



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 18. Dezember 2024

KI in der Wärmepumpenberatung



Datum: 18. Dezember 2024

Ort: Zürich

ETH zürich

 BITS TO ENERGY LAB



Hoval

enerlytica

Subventionsgeber:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Bits to Energy Lab (Chair of Information Management), ETH Zürich
Weinbergstrasse 56, CH-8092 Zürich
www.im.ethz.ch, www.bitstoenergy.com

Autoren:

Tobias Bruder Müller, ETH Zürich, tbrudermuell@ethz.ch
Thorsten Staake, ETH Zürich & Otto-Friedrich-Universität Bamberg, tstaake@ethz.ch

Weitere Ansprechpartner/innen:

Marina González Vayá, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, marina.gonzalezvaya@ekz.ch
Lorenz Deppeler, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, lorenz.deppeler@ekz.ch
Jan Marckhoff, Enerlytica (ehemals BEN Energy), jan.marckhoff@enerlytica.com
Dominik Bilgeri, Hoval, dominik.bilgeri@hoval.com
Elgar Fleisch, ETH Zürich, efleisch@ethz.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stephan Renz, info@renzconsulting.ch
Roland Brüniger, roland.brueiniger@brueniger.swiss

Während der Projektlaufzeit aus dem BFE ausgeschieden:

Carina Alles & Rita Kobler

BFE-Vertragsnummer: SI/502257-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen im generischen Maskulinum gelten gleichermassen für alle Geschlechter.

Der Projektname «KI für die Wärmepumpenoptimierung (KIWO)» wurde aufgrund seiner besser klingenden Abkürzung in der internen und externen Kommunikation häufig als Synonym für den offiziellen Namen «KI in der Wärmepumpenberatung (KI-WP)» verwendet.



Zusammenfassung

Wärmepumpen sind in der Schweiz die aktuell meistverkaufte Wärmequelle und bereits in rund 20% der Gebäude installiert. Wärmepumpen reduzieren den Verbrauch fossiler Energieträger, erhöhen aber den Bedarf an elektrischer Energie. Entsprechend wichtig ist ein effizienter Betrieb der Geräte nicht nur auf dem Prüfstand, sondern auch in der Praxis – und dies auch noch viele Jahre nach der Installation. Für Installateure stellen die Auslegung und Konfiguration von Wärmepumpen eine komplexe Aufgabe dar. Häufig werden Kennlinien daher so eingestellt, dass sie den geforderten Heizkomfort zulasten der Energieeffizienz übertreffen, und beschwerdefreie Systeme werden häufig nicht weiter optimiert. Anlagennutzer können meist nur schwer beurteilen, ob der elektrische Energieverbrauch der Wärmepumpe angemessen ist bzw. ob Einsparpotentiale vorhanden sind. Bestehende, meist proprietäre Monitoring-Ansätze sind im Bestand selten verbaut, wodurch erhebliche energetische und monetäre Potentiale verloren gehen. Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung und Bewertung eines KI-basierten Verfahrens, welches Anlagen mit hohem Einsparpotential auf Basis von Smart-Meter-Daten identifiziert. Das Verfahren soll Anwendern eine treffsichere Auswahl von Anlagen ermöglichen, bei denen Arbeiten Vor-Ort sinnvoll sind und zugleich eine wirkungsvolle Ansprache betroffener Haushalte unterstützen.

Um dies zu ermöglichen sind im Rahmen dieses Forschungsprojektes mehrere KI-basierte Algorithmen entwickelt, trainiert und evaluiert worden, welche die Bewertung von Wärmepumpen im laufenden Betrieb ermöglichen. Als Trainingsgrundlage dienten hierfür reale 15-minütige Messungen des elektrischen Energieverbrauchs Schweizer Haushalte, welche mit Wärmepumpen und modernen Smart-Metern ausgestattet sind und keine Photovoltaic-Anlagen nutzen. Die entwickelten Algorithmen sind so konzipiert worden, dass sie auch eine Evaluation des Wärmepumpenbetriebs erlauben, wenn keine weiteren Kontextinformationen bezüglich der Installationsumgebung vorhanden sind. Dies macht sie geeignet für den Praxisbetrieb, in dem der Gebäudekontext häufig unbekannt ist. Die Funktionalitäten der im Forschungsprojekt entwickelten Algorithmen lassen sich wie folgt zusammenfassen: automatisierte Identifikation von Haushalten mit einer Wärmepumpe, automatisierte Unterscheidung von modulierenden und nicht modulierenden Wärmepumpen, retrospektive Bewertung der elektrischen Energieersparnis durch eine Wärmepumpenoptimierung, Disaggregation eines Wärmepumpensignals aus einer Gesamtmessung, und Bewertung des zyklischen Ein- und Ausschaltverhaltens von Wärmepumpen. Die Details der technischen Implementierung und Evaluation der Algorithmen sind diesem Bericht zu entnehmen.

Résumé

Les pompes à chaleur sont actuellement la source de chaleur la plus populaire en Suisse et sont déjà installées dans environ 20% des bâtiments. Elles réduisent notablement la consommation d'énergies fossiles, mais augmentent les besoins en électricité. Il est donc important qu'elles fonctionnent efficacement, non seulement sur le banc d'essai, mais aussi dans la pratique - et ce, même plusieurs années après leur installation. Pour les installateurs, la conception et la configuration des pompes à chaleur représentent une tâche complexe, et il arrive souvent que les courbes caractéristiques soient réglées de manière conservatrice et que les systèmes ne présentant pas de problèmes ne soient pas optimisés davantage. De plus, les ménages ne sont généralement pas en mesure d'évaluer si la consommation électrique de la pompe à chaleur est appropriée ou s'il existe un potentiel d'économie. Les approches de surveillance existantes, généralement propriétaires, sont rarement mises en œuvre, ce qui entraîne des pertes énergétiques et monétaires considérables. L'objectif de ce projet est de développer et d'évaluer un procédé basé sur l'intelligence artificielle (IA) qui identifie les installations présentant un potentiel d'économie élevé sur la base de données de compteurs intelligents. Le procédé



doit permettre aux utilisateurs de sélectionner avec précision les installations pour lesquelles une intervention sur place est judicieuse et d'approcher efficacement les ménages concernés.

Pour ce faire, plusieurs algorithmes basés sur l'IA ont été développés, entraînés et évalués dans le cadre de ce projet de recherche, permettant d'évaluer les pompes à chaleur en fonctionnement. Des mesures réelles de 15 minutes de la consommation d'énergie électrique de ménages suisses équipés de pompes à chaleur et de compteurs intelligents modernes, et n'utilisant pas d'installations photovoltaïques, ont servi de base d'entraînement. Les algorithmes développés ont été conçus de manière à permettre une évaluation du fonctionnement de la pompe à chaleur en l'absence d'autres informations contextuelles sur l'environnement de l'installation. Cela les rend adaptés à l'exploitation pratique, dans laquelle le contexte du bâtiment est souvent inconnu. Les fonctionnalités des algorithmes développés dans le projet de recherche peuvent être résumées comme suit : identification automatisée des ménages équipés d'une pompe à chaleur, distinction automatisée entre les pompes à chaleur modulantes et non modulantes, évaluation rétrospective des économies d'énergie électrique réalisées grâce à une optimisation de la pompe à chaleur, désagrégation d'un signal de pompe à chaleur issu d'une mesure globale, et évaluation du comportement cyclique de mise en marche et d'arrêt des pompes à chaleur. Les détails de l'implémentation technique et de l'évaluation des algorithmes sont disponibles dans ce rapport.

Summary

Heat pumps are currently the most popular heat source in Switzerland and are already installed in around 20% of buildings. Heat pumps reduce the consumption of fossil fuels but increase the demand for electrical energy. Accordingly, efficient operation of the equipment is important not only on the test bench, but also in practice - and for many years after their installation. For installers, the design and configuration of heat pumps is a complex task, and often characteristic curves are set to exceed the heating comfort at the cost of energy efficiency. Complaint-free systems are not further optimized. Households are usually unable to assess whether the heat pump's electricity consumption is appropriate or whether there is potential for savings. Existing, mostly proprietary monitoring approaches are rarely in place, resulting in significant energetic and monetary potentials being lost. The aim of this project is to develop and evaluate AI-based methods that can identify systems with high savings potential based on smart meter data. The procedure should enable service providers to select installations where on-site work makes sense and at the same time support an effective targeting of affected households.

To achieve this, several AI-based algorithms were developed, trained, and evaluated as part of this research project. These algorithms enable the performance evaluation of heat pumps during operation. The training process was based on real 15-minute measurements of electrical energy consumption from Swiss households equipped with heat pumps and modern smart meters, excluding those using photovoltaic systems. The algorithms were specifically designed to function even in the absence of contextual information about the installation environment, making them highly practical for real-world applications where details about the building context are often unavailable. Their functionalities include the automated identification of households with a heat pump, the differentiation between variable and fixed speed heat pumps, the retrospective evaluation of electrical energy savings achieved through heat pump optimization, the disaggregation of the heat pump signal from overall electrical energy consumption measurements, and the assessment of the cyclic switch-on and switch-off behavior of heat pumps. Further details on the technical implementation and evaluation of these algorithms can be found in this report.



Take-Home-Messages

- Smart-Meter-Daten in Form 15-minütiger Messungen elektrischer Energie können genutzt werden, um Wärmepumpen in Haushalten zu identifizieren, welche Optimierungspotential aufweisen.
- Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sind hierfür KI-basierte Algorithmen entwickelt worden, mittels welcher sich der Elektrizitätsverbrauch einer Wärmepumpe ohne detaillierte Kenntnis der genauen Betriebsumgebung bewerten lässt, bspw. durch eine Evaluierung der Betriebsstunden oder Ein- und Ausschaltungen.
- Die Algorithmen bilden die Grundlage für eine datenbasierte Ansprache von Haushalten, bei denen eine Vor-Ort-Beratung sinnvoll ist. Die Nutzung im digitalen Endkundenportal eines EVUs wurde erfolgreich in der Praxis getestet und die Algorithmen sind öffentlich verfügbar gemacht worden.
- Die Vor-Ort-Beratung durch einen Energieberater kann Haushalte dabei unterstützen, den optimalen Betrieb einer Wärmepumpe sicher zu stellen. Die Hälfte aller Haushalte erzielte nach einer solchen Optimierung eine durchschnittliche Ersparnis von 1'805 kWh (15.2%) elektrischer Energie pro Jahr.



Danksagung

Die Autoren dieses Schlussberichts (Tobias Brudermüller und Thorsten Staake) möchten sich bei allen weiteren Beteiligten des Forschungsprojektes für die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken!

- **Bundesamt für Energie:** Stephan Renz, Roland Brüniger, Carina Alles, Rita Kobler
- **Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ):** Marina González Vayá, Lorenz Deppeler, Hardy Schröder, Michael Peter, Nina Bichsel, Eliza Garbacik, Vanesa Gajic, Daniel Bauer, Angelos Selviaridis, Benedikt Hilpisch, Martina Bieler
- **Enerlytica (ehemals BEN Energy):** Jan Marckhoff, Tobias Graml, Thomas Losinger, Christian Widderich, Tanja Rüegg, Felix Lossin
- **Hoval:** Dominik Bilgeri, Yuasa Mizuki, Christian Wasem, Claudio Corrado, Kevin Allenspach
- **ETH Zürich (Bits to Energy Lab):** Elgar Fleisch, Markus Kreft, Andreas Weigert, Konstantin Hopf, Sebastian Günther, Monica Heinz, Elisabeth Keller, Florian Wirth, Johannes Gross, Julian Backs, Luca Pernatozzi, Fabian Breer, Alison Maguire, Lars Nettemann, Vincent Dabir, Marvin Pecher, Samuel Joray



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-Home-Messages	5
Danksagung	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	9
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Allgemeine Projektziele	10
1.4 Forschungs- und Anwendungsziele	11
1.5 Projektpartner und Projektzeitraum.....	12
2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	13
2.1 Datenerhebung und Erstellung eines Gesamtdatensatzes	13
2.2 Beispiel eines Lastgangs eines Haushaltes mit Wärmepumpe	14
2.3 Typische Probleme auffälliger Wärmepumpen	15
2.4 Bewertung der elektrischen Energieersparnis durch Wärmepumpenoptimierung	16
2.5 Erkennung von Wärmepumpen-Installationen.....	17
2.6 Unterscheidung modulierender und nicht-modulierender Wärmepumpen	17
2.7 Disaggregation eines Wärmepumpensignals aus einer Gesamtmessung	20
2.8 Zyklisches Verhalten als Indikator für auffällige Wärmepumpen	22
2.9 Überführung der Ergebnisse in die Praxis: Einbindung in Online-Tools.....	24
3 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	25
3.1 Kontinuierliche Überwachung des Wärmepumpenbetriebs	25
3.2 Nutzung von Sensordaten vs. Smart-Meter-Daten für Dienstleistungen.....	26
3.3 Limitationen und Anwendbarkeit bisheriger Ergebnisse	27
3.4 Algorithmische Umsetzung der Forschungs- und Anwendungsziele	28
3.5 Zukünftige Arbeiten und Ausblick.....	31
4 Publikationen und Fachvorträge	33
4.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen	33
4.2 Fachvorträge	34
Anhang	35



Abkürzungsverzeichnis

AUC:	Area under the (ROC) curve
AZ:	Anwendungsziel
EKZ:	Elektrizitätswerke des Kantons Zürich
ETH Zürich:	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EVU:	Energieversorgungsunternehmen
F&E:	Forschung und Entwicklung
FZ:	Forschungsziel
ROC:	Receiver operating characteristics



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Wärmepumpen haben in der Schweiz bereits 2014 den Gaskessel als meistverkaufte Wärmequelle abgelöst.¹ Mittlerweile ist rund jedes fünfte Gebäude der Schweiz mit einer Wärmepumpe ausgerüstet.² Höhere verfügbare Vorlauftemperaturen ermöglichen es seit einigen Jahren, auch konventionelle Heizungen im Gebäudebestand abzulösen, wodurch sich der Verkauf von Wärmepumpen immer stärker vom Neubaugeschäft entkoppelt. Die Entwicklung trägt erheblich zur Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger bei, führt aber gleichzeitig zu einem wachsenden Bedarf an elektrischer Energie insbesondere in den Wintermonaten, in denen die Schweiz bereits heute verstärkt Strom importiert. Dieser Trend wird durch die nun vermehrt eingesetzte Luft-Wasser Wärmepumpen noch verstärkt.

