der Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und tatsächlichem Energieverbrauch nicht linear und hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu zählen insbesondere die thermische Qualität der Gebäudehülle, die Dimensionierung und Art der Heizkörper, das Nutzerverhalten, die jeweiligen Außentemperaturverläufe sowie die Frage, ob ein hydraulischer Abgleich durchgeführt wurde.

Eine isolierte Betrachtung der Temperaturreduktion ist daher nicht ausreichend, um belastbare Aussagen über Einsparpotenziale zu treffen.

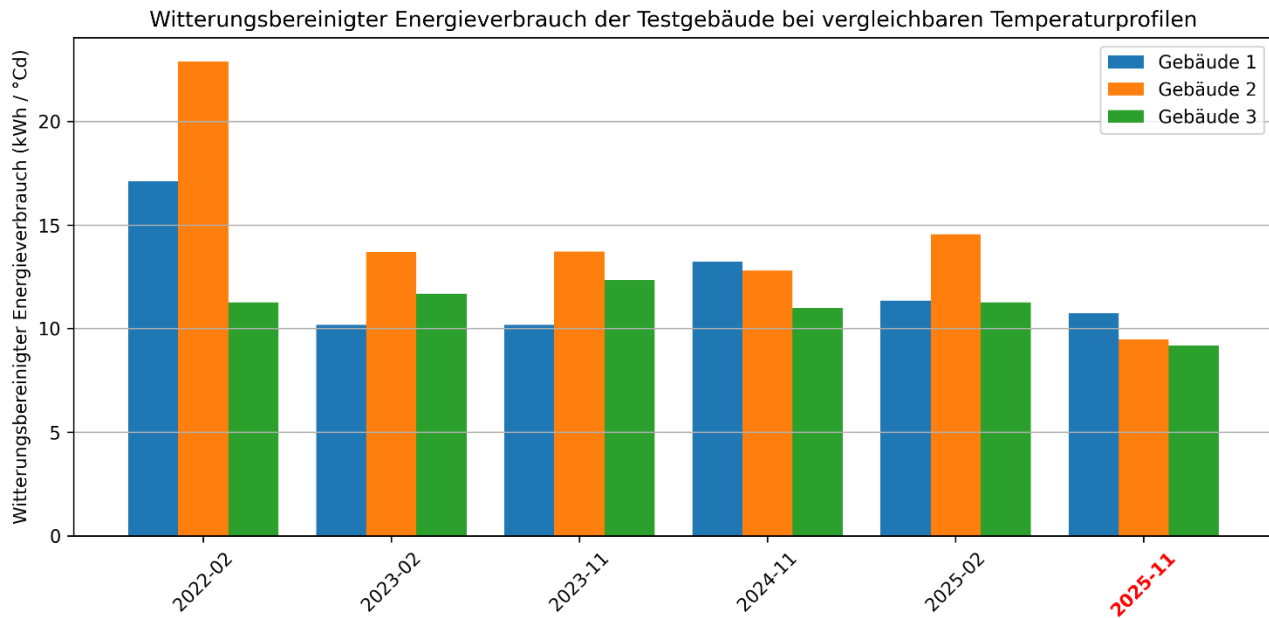


Abbildung 13: Witterungsbereinigter Energieverbrauch der Gebäude in SECAI. Der SECAI-Ansatz wurde im November 2025 angewendet. Zum Vergleich werden Monate mit einem ähnlichen Witterungsprofil herangezogen, in denen der SECAI-Ansatz ebenfalls eingesetzt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass ein zweistelliges Einsparpotenzial besteht.