1.2 Motivation des Projektes

Mit dem wachsenden Gerätebestand für unterschiedliche Anforderungen wächst auch die Vielfalt der Anlagen im Feld. Zudem werden Wärmepumpen immer häufiger mit thermischen und elektrischen PV-Anlagen verknüpft, was komplexere Planungen, Installationen und Einstellungen nach sich zieht. Hiermit wächst auch der technische Anspruch bezüglich der Wartung und Adjustierung im Betrieb.

Nicht alle Installateure sind diese Entwicklung hin zu komplexeren Systemen mitgegangen. Dies spiegelt sich regelmässig in einer komfortbetonten, aber gerade bei Wärmepumpen energetisch ineffizienten Kennlinieneinstellung bei Installation und Wartung ebenso wider wie in der Maxime, beschwerdefreie Systeme besser nicht weiter zu optimieren («never touch a running system»). Dadurch gehen erhebliche Einsparpotentiale verloren – sowohl energetisch als auch monetär. Zudem wird die Zufriedenheit der Haushaltsbewohner bei der ersten Stromrechnung unnötig gedämpft, was wiederum die (wichtige) Weiterempfehlung von Wärmepumpen insbesondere für den Gebäudebestand beeinträchtigt. Auf der anderen Seite stehen durch die komplexeren Systeme zunehmend immer mehr Daten aus dem Betrieb von Wärmepumpen zur Verfügung, etwa direkt durch neue, vernetzte Geräte oder – im Bestand von besonderer Bedeutung – indirekt durch Lastgänge von elektronischen Stromzählern («Smart Metern»). Diese Daten würden, wenn richtig und flächendeckend ausgewertet, helfen, Wärmepumpen mit Optimierungspotential zu erkennen und dieses Potential zu heben.

Auch wenn heute nahezu alle Wärmepumpenersteller Kommunikationsmodule für Neugeräte anbieten, reichen diese proprietären Lösungen nicht aus, um das energetische Einsparungspotential zu erkennen und durch Optimierung zu heben. Gründe sind:³

- der grosse Anlagenbestand von Wärmepumpen ohne Kommunikationsmodule,
- die geringe Anzahl aktiver Kommunikationsmodule auch bei Neuanlagen,

¹ Quelle: Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, FWS: www.fws.ch/unsere-dienstleistungen/statistiken → abgerufen am 18.08.2020.

² Quelle: Bundesamt für Statistik, BFS: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen/gebäude/energiebereich.html> → abgerufen am 18.08.2020.

³ Quelle 1: D. Fischer et al. "Business models using the flexibility of heat pumps-a discourse". In: 12th IEA Heat Pump Conference. 2017, pp.1–12. Quelle 2: International Energy Agency - Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technology (IEA - HPT TCP). Annex 56 on Digitalization and IoT for Heat Pumps. Sweden: International Energy Agency (IEA), 2023. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/> (Letzter Aufruf: 31. Juli 2024)



- der bisherige Fokus der Anlagenhersteller auf technische Störungen, nicht auf Verbrauchsoptimierung,
- die Deaktivierung der vorhandenen Kommunikationsmodule nach der Garantiezeit, da danach meist Kosten für einen Wartungsvertrag aufgerufen werden sowie
- die hohe Diversität der proprietären Kommunikationsmodule, die ein Angebot flächendeckender und damit wirtschaftlich attraktiver Lösungen erschwert.

Entsprechend ist eine datenbasierte energetische Optimierung im Feld – etwa die Entwicklung von datengetriebenen Energieeffizienzdienstleistungen für Haushalte und die datenbasierte Unterstützung des Vertriebs entsprechender Leistungen bisher keine gängige Praxis. Dies gilt trotz des bekannten energetischen Potentials durch eine Kennlinienoptimierung bei Inbetriebnahme und Wartung sowie des Wunschs von Haushaltskunden nach Transparenz bzgl. der Energiekosten.

1.3 Allgemeine Projektziele

Das Ziel dieses F&E-Projektes ist es, ein System zu entwickeln und zu testen, das sämtliche relevante Informationen aus vorhandenen Smart-Meter-Daten (und weiteren öffentlich verfügbaren Daten) ableitet und damit Anlagen identifiziert, bei denen eine Vor-Ort-Beratung erforderlich und zielführend ist. Die Vor-Ort-Beratung bleibt somit bestehen, wird jedoch durch das entwickelte System ergänzt. Dieses ermöglicht eine dauerhafte Überwachung, erkennt wiederkehrende Optimierungspotentiale und schätzt Einsparungen im Vorfeld ab, sodass das Interesse geeigneter Haushalte durch eine datenbasierte Ansprache geweckt wird. Vorteile, die sich dadurch ergeben sollen, resultieren aus:

- einer anlagenübergreifenden Lösung und damit aus der Schaffung von Skaleneffekten bei hoher Anlagenanzahl,
- der Möglichkeit des einfachen Einbezugs von Bestandsanlagen und älteren (und damit besonders relevanten) Anlagen ohne Kommunikationsmodul,
- dem Entfall zusätzlicher Hardware-Kosten jenseits der unabhängig von einer solchen Lösung (zukünftig) installierten Smart Meter,
- dem Entfall zusätzlicher Kommunikationskosten,
- dem entstehenden Interface zu einem Energiedienstleister oder EVU als «Trusted Partner»
- der Herstellerunabhängigkeit und damit Ausschluss von Interessenkonflikten bei der Identifikation technischer Probleme und
- der Kosteneffizienz der Optimierung auch für «kleine» Anlagen von Ein- und Zweifamilienhäusern (inkl. der relativ billigen Luft-Wasser Wärmepumpen).



1.4 Forschungs- und Anwendungsziele

Im Rahmen des Projektantrags wurden vier Themenkomplexe aufgezeigt, innerhalb derer mehrere Forschungsziele (FZ) und damit verbundene Forschungsfragen formuliert wurden. Zusätzlich wurden weitere technische Anwendungsziele (AZ) definiert. Diese sind aus Gründen der Vollständigkeit nachfolgend aufgelistet. Eine Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf diese konkreten Zielformulierungen ist in Abschnitt 3.4 zu finden.

Themenkomplex 1: Wie lassen sich bereits mit relativ kleinen Trainingsdatensätzen zuverlässige Prädiktoren für eine präzise Erkennung von Optimierungspotentialen im Anlagenbestand mit Verfahren des Maschinellen Lernens bestimmen?

- **FZ 1.1:** Identifikation und Erprobung von maschinellen Lernverfahren mit besonderer Eignung für kleine Trainingsmengen.
- **FZ 1.2:** Identifikation und Erprobung maschinellen Lernverfahren mit besonderer Eignung zur Erkennung von Einsparpotentialen auf Basis von grobgranularen Verbrauchsreihen.

Themenkomplex 2: Wie kann kontinuierliches Lernen bei gleichzeitigen «vergessen» nicht mehr relevanter Erfahrungen effizient abgebildet werden? Konkret: Wie kann durch eine laufende Erfolgskontrolle das System im Betrieb verbessert werden?

- **FZ 2.1:** Identifikation von maschinellen Lernverfahren, mit der Eignung kontinuierlich bzw. lebenslang zu lernen.

Themenkomplex 3: Wie kann Datensparsamkeit und Datenschutz bereits im Systementwurf berücksichtigt werden? Konkret: Wie stellt man sicher, dass Informationen z.B. zu Abwesenheiten, Veränderung von Lebensumständen etc. nicht zugänglich werden?

- **FZ 3.1:** Identifikation von technischen und organisatorischen Massnahmen zur Datensparsamkeit («by Design»)

Themenkomplex 4: Wie hoch ist die Erkennungsgenauigkeit (Sensitivität und Spezifität) der Lösung in der Praxis, und wie schnell werden Probleme erkannt? Wie hoch ist das korrekt erkannte energetische Einsparpotential und wie hoch sind die tatsächlich realisierten Energieeinsparungen?

- **FZ 4.1:** Identifikation von 50% und 25% der Haushalte mit dem höchsten Einsparpotential
- **FZ 4.2:** Identifikation von wesentlichen Fehleinstellungen (Neuland und anspruchsvolle, risikobehaftete Forschung)

Anwendungsziele:

- **AZ 1:** Identifikation von unzureichend eingestellten oder fehlerhaften Anlagen.
- **AZ 2:** Potentialschätzung einer Justierung der Anlagenparameter im Betrieb.
- **AZ 3:** Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Optimierung.
- **AZ 4:** Potentialschätzung sowie die Berechnung der durch die jeweilige Massnahme im Einzelfall erzielte Einsparungen als Leistungsnachweis für den Kunden.
- **AZ 5:** Aufbau eines produktives Testsystem, welches über 120 Anlagen kontinuierlich überwacht. Zudem soll die Treffergenauigkeit bei der Identifikation von Anlagen mit hohem Optimierungspotential anhand von der 120 Anlagen bewertet werden.
- **AZ 6:** Das System soll folgende Teilkomponenten umfassen:
 - **AZ 6.1:** Reporting-Dashboard für den System-Nutzer
 - **AZ 6.2:** Mailing-System zum Versand von Analyse-Ergebnissen und Informationen zu erzielten Einsparungen für Haushaltskunden



- **AZ 7:** Die Datenkompatibilität des Systems soll so gestaltet sein, dass es für möglichst viele Haushalte anwendbar ist und schlussendlich eine wirtschaftlich attraktive Dienstleistung ermöglicht.
 - **AZ 7.1:** Das System soll kompatibel für alle gängigen Smart-Meter-Datensätze (15-minütige Daten) geeignet sein.
 - **AZ 7.2:** Die Erkennung umfasst auch die Fälle, bei denen die Wärmepumpe gemeinsam mit dem Haushaltsstrom erfasst wird. Diese Funktionalität ist für den Praxiseinsatz wichtig, da in vielen Fällen eine summarische Verbrauchserfassung gemeinsam mit dem Haushaltsstrom erfolgen wird.

1.5 Projektpartner und Projektzeitraum

Das Projekt wurde durchgeführt vom Bits to Energy Lab der ETH Zürich, den Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Enerlytica (vor Dezember 2023 unter dem Namen «Ben Energy») und Hoval. Die Projektpartner brachten verschiedene Kompetenzen in das Projekt ein:

- Das Bits to Energy Lab der ETH Zürich hat Projektleitungserfahrung für zahlreiche nationale und internationalen Forschungsprojekte im Energiebereich, insbesondere für die Entwicklung datengetriebenen Lösungen (mittels Algorithmen) zur Steigerung der Energieeffizienz.
- Die EKZ hat als Energieversorger eine langjährige Erfahrung in der Bereitstellung von Energieeffizienzmassnahmen für Endkunden. Mit seinen Spezialisten für die Adjustierung von Wärmepumpen und in seiner Rolle als Grundversorger genießt sie ein hohes Vertrauen bei den Kunden, insbesondere bei der häufig als sensibel zu betrachtenden Nutzung von persönlichen Verbrauchsdaten und in der Servicebereitstellung.
- Enerlytica (ehemals BEN Energy AG) hatte als Start-Up und Ausgründung aus dem Bits to Energy Lab stets das Ziel, aktuelle Forschungsergebnisse und Algorithmen in nutzbare und wertstiftende Softwarelösungen (z.B. Portale) für Endanwender (Energieversorger und Kunden) zu überführen und diese Systeme für EVUs in der D-A-CH-Region zu skalieren.
- Die Hoval AG ist ein führender Anbieter für Raumklima-Lösungen in mehr als 50 Ländern, wobei Wärmepumpen seit 2008 ein wichtiger Teil der Unternehmensstrategie sind. Als Entwicklerin solcher Heizungen kennt sie die Komplexität der verschiedenen Systemkomponenten im Zusammenspiel und die Stellschrauben zur Steigerung der Energieeffizienz. Im Projekt brachte Hoval zudem ihre Erfahrungen aus einem umfassenden Service- und Wartungsgeschäft von Wärmepumpen ein.

Die Projektlaufzeit umfasste drei Heizperioden im Zeitraum von August 2021 bis März 2024. Die Erhebung und Auswertung der Daten sowie die Entwicklung der Algorithmen und das Testen im laufenden Betrieb fanden über den gesamten Projektzeitraum parallel zueinander statt.



2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte dienen der Übersicht und Zusammenfassung der im Projektverlauf durchgeführten Arbeiten. Die Abschnitte umfassen auch vereinfachte Erklärungen der Funktionsweisen der KI-Algorithmen. Um die Lesbarkeit dieses Berichtes zu erhöhen, wird jedoch auf detaillierte Argumentationen bzgl. der Wahl der Methodik und die Einordnung in bestehende Fachliteratur verzichtet. Diese können jedoch als zusätzliche Information der jeweiligen Publikationen in einem Fachjournal entnommen werden und entsprechende Verweise sind in den folgenden Kapiteln enthalten.

2.1 Datenerhebung und Erstellung eines Gesamtdatensatzes

Ein Arbeitspaket des Projektes befasste sich mit der Erhebung von Daten zu Wärmepumpen im laufenden Betrieb; der Datensatz diente als Grundlage für die Entwicklung von KI-basierten Algorithmen zur Bewertung der Energieeffizienz. Wesentlicher Bestandteil des Datensatzes sind Lastgänge in Form von elektrischen Energiemessungen in 15-minütiger Auflösung (im Folgenden als «Smart-Meter-Daten» bezeichnet). Es wurden ausserdem für jeden Haushalt die Temperaturmessungen der nächstgelegenen Wetterstation extrahiert und durch eine Abfrage im Gebäude- und Wohnungsregister Informationen über das jeweilige Gebäude ermittelt. Ebenfalls Teil des Datensatzes sind Protokolle der EKZ-Energieberatung, welche im Rahmen von «Heizungschecks» bei den Haushalten vor-Ort Optimierungen an den Wärmepumpeneinstellungen vorgenommen haben.