Die untersuchten Ergebnisse basieren überwiegend auf konventionellen Heizsystemen wie Gas- oder Ölheizungen. In diesen Systemen führt die Reduktion der Vorlauftemperatur bereits zu messbaren Effizienzgewinnen. Für alternative Heiztechnologien, insbesondere Wärmepumpen, ist dieser Effekt potenziell noch ausgeprägter. Der Wirkungsgrad von Wärmepumpen steigt mit sinkender Vorlauftemperatur deutlich an, da geringere Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Heizsystem erforderlich sind. Eine präzise, bedarfsorientierte Regelung kann hier somit nicht nur den Energieverbrauch reduzieren, sondern gleichzeitig die Effizienz des Gesamtsystems erheblich steigern.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Kombination aus datengetriebener Wärmebedarfsvorhersage und dynamischer Anlagensteuerung einen effektiven Hebel zur Reduktion des Energieverbrauchs im Gebäudesektor darstellt. Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel aus lokaler Optimierung auf Wohnungsebene und aggregierter Steuerung auf Gebäudeebene, wodurch sowohl individuelle Nutzungsmuster als auch systemische Effekte berücksichtigt werden.

4 Die Mieter-App als zentrales Artefakt: Umsetzung und Evaluation

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Erkenntnisse zur technischen Architektur, zu den KI-gestützten Heizoptimierungs-Services sowie zu den Wirkungsmustern von Nudges münden im SECAI-Ansatz in ein zentrales Artefakt: die Mieter-App. Während die zugrunde liegende Edge-Cloud-Architektur und die föderierte Verarbeitung der Wärmebedarfsdaten überwiegend im Hintergrund wirken, bildet die App den unmittelbaren Berührungspunkt zwischen System und Mieterschaft. Sie ist damit der Ort, an dem aus technologischer Optimierung tatsächlich wahrgenommener Nutzen, Akzeptanz und Verhaltensänderung entstehen. Vor diesem Hintergrund wurde die App nicht als optionales Add-on, sondern als integraler Bestandteil des Forschungsansatzes konzipiert und im Rahmen einer projektinternen Studie einer strukturierten Evaluation unterzogen.



Abbildung 14: Scannen Sie diesen QR-Code, um zur SECAI-App zu gelangen.

4.1 Konzeption als Synthese theoretischer und empirischer Erkenntnisse

Die Konzeption der Mieter-App folgte einem gestaltungsorientierten Vorgehen, das durch die Prinzipien des Human-centered Design ergänzt wurde. Methodisch leitete sich dieser Zugang aus dem Anspruch ab, technische Innovation eng mit den tatsächlichen Bedürfnissen und Eigenheiten der Zielgruppe zu verzahnen. Inhaltlich speiste sich die App-Konzeption aus zwei komplementären Erkenntnisquellen: einer systematischen Literaturanalyse zur Wirksamkeit digitaler Nudges im Energie- und Smart-Heating-Kontext sowie den im Projekt SECAI erhobenen empirischen Daten der Nutzerstudie mit 1.606 Teilnehmenden (vgl. Kapitel 3.1).

Die Literaturanalyse identifizierte fünf für den Anwendungsfall besonders relevante Nudging-Strategien: Feedback, Social Norms, Defaults, Framing und Goal-Setting. Übergreifend zeigte sich, dass deren Wirkung stark vom Anwendungskontext, von den Persönlichkeitsmerkmalen der Nutzenden sowie davon abhängt, ob die Heizkosten von den Bewohnenden selbst getragen werden. Insbesondere die Befunde zu Mietverhältnissen ohne direkten finanziellen Anreiz verdeutlichten, dass nicht-monetäre Nudges allein nur begrenzte Wirkung entfalten. Diese Erkenntnis fügt sich nahtlos in das in Kapitel 3.1 berichtete Bild ein, wonach finanzielle Argumente mit Abstand den stärksten Verhaltenshebel darstellen, während soziale und klimabezogene Argumente in der Wirkungshierarchie zurücktreten.

Die SECAI-Nutzerstudie verweist auf eine heterogene Zielgruppe sowie die Präferenz einer hybriden Steuerung aus Automatisierung und jederzeit möglicher manueller Eingriffsmöglichkeit. Ergänzend wurde der ausgeprägte Wunsch nach Transparenz aufgegriffen, demzufolge Empfehlungen nicht nur ausgegeben, sondern auch nachvollziehbar begründet werden sollen. Die App-Konzeption begegnet dem durch konkrete Designanforderungen wie Anpassbarkeit, Barrierefreiheit, einen verständlich strukturierten Funktionsumfang sowie die Möglichkeit, individuelle Heizpläne und Sparziele sowohl automatisiert als auch manuell zu verwalten. Damit wird die zentral hergeleitete Designanforderung, Systeme so zu gestalten, dass sie möglichst ohne aktives Zutun der Nutzenden funktionieren, gleichzeitig aber einfache und transparente Eingriffsmöglichkeiten bieten, aufgegriffen.