Der Datensatz wurde teils maschinell, teils manuell bereinigt und kodiert, um ihn für das Training und die Evaluation von KI-Algorithmen in ein maschinenlesbares Format zu bringen. Zum Ende des Projektes (April 2024) umfasst der Datensatz 214 Haushalte, für welche sowohl ein Beratungsprotokoll als auch Smart-Meter-Daten vorliegen. Einhundertdreiundneunzig weitere Haushalte haben zwar ein Beratungsangebot wahrgenommen, jedoch keinen aktiven Smart-Meter, sodass für diese Haushalte nur ein Beratungsprotokoll vorliegt. Da drei Haushalte zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten jeweils eine Beratung wahrgenommen haben, beläuft sich die Gesamtanzahl der Protokolle auf 410. Für einige weitere Haushalte sind Smart-Meter-Daten vorhanden, jedoch liegen keine weitere Auskunft über die Einstellung der Wärmepumpen (keine Beratungsprotokolle) vor, sodass diese Haushalte ausschliesslich als Kontrollgruppe dienen können, um den Praxisbetrieb der Algorithmen zu testen.

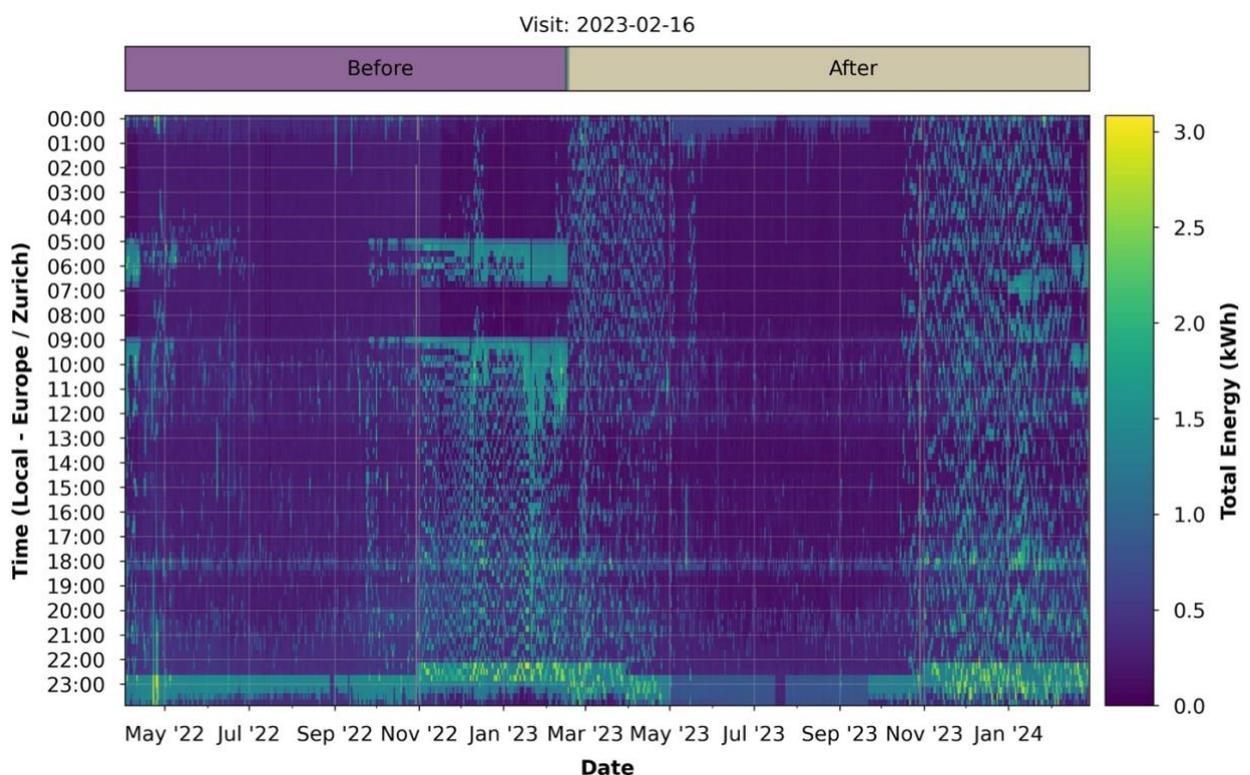
Die Zeitreihen der Lastgangdaten unterscheiden sich teilweise stark voneinander in Bezug auf die durchgängige Datenverfügbarkeit. Diese ist abhängig vom Zeitpunkt der Installation des Smart-Meters sowie davon, ob der Smart-Meter von Ausfällen in der Messung betroffen war. Ausserdem gibt es Unterschiede darin, wie viele Daten bereits vor dem Termin einer Energieberatung aufgezeichnet wurden. Dies bedeutet, dass es vorkommen kann, dass ein Haushalt eine Energieberatung wahrgenommen hat (d.h. ein Beratungsprotokoll vorhanden ist) und einen aktiven Smart-Meter hat, welcher aber erst nach der Beratung installiert wurde. Im Durchschnitt liegt die Gesamtzahl aufgezeichneter Daten eines Haushaltes bei 837 Tagen, wobei für 161 Haushalte (ca. 75%) Messungen vor der Beratung vorliegen und für 204 Haushalte (ca. 95%) Messungen im Zeitraum danach. Auch unterscheiden sich die Haushalte teils darin, ob die Wärmepumpe separat von anderen Verbrauchern gemessen wurde (d.h. zwei oder mehr Smart-Meter verbaut sind) oder nicht. Die Vielfalt im Datensatz bildet eine reale Umgebung ab, welche die Anwendbarkeit der Algorithmen im Praxisbetrieb unter verschiedenen Bedingungen sicherstellt.

Hinweis: Die in den folgenden Abschnitten dargelegten Arbeiten wurden vor oder während der Erhebung des Datensatzes durchgeführt. Daher sind die zugrunde liegenden Trainingsdaten der in den folgenden Absätzen beschriebenen Algorithmen nicht immer dieselben gewesen. Die grundsätzliche Art der Daten (bspw. 15-minütige Messungen, unterschiedliche Anzahl an Smart-Metern pro Haushalt, Datenverfügbarkeit, etc.) sind jedoch identisch und entsprechen den obigen Erläuterungen.



2.2 Beispiel eines Lastgangs eines Haushaltes mit Wärmepumpe

Bevor auf die Methodik und Ergebnisse der Algorithmen eingegangen wird, soll dieser Abschnitt exemplarisch die Smart-Meter-Daten einer Wärmepumpe und deren Veränderung bei Optimierung aufzeigen. Grafik 1 zeigt daher beispielhaft den 15-minütigen Lastgang des elektrischen Energieverbrauchs eines Haushaltes in Form einer sogenannten «Heat Map». Diese Darstellung ermöglicht es, regelmässige Verbrauchsmuster über längere Zeiträume beobachten. Hierbei ist das Datum einer Messung auf der x-Achse aufgetragen und die Uhrzeit auf der y-Achse. Der elektrische Energieverbrauch zum jeweiligen Zeitpunkt lässt sich daher als farblich codierte Pixel in einer zwei-dimensionalen Darstellung wie folgt abbilden.



Grafik 1: *Beispielhafter Lastgang 15-minütiger elektrischer Energiemessungen eines Haushaltes mit Wärmepumpe (vor und nach Energieberatung bzw. Wärmepumpenoptimierung) – dargestellt als sogenannte «Heat Map».*

In Grafik 1 handelt es sich um das Beispiel eines Haushaltes mit nur einem Smart-Meter, welcher die Wärmepumpe zusammen mit allen anderen Verbrauchern des Haushaltes misst, wobei die Wärmepumpe den Verbrauch dominiert. Die Smart-Meter-Daten umfassen einen Zeitraum von Anfang März 2022 bis Ende Februar 2024. Im Februar 2023 hat der Haushalt eine Energieberatung des EKZ in Anspruch genommen, wobei ein Energieberater die Wärmepumpe vor-Ort optimiert hat.

In der Grafik zeigt sich eine klare Veränderung des Verbrauchsmuster nach der Beratung, da der Energieberater eine vorher aktivierte Nachtabsenkung deaktiviert hat (vgl. Aktivität zwischen 00:00 und 05:00 Uhr vor und nach der Beratung). Des Weiteren sind typische Ein- und Ausschaltungen der Wärmepumpe an einem Tag zu beobachten (d.h. eine Art relativ scharf begrenztes Muster beim Lesen in Spalten), sowie ein erhöhter Betrieb in kalten Wintermonaten im Vergleich zu warmen Sommermonaten, in welchen kein Heizbetrieb erfolgt. Um ca. 23 Uhr ist ausserdem ein weitgehend



konstanter Verbrauch über alle Jahreszeiten zu beobachten, welcher einem typischen Muster für die Erzeugung von Brauchwarmwasser entspricht.

2.3 Typische Probleme auffälliger Wärmepumpen

Wärmepumpen im Feld können durch verbesserte Einstellungen und Betriebsoptimierung zu einer höheren Energieeffizienz verholfen werden. Die 410 Beratungsprotokolle der durch die Energieberater durchgeführten Vor-Ort-Inspektionen bieten detaillierte Einblicke in die Häufigkeit typischer Problemklassen und Fehleinstellungen. Im Folgenden sind diese nach absteigender Häufigkeit gelistet. Eine detailliertere Auswertung inkl. Kategorisierung und Ansätze zur Problemlösung sind im Folgenden «open access»-Artikel publiziert (allerdings unter Verwendung von 228 Protokollen, da die Auswertung zu einem früheren Zeitpunkt als dem Projektabschluss stattfand).

Andreas Weigert. 2022. Identification and classification of heat pump problems in the field and their implication for a user-centric problem recognition. In Energy Informatics 5, 70.

Direktlink: <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00250-3>

Tabelle 1: Typische Probleme und Konfigurationen von Wärmepumpen (auf Basis von 410 Beratungsprotokollen von Vor-Ort-Inspektionen der EKZ-Energieberater)

Problem / Fehleinstellung	Relative Häufigkeit	Absolute Häufigkeit
Heizkurve zu hoch eingestellt	40,98 %	168
Nachtabenkung fälschlicherweise aktiviert	36,10 %	148
Heizgrenze zu hoch eingestellt	25,61 %	105
Entkalkung des Brauchwarmwassers notwendig	17,80 %	73
Expansionsanlage falsch eingestellt	13,41 %	55
Probleme bei Luftführung von Luftwärmepumpen	11,25 %	27
Wärmepumpe falsch dimensioniert	10,00 %	41
Leitungen nicht gut genug isoliert	9,02 %	37
Brauchwarmwassertemperatur falsch eingestellt	7,80 %	32
Soledruck bei Erdwärmepumpe nicht in Ordnung	7,19 %	12
Umwälzpumpenregulierung falsch eingestellt	6,34 %	26
Temperatur der Erdsonde bei Erdwärmepumpe zu niedrig	5,99 %	10
Einbau von Thermostatventilen zur Einzelraumregulierung empfohlen	4,88 %	20
Wärmepumpe verschmutzt	3,17 %	13
Wärmepumpe technisch nicht in Ordnung	1,46 %	6
Grundsätzliche Funktionen nicht in Ordnung	1,46 %	6

Hinweis: Die relativen Häufigkeiten beziehen sich auf alle 410 inspizierten Wärmepumpen, ausser bei Problemen, bei denen explizit nach Wärmepumpentyp unterschieden wird. Die Anzahl der Luftwärmepumpen liegt bei 240 (58,54 %) und die der Erdwärmepumpen bei 167 (40,73%).



2.4 Bewertung der elektrischen Energieersparnis durch Wärmepumpenoptimierung

Durch einen Vergleich der Smart-Meter-Daten vor und nach einer Wärmepumpenoptimierung durch einen Energieberater lässt sich der Effekt der erzielten Einsparung in Bezug auf den Elektrizitätsverbrauch quantifizieren. In einer Auswertung von 41 Haushalten mit Energieberatung und 256 Haushalten ohne Energieberatung zeigt sich das hohe Potential der Wärmepumpenoptimierung. Die Hälfte aller Haushalte erzielte eine durchschnittliche Ersparnis von 1'805 kWh (15.2%) elektrischer Energie pro Jahr, was bei einem durchschnittlichen Strompreis von 32,14 Rappen⁴ eine Ersparnis jährlicher Betriebskosten pro Haushalt in Höhe von ca. 580 Schweizer Franken entspricht. Diese Einsparung ist mehr als der durchschnittliche Betrag von ca. 400 Schweizer Franken, den ein Haushalt für den Besuch eines Energieberaters aufbringen muss. Das bedeutet, dass sich bei der Hälfte der Haushalte die Beratung bereits nach der ersten Heizungsperiode rechnet. Eine Beschreibung der Methoden sowie detaillierte Analysen und Auswertungen sind der folgenden «open access»-Publikation zu entnehmen:

Andreas Weigert, Konstantin Hopf, Sebastian A. Günther, Thorsten Staake. 2022. Heat pump inspections result in large energy savings when a pre-selection of households is performed: A promising use case of smart meter data. In Energy Policy, Volume 169, 113156, ISSN 0301-4215.

Direktlink: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113156>

Vereinfachte Zusammenfassung der Funktionsweise des Algorithmus:

Für die Analysen wurden monatliche Zählerstände der Smart-Meter-Daten verwendet, welche das EVU auch für die Abrechnung verwendet, d.h. ein kumulativer Zählerstand zum Ende des letzten Tages eines Monats minus der zum Ende des letzten Tages des Vormonats. Da für Haushalte mit einer Energieberatung der Termin der Beratung bekannt ist, wurde für jeden monatlichen Verbrauch ermittelt, ob es sich um eine Beobachtung vor oder nach einer Beratung handelt. Für jeden Haushalt der Kontrollgruppe wurde zusätzlich ein fiktiver Beratungstermin in der Mitte des verfügbaren Datenzeitraums angenommen. Nicht berücksichtigt wurden Haushalte ohne ein vollständiges Jahr an verfügbaren Daten und mit weniger als drei Monaten an Daten nach der Energieberatung. Dies führte zu einer Summe von 14'815 monatlichen Werten, welche Teil der Modelle und Analysen waren. Anschliessend wurde für jeden Haushalt ein lineares Regressionsmodell geschätzt, welches den monatlichen elektrischen Energieverbrauch in Abhängigkeit der monatlichen Anzahl an Heiztagen und einer binären Variable für den Zeitpunkt vor oder nach der Beratung modelliert. Dieses Modell liefert retrospektiv die durchschnittliche monatliche Einsparung pro Haushalt, welche durch eine Multiplikation mit der Zahl zwölf in eine jährliche Einsparung überführt werden kann. Da sich die Einsparung auch in einen prozentualen Wert umrechnen lässt, können auch Haushalte verschiedener Grössen und Eigenschaften miteinander verglichen werden und lassen sich «Viel-Sparer» von «Wenig-Sparern» retrospektiv unterscheiden. Hierbei zeigt sich wie eine breite Spanne. Während die Hälfte der Haushalte ein hohes Einsparpotential aufweist, gibt es auch Haushalte, bei denen sich durch einen Besuch eines Energieberaters keine grossen Einsparungseffekte erzielen lassen, bspw. da die Wärmepumpenanlagen bereits effizient laufen. Dies motiviert wie im ersten Kapitel des Berichts beschrieben eine geeignete Auswahl an Haushalten und deren datenbasierte Ansprache, um die limitierte Ressourcen einer Energieberatung gezielt einzusetzen und deren maximale Wirksamkeit zu entfalten.

⁴ Quelle: Schweizer Radio und Fernsehen, SRF, <https://www.srf.ch/news/schweiz/strompreise-schweiz-2024-so-stark-steigen-die-strompreise-in-ihrer-gemeinde> → abgerufen am 25.04.2024.



2.5 Erkennung von Wärmepumpen-Installationen

Da Wärmepumpen eine grosse Last für die Stromnetze darstellen, ist es für Netzbetreiber relevant zu wissen, wo Wärmepumpen installiert sind, um einen stabilen Netzbetrieb zu garantieren. Zwar ist eine Installation häufig anmeldepflichtig, jedoch kann es in der Praxis zu Unvollständigkeiten im Wissen darüber kommen, ob eine Wärmepumpe installiert ist und um welchen Typ es sich handelt. Daher hat das «Bits to Energy Lab» der ETH Zürich vor Beginn des Forschungsprojektes an einer Methode gearbeitet, mittels welcher sich unter Verwendung von Smart-Meter-Daten, Wetterdaten und Geodaten ermitteln lässt, ob eine Wärmepumpe vorhanden ist oder nicht (AUC=0,82). Auch der Typ der Anlage (Luft- oder Erdwärmepumpe) lässt sich bestimmen (AUC=0,86), sowie deren Alter (AUC=0,73). Die Methodik und Ergebnisse der Evaluierung sind im folgenden «open access»-Artikel publiziert:

Andreas Weigert, Konstantin Hopf, Nicolai Weinig, Thorsten Staake. 2020. Detection of heat pumps from smart meter and open data. In Energy Informatics 3 (Suppl 1), 21.

Direktlink: <https://doi.org/10.1186/s42162-020-00124-6>

Hinweis: Die Arbeit zur Erkennung von Wärmepumpen-Installationen mittels Smart-Meter-Daten ist aufgrund der thematischen Nähe der Vollständigkeit halber gelistet. Sie war jedoch kein direkter Bestandteil des hier dokumentierten Forschungsprojektes, sondern ist im Rahmen eines anderen vom BFE-geförderten Projektes vorher durchgeführt worden⁵. Aus diesem Grund wird die Methodik hier nicht weiter zusammengefasst. Es sei jedoch erwähnt, dass diese einer ähnlichen Funktionsweise folgt wie in den Beschreibungen des nächsten Abschnitts. Aus den Zeitreihen wurden sogenannte «Features» extrahiert, auf deren Basis verschiedene Klassifikationsalgorithmen trainiert und getestet wurden.

2.6 Unterscheidung modulierender und nicht-modulierender Wärmepumpen

Wärmepumpen lassen sich neben ihrer Energiequelle (bspw. Luft- oder Erdwärme) auch hinsichtlich ihrer Modulationsfähigkeit unterscheiden. Während modulierende Wärmepumpen (sogenannten «Inverter»-Wärmepumpen) die Kompressorgeschwindigkeit kontinuierlich anpassen können, um je nach Wärmebedarf zu regulieren, schalten nicht-modulierende Wärmepumpen lediglich ein oder aus und arbeiten mit einer konstanten Kompressorgeschwindigkeit. Die verschiedenen Systemtypen unterscheiden sich also häufig auch in ihrem Ein- und Ausschaltungsverhalten, sowie in ihren Gesamtlaufzeiten. Da nicht-modulierende Wärmepumpen eher als die älteren, ineffizienteren Systeme gelten, kann eine Identifikation des Systemtyps als Indikator dafür dienen, ob es sich per se eher um ein effizientes oder ineffizientes Wärmepumpenmodell handelt. Aus diesem Grund hat das «Bits to Energy Lab» der ETH Zürich KI-Algorithmen entwickelt, mit denen sich präzisieren lässt, ob es sich um eine modulierende oder nicht-modulierende Anlage handelt. Eine Woche an 15-minütigen Smart-Meter-Daten einer Wärmepumpe, welche auf einem Zähler mit allen anderen Gerätschaften eines Haushaltes gemessen wurde, reicht hierfür bereits aus, um sehr zuverlässige Ergebnisse zu erzielen (AUC = 0,976). Eine detaillierte Beschreibung der Methoden und Auswertung ist der folgenden Publikation zu entnehmen (der Programmiercode ist ebenfalls publiziert).

⁵ Projektnummer: SI/501521, Titel: «SmartLoad – Smart-Meter-Datenanalyse für die Steigerung der Energieeffizienz im Haushaltsbereich», Online abrufbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=40143>



Tobias Brudermueller, Florian Wirth, Andreas Weigert and Thorsten Staake. 2022. Automatic Differentiation of Variable and Fixed Speed Heat Pumps With Smart Meter Data. In 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, Singapore, pp. 412-418.

Direktlink: <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961055>

Code: <https://github.com/tbrumue/smd-hp-type-detection>

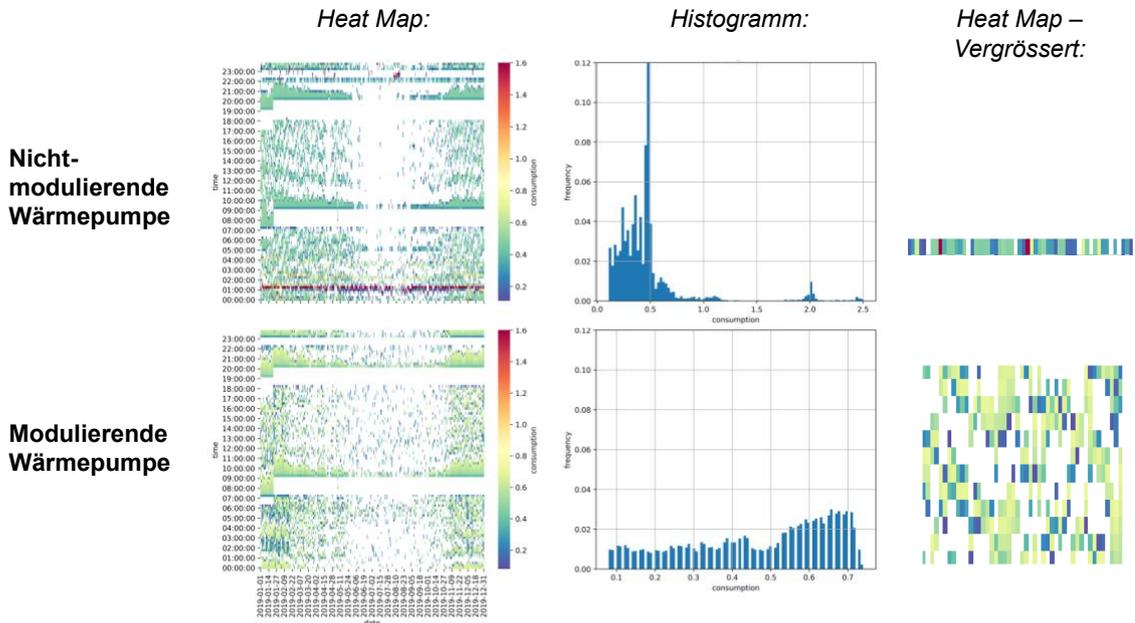
Hinweis: Die publizierte Version des Artikels ist im Gegensatz zu allen anderen Artikeln, auf die in diesem Bericht referenziert wird, nicht kostenfrei verfügbar und kann aufgrund des Copyrights leider nicht in identischer Weise in diesem Bericht veröffentlicht werden. Die Version zum Zeitpunkt der Einreichung beim Fachjournal (d.h. der sogenannte «Preprint») ist jedoch im Anhang an diesen Bericht zu finden.

Copyright: © 2022 IEEE. Reprinted, with permission, from T. Brudermueller, F. Wirth, A. Weigert, T. Staake, “Automatic Differentiation of Variable and Fixed Speed Heat Pumps With Smart Meter Data”, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm).

Vereinfachte Zusammenfassung der Funktionsweise des Algorithmus:

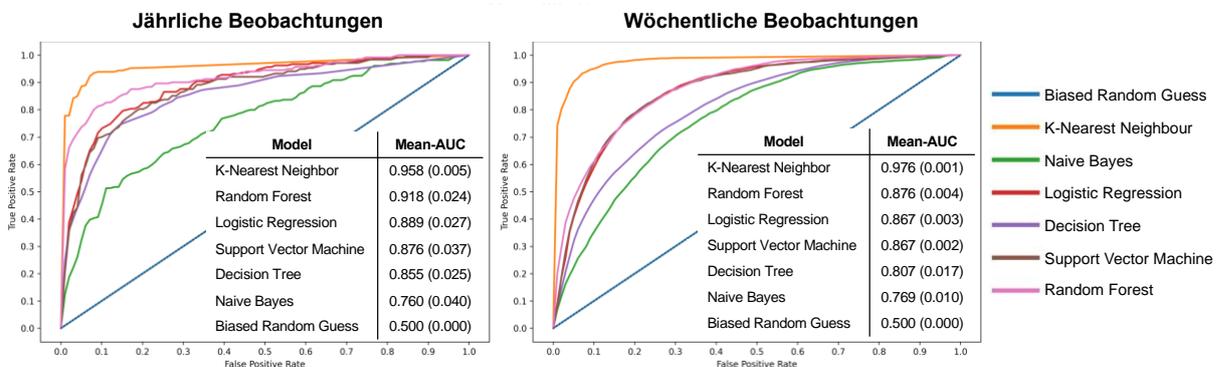
Der Original-Datensatz enthält keine Informationen darüber, ob die Wärmepumpen modulierend oder nicht-modulierend sind. Daher haben zwei Energieberater mit Expertenwissen diese Information pro Wärmepumpe aus Visualisierungen der Smart-Meter-Daten in Form von «Heat Maps» und Histogrammen abgeleitet. Grafik 2 zeigt beispielhaft den Unterschied einer modulierenden und einer nicht-modulierenden Wärmepumpe. Während eine modulierende Wärmepumpe farbliche Gradienten in der «Heat Map» und ein breites Leistungsspektrum im Histogramm aufweist, zeigt das Histogramm einer nicht-modulierenden Wärmepumpen eine klaren Spitze in der Häufigkeit der Messwerte an der Stelle der Maximalleistung der Wärmepumpe. Messwerte unterhalb dieser Spitze können dennoch auftreten, da das System auch innerhalb eines 15-minütigen Messintervalls ein- oder ausschalten kann. In der «Heat Map» einer nicht-modulierenden Wärmepumpe zeigt sich dies darin, dass es zum Zeitpunkt der Ein- oder Ausschaltung farbliche Abweichungen von den Messwerten dazwischen gibt. Die nicht ein- oder ausschaltungsbezogenen Messwerte wiederum sind nahezu konstant.

Nach der Ableitung des Typs eines jeden Systems wurde die Kategorisierung binär codiert, d.h. nicht-modulierend = 1, modulierend = 0. Das Ziel eines Algorithmus ist es den Zusammenhang der Smart-Meter-Daten zu dieser binären Zahl zu erlernen und die Kategorie anschliessend in der Praxis korrekt vorherzusagen. Für das Training des Algorithmus wurden die Daten von 171 Haushalten verwendet und nur Messungen der Monate Oktober bis Februar miteinbezogen, um sicherzustellen, dass es sich um Beobachtungen während der Heizperiode handelt. Ausserdem wurden Messungen mit einer Datenverfügbarkeit von weniger als 15% ausgeschlossen. Anschliessend wurden die Daten in 16'498 wöchentlichen, 4'435 monatlichen und 764 jährlichen Beobachtungen zusammengefasst. Dies dient der Standardisierung der Eingabedaten, ermöglichte dem Algorithmus zugleich aber auch aus der Varianz der verschiedenen Beobachtungen zu lernen. Eine Beobachtung enthält also mehrere Messwerte, z.B. besteht eine vollständige Woche aus 672 Messungen elektrischer Energie bezogen auf 15-Minuten Intervalle. Eine Beobachtung kann man sich also als eine Verteilung vorstellen, dessen Eigenschaften sich auch durch statistische Werte beschreiben lassen, z.B. Mittelwert und Standardabweichung.



Grafik 2: Beispielhafte Darstellung der Unterschiede zwischen einer modulierenden und einer nicht-modulierenden Wärmepumpe.