4.2 Funktionale Umsetzung der Wirkmechanismen in der App

Die Mieter-App ist als Interaktionssystem aufgebaut, in dem die zuvor identifizierten Nudging-Strategien in konkrete Funktionen überführt wurden. Den Einstieg bildet ein zentrales, individuell konfigurierbares Dashboard, das den aktuellen Tagesverbrauch, die Zustände einzelner Räume sowie ausgewählte Widgets zu Verbrauch, CO₂-Ausstoß und Sparzielen aggregiert. Über eine durchgehende Navigationsleiste sind die Hauptfunktionen Heizungssteuerung, Verbrauch, Vergleich, Prognose, CO₂-Übersicht, Postfach und Feedback unmittelbar erreichbar.

Im Zentrum der Steuerungslogik steht ein hybrides Modell, das die in Kapitel 3.1 herausgearbeitete Präferenz für eine Kombination aus Automatik und Eingriffsmöglichkeit unmittelbar adressiert. KI-basierte Heizpläne und ein KI-empfohlenes Sparziel bilden die Standardoption (Default) und übernehmen im Sinne der mehrstufigen SECAI-Architektur die individuelle Bedarfsabschätzung pro Raum. Greift eine Mietpartei manuell in die Temperaturregelung ein, wird der jeweilige Heizplan automatisch deaktiviert; die Rückkehr in die automatische Steuerung bleibt jederzeit möglich. Damit wird das systemische Wirkprinzip, das im Whitepaper als zentrale Akzeptanzvoraussetzung herausgearbeitet wurde, auf der Interaktionsebene konsequent eingelöst.

Feedback bildet das durchgängige Grundprinzip der App. Verbrauchsdaten werden sowohl in Kilowattstunden als auch in Euro ausgewiesen und durch Säulendiagramme visualisiert. Die parallele Darstellung in unterschiedlichen Einheiten trägt der in Kapitel 3.1 berichteten Dominanz finanzieller Bezugsgrößen Rechnung, ohne den technischen Informationsgehalt aufzugeben. Ergänzend kommen Push-Nachrichten als kontextbezogene Hinweise zum Einsatz, etwa bei dauerhaft hohen Raumtemperaturen von über 24 Grad, fehlender Nachtabenkung oder dem Heizen bei geöffnetem Fenster. Diese Hinweise greifen die im Whitepaper benannten ineffizienten Verhaltensmuster gezielt auf und übersetzen sie in adressierbare, situationsgebundene Verhaltensimpulse.

Goal-Setting wird in Form selbst gewählter oder KI-empfohlener Sparziele im App-Konzept umgesetzt. Die KI-empfohlene Variante übernimmt zugleich die Rolle eines moderaten Defaults, das sich auf Basis vergangener Verbrauchsmuster automatisch an das individuelle Verhalten anpasst. Damit wird der in der zugrunde liegenden Literatur dokumentierten Beobachtung Rechnung getragen, dass statische Standardziele entweder unterfordern oder demotivierend wirken können. Defaults greifen darüber hinaus bei der grundsätzlichen Voreinstellung automatischer Heizpläne sowie bei der visuellen Hervorhebung umweltschonender Optionen, die durch Framing-Elemente wie ein grünes Blatt als solche kenntlich gemacht werden. Die CO₂-Übersicht übersetzt abstrakte Emissionswerte durch eine Umrechnung in gefahrene Autokilometer in eine alltagsnahe Bezugsgröße und folgt damit dem Anspruch, technische Informationen verständlich zu kontextualisieren.

Social Norms werden im Konzept der App in Form von Verbrauchs- und CO₂-Vergleichen umgesetzt, die einen Bezug auf Haushalte mit gleicher Personenanzahl im Gebäude oder im bundesdeutschen Durchschnitt herstellen. Ergänzend wird der Anteil der Nachbarschaft, die einen automatisierten Heizplan nutzt, als sozialer Verstärker für die Annahme der KI-basierten Standardoption herangezogen. Die in Kapitel 3.1 berichtete vergleichsweise schwache Wirkung reiner Social-Proof-Argumente im Heizkontext wird dabei bewusst berücksichtigt: Soziale Vergleiche treten in der App nicht als primärer Hebel auf, sondern fungieren als ergänzende Einordnung individueller Verbrauchsdaten neben den dominanten finanziellen Bezugsgrößen.

4.3 Evaluation des App-Konzepts im Rahmen einer Studie

Eine erste strukturierte Evaluation der Mieter-App erfolgte im Rahmen einer projektintern durchgeführten Studie. Untersucht wurde ein interaktiver Oberflächenprototyp, der die wesentlichen Funktionen der App und die hinterlegten Nudging-Mechanismen vollständig abbildet. Die Evaluation fokussierte auf Usability, Design und Funktionsumfang. Eine empirische Erhebung der Langzeitwirkung der einzelnen Nudges auf den realen Energieverbrauch war im Rahmen dieser ersten Iteration nicht vorgesehen und bleibt, wie im Whitepaper an mehreren Stellen angelegt, dem realen Einsatz im Feld vorbehalten.

Methodisch kam ein zweistufiger Ansatz zum Einsatz: Neun Teilnehmende mit dem Einschlusskriterium eines bestehenden Mietverhältnisses bearbeiteten in einem unmoderierten Online-Usability-Test sechzehn aufgabenbasierte Szenarien, die aus den funktionalen Anforderungen der App abgeleitet wurden. Die Bearbeitung wurde anhand der Task Success Rate, der Time on Task und einer Ease-of-Use-Bewertung erfasst. Im Anschluss wurde eine Posttest-Befragung durchgeführt, die unter anderem die System Usability Scale (SUS) sowie Bewertungen zu Benutzererfahrung, Design und Funktionsumfang umfasste. Die Teilnehmenden deckten unterschiedliche Altersgruppen sowie unterschiedliche Erfahrungsstände im Umgang mit Smart-Home-Technologien ab und bildeten damit zentrale Heterogenitätsachsen der in Kapitel 3.1 beschriebenen Zielgruppe ab.

Die Ergebnisse weisen in ihrer Gesamtschau auf eine hohe Tragfähigkeit des entwickelten Konzepts hin. Der erreichte System-Usability-Score von 74,17 deutet auf eine hohe Nutzbarkeit hin und liegt oberhalb des Wertes von rund 70 Prozent vergleichbar untersuchter Systeme. Die durchschnittliche Bewertung der allgemeinen Zufriedenheit lag bei 7,56 von 10 Punkten, das Design wurde mit 7,12 und der Funktionsumfang mit 8,78 von 10 Punkten bewertet. Insbesondere die hohe Bewertung des Funktionsumfangs deutet darauf hin, dass die im Projekt abgeleiteten funktionalen Anforderungen die Erwartungen der Zielgruppe in ihren wesentlichen Punkten treffen.

Gleichzeitig identifizierte die Evaluation Verbesserungspotenziale, die sowohl für die Weiterentwicklung der App als auch für die Konzeption vergleichbarer Systeme von Bedeutung sind. Ein zentraler Befund betrifft die Unterscheidung zwischen automatisch generierten und manuell erstellten Heizplänen beziehungsweise Sparzielen. Mehrere Teilnehmende konnten beide Optionen nicht intuitiv voneinander abgrenzen. Diese Beobachtung zeigt, dass Empfehlungen nicht nur ausgegeben, sondern auch erklärt werden müssen. Dafür ist eine klar gestaltete Einführung in die KI-Logik sinnvoll, etwa über ein initiales Onboarding, das die Arbeitsweise des Systems und den Mehrwert der Automatisierung verständlich macht. Weitere Hinweise betrafen die Anordnung der Funktionen Verbrauch, Prognose, Vergleich und CO₂-Übersicht, die von vielen Teilnehmenden intuitiv als zusammengehörig wahrgenommen wurden. Daraus ergibt sich die Empfehlung, diese inhaltlich verbundenen Funktionen stärker zu integrieren und die Navigationslogik weiter zu vereinfachen.