Im nächsten Schritt wurden für jede Beobachtung bis zu 78 verteilungsbezogene Eigenschaften berechnet - sogenannte «Features». Diese «Features» wurden empirisch ermittelt und sind so entwickelt worden, dass sie speziell die oben beschriebenen Unterschiede zwischen Wärmepumpen verschiedenen Typs erfassen. So liefert die «Feature»-Berechnung aus einer einzelnen Beobachtung mit mehreren Messwerten einen Vektor standardisierter Länge als Definition eines mehrdimensionalen Datenpunktes. Diese Vektoren dienen wiederum als Eingabe für verschiedene Klassifikationsalgorithmen (bspw. «Random Forest» oder «K-Nearest Neighbor»), deren Performanz miteinander verglichen wurde. Grafik 3 zeigt das Ergebnis in Form von ROC-AUC-Kurven angewendet auf die jährlichen und wöchentlichen Beobachtungen. Die blaue, diagonale Linie entspricht dem Ergebnis willkürlichen Ratens. Damit ein KI-Algorithmus generalisiert und zeigt, dass er «etwas gelernt hat», muss dessen Kurve links oberhalb der Diagonale liegen – je weiter in der Ecke, desto besser. Es zeigt sich klar, dass das «K-Nearest Neighbor» die besten und zuverlässigsten Ergebnisse liefert.

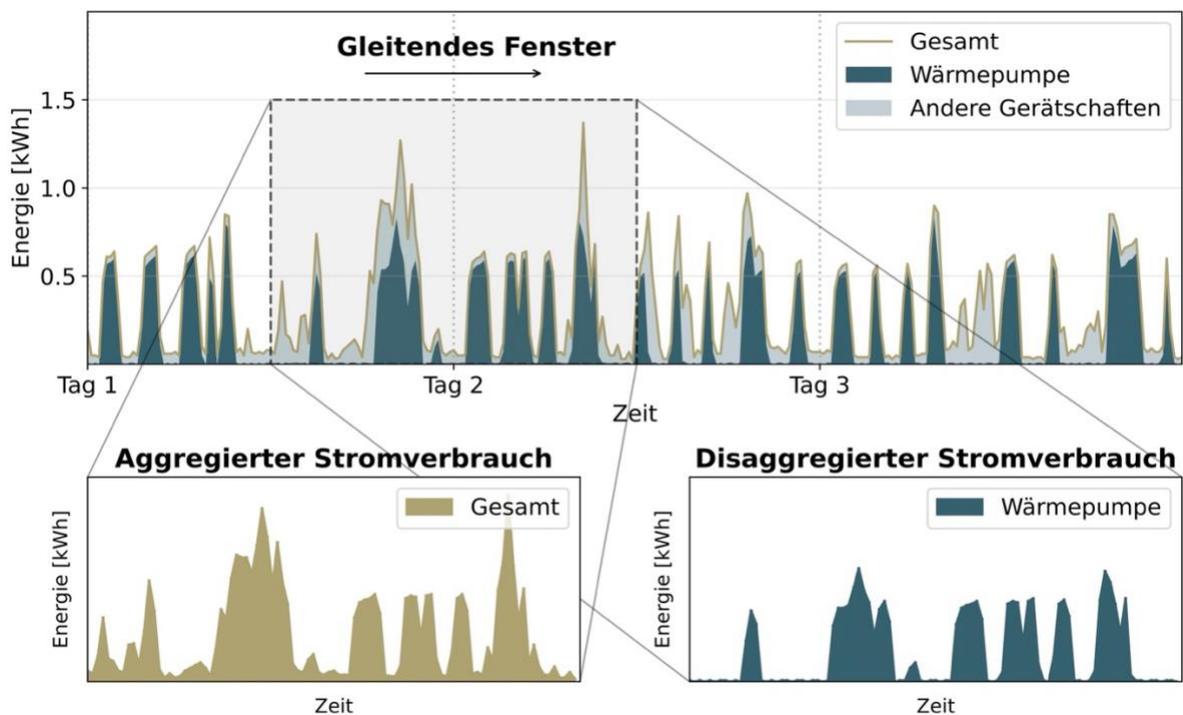


Grafik 3: ROC-AUC Kurven verschiedener Klassifikationsmodelle zur Vergleichbarkeit der Performanz unter Verwendung der Smart-Meter-Daten aggregierter Zähler.



2.7 Disaggregation eines Wärmepumpensignals aus einer Gesamtmessung

In einigen Fällen verfügen Haushalte über einen separaten Smart-Meter, welcher die Wärmepumpe getrennt von anderen Verbrauchern misst. Dies ist bspw. dann der Fall, wenn die Wärmepumpe zu einem vergünstigten Tarif abgerechnet wird und das EVU im Gegenzug die Flexibilität erhält, den Wärmepumpenbetrieb zu festgelegten Tageszeiten zu deaktivieren. Da diese separaten Wärmepumpenmessungen jedoch eher die Ausnahme als die Regel sind, ist es von hoher praktischer Relevanz den Verbrauch der Wärmepumpe aus einer Gesamtmessung eines Smart-Meters zu isolieren. Dieser Schritt ist häufig notwendig, um weitere Analysen durchführen zu können, die eine Aussage über den Zustand und Betrieb einer Wärmepumpe mittels Smart-Meter-Daten ermöglichen. Ein Beispiel der Zusammensetzung des elektrischen Energieverbrauchs mit separaten Smart Metern ist in Grafik 4 abgebildet.



Grafik 4: Beispielhafte Darstellung des aggregierten Verbrauchs elektrischer Energie und disaggregierten Signals der Wärmepumpe.

Während sich eine Vielzahl an Forschungsbeiträgen grundsätzlich mit der Disaggregation von elektrischen Verbrauchern aus Smart-Meter-Daten unter dem Begriff «non-intrusive load monitoring» beschäftigt, gibt es kaum Studien, welche die praktische Anwendung im Blick haben. So arbeiten vorangegangene Studien häufig mit hochauflösten Messungen von Phasenwinkel, Wirk- und Blindleistung in einer Frequenz von 1 Hertz und/oder lassen die besonders komplexen Wärmepumpen einfach aussen vor. In der Entwicklung von KI-Algorithmen, welche die Wärmepumpe auch mit Messungen elektrischer Energie in 15-minütiger Auflösung disaggregieren können (also mit Daten, die dem Industriestandard entsprechen), ist in diesem Forschungsprojekt also Pionierarbeit mit hoher praktischer Relevanz geleistet worden. Die Studie ist im folgenden «open access»-Artikel publiziert, und es wurden ebenfalls der Programmiercode und die KI-Modelle veröffentlicht.



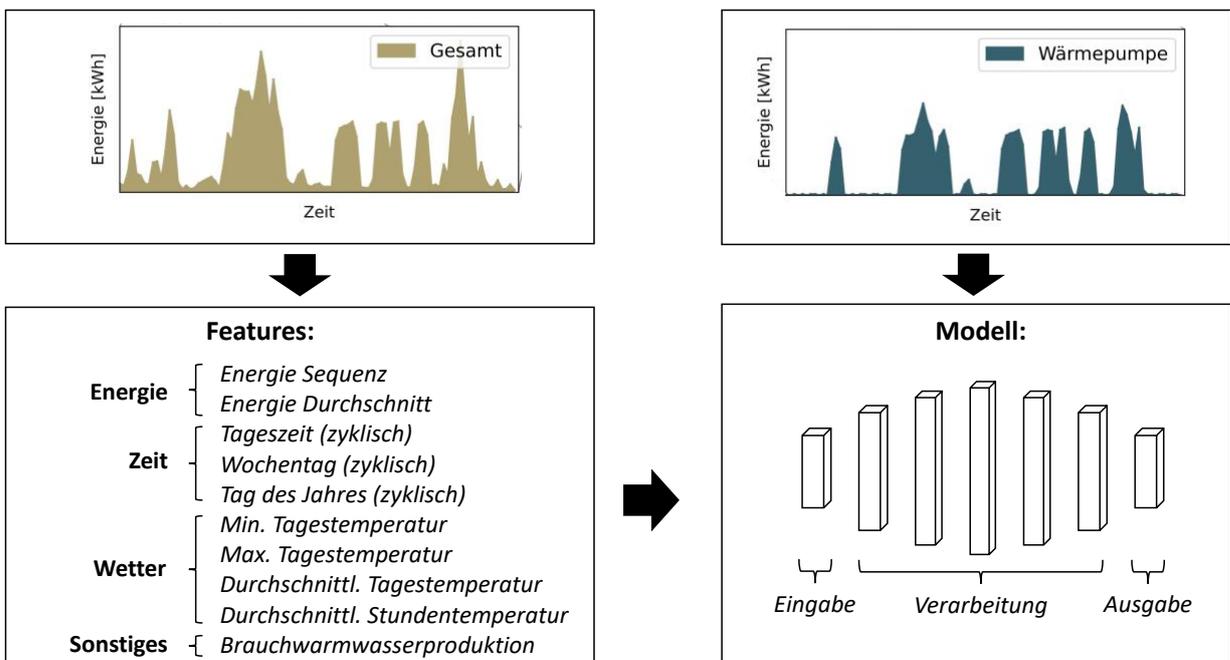
Tobias Brudermueller, Fabian Breer, Thorsten Staake. 2023. Disaggregation of Heat Pump Load Profiles From Low-Resolution Smart Meter Data. In Proceedings of the 10th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 228–231.

Direktlink: <https://doi.org/10.1145/3600100.3623731>

Code: <https://github.com/tbrumue/smd-hp-disaggregation>

Vereinfachte Zusammenfassung der Funktionsweise des Algorithmus:

Die Methodik des hier entwickelten Algorithmus beruht auf der Verwendung vollständig vernetzter, mehrschichtiger, künstlicher neuronaler Netze, welche mathematisch der Funktionsweise biologischer Neuronen nachempfunden sind. Wie in Grafik 4 abgebildet, läuft ein gleitendes Fenster über die Zeitreihe und extrahiert innerhalb dieses Fensters die Sequenz der Smart-Meter-Messungen. Diese Sequenz wird vollständig als Eingabe für den Disaggregationsalgorithmus verwendet. Zusätzlich dienen weitere aus dem Fenster abgeleitete Informationen bezüglich des Zeitpunktes der Messungen und der Wetterdaten als Eingabe. Eine Wärmepumpe, die neben dem Heizbetrieb auch für die Produktion von Brauchwarmwasser verwendet wird, weist typischerweise auch Aktivitäten im Sommer auf. Aus diesem Grund wurde dieses Wissen ebenfalls den neuronalen Netzen im Trainingsprozess als Information zur Verfügung gestellt. Grafik 5 veranschaulicht eine Übersicht aller Ein- und Ausgabeparameter. Es wurden verschiedene Fenstergrößen und Schrittweiten zwischen zwei Stunden und einem Tag getestet. Hierbei zeigte sich jedoch, dass dies keinen signifikanten Einfluss auf die Performanz hatte. Wichtiger zeigte sich hingegen die Einbindung der Kenntnis darüber, ob eine Wärmepumpe auch für die Brauchwarmwasserproduktion verwendet wird oder nicht. Ist dieses Wissen vorhanden und wird in die Vorhersage eingebunden, führt dies durchschnittlich zu einer Verbesserung der Vorhersagen von ca. 3-7%. Das beste Modell erzielt somit einen mittleren absoluten Fehler von 0.068 kWh bezogen auf ein 15-minütiges Messintervall.



Grafik 5: Veranschaulichung der Ein- und Ausgabeparameter der neuronalen Netze zur Disaggregation von Wärmepumpensignalen.



2.8 Zyklisches Verhalten als Indikator für auffällige Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe schaltet in regelmässigen Abständen ein und aus. Dieses zyklische Verhalten hinterlässt prominente Muster in den Smart-Meter-Daten, die es erlauben, den laufenden Betrieb zu bewerten. So nutzen die Energieberater der EKZ beispielsweise die jährlichen Betriebsstunden, die Anzahl der Schaltzyklen und den elektrischen Gesamtenergieverbrauch einer Wärmepumpe als Indikatoren dafür, ob eine Anlage zu viel oder zu wenig läuft, effizient oder ineffizient ist und/oder zu klein oder zu gross dimensioniert. Im Verlauf des Forschungsprojektes ist daher ein Algorithmus entwickelt worden, um diese Parameter aus Smart-Meter-Daten automatisiert abzuleiten und zu bewerten. Unter Einbezug der Aussentemperatur als Einflussfaktor ist ausserdem analysiert worden, wie sich die Indikatoren in unterschiedlichen Umgebungen verhalten – bspw. in Gebäuden verschiedenen Alters und verschiedener Grössen, sowie bei Wärmepumpen unterschiedlichen Typs (Luft- vs. Erdwärme) und verschiedener Leistungszahlen. Während für die Bewertung der Dimensionierung einer Wärmepumpe und des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs zusätzliche Kontextinformationen notwendig sind, haben die Analysen ergeben, dass die Bewertung des Ein- und Ausschaltverhaltens auch kontextunabhängig möglich ist. Der Grund hierfür ist, dass sich das Verhalten der Wärmepumpen in verschiedenen Umgebungen bei einer Normalisierung über die Aussentemperatur nur geringfügig unterscheidet. Dass bedeutet, dass die entwickelten Algorithmen auch dann in der Praxis verwendet werden können, wenn keine Kontextinformationen vorhanden sind. Insbesondere ist es aber auch gelungen, mittels automatisierter, statistischer Vergleiche Ausreisser im Verhalten zu erkennen, sodass entsprechende Haushalte mit auffälligen Wärmepumpen zielgerichtet angesprochen werden können. Eine Erklärung der Algorithmen und detaillierte Analysen sind im folgenden «open access»-Fachartikel zu finden, wobei die Analysedaten und Implementierungen in Form von Programmiercode ebenfalls frei zugänglich gemacht wurden.

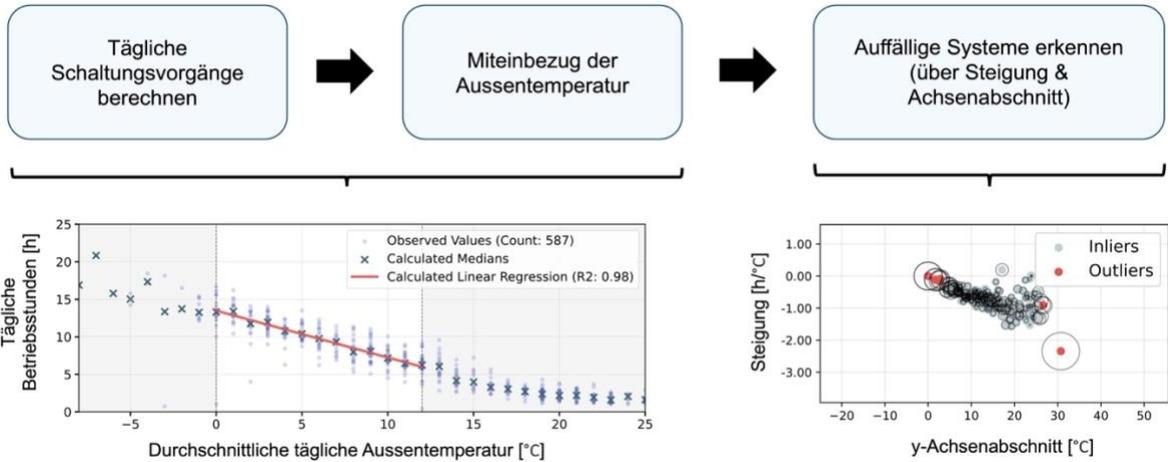
Tobias Brudermueller, Markus Kreft, Elgar Fleisch, Thorsten Staake. 2023. Large-scale monitoring of residential heat pump cycling using smart meter data. In Applied Energy, Volume 350, 2023, 121734, ISSN 0306-2619.

Direktlink: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121734>

Code: <https://github.com/tbrumue/smd-hp-cycling>

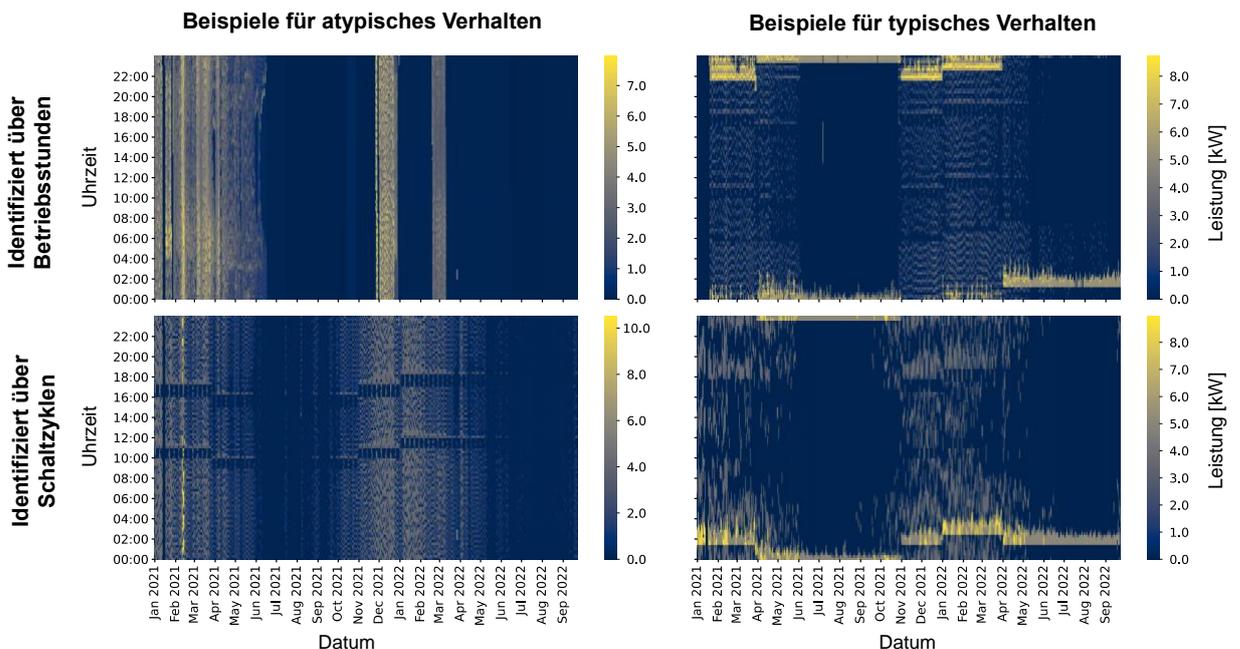
Vereinfachte Zusammenfassung der Funktionsweise des Algorithmus:

Für eine Bewertung des zyklischen Verhaltens einer Wärmepumpe ist es im ersten Schritt notwendig, Informationen über die Ein- und Ausschaltvorgänge und die Dauer einer jeden Wärmepumpenaktivität aus den Smart-Meter-Daten abzuleiten. Dies geschieht durch eine verteilungsbasierte Schätzung der Grundlast und einen anschliessenden Vergleich jeder elektrischen Energiemessung. Dort wo ein Messwert, welcher die Grundlast unterschreitet, gefolgt wird von einem Wert, welcher die Grundlast überschreitet, ist eine Einschaltung der Wärmepumpe gegeben. Analog entspricht eine Messung, welche die Grundlast unterschreitet, die vorherige Messung jedoch nicht, einer Ausschaltung. Auf eine Einschaltung folgt daher immer eine Ausschaltung und deren zeitliche Differenz entspricht der Dauer eines einzelnen Wärmepumpenzyklus. Somit lassen sich so pro Tag die Anzahl der Zyklen, die Anzahl der Betriebsstunden und deren Verhältnis zueinander, sowie die durchschnittliche Länge eines Zyklus ermitteln. Wird die tägliche Durchschnittstemperatur miteinbezogen, zeigt sich ein linearer Zusammenhang wie in Grafik 6 abgebildet: je geringer die Aussentemperatur, desto länger bspw. die Laufzeit einer Wärmepumpe. Durch eine lineare Regression kann dieser Zusammenhang für jede zu untersuchende Metrik einer Wärmepumpe in einem zwei-dimensionalen Punkt beschreiben werden, welcher gegeben ist durch den y-Achsenabschnitts und die Steigung des Regressionsmodells. Werden diese Werte für eine Vielzahl an Wärmepumpen berechnet, ergibt sich eine bivariate Verteilung pro Metrik. Durch die Verwendung eines KI-Algorithmus für die Erkennung von Ausreissern kann so unterschieden werden zwischen Wärmepumpen, die atypisches und typisches Verhalten aufweisen. Dies ist in Grafik 6 durch unterschiedlich farbige Punkte im rechten Graphen dargestellt.



Grafik 6: Beispiel einer linearen Regression täglicher Betriebsstunden über die Aussentemperatur und Anwendung eines KI-Algorithmus zur Erkennung von Ausreißern bei mehreren Wärmepumpen.

Im Rahmen der publizierten Analysen wurde die oben beschriebene Methodik auf 243 Wärmepumpen angewendet, wobei 41 Anlagen (16.9%) als auffällig erkannt wurden. Grafik 7 zeigt exemplarisch «Heat Map»-Beispiele von Wärmepumpen, die nach Bewertung des Algorithmus typische bzw. atypische Muster in den Betriebsstunden oder der Anzahl der Zyklen aufweisen. So hat der Algorithmus beispielsweise eine Wärmepumpe entdeckt, welche auffällig lange läuft (links oben) und eine Anlage mit besonders vielen Einschaltungen (rechts unten). Es sei an der Stelle erwähnt, dass die Methodik durch die Einbindung der Aussentemperatur statt des Zeitstempels von Smart-Meter-Daten auch mit Datenlücken durch fehlende oder fehlerhafte Messungen umgehen kann, was ebenfalls in den zwei linken Grafiken sichtbar wird.



Grafik 7: Beispiele für atypisches und typisches Verhalten, welche durch Anwendung des Algorithmus identifiziert wurden.



2.9 Überführung der Ergebnisse in die Praxis: Einbindung in Online-Tools

Das Forschungsprojekt «KI in der Wärmepumpenberatung» hatte nicht nur die Erforschung und Entwicklung der Algorithmen für die Bewertung des Wärmepumpenbetriebs zum Ziel, sondern auch deren Überführung in die Praxis. Dabei stand auch ein Test der Skalierbarkeit im Fokus und sollte es realen Schweizer Haushalten bereits vor Abschluss des Projektes ermöglicht werden, von den Entwicklungen profitieren zu können. Die Algorithmen und Analyse-Ergebnisse der ETH Zürich wurden daher unter Durchführung von Enerlytica in den «EKZ-Energieassistent»⁶ eingebunden, um Kunden personalisiertes Feedback zu ihrer Wärmepumpe zur Verfügung zu stellen. Der «EKZ Energieassistent» ist ein Online-Tool, welches als digitale Energieberatung für Endkunden der EKZ entwickelt wurde. Es zeigt bspw. eine Verbrauchsdarstellung der Smart-Meter-Daten, gibt personalisierte Hinweise zum Energiesparen und informiert bei ungewöhnlich hohem Elektrizitätsverbrauch. Ähnliche Funktionalitäten bietet auch das Tool «PERLAS»,⁷ welches Schweizer Haushalten eine kostenfreie, digitale Energie-Erstberatung bietet und durch das Bundesamt für Energie und EnergieSchweiz unterstützt wird. Da «PERLAS» ebenfalls von Enerlytica betrieben wird, profitieren auch weitere Schweizer Haushalte ausserhalb des EKZ-Versorgungsgebietes von den Ergebnissen des Forschungsprojektes, welche direkt und indirekt in die Entwicklung der Plattform einfließen. Zusätzlich sind die im Forschungsprojekt entwickelten Algorithmen zur kommerziellen Nutzung und zur Nutzung zu Forschungszwecken frei zugänglich gemacht worden. Dies ermöglicht es allen Schweizer EVUs die Algorithmen kostenfrei in ihren digitalen Endkundenportalen zu verwenden.

Als Pilotprojekt für eine Kampagne zur Energieeffizienz von Wärmepumpen hat EKZ im Dezember 2023 ausserdem 295 Kunden ausgewählt, die eine Wärmepumpe besitzen, in einem Einfamilienhaus leben, über keine PV-Anlage aber einen aktiven Smart-Meter mit guter Datenverfügbarkeit und separaten Wärmepumpenmessungen verfügen. Diese Kunden wurden per E-Mail angeschrieben, um sie auf die Ergebnisse des kostenfreien Wärmepumpen-Checks aufmerksam zu machen. Mittels ihrer Kundennummer und Verbrauchsstelle konnten sie so eine Bewertung der Betriebsstunden, der Einschaltungen und des elektrischen Energieverbrauchs ihrer Wärmepumpe abrufen. Eine Auswertung der Ergebnisse dieser einmaligen Kampagne ergab, dass 27% aller Wärmepumpen auffällig waren. Die Teilnahmequote lag bei 32% (d.h. 94 Kunden hatten die Ergebnisse abgerufen) und 21% (20 Kunden) sind einem Verweis auf eine Übersicht aller Schweizer Energieberatungen auf der Webseite der EnergieSchweiz gefolgt. Bei einer anschliessenden Umfrage im April 2024 gaben 86% (d.h. 32 der 37 Kunden, die an der Umfrage teilnahmen) an, dass sie den kostenlosen Wärmepumpen-Check weiterempfehlen würden. Ob ein Beratungsangebot gebucht wurde, wurde jedoch nicht nachverfolgt. Hierfür benötigt es eventuell zusätzliche Anreize über ein einzelnes Verbrauchsfeedback hinaus, um Haushalte mit hohem Einsparpotential zur Buchung einer Vor-Ort-Beratung zu bewegen.

⁶ Quelle: <https://energieassistent.ekz.ch/de/> → abgerufen am 20.04.2024.

⁷ Quelle: <https://perlas.ch/de/> → abgerufen am 20.04.2024.



3 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden neue Methoden entwickelt, um Haushalten mittels KI-basierten Algorithmen und Smart-Meter-Daten individuelles Feedback zur Energieeffizienz ihrer Wärmepumpe zur Verfügung zu stellen. Dabei wurden die Algorithmen bereits in die Praxis überführt, um so Schweizer Haushalten zur realen Optimierung ihrer Wärmepumpen im laufenden Betrieb zu verhelfen. Im Folgenden werden die Limitationen und die Anwendbarkeit der Ergebnisse diskutiert sowie ein Ausblick auf mögliche, zukünftige Arbeiten gegeben.

3.1 Kontinuierliche Überwachung des Wärmepumpenbetriebs

Um eine hohe Energieeffizienz von Wärmepumpen im laufenden Betrieb dauerhaft zu gewährleisten, ist eine kontinuierliche Überwachung der Anlagen notwendig. Mit Algorithmen können wiederkehrende Muster aufgedeckt und Auffälligkeiten automatisiert gemeldet werden. Dies ermöglicht eine datenbasierte Ansprache der Haushalte, bei denen eine Vor-Ort-Beratung sinnvoll ist. Wenn ein solches System auch fähig ist, die Einsparungen einer Optimierung vorherzusagen, kann dies den Haushalten als Entscheidungshilfe dienen, ob eine Vor-Ort-Beratung wirtschaftlich ist. Ausserdem ermöglicht es Energieberatungen, eine entsprechende Priorisierung der Haushalte mit dem höchsten Einsparpotential vorzunehmen. Nach einer Vor-Ort-Beratung kann überprüft werden, ob die vorhergesagten Einsparungen erreicht wurden, was es wiederum erlaubt, die Genauigkeit der Algorithmen zur Prädiktion zu verbessern. Dieser Kreislauf ist die Grundlage für Dienstleistungsangebote (siehe Grafik 8).



Grafik 8: Kreislauf der Wärmepumpen-Überwachung auf Basis von Smart-Meter-Daten.



3.2 Nutzung von Sensordaten vs. Smart-Meter-Daten für Dienstleistungen

Grundsätzlich ist die Umsetzung einer kontinuierlichen Wärmepumpenüberwachung mit Smart-Meter-Daten möglich, kann aber auch mit Messdaten, welche mittels interner Sensorik direkt in der Wärmepumpe erhoben werden, erfolgen. Interne Sensordaten haben den Vorteil, dass sie typischerweise eine höhere zeitliche Auflösung besitzen (im Bereich von Sekunden) und deutlich mehr Parameter erfassen. So sind bspw. Messungen von Vor- und Rücklauftemperaturen, der Geschwindigkeit des Kompressors oder physikalischer Grössen aus dem Kältemittelkreis vorhanden, was detaillierte Einblicke in den Betrieb der Anlage ermöglicht. Aus diesem Grund sind Sensordaten aus datentechnischer Sicht als Datenquelle zu bevorzugen.⁸ Ein Problem insbesondere für anbieterunabhängige Dienstleistungsangebote ist jedoch der mangelnde Zugang zu den Daten aus der internen Sensorik einer Wärmepumpe. Nach wie vor haben viele Wärmepumpen im Feld keine Internetanbindung⁹, welche das Auslesen der Daten überhaupt erst ermöglichen würde. Aber auch wenn eine Wärmepumpe mit dem Internet verbunden ist, ist der Zugang zu den Daten nicht automatisch gegeben, da diese typischerweise an den Wärmepumpenhersteller übermittelt werden. Da die Hersteller meist selbst als Anbieter digitaler Wartungsverträge auftreten und es so bisher selten zur Notwendigkeit des Datenaustauschs kommt, gibt es häufig keine Schnittstellen, welche Dritten das Abfragen der Daten ermöglichen würde. Jedoch auch wenn Schnittstellen existieren, gibt es bisher keine Vorschriften zur Standardisierung. Somit kann das Ausgabeformat der Daten nicht nur zwischen Herstellern, sondern gegebenenfalls auch zwischen Wärmepumpenmodellen variieren. Für Dritte, die eine Dienstleistung anbieten wollen, welche mit einer Vielzahl an Wärmepumpen umgehen kann, besteht also ein erheblicher Integrationsaufwand und eine grosse Abhängigkeit von den Herstellern der jeweiligen Wärmepumpen.

In diesem Kontext bieten Smart-Meter-Daten ein sehr grosses Potential und deutlich geringere Hürden für grossflächige Angebote zur Steigerung der Energieeffizienz von Wärmepumpen. Einige grössere EVUs bieten bereits jetzt Schnittstellen an, mittels derer Endkunden ihre eigenen Smart-Meter-Daten abfragen können oder Dritte zur Abfrage autorisieren können. Ausserdem sind die Messungen der Smart-Meter weitestgehend standardisiert und besteht bereits jetzt eine hohe Verfügbarkeit, welche durch den politisch intensivierten Smart-Meter-Rollout noch weiter steigen wird. Ebenfalls ist die Verwendung von Smart-Meter-Daten auch für Wärmepumpen geeignet, die keine Internetanbindung haben. Dass Angebote, die darauf aufbauen, nicht nur theoretisch möglich sind, sondern auch praktisch realisierbar, hat dieses Forschungsprojekt bereits gezeigt.

Auch in Zukunft wird EVUs (und ihren Partnerunternehmen zur Datenanalyse) beim Angebot von Dienstleistungen im Bereich der Analyse von Smart-Meter-Daten eine zentrale Rolle zukommen. Sie geniessen bei Endkunden ein hohes Vertrauen und werden als Kompetenzpartner bei Energiefragen wahrgenommen. So stimmen Endkunden der Auswertung vertraulicher (Smart-Meter-) Daten durch ihr EVU eher zu und schenken auch den Ergebnissen der Analysen eher Glauben, was wiederum zu einer höheren Handlungsbereitschaft zur Steigerung der Energieeffizienz führen kann. Zentral werden ebenfalls auch Energieberater bleiben, welche durch Inspektionen der Wärmepumpen vor Ort nicht nur besser Probleme erfassen können, sondern diese auch direkt beheben können. Ausserdem schulen sie die Nutzer und können im Gespräch Präferenzen erfassen, die bspw. den Komfort betreffen, um die Zufriedenheit mit und Akzeptanz von Wärmepumpen zu erhöhen. Eine Beratung und Optimierung aus der Ferne sind nur bei vernetzten Wärmepumpen und entsprechenden Möglichkeiten des Zugriffs auf

⁸ Die Chancen und aktuellen Problemstellungen der Digitalisierung von Wärmepumpen sind auch in einem ausführlichen Bericht der «International Energy Agency (IEA)» beleuchtet worden. Quelle: «Annex 56: Digitalization and IoT for Heat Pumps» <https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/> → abgerufen am 20.04.2024

⁹ D. Fischer et al. "Business models using the flexibility of heat pumps-a discourse". In: 12th IEA Heat Pump Conference. 2017, pp.1–12



die aufgezeichneten Daten und Einstellungen möglich. Wie bereits beschrieben, ist dies bisher noch nicht flächendeckend gegeben.

Während hier die Vor- und Nachteile von Sensordaten aus vernetzten Anlagen und Smart-Meter-Daten isoliert betrachtet wurden, so werden diese Welten in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmend verschmelzen. So werden EVUs vermutlich Smart-Meter-Daten nutzen, um Wärmepumpen so zu steuern, dass ein stabiler Netzbetrieb garantiert werden kann. Zeitgleich werden Wärmepumpenbesitzer die Effizienz ihrer Heizungsanlage im Betrieb aber auch mit digitalen Lösungen der Wärmepumpenherstellern oder deren Partnerunternehmen überwachen und optimieren. Genauso werden Dritte wiederum Integrationslösungen anbieten, welche die Wärmepumpe als eine Komponente im «Smart Home» vernetzt und integriert, um in Zukunft bei dynamischen Strompreisen möglichst günstige Tarifzeiten auszunutzen.

3.3 Limitationen und Anwendbarkeit bisheriger Ergebnisse

Das Projekt umfasste ausschliesslich Wärmepumpen in Wohngebäuden und nicht Wärmeerzeuger im Kontext industrieller Anlagen. Die im Forschungsprojekt erhobenen und analysierten Daten sind Messungen von Haushalten in der Schweiz. Somit sind die Ergebnisse gegebenenfalls nicht unmittelbar auf Haushalte anderer geographischer Zonen und anderer klimatischer Bedingungen übertragbar. Hierfür sollten die vorgestellten Analysen und Methoden mit einem anderen Datensatz wiederholt werden. Während Mehrfamilienhäuser nicht explizit ausgeschlossen wurden, setzt sich der Datensatz doch zu einem erheblichen Anteil aus Einfamilienhäusern zusammen. Da sich der Betrieb von grossen Wärmepumpen, welche mehrere Wohneinheiten versorgen, unter Umständen unterscheiden kann, sind auch hier die Ergebnisse eventuell nicht direkt übertragbar bzw. weitere Analysen mit einem umfassenderen Datensatz notwendig. Des weiteren lag der Fokus des Projektes auf der Bewertung von Wärmepumpen im Heizbetrieb. Die Nutzung von Wärmepumpen zum Kühlen wird in Zukunft wahrscheinlich einen grösseren Stellenwert einnehmen. Auch wenn die hier durchgeführten Analysen darauf nicht ausgelegt waren, ist dieses Wissen jedoch in die Methodenentwicklung eingeflossen. Somit sind nur geringfügige Anpassungen und ein erneutes Training der KI-Algorithmen nötig, um die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Energieverbrauchs auch bei hohen Temperaturen abzubilden. Die Voraussetzung für die Anpassungen sind lediglich Smart-Meter-Daten einer Vielzahl von Haushalten, welche Wärmepumpen auch im Kühlbetrieb nutzen.

Ein weiterer, wichtiger Punkt der Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse betrifft Haushalte mit Photovoltaik-Anlagen. Da die Lastgänge der Smart Meter nur den Netzbezug messen, weisen die Smart-Meter-Daten andere Verbrauchsmuster einer Wärmepumpe auf, wenn ein Haushalt eine hohe Eigenverbrauchsquote hat (d.h. zu grossen Teilen den generierten Strom der eigenen Photovoltaik-Anlage nutzt). Es ist also schwierig, den Wärmepumpenbetrieb mittels Smart-Meter-Daten insbesondere im Sommer zu bewerten, wenn eine Photovoltaikanlage vorhanden ist, da vorhandene Muster in den Daten unvollständig sein können. Dies ist ein Problem, welches sich unter Umständen mittels der Entwicklung von speziellen KI-basierten Disaggregations- und Rekonstruktionsalgorithmen lösen lässt. Diese können «fehlende» Verbrauchsmuster der Wärmepumpen oder anderer Gerätschaften potenziell extrapolieren, es bleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit in der Bewertung der Wärmepumpeneffizienz aufgrund von Fehlerpropagation. Für die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse auf Haushalte mit Photovoltaik-Anlage ist dementsprechend tiefgehende, weitere Forschung notwendig, die sich explizit nur mit diesem Anwendungsfall befasst.

Jedoch auch bei Haushalten ohne Photovoltaik-Anlage ist es die Qualität der vorhandenen Smart-Meter-Daten, die einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeiten der Bewertung einer Wärmepumpe hat. Wenn die Wärmepumpe separat gemessen wird, muss keine Disaggregation erfolgen, was die



Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Einschätzung reduziert. Ist das Wärmepumpensignal wiederum Teil der Gesamtmessung, kann sie umso besser isoliert werden, je mehr sie einen dominanten Verbraucher darstellt, d.h. einen hohen Prozentsatz des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs ausmacht. Auch ist die Möglichkeit, das Verhalten einer Wärmepumpe zu bewerten abhängig von der temporären Datenverfügbarkeit und Qualität der Messungen. Der Umgang mit fehlenden Messzeiträumen und Datenlücken wurde in den im Forschungsprojekt entwickelten Methoden berücksichtigt. Dennoch steigen die Qualität und Zuverlässigkeit der Aussagen, wenn die Wärmepumpe über einen langen Zeitraum in verschiedenen Temperaturbereichen beobachtet wurde. Auch zusätzliche Kontextinformationen über die Wärmepumpe selbst (bspw. Art und Leistung) oder das Gebäude (bspw. Grundfläche und Alter) helfen bei der Bewertung.

3.4 Algorithmische Umsetzung der Forschungs- und Anwendungsziele

In Abschnitt 1.4 sind die im Projektantrag formulierten Forschungsziele (FZ) und Anwendungsziele (AZ) aufgelistet. Im Folgenden wird eingeordnet, wie diese bei der Entwicklung der Algorithmen berücksichtigt und umgesetzt worden sind.

Forschungsziel	Algorithmische Umsetzung
FZ 1.1: Identifikation und Erprobung von maschinellen Lernverfahren mit besonderer Eignung für kleine Trainingsmengen.	Es wurde ein Framework entwickelt, mit dem sich automatisiert Merkmale («Features») aus Zeitreihen der Smart-Meter-Daten extrahieren lassen. Diese «Features» können genutzt werden, um Modelle des maschinellen Lernens für verschiedene Klassifikationsaufgaben zu trainieren, auch wenn nur geringe Datenmengen vorhanden sind. Das Framework wurde zum Beispiel bei den in Abschnitt 2.5 und 2.6 beschriebenen Algorithmen eingesetzt.
FZ 1.2: Identifikation und Erprobung maschinellen Lernverfahren mit besonderer Eignung zur Erkennung von Einsparpotentialen auf Basis von grobgranularen Verbrauchsreihen.	Viele Smart-Meter können rein technisch hochaufgelöste Messungen liefern (bspw. Messungen der elektrischen Blindleistung, Wirkleistung und des Phasenwinkels mit einer Frequenz von 1 Hz). Die hier entwickelten Algorithmen beschränken sich jedoch auf die Verwendung von 15-minütigen elektrischen Energiemessungen. Diese bilden den grobgranularen Fall ab, welcher den Standardfall der EVUs darstellt. Zusätzlich wurde auch der Einfluss von einer noch geringeren zeitlichen Auflösung (Tagesbasis, Wochenbasis und Jahresbasis) der Smart-Meter-Daten untersucht, bei welchem sich die Algorithmen auch als robust gegenüber einer geringeren als 15-minütigen Auflösung erwiesen (siehe Ergebnisse in Abschnitt 2.6).
FZ 2.1: Identifikation von maschinellen Lernverfahren, mit der Eignung kontinuierlich bzw. lebenslang zu lernen.	Alle in diesem Bericht beschriebenen KI-Modelle lassen sich regelmässig mit geringem Rechenaufwand aktualisieren, bspw. wenn neue Daten vorhanden sind, die nicht Teil des



	<p>vorherigen Trainingsprozesses waren. So kann ein kontinuierliches Lernen im Praxisbetrieb und eine Anpassung an neue Gegebenheiten ermöglicht werden.</p>
<p>FZ 4.1: Identifikation von technischen und organisatorischen Massnahmen zur Datensparsamkeit («by Design»).</p>	<p>Die entwickelte Software erlaubt es die Smart-Meter-Daten eines Haushaltes in verschiedenen Fenstern zu analysieren und jedes dieser Fenster als eine einzelne Beobachtung und somit einen Datenpunkt zu betrachten. Somit lässt sich die Datenmenge künstlich vergrössern. Die Fenstergrössen können hierbei fixiert auf einen Tag, eine Woche, einen Monat oder ein Jahr gesetzt werden, sowie auf eine flexible Grösse. Dadurch können die Algorithmen auch bei wenigen Daten zuverlässig Muster erlernen und erkennen, was einer Datensparsamkeit «by design» entspricht.</p>
<p>FZ 4.1: Identifikation von 50% und 25% der Haushalte mit dem höchsten Einsparpotential.</p>	<p>In Abschnitt 2.8 wird ein Algorithmus zur Identifikation von auffälligen Wärmepumpen vorgestellt, welcher auch genutzt werden kann, um eine auf- oder absteigende Sortierung der Anlagen nach verschiedenen Parametern vorzunehmen (bspw. durchschnittliche Betriebsstunden). Mittels dieser Funktionalität können Wärmepumpen auch nach ihrer elektrischen Energieintensität sortiert werden (d.h. elektrischer Energieverbrauch in kWh pro beheizte Fläche in qm). Notwendig ist hierfür jedoch die Kenntnis über die Gebäudegrösse, welche adressbasiert aus dem Gebäude- und Wohnungsregister ermittelt werden kann, wie in dieser Arbeit exemplarisch gezeigt. Eine verbesserte Sortierung wäre möglich mit einem Algorithmus, welcher das Energiesparpotential einzelner Haushalte vorhersagen kann. Dies ist Teil zukünftiger Arbeiten (siehe Arbeitspaket 2 in Abschnitt 3.5).</p>
<p>FZ 4.2: Identifikation von wesentlichen Fehleinstellungen (Neuland und anspruchsvolle, risikobehaftete Forschung).</p>	<p>Im Rahmen des Forschungsprojektes sind Algorithmen entwickelt worden, welche Wärmepumpen mit Optimierungspotential identifizieren können, auch solche mit wesentlichen Fehleinstellungen. Eine Vorhersage der Wärmepumpenkonfigurationen einzelner Haushalte könnte Teil zukünftiger Forschungsarbeiten sein (siehe Arbeitspaket 3 in Abschnitt 3.5).</p>



Forschungsziel	Algorithmische Umsetzung
AZ 1: Identifikation von unzureichend eingestellten oder fehlerhaften Anlagen.	Dieses Anwendungsziel wurde insbesondere bei den in Abschnitt 2.8 beschriebenen Algorithmen berücksichtigt. Das zyklische Ein- und Ausschaltverhalten einer Wärmepumpe dient hierbei als weitestgehend gebäudeunabhängiger Indikator dafür, ob eine Anlage fehlerhaft oder unzureichend eingestellt ist.
AZ 2: Potentialschätzung einer Justierung der Anlagenparameter im Betrieb.	Die Ergebnisse in Abschnitt 2.4 bieten eine Potentialabschätzung der jährlichen Einsparungen nach Optimierung der Wärmepumpe durch einen Energieberater. Diese Optimierungen umfassen lediglich eine Justierung der Anlagenparameter. Die Hälfte aller Haushalte erzielte eine durchschnittliche Ersparnis von 1'805 kWh (15.2%) elektrischer Energie pro Jahr.
AZ 3: Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Optimierung.	Die Identifikation von Wärmepumpen mit Optimierungspotential erlaubt eine datenbasierte Ansprache der Haushalte, bei denen ein Handeln notwendig ist. Eine Vor-Ort-Beratung kann in diesen Fällen zu einer Reduzierung des elektrischen Energieverbrauchs beitragen. Eine nutzergeführte Optimierung von Wärmepumpen aus der Ferne ist in der Zukunft denkbar. Hierfür wären allerdings Methodiken für die Vorhersage einzelner Wärmepumpenkonfigurationen notwendig, was in zukünftigen Forschungsarbeiten adressiert werden könnte (siehe Arbeitspaket 3 in Abschnitt 3.5).
AZ 4: Potentialschätzung sowie die Berechnung der durch die jeweilige Massnahme im Einzelfall erzielte Einsparungen als Leistungsnachweis für den Kunden.	Die individuelle Berechnung der retrospektiven elektrischen Energieersparnis einer Wärmepumpenoptimierung wird in Abschnitt 2.4 behandelt und kann Endkunden als Leistungsnachweis dienen. In Abschnitt 2.3 sind zudem typische Probleme auffälliger Anlagen aufgelistet. Ein Algorithmus zur Vorhersage des Energiesparpotentials einzelner Haushalte ist Teil zukünftiger Arbeiten (siehe Arbeitspaket 2 in Abschnitt 3.5).
AZ 5: Aufbau eines produktives Testsystem, welches über 120 Anlagen kontinuierlich überwacht. Zudem soll die Treffergenauigkeit bei der Identifikation von Anlagen mit hohem Optimierungspotential anhand von der 120 Anlagen bewertet werden.	Die im Forschungsprojekt entwickelten Algorithmen wurden in ein produktives Testsystem überführt und finden aktuell im EKZ-Energieassistent in Verwendung. Ebenfalls gab es ein Pilotprojekt für eine Energieeffizienzkampagne, bei welcher 295 EKZ-Kunden Rückmeldung über die Bewertung ihrer Wärmepumpe erhalten haben. Mehr Details diesbezüglich können Abschnitt 2.9 entnommen werden.



<p>AZ 6: Das System soll folgende Teilkomponenten umfassen:</p> <ul style="list-style-type: none">• AZ 6.1: Reporting-Dashboard für den System-Nutzer• AZ 6.2: Mailing-System zum Versand von Analyse-Ergebnissen und Informationen zu erzielten Einsparungen für Haushaltskunden	<p>Siehe obige Erläuterungen zu AZ5. Die genannten Teilkomponenten sind Bestandteile des produktiven Testsystems.</p>
<p>AZ 7: Die Datenkompatibilität des Systems soll so gestaltet sein, dass es für möglichst viele Haushalte anwendbar ist und schlussendlich eine wirtschaftlich attraktive Dienstleistung ermöglicht.</p> <ul style="list-style-type: none">• AZ 7.1: Das System soll kompatibel für alle gängigen Smart-Meter-Datensätze (15-minütige Daten) geeignet sein.• AZ 7.2: Die Erkennung umfasst auch die Fälle, bei denen die Wärmepumpe gemeinsam mit dem Haushaltsstrom erfasst wird. Diese Funktionalität ist für den Praxiseinsatz wichtig, da in vielen Fällen eine summarische Verbrauchserfassung gemeinsam mit dem Haushaltsstrom erfolgen wird.	<p>Die breite Anwendbarkeit der Algorithmen war eine grundlegende Anforderung für deren Entwicklung. Die Algorithmen verwenden alle ausschliesslich 15-minütige elektrische Energiemessungen und keine höher aufgelösten Smart-Meter-Daten (siehe Ausführungen zu FZ 1.2). Ausserdem wurde auch eine Methodik für die Disaggregation des Wärmepumpensignals aus einer Gesamtmessung entwickelt, welche in Abschnitt 2.7 beschrieben ist.</p>

3.5 Zukünftige Arbeiten und Ausblick

Wie dieses Forschungsprojekt bereits gezeigt hat, ist der Nutzen von Smart-Meter-Daten zur Steigerung der Wärmepumpeneffizienz sehr hoch. Um das inhärente Potential zu heben, kann sich zukünftige Forschung mit den vorher benannten Limitationen beschäftigen und sich weitergehend mit der Wärmepumpe als Teil eines Gesamtsystems befassen. So wird zum Beispiel die Integration mit Photovoltaik-Anlagen, Batteriespeichern und gesteuerten Thermostatventilen in der Zukunft immer wichtiger und von Kunden häufiger nachgefragt. Dies bringt wiederum neue Steuerungsmöglichkeiten mit sich, was die Effizienz und Langlebigkeit einer Wärmepumpe beeinflusst. Ähnlich verhält es sich mit der Steuerung von Wärmepumpen zur Nutzung von Flexibilitäten bei «Demand Response»-Programmen und dem Zusammenspiel mit dynamischen Tarifen. Auch in diesem Bereich liegt ein grosses Potential für weitere Forschung und können Smart-Meter-Daten genutzt werden. Zusätzlich können bisherige Methoden so erweitert werden, dass sie sich auf andere Fokusgruppen wie bspw. Mehrfamilienhäuser oder Bürogebäude besser übertragen lassen. Eine konkrete Fortführung dieses Forschungsprojektes ist ausserdem in drei weiteren Arbeitspaketen möglich:

- **Arbeitspaket 1:** Veröffentlichung des erhobenen Datensatzes
 - Vorteile: Nutzung in der Praxis durch Schweizer EVUs, Weiterentwicklung durch die internationale Forschungsgemeinschaft, Kooperation mit der Schweizer Forschungsgemeinschaft, Einklang mit der «Open Government Data (OGD)» Strategie des Bundes



- **Arbeitspaket 2:** Algorithmus zur Vorhersage des Energiesparpotentials einzelner Haushalte
 - Vorteile: Priorisierung der Haushalte mit besonders hohem elektrischen Energiesparpotential, Feedback an Haushalte bzgl. ökonomischer Rentabilität einer Energieberatung, Vergleich erwarteter und erreichter Einsparungen, Untersuchung der Wirksamkeit einzelner Konfigurationsänderungen, Untersuchung der Einflussparameter von elektrischen Energieeinsparungen
- **Arbeitspaket 3:** Algorithmus zur Vorhersage der Wärmepumpenkonfigurationen einzelner Haushalte
 - Vorteile: Genaue Vorhersage einzelner Konfigurationen, hohe Interpretierbarkeit und Vertrauenswürdigkeit, nutzergeführte Optimierung der wichtigsten Einstellungen

Eine Umsetzung der Arbeitspakete 1 und 2 wurde vom BFE zum Endzeitpunkt des Forschungsprojektes für dessen Fortführung beauftragt und wird entsprechend finanziell gefördert. Die Ergebnisse der Arbeitspakete werden nach deren Abschluss in einer separaten Publikation dokumentiert.



4 Publikationen und Fachvorträge

4.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Tobias Bruder Müller, Thorsten Staake, Thorsten. 2022. Introduction to Smart Meter Data Analysis for Heat Pump Optimization. In 28. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik.
- Andreas Weigert, Konstantin Hopf, Nicolai Weinig, Thorsten Staake. 2020. Detection of heat pumps from smart meter and open data. In Energy Informatics 3 (Suppl 1), 21. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-00124-6>
- Andreas Weigert. 2022. Identification and classification of heat pump problems in the field and their implication for a user-centric problem recognition. In Energy Informatics 5, 70. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00250-3>
- Andreas Weigert, Konstantin Hopf, Sebastian A. Günther, Thorsten Staake. 2022. Heat pump inspections result in large energy savings when a pre-selection of households is performed: A promising use case of smart meter data. In Energy Policy, Volume 169, 113156, ISSN 0301-4215. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113156>
- Tobias Bruder Müller, Florian Wirth, Andreas Weigert and Thorsten Staake. 2022. Automatic Differentiation of Variable and Fixed Speed Heat Pumps With Smart Meter Data. In 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, Singapore, pp. 412-418. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961055>
<https://github.com/tbrumue/smd-hp-type-detection>
- Tobias Bruder Müller, Fabian Breer, Thorsten Staake. 2023. Disaggregation of Heat Pump Load Profiles From Low-Resolution Smart Meter Data. In Proceedings of the 10th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 228–231. <https://doi.org/10.1145/3600100.3623731> | <https://github.com/tbrumue/smd-hp-disaggregation>
- Tobias Bruder Müller, Markus Kreft, Elgar Fleisch, Thorsten Staake. 2023. Large-scale monitoring of residential heat pump cycling using smart meter data. In Applied Energy, Volume 350, 2023, 121734, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121734>
<https://github.com/tbrumue/smd-hp-cycling>
- Tobias Bruder Müller, Markus Kreft. 2023. Smart Meter Data Analytics: Practical Use-Cases and Best Practices of Machine Learning Applications for Energy Data in the Residential Sector. In Workshop Tackling Climate Change with Machine Learning, International Conference on Learning Representations (ICLR). <https://www.climatechange.ai/papers/iclr2023/3> | <https://github.com/bitstoenergy/iclr-tutorial>
- Markus Kreft, Tobias Bruder Müller, Tyler Anderson, Thorsten Staake. 2024. Identifying Electric Water Heaters from Low-Resolution Smart Meter Data. In 2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). <https://doi.org/10.1109/SusTech60925.2024.10553590>



4.2 Fachvorträge

Das Forschungsprojekt wurde durch Tobias Bruder Müller (Bits to Energy Lab, ETH Zürich) in Form von Fachvorträgen an folgenden Veranstaltungen vertreten:

Termin	Ort	Titel	Veranstaltung
06.05.2024	Online	Smart Meter Data Analytics für die Wärmepumpen-Optimierung	Electrosuisse Expert Talk - Künstliche Intelligenz
18.04.2024	Online	Smart Meter Data Analytics: Practical Use-Cases and Best Practices of Machine Learning Applications for Energy Data in the Residential Sector	Climate Change AI Monthly Webinar Series
15.11.2023	Istanbul, Türkei	Disaggregation of Heat Pump Load Profiles from Low-Resolution Smart Meter Data	The 10th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys 2024)
23.08.2023	Zürich, Schweiz	Smart Meter Data Analytics für die Wärmepumpen-Optimierung	Lighthouse Institute Data Analytics Day
07.07.2023	Online	Smart Meter Data Analytics: Practical Use-Cases and Best Practices of Machine Learning Applications for Energy Data in the Residential Sector	Climate Change AI Summer School
04.05.2023	Kigali, Ruanda (Online)	Smart Meter Data Analytics: Practical Use-Cases and Best Practices of Machine Learning Applications for Energy Data in the Residential Sector	The 11th International Conference on Learning Representations (ICLR)
22.11.2022	Zürich, Schweiz	Smart Meter Data Analytics für die Wärmepumpen-Optimierung	Lighthouse Institute Data Analytics Day
17.11.2022	Heidelberg, Deutschland	Nachhaltig und effizient heizen: Wärme pumpen, Strom zählen & Energie sparen	Science Slam @ Karlstorbahnhof, Heidelberg
28.10.2022	Singapur (Online)	Automatic differentiation of variable and fixed speed heat pumps with smart meter data	2022 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)
19.10.2022	Stuttgart, Deutschland	Nachhaltig und effizient heizen: Wärme pumpen, Strom zählen & Energie sparen	Science Slam @ Theaterhaus, Stuttgart
10.09.2022	Mannheim, Deutschland	Nachhaltig und effizient heizen: Wärme pumpen, Strom zählen & Energie sparen	Science Slam @ Alte Feuerwache, Mannheim
22.06.2022	Burgdorf, Schweiz	Introduction to Smart Meter Data Analysis for Heat Pump Optimization	28. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik



Anhang

Der Anhang umfasst den «Preprint» des in Abschnitt 2.6 referenzierten Artikel, welcher im Gegensatz zu allen anderen in diesem Bericht referenzierten Artikeln aus Gründen des Copyrights in seiner veröffentlichten Version nicht kostenfrei zugänglich ist. Die publizierte Version kann online unter folgendem Link abgerufen werden: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9961055> (Letzter Zugriff: 18. Dezember 2024)