4.4 Einordnung in den SECAI-Ansatz

Die Evaluation der Mieter-App liefert in ihrer Gesamtschau Hinweise darauf, dass die Verbindung aus datengetriebener Optimierung, hybriden Steuerungsformen und transparenten Verhaltensimpulsen auch in der konkreten Nutzerinteraktion tragfähig ist. Die App bündelt zentrale Bausteine des SECAI-Ansatzes in einem konsistenten Bedienkonzept: Die mehrstufige Architektur und die KI-Services aus Kapitel 2 werden in ausgewählten Funktionen sichtbar, die Erkenntnisse aus der Nutzerstudie in Kapitel 3.1 spiegeln sich in den Designentscheidungen wider, und die in Kapitel 2.4 entwickelte Nudging-Logik wird auf der Interaktionsebene erfahrbar gemacht.

Damit erfüllt die App eine doppelte Rolle. Zum einen ist sie der zentrale Berührungspunkt zwischen Mieterschaft und System und damit eine notwendige Bedingung dafür, dass die in Kapitel 3.2 berichteten Energieeinsparungen nicht nur technisch erzeugt, sondern im Alltag verstanden, akzeptiert und langfristig stabilisiert werden können. Zum anderen fungiert sie als sichtbares Forschungsartefakt, in dem die theoretischen Annahmen, empirischen Befunde und technischen Entwicklungen des Projekts in eine prüfbare Form überführt wurden. Die im Rahmen dieser Evaluation erzielten Ergebnisse stützen die Plausibilität dieses Ansatzes, ohne die im Whitepaper an mehreren Stellen betonte Notwendigkeit weiterer Felderproben zu ersetzen. Insbesondere die Frage, in welchem Maße die in der App umgesetzten Nudges langfristig zu nachhaltigen Verhaltensänderungen und realisierten Einsparungen führen, bleibt Gegenstand weiterer Forschung im laufenden Projekt und schließt unmittelbar an die im folgenden Kapitel diskutierten Herausforderungen und Erfolgsfaktoren an.

5 Erfolgsfaktoren

Die Projektergebnisse zeigen in ihrer Gesamtschau, dass der SECAI-Ansatz technisch tragfähig, praktisch anwendbar und in seiner Wirklogik überzeugend ist. Die Verbindung aus datengetriebener Heizungsoptimierung, intelligenter Systemarchitektur, nutzerzentrierter Interaktion und transparenten Verhaltensimpulsen konnte im Projekt nicht nur konzeptionell beschrieben, sondern in konkreten technischen Implementierungen, Nutzerstudien und Felderprobungen nachvollziehbar überprüft werden. Damit wurde aus einem theoretischen Wirkmodell ein greifbares, evaluierbares System, das zentrale Anforderungen des Gebäudebestands adressiert: Energieeffizienz, Nutzerakzeptanz, Skalierbarkeit und Betriebsfähigkeit unter realen Bedingungen.

Ein wesentlicher Erkenntnisgewinn liegt darin, dass Energieeinsparungen im Gebäudebestand nicht durch einzelne technologische Komponenten entstehen, sondern durch das Zusammenspiel mehrerer Ebenen. Erst die Kombination aus sauber integrierter Heizungs- und Gebäudetechnik, Sensorik und Aktorik, datenbasierter Steuerung sowie einer verständlichen Einbindung der Mietenden ermöglicht eine nachhaltige Wirkung. Die entwickelte Mieter-App übernimmt dabei eine zentrale Rolle: Sie macht die im Hintergrund arbeitenden KI-Services sichtbar, übersetzt technische Optimierung in nachvollziehbare Informationen und schafft über gezielte Nudges einen alltagsnahen Zugang zu effizienterem Heizverhalten. Damit fungiert sie zugleich als Schnittstelle zur Mieterschaft und als sichtbares Forschungsartefakt, in dem die theoretischen Annahmen des Projekts praktisch erfahrbar werden.

Durch das im Projekt aufgebaute und erprobte Heizsystem lässt sich belastbar festhalten, dass mit dem Einsatz des SECAI-Systems zweistellige prozentuale Wärmeeinsparungen erreichbar sind. Die konkrete Höhe dieser Einsparungen ist selbstverständlich abhängig vom jeweiligen Gebäudetyp, dem energetischen Zustand, der Ausrichtung, der vorhandenen Heizungsinfrastruktur, dem Nutzerverhalten sowie weiteren betrieblichen und baulichen Rahmenbedingungen. Gleichwohl zeigen die Ergebnisse deutlich, dass der Ansatz ein relevantes Einsparpotenzial im Bestand erschließt, insbesondere dort, wo bislang heterogene, wenig digitalisierte oder nur eingeschränkt steuerbare Heizungsanlagen betrieben werden.

Gleichzeitig verdeutlicht das Projekt, dass die technische Ausgangsbasis ein entscheidender Erfolgsfaktor ist. Defekte Ventile, fehlender hydraulischer Abgleich, instabile Netzwerkinfrastruktur oder unklare Schnittstellen können die Wirksamkeit digitaler Steuerung erheblich begrenzen. Umgekehrt wirken genau diese vorbereitenden Maßnahmen als Enabler: Je robuster und standardisierter die technische Grundlage, desto besser kann die datengetriebene Optimierung ihr Potenzial entfalten. Die im Projekt verfolgte Edge-Cloud-Architektur erweist sich dabei als geeigneter Ansatz, um Datenschutz, Ausfallsicherheit, Skalierbarkeit und zentrale Wartbarkeit miteinander zu verbinden. Entscheidend bleibt, dass die technische Gebäudeausrüstung auch bei temporären Verbindungsverlusten sicher weiterbetrieben werden kann und digitale Dienste den Grundbetrieb unterstützen, aber nicht gefährden.

Neben der technischen Dimension bestätigt das Projekt die zentrale Bedeutung des Faktors Mensch. Mietende akzeptieren digitale Energiesysteme vor allem dann, wenn der konkrete Nutzen verständlich ist, keine zusätzliche Komplexität entsteht und Eingriffe in Komfort oder Privatsphäre transparent erklärt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass finanzielle Einsparinformationen, konkrete Handlungsempfehlungen und nachvollziehbare Systemlogiken deutlich wirksamer sind als abstrakte Appelle. Damit bestätigt sich die Relevanz eines transparenten Nudging-

Ansatzes: Effizientes Verhalten wird nicht erzwungen, sondern durch verständliche Impulse, klare Rückmeldungen und einfache Eingriffsmöglichkeiten unterstützt.

Insgesamt erbringt SECAI den Nachweis, dass relevante Wärmeeinsparungen im Gebäudebestand realisierbar sind, wenn technische Optimierung und nutzerzentrierte Interaktion konsequent zusammengedacht werden. Die größten Herausforderungen liegen weniger in der grundsätzlichen technologischen Machbarkeit, sondern in der Standardisierung, der Integration in heterogene Bestandsgebäude, belastbaren Betriebsprozessen und einer zielgruppengerechten Kommunikation.

Für die weitere Entwicklung ergeben sich klare nächste Schritte: eine Ausweitung der Erprobung auf größere und diversere Gebäudebestände, die Reduktion hardwareintensiver Komponenten, die Weiterentwicklung der KI-Modelle auf Basis wachsender Datenmengen sowie die weitere Standardisierung von Schnittstellen, Wartungsprozessen und Rollout-Modellen. Das Projekt zeigt damit einen realistischen Weg vom Pilotbetrieb hin zu skalierbaren Lösungen für den Gebäudebestand.

SECAI Konsortialführung



SECAI Konsortialpartner



Gefördert durch:

