



PhD-FSTM-2024-064
Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Medizin

DISSERTATION

verteidigt am 29/10/2024 in Luxemburg (Luxemburg)

zur Erlangung des Titels

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU LUXEMBOURG EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

von

Tobias Wolfgang Rehm
geboren am 17. April 1992 in Frechen (Deutschland)

ENERGIEMANAGEMENT IN HAUSHALTEN: NUTZUNG VON SMARTEN TECHNOLOGIEN FÜR THERMISCHE UND ELEKTRISCHE ANWENDUNGEN

Prüfungskommission

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, Betreuer der Doktorarbeit
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schneiders
Professor, Technische Hochschule Köln

Prof. Dr.-Ing. Jean-Régis Hadji-Minaglou, Vorsitzender
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas, Stellvertretender Vorsitzender
Professor, Universität Luxemburg

Dr. Anja Degens
Senior Consultant, Paul Wurth Geprolux S.A.

Kurzfassung

Im Rahmen der Energie- und Wärmewende werden Haushalte nicht mehr nur passive Energieverbraucher, sondern aktive Elemente im gesamten Energiesystem sein: als Energieerzeuger, -speicher und -verbraucher. Um diese aktive Rolle einnehmen zu können, müssen digitale, smarte Technologien wie Home Energy Management Systems eingesetzt werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit zwei aktuellen Anwendungsfeldern (elektrisch und thermisch) für ein vernetztes Energiemanagement im Haushalt.

Das elektrische Anwendungsfeld beschäftigt sich mit dem Thema des bidirektionalen Ladens von batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV), insbesondere mit dem Konzept Vehicle-to-Home (V2H). Als Hintergrund dient ein modernes Einfamilienhaus mit Eigenerzeugungsanlage durch Photovoltaik und elektrische Wärmepumpe. Zur Abbildung des Systems wurde ein V2H-Simulationstool entwickelt, welches auf Basis eines typischen Referenzhaushalts verschiedene Szenarien und Sensitivitäten methodisch untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass im Vergleich zum unidirektionalen BEV der Autarkiegrad durch ein bidirektionales V2H-System gesteigert werden kann. Weiterführende Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Entscheidende Einflussfaktoren auf den Autarkiegrad sind die Ladeleistung und die Ladestrategien sowie die Verfügbarkeit des BEV. Der Beitrag der Simulation ist ein modulares Tool, das zur Potenzialabschätzung und zur Weiterentwicklung von V2H-Konzepten eingesetzt werden kann. Darüber hinaus bestätigt es bestehende Forschungsarbeiten und zeigt weiteren Entwicklungsbedarf für diese innovative Technologie auf.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem thermischen Anwendungsfeld des Energiemanagements in Haushalten. Da Raumwärme den größten Energieverbrauch im Haushalt ausmacht wurden im Rahmen eines empirischen Anwendungstests 14 Wohnungen eines Mehrfamilienhauses nahezu komplett mit Smart Home Technologien ausgestattet, einschließlich der Installation von 63 smarten Thermostaten. Die Auslesung der smarten Thermostate ermöglichte die Entwicklung einer neuen Messmethode zur Analyse und Bewertung des Heizverhaltens, welche zuvor nicht in dieser hohen Auflösung möglich war.

Die smarten Thermostate lieferten neben der Soll- und Ist-Temperatur auch weitere Datenpunkte wie die Ventilöffnung und die relative Luftfeuchtigkeit. Aus diesen umfangreichen Daten wurden verschiedene Heiztypen abgeleitet, die eine korrelierte Bewertung des Heizverhaltens mit dem realen monatlichen Energieverbrauch ermöglichen. Erstmals wird auf dieser Grundlage eine kennzahlenbasierte Einschätzung des Heizverhaltens ermöglicht, die für ein zielgerichtetes Feedback an die Nutzer verwendet werden kann.

Im Zeitraum von November 2023 bis Januar 2024 konnte während der Heizperiode eine Einsparung in der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe nachgewiesen werden. Die Ursache für die Einsparungen wird nicht auf die smarten Thermostate zurückgeführt, sondern auf das individuelle Heizverhalten. Diese Erkenntnis stützt die Hypothese, dass die Nutzer mehr Informationen für ein effizientes Heizen benötigen und durch die entwickelte Methodik zur Datensammlung darin unterstützt, werden können. Die Kenntnis des eigenen Verbrauchs sowie dessen Optimierungspotenzial sind wesentliche Voraussetzungen für eine effiziente Energienutzung. Die Kenntnis der Verbrauchskomponenten ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Abstract

In the context of the energy and heat transition, households will no longer be passive energy consumers but active elements in the entire energy system: as energy producers, storage and consumers. To play this active role, digital, smart technologies such as Home Energy Management Systems are needed. This paper addresses two current fields of application for energy management in households: electrical and thermal.

The field of electrical applications is concerned with the topic of bidirectional charging of battery electrical vehicles (BEV), in particular with the vehicle-to-home (V2H) concept. The context for this study is a modern single-family home with its own photovoltaic and electric heat pump generation system. A V2H simulation tool was developed to model the system, which methodically analyses various scenarios and sensitivities based on a typical reference household. The results of the study demonstrate that, in comparison to a unidirectional BEV, a bidirectional V2H system can enhance the degree of self-sufficiency. Further findings can be summarized as follows: The degree of self-sufficiency is influenced by a number of factors, including the charging power and charging strategies, as well as the availability of the BEV. The contribution of the simulation is a modular tool that can be used to assess potential and further develop V2H concepts. Furthermore, the results of this study confirm existing research findings and highlight the need for further development of this innovative technology.

This work also addresses the field of thermal energy management in households. As space heating represents the largest energy consumption in households, an empirical application test was conducted in which 14 flats in an apartment block were almost completely equipped with smart home technologies. This included the installation of 63 smart thermostats. The readings from the smart thermostats enabled the development of a new measurement method for analysing and evaluating heating behaviour, which was not previously possible at this high resolution.

In addition to the target and actual temperature, the smart thermostats also provided other data points, including the valve opening and relative humidity. Various heating types were derived from this extensive data, which enabled a correlated assessment of the heating behaviour with the actual monthly energy consumption. This represents a novel approach to assessing heating behaviour, which can be used for targeted feedback to users.

The test group demonstrated a saving in comparison to the control group during the heating period between November 2023 and January 2024. The savings were not attributed to the smart thermostats, but rather to individual heating behaviour. This finding supports the hypothesis that users require more information for efficient heating and can be supported in this by the data collection methodology developed. It is essential that consumers have an understanding of their own energy consumption patterns, including the potential for optimisation. Furthermore, it is important to understand the components of consumption.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Frank Scholzen und Prof. Dr. Jean-Régis Hadji-Minaglou von der Universität Luxemburg, denen ich für die wertvollen Hinweise, die kontinuierliche Unterstützung und die inspirierenden Diskussionen danke, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt auch Prof. Dr. Thorsten Schneiders. Er hat mich nicht nur während der gesamten Promotionszeit, sondern auch schon lange Zeit davor tatkräftig unterstützt. Sein Engagement, mich in die Welt der Forschung, Lehre und Projekte einzuführen und mich stets zu fördern, hat einen unvergesslichen Beitrag zu meiner akademischen Entwicklung geleistet.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Dr. Anja Degens und Herrn Prof. Dr. Stefan Maas für die Übernahme wichtiger Aufgaben in der Prüfungskommission.

Ich bin zudem meinen Promotionskollegen Sascha Birk und Lukas Kurt Gerhard Hilger zu großem Dank verpflichtet. Die zahlreichen Diskussionen und qualifizierten Anregungen sowie die gegenseitige Motivation entlang dieser Promotionsreise waren für mich von unschätzbarem Wert.

Ein besonderes Dankeschön gilt auch meinen lieben Kolleginnen und Kollegen von der TH Köln, die auf vielfältige Weise zur Realisierung dieser Dissertation beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich die Personen aus meinem Büro ZW-4-4, Laura Züll, Stefanie Könen, Oliver Pfeifer, Moritz End und viele weitere Personen aus dem Cologne Institute for Renewable Energy, für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre.

Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, die ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter betreuen und begleiten durfte, insbesondere F. Kunjas, R. Graeber, S. Harth und N. Starcevic, für ihr Engagement und ihre Beiträge. Viele bleiben hier unerwähnt, aber alle haben auf ihre Weise einen wertvollen Beitrag zu meinem Werdegang geleistet.

Mein Dank gilt auch den Kolleginnen und Kollegen des *Wuppertal Instituts* und der *EBZ Business School* für die gute und bereichernde interdisziplinäre Zusammenarbeit im Forschungsprojekt *Smart User Interfaces*, das Teil des *Virtuellen Instituts Smart Energy* ist. Danken möchte ich auch allen Praxispartnern des Projektes, ohne die eine solche anwendungsorientierte Forschung im Feld nicht möglich wäre, sowie dem Fördergeber für die Bereitstellung der notwendigen Forschungsressourcen. Weiterhin bedanke mich bei allen, die direkt oder indirekt zu meiner akademischen Reise beigetragen haben und deren Namen hier nicht einzeln erwähnt wurden.

Zu guter Letzt möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Freundin, meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich nicht nur stets ermutigt und mir den notwendigen Rückhalt geboten haben, sondern auch großes Verständnis für die vielen Stunden der Abwesenheit und die intensive Beschäftigung mit meiner Forschung aufgebracht haben. Danke!

Köln, März 2025

Tobias W. Rehm

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Danksagung.....	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation: Vernetzung von energetischen Systemkomponenten im Haushalt.....	3
1.2 Fokussierte HEMS-Anwendungsfelder	5
1.2.1 Steigerung der elektrischen Autarkie durch Vehicle-to-Home	5
1.2.2 Steigerung der Heizenergieeffizienz durch Smart Home Anwendungen	6
1.3 Struktur der Arbeit.....	8
2 Stand der Technik und Forschung von HEMS-Anwendungen.....	10
2.1 Überblick über relevante Technologien und Anlagen im Gebäude	10
2.2 Methodik der Literaturstudie	14
2.3 Vehicle-to-Home	15
2.3.1 Stand der Technik: Vehicle-to-Home	15
2.3.2 Stand der Forschung: Vehicle-to-Home.....	17
2.4 Thermische Smart Home-Anwendungen	18
2.4.1 Stand der Technik: Smart Home-Anwendungen	18
2.4.2 Stand der Forschung: Verbrauchsvisualisierung.....	24
2.4.3 Stand der Forschung: Smart Home Thermostate	26
3 Zwischenfazit: Stand der Technik und Forschung.....	30
4 Simulation von Vehicle-to-Home im HEMS.....	33
4.1 Ansatz und Rahmenbedingungen	33
4.2 Aufbau Simulationstool und Datengrundlage	35
4.2.1 Methodik V2H-Simulation.....	35

4.2.2	Simulationsparameter.....	40
4.2.3	Berechnungsgrundlagen	41
4.2.4	Ladestrategien	43
4.2.5	Definition Referenzhaushalt.....	46
4.3	Simulationsergebnisse	50
4.3.1	Referenzhaushalt	50
4.3.2	Szenarien für Sensitivitätsanalyse.....	53
4.3.3	Sensitivitätsanalyse	53
4.3.4	Ergebnisdiskussion.....	59
4.4	Zwischenfazit: V2H-Simulation.....	62
5	Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz mit Smart Home Technologien	63
5.1	Untersuchungsdesign für einen empirischen Anwendungstest	63
5.1.1	Methodik und Untersuchungsdesign.....	64
5.1.2	Forschungsprojekt: Smart User Interfaces	66
5.1.3	Pretest (Heizperiode 2022/2023).....	68
5.1.4	Datengrundlage für den Anwendungstest (Heizperiode 2023/2024)	74
5.2	Analyse- und Auswertungskonzept.....	78
5.2.1	Temperatur-Niveaus.....	80
5.2.2	Soll-Ist-Vergleich (Offset) Raumtemperatur	85
5.2.3	Ventilöffnungen	88
5.2.4	Heizenergieverbrauch.....	91
5.2.5	Gegenüberstellung Versuchs- und Kontrollgruppe.....	96
5.2.6	Warmwasserverbrauch	102
5.2.7	Luftfeuchtigkeit.....	104
5.2.8	Entwicklung von Heiztypen.....	112
5.2.9	Ergebnisdiskussion.....	118
5.3	Zwischenfazit: Anwendungstest mit Smart Home Technologien	125
6	Fazit und Ausblick	127
6.1	Fazit: V2H-Simulation	127
6.2	Fazit: Anwendungstest mit Smart Home Technologien.....	130
6.3	Allgemeine Schlussfolgerungen, Synergieeffekte und Ausblick	134
7	Literaturverzeichnis	137

Anhang	146
V2H-Simulation: Ladefälle	147
V2H-Simulation: Wochenendtag	150
SHT-Anwendungstest: Gebäudedaten.....	151
SHT-Anwendungstest: Heizenergieverbrauch	152
SHT-Anwendungstest: Ventilöffnungen	153
SHT-Anwendungstest: Warmwasserverbrauch.....	154
SHT-Anwendungstest: Wasserdampfpartialdruck	155
SHT-Anwendungstest: Vergleich Verbrauchsdaten und Ventilöffnungen	156

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema Daten und Energieflüsse des HEMS (eigene Darstellung nach [17])	4
Abbildung 2: Zeitskala Novellierung der EU-Effizienz-Richtlinie (EED) (adaptiert nach [22]) ...	6
Abbildung 3: Überblick Standard und smarte Energietechnologien im Haushalt (eigene Darstellung)	11
Abbildung 4: Automationspyramide für Energiemanagementsysteme im Haushalt nach [25]....	12
Abbildung 5: Schematische Darstellung Energiemanagementsystem Haushalt (eigene Darstellung)	13
Abbildung 6: Schematische Darstellung V2H-System nach [20]	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung Heizkreislauf mit zentralen Bestandteilen.....	20
Abbildung 8: Elektronischer Heizkostenverteiler (links [54]) an Heizkörper in Testwohnung (rechts)	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Komponenten in einem V2H-System mit Lastflüssen und Kommunikationswegen (Icon HEMS <i>SmartFox</i>)	35
Abbildung 10: Methodischer Aufbau des V2H-Simulationstools	37
Abbildung 11: Schematische Darstellung externer und eigener Profile für das V2H-System	38
Abbildung 12: Tabellenblatt Einstellungen – Eingabe von Parametern (Screenshot Simulationstool).....	40
Abbildung 13: Schematisch dargestellte Priorisierung des Heimspeichers im Tool	44
Abbildung 14: Entscheidungsschema im Programmablauf anhand eines Beispiels (Ladefall 17)	45
Abbildung 15: Beispielhaftes Tagesprofil für Haushalt nach <i>Load Profile Generator</i> (Typ: CHR44) [84]	48
Abbildung 16: Erzeugungsprofil für eine 10kW _P Anlage - Simuliert mit <i>PV*SOL</i> [85]	48
Abbildung 17: Wärmelastprofil für eine el. Luft-Wasser-Wärmepumpe nach <i>HEF33</i> [86]	49
Abbildung 18: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios mit der Leistungs- und SoC-Kurve am Dienstag, 05. Juli 2021	51
Abbildung 19: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios mit der Leistungs- und SoC-Kurve am Dienstag, 04. Januar 2021.....	52
Abbildung 20: Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns nach Technologien, Feedbackarten und der Outputs	65
Abbildung 21: Terminierung der Anwendungstests im Forschungsprojekt <i>Smart User Interfaces</i>	68
Abbildung 22: Messaufbau Pretest - smarte Thermostate in Studierenden Haushalten	69
Abbildung 23: Beispielhafte Grafana Visualisierung (User ID 9) – 15.01.2023	71
Abbildung 24: Beispielhafte Grafana Visualisierung User ID 3 (Lüftungserkennung) – 18.01.2023	72
Abbildung 25: Gebäude für Anwendungstest (Standort: NRW)	75
Abbildung 26: Aufbau der Wohnungen pro Etage – gleicher Aufbau auf allen sieben Etagen (n=28 Wohnungen).....	75
Abbildung 27: Schematische Darstellung des ausgestatteten Mehrfamilienhauses mit Angabe der Lage, Fläche und Anzahl der Smart Home Thermostate (SHT) pro Wohnung	76

Abbildung 28: Tado° smartes Heizkörperthermostat inkl. Internet-Bridge und App (tado GmbH)	77
Abbildung 29: ERS2 CO ₂ -Sensor (ELSYS)	77
Abbildung 30: Feedback Ansatz im Anwendungstest Heizperiode (2023/2024)	79
Abbildung 31: Energetische Analysen für die Datenauswertung	79
Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Soll- und Ist-Temperatur-Niveaus (Jan. 2024)	80
Abbildung 33: Heizdauer der Soll-Temperatur am Beispiel der Wohnung 1	81
Abbildung 34: Heatmap Standardabweichung der gemessenen Ist-Temperatur je Raum (Jan. 2024)	84
Abbildung 35: Heatmap Standardabweichung der eingestellten Soll-Temperatur je Raum (Jan. 2024)	84
Abbildung 36: Heatmap der Offset-Analyse (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median	86
Abbildung 37: Heatmap der gemessenen Ist-Temperaturen (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median	86
Abbildung 38: Heatmap der eingestellten Soll-Temperaturen (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median	87
Abbildung 39: Verteilung der SHT-Ventilöffnungen nach Raumtypen aller Wohnungen (n=14)	88
Abbildung 40: Heatmap der prozentual verteilten Ventilöffnungen nach Raumtypen (Jan. 2024)	89
Abbildung 41: Vergleich der anteiligen Verbrauchsdaten (UVI) und Ventilöffnungen (SHT) je Wohnung (Jan. 2024)	90
Abbildung 42: Vergleich der absoluten Ventilöffnungen (SHT) - Dez. 2023 vs. Jan. 2024	90
Abbildung 43: Heizenergieverbrauch (Nutzenergie) Januar 2024 nach Etage und Wohnungen (n=28 Wohnungen).....	91
Abbildung 44: Vergleich der Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Verbrauch sortiert) – Jan. 2024	92
Abbildung 45: Vergleich der Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Verbrauch sortiert) – Dez. 2023	92
Abbildung 46: Heizenergieverbrauch nach fl. Verbrauchswert und Kennzeichnung der Heiztypen (Dez. 2023 vs. Jan. 2024)	95
Abbildung 47: Heizenergieverbrauch der 28 Wohnungen im Testgebäude (Dez. 2023 vs. Jan. 2024)	96
Abbildung 48: Vergleich Versuchsgruppe mit SHT und Kontrollgruppe ohne SHT (Dez. 2023 & Jan. 2024).....	97
Abbildung 49: Witterungsbereinigter Verbrauch Wohnungen mit und ohne Smart Home (Installation der SHT im Oktober 2023)*.....	99
Abbildung 50: Vergleich Heizenergieverbrauch Wohnungen mit Smart Home Thermostate (witterungsbereinigte Verbräuche)*	100
Abbildung 51: Vergleich Heizenergieverbrauch Wohnungen ohne Smart Home Thermostate (witterungsbereinigte Verbräuche)	101
Abbildung 52: Anteile Verbrauch für Heizung und Warmwasser normiert nach Anzahl Personen und Wohnfläche (Jan. 2024).....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 53: Anteile Verbräuche für Heizung und Warmwasser im Verhältnis zur Außentemperatur im Testgebäude	103
Abbildung 54: Absoluter Verbrauch für Heizung und Warmwasser im Testgebäude	103
Abbildung 55: Relative Luftfeuchte [%] der Wohnungen je Raum basierend auf dem monatlichen Median - Jan.2024.....	106
Abbildung 56: Wasserdampfkonzentration der absoluten Feuchte [g/m ³] - Jan. 2024.....	107
Abbildung 57: Niedrigste zulässige Innenoberflächentemperatur [°C] – Jan. 2024.....	109
Abbildung 58: Differenz zwischen zulässiger Innenoberflächentemperatur und Ist-Temperatur im Raum - Jan.2024.....	109
Abbildung 59: Bewertung der Luftfeuchtigkeit und Schimmelgefahr in Räumen (Jan. 2024) ..	110
Abbildung 60: Schematische Darstellung Analysemethode der Heiz- und Verbrauchstypen zur Bildung von Feedback	115
Abbildung 61: Anteile der Heiztypen am gesamten spezifischen Heizenergieverbrauch - Jan. 2024	117
Abbildung 62: Veranschaulichung Energie-Management-System Haushalt mit Smart Home Technologien und V2H-System	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Technologiekategorien und Beispiele von Technologien	11
Tabelle 2: Arten des bidirektionalen Ladens [32].....	15
Tabelle 3: Übersicht relevanter Studien im Kontext "Einsparpotenziale durch Verbrauchsvisualisierung und Feedback"	25
Tabelle 4: Übersicht relevanter Studien zum Kontext Einsparpotenziale durch smarte Thermostate 1-2	28
Tabelle 5: Übersicht relevanter Studien zum Kontext Einsparpotenziale durch smarte Thermostate 2-2	29
Tabelle 6: Einstellbare Kennzahlen und Parameter des V2H-Simulationstools	39
Tabelle 7: Auswertungsergebnisse des Simulationstools.....	41
Tabelle 8: Zusammenfassung der energetischen Kennwerte Referenzhaushalt	47
Tabelle 9: Simulationsergebnisse für den Referenzhaushalt mit bidirektionalen Laden (Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt mit unidirektionalem Laden).....	51
Tabelle 10: Ausarbeitung verschiedener Szenarien für ein Einfamilienhaus Referenzhaus.....	53
Tabelle 11: Sensitivitätsanalyse zur Veränderung der BEV-Batteriekapazität (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden)	54
Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse Variation der Ladeleistung des BEV (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden)	56
Tabelle 13: Sensitivitätsanalyse BEV-Verfügbarkeit anhand der Nutzungszeiten (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionalem Laden)	58
Tabelle 14: Variablen für den Anwendungstest.....	65
Tabelle 15: Aufgezeichnete Mess-Zeitreihen durch Sensorik im Smart Home Thermostat (Pretest).....	70
Tabelle 16: Erste Einordnung und Prototypen unterschiedliche Heiztypen im Pretest	73
Tabelle 17: Allgemeine und energetische Kenndaten zum Mehrfamilienhaus im Anwendungstest	74
Tabelle 18: Mess-Zeitreihen durch Smart Home Thermostate (SHT) und unterjährige Verbrauchsinformation (UVI)	78
Tabelle 19: Bewertung der durchschnittlichen Temperatur-Niveaus (Jan.2024 und Vormonat in Klammern).....	80
Tabelle 20: Bewertung der Standardabweichung nach [116]	82
Tabelle 21: Bewertung der Temperatur-Schwankungen mittels Standardabweichung (Jan.2024 und Vormonat in Klammern)	83
Tabelle 22: Auflistung möglicher Gründe für Offset Kennwerte	87
Tabelle 23: Heizenergieverbrauch und Summe Ventilöffnungen der Wohnungen - Jan. 2024 (Werte in Klammern Vormonat)	93
Tabelle 24: Verteilung Verbrauchstypen nach normierten fl. Verbrauchswert im Testgebäude (n=28 Wohnungen) pro Monat.....	94
Tabelle 25: Gegenüberstellung der spez. Verbräuche Gruppe mit und ohne smarte Thermostate (Heizperiode 22/23 vs. 23/24)	97
Tabelle 26: Bewertung der Luftfeuchtigkeit und Einordnung Schimmelrisiko je Raum (Jan.2024 und Vormonat in Klammern)	110

Tabelle 27: Kurzbeschreibung der Grenzwerte zur Einordnung Heizverhaltenstypen nach Heizdauer und Soll-Temperatur	114
Tabelle 28: Heiz- und Verbrauchstypen (Jan. 2024) der ausgestatteten Wohnungen.....	116

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
EED	Energy Efficiency Directive (Energieeffizienz-Richtlinie)
EFH	Einfamilienhaus
EMS	Energie-Management-System
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Energy Performance of Building Directive
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HEMS	Home Energy Management Systems
HKVO	Heizkostenverordnung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IoT	Internet of Things
MFH	Mehrfamilienhaus
PMV	Predicted Mean Vote (persönliches Wohlbefinden)
PPD	Projected Percentage of Dissatisfied (Unzufriedenheitsprozentsatz)
PV	Photovoltaik
REST-API	Representational State Transfer Application Programming Interface
SHT	Smart Home Thermostat
SoC	State of Charge (Ladezustand)
UVI	Unterjährige Verbrauchsinformation
V2H	Vehicle-to-Home
V2G	Vehicle-to-Grid
V2L	Vehicle-to-Load
V2V	Vehicle-to-Vehicle
WE	Wohneinheit

1 Einleitung

Die deutsche Energie- und Klimapolitik verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen langfristig zu reduzieren. Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, ist eine Verbesserung der Energieeffizienz und eine Steigerung des Anteils Erneuerbarer Energien erforderlich. Im Jahr 2022 hat der Sektor der privaten Haushalte mit ca. 678 Terawattstunden etwa ein Viertel zum Gesamtenergieverbrauch Deutschlands beigesteuert [1]. Angesichts seines beträchtlichen Verbrauchsanteils steht dieser Sektor vor der anspruchsvollen Aufgabe, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Komfort, ökonomischer Effizienz und Umweltverträglichkeit zu finden.

Vor dem Hintergrund des wissenschaftlichen Konsenses über die Notwendigkeit, den Klimawandel zu bekämpfen, und des wachsenden gesellschaftlichen Interesses an nachhaltigem Energiemanagement spielen regulatorische Maßnahmen eine zentrale Rolle. Ein Schlüsselement dieser Strategie innerhalb der Europäischen Union (EU) sind die europäischen Richtlinien zur Gesamtenegieeffizienz von Gebäuden, bekannt als *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) und die Energieeffizienz-Richtlinie *Energy Efficiency Directive* (EED) [2]. Die Richtlinien zielen darauf ab, den Energieverbrauch in Gebäuden zu reduzieren und somit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Klima- und Energieziele der EU zu leisten. Zu diesen Zielen gehört unter anderem eine erhebliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050 im Vergleich zu den Werten von 1990.

Die Umsetzung der Direktiven auf nationaler Ebene in Deutschland erfolgte zunächst vorwiegend durch die *Energieeinsparverordnung* (EnEV) und die *Heizkostenverordnung* (HKVO). Das *Gebäudeenergiegesetz* (GEG), welches die EnEV abgelöst hat, legt spezifische Anforderungen an die Energieeffizienz für Neubauten und Bestandsgebäude fest. Ziel ist es, die Anforderungen sukzessive zu verschärfen [3]. Die HKVO definiert u. a. die detaillierte verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizungs- und Warmwasserkosten in Mehrfamilienhäusern mit dem Ziel, einen Anreiz zur sparsamen Energieverwendung zu schaffen. Dies eröffnet neue Perspektiven und Notwendigkeiten zur Effizienzsteigerung sowie zur Transparenz im Energieverbrauch [4].

In der historischen Betrachtung wurde der Haushalt als reiner Abnehmer und Verbraucher von Energie betrachtet. Der für die Nutzung von Haushaltsgeräten wie Geschirrspülern oder Waschmaschinen erforderliche Strom wurde über das Stromnetz bezogen. Des Weiteren erfolgte die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in der Regel durch fossile Energiequellen, die primär mit Erdgas oder Öl befeuert wurden [5]. Infolge der fortschreitenden Entwicklungen der Energie- und Wärmewende, insbesondere der Trends zur Dekarbonisierung und Digitalisierung, sind tiefgreifende Veränderungen in Haushalten zu beobachten. Haushalte haben heute die Möglichkeit, sich mit einer Vielzahl von Energietechnologien größtenteils unabhängig zu versorgen und werden vom reinen Verbraucher zum Produzenten von Energie (auch *Prosumer* genannt) [6]. Ein Beispiel hierfür ist, dass Haushalte nicht mehr ausschließlich auf die Versorgung durch das Strom- oder Gasnetz angewiesen sind. Die eigene Erzeugung, beispielsweise durch Photovoltaik- oder Solarthermie-Anlagen, ermöglicht eine teilweise Deckung des Bedarfs. Des Weiteren lässt sich seit dem Jahr 2012 eine kontinuierliche Zunahme der Nutzung elektrischer Wärmepumpen in privaten Haushalten beobachten, welche Umweltwärme nutzbar machen [7].

Zusätzlich kann eine steigende Anzahl an Elektrofahrzeugen, sogenannte Battery Electric Vehicle (BEV), im Verkehrssektor beobachtet werden. In Deutschland hat die Anzahl der Elektrofahrzeuge von 2020 bis April 2024 um mehr als 960% zugenommen und hat einen Stand von ca. 1,5 Millionen BEV [8]. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Kontext zu berücksichtigen ist, ist die Tatsache, dass ein beträchtlicher Anteil der Elektrofahrzeuge in privaten Haushalten geladen wird. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf das Energiesystem im Haushalt und trägt gleichzeitig zur Sektorenkopplung zwischen dem Gebäude- und Verkehrssektor bei.

Die Notwendigkeit, den Energieverbrauch in Haushalten zu optimieren und gleichzeitig den Übergang zu nachhaltigeren Energiequellen zu fördern, stellt eine zentrale Herausforderung unserer Zeit dar. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Energie- und Wärmewende in Gebäuden zunehmend an Bedeutung. Sie ist nicht nur ein entscheidender Faktor im Kampf gegen den Klimawandel, sondern bietet auch die Chance, durch verbesserte Energieeffizienz und den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Diese Entwicklung ist insbesondere für den Gebäudesektor von großer Bedeutung, da dieser für einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs verantwortlich ist, wie das Beispiel Deutschlands zeigt.

Durch eine intelligente Gestaltung und Optimierung des Energiemanagements in Gebäuden kann ein wesentlicher Beitrag zum Erreichen der nationalen Klimaziele geleistet werden. Die Transformation der globalen Energiesysteme von fossilen zu erneuerbaren Quellen bedingt eine Veränderung in der Struktur klassischer Haushalte, die sich zunehmend zu vollständig elektrifizierten Systemen entwickeln [9]. In diesem Zusammenhang gewinnen erlangen die Eigenversorgung mit Energie sowie die Flexibilisierung der Energieverbrauchsmuster in Haushalten an Bedeutung. Um die angestrebte Transformation erfolgreich zu bewerkstelligen und eine aktive Rolle in dem sich wandelnden Energieökosystem zu übernehmen, ist der Einsatz digitaler, smarter Technologien unabdingbar. Smarte Technologien ermöglichen eine präzise Erfassung, Kommunikation und Steuerung des Energieverbrauchs sowie der Energieerzeugung.

Die fortschreitende Digitalisierung und Vernetzung von Anlagen und Geräten im Haushalt eröffnet im Kontext des Energiemanagements gänzlich neue Perspektiven. Intelligent vernetzte Systeme ermöglichen eine präzisere Steuerung und Überwachung des Energieverbrauchs, wodurch eine Steigerung der Effizienz sowie eine Erhöhung des Komforts für die Bewohner erzielt werden kann. Die Integration smarter Technologien zur Datenerhebung und der Analyse von Verbrauchsdaten ermöglicht eine Optimierung der Energieflüsse. Dies erlaubt eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Energie und eine Maximierung des Eigenverbrauchs von vor Ort erzeugter erneuerbarer Energie. Die Digitalisierung eröffnet somit das Potenzial, die Energie- und Wärmewende in Gebäuden nicht nur effektiver zu gestalten, sondern auch aktiv zu beschleunigen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Untersuchung zweier exemplarischer Anwendungsfelder smarter Technologien, die im Kontext des Energiemanagements in Haushalten zum Einsatz kommen. Diese Technologien, die sowohl auf thermischer als auch auf elektrischer Ebene angewandt werden, zielen darauf ab, die Energieeffizienz zu steigern und das Verbrauchsverhalten nachhaltig positiv zu beeinflussen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfolgt eine Betrachtung des Vehicle-to-Home (V2H) auf elektrischer Ebene. Zudem wird die Möglichkeit der Erhebung von Daten zum Heizverhalten mittels Smart Home Thermostaten auf thermischer Ebene untersucht.

1.1 Motivation: Vernetzung von energetischen Systemkomponenten im Haushalt

Innerhalb des Kontextes des Energiemanagements stellt der Begriff der *Vernetzung* einen zentralen Aspekt dar. Der Begriff bezeichnet die interaktive Kommunikation technischer Komponenten innerhalb eines Gebäudes, welche eine Grundvoraussetzung für das Konzept des „*Smart Home*“ oder „*Smart Living*“ darstellt. Diese Begriffe umreißen ein fortschrittliches Wohnkonzept, das sich auf Automatisierung stützt, jedoch noch nicht auf künstlicher Intelligenz aufbaut [10]. Das primäre Ziel dieser Automatisierung besteht in einer kosteneffizienteren und nachhaltigeren Steuerung der Energieflüsse im Vergleich zu konventionellen Gebäuden. Das generelle Ziel ist eine Verbesserung der Lebensqualität der Bewohner [11].

In einem Haushalt können Photovoltaikanlagen, Batteriespeicher sowie intelligent steuerbare Lasten dazu beitragen, die Energieversorgung effizient und eigenständig zu gestalten. Diese Elemente sind von entscheidender Bedeutung für die Stabilisierung des Energiesystems sowie eine signifikante Reduktion der Stromkosten durch die Maximierung des Eigenverbrauchs und Minimierung der Abhängigkeit von externen Energiequellen [12]. Das zentrale Prinzip besteht in der optimalen Anpassung der selbst erzeugten Energie an den tatsächlichen Bedarf des Haushalts. Die Rückhaltung von Überschussenergie erfolgt in Batteriespeichern für eine spätere Nutzung. Durch intelligentes Energiemanagement, wie das zeitliche Anpassen des Verbrauchs, wird eine Maximierung der Selbstversorgung und eine größtmögliche Unabhängigkeit bei gleichzeitiger Förderung von ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit angestrebt [13].

Das Home Energy Management System (HEMS) spielt eine zentrale Rolle in der intelligenten Vernetzung eines Haushalts. Das HEMS fungiert als zentrale Steuerungs- und Kommunikationseinheit zur dezentralen Erzeugung und Speicherung von elektrischer Energie sowie zur Optimierung des Energieverbrauchs im Wohngebäude [14]. Es verarbeitet zeitgenaue Leistungs- und Verbrauchswerte, die durch Messkomponenten bereitgestellt werden. Von besonderer Relevanz ist hierbei die Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Konzept der Energiespeicherung. Dadurch kann der Eigenverbrauch erneuerbarer Energien gesteigert und somit zur Effizienz vernetzter Haushaltssysteme beigetragen werden [15]. Zu den Funktionen zählen die **Visualisierung**, die **Steuerung** und die **Automatisierung** der Energieflüsse sowie das gezielte sammeln von Information zum Strom- und Heizenergieverbrauch [16].

Die nachfolgende Abbildung 1 veranschaulicht die Daten- und Energieflüsse zwischen verschiedenen Anlagen und Anwendungen in einem HEMS. Das System ist in der Lage, eine Vielzahl elektrischer und thermischer Anlagen und Geräten (s. Anwendungen) zu handhaben und integriert in der Regel eine Benutzeroberfläche zur Verbrauchsvisualisierung, welche auch für Optimierungsfeedback genutzt wird (s. User Interface). Im Kern des HEMS befindet sich typischerweise eine zentrale Steuereinheit oder ein cloudbasiertes Gateway zur Koordination der Systemkomponenten. Zudem können beispielsweise auch Einflüsse wie Nutzerverhalten (s. User), Wetterdaten und Preissignale aus dem Stromnetz berücksichtigt. [17]

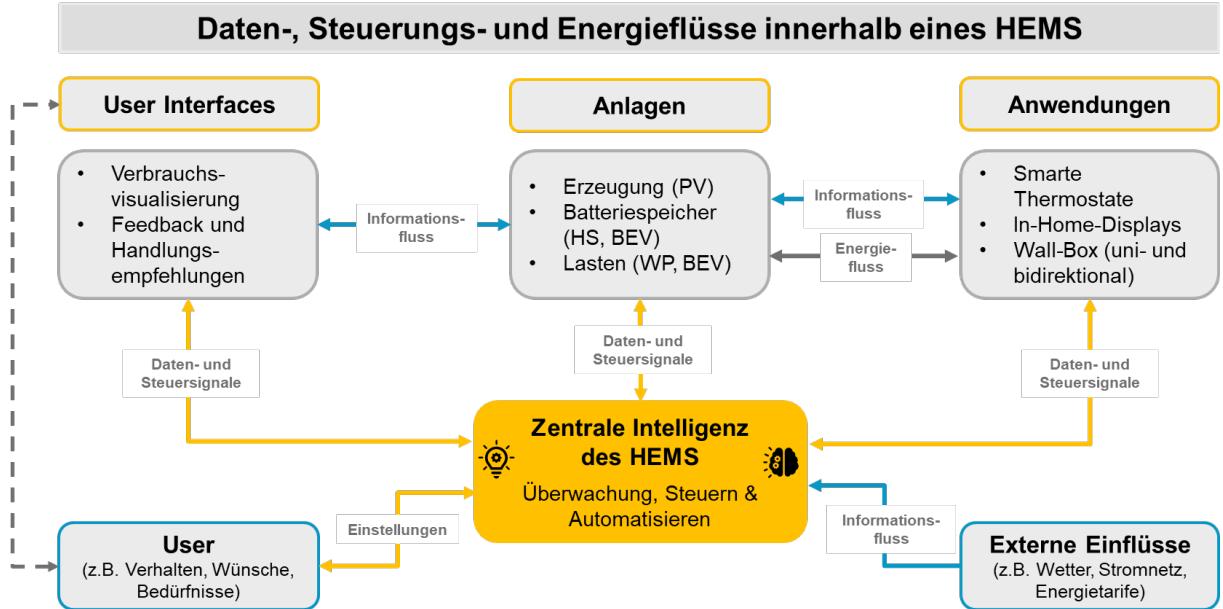


Abbildung 1: Schema Daten und Energieflüsse des HEMS (eigene Darstellung nach [17])

Die Zukunft des Haushaltssystems, insbesondere des HEMS, ist darauf ausgerichtet, den Eigenverbrauch von selbsterzeugter Energie optimal zu nutzen, sowohl in energetischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht. Ein wesentlicher Aspekt ist die Anwendung thermischen Energiemanagements, beispielsweise durch den Einsatz smarter Thermostate zur systematischen Datenerhebung und Steuerung von Heizenergieverbräuchen. Diese Daten dienen als Grundlage für das Feedback der Nutzer (s. Kapitel 1.2.2). Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit fokussiert sich auf die Untersuchung elektrischer HEMS-Anwendungen zur Optimierung des Eigenverbrauchs durch das bidirektionale Laden von Elektrofahrzeugen in Eigenheimen mit Photovoltaikanlagen. Im Rahmen dessen wird ein Referenzhaushalt mit modernen Komponenten (u. a. Wärmepumpen) und der Möglichkeit zum bidirektionalen Laden analysiert, um das Potenzial zur Steigerung der Autarkie zu evaluieren (s. Kapitel 1.2.1). In der vorliegenden Arbeit werden bestimmte Bereiche wie Nutzergewohnheiten und externe Einflüsse nicht näher beleuchtet.

Der vorliegende Überblick verdeutlicht die Vielfalt der Ansätze sowie die Relevanz intelligenter Energienutzungskonzepte in modernen Wohngebäuden. Die fortschreitende Entwicklung innovativer Technologien in Kombination mit deren intelligenter Vernetzung eröffnet neue Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz, zur Förderung der Nachhaltigkeit sowie zur Verbesserung der Lebensqualität. Die Vernetzung im Smart Home trägt somit maßgeblich zur Transformation der Energiesysteme bei. Im Nachfolgenden werden die beiden fokussierten Anwendungsfelder und die daraus resultierenden Forschungsfragen vorgestellt.

1.2 Fokussierte HEMS-Anwendungsfelder

1.2.1 Steigerung der elektrischen Autarkie durch Vehicle-to-Home

Die Ära des konventionellen Verbrennungsmotors neigt sich dem Ende zu. Gemäß dem europäischen *Green Deal* dürfen ab dem Jahr 2035 keine Fahrzeuge mit fossilen Verbrennungsmotoren in der Europäischen Union neu zugelassen werden [18]. Dies impliziert, dass ein Großteil der Bevölkerung auf alternative Mobilitätsformen umsteigen muss und das Elektrofahrzeug an Bedeutung gewinnt. Die fortschreitende Elektrifizierung des Verkehrssektors und seine enge Verknüpfung mit der Nutzung erneuerbarer Energien bieten sowohl Chancen als auch Herausforderungen für Haushalte. Die Integration von Elektrofahrzeugen eröffnet Möglichkeiten, nicht nur als Transportmittel zu fungieren, sondern auch als Energiespeicher. Beim unidirektionalen Laden wird lediglich Energie bezogen, während beim bidirektionalen Laden durch die Rückeinspeisung der Energie aus der Traktionsbatterie zum Haus die Nutzung von Elektrofahrzeugen als temporäre Energiespeicher möglich wird [19]. Durch das **bidirektionale Laden** wird ein Energieaustausch zwischen Elektrofahrzeugen und dem Hausnetz ermöglicht. Das Konzept des bidirektionalen Ladens wird auch als **Vehicle-to-Home** (V2H) bezeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine detaillierte Untersuchung des bidirektionalen Ladens für vernetzte Haushalte. Der Fokus liegt auf der Evaluierung des Autarkiegrades durch innovative Ladestrategien. Dadurch können Fahrzeuge während ihrer durchschnittlichen Inaktivitätszeit von etwa 23 Stunden pro Tag als Zwischenspeicher genutzt werden [20, 21]. Dies könnte nicht nur zur Netzstabilität beitragen, sondern auch wirtschaftliche Vorteile für die Fahrzeugbesitzer mit sich bringen. Insbesondere im Falle einer vorhandenen PV-Anlage kann das V2H-Konzept zur Erhöhung der Autarkie und des Eigenverbrauchs beitragen, was letztlich die Energiekosten reduziert [19].

Ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik sowie den Stand der Forschung zum Thema bidirektionales Laden und V2H sind in Kapitel 2.3 zu finden. In diesem Zusammenhang demonstrieren erste Pilotprojekte die technische Realisierbarkeit des bidirektionalen Ladens sowie das Potenzial zur Erhöhung des Autarkiegrades. Die vorliegende Arbeit zielt auf die Entwicklung eines Simulationstools zur Analyse des Stromverbrauchs in Einfamilienhäusern mit modernen elektrischen Anlagen, einschließlich Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen und PV-Anlagen ab. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Auswirkungen des Fahrverhaltens und der Fahrzeugverfügbarkeit auf die Energieautarkie durch bidirektionales Laden gelegt. Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit besteht in der Identifikation von Potenzialen für Haushalte durch bidirektionales Laden. Dabei wird der Einsatz von gesteuertem Laden durch z. B. Preissignale von dynamischen Stromtarifen nicht betrachtet. Mittels Sensitivitätsanalysen werden Indikatoren identifiziert, die einen ausgeprägten Einfluss auf die Autarkie von Haushalten im Kontext von V2H-Systemen haben. Die vorliegende Arbeit schließt somit eine wesentliche Forschungslücke im Bereich der Eigenverbrauchsoptimierung in privaten Haushalten und liefert wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von Ladestrategien.

Im Rahmen dieser Studie wird ein Simulationstool für V2H-Systeme in modernen Haushalten entwickelt, um die Auswirkungen des bidirektionalen Ladens auf die Energieversorgung von Haushalten zu untersuchen. Das bidirektionale Laden ermöglicht es Elektrofahrzeugen nicht nur

Energie zu entnehmen, sondern auch Energie zurückzuspeisen, um andere Verbraucher zu versorgen. Das **erste zentrale Anwendungsfeld** dieser Arbeit widmet sich mit der folgenden Forschungsfrage:

- *Inwiefern kann bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen den Autarkiegrad in einem modernen Einfamilienhaus steigern?*

1.2.2 Steigerung der Heizenergieeffizienz durch Smart Home Anwendungen

Die Frage der Energieeffizienz im Wärmesektor erfährt in der heutigen Zeit eine zunehmende Relevanz. Vor dem Hintergrund eines steigenden Bewusstseins für Nachhaltigkeit und Klimaschutz und stetig steigender Energiepreise sehen sich sowohl Verbraucher als auch die Gesetzgebung mit der Herausforderung konfrontiert, den Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser zu optimieren. Hier setzen smarte Technologien, insbesondere Smart Home Thermostate an, um einen Beitrag zur Steigerung der Heizenergieeffizienz zu leisten. Des Weiteren ermöglicht die gesetzlich vorgeschriebene digitale Erfassung der Heizenergieverbräuche Rückschlüsse auf das Heizverhalten. Smarte Thermostate können dabei unterstützen, die aufgezeigten Verbräuche zu optimieren.

Im Zuge der Novellierung der *Heizkostenverordnung* (HKVO) im Dezember 2021 erfuhr die *unterjährige Verbrauchsinformation* (UVI) eine an Bedeutung. Diese Novelle, initiiert durch die überarbeitete *Energieeffizienzrichtlinie* (EED) der Europäischen Union, etablierte für Vermieter neue Pflichten. Dies umfasst u. a. eine mindestens monatliche Information des Mieters über dessen Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser [4]. Die Gesetzesänderung zielt darauf ab, durch Transparenz und regelmäßige Information ein energiebewussteres Verhalten zu fördern. Diesbezüglich ist die Anforderung an die Verbrauchserfassungstechnik zu nennen, bis zum 31. Dezember 2031 Smart-Meter-Gateway-fähig und interoperabel zu sein. Die dargelegten Anforderungen an die Verbrauchserfassungstechnik mit den dazugehörigen Fristen sowie die Historie werden auf der nachfolgenden Zeitskala in Anlehnung an die Heizkostenverordnung dargestellt (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Zeitskala Novellierung der EU-Effizienz-Richtlinie (EED) (adaptiert nach [22])

Die Verbrauchsinformationen der UVI werden den Mietern in der Regel postalisch oder über ein Online-Mieterportal zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise erhalten Mieter durch erste regelmäßige Verbrauchserfassungen Informationen über ihr Heizverhalten und könnten Maßnahmen zur Energieeinsparung ableiten [23]. Eine Maßnahme wäre beispielsweise die Installation von Smart Home Thermostaten in Wohnräumen. Diese ermöglicht es den Nutzern, ihre Heizenergie am Heizkörper effizienter zu steuern. Die Möglichkeit, Heizpläne individuell und flexibel anzupassen sowie die Raumtemperatur jederzeit und von überall zu kontrollieren, erlaubt eine gezielte Reduktion des Energieverbrauchs. Die aktuellen Funktionen sowie der Stand der Technik und Forschung zur Verbrauchsvisualisierung und Smart Home Thermostaten sind in Kapitel 2.4 dargelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Zusammenspiel aus Verbrauchsvisualisierung und aktiver Steuerung analysiert. Dabei wird empirisch untersucht, welche Daten aus smarten Thermostaten erhoben werden können und welche Rückschlüsse sich durch Abgleich mit den monatlich aufgelösten Verbrauchsdaten ergeben. Die Freigabe der Dateneigentümer (Mieter) ermöglicht im Rahmen eines Anwendungstests in einem Mehrfamilienhaus die wissenschaftliche Untersuchung mehrerer Wohnungen. Dazu werden ebenfalls Smart Home Thermostate eingesetzt, um weitere Datenpunkte über das individuelle Heizverhalten zu gewinnen und mit dem Verbrauch zu korrelieren (s. Kapitel 5). Von besonderem Interesse sind hierbei die Fragen, inwiefern der Einsatz von Smart Home Thermostaten zur individuellen Kosten- und Energieeinsparung beitragen kann, sondern auch, inwiefern diese Technologie zur Datenerhebung und daraus resultierender Feedbacks im größeren Rahmen zur Klimaneutralität des Gebäudesektors beitragen kann. Das **zweite zentrale Anwendungsfeld** dieser Arbeit widmet sich mit der folgenden Forschungsfrage:

- *Inwiefern können Smart Home Thermostate zur Datenerhebung und Analyse beitragen, um die Heizenergieeffizienz in Wohngebäuden zu verbessern?*

1.3 Struktur der Arbeit

Kapitel 1: Einleitung

Im ersten Kapitel dieser Arbeit erfolgt eine Einführung in die Thematik des Energiemanagements in Haushalten. Zudem werden die relevanten gesetzlichen Grundlagen und Hintergründe erörtert. Im Anschluss werden die beiden fokussierten Anwendungsfelder des Energiemanagements und die zugehörigen Forschungsfragen präsentiert.

Kapitel 2: Stand der Technik und Forschung von HEMS-Anwendungen

Im zweiten Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung von den betrachteten HEMS-Anwendungsfeldern vorgestellt. Dazu wird zunächst ein Überblick über relevante Technologien und Anlagen im Gebäudebereich gegeben, bevor die Vorgehensweise der durchgeführten Literaturstudie erläutert wird. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Betrachtung spezifischer Anwendungsfelder, wie des Vehicle-to-Home (V2H) Systems und thermischer Smart Home Thermostate sowie der Aspekt der Verbrauchsvisualisierung. Ziel ist es, sowohl den aktuellen Stand der Technik als auch der Forschung in diesen Bereichen abzubilden.

Kapitel 3: Zwischenfazit: Stand der Technik und Forschung

Das dritte Kapitel präsentiert eine Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem vorangehenden Kapitel und analysiert den aktuellen Stand von Technik und Forschung im Bereich des Energiemanagements für Haushalte. Es bildet die Grundlage für die nachfolgenden Kernkapitel und identifiziert wesentliche Forschungslücken.

Kapitel 4: Simulation von Vehicle-to-Home im HEMS

Das vierte Kapitel ist dem ersten Anwendungsfeld für Energiemanagement-Anwendungen gewidmet, das im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird. Es befasst sich mit der Simulation von V2H-Systemen im Kontext von HEMS. Der Ansatz, die Rahmenbedingungen sowie der Aufbau und die Methodik der Simulation werden darin beschrieben. Des Weiteren werden die Simulationsergebnisse am Beispiel eines typischen Referenzhaushalts und einer Sensitivitätsanalyse für Ladeparameter präsentiert und diskutiert, gefolgt von einem Zwischenfazit, dass sich speziell auf das Anwendungsfeld V2H bezieht.

Kapitel 5: Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz mit Smart Home Technologien

In Kapitel fünf erfolgt die Betrachtung des zweiten fokussierten Anwendungsfeldes dieser Arbeit. Im Rahmen eines Anwendungstests in der Wohnungswirtschaft wird eine Messmethode zur Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz entwickelt und vorgestellt, welche den Einsatz von Smart Home Thermostaten berücksichtigt. Zunächst wird das Untersuchungsdesign erläutert, bevor auf die Methodik sowie auf Pretests und Datengrundlagen eingegangen wird. Im Anschluss werden Analyse- und Auswertungskonzepte vorgestellt und die Ergebnisse umfassend diskutiert.

Kapitel 6: Fazit und Ausblick

Im abschließenden sechsten Kapitel werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, ein Fazit für die beiden Anwendungsfelder (V2H und Smart Home Thermostate) gegeben und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten geboten. Damit wird die Dissertation abgerundet, indem allgemeine Schlussfolgerungen und Synergieeffekte zwischen den Anwendungsfeldern gezogen und Perspektiven für die Weiterentwicklung in diesem Forschungsfeld aufgezeigt werden.

2 Stand der Technik und Forschung von HEMS-Anwendungen

In einer Zeit, die durch ein wachsendes Bewusstsein für Energieeffizienz und nachhaltige Ressourcennutzung gekennzeichnet ist, spielen Home Energy Management Systeme (HEMS) eine entscheidende Rolle bei der Optimierung des Energieverbrauchs in privaten Haushalten. Dieses Grundlagenkapitel konzentriert sich auf zwei wichtige HEMS-Anwendungsfelder: Vehicle-to-Home (V2H) Anwendungen und Smart Home Thermostate (s. Kapitel 1.2). Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die energierelevanten Technologien und Anlagen im Gebäude gegeben, bevor auf die beiden Anwendungsfelder eingegangen wird. Dabei werden jeweils Stand der Technik und der Stand der Forschung vorgestellt.

2.1 Überblick über relevante Technologien und Anlagen im Gebäude

Im Folgenden wird ein Überblick und eine Kategorisierung für relevante Energietechnologien im Haushalt gegeben und der aktuelle Stand der Technik für Home Energy Management Systeme (HEMS) dargestellt. Im Rahmen eines Technologie-Screenings wurden zunächst Technologien identifiziert, die das Energienachfrageverhalten von Haushalten beeinflussen können. Das Technologie-Screening wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *Energienachfragerverhalten in Haushalten* erstellt und entspricht dem Stand von Dezember 2020. Der Fokus lag dabei ausschließlich auf technologischen Aspekten. Das individuelle Nutzerverhalten der Haushaltsbewohner wurde nicht berücksichtigt.

Im Technologie-Screening wurden verschiedene Technologien im Bereich der Digitalisierung von Haushalten analysiert [24]. Dabei wurden insbesondere Einzellösungen für Energiemessungen, Gebäudeautomationssysteme (Smart Home) und Energiemanagementsysteme untersucht. Unter anderem wurden 18 Smart Home-Systeme und neun Energiemanagementsysteme betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbindung von physischen Energieanlagen mit digitaler Konnektivität den Aufbau intelligenter Energieprodukt-Service-Systeme ermöglicht. Gebäudeautomationsysteme im Smart Home Bereich decken nicht nur Energie-, sondern auch Komfort- und Sicherheitsaspekte ab. Energiemanagementsysteme haben den größten Einfluss auf den Energieverbrauch und wurden anhand von vier Kriterien bewertet: Anwendbarkeit, Energieeffizienz, Kompatibilität und Kosten. Es wurde festgestellt, dass Energiemanagementsysteme hauptsächlich zur Visualisierung von Energieverbräuchen genutzt werden. Die Steuerung ist in der Regel nur mit kompatiblen Geräten möglich.

In der nachfolgenden Abbildung 3 sind auf der linken Seite die Standard-Energietechnologien in Erzeuger, Umwandler, Verbraucher und Speicher kategorisiert. Zudem zeigt die rechte Seite der Abbildung 3 die Kategorien Messsysteme, Gebäudeautomation und Energiemanagementsysteme. Dabei handelt es sich um digitale Technologien mit Aspekten und Anwendungen von Energietransparenz und -management.

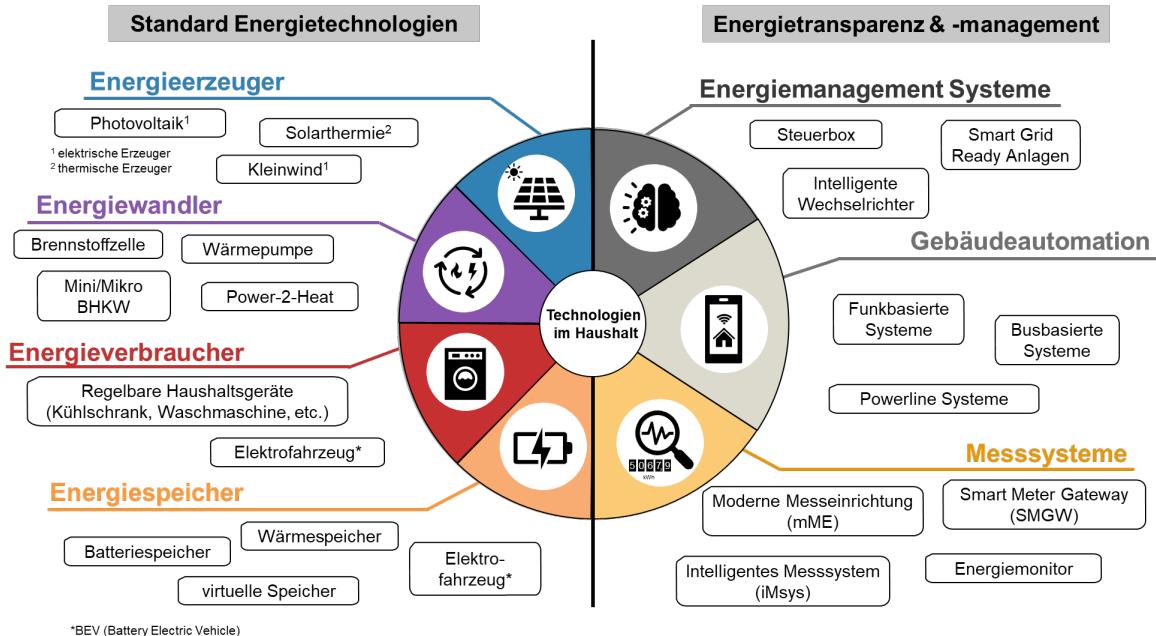


Abbildung 3: Überblick Standard und smarte Energietechnologien im Haushalt (eigene Darstellung)

Der Fokus auf energietechnische Anwendungen von smarten Technologien grenzt den Kreis der zu betrachtenden Systeme ein. Im Folgenden wird zwischen *Standard* und *smart*en Technologien unterschieden. Smarte Technologien und Produkte nutzen moderne, digitale Technologien zur Messung, Analyse oder Steuerung und zusätzlich die Möglichkeiten der Informationstechnologie und Kommunikationsmedien zum Datentransfer. Dies kann zum Beispiel durch eine App oder eine webbasierte Steuerungs- oder Visualisierungssoftware geschehen. Aufgrund dieser Definition kann eine erste Abgrenzung zwischen Standard Technologien und Maßnahmen durch den Einsatz smarter Technologien im Haushalt erfolgen. Folgende Kategorien werden für Haushaltstechnologien, die Einfluss auf das Energienachfrageverhalten haben, betrachtet (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Technologiekategorien und Beispiele von Technologien

Kategorie	Beispiele
Erzeuger	Solarpanels, Windturbinen, thermische Erzeuger
Wandler	Wärmepumpen, BHKW, Brennstoffzellen, Power-to-Heat
Verbraucher	Haushaltsgeräte, Beleuchtungssysteme, Heizungen
Energiespeicher	Batteriespeichersysteme, Wärmespeicher
Messsystem	Intelligente Stromzähler, Smart-Meter-Gateway, Sensorik
Gebäudeautomation (Smart Home)	Smarte Thermostate, Beleuchtungssteuerungssysteme, Sicherheitssysteme
Energie-Management-System (EMS)	Softwarelösungen zur Steuerung und Optimierung des Energieverbrauchs, Integration von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern

Die **Erzeuger** in Haushalten sind vornehmlich Technologien zur Produktion von elektrischer Energie, wie Photovoltaik (PV), Kleinwindanlagen oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). Unter der Kategorie **Verbraucher** zählen alle Geräte oder Anlagen, die einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch im Haushalt haben. Dies sind Wärmepumpen und andere Haushaltsgeräte, wie beispielsweise Waschmaschinen, Trockner, Kühlschränke etc., dort wird vor allem auch die Flexibilität der Geräte, durch Steuerbarkeit (beispielsweise zeitweise Abschaltung) betrachtet. In der Kategorie **Energiespeicher** werden die Speichertechnologien betrachtet, die ein intelligentes Einspeichern von elektrischer Energie zulassen.

Die smarten **Messsysteme** beinhalten Lösungen zur Messung von Energieströmen (Erzeugung und Verbrauch) im Haushalt und deren Weitergabe über eine (IoT- oder) IKT-Schnittstelle zur weiteren Datenverarbeitung. Die Kategorie der **Gebäudeautomation** beinhaltet vornehmlich Smart Home-Systeme, die einfache energetische Anwendungen ermöglichen und die Bewohner im Haushalt auch in anderen Anwendungsbereichen (z. B. Komfort und Sicherheit) unterstützt.

Die Automationspyramide in Abbildung 4 zeigt die unterschiedlichen Ebenen und Funktionen des digital vernetzten Haushalts. Bei der **Feldebene** handelt es sich um Standard-Einzeltechnologien am Beispiel der Gebäudeautomation (Aktoren und Sensoren). Im Weiteren behandelt die **Steuerungsebene** die Verarbeitung von Messwerten der Komponenten aus der Feldebene in Automatisierungen, beispielsweise als Reaktion auf ausgelöste Werte eines Sensors. An der Spitze des digitalisierten Gebäudes ist die Leitebene mit dem **EMS**. Diese soll alle Informationen der untergeordneten Ebenen verarbeiten, um beispielsweise die Verwaltung und Steuerung von Heizungsanlagen bis hin zur intelligenten Nutzung von selbst erzeugtem PV-Strom für Haushaltsgeräte oder Elektrofahrzeuge zu realisieren.

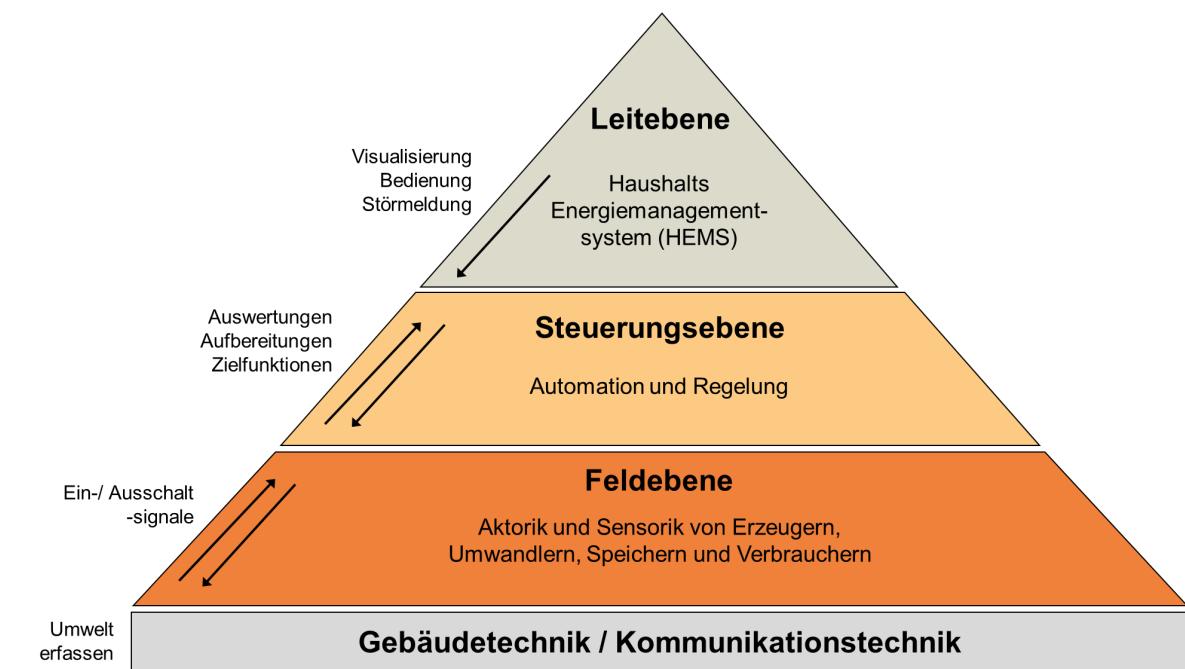


Abbildung 4: Automationspyramide für Energiemanagementsysteme im Haushalt nach [25]

Im Rahmen des durchgeföhrten Technologie-Screenings wurde die Kategorie des Energiemanagementsystems (kurz: HEMS) betrachtet. Es stellt das vernetzte Zusammenwirken smarter Technologien sowie dezentraler Erzeugungs- und Speichertechnologien im Haushalt dar (s. schematische Darstellung HEMS in Abbildung 5).

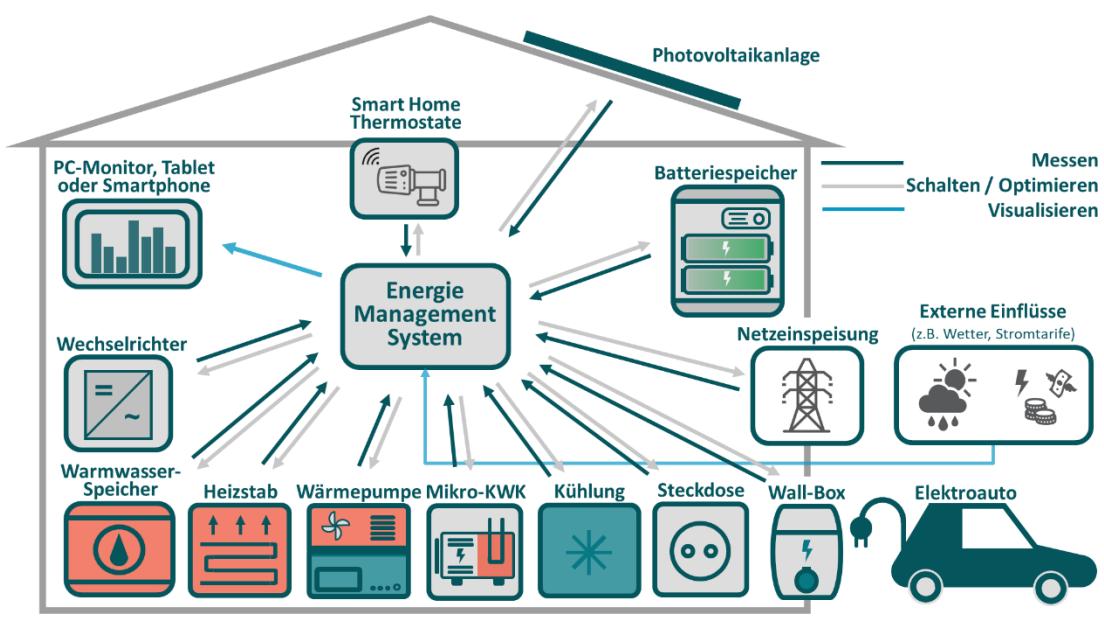


Abbildung 5: Schematische Darstellung Energiemanagementsystem Haushalt (eigene Darstellung)

Mit Hilfe interner und externer Informationen kann das HEMS energieintensive Haushaltsgeräte steuern. Interne Informationen sind beispielsweise gemessene Sensorwerte, die Auskunft über den Zustand der Geräte, den aktuellen Stromverbrauch der Geräte und den Produktionsstand der Erzeuger geben. Externe Informationen stammen aus Daten, die nicht innerhalb der Gebäudehülle erfasst werden können. Dies sind z. B. Wetterdaten für die Prognosen zur Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaikanlagen. Weitere Daten können aus gebäudeinternen Informationen gewonnen werden [26]:

- aktueller sowie prognostizierter Verbrauch
- aktuelle sowie prognostizierte Erzeugung
- Nutzungspräferenzen oder Programmierungen
- spezifische Messdaten (z. B. Raumtemperatur, Luftfeuchte und -qualität)

Der große Vorteil von HEMS liegt in der bidirektionalen Kommunikation der steuerbaren Anlagen (Erzeugung und Lasten) im Haushalt. Das Technologie-Screening und die weiterführende Literaturstudien haben jedoch gezeigt, dass noch viele Herausforderungen und Probleme gelöst werden müssen, um diese Technologie voll nutzen zu können. Die größte Schwierigkeit besteht nach wie vor in der Kopplung der Systemkomponenten sowie der Kommunikation und Koordination der Energieflüsse. Daraüber hinaus ist der aktuelle Markt ausschließlich durch proprietäre Systeme gekennzeichnet, mit nur wenigen Ausnahmen von herstellerübergreifender Vernetzung. Dies zeigt sich sowohl bei elektrischen Anwendungen als auch bei Schnittstellen zum bidirektionalen Laden unterschiedlicher Ladeprotokolle (s. Kapitel 2.3). Auf Seiten der thermischen Anwendungen (Smart Home) gibt es proprietäre Protokolle und in sich geschlossene Systeme, bei denen sich eine

herstellerübergreifende Kommunikation sowie Auswertung als schwierig erweist. Aus diesem Grund werden im Rahmen eines Anwendungstests auch die Exportierbarkeit von Daten aus Smart-Home-Anwendungen und deren Einsatz zur Visualisierung und Optimierung des Heizverhaltens erprobt (s. Kapitel 5).

Im weiteren Verlauf werden die beiden fokussierten Anwendungsfelder für Energiemanagement behandelt. Dazu wird der jeweilige Stand der Technik erläutert und eine themenspezifische Literaturstudie durchgeführt. Anschließend wird die Methodik zur Literaturstudie beschrieben.

2.2 Methodik der Literaturstudie

Home Energy Management Systeme (HEMS) spielen eine entscheidende Rolle in der zunehmend vernetzten und energiebewussten Welt von heute. Die effiziente Steuerung von Energieflüssen, sowohl thermischer als auch elektrischer Art, ist von entscheidender Bedeutung, um den steigenden Energiebedarf zu decken, nachhaltig zu nutzen und flexibel zu steuern. Vor diesem Hintergrund werden für die beiden HEMS-Anwendungsfelder (s. Kapitel 1.2) Literaturstudien zum aktuellen Stand der Forschung durchgeführt.

Elektrische HEMS-Anwendungen konzentrieren sich auf die Optimierung und Steuerung des Stromverbrauchs in Haushalten, während thermische HEMS-Anwendungen auf die effiziente Nutzung von Heizenergie ausgerichtet sind. Beide Anwendungsbereiche sind entscheidend für die Entwicklung intelligenter und nachhaltiger Wohn- und Energiekonzepte. Ziel der vorliegenden Literaturstudie ist es, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in diesen beiden HEMS-Anwendungsfeldern zu geben. Methodische Grundlage für die Literaturstudie ist die systematische Literatur Recherche (systematic Literature Review) basierend auf den Arbeiten von [27], [28] und [29]. Die untersuchten empirischen Studien werden hinsichtlich wichtiger Informationen wie z. B. Samplegröße, Forschungsumfang, verwendete Technologien und Knergebnisse analysiert. Abschließend werden die Ergebnisse übersichtlich dokumentiert, Forschungslücken aufgezeigt und Ansätze für eigene Arbeiten zu den beiden HEMS-Anwendungsfeldern abgeleitet.

In den folgenden Abschnitten werden zum einen Studien zu elektrischen HEMS-Anwendungsfeldern im Kontext von Vehicle-to-Home näher vorgestellt. Zum anderen werden für den Bereich der thermischen HEMS-Anwendungsfelder Studien zu Verbrauchsvisualisierung, Feedbackmechanismen, Automatisierung und Einsparpotenzialen von smarten Thermostaten betrachtet.

2.3 Vehicle-to-Home

2.3.1 Stand der Technik: Vehicle-to-Home

Das Prinzip des Vehicle-to-Home (V2H) beschreibt die Steuerung von Ladevorgängen der Wallbox mit dem Ziel die Eigenverbrauchsquote sowie Kostenersparnisse zu erhöhen [19, 30]. Durch die bidirektionalen Lade- und Endladeflüsse bildet das V2H-System eine wichtige Komponente des HEMS. Das Elektrofahrzeug kann im System als zusätzlicher Speicher oder Verbraucher betrachtet werden. Zusätzlich sind weitere Funktionen, wie beispielsweise eine Funktionalität als Notstromaggregat oder netzdienliche Anwendungen im Kontext Vehicle-to-Grid (V2G) möglich. Die Aufgabe des HEMS ist neben der intelligenten Lastflussteuerung auch die Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen, wie beispielsweise An- und Abwesenheitszeiten (bzw. An- und Abfahrtszeiten) [20]. Um bidirektionales und gesteuertes Laden zu ermöglichen, ist in der Regel ein Energiemanagementsystem im Haus erforderlich, das die Energieflüsse der steuerbaren Einheiten regelt. [31]

Im Bereich des bidirektionalen Ladens gibt es verschiedene Arten, die in Tabelle 2 näher beschrieben werden.

Tabelle 2: Arten des bidirektionalen Ladens [32]

Name	Abkürzung	Funktion
Vehicle-to-Home	V2H	Energie aus der Traktionsbatterie des BEV wird ausschließlich zur Versorgung eines Haushalts verwendet
Vehicle-to-Building	V2B	Zurückspeisung der Energie in alle Gebäudetypen z. B. Bürogebäude, Nicht-Wohngebäude
Vehicle-to-Grid	V2G	BEV speist überschüssige Energie zurück ins Stromnetz, um Lastspitzen auszugleichen und die Netzstabilität zu unterstützen
Vehicle-to-Load	V2L	BEV wird als mobile Stromquelle für externe Geräte verwendet
Vehicle-to-Vehicle	V2V	Energie aus der Traktionsbatterie des BEV kann zum Laden eines anderen verwendet werden
Vehicle-to-Everything	V2X	Die Möglichkeit, gespeicherte Energie außerhalb des BEV zu nutzen, umfasst alle oben genannten Arten

Um das bidirektionale Laden zu realisieren, müssen verschiedene technische Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst muss das BEV über eine bidirektionale Ladetechnik verfügen und eine geeignete Wallbox verwendet werden, die den Stromfluss in beide Richtungen realisiert. Damit ist es möglich, dass das BEV zu laden oder Energie aus dem Fahrzeug in das Hausnetz zu entladen.

Darüber hinaus ist ein Energiemanagementsystem im Haus notwendig, um die Energieflüsse der steuerbaren Einheiten zu regeln [20]. Dies können beispielsweise Leistungsvorgaben für die Wallbox des Elektrofahrzeugs, einen stationären Batteriespeicher oder eine Wärmepumpe sein. Die Kommunikation zwischen dem Energiemanagementsystem und der Wallbox muss kompatibel sein, wobei in der Regel internetbasierte Kommunikationsprotokolle wie *Modbus-TCP* oder *OCPP* (Open Charge Point Protocol) verwendet werden. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit der Kommunikationsschnittstelle (z. B. *EEBUS*) wichtig, um die Interoperabilität und den Datenaustausch zwischen den einzelnen Komponenten des Energiemanagementsystems zu unterstützen. Ein wichtiger Beitrag dazu wird durch die Fertigstellung und Verabschiedung der *ISO-Norm 15118-20* im April 2023 geleistet. Diese Norm definiert die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Wallbox für den bidirektionalen Fall. [33–35]

Die folgende Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau eines V2H-Systems mit den wichtigsten Systemkomponenten für das bidirektionale Laden. Im Rahmen des Simulationstools (s. Kapitel 4) sollen der dargestellte Status Quo simuliert und Potentiale für verschiedene Varianten in Bezug auf den Autarkiegrad für einen Referenzhaushalt aufgezeigt werden.

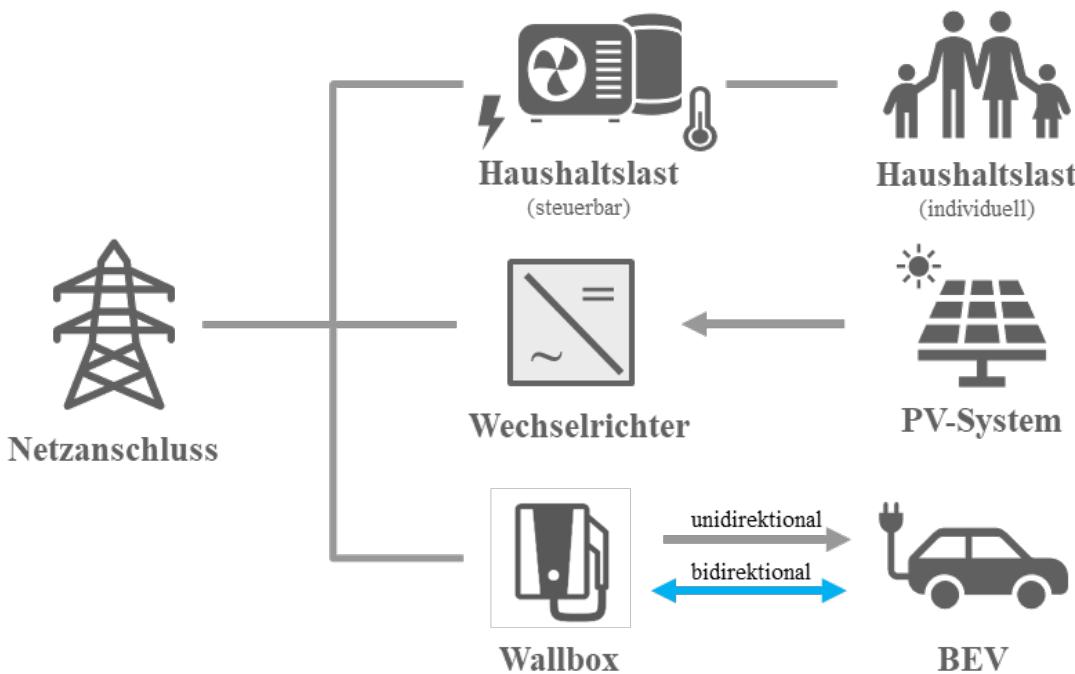


Abbildung 6: Schematische Darstellung V2H-System nach [20]

Beim Laden und Entladen von Elektrofahrzeugen treten technisch bedingte Verluste auf. Dabei entstehen z. B. beim Laden Verluste durch die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Dieser Wert setzt sich aus dem Hausverteiler, der Zuleitung, der Wallbox, dem Ladekabel und dem Ladegerät zusammen. Beim bidirektionalen Laden in einem V2H-Szenario treten jedoch weitere signifikante Umwandlungsverluste auf. Der Gleichstrom aus der Fahrzeubatterie muss für das Hausnetz wieder in Wechselstrom umgewandelt und in den Haushalt eingespeist werden. Insgesamt entstehen dabei Verluste von etwa 5 bis 15%. Weitere Verluste wie z. B. Speicherverluste über die Zeit werden aufgrund ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt. [36–39]

2.3.2 Stand der Forschung: Vehicle-to-Home

Diese Literaturstudie widmet sich der Untersuchung von elektrischen Home Energy Management Systemen (HEMS) im spezifischen Kontext von Vehicle-to-Home (V2H) Anwendungen, auch bekannt als bidirektionales Laden. Mit der zunehmenden Integration von Elektrofahrzeugen in den Alltag eröffnet sich eine vielversprechende Perspektive für die bidirektionale Energieübertragung zwischen Fahrzeugen und Wohngebäuden. Diese auch als V2H bezeichnete Technologie ermöglicht nicht nur das Aufladen von Elektrofahrzeugen durch das Haus, sondern auch die Rückspeisung von Energie vom Fahrzeug in das Hausnetz. Im Mittelpunkt steht die Analyse relevanter Forschungsliteratur, um einen tiefen Einblick in die aktuellen Erkenntnisse und Entwicklungen im Bereich elektrischer HEMS-Anwendungen im Kontext von Vehicle-to-Home zu geben.

Die Machbarkeit des bidirektionalen Ladens wurde in Deutschland erstmals in zwei empirischen Forschungsprojekten getestet. Dabei handelt es sich um das Projekt *BDL* [40] und das Folgeprojekt *Bi-clEVer* [41], das unter anderem in Kooperation mit dem Automobilhersteller *BMW* und dem Energieversorger *E.ON SE* durchgeführt wurde. In diesem Projekt wurden zwei reale Haushalte in der Nähe von München mit einem V2H-System ausgestattet. Zusammenfassend wurden unter anderem folgende Ergebnisse erzielt:

- Bidirektionales Laden ist technisch machbar und kann mit dem Combined Charging System (CCS) Standard realisiert werden [40]
- Der Autarkiegrad mit BEV und PV-System lag bei 24%, mit Hinzunahme der bidirektionalen Ladefunktion stieg er auf 51% und unter Einbeziehung eines Hausspeichersystems wurde ein Autarkiegrad von 59% erreicht [41]
- Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Effizienz des bidirektionalen Ladens sind der Stromverbrauch im Haushalt, die Leistung der PV-Anlage und das Nutzerverhalten [40]
- Weniger wichtig sind die Kapazität der Fahrzeughbatterie und die Ladeleistung [40]

Im Vergleich zu einem unidirektionalen Ladesystem konnte der Autarkiegrad im realen Umfeld nahezu verdoppelt werden. Zukünftige Geschäftsmodelle und Möglichkeiten werden weiter untersucht, wie z. B. zeitabhängige Tarife und dynamische Tarife, die durch die bidirektionalen Fähigkeiten des Fahrzeugs ermöglicht werden. Dazu gehören Maßnahmen zur Gewährleistung der Netzstabilität, Energiehandel und Arbitragethandel auf der Grundlage unterschiedlicher Strompreise im Tagesverlauf [41].

Der Leitfaden "*Bidirektionales Laden*" [20] des *Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme* (ISE) untersucht die Nutzung von Elektrofahrzeugen als Batteriespeicher für den eigenen Haushalt. Der Leitfaden betrachtet verschiedene Haushaltstypen und deren Einsatzmöglichkeiten, die Auswirkungen auf die Eigenversorgungsquote und das wirtschaftliche Potenzial. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Elektrofahrzeuge den Strombedarf erhöhen und daher große PV-Anlagen notwendig sind, um den Autarkiegrad zu erhöhen und die Stromkosten zu senken. Insbesondere ab einer PV-Anlagengröße von 10 kWp kann bidirektionales Laden die Eigenversorgungsquote erhöhen. Allerdings führt bidirektionales Laden in einigen Szenarien zu höheren Stromkosten aufgrund von Umwandlungsverlusten. Die technischen Anforderungen für bidirektionales Laden können weitgehend erfüllt werden, es fehlen jedoch noch rechtliche Rahmenbedingungen für die Umsetzung. Die Autoren empfehlen, auf eine effiziente Ladeinfrastruktur zu achten

und klare rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen. Insgesamt wird betont, dass bidirektionales Laden eine wichtige Rolle für die Energie- und Verkehrswende spielt und der Einsatz von gesteuertem Laden, ob unidirektional oder bidirektional, notwendig ist. [20]

In ähnlichen Studien, die im städtischen Bereich durchgeführt wurden, lag der Schwerpunkt auf der Simulation größerer Standorte für Busse und BEVs einer ganzen Stadt. Dabei wurden auch verschiedene intelligente Ladestrategien untersucht [42]. Im Rahmen der Studie [43] wurde insbesondere die Untersuchung von Wohnvierteln im Kontext des bidirektionalen Ladens vorgenommen. Es sei darauf hingewiesen, dass insbesondere die Vernetzung mehrerer Fahrzeuge intelligente Softwarelösungen und eine effiziente Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Stromnetz erfordert, um das Energiesystem zu optimieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tool entwickelt, welches sich auf die bereits heute verfügbare Technologie fokussiert. Die Implementierung intelligenter Ladestrategien wurde dabei nicht berücksichtigt, da diese eine Vielzahl an technischen Lösungen, wie beispielsweise eine intelligente Messinfrastruktur, erfordern würden. Dies schließt auch das intelligente Laden aus, beispielsweise durch Multi-Agenten-Systeme für V2H-Anwendungen in HEMS, wie in [44] untersucht wurde. Weiterhin legt das entwickelte Tool den Schwerpunkt von Einfamilienhaushalte, kann aber auch auf größere Liegenschaften adaptiert werden (s. Kapitel 4.1 Modellierungsansatz und Rahmenbedingungen). Damit liefert das Tool eine effektive Lösung für die Herausforderungen im Bereich des V2H, indem es eine Brücke zwischen der aktuellen technologischen Verfügbarkeit und der Notwendigkeit zur Optimierung des Energieverbrauchs schlägt.

Die Ergebnisse der Literaturstudien dienen der Entwicklung und Validierung des Simulationstools (s. Kapitel 4).

2.4 Thermische Smart Home-Anwendungen

2.4.1 Stand der Technik: Smart Home-Anwendungen

Die primäre Funktion einer Heizungsanlage besteht in der Bereitstellung von Raumwärme. Der Anteil der Raumwärme am Energieverbrauch in Wohngebäuden in Deutschland beträgt etwa 70% [45]. In den meisten Haushalten in Deutschland werden fossile Brennstoffe wie Erdgas oder Heizöl (Stand: 2023 ca. 70%) verwendet [46]. Alternative und umweltfreundliche Technologien wie Solarenergie oder der Einsatz von Wärmepumpen sowie Nah- und Fernwärme gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung. Beim konventionellen Verfahren wird der Brennstoff in einer Heizungsanlage verbrannt, um Wärme zu erzeugen. Diese Wärme wird über Wärmetauscher auf das Wärmeträgermedium, meist Wasser, übertragen. Über den Heizkreislauf, der aus Rohrleitungen, Pumpen und Ventilen besteht, wird das erwärmte Wasser an die Heizkörper in den einzelnen Räumen verteilt. Die Wärmeübertragung erfolgt hauptsächlich durch Konvektion, d. h. die Heizkörper geben die Wärmeenergie an die Raumluft ab und erhöhen so die Raumtemperatur. Bei Flächenheizungen dagegen zirkuliert das Heizungswasser in Rohren im Boden oder in den Wänden. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Strahlung. [47]

Die bereitgestellte Wärme wird dem Wärmebedarf angepasst, da die Heizlast eines Gebäudes nicht konstant ist. Sie hängt sowohl von äußeren Einflüssen wie der Sonneneinstrahlung und Außen-temperatur als auch vom Nutzerverhalten und Art der Raumnutzung ab. Der Heizwärmebedarf setzt sich nach Formel (1) wie folgt zusammen [48]:

$$Q_{Heiz} = Q_T + Q_V - n * (Q_S + Q_I) \quad (1)$$

Q_{Heiz}	Heizwärmebedarf [kWh]
Q_T	Transmissionswärmeverluste [kWh]
Q_V	Lüftungswärmeverluste [kWh]
n	Ausnutzungsgrad für Wärmegewinne [-]
Q_S	Solare (externe) Wärmegewinne [kWh]
Q_I	Interne Wärmegewinne [kWh]

Die Regelung der Raumtemperatur erfolgt bei Heizkörpern über Heizkörperthermostate. Diese thermostatisch gesteuerten Heizkörperventile ermöglichen eine individuelle Temperaturregelung in den Räumen und gleichen so äußere Einflüsse auf das System aus [47].

Ein klassisches Thermostat regelt die Raumtemperatur mit Hilfe des Temperaturfühlers im Thermostatkopf, der über einen Mechanismus den Ventilstift in Bewegung setzt und das Ventil öffnet beziehungsweise schließt. Im Thermostatkopf befindet sich ein Ausdehnungsmittel, meist ein Gas oder eine Flüssigkeit, das sich bei steigender Außentemperatur ausdehnt und dadurch den Ventilstift bewegt [49].

Ist die am Thermostat eingestellte Soll-Temperatur höher als die aktuelle Raumtemperatur, öffnet sich das Ventil, sodass Heizungswasser in die Heizkörper fließt. Sobald die eingestellte Soll-Temperatur erreicht ist, schließt das Ventil, wodurch der Wasserfluss stoppt. Die Temperatur des abfließenden Heizungswassers wird als Rücklauftemperatur bezeichnet. Eine effiziente Heizungssteuerung erfordert die Einstellung der Temperatur des zulaufenden Heizungswassers (Vorlauftemperatur) entsprechend der Heizkurve, welche sich nach der Außentemperatur richtet. Dies verbessert das Regelverhalten und verbessert die Energieeffizienz der Anlage. Eine zu niedrige Vorlauftemperatur kann dazu führen, dass die Räume nicht ausreichend beheizt werden. Eine zu hohe Vorlauftemperatur hingegen führt zwar zu einer guten Beheizung der Räume, ist aber mit erhöhten Energieverlusten bei der Wärmeerzeugung- und Verteilung verbunden. Im nachfolgenden ist eine schematische Darstellung der oben beschriebenen Regelung im Heizkreis zu sehen, siehe Abbildung 7.

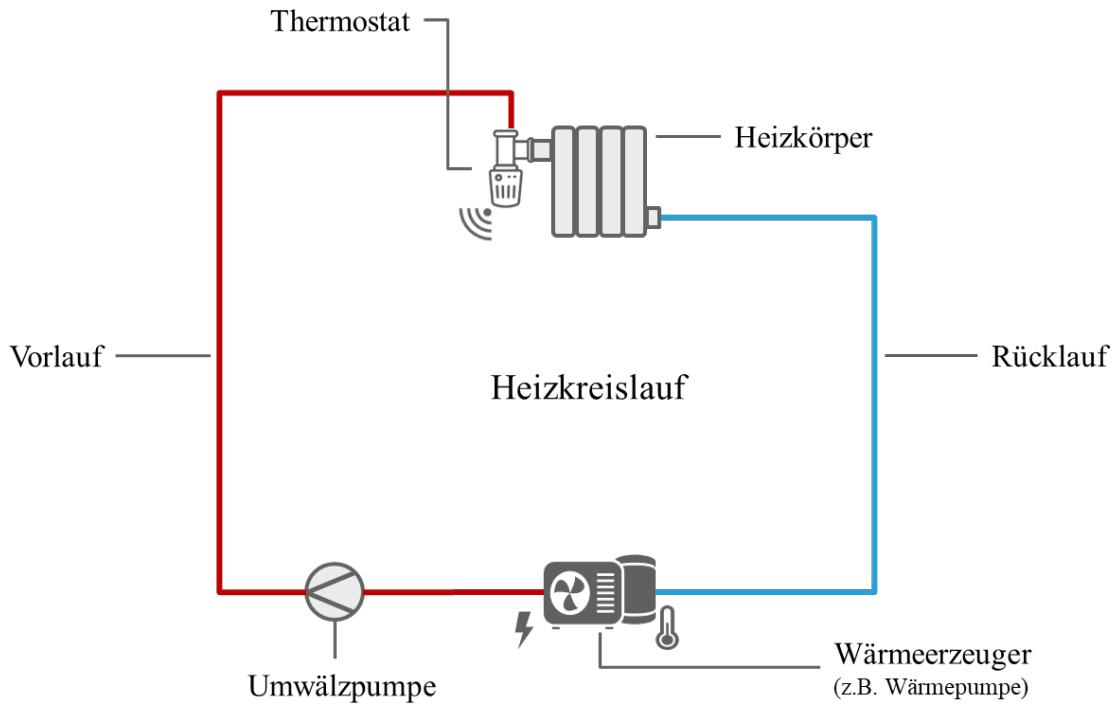


Abbildung 7: Schematische Darstellung Heizkreislauf mit zentralen Bestandteilen

Smart Home Thermostate

Insbesondere im Bereich der Gebäudeautomation können durch den Einsatz intelligenter Technologien erhebliche Einsparungen im Gebäudebestand erzielt werden. Die zunehmende Bedeutung sogenannter Smart Home Thermostate (SHT) trägt dazu bei, da sie den Heizwasserdurchfluss an den Heizkörpern regeln und automatisch auf verschiedene Einflussfaktoren reagieren, um Energie und Kosten zu sparen. Den Nutzern bietet dies verschiedene Funktionen. Dazu gehören voreingestellte oder individuelle Zeitprogramme, Anwesenheitserkennung, Erkennung offener Fenster und sogar selbstlernende Thermostate. Die Erfassung der Anwesenheit kann beispielsweise mittels zusätzlicher Sensoren oder Ortungsdiensten (Geofencing) der mobilen Endgeräte (beispielsweise Smartphones) erfolgen. Die möglichen Funktionen sind herstellerabhängig und teilweise an zusätzliche Abonnements oder Komponenten gebunden. [10]

Neueste smarte Thermostate können auch automatisch einen hydraulischen Abgleich durchführen und so eine effiziente und gleichmäßige Wärmeverteilung vom Kessel bis zu entfernten Heizkörpern sicherstellen. Eine Konnektivität zur Heizungsanlage (Kessel) ist Voraussetzung. [50]

Im Gegensatz zu herkömmlichen Heizungsreglern, die oft nur manuell bedient werden können, sind smarte Heizkörperthermostate über Funk wie WLAN oder andere Protokolle (z. B. ZigBee, Z-Wave, EnOcean) mit Smart Home Systemen verbunden. Dadurch ist es möglich, die Raumtemperatur auch von außerhalb der Wohnung, z. B. über eine Internetplattform oder eine Smartphone-App, fernzusteuern. [51]

Die genauere Regelung der Raumtemperatur, die oft in $0,5^{\circ}\text{C}$ Schritten erfolgt, hat den Vorteil einer feineren Abstufung gegenüber der stufenweisen (in der Regel 1-5) Temperaturregelung eines herkömmlichen Thermostats, die oft aus Unkenntnis zu Fehleinstellungen führen kann [51]. Die Anwesenheitserkennung sowie die Möglichkeit zur Erstellung individueller Zeitpläne tragen dazu

bei, dass die Heizung nur dann aktiv ist, wenn sie tatsächlich benötigt wird. Dies führt zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und somit zu einer Senkung der Heizkosten [52, 53].

Ein weiterer Fortschritt liegt in der Datenerfassung, die mit herkömmlichen Thermostaten bisher nicht möglich war. Damit ist eine umfassende Analyse des Heizverhaltens möglich, die auch Faktoren wie Lüftung und individuelles Heizverhalten einbezieht. Auf Basis dieser Daten können Rückschlüsse auf das Nutzerverhalten gezogen und entsprechende Rückmeldungen gegeben werden. Diese und weitere Aspekte werden im Rahmen des Anwendungstests (s. Kapitel 5) näher untersucht. Damit sind smarte Thermostate ein wichtiger Bestandteil eines Home Energy Management Systems (HEMS) zur intelligenten Regelung der Raumwärme.

Heizkostenverteiler zur Bestimmung des Verbrauchs

Zur Bestimmung des individuellen Heizenergieverbrauchs in Mehrfamilienhäusern werden Heizkostenverteiler an allen Heizkörpern einer Wohnung im Gebäude montiert. Heizkostenverteiler verfügen in der Regel über eine Metall-Rückseite, die die Wärme des Heizkörpers gut leitet. Dadurch kann der Heizkostenverteiler die spezifischen Wärmeeinheiten messen. Dabei wird die Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und Raum gemessen. Wenn ein Heizkörper Wärme abgibt, erwärmt er auch den Heizkostenverteiler. Die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz wird in Zählschritten angezeigt. Dabei ist zu beachten, dass diese Zählschritte nicht direkt den tatsächlichen Wärmeverbrauch darstellen, sondern nur im Zusammenhang mit dem Gesamtverbrauch interpretiert werden können. Elektronische Heizkostenverteiler werden in der Regel mit fest eingebauten Batterien betrieben, die eine Lebensdauer von mehr als 10 Jahren haben. Moderne elektronische Heizkostenverteiler senden ihre Messwerte per Funk an einen Datensammler und ersparen so das manuelle Ablesen (s. beispielhaften Heizkostenverteiler und Montagebeispiel in Testwohnung in Abbildung 8). [54]



Abbildung 8: Elektronischer Heizkostenverteiler (links [54]) an Heizkörper in Testwohnung (rechts)

Behaglichkeit und Raumtemperaturen

Neben den technischen Komponenten wird der Verbrauch zudem durch das individuelle Heizverhalten und die eingestellte Raumtemperatur beeinflusst. An dieser Stelle ist die gefühlte Behaglichkeit einer jeden Person von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden werden Aspekte zur Behaglichkeit und Bewertungsansätze für die Raumtemperatur dargelegt.

Der Begriff der "*thermischen Behaglichkeit*" beschreibt den Zustand, in dem sich die Mehrheit der Individuen hinsichtlich ihrer direkten thermischen Umgebung zufrieden zeigt. Die thermische Behaglichkeit wurde in den 1970er Jahren von Ole Fanger untersucht und wird im Rahmen von zwei Index-Werten beschrieben. Der Index fasst die durchschnittliche subjektive Einschätzung dieser Personen zu ihrem Behaglichkeitsempfinden zusammen. Dabei handelt es sich um den PMV-Index (Predicted Mean Vote) und den PPD-Index (Projected Percentage of Dissatisfied). [55]

Diese werden durch verschiedene Faktoren bestimmt, darunter:

- Aktivitätsgrad
- Kleidung (Bekleidungsisolationswert)
- Raumlufttemperatur
- Mittlere Strahlungstemperatur der Raumumschließungsflächen
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchtigkeit

Aufgegriffen werden der PMV- und PPD-Index in der *DIN ISO 7730*. Die *ISO-Norm 7730* beschreibt mit den Indizes PMV und PPD systematische Ansätze zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Zur objektiven Bewertung der subjektiven Behaglichkeit werden die Indizes PMV und PPD herangezogen. Der PMV-Index gibt die durchschnittliche thermische Empfindung einer großen Gruppe von Personen an, während der PPD-Index den Prozentsatz der unzufriedenen Personen vorhersagt. Ein optimaler PMV-Wert liegt nahe Null, was auf eine neutrale Empfindung hinweist, während ein niedriger PPD-Wert ein Zeichen für hohe Zufriedenheit ist. [56]

Die empfohlene Raumtemperatur unterliegt einer variablen Empfehlung, die sich an die spezifische Nutzung des Raumes orientiert. So wird für Wohnbereiche eine Temperatur von etwa 20°C, für Küchen eine Temperatur von 18°C und für Schlafzimmer eine Temperatur von 17°C empfohlen. Für Badezimmer wird eine höhere Temperatur empfohlen, die zwischen 24°C und 26°C liegt, um den Komfort nach dem Duschen oder Baden zu gewährleisten. [57]

Die Luftfeuchtigkeit sowie die Luftbewegung im Raum beeinflussen das Temperaturempfinden. Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 60% wird als angenehm erachtet, während Zugluft oder ungleichmäßige Luftzirkulation zu einem Gefühl des Unbehagens führen kann, selbst bei einer Raumtemperatur innerhalb des empfohlenen Bereichs. [56]

Die Behaglichkeit und die optimalen Raumtemperaturen werden von einem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren beeinflusst. Ein besseres Verständnis dieser Faktoren und die Anwendung von Indizes wie PMV und PPD können zur Gestaltung von Innenräumen beitragen, die das Wohlbefinden und die Zufriedenheit der Nutzer fördern.

Die nachfolgenden Literaturstudien widmen sich der Analyse von Einsparpotenzialen durch Verbrauchsvisualisierung und Smart Home Thermostaten. Im Fokus steht die Frage, wie diese Technologien zur Optimierung des Energieverbrauchs beitragen.

2.4.2 Stand der Forschung: Verbrauchsvisualisierung

Die Literaturstudie zur Verbrauchsvisualisierung hatte das Ziel, den Forschungsstand aktueller Studien und Feldtests zu ermitteln. Der Fokus der Recherche lag auf Studien, die sich mit der Visualisierung und Rückmeldung von Energieverbräuchen beschäftigt haben. Dabei können drei Arten von Feedback unterschieden werden:

- Indirektes Feedback
- Direktes Feedback
- Disaggregiertes Feedback

Indirektes oder historisches Feedback sind Rückmeldungen über bereits erfolgte Energieverbräuche. Als Kommunikationsmittel werden z. B. Briefe, E-Mails oder weitere digitale Anwendungen verwendet. Das Intervall der Rückmeldung (Stunde, Tag, Woche, Monat etc.) variiert je nach Studiendesign und technischen Möglichkeiten.

Das direkte Feedback, dass den Energieverbrauch in Echtzeit darstellt, erfolgt dagegen in den meisten Fällen über ein fest installiertes In-Home-Display oder eine mobile App. Im Gegensatz dazu basiert die disaggregierte Rückmeldung auf der Erkennung einzelner Geräte aus dem Lastprofil oder der direkten Messung der jeweiligen Geräte. Dadurch wird eine noch spezifischere und genauere Rückmeldung für einzelne Geräte oder Räume im Wärmebereich ermöglicht.

Die Darstellung des Feedbacks erfolgt in den meisten Fällen als grafische Auswertung der verbrauchten Kilowattstunden oder der aktuellen Leistung in Kilowatt. Weitere Umrechnungen in z. B. Umweltemissionen (kg CO₂) oder Kosten in Euro (€) sind möglich. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Handlungsempfehlungen z. B. in Form von Energiespartipps an die Haushalte zu übermitteln, die das Verhalten positiv verändern können.

Im Ergebnis zeigt die Literaturstudie, dass durch Feedbacksysteme tatsächlich Energieeinsparungen zwischen 5% und 14% erzielt werden können [58]. Insbesondere der Einsatz neuer digitaler Lösungen wie beispielsweise In-Home-Displays oder Apps zeigt vielversprechende Erfolge [59]. Auch interaktive KI-Anwendungen wie Chatbots können hilfreich sein [60].

Weitere Studien haben mehrfach gezeigt, dass insbesondere direktes Feedback zu höheren Energieeinsparungen führt als im Vergleich indirektes Feedback [58, 61–65]. Dementsprechend ist die Wirkung von indirektem bzw. historischem Feedback gering, führt aber dennoch zu Einsparungen. Im Vergleich dazu hat indirektes Feedback mit 3,8% bis 8,4% die geringsten Energieeinsparungen verzeichnet [61].

Positive Erfahrungen wurden auch mit disaggregiertem Feedback gemacht, die eine gerätespezifische Differenzierung und personalisierte Handlungsempfehlungen ermöglichen. So können ineffiziente Geräte sofort erkannt und Verhaltensänderungen und deren Auswirkungen unmittelbar verfolgt werden [61].

In der nachfolgenden Tabelle 3 (siehe nächste Seite) sind die relevantesten Studien zum Thema der Verbrauchsvisualisierung aufgelistet. Dabei sind die Kernergebnisse sowie das Untersuchungsdesign der jeweiligen Studien analysiert worden.

Tabelle 3: Übersicht relevanter Studien im Kontext "Einsparpotenziale durch Verbrauchsvisualisierung und Feedback"

Referenz	Sample	Haushalts Charakteristik	Feedback- system	Energie- einsparungen	Kern- ergebnisse
Huterer et. al. (2020) [64]	Zwei Mehrfamilienhäuser (jeweils mit 42 und 50 Wohnungen)	Neubau-Standard mit Smart Home	In-Home Display und Smart Home App	6,0%	6,0% Einsparung gegenüber der Kontrollgruppe; erwartete Ziel von 15,0% wurde nicht erreicht
Klobasa et. al. (2012) [63]	Verbrauchsmonitoring (11 Monate Feedback zum Stromverbrauch)	1.500 Haushalte	Web-Portal und schriftliche Verbrauchsinformationen	4,5%	Vergleich der Pilotgruppe mit Kontrollgruppe erzielten signifikante Einsparungen (Regressionsanalyse)
Hoffmann et. al. (2012) [62]	608 Haushalte in vier Gruppen (Smart Meter inkl. Web-Portal, Einzelmessungen und EE-Anlagen)	Haushalte (Mietwohnungen) Kundenstamm der beteiligten Versorgungsunternehmen	Schriftliche Verbrauchsinformationen, In-Home-Displays; Web-Portal	2,9%; 4,9% Stromverbrauch (zusätzliche Einzelgerätmessungen); 6,5% Heizenergieverbrauch	Nachweisbare Einsparungen durch Feedbacksysteme; Feedbacksoftware bedarf weiterer Optimierung hinsichtlich Nutzerfreundlichkeit und -verständlichkeit
Podgornik et. al. (2016) [65]	100 Haushalte	Gebäude aus dem Mittelmeerraum (Spanien, Frankreich und Malta); Alter Gebäude 20 Jahre und älter	Zwei Verbrauchsfeedback-ansätze, Interaktive Bewusstseinskampagne und Verbrauchsfeedback; Web-Portal und Verbrauchsberichte	22,4-27,4% Einsparungen (Strom) bei einkommensschwachen Haushalten	Einsparungen, wenn individualisierte und haushaltsspezifische Sensibilisierungskampagnen und kontextbezogenes Verbrauchsfeedback in den Zielhaushalten eingehalten wird

2.4.3 Stand der Forschung: Smart Home Thermostate

Die Literaturstudie untersucht verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit Energieeinsparungen durch den Einsatz von Smart Home Technologien, insbesondere smarten Thermostaten. Eine Studie von *Quack, Liu und Gröger* aus dem Jahr 2019 vergleicht Modellhaushalte mit und ohne Smart Home Anwendungen. Dabei werden verschiedene Szenarien von Energieeinsparung bis hin zu Anwendungen für Sicherheit und Komfort betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass Einsparpotenziale bei der Heizenergie von 9% in der Wohnung und bis zu 14% im Haus möglich sind. Allerdings ist auch ein Anstieg des Stromverbrauchs um etwa 3% zu verzeichnen [66].

In einer Studie von *Schäuble et al.* (2020) wird die Wirtschaftlichkeit von intelligenten Thermostaten unter verschiedenen Bedingungen bewertet. Das dynamische Investitionsmodell zeigt, dass intelligente Thermostate wirtschaftlich sind, wenn relative Einsparungen von mindestens 5,7% (Einfamilienhaus) bzw. 7,7% (Mehrfamilienhaus) erreicht werden. [67]

Die Studie von *Schneiders et al.* (2018) berichtet über einen Smart Home Feldtest in der Stadt Rösrath, bei dem über 120 mit Smart Home Systemen ausgestattete Einfamilienhäuser untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen eine maximale Heizenergieeinsparung von ca. 33%, aber auch einen maximalen Mehrverbrauch von 26,5%. Für den Erfolg beim Ersparen von Energie ist es entscheidend, die Automatisierung zu nutzen, das System sicher zu bedienen und ein hohes Energiebewusstsein zu haben. [68]

Mailach & Oschatz (2017) fassen in ihrer Kurzstudie sechs Studien zur Energieeinsparung durch die Vernetzung von Heizungsanlagen und intelligenten Thermostaten zusammen. Eine Simulationsstudie zeigt, dass die Kombination verschiedener Maßnahmen zu durchschnittlichen Einsparungen von 11,5% führen kann. [69]

Eine Fallstudie des *Karlsruher Instituts für Technologie* (KIT) aus dem Jahr 2023 zum Energieeinsparpotenzial für Mieter durch den Einsatz von intelligenten Heizkörperthermostaten ergab, dass der Einsatz von Smart Home Thermostaten in den untersuchten Mehrfamilienhäusern innerhalb von drei Monaten zu einer bereinigten Energieeinsparung von rund 15,5% im Vergleich zu nicht ausgestatteten Haushalten führte. [70]

Die Studie von *Kretz et al.* (2022) in München, die während der Heizperiode Winter/Frühjahr 2021 an zwei baugleichen Gebäuden durchgeführt wurde, zeigt, dass die Wohnanlage mit der digitalen Heizungsregelung (Kairos) signifikant weniger Heizenergie verbraucht als eine identische Anlage ohne Heizungsregelung. Die Auswertung der Daten ergab, dass allein durch den Einsatz von Kairos eine relative Heizenergieeinsparung von 20 bis 25% gegenüber einem baugleichen Gebäude mit konventionellen Handthermostaten erzielt werden konnte. [71]

Die *BaltBest-Studie* (2022) hat auch gezeigt, dass das Zusammenspiel mehrerer Faktoren wie Mieterverhalten und Technik zu deutlichen Einsparungen führen kann. Die Einsparungen lagen in der Größenordnung von 15%. Es wurde jedoch betont, dass insbesondere Groß- und Mittelverbraucher mit Einsparungen rechnen können, da Geringverbraucher bereits einen sparsamen Lebensstil pflegen und oft schon viele Möglichkeiten für weitere Einsparungen ausgeschöpft haben. Darüber

hinaus wurde festgestellt, dass höhere Einsparungen mit höheren Abwesenheitszeiten bzw. einer aktiven Drosselung bei Abwesenheit einhergehen. [72, 73]

Stopps et al. (2021) betonen die Bedeutung einer optimierten Programmierung für signifikante Energieeinsparungen durch intelligente Thermostate in Wohngebäuden, ohne jedoch konkrete Zahlen zu den tatsächlichen Einsparungen zu liefern [74].

In den folgenden Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die vorgestellten Studien im Kontext der Einsparpotenziale durch intelligente Thermostate aufgelistet. Dabei werden die wichtigsten Ergebnisse und das Untersuchungsdesign sowie die Rahmenbedingungen der jeweiligen Studien aufgelistet.

Tabelle 4: Übersicht relevanter Studien zum Kontext Einsparpotenziale durch smarte Thermostate 1-2

Referenz	Sample	Haushalts Charakteristik	Smartes Thermostat Funktionen	Energie-einsparungen	Kernergebnisse
(Dietlinde Quack, Ran Liu, Jens Gröger, 2019) [66]	Simulation	Zwei-Personen-Haushalt; Einfamilienhaushalt (EFH)	Nachtabsenkung; Absenkung bei Abwesenheit	9% Wohnung; 14% EFH	Smarte Heizkörperthermostate sparen Heizenergie; ca. 3% anstieg im Stromverbrauch
(Schäuble et al., 2020) [67]	Simulation	EFH & Wohnung (Bj. 1949-1978)	nicht näher definiert	Einsparungen von mindestens 5,7% (EFH) und 7,7% (Wohnung)	Bei den Einsparungen handelt es sich um notwenige Einsparungen, die erzielt werden müssen, damit das System wirtschaftlich ist
(Schneiders et al., 2018) [68]	120 EFH (Zeitraum 2 Jahre)	EFH (Erdgas Zentralheizung)	Nachtabsenkung; Absenkung bei Abwesenheit	Durchschnittlich 4% Einsparung; max. Einsparung 33%; max. Mehrverbrauch 26,5%	Aktive und bewusste Nutzung der Haushalte (hohes Maß an Energiebewusstsein) hat hohe Einsparungen erzielt
(Mailach & Oschatz, 2017) [69]	Simulation	EFH (Baujahr 1995-2009)	Präsenzkontroller (Personenerfassung), direkte Heizkurveneinstellung, Lüftungsautomation	von 8% bis 15% (mittlerer Wert 11,5%) Einsparpotential	Kombination mehrerer Maßnahmen von Altbau bis Neubau untersucht

Tabelle 5: Übersicht relevanter Studien zum Kontext Einsparpotenziale durch smarte Thermostate 2-2

Referenz	Sample	Haushalts Charakteristik	Smartes Thermostat Funktionen	Energie-einsparungen	Kernergebnisse
Lennerts & Kropf (2023) [70]	3 MFH (10 von 28 Wohnungen mit smarten Thermostaten ausgestattet); (Zeitraum: 3 Monate November 2022-Februar 2023)	MFH (Energieeffizienzklasse D <=130 kWh/m²a)	Tado° Smart Home Thermostate; Fernsteuerung, Zeitpläne, Geofencing sowie weitere Automationen	15,5% (Witterungsbereinigt) im vgl. zu Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate	Vergleich der rel. Wärmeverbrauchen von Haushalten mit und ohne smarten Thermostaten; Witterungsbereinigung nach VDI 3807
Kretz et. al. (2022) [71]	137 Wohnungen (Zeitraum: Winter 2021)	Zwei baugleiche Gebäude; Deutschland	Kabelgebundene Stellatrieben via CAN-Bus, Fernsteuerung, Zeitpläne	Einsparungen von 20%	Durch die Datenerfassungen konnten Handlungsbedarfe sowie Extremverbraucher aufgedeckt werden
Grinewitschus et.al. (2022) [72, 73]	Daten aus 100 MFH; 45 Wohnungen mit smarten Thermostaten ausgestattet	Rep. Gebäudebestand für Deutschland	Fernsteuerung, Zeitpläne	Im Mittel 15%, in der Spitze bis 30%	Verschiedene Ansätze zur Senkung der Vorlauftemperatur in Bestandsgebäuden angewendet; Besonders Normal- und Vielverbraucher profitieren vom smarten Thermostat
Stopps et. al. (2021) [74]	54 Teilnehmer (Zeitraum: August 2018-2019)	Wohnungen; Canada	Fernsteuerung; Zeitpläne; Erkennung von Anwesenheit; Geofencing	Intelligente Steuerungen in Wohngebäuden versprechen erhebliche Energieeinsparungen, jedoch fehlen konkrete Zahlen zu den realen Einsparungen.	Mehrheit programmiert Thermostate genau: Einfache Zeitpläne könnten ausreichen; Höhere technische Fähigkeiten führen zu energiebewusster Thermostatnutzung.

3 Zwischenfazit: Stand der Technik und Forschung

Die Forschung zu Energiemanagement Anwendungen im Wohnbereich unterstreicht die Bedeutung der Verbesserung des Stromverbrauchs durch den Einsatz von bidirektionalen Elektrofahrzeugen wodurch die Energieeffizienz und die Autarkie von Haushalten erhöht werden. Darüber hinaus wird die Rolle der Verbrauchsvisualisierung und smarten Thermostaten zur thermischen Optimierung hervorgehoben. Es wird deutlich, dass sowohl elektrische als auch thermische Anwendungsfelder relevant sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse und Herausforderungen aus der Literaturstudien zusammengefasst und Forschungslücken aufgezeigt.

Grundlagen und Stand der Forschung: Vehicle-to-Home

Die Grundlagen und der Stand der Forschung zeigen im elektrischen Anwendungsfeld einen Fokus auf die Verwaltung und Optimierung des Stromverbrauchs in Haushalten, insbesondere im Kontext von Vehicle-to-Home (V2H) und dem bidirektionalen Laden von Elektrofahrzeugen. Die Machbarkeit des bidirektionalen Ladens wurde in Deutschland erfolgreich getestet, wobei Ergebnisse wie die technische Realisierbarkeit mit dem Combined Charging System (CCS) Standard hervorgehoben werden. Die empirischen Projekte *BDL* und *Bi-cLEVer* zeigen, dass der Autarkiegrad durch V2H nahezu verdoppelt werden kann, insbesondere wenn ein PV-System und ein Hausspeichersystem integriert sind. Wichtige Einflussfaktoren auf die Effizienz sind der Haushaltsstromverbrauch, die PV-Anlagenleistung und das Nutzerverhalten, während die Fahrzeughalterkapazität und Ladeleistung weniger bedeutsam sind. Der Leitfaden *Bidirektionales Laden* des *Fraunhofer-Instituts* betont die Nutzung von Elektrofahrzeugen als Batteriespeicher für den Haushalt. Dabei wird darauf hingewiesen, dass große PV-Anlagen notwendig sind, um den Eigenversorgungsgrad zu erhöhen und die Stromkosten zu senken. Die Ergebnisse der Studien werden für die Entwicklung und Validierung eines Simulationstools verwendet (s. Kapitel 4). Dieses Tool ermöglicht es, individuelle Haushalte zu konfigurieren und den Nutzen des bidirektionalen Ladens im Kontext von V2H darzustellen. Der spezifizierte Nutzen bezieht sich insbesondere auf die Autarkie, d. h. die Selbstversorgung mit selbst erzeugtem Strom.

Ableitung der Forschungslücke: Vehicle-to-Home Simulationstool

Die bestehende Forschung zeigt zwar die technische Machbarkeit und die Vorteile des bidirektionalen Ladens für den Autarkiegrad in Haushalten auf, lässt jedoch eine detaillierte Simulation unter verschiedenen Bedingungen und Haushaltstypen vermissen. In diesem Zusammenhang besteht eine Forschungslücke hinsichtlich der Anwendung eines Simulationstools, welches die individuellen Haushalte, die diversen Parameter sowie das Nutzerverhalten berücksichtigt, um den spezifischen Nutzen des bidirektionalen Ladens zu analysieren und mit unidirektionalen Laden zu vergleichen. Um diese Forschungslücke zu schließen, wird für den elektrischen Bereich ein Simulationstool entwickelt, das im Kontext des bidirektionalen Ladens V2H den Autarkiegrad für verschiedene Szenarien ermittelt (s. Kapitel 4).

Grundlagen und Stand der Forschung: Smart Home Anwendungen

Als thermische HEMS-Anwendungsfelder wurden zum einen die Verbrauchsvisualisierung und die daraus resultierende Steuerung der Heizenergie, z. B. durch smarte Thermostate, identifiziert. Im Folgenden werden für beide Themenbereiche die Erkenntnisse aus der Literaturstudie zusammengefasst und jeweils eine gemeinsame Forschungslücke abgeleitet.

Zusammenfassend zeigt die Literaturstudie zur Verbrauchsvisualisierung, dass Feedbacksysteme tatsächlich Energieeinsparungen von 5-14% ermöglichen können, wobei neue digitale Lösungen wie In-Home-Displays und Apps besonders vielversprechende Ergebnisse zeigen. Die Studien unterstreichen, dass direktes Feedback zu höheren Energieeinsparungen führt als indirektes Feedback, wobei auch indirektes Feedback trotz geringerer Wirkung zu Einsparungen führt. Positive Erfahrungen wurden auch mit disaggregiertem Feedback gemacht, die eine gerätespezifische Unterscheidung und individuelle Handlungsempfehlungen ermöglichen. So können ineffiziente Geräte identifiziert und Verhaltensänderungen und deren Auswirkungen unmittelbar nachvollzogen werden.

Neben der Verbrauchsvisualisierung werden auch Anwendungen zur Steuerung der Heizenergie durch smarte Thermostate sowie die Automatisierung durch Smart Home-Anwendungen betrachtet. Studien verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Nutzungsverhalten und Einsparpotenzialen, insbesondere im Bereich smarter Thermostate mit Einsparpotenzialen von bis zu 16% bzw. über 30%, je nach bestimmungsgemäßem Gebrauch [68, 75, 76]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass smarte Thermostate nach den genannten Studien zu Einsparungen führen können. Forschungsbedarf besteht jedoch insbesondere im Bereich des Monitorings, der Verbrauchserfassung und der Bereitstellung entsprechender Empfehlungen auf Basis des Nutzerverhaltens.

Es ist wichtig zu unterscheiden, dass in Haushalten verschiedene Arten von Heizkörperthermostaten zur Temperaturregelung verwendet werden. Neben manuellen Thermostaten können auch programmierbare Thermostate und Smart Home Thermostate verwendet werden. Der Einsatz von programmierbaren Thermostaten und Smart Home Thermostaten ermöglicht im Vergleich zu manuellen Thermostaten eine präzisere Steuerung der Raumtemperatur, da Zeitprogramme individuell auf das Nutzerverhalten eingestellt werden können. Die Geräte können je nach Preisklasse variieren und weitere Zusatzfunktionen enthalten. Insbesondere Smart Home Thermostate bieten im Gegensatz zu den programmierbaren Varianten auch die Möglichkeit der Steuerung per App.

Neben der Fernsteuerung bieten Smart Home Thermostate oft noch weitere Zusatzfunktionen, z. B. können die Geräte mit Sensoren zur Erkennung von Türen und Fenstern ausgestattet sein und sich automatisch abschalten, wenn eine starke Temperaturänderung festgestellt wird [77]. Weitere Sensoren können Präsenzmelder, Wetterstationen (Anwesenheitssensoren, GPS-System etc.) sein, andere, weniger häufige, lernen automatisch die Lebensgewohnheiten der Bewohner, um den Heizplan zu optimieren. Diese Funktionen erweitern die Möglichkeiten zur Energieeinsparung und bieten den Nutzern eine komfortable und effiziente Steuerung der Heizung [52, 53].

Ableitung der Forschungslücke: Datenerhebung durch Smart Home Anwendungstest

Im Rahmen der durchgeführten Literaturstudie, die sich mit den Einsparpotenzialen befasst, die sowohl durch die Visualisierung des Energieverbrauchs als auch den Einsatz smarter Thermostate erzielt werden können. Hierbei wurde eine beachtliche Varianz in den erzielbaren Einsparungen bei Heizenergie festgestellt (s. Kapitel 2.4.3). Daraus ergibt sich folgende Forschungslücke: Bislang existieren keine Studien, die tatsächlich erhobene Sensordaten aus Smart Home Thermostaten (d. h. dem Heizverhalten) zusammen mit den zugehörigen Verbrauchsdaten analysieren, um auf dieser Basis gezieltes Feedback zu entwickeln, das effektiv zu Energieeinsparungen beiträgt. Im thermischen Bereich wird der Nutzen von Verbrauchsinformationen und der Einsatz von smarten Thermostaten im Rahmen in einem empirischen Feldtest untersucht, indem sämtliche gemessenen Daten der smarten Thermostate wie Temperatur und Ventilstellung über die Zeit digital erfasst werden, um umfassende Analysen des Heiz- und Nutzerverhaltens durchzuführen, die dann als Grundlage für Feedback dienen (s. Kapitel 5).

Das Ziel besteht darin, die Forschungsfragen aus Kapitel 1.2.1 und 1.2.2 mithilfe der Ausarbeitungen zu den beiden HEMS-Anwendungsfeldern (elektrisch und thermisch) zu beantworten.

4 Simulation von Vehicle-to-Home im HEMS

Ein Home Energy Management System (HEMS) ist ein System zur Überwachung, Steuerung und Optimierung des Energieverbrauchs in einem Haushalt. Im Rahmen eines HEMS werden häufig verschiedene Anwendungen zur Eigenverbrauchsoptimierung von selbsterzeugtem Photovoltaikstrom eingesetzt (s. Kapitel 1.2.1). Für dieses Anwendungsfeld wird im Rahmen der Arbeit ein Simulationstool im Kontext des bidirektionalen Ladens Vehicle-to-Home entwickelt und dargestellt (s. Kapitel 2.3). Im Folgenden werden der Simulationsansatz sowie die zugrundeliegenden Erzeugungs- und Lastprofile vorgestellt. Ausgehend von einem Referenzhaushalt werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse mehrere Szenarien erstellt. Ziel ist es, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welchen Einfluss das bidirektionale Laden im HEMS auf das Systemverhalten hat und welche Parameter einen hohen oder geringen Einfluss auf die Autarkie haben. Dieses Kapitel soll die nachfolgende Forschungsfrage beantworten: „*Inwiefern kann bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen den Autarkiegrad in einem modernen Einfamilienhaus steigern?*“

4.1 Ansatz und Rahmenbedingungen

Das Haus wird zum wichtigsten Bindeglied zwischen Wärme, Strom und Mobilität. Dies zeigt sich daran, dass zwischen 2015 und 2020 in Europa die Installation von Wärmepumpen um 81% [78], die Installation von Photovoltaikanlagen um 313% [79] und die Zulassungen von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) um 1.170% [80] gestiegen sind. Durch den Umbau des Energiesystems von einer zentralen und fossilen hin zu einer dezentralen und regenerativeren Energieversorgung ergeben sich bereits im Haushalt vielfältige Möglichkeiten, Energie nachhaltig und intelligent zu nutzen.

Insbesondere der Ansatz der bidirektionalen Energieflüsse gewinnt zunehmend an Bedeutung. Das Konzept Vehicle-to-Home (V2H) ermöglicht es, die durchschnittlich langen Standzeiten von BEV für Energiemanagementanwendungen im Haus zu nutzen. Pkw werden in Deutschland mehr als 23 Stunden pro Tag geparkt, und dies überwiegend zu Hause. Die durchschnittliche Parkdauer am Wohnort beträgt mehr als 20 Stunden pro Tag [81]. Infolgedessen können die Fahrzeuge auch als „Stehzeuge“ bezeichnet werden [21]. Damit bietet sich das Elektrofahrzeug als zusätzlicher Speicher im System an. Darüber hinaus sind weitere Funktionen möglich, wie z. B. die Notstromerzeugung oder netzdienliche Anwendungen im Rahmen von verwandten Konzepten, wie u. a. Vehicle-to-Grid (V2G). Weitere Konzepte zum bidirektionalen Laden durch BEV sind näher in Kapitel 2.3 beschrieben.

Die im Kapitel Stand der Forschung (s. Kapitel 2.3.2) vorgestellten Pilotstudien [40, 41] beschäftigten sich bereits mit der technischen Machbarkeit und Umsetzbarkeit des bidirektionalen Ladens. Neben empirischen Pilotstudien sind auch bereits Simulationsstudien zu diesem Thema im städtischen Bereich durchgeführt worden. Dabei lag der Fokus der Simulation auf der Untersuchung größerer Standorte für batterieelektrische Busse und BEV einer ganzen Stadt [42]. Die dort gezeigten intelligenten Ladestrategien konnten in Teilen adaptiert und für den Heimbereich weiterentwickelt werden. Systemgrenze für diese Arbeit sind bestehende Technologien, die bereits heute dem Stand der Technik für moderne Haushalte entsprechen (s. Kapitel 1.1 Technologiescreening). Auf die Betrachtung von Ladestrategien durch Vehicle-to-Grid-Anwendungen, die eine Vielzahl

von technischen Lösungen wie z. B. eine intelligente Messinfrastruktur erfordern würden, wird verzichtet. Dies schließt auch intelligentes Laden z. B. durch Multi-Agenten-Systeme für V2H-Anwendungen in HEMS aus, wie in [44] untersucht.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht das V2H-Konzept. Dabei wird überschüssige Energie z. B. durch eine private Photovoltaikanlage erzeugt. Diese überschüssige Energie wird in der Fahrzeughbatterie oder dem Heimspeicher gespeichert und kann bei Bedarf in das Hausnetz (AC/DC) zurückgespeist werden, anstatt zusätzliche Energie aus dem Stromnetz zu beziehen. Dieser Ansatz hat das Potenzial, den Eigenverbrauch und die Autarkie zu steigern sowie Kosten des Haushalts zu senken [19, 30]. Für eine intelligente Lastflussteuerung müssen die Erzeugung und der Verbrauch bzw. einzelne Systemkomponenten im HEMS priorisiert werden. Im Kontext des bidirektionalen Ladens müssen dafür **Ladestrategien** entwickelt werden (s. Kapitel 4.2.4). Eine weitere wichtige Rolle bei der Berücksichtigung der Ladestrategien sind auch die Präferenzen der Nutzenden, wie z. B. Ankunfts- und Abwesenheitszeiten sowie benötigte Reichweiten und fahrzeugspezifische Gegebenheiten (min. und max. Ladeleistungen, Batteriekapazitäten).

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es, die oben beschriebenen Parameter und Eigenschaften des V2H-Konzepts für einen **Referenzhaushalt** abzubilden und verschiedene Ladestrategien zu simulieren. Als Systemgrenze dient ein modernes Einfamilienhaus, das über eine Photovoltaikanlage zur Eigenverbrauchsversorgung verfügt. Als weitere Einflussparameter sind die Haushaltslast sowie die Anzahl der Personen eines Haushalts zu nennen. Zudem sind weitere Systemkomponenten zu berücksichtigen, beispielsweise die Wärmeversorgung durch eine elektrische Wärmepumpe. Diese ist die am häufigsten eingesetzte Heizungsanlage in neuen Wohnhäusern [82].

Kern des Simulationstools ist die Abbildung des BEV als zusätzlicher elektrischer Speicher und der Funktionalität des bidirektionalen Ladens. Im Rahmen einer **Sensitivitätsanalyse** werden durch den Vergleich zu einem unidirektionalen System (Referenzhaushalt) ausschlaggebende Parameter untersucht (s. Abschnitt 4.3.2 und 4.3.3).

Neben der Sensitivitätsanalyse werden im Tool Lastprofile für Haushaltslasten, Wärmelasten (Wärmepumpen) und Erzeugungsprofile (Photovoltaik) implementiert. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literatur wird ein Simulationstool entwickelt, das die dynamischen Wechselwirkungen zwischen dem Elektrofahrzeug und den Systemkomponenten im Haushalt berücksichtigt. In diesem Anwendungsfeld geht es um die Entwicklung eines Simulationstools, um die Auswirkungen des bidirektionalen Ladens auf die Energieversorgung von Haushalten zu untersuchen. Bidirektionales Laden ermöglicht es Elektrofahrzeugen, nicht nur Energie zu entnehmen und zurückzuspeisen, um andere Verbraucher zu versorgen.

Vor diesem Hintergrund wird in den folgenden Abschnitten der Modellaufbau des zugrunde liegenden V2H-Simulationstool, wie z. B. die benötigten Lastprofile und Datengrundlagen, beschrieben.

4.2 Aufbau Simulationstool und Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die Methodik der V2H-Simulationen, die definierten Parameter und Berechnungsgrundlagen, die mathematischen Berechnungszusammenhänge sowie die Definition des Referenzhaushalts detailliert erläutert. Der Referenzhaushalt dient als Vergleichsmodell für realitätsnahe V2H-Simulationen und wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse verwendet (s. Kapitel 4.3.3). Es ist anzumerken, dass die entwickelte Methodik die Simulation verschiedener Haushalte ermöglicht.

4.2.1 Methodik V2H-Simulation

Im Simulationstool können die Auswirkungen eines bidirektionalen BEV im Kontext von V2H für unterschiedliche Haushalte simuliert werden. Es besteht die Möglichkeit unterschiedliche Kennwerte und Parameter einzustellen und u. a. den Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad zu berechnen. Das Tool ist unter Verwendung von *MS Excel* und der Programmiersprache *VBA (Visual Basic for Applications)* entwickelt und bietet die Möglichkeit, relevante Parameter der Systemkomponenten zu variieren. Beispielhaft können Lastprofile von Verbrauchern und Erzeugern sowie Kennwerte des BEV mit unterschiedlichen Wallbox-Konfigurationen und Daten zum Nutzerverhalten (An- und Abwesenheitszeiten) eingestellt werden.

Das entwickelte Simulationstool umfasst folgende Systemkomponenten: Eine Photovoltaikanlage inkl. stationären Batteriespeicher für den Eigenverbrauch, typische Haushaltsgeräte, eine Wärmepumpe, eine Wallbox und ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug (BEV) mit einer bidirektionalen Lade- bzw. Entladeeinrichtung. Abbildung 9 zeigt schematisch die wichtigsten HEMS-Komponenten in einem V2H-System mit einer intelligenten Wallbox gemäß ISO 15118-20. Weitere Grundlagen zum V2H-System sind im Abschnitt 2.3 näher beschrieben.

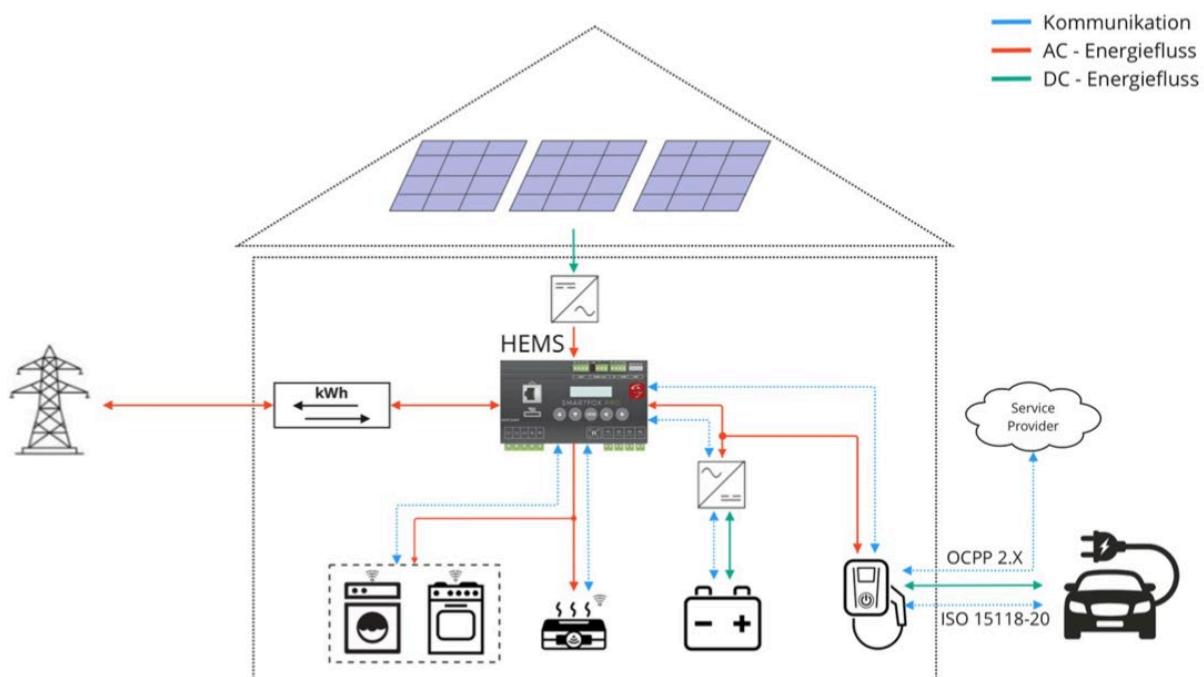


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Komponenten in einem V2H-System mit Lastflüssen und Kommunikationswegen (Icon HEMS *SmartFox*)

In der Simulation werden alle oben genannten Systemkomponenten als Black Box betrachtet. Die Black-Box-Methode ist "*eine nützliche Methode zur Grobstrukturierung komplexer Systeme, deren innere Struktur zunächst unbekannt ist*" (vgl. Beelich et.al, 1983) [83]. Dabei werden Eingangs- und Ausgangsparameter vereinfacht und zur Modellierung verwendet. Weitere Einflussparameter, wie z. B. das spezifische BEV-Nutzerverhalten oder das Fahrverhalten, werden in diesem Tool nicht über Profile berücksichtigt, sondern statisch festgelegt. Abbildung 10 (nächste Seite) verdeutlicht den methodischen Aufbau des V2H-Simulationstools. Dabei entspricht die Box der Lastprofile den hinterlegten Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen. Für das Verbrauchsprofil wurde der *Load Profile Generator Version 10.8.0* [84] verwendet. Dabei handelt es sich um ein Modellierungswerkzeug für den Energieverbrauch von Haushalten, das eine Verhaltenssimulation der Bewohner durchführt und Lastprofile erzeugt. Es bietet vorgefertigte deutsche Haushaltsprofile und erzeugt CSV-Dateien zur Verwendung in anderer Simulationssoftware. Das Erzeugungsprofil wurde mit *PV*SOL premium 2022 Release 7* [85] simuliert und basiert wie das Verbrauchsprofil auf dem Referenzjahr 2021.

Als Lastprofil für die Simulation der elektrischen Wärmepumpe wurde das Wärmelastprofil "*HEF33*" [86] gewählt. Dabei wurde der Wärmebedarf mit einem Umrechnungstool [87] über die Leistungszahl (Coefficient of Performance - COP) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in den elektrischen Energiebedarf umgerechnet. Das Wärmeprofil ist wie die anderen in einer Auflösung von 15-Minuten im Simulationstool hinterlegt.

Die Verwendung von Standardlastprofilen wird bewusst vermieden, da diese nicht in der Lage sind, das stochastische Verbrauchsverhalten einzelner Verbraucher adäquat abzubilden. Standardlastprofile basieren auf Durchschnittswerten und typisierten Mustern, die individuelle Unterschiede in Haushalten nicht berücksichtigen. Im Gegensatz dazu bieten reale Lastprofile eine wesentlich höhere Genauigkeit, da sie auf individuellen, tatsächlichen Verbrauchsmustern basieren und somit auch spezifische, tageszeitliche oder saisonale Schwankungen präzise erfassen. Dies ist besonders wichtig, da das typische Verhalten eines Haushalts je nach Nutzungsverhalten der Bewohner, technischen Gegebenheiten und weiteren demografischen Einflüssen stark variieren kann.

Typisierte und verallgemeinerte Standardlastprofile wie das Haushaltslastprofil H0 sind oft zu ungenau, um die vielfältigen Verbrauchscharakteristika spezifischer Nutzergruppen adäquat abzubilden. Individuelle Lastprofile hingegen ermöglichen eine genaue Abbildung dieser Charakteristika und insbesondere der Lastspitzen, da sie das tatsächliche Verbrauchsverhalten eines Haushalts widerspiegeln. Diese Genauigkeit ist entscheidend für eine detaillierte Analyse und Simulation, insbesondere für die Darstellung von Lastspitzen.

Im Simulationstool werden, daher bevorzugt individuelle Lastprofile verwendet, um den realen Verbrauch, die Speicherung und die gleichzeitige Erzeugung, wie sie im V2H-System auftreten, genauer abzubilden. Für die Anwendung auf Elektrofahrzeuge mit V2H-Funktionalität wird ein spezifisches Lastprofil entwickelt. Alle Lastprofile haben eine Auflösung von 15-Minuten, um die dynamischen Prozesse genau abbilden zu können. Durch die Aggregation und Analyse vieler Einzelprofile kann letztlich auch ein umfassenderes Verständnis für ein typisches Verbrauchsverhalten gewonnen werden.

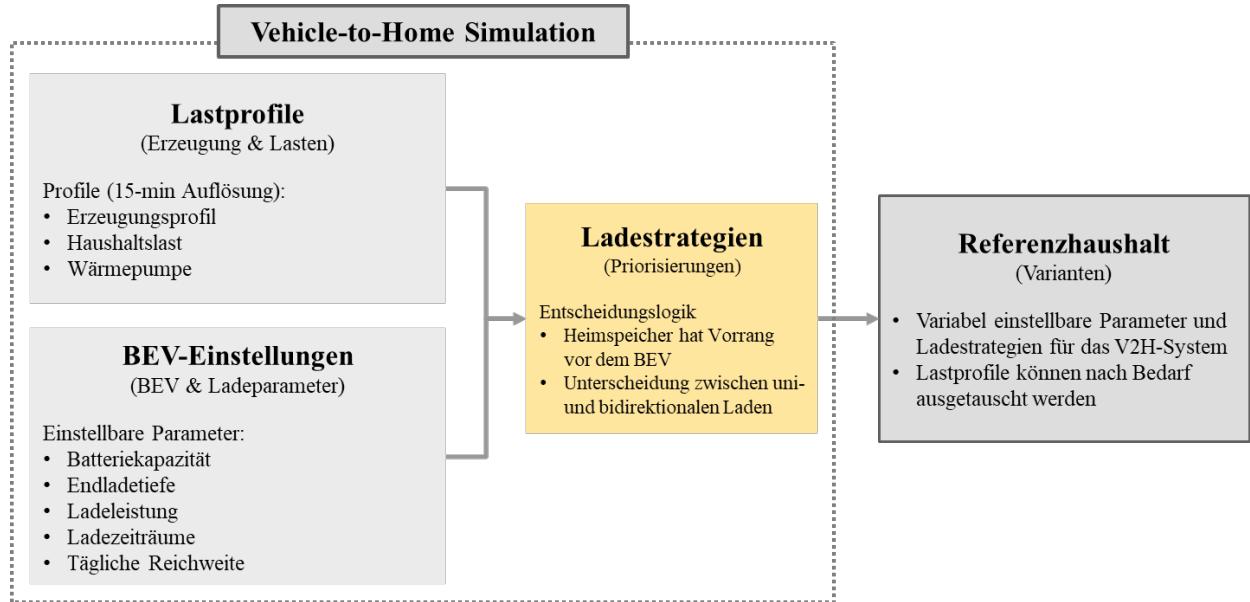


Abbildung 10: Methodischer Aufbau des V2H-Simulationstools

Die methodische Struktur umfasst Kennzahlen und Parameter der Systemkomponenten, wie in Abbildung 10 dargestellt. Die einstellbaren Komponenten des Systems sind das BEV, die Wallbox und der Heimspeicher (s. Tabelle 6), die je nach Simulation variiert werden können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Einstellungen des BEV anzupassen, wobei insbesondere die Batteriekapazität und die Entladetiefe (minimale SoC) zu nennen sind, da diese für die Bestimmung der erforderlichen Reichweite von entscheidender Bedeutung sind. Darüber hinaus können auch die täglichen Nebenzeiten des BEV sowie der Energiebedarf für Fahrten eingegeben werden. Die in der Simulation hinterlegten Profile für die Erzeugung, den Haushalt und die Wärmepumpe sind in 15-Minuten-Auflösung hinterlegt und können angepasst werden.

Die folgende Abbildung 11 zeigt schematisch die verwendeten Profile der Vehicle-to-Home Simulation. Bei den externen Profilen handelt es sich um das PV-System und den Haushaltsverbrauch, wobei letzterer aus einem synthetischen Verbrauchsprofil für einen durchschnittlichen Haushalt in Deutschland sowie einem Wärmeprofil einer elektrischen Luftpumpenwärme für den Referenzhaushalt besteht, weitere Informationen zu den externen Last- und Erzeugungsprofilen sind in Kapitel 4.2.5 zu finden. Die unteren Profile in Abbildung 11 zeigen die im Simulationstool berechneten Profile für den elektrischen Heimspeicher und die Lastprofile des Battery Electric Vehicle (BEV). Dabei werden die Speicherstände des Hausspeichersystems und des BEV über das Jahr unter Berücksichtigung der Eingangsparameter (Ladeleistung, Ladeleistungen, minimale Entladetiefen (SoC)) als selbst generiertes Profil berechnet.

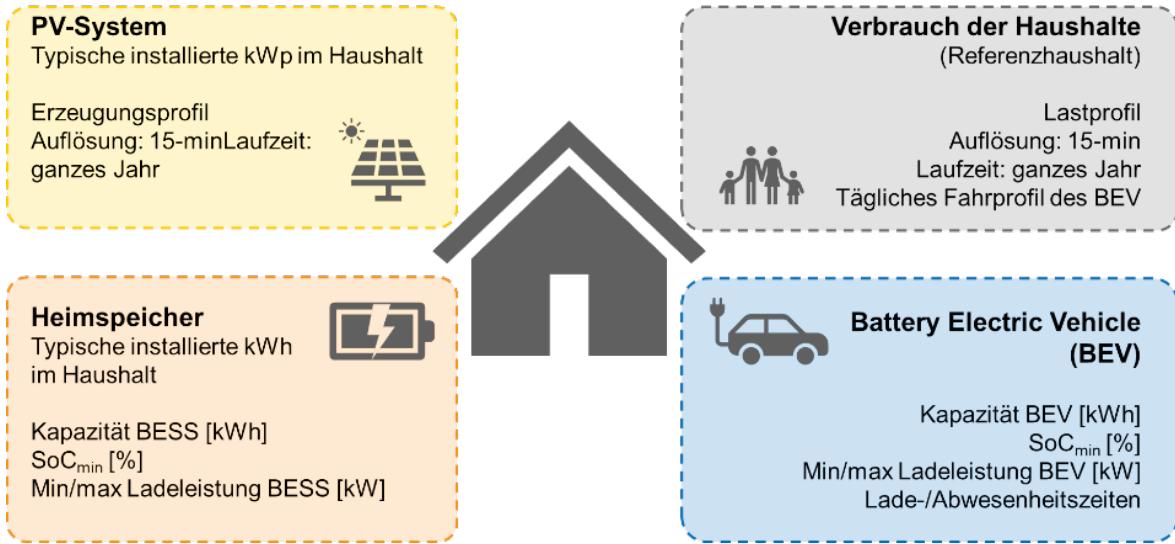


Abbildung 11: Schematische Darstellung externer und eigener Profile für das V2H-System

Die gewählte Ladestrategie priorisiert einen hohen Ladezustand des Heimspeichers gegenüber dem BEV-Speicher, so dass der Heimspeicher vorrangig geladen bzw. nur bei Abwesenheit des BEV entladen wird. Diese Strategie soll die Autarkie erhöhen (s. Kapitel 4.2.4). Das Tool erlaubt die Auswahl zwischen einem bidirektionalen und einem unidirektionalen System, sodass Referenzhaushalte sowie weitere Varianten erstellt werden können. Die variabel einstellbaren Parameter und Ladestrategien für das V2H sowie die Lastprofile gewährleisten eine hohe Flexibilität bei der Simulation.

Tabelle 6: Einstellbare Kennzahlen und Parameter des V2H-Simulationstools

Parameter	Einheit	Erläuterung
BEV		
Kapazität (Netto)	[kWh]	nutzbare Kapazität (Netto) des BEV
SoC min.	[%]	Mindestkapazität der Fahrzeubatterie
Minimale Ladeleistung	[kW]	Minimale Ladeleistung des BEV
Maximale Ladeleistung	[kW]	Maximale Ladeleistung des BEV
Ø Täglicher Verbrauch	[kWh/d]	Durchschnittliche Fahrleistung des BEV pro Tag
Abwesenheit Werktags	[Stunden]	Definierte Zeitfenster in denen das BEV nicht angeschlossen ist
Abwesenheit Wochenende	[Stunden]	Definierte Zeitfenster in denen das BEV nicht angeschlossen ist
Vollladung	[Wochentag]	Auswahl Wochentage für Vollladung des BEV
Ladetyp	[‐]	Auswahl bidirektionales oder unidirektionales Laden
Wallbox		
Minimale Ladeleistung	[kW]	Minimale Ladeleistung der Wallbox
Maximale Ladeleistung	[kW]	Maximale Ladeleistung der Wallbox
Heimspeicher		
Kapazität (Netto)	[kWh]	nutzbare Kapazität (Netto) des Heimspeichers
SoC min.	[%]	Mindestkapazität des Heimspeichers
Minimale Ladeleistung	[kW]	Minimale Ladeleistung des Heimspeichers
Maximale Ladeleistung	[kW]	Maximale Ladeleistung des Heimspeichers

Neben den Lastprofilen und der Parametrierung der Systemkomponenten spielen die Ladestrategien (s. Abbildung 10) eine entscheidende Rolle im methodischen Aufbau des V2H-Tools. Die Ladestrategien bzw. die Schaltlogiken regeln die Energieflüsse zwischen Heimspeicher und BEV. Dabei müssen eine Vielzahl an Ladefällen berücksichtigt werden. Durch Priorisierungen werden die Ladestrategien in Abschnitt 4.2.4 näher beschrieben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in diesem Tool das V2H-System mittels hinterlegter Lastprofile und einstellbarer Parameter sowie definierter Ladestrategien zur Simulation einer Variante eines Referenzhaushaltes verwendet wird (s. Abbildung 10). Die einstellbaren Parameter einer Variante und die dazugehörigen Berechnungsgrundlagen werden in den folgenden Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 erläutert.

4.2.2 Simulationsparameter

Im Folgenden werden die in Tabelle 6 dargestellten Parameter näher erläutert. Abbildung 12 zeigt beispielhaft einen Screenshot der Eingabemaske des Simulationstools.

Im Bereich *BEV* kann der Benutzer alle für die Simulation notwendigen Parameter des BEV eingeben (s. Abbildung 12 *Punkt 1*). Wichtig ist, bei der Kapazität die tatsächlich nutzbare Kapazität (Nettokapazität) anzugeben, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Es besteht die Möglichkeit, eine Mindestkapazität der Fahrzeughbatterie (SoC min.) vorzugeben, die beim Entladen nicht unterschritten werden soll. Dies dient in der Realität als Mindestreichweite, die das Fahrzeug dem Benutzenden zur Verfügung stellen soll, um Mobilität zu gewährleisten. Die Mindestkapazität dient als Untergrenze beim Entladen und gleichzeitig als Obergrenze beim Laden über das öffentliche Netz. Das bedeutet, dass das BEV nur bei PV-Überschuss (oder an einem ausgewählten Tag für einen Vollladezyklus) über die eingestellte Mindestkapazität hinaus lädt. Dadurch wird eine unkontrollierte tägliche Vollladung des BEV mit Netzstrom vermieden.

The screenshot shows a software interface for vehicle-to-home simulation. It is divided into four main sections, each with a red box around it:

- 1 BEV:** Contains fields for Marke (VW), Modell (ID.3), Kapazität (Netto) (58 kWh), SoC min. (30%), Minimale Ladeleistung (1,38 kW), Maximale Ladeleistung (11 kW), Täglicher Verbrauch durch. (7,5 kWh), and time intervals for absence (hh:mm) from 8:00 to 17:00 and 16:00 to 18:30. Below this is a table for selecting days of the week for full charging.
- 2 Wallbox:** Shows parameters for a BYD HVS 5.1 battery with a capacity of 10,24 kWh, minimum charge of 10%, maximum discharge of 0,5 kW, and maximum charge of 5,75 kW. It also lists minimal and maximal charging power.
- 3 Heimspeicher:** Displays parameters for a BYD HVS 5.1 battery with a capacity of 10,24 kWh, minimum charge of 10%, maximum discharge of 0,5 kW, and maximum charge of 5,75 kW. It also lists minimal and maximal charging power.
- 4:** A blue button labeled "Zum Starten der Simulation:" with the steps "1. Eingaben bestätigen" and "2. Simulation starten". To its right is another button "Eingaben bestätigen" and a "Simulation starten" button.

At the bottom of the interface are tabs for "Lastprofile", "Einstellungen" (highlighted in green), "Graphen", "Auswertung", and a plus sign icon.

Abbildung 12: Tabellenblatt Einstellungen – Eingabe von Parametern (Screenshot Simulationstool)

Der Tagesverbrauch bezeichnet die durchschnittliche Energiemenge, die das Fahrzeug pro Tag aufgrund der zurückgelegten Strecken benötigt. Überschreitet der Tagesverbrauch die Mindestkapazität, wird eine Fehlermeldung angezeigt, da sonst die Kapazität der Fahrzeughbatterie während der Simulation unter null sinken könnte.

Im Feld darunter können die Uhrzeiten und Zeitfenster definiert werden, in denen das BEV nicht angeschlossen ist. Dabei können unterschiedliche Intervalle für Werkstage und Wochenenden angegeben werden. Weiterhin ist es möglich, Tage auszuwählen, an denen das BEV vor Fahrtantritt vollgeladen sein soll, um z. B. eine längere Strecke zurückzulegen. Mit Abwesenheit ist hier gemeint, dass das BEV nicht an die Wallbox angeschlossen ist und daher Energie durch die Fahrt verbraucht. Darunter befindet sich die Option „*Bidirektionales Laden*“, die durch Anklicken aktiviert oder deaktiviert werden kann, um uni- oder bidirektionales Laden zu simulieren (s. Abbildung 12).

Im Bereich *Wallbox* kann der Nutzende die minimale und maximale Ladeleistung eingeben (s. Abbildung 12 *Punkt 2*). Unterschiedliche Ladeleistungen werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (s. Abschnitt 4.3.3) betrachtet.

Die Einstellungen zum *Heimspeicher* sind ähnlich zu denen zum *BEV*. Dort können Kennwerte zur Kapazität (Angabe der Nettokapazität), die maximale Entladetiefe in Prozent, die minimale Ladeleistung und die maximale Ladeleistung eingetragen werden (s. Abbildung 12 *Punkt 3*).

4.2.3 Berechnungsgrundlagen

In diesem Abschnitt werden die Rechenzusammenhänge der verwendeten Lastprofile des Tools näher beschrieben. Dabei werden für jede Zeitreihe (im Standard alle 15-Minuten) alle Zustände und Kennzahlen berechnet. Die nachfolgende Tabelle 7 zeigt und erläutert die berechneten Kennwerte für den Bedarf des PV-Systems, der Speicher (*BEV* und *Heimspeicher*) sowie der Effizienzkennzahlen für Eigenverbrauch und Autarkie. Aus den aufsummierten Zeitreihen können die jährlichen Energiemengen der jeweiligen Systemkomponenten berechnet werden.

Tabelle 7: Auswertungsergebnisse des Simulationstools

Parameter	Einheit	Erläuterung
Bedarf		
Haushalt	[kWh/a]	Jährlicher Energiebedarf nach Lastprofil
Wärmepumpe	[kWh/a]	Jährlicher Energiebedarf nach Lastprofil
BEV	[kWh/a]	Summe des täglichen Verbrauchs (Fahrleistung)
PV-System		
Produktion	[kWh/a]	Produzierter PV-Ertrag nach Erzeugungsprofil
Netzbezug	[kWh/a]	Differenz zwischen Bedarf und direktem Eigenverbrauch (Produktion) inkl. Speicherstand
Einspeisung	[kWh/a]	Differenz zwischen Produktion und Bedarf
Speicher		
Geladene Energie BEV / Heimspeicher	[kWh/a]	Summe der Leistung von PV-Überschuss und des Netstroms für min. SoC ¹
Entladene Energie BEV / Heimspeicher	[kWh/a]	Summe der für den Eigenverbrauch entnommenen Leistung
Vollladezyklen	[-]	Siehe Formel (4)
Effizienz		
Autarkiegrad	[%]	Siehe Formel (3)
Eigenverbrauchsanteil	[%]	Siehe Formel (2)

¹ Der minimale SoC für das BEV entspricht der eingestellten Mindestreichweite, um Mobilität zu gewährleisten. Weiterhin kann auch ein minimaler SoC für den Heimspeicher eingestellt werden, z. B. als Tiefenentladungsschutz.

Die wichtigsten Kenngrößen für die Effizienz eines Eigenversorgungssystems sind der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad, die wie folgt definiert sind.

Der **Eigenverbrauchsanteil** beschreibt den Anteil des erzeugten Solarstroms, der entweder gleichzeitig durch elektrische Verbraucher oder zum Laden des Batteriespeichers genutzt wird. Dies gilt auch für das Laden des BEV [88]. Je höher der Eigenverbrauch, desto weniger Energie wird in das Netz eingespeist. Der Eigenverbrauchsanteil berechnet sich durch die Division der Energiemenge für den eingespeisten Strom ($E_{Einspeisung}$) und der Energiemenge für den erzeugten PV-Strom ($E_{PV\ Produktion}$) in Kilowattstunden (s. Formel (2)). Es ist zu beachten, dass der Eigenverbrauch in der Regel den Anteil des erzeugten Stroms umfasst, der zur Deckung des Eigenbedarfs im Haushalt direkt oder über die Batterie genutzt wird. Sowohl bei der Speicherung als auch bei der Entnahme treten Umwandlungsverluste im Wechselrichter auf. Die Verluste bei der Speicherung in der Batterie werden üblicherweise nicht als Eigenverbrauch gezählt, da sie auftreten, bevor der Strom als nutzbare Energie zur Verfügung steht. Dagegen werden Umwandlungsverluste bei der Ausspeicherung, d. h. bei der Entnahme aus der Batterie, in der Regel als Eigenverbrauch gewertet, da sie Teil des tatsächlichen Energiebedarfs sind, der durch die Photovoltaikanlage und das Speichersystem gedeckt wird.

$$\text{Eigenverbrauchsanteil [%]} = \left(1 - \frac{E_{Einspeisung} [\text{kWh}]}{E_{PV\ Produktion} [\text{kWh}]} \right) * 100 \quad (2)$$

Der **Autarkiegrad** gibt an, welcher Anteil des Stromverbrauchs durch die Photovoltaikanlage (inkl. Speicher) gedeckt wird [88]. Dies wird entweder durch den direkten Verbrauch des erzeugten Solarstroms oder durch die Entladung des Batteriespeichers erreicht. Je höher der Autarkiegrad ist, desto weniger Energie wird aus dem Netz bezogen. Dazu werden die Energiemenge für den Netzbezug ($E_{Netzbezug}$) und die Energiemenge für den Jahresstromverbrauch ($E_{Jahresstromverbrauch}$) in Kilowattstunden dividiert (s. Formel (3)). Der Energiebedarf des BEV ist im Jahresstromverbrauch enthalten. Dabei wird angenommen, dass das BEV ausschließlich im Haushalt geladen wird.

$$\text{Autarkiegrad [%]} = \left(1 - \frac{E_{Netzbezug} [\text{kWh}]}{E_{Jahresstromverbrauch} [\text{kWh}]} \right) * 100 \quad (3)$$

Im Simulationstool wird die Anzahl der **Vollladezyklen**, die in einem Jahr erreicht werden, für das BEV und den Heimspeicher bestimmt. Dabei werden die geladene Energiemenge ($E_{Geladen}$) in Kilowattstunden durch die maximal nutzbare Kapazität ($C_{Kapazität}$) in Kilowattschunden dividiert (s. Formel (4)).

$$n_{Vollladezyklen} = \frac{E_{Geladen} [\text{kWh}]}{C_{Kapazität} [\text{kWh}]} \quad (4)$$

Die berechneten Kennwerte werden auch im Rahmen der Sensitivitätsanalyse genutzt, um die unterschiedlichen Szenarien miteinander zu vergleichen (s. Kapitel 4.3.3). Um die Unterschiede zwi-

schen den Szenarien dazustellen, wird weiterhin die prozentuale Veränderung der Kennwerte berechnet (s. Formel (5)). Dabei entspricht der Endwert den Werten des bidirektionalen Systems und der Anfangswert dem des unidirektionalen Systems zum Referenzhaushalt. Ergebnisse größer als null entsprechen einer Steigerung und Werte kleiner als null entsprechen einer Verringerung.

$$\text{Prozentuale Änderung [%]} = \frac{\text{Endwert} - \text{Anfangswert}}{\text{Anfangswert}} * 100 \quad (5)$$

4.2.4 Ladestrategien

Im Folgenden wird die angewandte Methodik und die Schaltlogik beschrieben, auf der die Lastflüsse für die Ladestrategien im Programmcode basieren. Im Tool werden Lastflusskennwerte über die Zeit berechnet und ausgegeben. Das bedeutet, dass die hinterlegten Daten (Lastprofile) mit den eingestellten Parametern und Grenzwerten für jeden Zeitpunkt berechnet werden. Die Berechnungsparameter sind (s. Kapitel 4.2.3 Tabelle 7):

- PV-Überschuss
- Netzbezug
- Leistung Heimspeichers & BEV
- Kapazität Heimspeicher & BEV
- Abwesenheitszeiten
- Ladezustände (SoC) Heimspeicher & BEV

Bei dem Parameter PV-Überschuss handelt es sich um die Summe der Lastprofile des Haushalts, der Wärmepumpe und des Erzeugungsprofils der PV-Anlage. Daraus ergibt sich der benötigte Netzbezug (bei negativen Werten ergibt sich eine Einspeisung). Dieser wird dann mit den entsprechenden Bedarfen (Leistungen) des Heimspeichers und des BEV für jeden Zeitpunkt abgestimmt. Dabei werden die jeweiligen Ladezustände (SoC) des Heimspeichers und BEV auf deren Grenzwerte (Mindestspeicherstände) überwacht. Das Programm folgt dann einem Entscheidungsschema, auf dessen Basis temporäre Zwischenwerte berechnet und Lasten verteilt werden. Dabei folgen beide Speicher (Heimspeicher und BEV) einer eingestellten Priorisierung bzw. Entscheidungsschema. Die Ladevorgänge sind wie folgt priorisiert:

1. Der Heimspeicher wird nur bei PV-Überschuss geladen
2. Das BEV wird bei Unterschreitung des minimalen Ladezustands (SoC), unabhängig von anderen Faktoren, sofort geladen (reicht dabei der PV-Überschuss nicht aus wird mit Netstrom ergänzt)
3. Das BEV wird nur bei PV-Überschuss über den minimalen SoC geladen (oder wenn eine Vollladung vorgesehen ist)
4. Das BEV wird nur mit PV-Überschuss geladen, wenn der Heimspeicher nicht mehr geladen werden kann oder die PV-Ladeleistung die maximale Ladeleistung des Heimspeichers übersteigt
5. Kann die PV-Anlage den Bedarf des Haushalts und der Wärmepumpe nicht decken, wird das BEV vor dem Heimspeicher entladen (wenn die min. SoC Ladezustände dies zulassen)

Weiterhin sind in Abbildung 13 (nächste Seite) die Lade- und Entladefälle vereinfacht visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Heimspeicher höhere Priorität als das BEV hat. Das BEV wird später geladen und früher entladen. Der Zweck der höheren Priorisierung des Heimspeichers ist es, diesen zu entlasten und eine hohe Eigenversorgung bei Abwesenheit des BEV zu gewährleisten. Weitere Untersuchungen zu Ladeprioritäten und deren Auswirkungen auf die Autarkie sind denkbar. Im Rahmen der Analyse der Lade- und Entladeleistung wurde vereinfachend von einem konstanten Wirkungsgrad ausgegangen. Der Ladewirkungsgrad wurde mit 92,5% und der Entladewirkungsgrad mit 92,0% angesetzt [89]. Daraus ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 85,1%. Die Batteriespeicherverluste über die Zeit wurden dabei vernachlässigt. Diese Entscheidung basiert auf der Annahme, dass das Fahrzeug täglich genutzt und folglich täglich angeschlossen wird. Durch diese regelmäßige Nutzung und den kontinuierlichen Lade- und Entladezyklus wurde angenommen, dass eine detaillierte Betrachtung zeitabhängiger Verluste für die Zwecke dieser Analyse nicht erforderlich ist. Daher fokussiert sich die Betrachtung auf die effektive Nutzung der Energie unter der Annahme konstanter Wirkungsgrade, ohne die potenziellen geringfügigen Schwankungen in den Verlusten über die Zeit hinweg detailliert zu berücksichtigen.

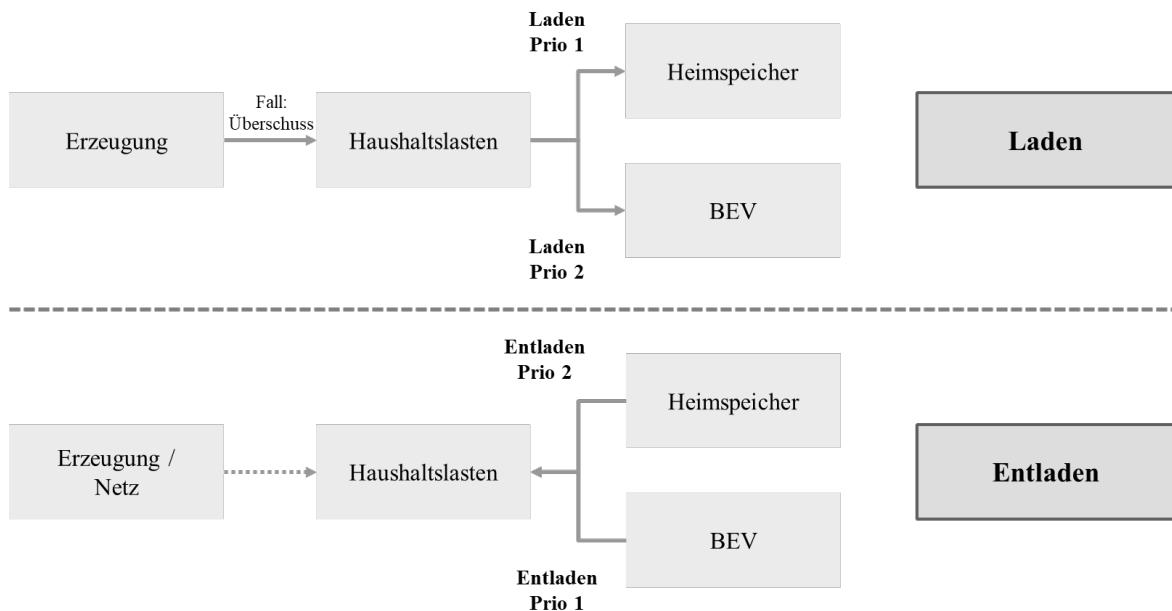


Abbildung 13: Schematisch dargestellte Priorisierung des Heimspeichers im Tool

Das Entscheidungsschema und die Logik in der Simulation sind in 30 Ladefällen im Programm berücksichtigt. Ähnliche Ladefälle wurden auch in den Studien [19, 90] angewendet. Im Anhang finden sich alle Ladefälle für den Ladevorgang des bidirektionalen Ladens sowie Entscheidungsschemata dargestellt (s. Anhang Ladefälle: Abbildung A 1, Abbildung A 2 und Abbildung A 3).

Anwendung von Ladefällen in der Simulation

Abbildung 14 (nächste Seite) zeigt einen Ausschnitt des Entscheidungsschemas am Beispiel von Fall Nr. 17, in dem nur das BEV entladen wird. Es beginnt mit der Überprüfung der Anwesenheit des BEV. Der Haushaltsbedarf (Haushalt und Wärmepumpe zusammengefasst) kann nicht durch die PV-Anlage gedeckt werden. Die darüberhinausgehende Leistung überschreitet nicht die maxi-

male Entladeleistung des BEV. Der restliche Bedarf wird durch das BEV gedeckt. Sollte der Ladevorgang jedoch zu einem Unterschreiten der Minimalkapazität des BEV sorgen, wird der Restbedarf durch das Netz gedeckt.

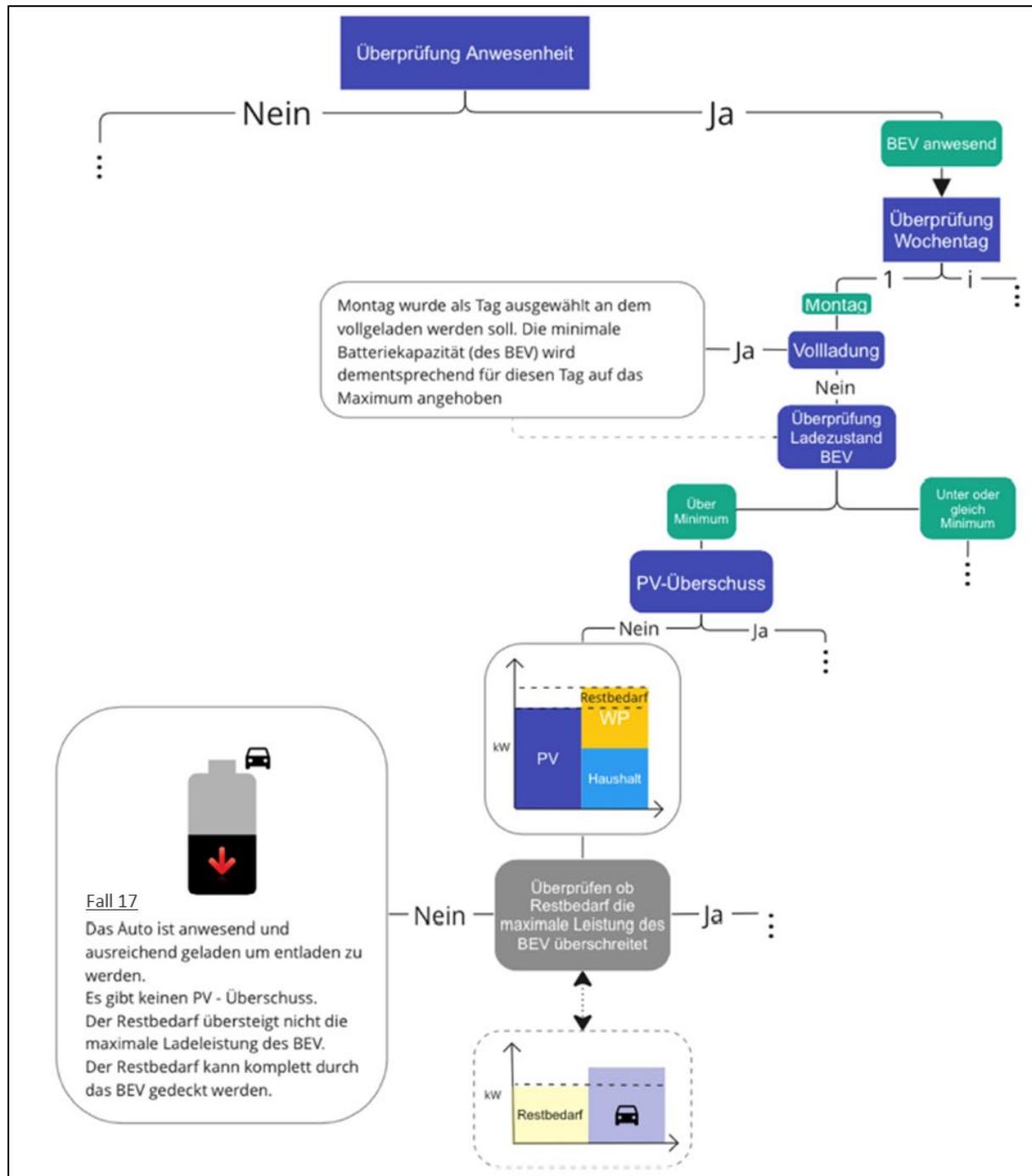


Abbildung 14: Entscheidungsschema im Programmablauf anhand eines Beispiels (Ladefall 17)

Die Punkte in Abbildung 14 sollen eine Fortsetzung des Entscheidungsschemas darstellen, welche zur Übersichtlichkeit der Abbildung nicht mit aufgenommen wird. Es sind alle 30 Ladefälle in einem Entscheidungsschemata im Anhang aufgeführt (s. Anhang Ladefälle: Abbildung A 1, Abbildung A 2 und Abbildung A 3).

Berücksichtigung von Ladekurven

Ein weiteres Thema ist das **Ladeverhalten** der Speicher. Um schonend zu Laden, werden weder Heimspeicher noch BEV mit voller Leistung bis zur maximalen Kapazität geladen. Auch beim Schnellladen mit Gleichstrom wird in der Regel nur bis zu einem SoC von 80% mit voller Leistung geladen [91]. Auswertungen von Ladekurven verschiedener BEV bei ungesteuertem Laden zeigen, wie sich die Ladeleistung im Verlauf reduziert. Um dies in der Simulation zu berücksichtigen wird die Ladeleistung ($P_{SoC}^{max,0}$) ab einem SoC von 75% reduziert [92]. In der Formel (6) wird der SoC als Dezimalzahl verwendet.

$$P_{SoC}^{max} = \begin{cases} P^{max,0} & \text{für } SoC=\{0-0,75\} \\ P^{max,0} * (-4 * SoC + 4) & \text{für } SoC=\{0,75-1\} \end{cases} \quad (6)$$

In der Simulation wird die obige Formel (6) so lange angewendet, bis die minimale Ladeleistung erreicht ist. Ab diesem Punkt wird konstant mit dieser Leistung weitergeladen. Durch den linearen Abfall der Ladeleistung ab einem SoC von 75% sollen die Ladevorgänge der Realität angenähert werden.

4.2.5 Definition Referenzhaushalt

Ausgangslage für die Simulation des V2H-Systems bildet ein Referenzhaushalt bestehend aus einem modernen Einfamilienhaus (EFH), dass über die nachfolgenden Systemkomponenten und Konfigurationen verfügt (s. Tabelle 8).

Dazu sind neben dem Erzeugerprofil durch die Photovoltaikanlage auch unterschiedliche Verbrauchsprofile (Haushaltsstromverbrauch, Wärmepumpe) und Kennwerte (Elektrofahrzeuge) zusammengetragen. Damit ist es möglich modular Haushaltsparameter oder Lastprofile zu verändern (s. Kapitel 4.2.1 Methodik V2H). Weiterhin ist die Funktion des bidirektionalen Ladens bzw. Entladens (V2H) des Elektrofahrzeugs berücksichtigt. Im Simulationstool selbst können verschiedene Parameter (Nutzungszeiten, Ladeleistungen, Verbrauch) angepasst werden (s. Kapitel 4.2.1 und Tabelle 6).

Das Verhältnis von Photovoltaikanlagenleistung zu Heimspeicherkapazität von 1 kWh pro 1 kWp wird als sinnvoll erachtet, da es ein effektives Gleichgewicht zwischen Energieerzeugung und -speicherung bietet. Im Durchschnitt benötigt 1 kWp ca. 5-10 m² Dachfläche, d. h. eine 10 kWp Anlage (wie im Referenzhaushalt), die auf eine typische Dachfläche von 50-100 m² passt, ist in vielen deutschen Haushalten gut integrierbar. Diese Dimensionierung wird durch Studien der HTW Berlin [93] und des Fraunhofer ISE [94] gestützt und hilft, den Eigenverbrauch zu maximieren und gleichzeitig den Netzbezug zu minimieren.

Die Abwesenheit des BEV basiert auf dem erstellten Aktivitätsprotokoll für den 4-Personen-Haushalt des *Load Profile Generators* [84]. Daraus geht hervor, dass der Erwerbstätige 9 Stunden pro Tag arbeitet und das Haus zwischen 08:00 und 09:00 Uhr morgens verlässt [84]. Die Abwesenheit am Wochenende wird mit 2,5 Stunden pro Tag angenommen. Daraus ergeben sich die gewählten Abwesenheitszeiten des BEV (s. Tabelle 8) für Wochentage und Wochenenden.

Um die Mobilität jederzeit zu gewährleisten, wurde eine Mindestreichweite definiert. Diese wurde standardmäßig auf 37 km/Tag [95] und einen Durchschnittsverbrauch von 20 kWh/100 km festgelegt, was einem Tagesverbrauch von ca. 7,5 kWh pro Tag entspricht, siehe Formel (7).

$$Tagesverbrauch_{BEV} \left[\frac{kWh}{d} \right] = BEV_{Verbrauch} \left[\frac{kWh}{100km} \right] * BEV_{Strecke} \left[\frac{km}{d} \right] \quad (7)$$

Tabelle 8: Zusammenfassung der energetischen Kennwerte Referenzhaushalt

Kennwerte des Referenzhaushalts		
Haushalt	Anzahl Personen:	4
	Haushaltslasten:	4.719 kWh/a
	Wärmepumpe:	6.401 kWh/a
PV-Anlage	Leistung:	10 kW _P
	Produktion:	10.400 kWh/a
	Ausrichtung/Neigung:	Süd / 30°
Batteriespeicher	Kapazität:	10,24 kWh
	Min. State of Charge (SoC):	10%
	Minimale Ladeleistung:	500 W
	Maximale Ladeleistung:	5,75 kW
Elektrofahrzeug (BEV)	Kapazität:	58 kWh
	Min. State of Charge (SoC):	30%
	Minimale Ladeleistung:	1,38 kW ²
	Maximale Ladeleistung:	11 kW
	Täglicher Verbrauch:	7,5 kWh ³
	Vollladungen:	0 x pro Woche
	Abwesenheit:	08:00 – 17:00 Uhr (unter der Woche) 16:00 – 18:30 Uhr (am Wochenende)
Wallbox (bidirektionales Laden)	Minimale Ladeleistung:	1,38 kW ¹
	Maximale Ladeleistung:	11 kW

² Die minimale Ladeleistung liegt beim 1-phasigen AC-Laden bei 1,38 kW und beim 3-phasigen AC-Laden bei 4,14 kW (festgelegt durch PWM) nach IEC 61851-1 [96].

³ Bei durchschnittlicher Fahrstrecke pro Tag ~37 km/Tag und durchschnittlichem Verbrauch 20 kWh/100 km

Das Referenzszenario besteht aus einem Verbrauchsprofil von vier Personen (Familie mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern, davon ist eine Person berufstätig), basierend auf dem Typ: CHR44 aus dem *Load Profile Generator* Version 10.8.0 [84] (s. exemplarisch ein Ausschnitt des Lastprofils für den 01.01.2021 in Abbildung 15).

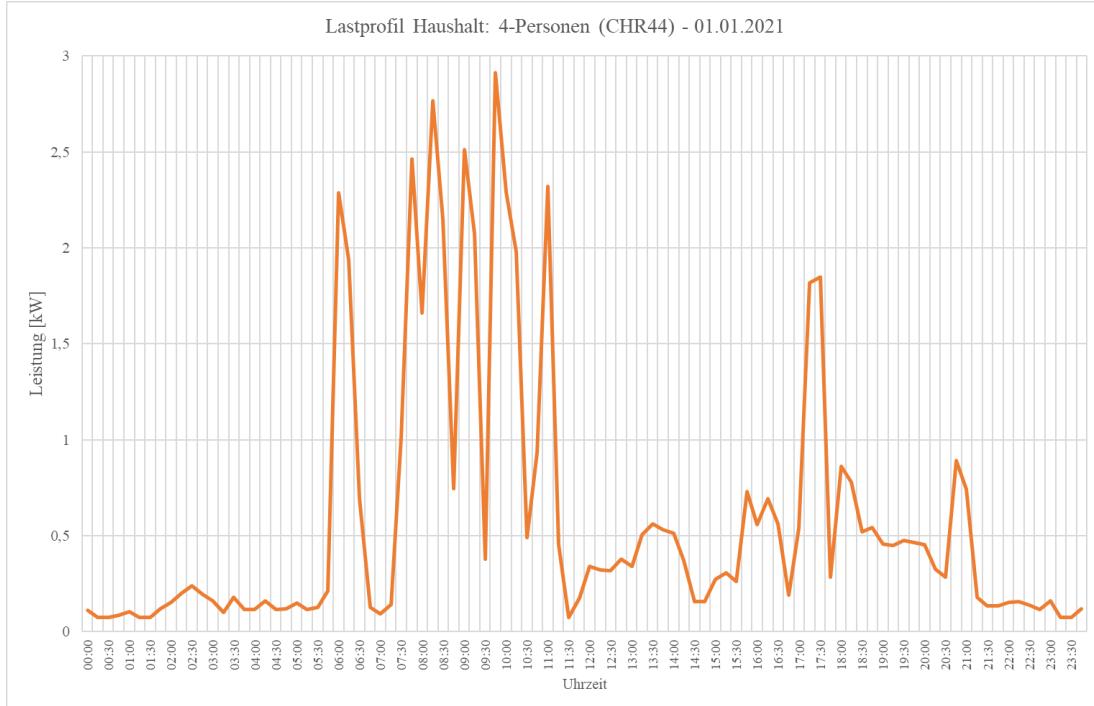


Abbildung 15: Beispielhaftes Tagesprofil für Haushalt nach *Load Profile Generator* (Typ: CHR44) [84]

Das Erzeugungsprofil wurde *mit PV*SOL premium 2022 Release 7* [85] simuliert und basiert ebenfalls auf dem Referenzjahr 2021 (s. Jahresverlauf in Abbildung 16).

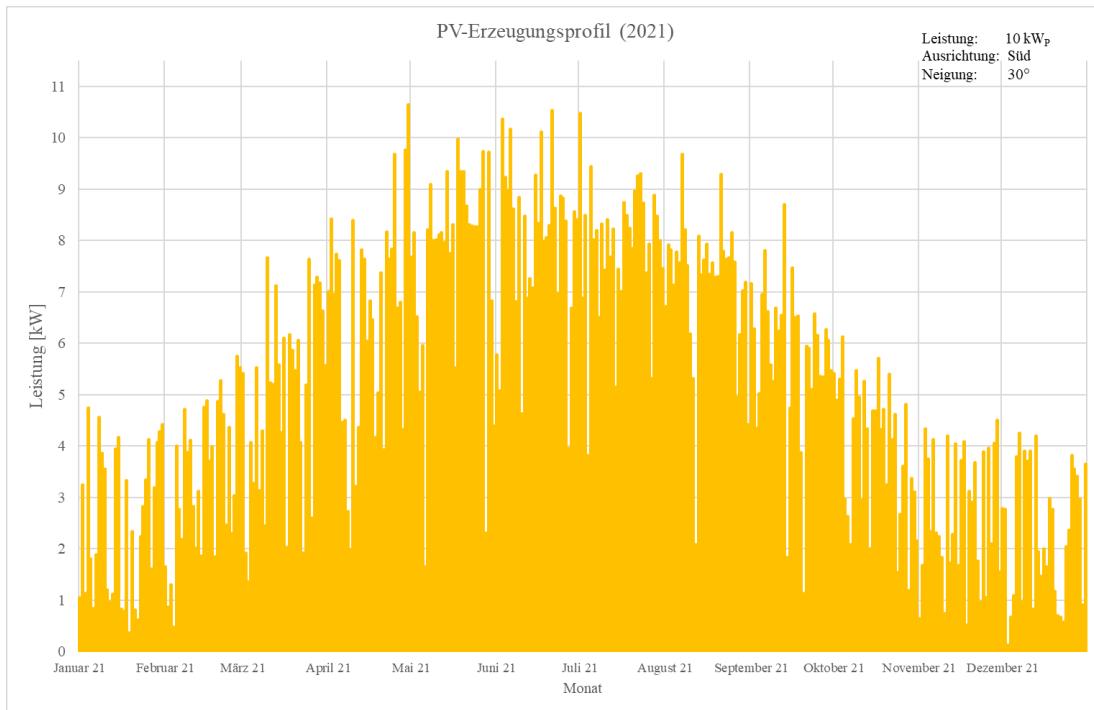


Abbildung 16: Erzeugungsprofil für eine 10kW_p Anlage - Simuliert mit *PV*SOL* [85]

Die Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus mit 132 m² Wohnfläche basiert auf einem jährlichen Wärmeenergiebedarf von 13.860 kWh, der Heizung und Warmwasser umfasst und auf dem Heizlastprofil "HEF33" basiert [86]. Dieses Heizlastprofil wurde speziell für deutsche Einfamilienhäuser entwickelt und wird vom *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)* verwendet. Der Wärmebedarf wird aus der Wohnfläche und der Energieeffizienzklasse des Gebäudes ermittelt, wobei eine Effizienzklasse C nach dem *Gebäudeenergiegesetz (GEG)* angenommen wird, was einem Mittelwert von 87,5 kWh/m² entspricht [3]. Der Wärmebedarf wurde mit einem Umrechnungstool [87] über die Leistungszahl (Coefficient of Performance - COP) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in den elektrischen Energiebedarf umgerechnet (s. Wärmelastprofil in Abbildung 17).

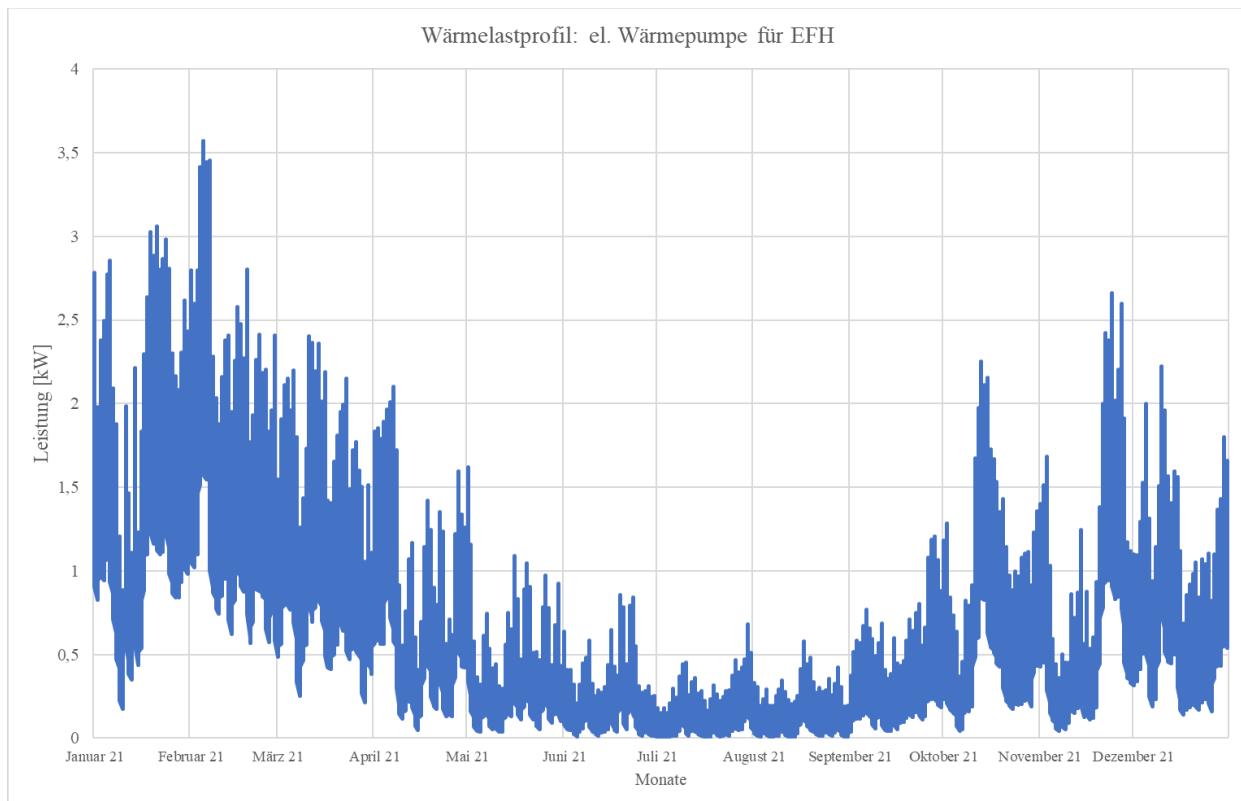


Abbildung 17: Wärmelastprofil für eine el. Luft-Wasser-Wärmepumpe nach HEF33 [86]

4.3 Simulationsergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse und Funktionen des Simulationstools anhand der Ergebnisse des Referenzhaushalts demonstriert. Anschließend werden Szenarien abgeleitet und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse einzeln dargestellt.

4.3.1 Referenzhaushalt

Die Analysen basieren auf sieben Diagrammen, die beispielhaft ein ganzes Jahr (Referenzjahr 2021) und eine Woche, einen Wochentag (Dienstag) jeweils im Sommer und Winter darstellen. Aus den Rohdaten können weiterhin beliebige Tage oder Wochen ausgewählt werden. Die Energiebewertung im Tool umfasst die folgenden Kennzahlen (s. Kapitel 4.2.3 Tabelle 7):

- Gesamtbedarf für alle elektrischen Verbraucher (Haushalt, Wärmepumpe, BEV)
- Gesamtproduktion der Photovoltaikanlage (eingespeiste Energiemenge, Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad)
- Speichermengen wie entladene Energie (Heimspeicher und BEV) und Anzahl der Vollladezyklen

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse für den Referenzhaushalt (s. Tabelle 8) beispielhaft erläutert.

In Abbildung 18 (nächste Seite) ist ein Ergebnisplot für einen beispielhaften Sommertag mit den entsprechenden Erzeugungs-, und Speicherzuständen im zeitlichen Verlauf dargestellt. Berücksichtigt sind dabei Photovoltaikleistung, Netzbezug, BEV-Leistung, Leistung Heimspeicher, Leistung der Haushaltlast und Wärmepumpe, SoC BEV und SoC Heimspeicher dargestellt. Die Leistungen in Kilowatt sind als Fläche dargestellt und können auf der vertikalen Primärachse abgelesen werden. Der SoC in Prozent wird als Linie dargestellt und kann auf der vertikalen Sekundärachse abgelesen werden. Die ganze Simulation basiert auf viertelstündlichen Datensätzen.

Die nachfolgende Abbildung 19 verdeutlicht den Sachverhalt, dass es bei bidirektionalem Laden ein Problem mit der zeitlichen Verfügbarkeit und saisonalen Unterschieden der PV-Erzeugung gibt. Aus diesem Grund werden in der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse (s. Abschnitt 4.3.3) die Abwesenheitszeiten bzw. Verfügbarkeiten des BEV variiert und untersucht. Beispielhaft ist ebenfalls ein Wochenendtag mit anderen Ladezeiten im Anhang dargestellt (s. Abbildung A 4).

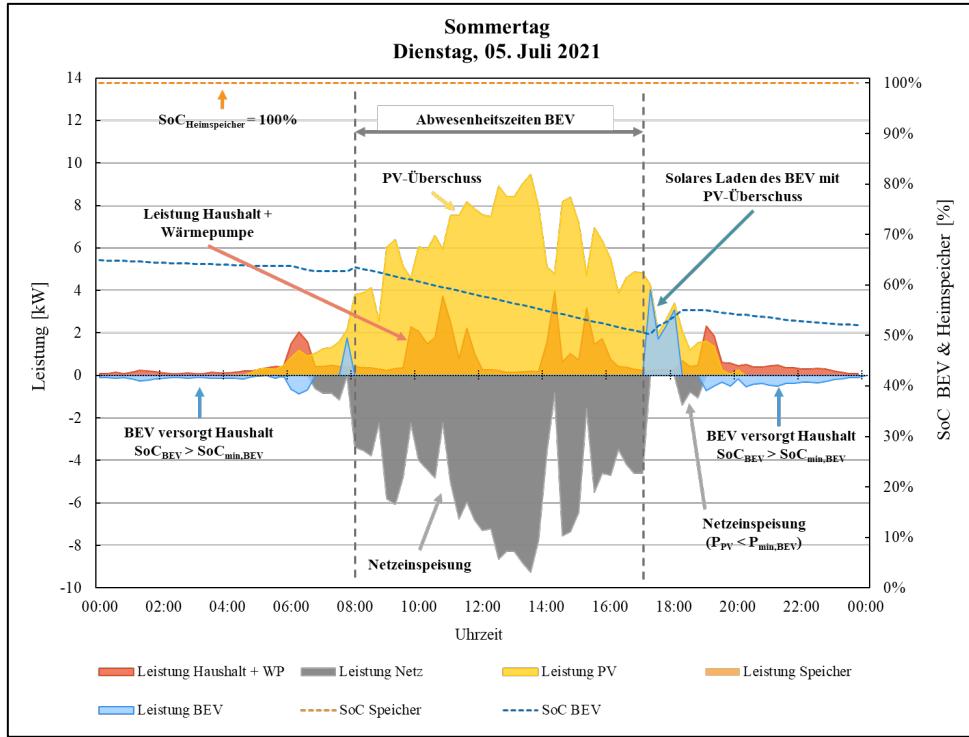


Abbildung 18: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios mit der Leistungs- und SoC-Kurve am Dienstag, 05. Juli 2021

Tabelle 9 zeigt die wichtigsten Kennwerte der Simulationsergebnisse des Referenzhaushalts. Dies sind die Jahresenergiemengen sowie die prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzhaushalt mit unidirektionalem BEV (positive Veränderungen entsprechen Steigerungen und negative Veränderungen entsprechen Verringerungen).

Tabelle 9: Simulationsergebnisse für den Referenzhaushalt mit bidirektionalen Laden (Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt mit unidirektionalen Laden)

Parameter (Systemkomponenten)	Referenz (ohne Bi-Laden)	Referenz (mit Bi-Laden)	%-Veränderung (zu unidirektionalen System)
Energiebedarf BEV	4.610 kWh/a	4.610 kWh/a	0,0%
Energiebedarf Haushalt ⁴	11.129 kWh/a	11.129 kWh/a	0,0%
Netzbezug	8.390 kWh/a	7.590 kWh/a	-9,5%
Produktion	10.400 kWh/a	10.400 kWh/a	0%
Einspeisung	3.193 kWh/a	3.323 kWh/a	+4,1%
Entladene Energie BEV	0 kWh/a	411 kWh/a	n. a.
Entladene Energie Heimspeicher	2.207 kWh/a	1.565 kWh/a	-29,1%
Autarkiegrad	47%	52%	+10,6%
Eigenverbrauchsanteil	69%	68%	-1,4%

⁴ Beinhaltet den Energiebedarf für Verbraucher im Haushalt (4.719 kWh/a), für die Wärmepumpe (6.401 kWh/a) und den Bedarf für PV-System (9kWh/a)

Wie die Ergebnisse in Tabelle 9 zeigen, steigert sich die Autarkie um mehr als 10% bei einem bidirektionalen System gegenüber einem unidirektionalen System für den Referenzhaushalt. Gleichzeitig sinkt auch der Netzbezug durch die Steigerung des Autarkiegrads. Dadurch steigt auch die Einspeisung geringfügig, wodurch der Eigenverbrauchsanteil (direkt nutzbarer PV-Strom) geringfügig sinkt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die entladene Energiemenge des Heimspeichers um rund 30% durch das bidirektionale Entladen des BEV reduziert wird.

Abbildung 19 zeigt weitere Ladecharakteristika am Beispiel eines vergleichbaren Wintertags für den Referenzhaushalt mit bidirektionalen Laden. Dort zu erkennen ist, dass das BEV nur auf dem Minimum Ladezustand (SoC) gehalten werden kann und es nicht ausreichend PV-Überschuss zu Verfügung steht. Nach der Rückkehr des BEV ab 18:30 Uhr (definierter Abwesenheitszeitraum) erfolgt eine Ladung mit maximaler Ladeleistung von 11 kW und Netzbezug auf den vorgegebenen Mindest-SoC, um die Reichweite des BEV zu gewährleisten. Ebenfalls zu erkennen ist die höhere Priorisierung des Heimspeichers gegenüber des BEV als Speicher, denn der solare Überschuss wird erst im Heimspeicher zwischengespeichert, bevor das BEV geladen wird.

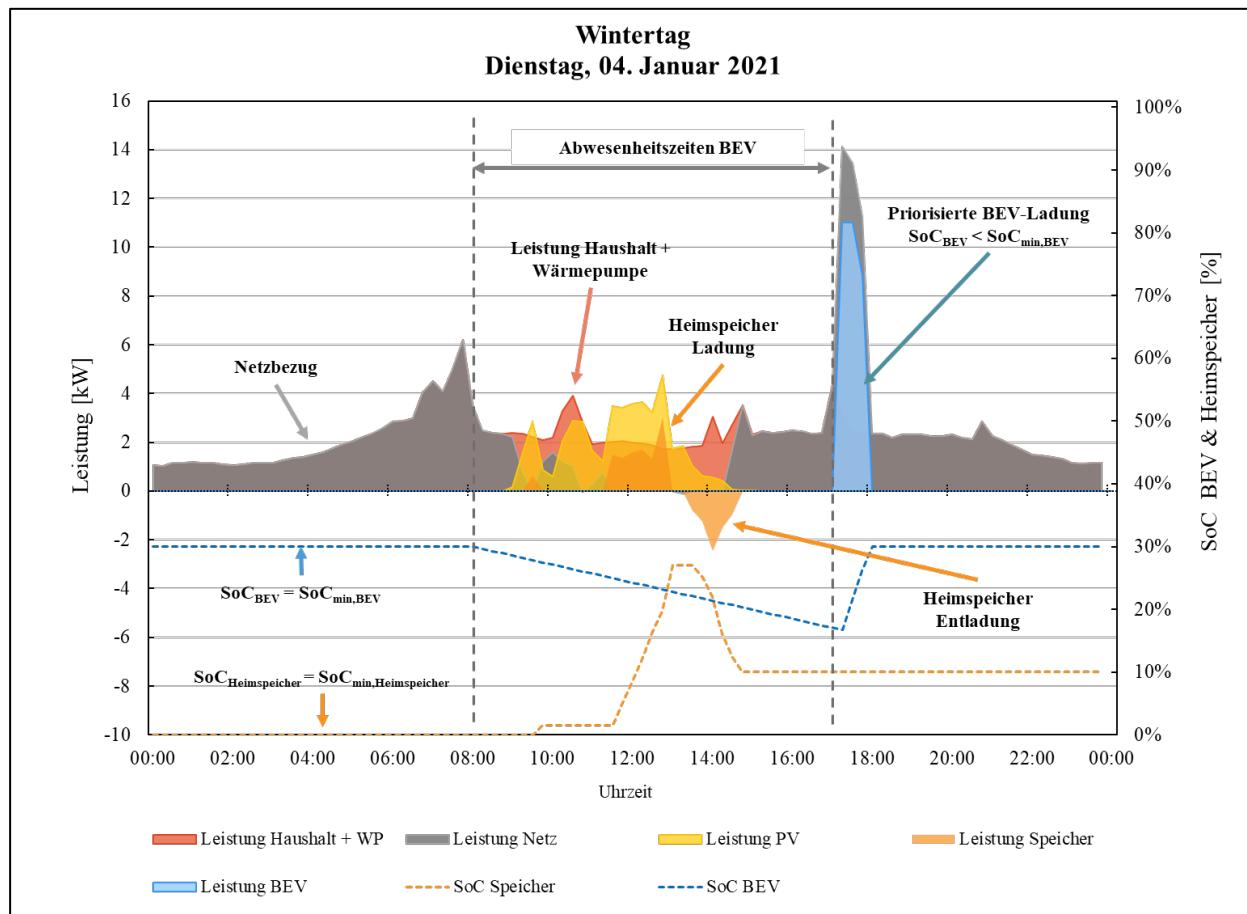


Abbildung 19: Simulationsergebnisse des Referenzzenarios mit der Leistungs- und SoC-Kurve am Dienstag, 04. Januar 2021

4.3.2 Szenarien für Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfolgt eine Betrachtung des Referenzhaushalts in verschiedenen Szenarien. Dabei werden die Eingangsgrößen (Parameter) variiert. Es soll untersucht werden, welche Parameter einen großen Einfluss auf das gesamte Systemverhalten haben und welche Parameter nur einen untergeordneten bzw. geringen Einfluss haben. Methodisch wird eine *lokale (klassische) Sensitivitätsanalyse* durchgeführt [97]. Hierbei werden drei Variationsstufen der Eingangsparameter (Minimum bis Maximum) variiert. Dies hat den Vorteil, dass der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen bei linearem Verhalten schnell hergestellt werden kann.

Als Ausgangslage dient der Referenzhaushalt bestehend aus einem Einfamilienhaus mit Photovoltaikanlage, Batteriespeicher, elektrischer Wärmepumpe und unidirektionalen BEV (s. Kapitel 4.2 und Tabelle 8). Die durchgeföhrten Pilotstudien (s. Kapitel 2.3.2) sowie die Simulation des Referenzhaushalts zwischen bidirektionalen und unidirektionalen Systemen dienen als Grundlage für die nachfolgende Sensitivitätsanalyse, in deren Rahmen folgende Parameter untersucht werden: Batteriekapazität des BEV, Lade- und Entladeleistung der Wallbox sowie die Nutzungszeiten, die das BEV an die Wallbox angeschlossen ist (s. Tabelle 10).

Tabelle 10: Ausarbeitung verschiedener Szenarien für ein Einfamilienhaus Referenzhaus

Szenario	Beschreibung	Parameterbereich
BEV-Batteriekapazität	Variation der BEV-Batteriekapazität	- Klein 52 kWh - Mittel 58 kWh - Groß 79 kWh
Lade- und Entladeleistung	Variation der Lade- und Entladeleistung (einphasig und dreiphasig) Wallbox	- Langsam 1,38 kW - Mittel 4,14 kW - Schnell 11 kW
Nutzungszeiten (BEV-Verfügbarkeit)	Definition verschiedener statischer Anwesenheitszeiten am Beispiel typischer Beschäftigungsverhältnisse	- Vollzeitbeschäftigt (9 Stunden unterwegs) - Teilzeitbeschäftigt (6 Stunden unterwegs) - Home-Office Beschäftigt (1 Stunde unterwegs)

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es ausschlagende Faktoren zu identifizieren, die Einfluss auf den Autarkiegrad in einem V2H-System mit bidirektionalen Laden haben. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse vorgestellt und näher beschrieben.

4.3.3 Sensitivitätsanalyse

Die vorliegende Untersuchung präsentiert eine detaillierte Darstellung und Analyse der zuvor präsentierte drei Szenarien (s. Tabelle 10) und die entsprechenden Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

BEV-Batteriekapazität

Die BEV-Batteriekapazität wird in drei Größen (klein, mittel und groß) untersucht. Dabei richtet sich die Wahl der Batteriekapazität an kommerziell verfügbaren BEV-Modellen (Klein- bis Großwagen), die repräsentative Batteriekapazitäten für einen Kleinwagen (Renault Zoe), eine Mittelklasselimousine (Volkswagen ID.3) und einen SUV (Tesla Model 3) darstellen. Der Energiebedarf des BEV variiert in der Simulation entsprechend der Batteriekapazität, da größere Batterien mehr überschüssige Energie zwischenspeichern können. Außerdem ist der minimale Ladezustand des Fahrzeugs absolut höher, obwohl der relative Wert konstant bleibt ($\text{SoC} = 30\%$). Dieser wird bei jeder Unterschreitung wieder aufgeladen (auch durch Netzstrom). In den anderen Simulationen wurde die mittlere Batteriekapazität als Referenz verwendet, so dass der Energiebedarf konstant bleibt. Unterschiedliche Fahrzeugverbräuche beeinflussen den Energiebedarf und führen zu dieser Variabilität, da Fahrzeuge mit größeren Batterien mehr Energie aufnehmen und abgeben können.

Die Ergebnisse in Tabelle 11 zeigen, dass die Erhöhung der Batteriekapazität keinen nennenswerten Einfluss auf den Autarkiegrad hat. Lediglich die aus dem BEV entladene Energiemenge steigt mit der BEV-Kapazität leicht an. Dieser Effekt spiegelt sich auch im Vergleich der Kennwerte zu den Veränderungen des Referenzhaushalts mit unidirektionalen Laden, siehe Kennwerte zu den prozentualen Veränderungen zum Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden in Klammern.

Tabelle 11: Sensitivitätsanalyse zur Veränderung der BEV-Batteriekapazität (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden)

Ausgangslage (Referenzhaushalt)		Veränderung der BEV-Batteriekapazität (Sensitivitätsanalyse)		
Parameter (Systemkomponenten)	Referenz (ohne Bi-Laden)	Klein 52 kWh	Mittel 58 kWh	Groß 79 kWh
Energiebedarf BEV	4.610 kWh/a (-)	4.376 kWh/a (-5,1%)	4.610 kWh/a (0,0%)	5.429 kWh/a (+17,8%)
Energiebedarf Haushalt ⁵	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)
Netzbezug	8.390 kWh/a (-)	7.596 kWh/a (-9,5%)	7.590 kWh/a (-9,5%)	7.589 kWh/a (-9,5%)
Produktion	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)
Einspeisung	3.193 kWh/a (-)	3.346 kWh/a (+4,8%)	3.323 kWh/a (+4,1%)	3.300 kWh/a (+3,4%)
Entladene Energie BEV	0 kWh/a (-)	393 kWh/a (-)	411 kWh/a (-)	452 kWh/a (-)
Entladene Energie Heimspeicher	2.207 kWh/a (-)	1.595 kWh/a (-27,7%)	1.565 kWh/a (-29,1%)	1.494 kWh/a (-32,3%)
Autarkiegrad	47% (-)	51% (+8,5%)	52% (+10,6%)	54% (+14,9%)
Eigenverbrauchsanteil	69% (-)	68% (-1,4%)	68% (-1,4%)	68% (-1,4%)

⁵ Beinhaltet den Energiebedarf für Verbraucher im Haushalt (4.719 kWh/a), für die Wärmepumpe (6.401 kWh/a) und den Bedarf für PV-System (9kWh/a)

Auffällig ist, dass der Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage trotz gleichbleibender Anlagengröße sinkt, wenn diese in ein bidirektionales System integriert wird. Dies liegt daran, dass der Gesamtenergieverbrauch durch die größere Batteriekapazität des Elektrofahrzeugs (BEV) steigt, da zusätzliche Energie für das BEV bereitgestellt und dort zwischengespeichert wird. Außerdem wird bei der Ladestrategie der Hausspeicher bevorzugt geladen, so dass dieser häufiger voll ist. Bei Abwesenheit des BEV kann dies dazu führen, dass überschüssige Solarenergie nicht mehr in den Hausspeicher geladen werden kann und stattdessen ins Netz eingespeist werden muss. Eine höhere Netzeinspeisung verringert den Eigenverbrauchsanteil, da weniger Solarstrom direkt im Haushalt genutzt wird (s. Formel (2)). Eine höhere Batteriekapazität des BEV erhöht zwar tendenziell den Eigenverbrauchsanteil, die Erhöhung ist jedoch minimal und meist nur in den Nachkommastellen erkennbar.

Nachfolgend werden wichtige Erkenntnisse zur Veränderung der BEV-Batteriekapazität stichpunktartig zusammengefasst:

- Autarkiegrad steigt nicht linear mit größerer BEV-Batteriekapazität, keine besonderen Auswirkungen auf die Autarkie bei größerer Batteriekapazität
- Die aus dem BEV entladene Energiemenge steigt mit der BEV-Kapazität leicht an
- Die Einspeisung nimmt bei steigender BEV-Kapazität leicht ab, da durch die höhere Kapazität der BEV mehr Energie zwischengespeichert werden kann
- Je größer die Kapazität des BEV, desto weniger wird der Heimspeicher entladen (bzw. entlastet)
- Der Eigenverbrauchsanteil bleibt nahezu gleich, da im Vergleich zu den anderen BEV-Batteriegrößen nicht mehr Energie direkt im Haushalt genutzt werden kann

Demnach lässt sich für den Referenzhaushalt schlussfolgern, dass die BEV-Batteriekapazität keinen besonderen Einfluss hat.

Lade- und Entladeleistung

In diesem Szenario werden die Lade- und Entladeleistung des BEV bzw. der Wallbox variiert. In den meisten Fällen wird ein Strom von sechs Ampere benötigt, um das BEV mit Energie aus der Photovoltaikanlage zu laden. Das bedeutet, dass das Überschussladen (solares Laden) erst ab einer Erzeugungsleistung von 1,38 kW (einphasig) funktioniert. Bei dreiphasiger Ladung, wird eine Leistung von ca. 4,14 kW ($3 \times 1,38 \text{ kW}$) zum Laden benötigt [98]. Zusammengefasst bedeutet dies, dass bei einer Ladeleistung unter 1,38 kW (einphasig) keine Ladung des BEV erfolgt. Sofern die solare Erzeugung der PV-Anlage unter dem Grenzwert liegt, kann diese Energie nicht in das BEV geladen werden und wird somit als Überschuss in das Netz geladen. Dies hat die Folge, dass an vielen Tagen im Jahr, zumindest bei kleineren Photovoltaikanlagen, nur begrenzte Zeitfenster zum Laden zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse drei Lade- und Entladeleistungen untersucht (s. Tabelle 12).

Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse Variation der Ladeleistung des BEV (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden)

Ausgangslage (Referenzhaushalt)		Veränderung der BEV Lade- und Endladaleistung (Sensitivitätsanalyse)		
Parameter (Systemkomponenten)	Referenz (ohne Bi-Laden)	Slow 1,38 kW (einphasig)	Medium 4,14 kW (dreiphasig)	Fast 11 kW (dreiphasig)
Energiebedarf BEV	4.610 kWh/a (-)	4.610 kWh/a (0,0%)	4.610 kWh/a (0,0%)	4.610 kWh/a (0,0%)
Energiebedarf Haushalt ⁶	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)
Netzbezug	8.390 kWh/a (-)	7.590 kWh/a (-9,5%)	7.699 kWh/a (-8,2%)	7.832 kWh/a (-6,7%)
Produktion	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)
Einspeisung	3.193 kWh/a (-)	3.323 kWh/a (+4,1%)	3.370 kWh/a (+5,5%)	3.563 kWh/a (+11,6%)
Entladene Energie BEV	0 kWh/a (-)	411 kWh/a (-)	256 kWh/a (-)	0 kWh/a (-)
Entladene Energie Heimspeicher	2.207 kWh/a (-)	1.565 kWh/a (-29,1%)	1.794 kWh/a (-18,7%)	2.192 kWh/a (-0,7%)
Autarkiegrad	47% (-)	52% (+10,6%)	51% (+8,5%)	50% (+6,4%)
Eigenverbrauchsanteil	69% (-)	68% (-1,4%)	68% (-1,4%)	66% (-4,3%)

Die Sensitivitätsanalyse zeigt den Vergleich des Referenzhaushalts mit unidirektionalen Laden und den drei unterschiedlichen Lade- und Endladaleistungen von langsamem bis schnellen Ladevorgängen (1,38 kW bis 11 kW) für das bidirektionale System (s. Tabelle 12). Dabei können im Vergleich von bidirektionalem und unidirektionalem Laden hinsichtlich eines Referenzhaushalts Unterschiede hinsichtlich der Netzbeanspruchung, der Energieübertragung sowie des Autarkiegrads des Haushalts beobachtet werden. Der Vorteil des bidirektionalen Ladens besteht in der Verringerung der Netzbelaufung (Netzbezug) gegenüber dem unidirektionalen Laden, wobei sich dieser Vorteil insbesondere bei der Anwendung niedriger Ladeleistungen zeigt.

Eine höhere Lade- oder Entladaleistung im bidirektionalen System führt zu einem gesteigerten Netzbezug, da bei hohen Ladeleistungen weniger der Energie ins Fahrzeug geladen oder daraus entnommen werden kann. Dies bedeutet, dass weniger Energie im Fahrzeug gespeichert oder für den Haushalt nutzbar gemacht werden kann.

Des Weiteren lässt sich eine direkte Korrelation zwischen der bidirektionalen Ladeleistung und der Menge, der vom BEV an den Haushalt abgegebenen Energie feststellen. Dies impliziert, dass

⁶ Beinhaltet den Energiebedarf für Verbraucher im Haushalt (4.719 kWh/a), für die Wärmepumpe (6.401 kWh/a) und den Bedarf für PV-System (9kWh/a)

bei einer Ladeleistung von 11 kW kein effektiver Energieaustausch vom BEV zum Haushalt stattfindet, da der Grenzwert der Entladeleistung im Zeitraum, in dem das BEV vor Ort ist, nicht erreicht wird. Ein hoher Autarkiegrad wird insbesondere bei niedrigen Ladeleistungen erreicht, da hier weniger Energie in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird und somit mehr Energie für das Laden des BEVs von der PV-Anlage direkt genutzt werden kann.

Nachfolgend werden wichtige Erkenntnisse zur Veränderung der Lade- und Endladeleistung stichpunktartig zusammengefasst:

- Bi-Laden reduziert den Netzbezug im Vergleich zum unidirektionalen Laden
- Je geringer die Ladeleistung, desto mehr Energie kann direkt im BEV zwischengespeichert werden, desto geringer ist der Netzbezug und desto höher ist der Autarkiegrad
- Je höher die Ladeleistung, desto größer die Netzeinspeisung, da weniger Energie in das BEV geladen werden kann
- Bei 11 kW bidirektonaler Lade-/Endladeleistung wird keine Energie vom BEV an den Haushalt abgegeben, da die Entladeschwelle im Haushalt nicht erreicht wird
- Größter Autarkiegrad bei niedrigster Ladeleistung

In der Zusammenfassung lässt sich festhalten, dass niedrigere Ladeleistungen beim bidirektionalen Laden vorteilhaft sind. Dies liegt daran, dass sie eine effizientere Nutzung des BEVs als Energiespeicher ermöglichen und dadurch zu einer geringeren Netzbelastrung (Netzbezug) führen. Zudem wird eine höhere Menge an Energie für den Haushalt verfügbar und ein höherer Autarkiegrad des Haushalts erzielt.

Nutzungszeiten (BEV-Verfügbarkeit)

Durch die Simulation des Referenzhaushalts ist bereits die Problematik der zeitlichen Verfügbarkeit des BEV identifiziert worden (s. Abschnitt 4.3.1). In der Sensitivitätsanalyse werden daher drei Szenarios mit unterschiedlichen Nutzungszeiten bzw. Zeiten, in denen das BEV nicht verfügbar ist, am Beispiel von Beschäftigungsverhältnissen simuliert.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 13 zeigen wird deutlich, dass sich eine längere Verfügbarkeit des BEV positiv auf die vom BEV an den Haushalt abgegebene Energiemenge auswirkt, womit auch der Eigenverbrauchsanteil mit steigender BEV-Verfügbarkeit steigt.

Interessant ist auch, dass der Haushaltsspeicher und der BEV-Speicher ein konkurrierendes Verhalten zeigen. Mit zunehmender Verfügbarkeit des BEV steigt die Eigenverbrauchsquote auf 75%, d. h. es kann mehr Solarstrom direkt verbraucht werden, aber der Autarkiegrad stagniert.

Tabelle 13: Sensitivitätsanalyse BEV-Verfügbarkeit anhand der Nutzungszeiten (in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzhaushalt ohne bidirektionales Laden)

Ausgangslage (Referenzhaushalt)		Veränderung der BEV-Nutzungszeiten (Sensitivitätsanalyse)		
Parameter (Systemkomponenten)	Referenz (ohne Bi-Laden)	Full-time Beschäftige	Part-time Beschäftige	Home-Office Beschäftige
		Abwesenheitszeiten 08:00 – 17:00 h (Wochentags) 16:00 – 18:30 h (Wochenende)	Abwesenheitszeiten 08:00 – 14:00 h (Wochentags) 16:00 – 18:30 h (Wochenende)	Abwesenheitszeiten 18:00 – 19:00 h (Wochentags) 16:00 – 18:30 h (Wochenende)
Energiebedarf BEV	4.610 kWh/a (-)	4.610 kWh/a (0,0%)	4.610 kWh/a (0,0%)	4.610 kWh/a (0,0%)
Energiebedarf Haushalt ⁷	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)	11.129 kWh/a (-)
Netzbezug	8.390 kWh/a (-)	7.590 kWh/a (-9,5%)	7.352 kWh/a (-12,4%)	7.475 kWh/a (-10,9%)
Produktion	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)	10.400 kWh/a (-)
Einspeisung	3.193 kWh/a (-)	3.323 kWh/a (+4,1%)	2.915 kWh/a (-8,7%)	2.609 kWh/a (-18,3%)
Entladene Energie BEV	0 kWh/a (-)	411 kWh/a (-)	688 kWh/a (-)	999 kWh/a (-)
Entladene Energie Heimspeicher	2.207 kWh/a (-)	1.565 kWh/a (-29,1%)	1.247 kWh/a (-43,5%)	876 kWh/a (-60,3%)
Autarkiegrad	47% (-)	52% (+10,6%)	53% (+12,8%)	53% (+12,8%)
Eigenverbrauchsanteil	69% (-)	68% (-1,4%)	72% (+4,3%)	75% (+8,7%)

Nachfolgend werden wichtige Erkenntnisse zur Veränderung der BEV-Nutzungszeiten stichpunktartig zusammengefasst:

- Längere Verfügbarkeit von BEV führt zu erhöhter Energieabgabe durch das BEV an den Haushalt
- Haushaltsspeicher und BEV-Speicher zeigen ein konkurrierendes Verhalten, durch die Priorisierung des Heimspeichers wird dieser mit steigender Anwesenheit des BEV entlastet
- Mit zunehmender Präsenz des BEV wird die entladene Energiemenge des BEV mehr als verdoppelt und der Hausspeicher entlastet
- Höhere BEV-Verfügbarkeit führt zu einem Eigenverbrauchsanteil von 75% und ermöglicht mehr direkten Solarstromverbrauch
- Autarkiegrad stagniert trotz erhöhtem Eigenverbrauch

⁷ Beinhaltet den Energiebedarf für Verbraucher im Haushalt (4.719 kWh/a), für die Wärmepumpe (6.401 kWh/a) und den Bedarf für PV-System (9kWh/a)

4.3.4 Ergebnisdiskussion

Mit dem Simulationstool kann ein V2H-System für einen modernen Einfamilienhaushalt simuliert werden, wodurch energetische Auswertungen und Analysen möglich sind. Durch die Einstellung von unterschiedlichen Eingangsgrößen und Parametern, wie z. B. BEV-Batteriekapazität, BEV-Ladeleistung, BEV-Tagesverbrauch und BEV-Abwesenheitszeiten ist es möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Analysen durchzuführen.

Validierung und Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Pilotstudien konnte das Simulationstool einige der Behauptungen bezüglich der Einsparpotenziale durch den Einsatz des bidirektionalen Ladens gegenüber einem unidirektionalen System bestätigen (vgl. Kapitel 2.3.2 zum Stand der Forschung). Die empirische Pilotstudie *Bi-clEVer* [41] hat beispielsweise einen Autarkiegrad von 59% für eine Kombination aus PV-Anlage, Heimspeicher und bidirektionalem Laden eines BEV nachgewiesen. In einem vergleichbaren Szenario konnte das Simulationstool für einen Referenzhaushalt einen Autarkiegrad von 52% ermitteln. Obwohl beide Szenarien auf Einfamilienhäuser bezogen waren, war ein Vergleich hinsichtlich weiterer spezifischer Merkmale, wie beispielsweise dem Einsatz weiterer Lasten wie Wärmepumpen oder der Anzahl der Personen im Haushalt, nicht möglich. Auch wurden in der Studie keine Angaben darüber gemacht, welche Distanzen täglich mit dem BEV zurückgelegt wurden. Dennoch liegen die ermittelten Autarkiegrade in einer ähnlichen Größenordnung, was die generellen Ergebnisse des Simulationstools stützt.

Bei der Gegenüberstellung der Auslegung des entwickelten Simulationstool mit dem Leitfaden *Bidirektionales Laden* [20] des *Fraunhofer-Instituts* wird ersichtlich, dass beide Ansätze ähnliche Parameter verwenden. In beiden Simulationen ist eine PV-Anlage mit einer Leistung von 10 kWp Grundlage der Simulation. Zudem werden ähnliche Szenarien mit unterschiedlichen Anwesenheitszeiten, die durch verschiedene Haushaltstypen bedingt sind (darunter z. B. Home-Office-Nutzer, Büroangestellte und Senioren) untersucht. Dort zeigen sich im Vergleich zum entwickelten Simulationstool eine ähnliche Herangehensweise (s. Sensitivitätsanalyse Kapitel 4.3.3 in Tabelle 13 mit Nutzungszeiten des BEV). In der Gegenüberstellung der Ergebnisse zur Abwesenheitszeit der BEV beider Ansätze zeigt sich, dass diese in ihrer Tendenz übereinstimmen. Die Fraunhofer-Studie konnte eine durchschnittliche Steigerung der Autarkie um ca. 10% nachweisen⁸, während die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Simulation einen absoluten Anstieg um etwa 6%⁹ im Vergleich zu einem unidirektionalen System aufzeigt. Dies veranschaulicht, dass die Präsenz des BEV zur Steigerung des Autarkiegrads beiträgt.

Des Weiteren lässt sich aus der Studie des *Fraunhofer-Instituts* [20] ableiten, dass sich der Autarkiegrad bei unidirektionalem Laden im Vergleich zu bidirektionalem Laden um etwa 5%¹⁰ unterscheidet. Der genannte Wert konnte ebenfalls in der eigenen Simulation (s. Tabelle 9 Vergleich unidirektionalen zu bidirektionalen Laden) beobachtet werden. Es sei jedoch darauf verwiesen,

⁸ Siehe Studie [20], Abb. 8: Vergleich Eigenversorgungsquote für uni- und bidirektionale Fahrzeuge: abgelesene Werte für Haushaltstyp Home-Office bidirektional (37%) vs. Office unidirektional (27,5%)

⁹ Siehe Tabelle 14, Vergleich Referenzhaushalt ohne Bi-Laden (47%) mit Szenario Home-Office-Beschäftigten (53%)

¹⁰ Siehe Studie [20], Abb. 9: Vergleich Eigenversorgungsquote für verschiedene Szenarien: abgelesene Werte für bidirektional (32,5%) und unidirektional (28%)

dass die mittleren Autarkiegrade in der Fraunhofer-Studie bei etwa 36% liegen, während sie in dieser Arbeit bei 52% liegen. Die Differenz wird darauf zurückzuführen sein, dass die Studie des *Fraunhofer-Instituts* keinen Heimspeicher im System berücksichtigt hat. Im Gegensatz dazu wurde in dem entwickelten Simulationstool ein Referenzhaushalt mit Heimspeicher simuliert, welcher zu einem höheren Autarkiegrad führt. Insgesamt zeigt der Vergleich der Studie des *Fraunhofer-Instituts* und des entwickelten Simulationstools, dass die Ergebnisse ähnliche Tendenzen und Beobachtungen aufweisen.

Lediglich die Erkenntnis aus dem Projekt *Bi-cLEVer* [41], dass die Ladeleistung nur einen geringen Einfluss hat, konnte zurückgewiesen werden. Je weniger das bidirektionale BEV laden kann, desto mehr Energie kann zwischengespeichert und an den Haushalt abgegeben werden. Die Schwellenwerte (sechs Ampere Ladegrenze) sollten daher die Hemmnisse für das solare Laden berücksichtigen. Andernfalls wird das BEV nicht geladen. Das bedeutet, dass zumindest für kleinere PV-Anlagen an vielen Tagen im Jahr nur begrenzte Zeiträume zum Laden zur Verfügung stehen. In diesem Fall ist die beste Ladestrategie eine netzergänzende Ladung, bei der auch geringe Photovoltaikleistung genutzt und mit Netzstrom ergänzt wird. Durch Verwendung einer Wallbox mit automatischer Phasenumschaltung können PV-Leistungen zwischen ein- und dreiphasigen Laden umschalten [98]. Dadurch können die Zeiträume zum Laden bei wechselhaftem Wetter oder zu Schwachlastzeiten deutlich verlängert werden. Im Gegensatz zur Ladeleistung konnte die Aussage, dass die Kapazität der Fahrzeugbatterie einen geringen Einfluss auf den Autarkiegrad hat (s. Kapitel 2.3.2 Stand der Forschung *Bi-cLEVer* [41]), durch die Sensitivitätsanalyse (s. Tabelle 11) bestätigt werden. Bei einer Erhöhung der Batteriekapazität von 52 kWh auf 79 kWh steigt der Autarkiegrad lediglich von 51% auf 54%.

Geringe Beanspruchung von Batterien durch V2H in Simulation

Die Batterie des BEV wird als Verschleißteil betrachtet, dessen Lebensdauer durch Alterungsprozesse begrenzt wird. Die Lebensdauer einer Batterie wird üblicherweise anhand zweier Schlüsselkriterien bemessen: der kalendarischen Lebensdauer und der Zyklenfestigkeit. Für Lithium-Ionen-Batterien werden typischerweise 2.000 bis 4.000 Vollzyklen angegeben [91]. Das Ende der Lebensdauer einer Batterie wird definiert als der Punkt, an dem ihre Kapazität auf 70 bis 80% der ursprünglichen Nennkapazität gefallen ist. Dieser Grenzwert kann jedoch je nach Hersteller variieren. In der Simulation konnte kein technischer Verschleiß durch Batteriealterung festgestellt werden, da die Energiemengen und die Anzahl der Vollladezyklen als zu gering eingestuft wurden¹¹. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass der durchschnittliche Haushaltsstrombedarf ca. 15 kWh pro Tag beträgt und nicht vollständig durch das BEV gedeckt werden muss. Die Vollzyklen ergeben sich folglich erst nach einigen Tagen, wodurch sich die Belastung für die Batterie reduziert, was sich positiv auf deren Lebensdauer auswirkt [99]. Darüber hinaus kann die Belastung der Batterie durch bidirektionales Laden im gewöhnlichen Haushaltsgebrauch¹² als vernachlässigbar gering eingestuft werden, da für das BEV wesentlich höhere Belastungen, beispielsweise

¹¹ Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse sind zwischen 50 und 77 Vollladezyklen pro Jahr angefallen (s. Formel (4) in Kapitel 4.2.3)

¹² Siehe Kapitel 4.2.5, in dem die Definition des Referenzhaushalts sowie die entsprechenden Lastprofile, die in der Regel durchschnittlich unter 5 kW liegen, dargelegt werden.

durch den regulären Fahrbetrieb, durch Beschleunigungsvorgänge oder Schnellladevorgänge¹³, eine größere Rolle spielen.

V2H-Simulation: Potenziale, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungsrichtungen

Zusammenfassend wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse verschiedene Parameter in Szenarien variiert und mit dem vorgegebenen Referenzhaushalt mit unidirektionalen Laden verglichen. Zu den untersuchten Parametern gehören die Batteriekapazität des BEV, die Ladeleistung des bidirektionalen Ladens und die zeitliche Verfügbarkeit des Fahrzeugs. Weitere zu untersuchende Parameter könnten der Einfluss der Photovoltaikleistung und die Ausrichtung sein. In der Simulation wurde die Leistung der Photovoltaikanlage konstant angesetzt, da die Leistungsangabe mit der durchschnittlichen Dachfläche für ein Einfamilienhaus in Deutschland erzielbar ist. Es wird angenommen, dass die Betrachtung von leistungsstärkeren Anlagen sowie die Ausrichtung der Anlage in verschiedene Richtungen, wie beispielsweise Ost-West, können die Autarkie des Hauses positiv beeinflussen kann. Der modulare Aufbau des Tools ermöglicht die Hinterlegung und Simulation weiterer Erzeugerprofile.

Da in dem jetzigen Tool nur gemittelte viertelstündliche Datensätze zur Verfügung stehen, wäre eine Analyse mittels hochauflösten Datensätzen für z. B. Erzeugung oder Verbrauch interessant, um Lastspitzen und deren Auswirkungen auf das Ladeverhalten von BEV stärker zu untersuchen.

Ausschlaggebend für die Simulation sind die zugrundeliegenden Last- und Nutzungsprofile. Diese haben durch die Wahl bestimmter Parameter (z. B. BEV-Tagesverbrauch) teilweise statische Auswirkungen auf die Simulation. Daher sollte in der weiteren Entwicklung versucht werden, dynamische Fahrprofile für BEV zu entwickeln oder reale Profile zu verwenden. Anhand der Simulationsergebnisse wird deutlich, dass die Verfügbarkeit des BEV den größten Einfluss auf den Autarkiegrad hat. In Zukunft könnten variable Stromtarife (Time-of-Use-Tarife) auch für Haushalte ohne PV-Anlage interessant sein, um ihr BEV intelligent zu laden oder für neue Geschäftsmodelle im Sinne von V2G zur Vermarktung ihrer Batteriekapazität zu nutzen.

Das Weiterentwicklungspotenzial des Tools besteht darin, es zukünftig mit dynamischeren Nutzerprofilen für das Fahrverhalten auszustatten. Ziel ist es, die Simulationen besser an die spezifischen Bedingungen der Haushalte anzupassen und realistischer zu gestalten. Darüber hinaus können weitere Ladestrategien und die Priorisierung der Systeme integriert untersucht werden, wobei der Heimspeicher derzeit eine höhere Priorität als das BEV hat, um den Autarkiegrad zu erhöhen. Zukünftige Untersuchungen könnten sich mit der Frage beschäftigen, welche Priorisierungen für unterschiedliche Haushaltstypen je nach Fahrverhalten sinnvoller sind. Hervorzuheben ist, dass das Tool bereits modular aufgebaut ist und alle Profile (Erzeugung und Last) einzeln ausgetauscht werden können. Somit ist es möglich, verschiedene Szenarien und Haushalte für bidirektionales Laden im Vehicle-to-Home-Kontext zu simulieren.

¹³ Schnellladestationen haben in der Regel eine Ladeleistung von 50 kW bis zu 300 kW und Normale öffentliche Ladestationen eine Ladeleistung von bis zu 22 kW [100].

4.4 Zwischenfazit: V2H-Simulation

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass bidirektionales Laden das Potenzial hat, die Eigenversorgung mit erneuerbarer Energie (in diesem Fall Photovoltaik) im Haushalt zu erhöhen, die Stromkosten zu senken und indirekt die Belastung des Stromnetzes zu reduzieren. Dabei ist zu beachten, dass dieses Potenzial stark vom individuellen Nutzerverhalten (Fahrverhalten), der möglichen Ladetechnik und der Präsenz des Fahrzeugs vor Ort abhängt.

Verschiedene Szenarien des bidirektionalen Ladens konnten simuliert und z. B. mit einem unidirektionalen System verglichen werden. So konnte beispielsweise der Autarkiegrad von bidirektionalen Systemen im Vergleich zu unidirektionalen Systemen um mehr als 10% am Beispiel des Referenzhaushalts gesteigert werden (s. Kapitel 4.3.1). Die Ergebnisse ähnlicher Studien aus der Literatur konnten ebenfalls bestätigt werden.

Darüber hinaus konnten verschiedene Parameter angepasst und mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden. So wurden die Parameter Fahrzeugbatteriekapazität, Ladeleistung und die tägliche Verfügbarkeit von BEV am Beispiel von typischen Arbeitszeiten variiert (s. Kapitel 4.3.3).

Dabei erweisen sich eine geringe Ladeleistung und die Verfügbarkeit des Elektrofahrzeugs als entscheidende Faktoren für den Autarkiegrad. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Ladepriorisierung der Hausspeicher entlastet werden kann. Allerdings wurde auch festgestellt, dass der Autarkiegrad nicht linear mit der BEV-Batteriekapazität steigt. Dies unterstreicht die Bedeutung einer optimierten Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Die gewonnenen Erkenntnisse weisen daher auf die Notwendigkeit hin, das Nutzerverhalten noch realistischer abzubilden, z. B. durch dynamische oder real gemessene Anwesenheitszeiten der Elektrofahrzeuge (Fahrverhalten), um die tatsächliche Energieautarkie genauer zu bestimmen. Darüber hinaus sind Studien denkbar, die verschiedene Ladestrategien für unterschiedliche Nutzertypen untersuchen. Durch das Simulationstool konnten für einen Referenzhaushalt Einsparungen (gesteigerter Autarkiegrad) durch bidirektionales Laden im V2H-Kontext nachgewiesen werden. Dabei kann das entwickelte Tool generisch genutzt werden durch Hinterlegung variabler Last- und Erzeugungsprofile. Weiterhin kann das Simulationstool als Entscheidungshilfe für die Auswahl und Dimensionierung von Systemkomponenten im HEMS dienen. Die Adaption einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter erlaubt die Durchführung weiterer Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen für verschiedene Haushalte. Darüber hinaus liefert das Simulationstool Anregungen für die weitere Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität und Home Energy Management Systeme, wie z. B. durch die Nutzung von geringen Ladeleistungen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass V2H-Anwendungen durch bidirektionales Laden einen Mehrwert für Einfamilienhäuser mit PV-Anlage bieten und den Autarkiegrad erhöhen. Darüber hinaus steigt das Potenzial mit der Anzahl der BEV, so dass bidirektionale BEV ein großes Potenzial für Endverbraucher und das zukünftige Stromnetz bieten.

5 Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz mit Smart Home Technologien

Dieses Kapitel widmet sich der Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz mit Hilfe von Smart Home Technologien und monatlichen Heizenergieverbrauchsdaten in einem empirischen Anwendungstest. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird die Frage erörtert, welche Daten aus den Smart Home Thermostaten gewonnen werden können und wie diese in einem Analyse- und Auswertungskonzept genutzt werden können.

Datengrundlage dafür liefert ein **Pretest** mit Haushalten aus der Heizperiode (2022/2023) und dem Einsatz von Smart Home Thermostaten. Weitere Daten liefert ein ausgedehnter **Anwendungstest** in der Heizperiode (2023/2024). Im letzteren wird ein großes Mehrfamilienhaus (MFH) mit 28 Wohneinheiten mit smarten Thermostaten sowie weiterer Sensorik ausgestattet (s. Kapitel 5.1.4). Ziel ist es die gewonnenen Daten im Rahmen von einem Analyse- und Auswertungskonzepts zu verarbeiten und das Heizverhalten mit den entsprechenden Verbrauchsdaten zu bewerten. Übergeordnet sollen daraus Energie-Feedbacks an die Mieter im Forschungsprojekt (s. Kapitel 5.1.2) gegeben werden. Der Beitrag des Untersuchungsdesigns besteht darin, empirische Ergebnisse und Aussagen zur Beantwortung der folgenden Forschungsfrage zu liefern: „*Inwiefern können Smart Home Thermostate zur Datenerhebung und Analyse beitragen, um die Heizenergieeffizienz in Wohngebäuden zu verbessern?*“

5.1 Untersuchungsdesign für einen empirischen Anwendungstest

In Zeiten des Klimawandels und steigender Energiepreise ist es wichtig, den eigenen Energieverbrauch zu kennen und zu wissen, wie Energie effizient und nachhaltig genutzt werden kann. Auch die aktuelle Gesetzgebung zur Reduzierung des Energieverbrauchs adressiert dies, wie in der *European Energy Directive* (EED) dargelegt [101]. Diese Richtlinie verpflichtet unter anderem die Dienstleister der Immobilienwirtschaft, den Mietern ab dem 01. Januar 2022 eine monatliche Rückmeldung über den Energieverbrauch („*unterjährige Verbrauchsinformation*“ kurz UVI) zu geben. Bisher erhalten Mieter nur eine Jahresabrechnung, die keine Rückschlüsse auf das Heizverhalten zulässt [4].

In diesem Zusammenhang wird die Sensibilisierung der Nutzenden für den Energieverbrauch immer wichtiger. Besonders der Wärmebereich im Gebäudesektor spielt bei der Energiewende eine große Rolle. Schließlich werden die meisten Emissionen in Deutschland durch Heizung und Warmwasser verursacht. Der Sektor private Haushalte hat einen Anteil von 26,2% am Gesamtenergieverbrauch in Deutschland, davon entfallen allein 70% auf die Raumwärme [102]. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass mehr als zwei Drittel der deutschen Häuser älter als 40 Jahre sind und somit nicht mehr dem energetischen Stand der Technik entsprechen [103].

Mit der zunehmenden Digitalisierung gibt es auch immer mehr technische Möglichkeiten, den Energieverbrauch der Nutzenden zu messen und zu steuern. Das Home Energy Management System (HEMS) spielt in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle, da es die intelligente Steuerung der Heizung und anderer energiebezogener Systeme im Haus ermöglicht. Ein Beispiel dafür sind Smart Home Thermostate (s. Kapitel 2.4). Diese Lösung bietet eine kostengünstige und einfache

Möglichkeit, die Energieeffizienz der Heizung zu optimieren. So können beispielsweise Smart Home Thermostate eingesetzt werden, um die Raumtemperatur intelligent zu steuern und Heizenergie einzusparen. Laut Literaturstudien [68, 75, 76] variiert das Energieeinsparpotenzial von smarten Thermostaten zwischen bis zu 16% und über 30% (s. Kapitel 2.4.3). Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Thermostate auch entsprechend den Vorgaben zur Energieeinsparung eingesetzt werden. So können die Heizkörper beispielsweise in den Stunden, in denen das Haus oder die Wohnung typischerweise leer steht, wie während der Arbeits- oder Schulzeit, automatisch durch Zeitpläne oder Ortungsdienst (Geofencing) niedrigere Raumtemperaturen eingestellt werden, siehe auch Funktionen von smarten Thermostaten in Kapitel 2.4.1.

Die Aufschlüsselung von Energiedaten ist die Grundlage für Rückmeldungen zum Energieverbrauch in Haushalten, was eine nachhaltige Energienutzung impliziert. Frühere Studien zeigen den Nutzen von Feedback-Informationssystemen, wobei zwischen direktem, indirektem und disaggregiertem Feedback unterschieden wird [58]. Aus diesem Grund soll ein Untersuchungsdesign für verschiedene Feedbackarten untersucht werden. Ziel ist es, ein Analyse- und Auswertungskonzept für Heiz- und Verbrauchsverhalten zu entwickeln sowie die Erkenntnisse in unterschiedliche Nutzergruppen zu clustern.

Um einen Einblick in den Aufbau und die Vorgehensweise des Forschungsprojektes zu geben, werden in diesem Abschnitt das Untersuchungsdesign und die angewandte Methodik vorgestellt. Darüber hinaus wird das zugrundeliegende Forschungsprojekt beleuchtet, welches sich aus dem entwickelten Untersuchungsdesign und Forschungslücken der Literaturstudie (s. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3) abgeleitet hat. Ebenfalls werden Ergebnisse aus dem Pretest (Heizperiode 2022/2023) mit smarten Thermostaten (s. Kapitel 5.1.3) sowie die Rahmenbedingungen für den Anwendungstest in der Heizperiode (2023/2024) vorgestellt (s. Kapitel 5.1.4).

5.1.1 Methodik und Untersuchungsdesign

Im Folgenden wird das entwickelte Untersuchungsdesign sowie der Ansatz des Vorhabens erörtert. Das Untersuchungsdesign bildet das grundlegende Gerüst und bestimmt, welche Daten erhoben und verarbeitet werden. Das Analyse- und Auswertungskonzept wird in Kapitel 5.2 beschrieben. Darüber hinaus werden die Hintergründe und der methodische Ansatz zur Erreichung der Forschungsziele dargestellt.

Das Untersuchungsdesign umfasst alle Aspekte, die in einem Anwendungstest untersucht werden sollen. Die Grundlage dieser Untersuchung bildet eine experimentelle Studie, in der verschiedene Anwendungen oder Modifikationen an verschiedenen Gruppen getestet werden [104]. Es wird untersucht, wie sich die Energieeinsparung durch Veränderungen (z. B. die Integration neuer Technologien) durch Feedbackmechanismen beeinflussen lässt. Bei einem experimentellen Untersuchungsdesign wird aktiv in das Verhalten eingegriffen. Ein experimentelles Studiendesign definiert eine Systematik, die Veränderungen kontrollieren soll. Dabei ist es wichtig, dass Ursache und Wirkung der Veränderungen klar erkennbar sind. Das bedeutet, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung festgestellt werden kann und durch ein Ereignis A ein weiteres Ereignis B ausgelöst wird [105].

Bei dem Untersuchungsdesign für das Projekt „*Smart User Interfaces*“ handelt es sich um eine experimentelle Studie, die in einer nicht kontrollierten Umgebung (Mietwohnungen) stattfindet. Dabei müssen jene Variablen, die in der späteren Feldstudie unmittelbar für die Einsparung von Energie verantwortlich sind, festgelegt werden. Dabei gibt es die veränderliche Variable 1 und die sich daraus verändernde Variable 2. Die veränderliche Variable 1 in der Feldstudie ist die Technologie, die in Verbindung mit Feedback genutzt wird, um den Energieverbrauch zu senken. Welche Auswirkungen die veränderliche Variable 1 hat, soll in der Feldstudie herausgearbeitet werden. Die beiden Variablen sind in der folgenden Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Variablen für den Anwendungstest

Variable 1	Variable 2
Technologie + Feedback	Energieverbrauch

Für die Durchführung des Anwendungstests wird der Mehrstichprobenversuchsplan¹⁴ mit Blockbildung ausgewählt [105]. Die folgende Abbildung 20 präsentiert das experimentelle Untersuchungsdesign für das Projekt *Smart User Interfaces* in Form eines Blockdiagramms.

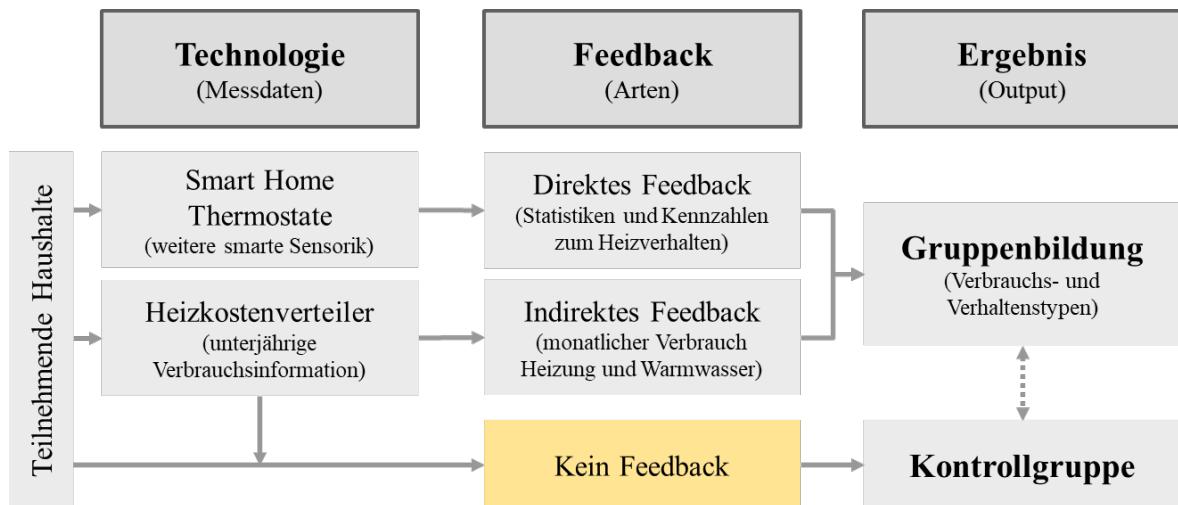


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns nach Technologien, Feedbackarten und den Outputs

Eine der eingesetzten Technologien ist die unterjährige Verbrauchsinformation (UVI), die über Heizkostenverteiler ermittelt wird (s. Kapitel 2.4.1). Diese monatlichen Verbrauchsdaten werden als indirektes Feedback zur Verfügung gestellt. Daraus werden die Verbrauchsdaten der jeweiligen Wohnungen kategorisiert (s. Kapitel 5.2.4). Die Einteilung in Verbrauchstypen erfolgt nach dem normierten flächenbezogenen Verbrauchswert nach VDI 2077 [106]. Dies ermöglicht den Vergleich des Energieverbrauchs von Gebäuden oder Wohnungen unabhängig von ihrer Größe bzw. der beheizten Wohnfläche. Ein niedriger normierter flächenbezogener Verbrauchswert weist auf eine höhere Energieeffizienz hin, da die Wohnung weniger Energie pro Quadratmeter benötigt. Dieser Wert ist daher eine wichtige Größe bei der Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden.

¹⁴ Ein Mehrstichprobenversuchsplan untersucht die Effekte von zwei oder mehr unabhängigen Variablen auf eine oder mehrere abhängige Variablen. Er ermöglicht die Analyse von direkten Effekten und Interaktionen zwischen den Variablen, um ein detailliertes Verständnis komplexer Zusammenhänge zu erlangen [105].

oder Wohnungen und kann bei der Identifizierung von Effizienzpotenzialen und der Umsetzung von energetischen Optimierungsmaßnahmen hilfreich sein.

Weitere Technologien wie Smart Home Thermostate und CO₂-Sensoren sammeln Daten zum Heizverhalten, wie eingestellte oder gemessene Raumtemperaturen sowie CO₂-Konzentrationen. Anhand des letzten Parameters kann festgestellt werden, ob sich eine Person in einem Raum aufhält. Daraus sollen Statistiken zum Heizverhalten erstellt werden, die den teilnehmenden Haushalten als Feedback zur Verfügung gestellt werden. Aus den beiden Feedbackarten sollen eine positive Änderung des Energieverbrauchs (Variable 2) erzielt werden. Das Ergebnis in Abbildung 20 ist die Auswertung der Datensätze der teilnehmenden Haushalte und die Einteilung in spezifische Kategorien zum Verbrauchs- und Heizverhalten (s. Kapitel 5.2.7).

Weiterhin beinhaltet das Untersuchungsdesign eine **Kontrollgruppe**, welche die Einsparungen validieren soll und kein aktives Feedback erhält (s. Abbildung 20 unterer Strang). Des Weiteren liegen für die Kontrollgruppe die monatlichen Verbrauchswerte der unterjährigen Verbrauchsinformation vor.

Es gilt anzumerken, dass sich diese Arbeit nicht mit der Entwicklung von Nutzer-Feedback befasst. Auch die Entwicklung des Mediums und des Konzepts zur Ansprache sowie der Gestaltung der Feedbacks für die Teilnehmenden ist nicht Teil dieser Arbeit. Im Zentrum der Arbeit steht die Auswertung und Analyse der Messdaten, die durch die Datensammler (UVI, Smart Home Thermostate und weitere Sensorik) zusammengetragen werden. In der vorliegenden Untersuchung sollen erstmals Daten zum Heizverhalten mit realen Verbräuchen analysiert werden. Ziel ist es, Rückschlüsse zu ziehen und die Höhe der möglichen Datenauflösung zu bestimmen. Darüber hinaus sollen das Heiz- und Verbrauchsverhalten kategorisiert und entsprechende Indikatoren für das jeweilige Verhalten erfasst werden (s. Kapitel 5.2). Der entwickelte Ansatz zum Untersuchungsdesign wird in einem empirischen Anwendungstest (s. Kapitel 5.1.4) überprüft werden, um Aussagen über mögliche Einsparpotenziale im Heizenergieverbrauch zu prüfen.

5.1.2 Forschungsprojekt: Smart User Interfaces

Im Folgenden wird das Gesamtkonzept des Forschungsprojekts erläutert. Das Projekt hat sich aus dem zuvor entwickelten Untersuchungsdesign (s. Kapitel 5.1.1) sowie getätigten Vorstudien (s. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3) abgeleitet. Im Rahmen der Literaturstudie sind Studien zu Einsparpotenzialen durch Verbrauchsvisualisierung und durch smarte Thermostate analysiert worden. Dabei ist eine beachtliche Diskrepanz zu möglichen Heizenergieeinsparungen erfasst worden (s. Kapitel 2.4.3). Des Weiteren konnte eine Forschungslücke identifiziert werden, da bislang keine Untersuchungen durchgeführt wurden, die reale Sensordaten aus Smart Home Thermostaten (Heizverhalten) mit den entsprechenden Verbrauchsdaten gemeinsam analysieren und auf dieser Grundlage Feedback generieren, um Einsparungen zu erzielen.

An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt *Smart User Interfaces*¹⁵ an. Damit kann erstmalig das Heizverhalten mit realem Verbrauch verbunden bzw. gepaart werden und auf mögliche Einspar-effekte untersucht werden. Denkbar sind Effizienzgewinne durch die Verwendung von Automati-onen sowie der Suffizienz gewinne durch Einsparungen von angepasstem Verbrauch. Es folgt eine Kurzzusammenfassung des Forschungsprojekts einschließlich der Projektziele.

Smart User Interfaces – Usability, Feedback und Einsparpotenziale

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts ist es, den Einfluss von Benutzeroberflächen (Interfaces) energiewenderelevanter Technologien (im Folgenden begrenzt auf Smart Energy Tech-nologien) auf Energieeffizienzpotenziale im Haushaltsbereich zu untersuchen. Dafür sollen ver-schiedene Arten von Mensch-Technik-Interaktionen (Kommunikations- und Feedbackfunktionen) exploriert und getestet werden.

Der Mehrwert des Projekts besteht darin, technische und gestalterische Impulse für die hersteller- und plattformunabhängige Entwicklung von Benutzeroberflächen im Bereich Smart Energy zu liefern. Dabei werden Aspekte wie Benutzerfreundlichkeit, Datentransparenz und Energieeffizi-enz berücksichtigt. Ein weiterer Mehrwert des Projektes besteht in der Erkundung und dem Testen innovativer Feedbacksysteme. Dies geschieht beispielhaft im Anwendungsfeld Wärme, da hier ein hohes Einsparpotenzial besteht und vorhandene Smart Energy Lösungen wie beispielsweise smarte Thermostate ein geringes Investitionsbudget aufweisen.

Das Projekt liefert damit einen Beitrag zur Verbesserung der Kommunikation zwischen Gebäude-technik und Nutzenden, wie es u. a. in den Aktivitäten der Europäischen Union zum Smart Readiness Indicator von Gebäuden gefordert wird [107]. Dabei kommt den vernetzten Universal-End-geräten wie Smartwatches, Smartphones, Tablets als User Interfaces eine große Bedeutung zu. Das Projekt konzentriert sich auf die Chancen der Digitalisierung und der Informationsverar-beitung. Der Forschungs- und Entwicklungsansatz des Projektes basiert auf der Living Lab-Methode [108, 109]. In Co-Design-Prozessen (Nutzende/ Unternehmen/ Wissenschaft/ Design) werden mögliche Feedback-Funktionen analysiert, entwickelt und optimiert. Das Projekt ist inter- und transdisziplinär angelegt und wird durch das *Wuppertal Institut* koordiniert. Projektpartner sind die *Technische Hochschule Köln* und die *EBZ Business School*.

Die *Technische Hochschule Köln* ist für die Ausgestaltung und Durchführung der Anwendungs-tests in dem Projekt verantwortlich. Dabei sollen in der Heizperiode Wohneinheiten der *Aachener Siedlungs- und Wohnungsgesellschaft mbH* (assozierter Projektpartner), mit smarten Thermosta-ten ausgestattet und Verbrauchsdaten analysiert werden. In der nachfolgenden Abbildung 21 ist ein Zeitplan der geplanten Anwendungstests zu sehen. In der Heizperiode (2022/2023) konnten bereits erste Daten im Rahmen eines Pretests erfasst werden. In elf unterschiedlichen Mietwohnungen wurden marktübliche, smarte Thermostate unterschiedlicher Hersteller eingesetzt und ge-testet. In den nächsten Abschnitt 5.1.3 wird näher auf die ersten Messdaten und Ergebnisse aus dem Pretest eingegangen. In einem zweiten Anwendungstest während der Heizperiode 2023/2024

¹⁵ Forschungsprojekt [Smart User Interfaces](#): Intelligente Bedienungsoberflächen für Nutzer im energieeffizienten Haushalt

wurden Wohnungen eines Gebäudes mit einer vollständigen Smart Home-Ausstattung ausgestattet (s. weitere Details in Kapitel 5.1.4).



Abbildung 21: Terminierung der Anwendungstests im Forschungsprojekt *Smart User Interfaces*

5.1.3 Pretest (Heizperiode 2022/2023)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse Pretests mit Smart Home Thermostaten in der Heizperiode (2022/2023) präsentiert. Im Rahmen von Vorarbeiten sind Mietwohnungen mit unterschiedlichen Smart Home Thermostaten ausgestattet worden. Diese Vorarbeiten (Pretest) haben einen großen Mehrwert für den Anwendungstest in der Heizperiode (2023/2024). Dabei wurden im Pretest sowohl technische, methodische als auch inhaltliche und konzeptionelle Erkenntnisse gewonnen. Diese sind im Untersuchungsdesign aufgenommen.

Im Pretest wurden 14 Mietwohnungen mit Smart Home Thermostaten ausgestattet. Es wurden nur Thermostate für klassische Heizkörper verbaut, da diese in Deutschland immer noch einen relevanten Anteil insbesondere in älteren Gebäuden ausmachen und für die Anwendung von Thermostaten geeignet sind [110]. Die Auswahlkriterien der smarten Thermostate umfassten eine offene Datenschnittstelle zum Auslesen der Sensordaten sowie die Fernsteuerbarkeit und Einstellbarkeit von einfachen Automationen, wie beispielsweise Zeitpläne oder Ortungsdienste. Dabei konnten drei smarte Thermostate unterschiedlicher Hersteller getestet werden.

Über eine REST-API¹⁶ ist es möglich die erfassten Daten von zwei der drei beiden Hersteller aus den Thermostaten zu sammeln und auszuwerten. Neben dem Smart Home Thermostat ist auch noch ein Temperaturdatenlogger¹⁷ mit 10-minütigen Messintervall zu Validierung der Messdaten installiert worden.

In der nachfolgenden Abbildung 22 sind alle Schritte von Aufbau (Installation der smarten Thermostate) über die Datenaufzeichnung (Monitoring) bis hin zur Auswertung des ersten Feedbacks zum Heizverhalten veranschaulicht.

¹⁶ Im Kontext Smart Home kann eine REST-API (Representational State Transfer Application Programming Interface) verwendet werden, um die Interaktion zwischen der Smart Home-Plattform und anderen Anwendungen oder Diensten zu ermöglichen und Daten auszutauschen.

¹⁷ Mini-Datenlogger Temperatur: [Testo 174 T](#)

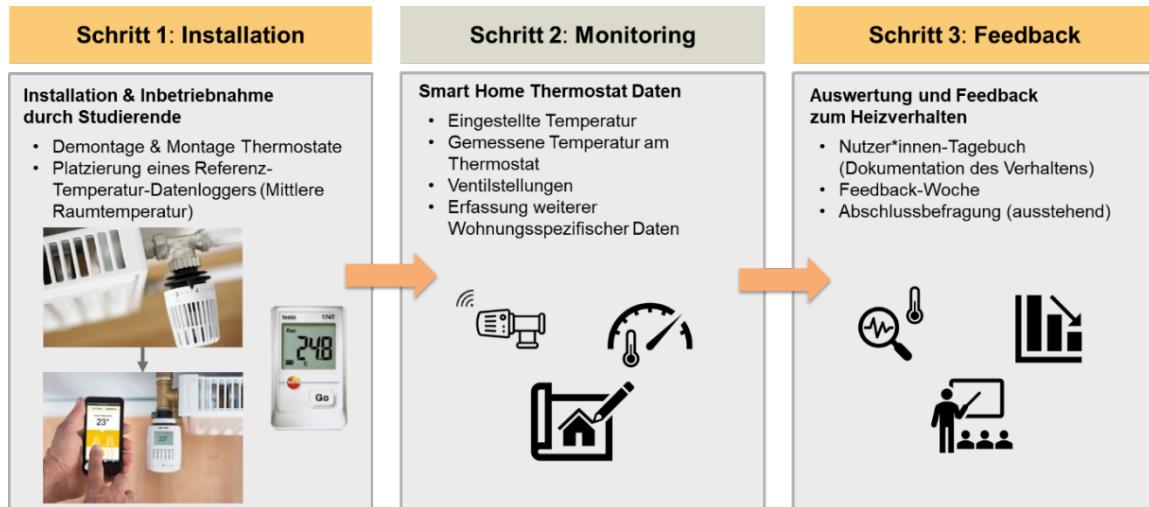


Abbildung 22: Messaufbau Pretest - smarte Thermostate in Studierenden Haushalten

Die erfassten Datensätze sind die gemessene Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$), die eingestellte Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$) sowie die prozentuale Ventilstellung des Heizkörperventils (%). Weiterhin konnte teilweise die Nutzung von automatisierten Zeitplänen erfasst werden. Die Anzahl der auswertbaren Datensätze verringerte sich, da drei Teilnehmende Haushalte den Feldtest frühzeitig verlassen haben. Die Gründe für das Ausscheiden sind unter anderem auf technische Probleme zurückzuführen. Zum Beispiel passten die Ventilanschlüsse am Heizkörper nicht oder es fehlte die Konnektivität zum Internet.

Zur Validierung der Messwerte der Smart Home Thermostate wurden Temperaturdatenlogger aufgestellt. Die Teilnehmer der Testhaushalte wurden instruiert, die Temperaturdatenlogger gemäß spezifischen Vorgaben zu positionieren, um eine präzise Datenerfassung zu gewährleisten. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Datenlogger wie folgt positioniert werden sollten:

- Nicht direkter Sonneneinstrahlung oder Zugluft aussetzen
- Nicht über Wärmequellen wie Heizkörpern platzieren
- Anbringung in Höhe von ca. 1,5 bis 1,6 Metern

Die genannten Anweisungen zielen darauf ab, die mittlere Raumtemperatur möglichst exakt zu messen, um verlässliche Daten für die Auswertung zu erhalten. Die Temperaturdatenlogger messen dabei mit einer Genauigkeit von $0,1^{\circ}\text{C}$ [111] und die Genauigkeit des Temperatursensors des eingesetzten smarten Thermostats beträgt nach Herstellerangaben $0,01^{\circ}\text{C}$ [112]. Die angegebene Messgenauigkeit des smarten Thermostats erscheint jedoch ungewöhnlich hoch, da eine solche Präzision bei kommerziell erhältlichen Thermostaten selten ist und daher hinterfragt werden sollte.

Die Validierung der Temperaturdatenlogger hat ergeben, dass beim Abgleich der Messwerte im Mittel etwa 1°C Differenz erfasst wurden. Diese Unterschiede lassen sich auf die unterschiedlichen Messgenauigkeiten der Geräte sowie der verschiedenen Standorte im Raum zurückführen. Obgleich keine Garantie für eine sachgemäße Positionierung der Datenlogger in den Testhaushalten abgegeben werden kann, zeigen die gemittelten Abweichungen zwischen Raummitte und Heizkörper, dass es zu einem Versatz der Temperaturen kommen kann.

Im Rahmen des Pretests konnten seit November 2022 bis April 2023 Daten aus den Wohnungen erfasst werden. Dabei war jede Wohnung mit einem Smart Home Thermostat ausgestattet. Es wurde bei jeder Zustandsänderung (z. B. Temperaturänderung von einem Grad Celsius) ein Datenpunkt gesendet. In der Folge lassen sich je Messwert über 77.500 Zeitreihenwerte pro Wohneinheit ableiten (s. Tabelle 15).

Tabelle 15: Aufgezeichnete Mess-Zeitreihen durch Sensorik im Smart Home Thermostat (Pretest)

Messwerte Smart Home Thermostat	Einheit	Anzahl Datenpunkte (Stand bis April 2023)
Gemessene Temperatur am Heizkörper (Ist-Temperatur)	°C	77.540
Eingestellte Temperatur am Heizkörper (Soll- /Ziel-Temperatur)	°C	77.543
Ventilposition (Öffnungsgrad des Heizkörperventils für den Durchfluss von Heizungswasser)	0-100%	77.548

Die gesammelten Daten werden in einer Datenbank gespeichert und mittels *Grafana*¹⁸ visualisiert. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind exemplarisch visualisierte Messdaten von Teilnehmenden Haushalten aus dem Pretest zu sehen. Dort zu erkennen sind beispielsweise das Heizverhalten sowie das Regelverhalten des Thermostats bei Temperaturänderungen z. B. durch Lüften. Dort sind auch die Grundeinstellungen der Temperatur durch eingestellte Solltemperaturen ersichtlich. Über die Höhe der Temperatur werden in der späteren Auswertung (s. Kapitel 5.2) auch Wechselwirkungen mit dem jeweiligen Verbrauch untersucht.

¹⁸ [Grafana](#): Open-Source-Anwendung zur grafischen Darstellung von u. a. Daten in Zeitreihen



Abbildung 23: Beispielhafte Grafana Visualisierung (User ID 9) – 15.01.2023

An den Verläufen in Abbildung 23 ist ein eingestellter Zeitplan zu erkennen. Dort ist eine Temperaturabsenkung von ca. 10 bis 17 Uhr eingestellt. Ebenfalls gut zu erkennen ist das Regelverhalten des Thermostats: durch Abfallen der gemessenen Temperatur öffnet das Ventil den Zufluss an Heizungswasser im Heizkörper. Auffällig ist, dass das Ventil immer von 0 bis 100% öffnet, hierfür könnte als Grund ein mechanischer Defekt am Heizkörper vorliegen. Beispielsweise könnte das Ventil verkalkt sein und damit die Beweglichkeit beeinträchtigen. Dies kann dazu führen, dass das Ventil nicht mehr ordnungsgemäß öffnet bzw. nur sprunghaft öffnet.

Ein normales Regelverhalten der Ventilstellung ist beispielsweise in Abbildung 24 zu erkennen. Ebenfalls konnte durch die Visualisierung auch Fehlverhalten beim Lüftungsvorgängen erkannt werden. In Abbildung 24 (s. roter Umriss) ist das Regelverhalten des Thermostats bei Temperatursturz durch ein geöffnetes Fenster zu erkennen (s. grüne Kurve).

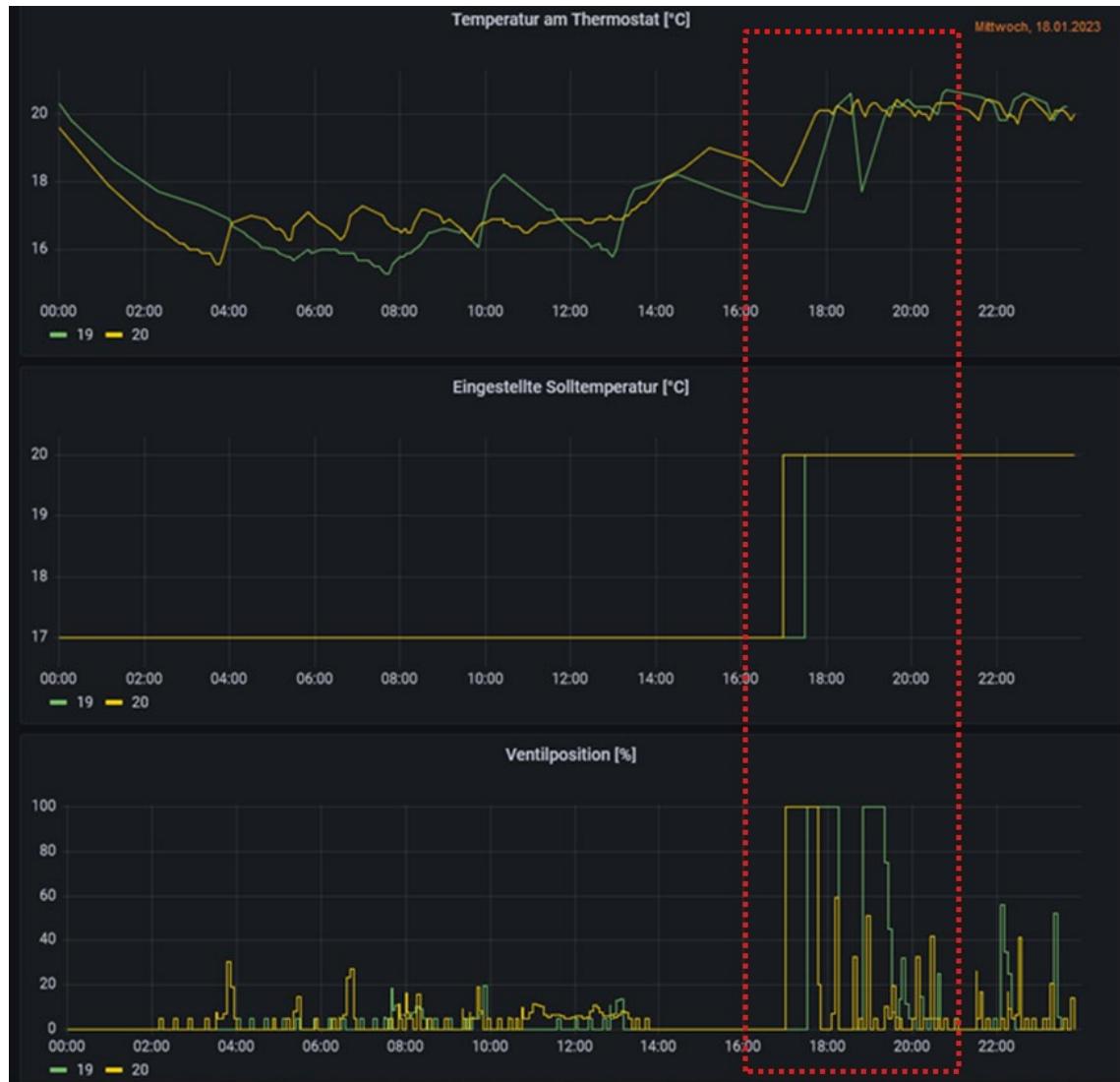


Abbildung 24: Beispielhafte Grafana Visualisierung User ID 3 (Lüftungserkennung) – 18.01.2023

Nach einer ersten Auswertung der Datensätze im Pretest konnte das Heizverhalten in verschiedene Verhaltenstypen kategorisiert werden (s. Tabelle 16). Diese Verhaltenstypen dienten als Grundlage für den Anwendungstest (s. Kapitel 5.2.7) mit einer größeren Anzahl von voll ausgestatteten Mietwohnungen. Dabei konnten diese Prototypen an Heiztypen weiter validiert werden.

Tabelle 16: Erste Einordnung und Prototypen unterschiedliche Heiztypen im Pretest

Heiztypen	Beschreibung
Hoch-Heizer	Wohneinheit wird deutlich über Norm-Temp. geheizt
Durch-Heizer	Wohneinheit wird durchgehend auf einheitlicher Temp. geheizt
Nacht-Heizer	Nachtabsenkung bzw. Abwesenheitssenkung wird <u>nicht</u> genutzt
Manuell-Heizer	Viele manuelle Interaktionen am Thermostat
Nicht-Heizer	Ventil durchgehend geschlossen und Soll-Temp. < Ist-Temp.
Zeitplan-Heizer	Automatisches Heizen durch Zeitpläne

Die Auswertung der Umfragen unter den Teilnehmenden hat weitere Einflussfaktoren identifiziert, die das Heizverhalten beeinflussen. Neben der Interaktion durch den User sind dies:

- Gebäudebeschaffenheit (Baustoffe und Isolierung: Wände und Fenster)
- Interne und externe Gewinne (Abwärme, Sonneneinstrahlung oder der Lage im Gebäude)
- Verwendetes Heizungssystem und Einstellungen (Vorlauftemperatur; Verwendung einer kesselseitigen Nachtabsenkung)

Hinzu kommen weitere Faktoren durch das Nutzerverhalten, wie beispielsweise das individuelle Behaglichkeitsempfinden, die eingestellte Grundtemperatur sowie das Lüftungsverhalten (Stoß- oder Kipplüftung) und ob beim Lüften das Ventil abgedreht wird oder nicht (s. Abbildung 24 Lüftungserkennung).

Im Pretest stammten die ausgestatteten Gebäude aus dem Raum Köln und Wuppertal. Die verschiedenen Gebäude boten jedoch keine einheitlichen Vergleichsmöglichkeiten, was vor allem auf die vielfältigen Unterschiede in der Bauphysik der Gebäude und der Heizungstechnik zurückzuführen ist. Zudem standen im Pretest keine spezifischen Daten zum Heizenergieverbrauch der einzelnen Wohnungen zur Verfügung.

Dennoch wurden wertvolle Erkenntnisse über das Heizverhalten der Bewohner gewonnen. Insbesondere durch die Sensordaten, die von den Smart Home Thermostaten gesammelt wurden. Trotz des proprietären Charakters der smarten Thermostate war es möglich, über eine REST-API Messdaten der smarten Thermostate zu exportieren. Im weiteren Verlauf konnten die gewonnenen Erkenntnisse für die Umsetzung eines aussagekräftigeren Anwendungstests in der Heizperiode 2023/2024 mit einer zentralen Liegenschaft sowie einer optimierten Versuchsumgebung genutzt werden. Darüber hinaus standen dort auch Verbrauchsdaten aus der monatlichen unterjährigen

Verbrauchsinformation zur Verfügung. Weiterhin wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Wohnungen ein einheitliches Gebäude ausgewählt (s. Kapitel 5.1.4 Auswahl MFH für Anwendungstest).

5.1.4 Datengrundlage für den Anwendungstest (Heizperiode 2023/2024)

Im Folgenden werden die spezifischen Rahmenbedingungen und Datengrundlagen zum Gebäude und der eingesetzten Technik für den großen Anwendungstest erörtert. Die Tabelle 17 präsentiert die allgemeinen und energetischen Kenndaten, beispielsweise die Heizenergieverbräuche des Gebäudes.

Tabelle 17: Allgemeine und energetische Kenndaten zum Mehrfamilienhaus im Anwendungstest

Allgemeine Informationen	
Gebäudetyp:	Mehrfamilienhochhaus
Standort:	Nordrhein-Westfalen (NRW)
Baujahr:	1966 (mit saniertem Gebäudehülle)
Anzahl Wohneinheiten:	28 (davon 50% mit Smart Home Thermostaten ausgestattet)
Ø Fläche pro Wohneinheit:	69,32 m ²
Gebäudenutzfläche: (nach GEG, A _N = 0,32 x V _e)	2.222,4 m ²
Gebäudewohnfläche:	1.941,4 m ²
Heizung:	Erdgas Zentralheizung + Warmwasser (Baujahr 2006)
Endenergieverbrauch:	93,55 kWh/m ² a (2021) 80,36 kWh/m ² a (2022)

Bei der Betrachtung der historischen Energieverbräuche fällt auf, dass der reale Verbrauch leicht über dem berechneten Bedarf des Energieausweises von 77,0 kWh/m²a liegt. Ein weiterer Vergleichswert liefert die TABULA Gebäudetypologie [113]. Dort kann der Gebäudetyp für große Mehrfamilienhäuser GMH_E (1958-1968) für ein konventionell modernisiertes Gebäude herangezogen werden. Dieser entspricht einem berechneten Bedarf von 108,4 kWh/m²a. Damit liegt das für den Anwendungstest ausgewählte Gebäude in den Effizienzklassen C bis D gemäß Gebäudeenergiegesetz [3]. Dies entspricht dem prozentual größten Anteil an Mehrfamilienhäusern (MFH) [70]. Das ausgewählte Gebäude repräsentiert somit einen Großteil der MFH im Gebäudebestand in Deutschland. Die relevanten Angaben zu den Wandaufbauten sowie der Bauphysik, einschließlich der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert, sind dem Anhang zu entnehmen (s. Tabelle A 1). Alle oben genannten Angaben entstammten dem Eigentümer, der Aachener Siedlungs- und Wohnungsgesellschaft mbh. Im nachfolgenden ist die Außenansicht des Gebäudes in Abbildung 25 zu sehen.



Abbildung 25: Gebäude für Anwendungstest (Standort: NRW)

Bei dem Gebäudetyp des Mehrfamilienhauses handelt es sich um ein Hochhaus. Abbildung 26 zeigt schematisch den Aufbau einer Etage des Gebäudes, dabei sind alle sieben Geschosse gleich aufgebaut und verteilt. Die äußeren Wohnungen haben eine Wohnfläche von 75,52 m² (Drei-Zimmer-Wohnung) und die inneren Wohnungen eine Wohnfläche von 63,12 m² (Zwei-Zimmer-Wohnung). Der homogene Aufbau der Wohnungen je Etage ist zusätzlich in Abbildung 27 dargestellt. Dadurch ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit in der Ausstattung der Wohnungen und Einflüsse wie z. B. die Außentemperatur oder technische Störungen verhalten sich jeweils für äußere und innere Wohnungen gleich. Dies ermöglicht einen guten Vergleich der Wohnungen im Gegensatz zum Pretest (s. Kapitel 5.1.3).

Vier Wohnungen pro Etage			
Links	Links Mitte	Rechts Mitte	Rechts
3-Zimmer-Wohnung (75,52 m ²) • 2 x Schlafzimmer • 1 x Wohnzimmer • 1 x Küche • 1 x Bad	2-Zimmer-Wohnung (63,12 m ²) • 1 x Schlafzimmer • 1 x Wohnzimmer • 1 x Küche • 1 x Bad	2-Zimmer-Wohnung (63,12 m ²) • 1 x Schlafzimmer • 1 x Wohnzimmer • 1 x Küche • 1 x Bad	3-Zimmer-Wohnung (75,52 m ²) • 2 x Schlafzimmer • 1 x Wohnzimmer • 1 x Küche • 1 x Bad

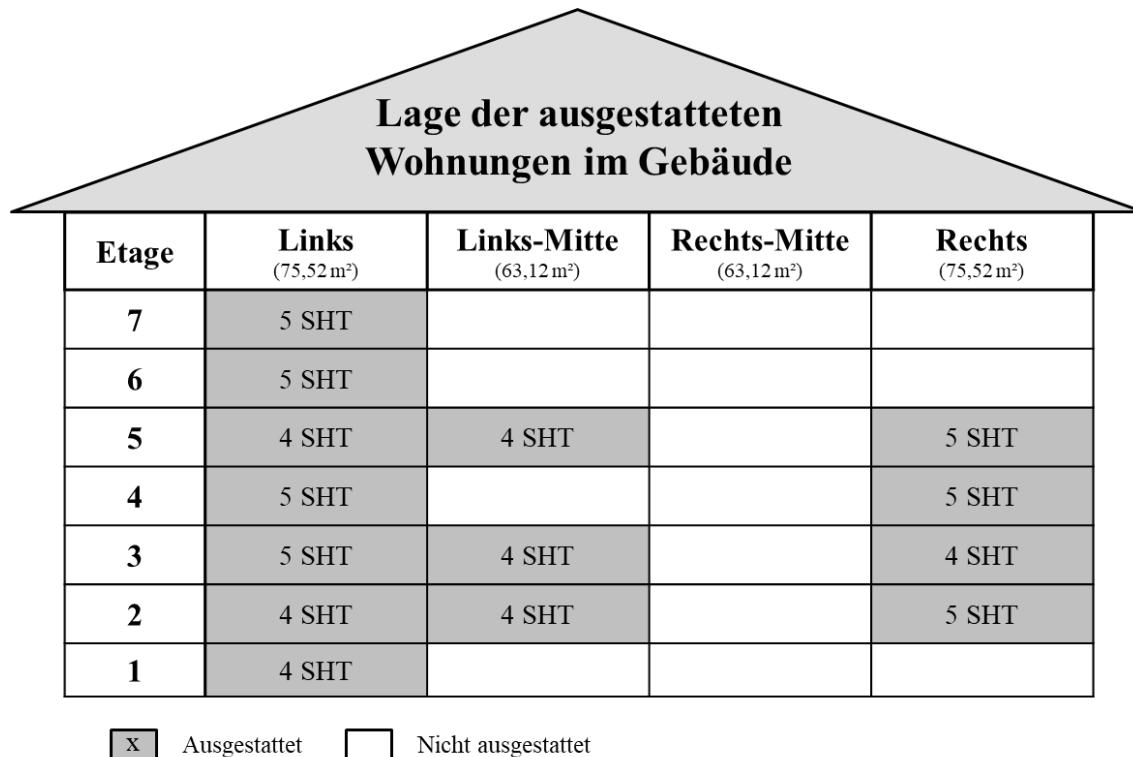
Abbildung 26: Aufbau der Wohnungen pro Etage – gleicher Aufbau auf allen sieben Etagen (n=28 Wohnungen)

Im Gebäude konnten 14 von 28 Wohnungen mit smarten Thermostaten¹⁹ und teilweise mit weiteren Multisensoren²⁰ ausgestattet werden. Mögliche Gründe für die Nichtteilnahme an der Studie sind Sprachbarrieren sowie mangelndes Interesse an der Thematik. Die Haushalte, die sich zur Teilnahme an der Studie bereit erklärt haben, konnten nahezu vollständig mit Smart Home Thermostaten an Heizkörpern ausgestattet werden. Nur vereinzelt konnten Thermostate aufgrund baulicher Einschränkungen (z. B. durch Möbel) nicht montiert werden. Insgesamt wurden 63 smarte Thermostate eingebaut, die alle 5-Minuten Informationen über den Status der Heizkörper senden (s. Tabelle 18). Nachfolgend ist der schematische Aufbau des Gebäudes dargestellt. Die Lage der

¹⁹ In der Liegenschaft wurden den Mietern Smart Home Thermostate inkl. App der Firma *tado° GmbH* zur Verfügung gestellt

²⁰ LoRaWAN: CO₂-, Temperatur-, Feuchte-, Licht- und Bewegungssensor (PIR)

ausgestatteten Wohnungen mit Angabe der Etage sowie die Anzahl der Smart Home Thermostate (SHT) sind darin aufgezeigt (s. Abbildung 27).



Lage der ausgestatteten Wohnungen im Gebäude

Etage	Links (75,52 m²)	Links-Mitte (63,12 m²)	Rechts-Mitte (63,12 m²)	Rechts (75,52 m²)
7	5 SHT			
6	5 SHT			
5	4 SHT	4 SHT		5 SHT
4	5 SHT			5 SHT
3	5 SHT	4 SHT		4 SHT
2	4 SHT	4 SHT		5 SHT
1	4 SHT			

X Ausgestattet
 □ Nicht ausgestattet

Abbildung 27: Schematische Darstellung des ausgestatteten Mehrfamilienhauses mit Angabe der Lage, Fläche und Anzahl der Smart Home Thermostate (SHT) pro Wohnung

Die Installation und das Onboarding²¹ wurde gemeinsam vom Forschungsteam und dem Hersteller der smarten Thermostate durchgeführt. In den ausgestatteten Haushalten konnten auch sozio-demographische Haushaltspараметer, u. a. Anzahl der Personen, Alter, Bildungsstand, erhoben werden. Je nach Wohnungsgröße erhält jede Wohnung vier bis fünf Smart Home Thermostaten, die vom assoziierten Projektpartner montiert und installiert worden sind (s. Abbildung 27). Zusätzlich zu den Standard-Messdaten (s. Tabelle 15), die ein Smart Home Thermostat erfasst, hat das Thermostat noch einen eingebauten Luftfeuchtigkeitssensor zur Erfassung der relativen Luftfeuchte.

Zur Steuerung sowie zur Datenübertragung der Messdaten (s. Tabelle 15 Erhobene Messdaten) werden die Thermostate mit einer Internet-Bridge (Gateway) verbunden. Dieses Gateway wird an die privaten Router der Mieter angeschlossen. Sollte ein Anschluss an den Router nicht möglich oder dieser nicht vorhanden sein, wird vom Projektteam ein mobiler Router installiert. Die weitere Steuerung der Thermostate sowie die Möglichkeit der Automatisierung, wie z. B. das Erstellen von Zeitplänen, wird den Mietern über die Smartphone App ermöglicht. Wichtig zu betonen ist, dass die Thermostate auch manuell durch Drehen (Einstellen der Soll-Temperatur) bedient werden können. In Abbildung 28 sind die oben beschriebenen Geräte wie smartes Thermostat, App und Internet-Bridge beispielhaft dargestellt. Die Installation der Geräte erfolgte im Oktober 2023 und

²¹ Onboarding beschreibt den Prozess, bei dem den Teilnehmenden eine Einführung in die manuelle Bedienung des Thermostats sowie eine Erläuterung der Funktionalitäten in der Smartphone-App gegeben wird.

wurde ebenfalls wissenschaftlich begleitet. Der Hersteller *tado GmbH* führt die technische Installation durch.



Abbildung 28: Tado° smartes Heizkörperthermostat inkl. Internet-Bridge und App (tado GmbH)

Weiterhin werden in den Wohnungen auf freiwilliger Basis CO₂-Multi-Sensoren verbaut (s. Abbildung 29). Die Sensoren können Temperatur, Luftfeuchte, Licht, Bewegung und die CO₂-Konzentration im Raum messen. Diese senden ihre Messwerte per Funk an ein zentrales LoRaWAN-Gateway im Gebäude.



Abbildung 29: ERS2 CO₂-Sensor (ELSYS)

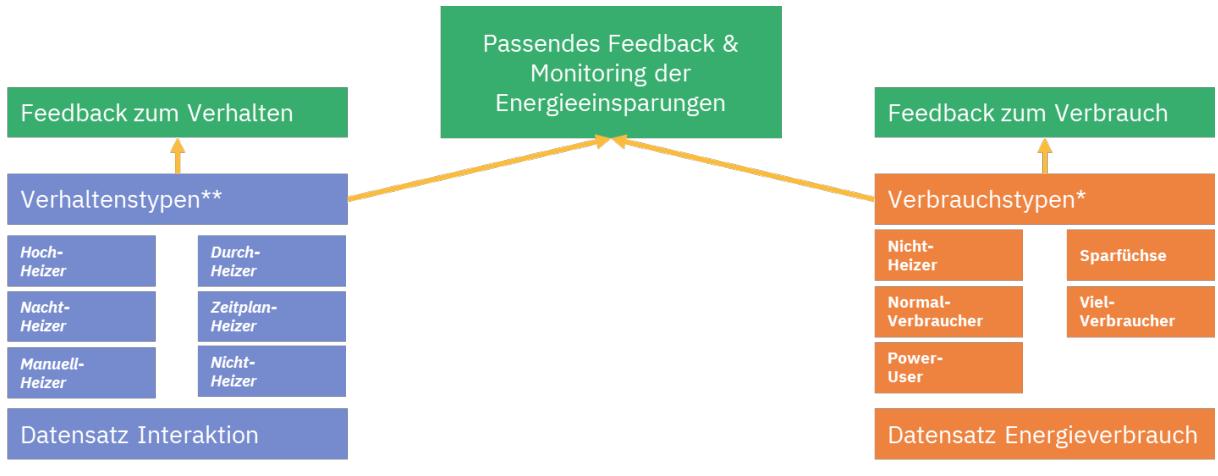
5.2 Analyse- und Auswertungskonzept

Im Rahmen der Untersuchung der erhobenen Messdaten aus dem Anwendungstest werden verschiedene Ansätze und Methoden zur Datenauswertung untersucht. Das Ziel der Untersuchung bestand in der Gewinnung von Daten, die sowohl eine Steigerung der Effizienz als auch eine nachhaltigere Energienutzung ermöglichen. Die Zusammenführung von Daten aus Smart Home Technologien und Verbrauchsdaten eröffnet neue Perspektiven, um das Heizverhalten zu verstehen und zukunftsweisende Lösungen zu entwickeln. Bisher war es nicht möglich, Auswertungen des Heizverhaltens und des Heizverbrauchs durchzuführen, da lediglich eine jährliche Abrechnung für eine ganze Wohnung erfolgte, die nur begrenzt Rückschlüsse zulässt. In der nachfolgenden Tabelle 18 sind Mess-Zeitreihen gelistet, die im Rahmen des Anwendungstests erfasst werden. Beispielsweise erzeugt **ein Thermostat ca. 35.000 Datenpunkte pro Monat**, die für die Auswertung verwendet werden können.

Tabelle 18: Mess-Zeitreihen durch Smart Home Thermostate (SHT) und unterjährige Verbrauchsinformation (UVI)

Messdaten aus SHT und UVI	Einheit
Gemessene Temperatur am Heizkörper (SHT) (Ist-Temperatur)	[°C]
Eingestellte Temperatur am Heizkörper (SHT) (Soll- /Ziel-Temperatur)	[°C]
Ventilstellung (SHT) (Öffnungsgrad des Heizkörperventils für den Durchfluss von Heizungswasser)	[%]
Relative Luftfeuchtigkeit (SHT) (Schimmelerkennung)	[%]
Heizenergieverbrauch (UVI) (monatlicher Verbrauch Heizung und Warmwasser)	[kWh/Monat]

Der Pretest mit Daten zum Heiz- und Lüftungsverhalten lieferte bereits wertvolle Erkenntnisse, die als Grundlage für das Konzept des Anwendungstests dienen. Mit dem Anwendungstest, der Daten zum Heizenergieverbrauch auf monatlicher Basis liefert, wird das Untersuchungsdesign erweitert, um ein umfassenderes Feedback zum Verbrauch zu ermöglichen (s. Abbildung 30). Das Feedback zum Verbrauch basiert dabei auf einer gewählten Kategorisierung nach dem normierten flächenbezogenen Verbrauchswert (s. Kapitel 5.2.4). Das Feedback zum Verhalten hingegen basiert auf den Einstellungen und Nutzungsdaten aus den smarten Thermostaten, woraus Heiztypen abgeleitet werden (s. Kapitel 5.2.8). Es ist vorgesehen, beide Datenströme zusammenzuführen, um ein Feedback zu generieren, das auf die jeweilige Situation angepasst ist. Auf diese Weise soll es möglich werden, den Verbrauch in Abhängigkeit vom Heizverhalten zu bewerten und Hinweise für Verbesserungen abzuleiten.



*Aus BaltBest: Normierter flächenbezogener Verbrauchswert

** Ansatz in VISE-I

Abbildung 30: Feedback Ansatz im Anwendungstest Heizperiode (2023/2024)

Im Mittelpunkt steht dabei die Auswertung und Analyse von Messdaten, die von Heizkostenverteilern im Zuge der Unterjährigen Verbrauchsinformation (UVI), Smart Home Thermostaten und weiteren Sensorquellen erfasst werden. Durch diese Kombination sollen erstmals Daten zum Heizverhalten mit realen Verbräuchen analysiert und Schlussfolgerungen gezogen werden. Es folgt die Auswertung der Messdaten exemplarisch für die Monate Dezember 2023 und Januar 2024.

In der folgenden Abbildung 31 sind die Parameter und Auswertungen dargestellt. Dabei werden erfasste Messdaten wie Temperatur-Niveaus (s. Kapitel 5.2.1 und 5.2.2), Ventilöffnungen am smarten Thermostat (s. Kapitel 5.2.3) sowie der reale monatliche Heizenergieverbrauch (s. Kapitel 5.2.4) analysiert. Anhand der erstellten Kennzahlen zu den genannten Messdaten kann das Heiz- und Verbrauchsverhalten kategorisiert werden. Das ermöglicht es, Feedback für die Mieter abzuleiten. Zusätzlich werden auch die Luftfeuchtigkeit und mögliche Schimmelgefahr betrachtet (s. Kapitel 5.2.7).

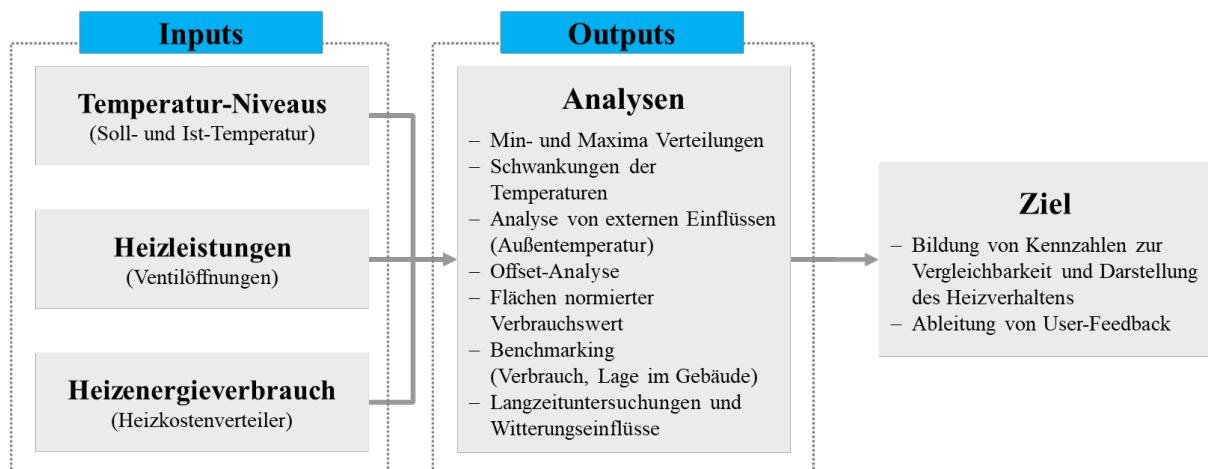


Abbildung 31: Energetische Analysen für die Datenauswertung

5.2.1 Temperatur-Niveaus

Ein zentraler Punkt bei der Beurteilung des Heizverhaltens sind die Raumtemperaturen. Die Soll-Temperaturen sind die von den Nutzenden am Thermostat oder in der App eingestellten Raumtemperaturen, während die Ist-Temperaturen den vom Thermostat am Heizkörper gemessenen Raumtemperaturen entsprechen. Die Analyse dieser beiden Datenpunkte über die Zeit ermöglicht die Untersuchung des Heizverhaltens. Bei der Analyse der Temperaturen ist insbesondere auch die individuelle Behaglichkeit zu berücksichtigen (s. Kapitel 2.4.1).

Die folgende Abbildung 32 zeigt die Soll- und Ist-Temperaturen für den Monat Januar 2024 in Clustern nach ihrer Häufigkeit. Ein Großteil der gemessenen und eingestellten Temperaturen liegen zwischen 18-20°C. Außerdem ist zu erkennen, dass mehr als die Hälfte der Soll-Temperaturen unter 14°C eingestellt sind, was darauf hinweist, dass ein großer Teil der Räume nicht ständig bzw. kaum beheizt werden. Dies ist ebenfalls am Beispiel von Wohnung 1 ersichtlich (s. Abbildung 33 Heizdauer je Raum). Es lässt sich feststellen, dass einige Räume nicht aktiv beheizt werden, sondern lediglich durch die Beheizung der viel genutzten Räume passiv mitbeheizt werden.

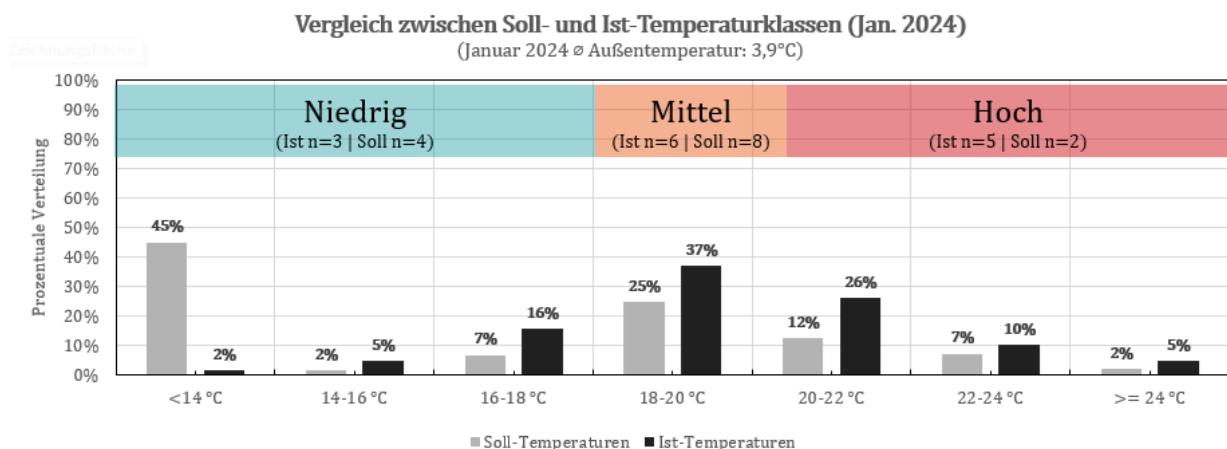


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Soll- und Ist-Temperatur-Niveaus (Jan. 2024)

Zur Bewertung der Höhe (Niveaus) der eingestellten und tatsächlichen Raumtemperaturen in den ausgestatteten Wohnungen wurden drei Bewertungsstufen (*hoch*, *mittel* und *niedrig*) definiert. Die Temperaturgrenzen basieren auf einem Vergleich verschiedener Quellen für empfohlene Raumtemperaturen [57, 114, 115]. Die Grenzwerte sowie die Anzahl der klassifizierten Wohnungen sind in der Tabelle 19 sowie in der Abbildung 32 dargestellt. Datengrundlage für die Temperatur-Niveaus ist das arithmetische Mittel aus allen Räumen der Soll- und Ist-Temperaturen der jeweiligen Wohnungen für einen Monat.

Tabelle 19: Bewertung der durchschnittlichen Temperatur-Niveaus (Jan.2024 und Vormonat in Klammern)

Heizverhalten (Einordnung)	Grenzwerte		Ist-Temperatur (Anzahl Wohnungen)	Soll-Temperatur (Anzahl Wohnungen)
	von	bis		
Hoch	> 20,5°C	-	5 (3)	2 (3)
Mittel	≥ 18°C	≤ 20,5°C	6 (7)	8 (6)
Niedrig	< 18°C	-	3 (7)	4 (5)

In Tabelle 19 sind auch die Veränderungen zum Vormonat dargestellt (siehe Werte in Klammern). Es fällt auf, dass im Vergleich zum Vormonat bei einigen Haushalten höhere Temperatur-Niveaus eingestellt wurden. Die Abnahme der durchschnittlichen Temperatur von Dezember 2023 ($6,8^{\circ}\text{C}$) bis Januar 2024 ($3,9^{\circ}\text{C}$) könnte als Ursache für den beobachteten Effekt in Betracht gezogen werden.

Weiterhin können die erhobenen Temperaturen auch als Betriebszeit (Heizdauer) dargestellt werden. Abbildung 33 zeigt beispielsweise die Heizdauer in Stunden pro Monat für eine Wohnung. Daraus ist auch das Heizverhalten bzw. die Heizdauer der einzelnen Räume gut zu erkennen. Aufällig ist, dass Bad und Küche kaum beheizt werden, obwohl es im Januar 31 Heiztage gibt, an denen die Heizung in Betrieb ist. Die Heizdauer auf unterschiedlichen Temperatur-Niveaus kann auch für weitere Auswertungen herangezogen werden. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse über das Durchheizverhalten auf einem Temperatur-Niveau erkennen. Im weiteren Verlauf werden aus der Heizdauer und der eingestellten Soll-Temperatur Heiztypen abgeleitet (s. Kapitel 5.2.8).

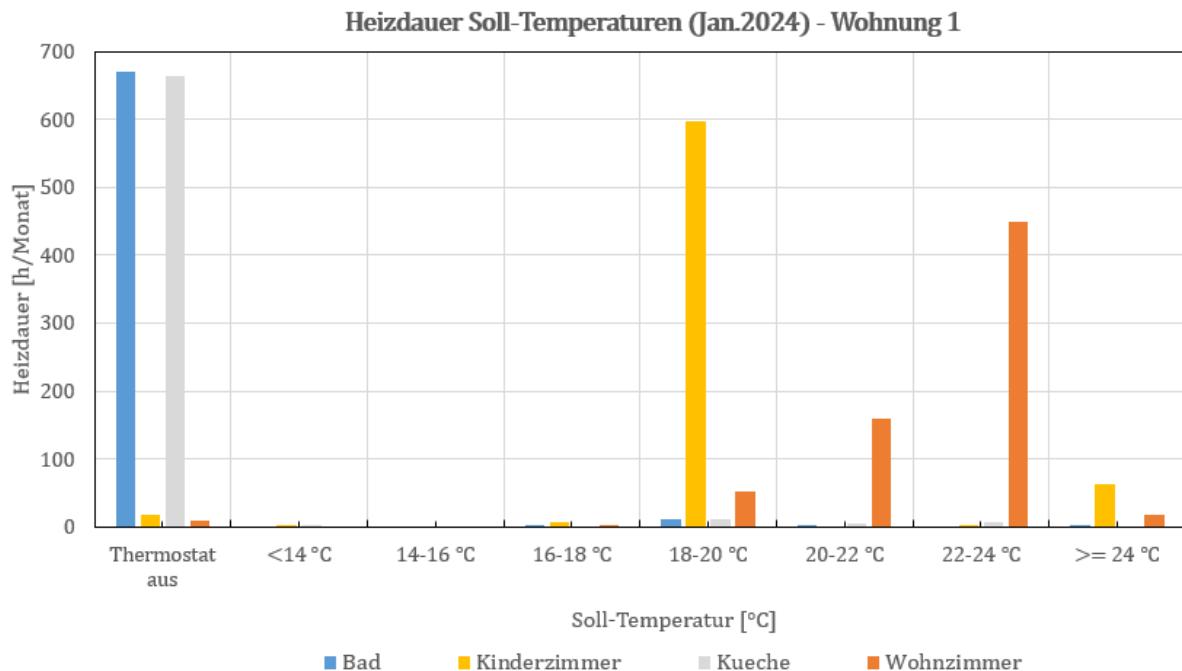


Abbildung 33: Heizdauer der Soll-Temperatur am Beispiel der Wohnung 1

Als weiterer Kennwert wird die Schwankungsbreite der Temperaturen mit Hilfe der Standardabweichung für jede Wohnung ermittelt. Die Analyse der Standardabweichung lässt Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit und Gleichmäßigkeit des Heizverhaltens zu. Die Standardabweichung²² [116] der Raumtemperaturen gibt an, wie weit diese von der mittleren Temperatur abweichen, siehe Formel (8).

²² Die Standardabweichung ist eine statistische Kennzahl, die die Streuung von Daten in einer Stichprobe angibt. Sie gibt an, wie weit die einzelnen Datenpunkte von dem arithmetischen Mittel (Durchschnitt) der Daten entfernt sind. Eine geringe Standardabweichung bedeutet, dass die Daten tendenziell nahe beieinander liegen und somit wenig Variation aufweisen, während eine hohe Standardabweichung auf eine größere Streuung und somit eine größere Variation hinweist. Die Standardabweichung wird zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Daten verwendet. Je kleiner die Standardabweichung, desto genauer und konsistenter sind die Daten [116].

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (8)$$

s : Standardabweichung [°C]

x_i : Datenpunkt in der Stichprobe Temperatur [°C]

\bar{x} : Stichprobenmittelwert der Datenpunkte (mittlere Temperatur) [°C]

n: Stichprobenumfang (Anzahl Temperatur-Werte)

Die Definition von drei verschiedenen Grenzwerten zur Beschreibung der Schwankungen in den Datenwerten basiert auf den Richtlinien für typische Standardabweichungen (s. Auflistung in Tabelle 20) [116]. Dabei werden Daten zunächst als *konstant* eingestuft, wenn sie eine niedrige Standardabweichung aufweisen, spezifisch im Bereich von 0 bis 1. Dies bedeutet, dass die Datenpunkte eng um den Mittelwert gruppiert sind und somit eine geringe Streuung zeigen. Als *moderat* werden Daten beschrieben, wenn sie eine moderate Standardabweichung zwischen 1 und 2 aufweisen. In diesem Fall liegen die Datenpunkte mit einer moderaten Streuung um den Mittelwert, was auf eine mäßige Variabilität in den Daten hinweist. Schließlich sind Daten als *schwankend* zu bezeichnen, wenn sie eine hohe Standardabweichung, also einen Wert größer als 2, aufweisen. Dies impliziert, dass die Datenpunkte weit vom Mittelwert entfernt sind und eine signifikante Streuung innerhalb der Datenmenge vorhanden ist.

Tabelle 20: Bewertung der Standardabweichung nach [116]

Einstufung	Grenzwerte	Beschreibung
Konstant	$0 \leq s < 1$ [°C]	Die Standardabweichung ist mit ($0 \leq s < 1$) relativ gering. Wenn die Standardabweichung null ist, haben alle Datenpunkte den gleichen Wert. Sind also identisch. Dies bedeutet, dass die Datenpunkte eng um den Mittelwert liegen und eine geringe Streuung aufweisen.
Moderat	$1 \leq s < 2$ [°C]	Die Standardabweichung ist moderat ($1 \leq s < 2$). Dies bedeutet, dass die Datenpunkte eine moderate Streuung um den Mittelwert aufweisen. Die Streuung ist jedoch vorhanden und nicht zu vernachlässigen.
Schwankend	$s \geq 2$ [°C]	Die Datenpunkte zeigen eine hohe Standardabweichung ($s \geq 2$). Dies deutet auf eine erhebliche Streuung in den Daten hin.

In der folgenden Tabelle 21 wurden die Wohnungen nach den oben genannten Grenzwerten bewertet. Die Einstufung *konstant* wurde nach einer eingehenden Betrachtung der Verteilung bewusst niedriger gewählt, um ein noch konstanteres Heizverhalten zu detektieren. Anhand der Klassifizierungen ist auch eine Bewertung des Heizverhaltens möglich. Die Tabelle 21 basiert auf den Mittelwerten der gesamten Wohnung.

Tabelle 21: Bewertung der Temperatur-Schwankungen mittels Standardabweichung (Jan.2024 und Vormonat in Klammern)

Heizverhalten (Einordnung)	Standardabweichung von	bis	Ist-Temperatur (Anzahl Wohnungen)	Soll-Temperatur (Anzahl Wohnungen)
Schwankend	> 2 [°C]	-	5 (2)	4 (4)
Moderat	≥ 0,8 [°C]	≤ 2	8 (11)	9 (7)
Konstant	< 0,8 [°C]	-	1 (1)	1 (3)

Bei der Betrachtung der gemessenen Ist-Temperaturen fällt auf, dass der größte Teil der Wohnungen als *moderat* eingestuft worden ist. In fünf der Wohnungen wurde *schwankende* Ist-Temperaturen festgestellt, was auf sprunghafte Temperaturveränderungen und beispielsweise häufiges Lüften hindeuten könnte. Nur eine Wohnung wies ein konstantes Heizverhalten auf, sodass nur geringe Änderungen der Ist-Temperatur zu verzeichnen waren.

Die Schwankungen der Standardabweichung der eingestellten Soll-Temperaturen sind größtenteils als *moderat* einzustufen. Vier der ausgestatteten Wohnungen weisen ein *schwankendes* Heizverhalten auf, was auf eine häufige Änderung der Raumtemperaturen zurückzuführen ist. Dies kann auf eine häufige manuelle Bedienung oder auf die Verwendung von Zeitplänen (Planprofil) zurückzuführen sein. Das *konstante* Heizverhalten der Solltemperatur spricht für ein Durchheizprofil. Hier werden Einsparungen z. B. durch den Einsatz von Zeitplänen vermutet.

Die in Tabelle 21 dargestellte Auswertung des Heizverhaltens anhand der Temperaturschwankungen wird exemplarisch auch auf Raumbene durchgeführt und nachfolgend als Heatmap visualisiert, siehe Abbildung 34 für die Darstellung der Ist-Temperaturen und Abbildung 35 für die Soll-Temperaturen. Die in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellten Zahlenwerte in den Kästen entsprechen der nach Formel (8) berechneten Standardabweichung für den jeweiligen Raum. Die Lücken in der Abbildung sind darauf zurückzuführen, dass nicht alle Wohnungen mit der gleichen Anzahl an smarten Thermostaten ausgestattet sind.

Auf Raumbene lassen sich Räume identifizieren, die einen häufig wechselnden Temperaturverlauf aufweisen (siehe rote Einfärbung). Bei Betrachtung der Ist-Temperaturen in Abbildung 34 zeigt sich auf Raumbene ein moderates bis konstantes Temperatur-Niveau. Ausreißer sind dabei Wohnung 2 und 3, die eine stark schwankende Ist-Temperatur aufweisen, was wiederum ein Indikator für häufiges Lüften ist.

Weitere Einflussfaktoren, die die gemessene Ist-Temperatur beeinflussen könnten, sind beispielsweise interne Faktoren wie Menschen oder Geräte, die Wärme abgeben. Weiterhin können auch externe Faktoren wie Sonneneinstrahlung durch Fenster oder die passive Beheizung geöffneter Türen zu stark beheizter Nachbarräume dazu führen. Dies ist in Tabelle 22 in Kapitel 5.2.2 dargestellt. Besonders das Wohnzimmer fällt durch häufig schwankende Ist-Temperaturen auf, die auf die oft eingesetzte Heizdauer zurückzuführen sind (s. Abbildung 33). Dies zeigt sich auch später in der Verteilung der Ventilstellungen (Öffnungsgrad des Heizkörperventils) am Thermostat (s. Abbildung 39).

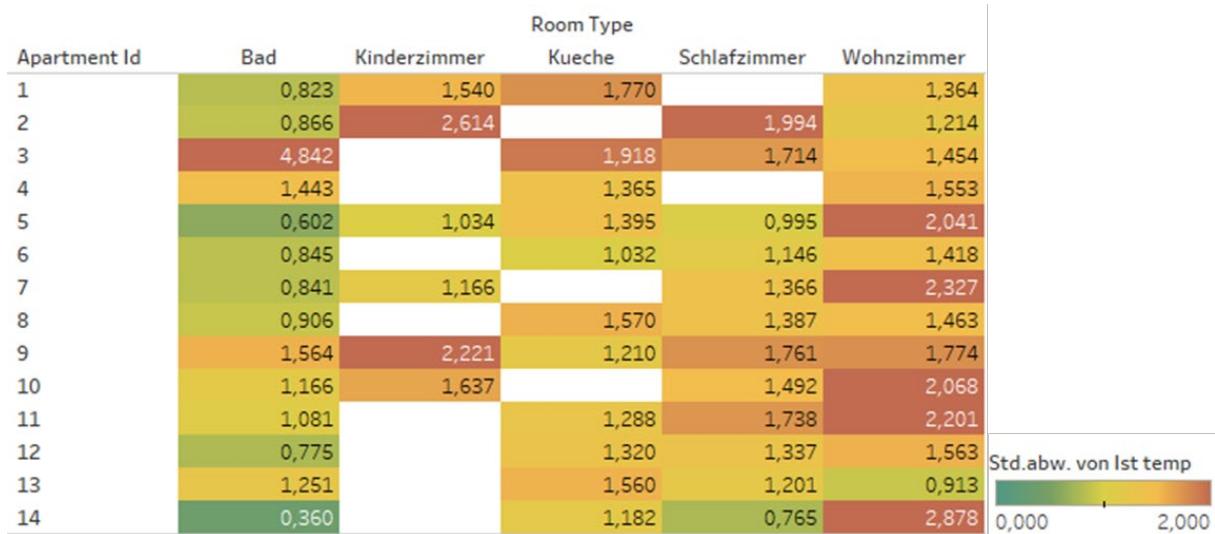


Abbildung 34: Heatmap Standardabweichung der gemessenen Ist-Temperatur je Raum (Jan. 2024)

Abbildung 35 zeigt durch die Heatmap der Soll-Temperaturen das schwankende Nutzerverhalten der eingestellten Temperaturen auf Raumbene. Dabei können den jeweiligen Räumen Nutzungs-
raten zugeordnet werden. Grüne Flächen in Abbildung 35 zeigen geringe Änderungsraten und las-
sen den Schluss zu, dass diese Räume kaum genutzt werden und nur auf einem Temperatur-Niveau
(Durchheizprofil) gehalten werden.

Die Visualisierung zeigt, dass das Heizverhalten im Durchschnitt gut zugeordnet werden kann,
wie zum Beispiel in Wohnung 1 und 9. In den übrigen Wohnungen zeigt sich eine Schwankung
des Heizverhaltens hinsichtlich der eingestellten Soll-Temperaturen, die sich raumweise unter-
scheiden. Beispielsweise demonstriert Wohnung 3 im Wohnzimmer den Fall, dass keine Änderung
der Soll-Temperatur vorgenommen wurde und durchgehend konstant eingestellt war. Eine genaue
Betrachtung auf Raumbene ist erforderlich, um das Heizverhalten bewerten zu können.

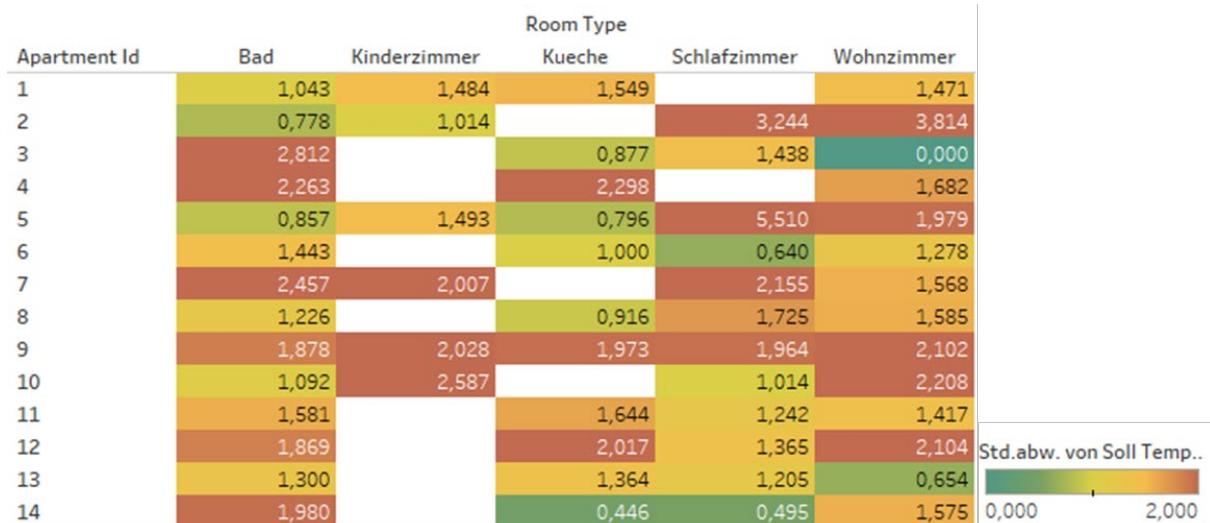


Abbildung 35: Heatmap Standardabweichung der eingestellten Soll-Temperatur je Raum (Jan. 2024)

5.2.2 Soll-Ist-Vergleich (Offset) Raumtemperatur

Um Aufschluss über das Regelverhalten der smarten Thermostatventile zu bekommen, wird die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Temperatur analysiert. Bei dem Vergleich der beiden Datenwerte wurden nur Sollwerte größer oder gleich 16°C berücksichtigt, die einem Heizbetrieb entsprechen. Der Versatz zwischen Soll- und Ist-Temperatur wird im Folgenden als *Offset* bezeichnet. Zur Berechnung wird der Median der Soll- und Ist-Temperaturen pro Wohnung berechnet und voneinander subtrahiert, siehe Formel (9). Dies erfolgt für jeden Zeitstempel alle 5-Minuten.

$$T_{Offset} = T_{avg,Soll} - T_{avg,Ist} \quad (9)$$

$T_{avg,Soll}$: Median der durchschnittlich eingestellten Soll-Temperatur [°C]

$T_{avg,Ist}$: Median der durchschnittlich gemessenen Ist-Temperatur [°C]

Ist der *Offset* negativ, deutet dies auf eine Übersteuerung bzw. Überheizung des Raumes hin. Gründe hierfür können z. B. interne oder externe Wärmequellen sein. Da die Heizungsrohre in den Wohnungen teilweise offen verlegt sind, heizt z. B. das Wohnzimmer die angrenzenden Räume mit. Ist der *Offset* hingegen positiv, kann dies bedeuten, dass der Raum nicht ausreichend beheizt wird. Gründe hierfür könnten z. B. Dauerlüften sein. In der Regel sind die Offset-Werte negativ und weisen eine geringe Abweichung auf, was für ein gutes Regelverhalten der Thermostate spricht. Probleme können auftreten, wenn sich die Wärme am Thermostat staut, z. B. durch Verdecken mit Vorhängen oder Möbeln. In diesem Fall regelt das Thermostat vorzeitig ab und der Raum wird nicht optimal beheizt (s. Tabelle 22 Auflistung möglicher Gründe für Offset Kennwerte).

In den Monaten Dezember 2023 und Januar 2024 wurden überwiegend negative Offset-Werte im Mittel von -1°C über alle Wohnungen erfasst. Dies lässt den Schluss zu, dass die smarten Thermostate ein gutes Regelverhalten aufweisen. Dennoch konnten mit Hilfe der Offset-Analyse Ausreißer bzw. Fehlverhalten im Heizverhalten erkannt werden. In zwei Fällen konnten deutlich zu hohe positive Offset-Werte von 4,5°C und mehr ermittelt werden, was möglicherweise auf ein dauerhaft geöffnetes Fenster oder Zimmertür mit kälteren Nachbarräumen hinweist, sodass die eingestellte Solltemperatur nicht erreicht wird. Dieser Fall ist in der Heatmap in Abbildung 36 dargestellt, siehe grüne Markierung für Wohnung 3 (Wohnzimmer) sowie Wohnung 6 (Bad). Die Lücken in der Abbildung sind darauf zurückzuführen, dass nicht alle Wohnungen mit der gleichen Anzahl an smarten Thermostaten ausgestattet sind. Die Grundlage der Berechnungen in Abbildung 36 bildet der Median, der über einen Monat ermittelt wurde. Dadurch wird eine hohe Robustheit gegenüber Ausreißern gewährleistet.

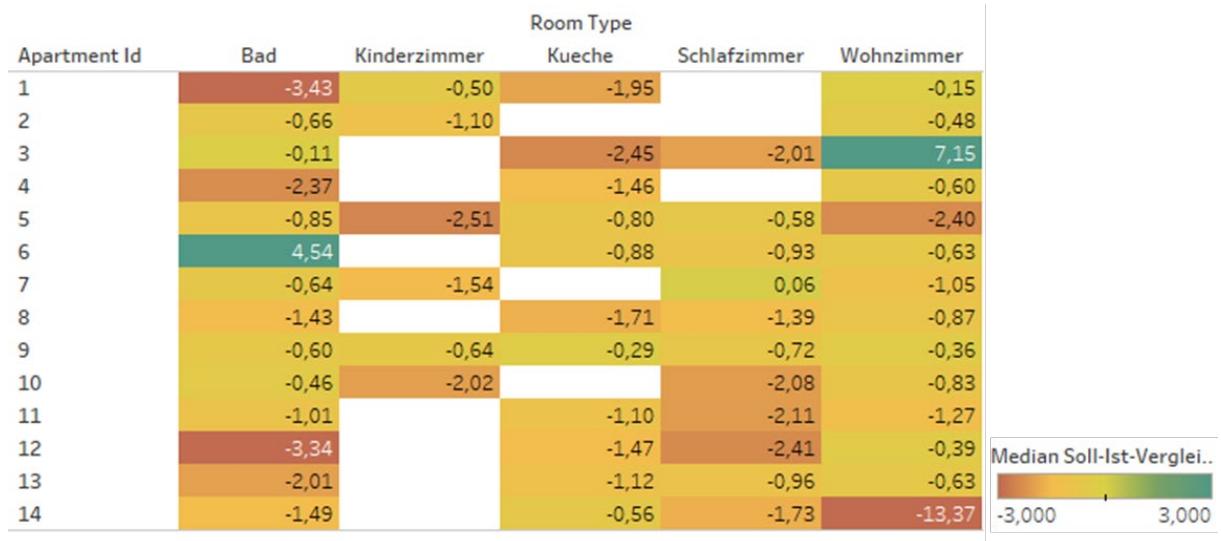


Abbildung 36: Heatmap der Offset-Analyse (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median

Ein weiterer Ausreißer bildet die Wohnung 14 mit einem negativen Offset-Wert von -13,4°C. Dort herrschen im Wohnzimmer durchschnittlich über 30°C trotz ausgeschaltetem Thermostat. Gründe dafür können weitere externe Wärmequellen (z. B. elektrische Zusatzheizungen) sein. Es sind auch Geräte denkbar, die direkt auf den Sensor des smarten Thermostats ausgerichtet sind und diesen indirekt beeinflussen können.

Bei näherer Betrachtung der Messdaten von Wohnung 14 ist aufgefallen, dass diese seit dem 06. Januar 2024 keine Messdaten mehr sendet und die Smart Home Thermostate und das Gateway nicht mit dem Internet verbunden sind. Infolgedessen können die Messwerte von Wohnung 14 nicht für den Vergleich herangezogen werden und sind folglich ausgeschlossen. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen durchschnittlichen Raumtemperaturen sind weitere Heatmaps pro Wohnung und Nutzungsraum dargestellt, siehe Abbildung 37 Ist-Temperaturen und Abbildung 38 Soll-Temperaturen. Durch den direkten graphischen Vergleich der beiden Kenngrößen können die oben genannten Offset-Analysen weiter nachvollzogen werden.

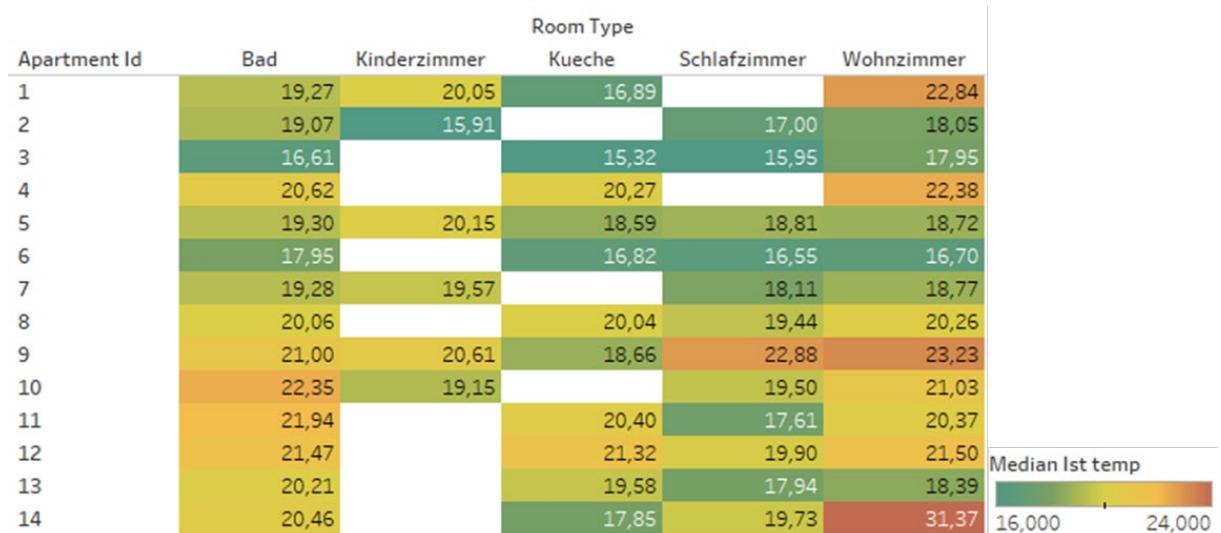


Abbildung 37: Heatmap der gemessenen Ist-Temperaturen (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median

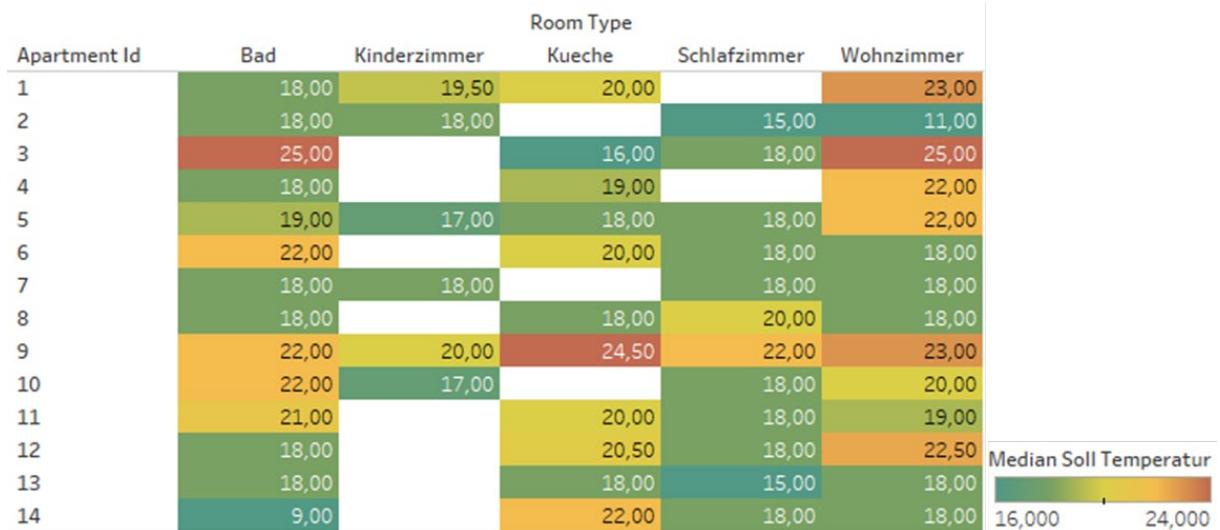


Abbildung 38: Heatmap der eingestellten Soll-Temperaturen (Jan. 2024) basierend auf monatlichen Median

Zusammenfassend sind mögliche Gründe für den Versatz zwischen Soll- und Ist-Temperatur in der nachfolgenden Tabelle 22 aufgeführt. In Abhängigkeit von der Größe der Abweichungen der Offset-Werte (s. Abbildung 36) können eine Vielzahl von Gründen zutreffend sein, welche den Effekt verstärken.

Tabelle 22: Auflistung möglicher Gründe für Offset Kennwerte

Offset	Zustand im Raum	Mögliche Gründe
Tollerranz-zone	Differenz zwischen Soll-Ist +/- 1°C	<ul style="list-style-type: none"> - gutes Regelverhalten des Thermostats - je nach Dämmung und Außentemperatur leichte negative Werte
Negative	Soll-Temperatur deutlich überschritten (Überhitzung / Überheizung des Raums)	<ul style="list-style-type: none"> - verdeckte Thermostate (Wärmestau) - Externe Wärmeerzeuger - Interne Gewinne (Personen, elektrische Geräte)
Positive	Soll-Temperatur wird <u>nicht</u> erreicht (gewünschte Raumtemperatur wird nicht erreicht)	<ul style="list-style-type: none"> - geöffnete Zimmertüren (kalte Nachbäume) oder Fenster - technische Defekte am Ventil, z. B. verkalkte Ventilstifte - zu wenig Heizleistung am Heizkörper (verdeckte Heizkörper) - fehlender hydraulischer Abgleich

5.2.3 Ventilöffnungen

Die von einem smarten Thermostat gemessene Ventilöffnung bzw. Ventilstellung gibt Aufschluss über den Öffnungsgrad des Heizkörperventils. Die Angabe erfolgt in Prozent, wobei 0% eine vollständig geschlossene Stellung des Ventils und somit keine Wärmeabgabe an den Raum bedeutet (kein Heizungswasser fließt durch den Heizkörper). Eine Ventilstellung von 100% entspricht einem vollständig geöffneten Ventil und somit einer maximalen Wärmeabgabe an den Raum. In einigen Fällen wird seitens einiger Hersteller von Smart Home Lösungen die Ventilstellung auch als Heizleistung bezeichnet, was jedoch aus physikalischer Perspektive nicht korrekt ist. Obwohl dieser Wert als Hilfsgröße zur Ermittlung des Raumes mit dem höchsten Verbrauch an Heizenergie herangezogen werden kann, gibt er keine direkte Auskunft über die Heizleistung am Heizkörper oder die Durchflussmenge von Heizungswasser am Heizkörper.

Im Rahmen des Anwendungstests werden im 5-Minuten Intervall Messpunkte der smarten Thermostate ermittelt. Aus den erfassten Daten lassen sich die aktuellen Ventilöffnungen zu jedem Zeitintervall ableiten. In der nachfolgenden Abbildung 39 sind die prozentualen Anteile der Ventilöffnungen aller Wohnungen nach Räumtypen aufgetragen. Die Anteile werden durch Aufsummierung der Ventilstellungen pro Zeitintervall eines Monats für jedes Thermostat ermittelt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Aufsummierung der Ventilstellungen nicht der Heizleistung am Heizkörper entspricht und lediglich als Indikator für die Heizintensität verwendet werden kann. Somit wird lediglich angezeigt, in welchem Raum am meisten geheizt wird (s. Abbildung 39).

Die Daten beziehen sich auf alle ausgestatteten Wohnungen im Testgebäude. Raumtypen wie Kinderzimmer wurden dem Raumtyp Schlafzimmer zugeordnet, da sie ähnliche Summen aufweisen. Im Kreisdiagramm ist gut zu erkennen, dass die Räume Wohn- und Schlafzimmer am meisten beheizt werden. Die Räume Bad und Küche haben einen geringen Anteil. Letzteres ist wahrscheinlich auf die geringen Nutzungs- bzw. Aufenthaltszeiten zurückzuführen. Bei einer Gegenüberstellung der beiden Monate Dezember 2023 (linkes Kreisdiagramm) und Januar 2024 (rechtes Kreisdiagramm) in Abbildung 39 zeigt sich, dass die Verteilung der Heizleistung in den einzelnen Raumtypen nur geringfügigen Veränderungen unterliegt. Dies lässt den Schluss zu, dass das Heizverhalten unverändert geblieben ist.

Ventilöffnungen nach Räumen in allen Wohnungen (Dez. 2023)



Ventilöffnungen nach Räumen in allen Wohnungen (Jan. 2024)

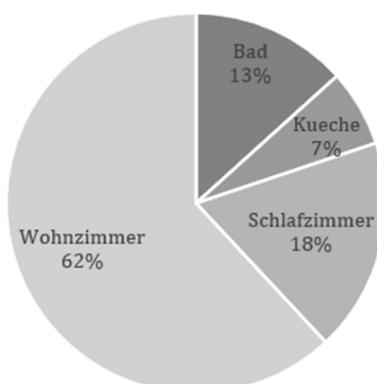


Abbildung 39: Verteilung der SHT-Ventilöffnungen nach Raumtypen aller Wohnungen (n=14)

Die folgende Abbildung 40 zeigt eine Heatmap aller Wohnungen nach Raumtypen. Auch hier ist gut zu erkennen, dass die Wohnzimmer, die am meisten beheizten Räume sind. Die Heatmap basiert auf der Summe aller Ventilstellungen und der prozentualen Anteile für den Monat Januar 2024. Zu beachten ist, dass aufgrund des Übertragungsintervalls der Smart Home Thermostate (5- Minuten) nur der aktuelle Zustandswert übertragen wird. Ventilbewegungen innerhalb des Zeitraums werden nicht erfasst. Die Abtastrate der Thermostate kann aus Gründen der Batterielebensdauer nicht erhöht werden. Dennoch geben die Anteile gute Rückschlüsse zur Nutzung der Räume und sind ein Indikator für den Verbrauch. Die Kennwerte zum Verbrauch werden im nachfolgenden Kapitel 5.2.4 vorgestellt.

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	0%	21%	0%	0%	79%
2	34%	0%	0%	0%	66%
3	100%	0%	0%	0%	0%
4	2%	0%	7%	19%	72%
5	3%	41%	10%	19%	27%
6	0%	0%	0%	13%	87%
7	1%	7%	0%	37%	55%
8	14%	0%	5%	14%	67%
9	6%	11%	2%	24%	57%
10	11%	9%	0%	2%	78%
11	15%	0%	56%	0%	30%
12	0%	0%	13%	3%	84%
13	12%	0%	24%	4%	59%
14	0%	0%	0%	70%	30%

Abbildung 40: Heatmap der prozentual verteilten Ventilöffnungen nach Raumtypen (Jan. 2024)

Um die Aussagekraft der erfassten Ventilposition am smarten Thermostat für die Bezinserung des Verbrauchs zu ermitteln, wurden in der folgenden Abbildung 41 die Anteile der Ventilöffnungen und die Anteile der Verbrauchsdaten gegenübergestellt. Die Anteile ergeben sich aus der Summe aller Ventilstellungen im Gebäude im Verhältnis zu jeder einzelnen Wohnung. Die Verbrauchsdaten stammen aus den unterjährigen Verbrauchsinformationen, die über die Heizkostenverteiler gemessen worden sind und werden ebenfalls anteilig auf einzelne Wohnungen herunter gebrochen.

Die Gegenüberstellung der beiden Messwerte aus smarten Thermostaten und Verbrauchsmessung zeigt, dass die meisten Wohnungen eine ähnliche Größenordnung der Verteilung aufweisen (s. Abbildung 41). Lediglich die Wohnungen 1 und 14 weisen größere Abweichungen auf. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Wohnungen im Vergleich zu den übrigen Wohnungen einen überdurchschnittlich hohen absoluten Verbrauch aufweisen. In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass bei Wohnung 14 seit dem 06. Januar 2024 keine Verbindung mit dem Internet bestand und folglich keine weiteren Daten gesendet werden. Dies erklärt die Diskrepanz. Dies impliziert eine Tendenz dafür, dass smarte Thermostate in der Lage sind, einen Überblick über den relativen Verbrauch zu geben. Weitere Langzeitbeobachtungen sind erforderlich, um die Auswirkungen des Verhaltens von Vielverbrauchern weiter zu untersuchen.

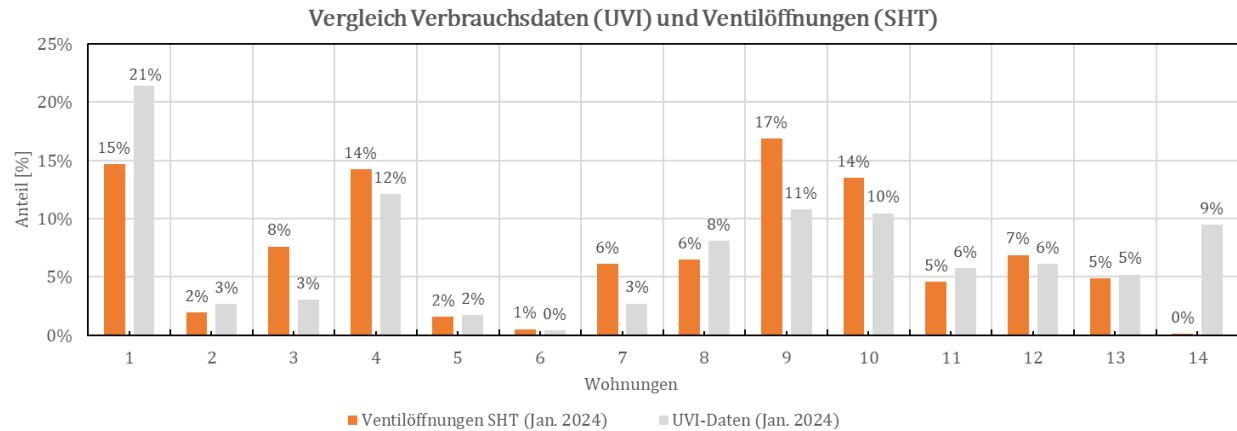


Abbildung 41: Vergleich der anteiligen Verbrauchsdaten (UVI) und Ventilöffnungen (SHT) je Wohnung (Jan. 2024)

In Abbildung 42 sind die absoluten aufsummierten Ventilöffnungen aller Wohnungen für Dezember 2023 und Januar 2024 dargestellt. Zur Veranschaulichung der Tendenz und Entwicklung der Daten über einen bestimmten Zeitraum wurde ein Liniendiagramm gewählt. Trotz der Tatsache, dass die einzelnen Datenpunkte nicht unmittelbar miteinander verbunden sind, ermöglicht das Liniendiagramm eine klare Darstellung der allgemeinen Richtung und der Schwankungen der Datenreihe (s. Abbildung 42). Die Verläufe zeigen bei den meisten Wohnungen eine ähnliche Tendenz, die wahrscheinlich auf die geringere Außentemperatur und damit auf die größere Heizleistung zurückzuführen ist. An dieser Stelle lässt sich ebenfalls gut erkennen, dass Wohnung 14 im Dezember 2023 noch Daten gesendet hat und dem Verbrauch entsprechende Ventilöffnungen aufweist. Der Vergleich zwischen Verbrauchsdaten und Ventilöffnungen ist in Abbildung A 6 im Anhang dargestellt.

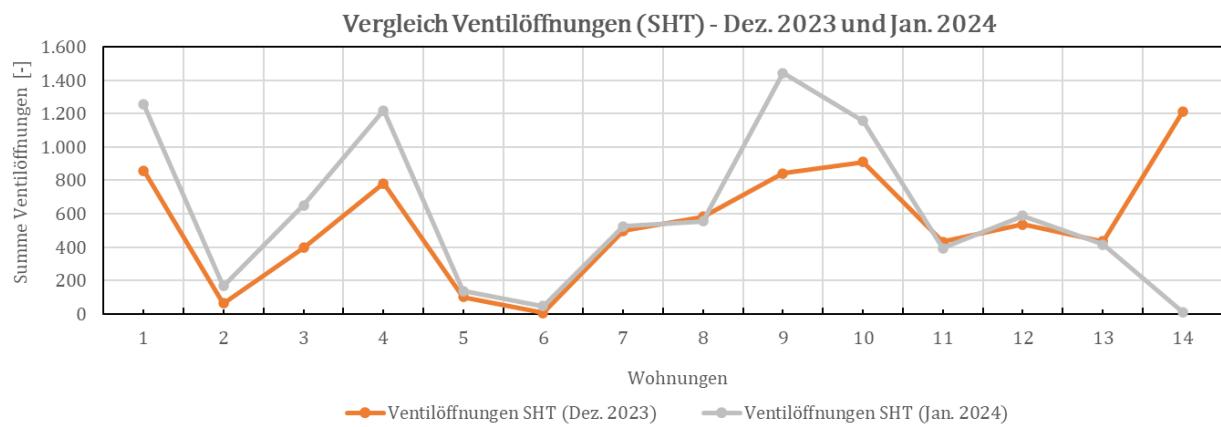


Abbildung 42: Vergleich der absoluten Ventilöffnungen (SHT) - Dez. 2023 vs. Jan. 2024

In den Abbildung 44 und Abbildung 45 sind weitere Vergleiche zwischen den absoluten Ventilöffnungen und den Heizenergieverbräuchen dargestellt (s. Kapitel 5.2.4).

5.2.4 Heizenergieverbrauch

In der vorliegenden Untersuchung werden die Heizenergieverbräuche anhand von Messdaten aus Heizkostenverteilern (vgl. Kapitel 2.4.1) analysiert. Die Ergebnisse dienen der Evaluierung der Energieeffizienz der Haushalte sowie des gesamten Gebäudes. Die dargestellten Daten geben Aufschluss über individuelle Verbrauchsmuster und spiegeln den Nutzenergieverbrauch wider, welcher dem Verbrauch der direkt am Heizkörper an kommenden Energie entspricht. In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung diverser Analysemethoden, welche dazu dienen, den Heizenergieverbrauch zu verstehen, Effizienzpotenziale aufzudecken sowie das Verbrauchsverhalten zu kategorisieren.

Das vorliegende Sankey-Diagramm (s. Abbildung 43) zeigt den absoluten Heizenergieverbrauch des siebengeschossigen Gebäudes mit allen 28 Wohnungen (ausgestattete Wohnungen und Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate) für den Monat Januar 2024. Die grafische Darstellung demonstriert die absoluten Energieverbräuche in Kilowattstunden pro Etage sowie für die Lage jeder Wohnung. Im Anhang ist das Sankey-Diagramm auch mit den spezifischen Heizenergieverbräuchen pro Wohnfläche dargestellt (s. Abbildung A 5). Da die Wohnungen jedoch eine ähnliche Größe aufweisen, ist kein direkter Effekt sichtbar.

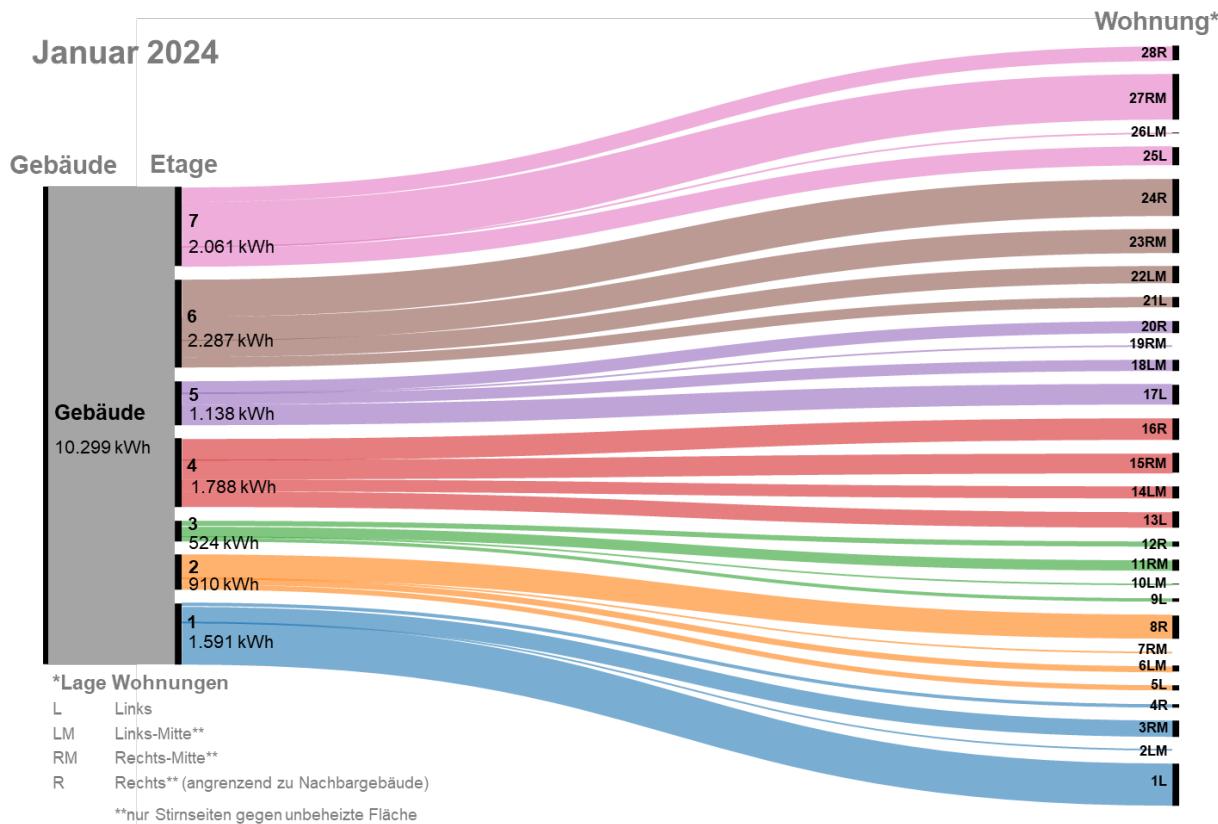


Abbildung 43: Heizenergieverbrauch (Nutzenergie) Januar 2024 nach Etage und Wohnungen (n=28 Wohnungen)

Die vertikale Ausrichtung des Diagramms stellt die Etagen des Gebäudes dar, während die horizontalen Verbindungslien den Energiefluss zwischen den einzelnen Wohnungen veranschaulichen. Durch die farbliche Differenzierung der Linien werden die einzelnen Wohnungen und ihre jeweiligen Verbrauchsmengen deutlich sichtbar. Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, die

Energieverbräuche der einzelnen Wohnungen und Etagen miteinander zu vergleichen. Die Lage der Wohnungen ist ebenfalls in die Darstellung integriert, so ist erkennbar, welche der Wohnungen überwiegend innen liegen bzw. an unbeheizte Außenflächen grenzen. Es ist zu erkennen, dass die Wohnungen *1 Links*, *27 Rechts-Mitte* und *24 Rechts* den höchsten Heizenergieverbrauch aufweisen. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Lage der Wohnung keinen direkten Einfluss auf den Verbrauch hat und es wird vermutet, dass dieser durch das individuelle Heizverhalten verursacht wird. Diese Tendenz lässt sich auch in den weiteren Daten beobachten. Es gilt anzumerken, dass alle Wohnungen eine ungefähr ähnliche Anzahl und Größe an Fensterflächen besitzen.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel 5.2.3 dargelegt, wurden die Anteile der Ventilöffnungen in Relation zum Heizenergieverbrauch gesetzt. Die nachfolgenden Abbildungen präsentieren den sortierten absoluten Heizenergieverbrauch sowie die summierten Ventilöffnungen für den Monat Januar 2024 (s. Abbildung 44) und den Vormonat Dezember 2023 (s. Abbildung 45).

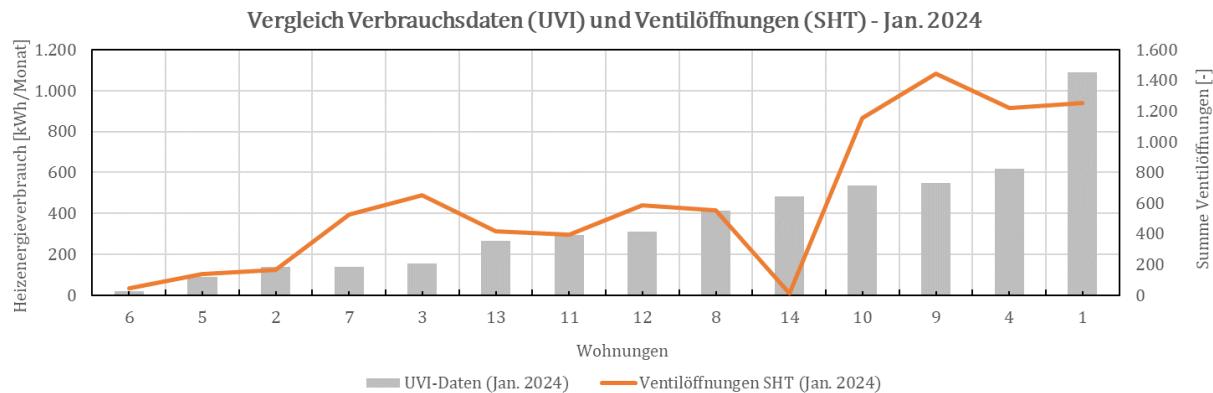


Abbildung 44: Vergleich der Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Verbrauch sortiert) – Jan. 2024

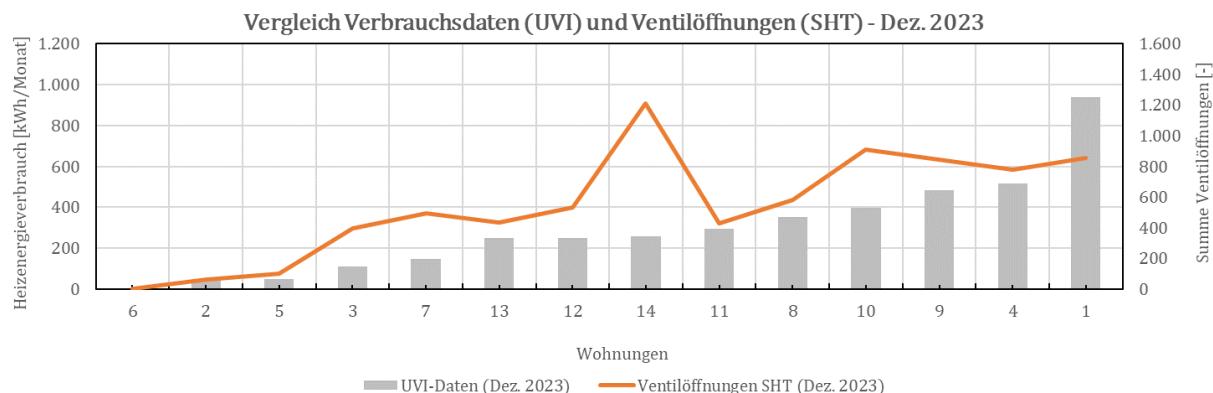


Abbildung 45: Vergleich der Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Verbrauch sortiert) – Dez. 2023

Es lässt sich feststellen, dass in beiden Monaten ein Zusammenhang zwischen steigendem Verbrauch und der Anzahl der erfassten Ventilöffnungen besteht. Dennoch sind Ausreißer erkennbar, wie beispielsweise in Abbildung 44 die Wohnung 14, welche nahezu keine Ventilöffnungen detektiert hat und im Vormonat in Abbildung 45 einen entgegengesetzten Ausreißer zeigt. Als mögliche Ursachen für die Abweichung können die Abtastrate der smarten Thermostate (s. Kapitel 5.2.3) sowie im Fall von Wohnung 14 die geringe Anzahl an Messwerten für den Monat Januar

angeführt werden. Des Weiteren können Messfehler nicht ausgeschlossen werden, die beispielsweise durch den Soll-Ist-Vergleich (s. Abbildung 36) entstanden sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass externe Einflüsse dafür verantwortlich sein könnten, dass die Ist-Temperatur im Raum nahezu zu jedem Zeitpunkt größer als die Soll-Temperatur ist (s. Abbildung 37 und Abbildung 38). Infolgedessen erfolgt durch die Regelung keine Öffnung des Ventils. In der Gesamtschau lässt sich festhalten, dass die Betrachtung der Trendlinie der Ventilöffnungen eine Tendenz erkennen lässt, welche eine Korrelation mit dem Verbrauch nahelegt, aber dennoch fehlerbehaftet ist. In der nachfolgenden Tabelle 23 werden die Kennwerte zum Verbrauch (absolut und spezifisch pro Wohnfläche sowie die summierten Ventilöffnungen) der ausgestatteten Wohnungen aufgeführt. Weiterhin werden dort die Werte des Vormonats Dezember 2023 dargestellt.

Tabelle 23: Heizenergieverbrauch und Summe Ventilöffnungen der Wohnungen - Jan. 2024 (Werte in Klammern Vormonat)

Wohnung [Nr.]	Verbrauch [kWh]	Spez. Verbrauch [kWh/m ²]	Σ Ventilöffnungen [-]
1	1.091 (939)	14,4 (12,4)	1.254 (858)
2	137 (46)	1,8 (0,6)	167 (63)
3	155 (110)	2,5 (1,7)	652 (397)
4	618 (517)	8,2 (6,8)	1.219 (781)
5	88 (51)	1,2 (0,7)	136 (100)
6	21 (6)	0,3 (0,1)	46 (5)
7	139 (149)	1,8 (2,0)	524 (497)
8	413 (353)	5,5 (4,7)	554 (582)
9	550 (482)	7,3 (6,4)	1.442 (843)
10	534 (396)	7,1 (5,2)	1.156 (911)
11	293 (297)	4,6 (4,7)	393 (431)
12	311 (251)	4,1 (3,3)	589 (535)
13	265 (249)	3,5 (3,3)	416 (434)
14	482 (258)	6,4 (3,4)	12 (1.211)

Aufgrund der homogenen Struktur der Wohnungen je Etage sowie der vergleichbaren Wohnflächen ($\varnothing 69 \text{ m}^2$, s. Kapitel 5.1.4 und Tabelle 17), ist eine gute Vergleichbarkeit der Verbräuche gewährleistet. Trotz der Ähnlichkeit der Wohnflächen wird der Heizenergieverbrauch durch die Wohnfläche dividiert, um den Heizenergieverbrauch einer Wohnung weitgehend unabhängig von der Größe bewerten zu können. Zur Normierung wird der flächenbezogene Verbrauchswert durch die Methode nach *VDI 2077 Blatt 3.5* herangezogen. Der flächenbezogene Verbrauchswert einer Wohneinheit wird dabei durch den Quotienten aus dem flächenbezogenen Verbrauchswert v_j und dem Mittelwert der flächenbezogenen Verbrauchswerte \bar{v} aller untersuchten Wohneinheiten dividiert, wie in den Formeln (10) und (11) beschrieben.

$$\hat{v}_j = \frac{v_j}{\bar{v}} \quad (10)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n v_j \quad (11)$$

\hat{v}_j : normierter Verbrauchswert [-]

v_j : Flächenbezogener Verbrauchswert je Wohneinheit [kWh/m²]

\bar{v} : Mittelwert der flächenbezogenen Verbrauchswerte der Wohneinheiten [kWh/m²]

n: Anzahl der Wohnungen

Der normierte Wert ermöglicht einen Vergleich des Energieverbrauchs zwischen verschiedenen Wohnungen unabhängig von ihrer Größe. Ein normierter flächenbezogener Verbrauchswert \hat{v}_j von beispielsweise größer 1 gibt an, dass die betreffende Wohneinheit bezogen auf die beheizte Fläche mehr Heizenergie benötigt als der Durchschnitt aller Wohneinheiten im betrachteten Gebäude. Damit ergibt sich eine Kennzahl zur vergleichenden Darstellung einzelner Wohnungen im Gesamtgebäude. Daraus werden fünf Heiztypen anhand unterschiedlicher Grenzwerte des \hat{v}_j gebildet, siehe Tabelle 24 in Anlehnung an [72]. Die folgende Tabelle 24 präsentiert die Verteilung der Verbrauchstypen je Monat für das Testgebäude. Neben der absoluten Häufigkeit für jeden Verbrauchstyp sind auch in den Klammern die prozentualen Anteile eines Monats angegeben.

Tabelle 24: Verteilung Verbrauchstypen nach normierten fl. Verbrauchswert im Testgebäude (n=28 Wohnungen) pro Monat

Verbrauchstypen (Einordnung)	Zeitraum (Außentemperatur)		
	Nov. 23 (ø 7,7°C)	Dez. 23 (ø 6,8°C)	Jan. 24 (ø 3,9°C)
Nicht-Heizer ($\hat{v}_j < 0,2$)	9 (32%)	9 (32%)	5 (18%)
Sparfüchse ($\hat{v}_j \geq 0,2 \hat{v}_j < 0,5$)	1 (4%)	2 (7%)	5 (18%)
Normal-Verbraucher ($\hat{v}_j \geq 0,5 \hat{v}_j < 1,5$)	14 (50%)	11 (39%)	12 (43%)
Viel-Verbraucher ($\hat{v}_j \geq 1,5 \hat{v}_j < 2,5$)	1 (4%)	3 (11%)	4 (14%)
Power-User ($\hat{v}_j \geq 2,5$)	3 (11%)	3 (11%)	2 (7%)

Die Analyse der Heizenergieverbräuche im Testgebäude, dokumentiert in Tabelle 24, offenbart aufschlussreiche Trends hinsichtlich der Heizgewohnheiten der Bewohner über die kalten Monate November und Dezember 2023 hinweg bis in den Januar 2024. Es ist festzustellen, dass in den Monaten November und Dezember 2023 jeweils noch 32% der Wohnungen keine oder nur eine geringfügige Heizung in Betrieb hatten (*Nicht-Heizer*). Dieser Anteil hat sich im Januar 2024 nahezu halbiert. Diese Entwicklung unterstreicht eine Veränderung im Heizverhalten der Bewohner,

die vermutlich auf die sinkenden Außentemperaturen zurückzuführen ist. Diese fielen von 7,7°C im November 2023 auf 3,9°C im Januar 2024. In Kapitel 5.2.5 erfolgt eine Witterungsbereinigung der Messdaten.

Der größte Anteil der Wohnungen, nämlich 43% im Januar 2024 und 39% im Dezember 2023, wies einen durchschnittlichen Energieverbrauch auf (*Normal-Verbraucher*), siehe Tabelle 24. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass die Mehrheit der Wohnungen trotz sinkender Außentemperaturen ein moderates Heizverhalten beibehalten hat bzw. eine Verschiebung von einem geringen Verbrauch (*Sparfuchs* und *Nicht-Heizer*) hin zu einem durchschnittlichen Verbrauch stattgefunden hat.

Zusammengefasst wurden 21% der Fälle im Januar 2024 und 22% im Dezember 2023 mit einem überdurchschnittlichen Energieverbrauch eingeschätzt, was eine Kategorisierung als *Viel-Verbraucher* und *Power-User* zur Folge hatte. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass bei steigender Außentemperatur die Anzahl der Wohnungen, die nicht heizen (*Nicht-Heizer*), zunimmt. Gleichzeitig lässt sich eine Abnahme der Anzahl der Wohnungen beobachten, die einen besonders hohen Energieverbrauch aufweisen (*Viel-Verbraucher*). Auch in Abbildung 46 wird ersichtlich, dass sich Verbrauchsmuster innerhalb verschiedener Nutzergruppen verändert haben. In Abbildung 46 wird der flächenbezogene Verbrauchswert aller Wohnungen für die Monate Dezember 2023 und Januar 2024 dargestellt. Zudem eingezzeichnet ist die Einordnung der Verbrauchswerte in die Verbrauchstypen. Es ist bemerkenswert, dass bei den Gruppen mit hohem Verbrauch (*Viel-Verbraucher* und *Power-User*) ein Rückgang im Verbrauch zu beobachten ist. Im Gegensatz dazu neigen die *Normal-Verbraucher* zu einem erhöhten Energieverbrauch, und auch die Gruppe der *Nicht-Heizer* hat im Durchschnitt mehr geheizt als im vorherigen Monat. Die Verschiebung der Verbrauchsmuster lässt sich insbesondere auf die gesunkenen Außentemperaturen zurückführen.

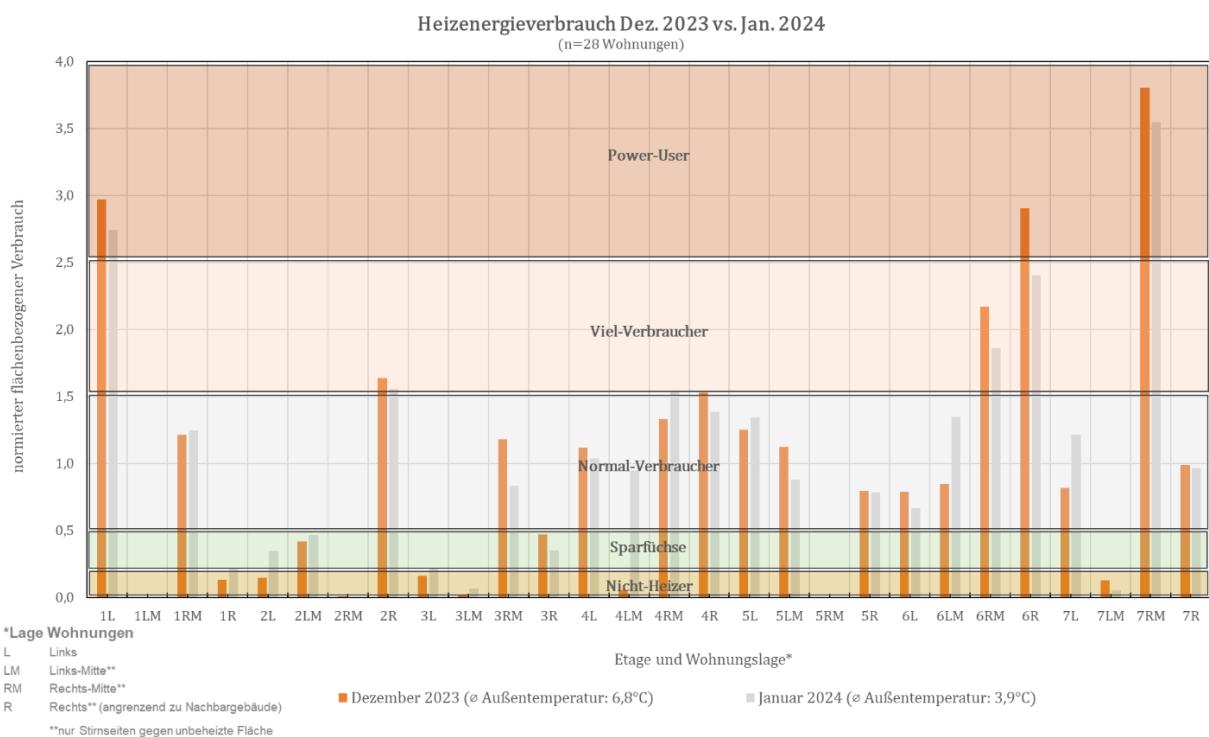


Abbildung 46: Heizenergieverbrauch nach fl. Verbrauchswert und Kennzeichnung der Heiztypen (Dez. 2023 vs. Jan. 2024)

Die Verteilung der Verbrauchstypen im Testgebäude zeigt im Betrachtungszeitraum nur geringfügige Veränderungen, wobei eine leicht steigende Tendenz zum gestiegenen Verbrauch zu beobachten ist. Dies ist auf die sinkenden Außentemperaturen (von November 2023: 7,7°C bis Januar 2024: 3,9°C) zurückzuführen. Diese Tendenz lässt sich auch bei einer Gegenüberstellung der absoluten Verbräuche in Kilowattstunden pro Quadratmeter für den Monat Januar 2024 und des Vormonats Dezember 2023 beobachten. Dabei ist insgesamt ein Anstieg des Verbrauchs, um ca. 26% festzustellen, wie Abbildung 47 verdeutlicht.

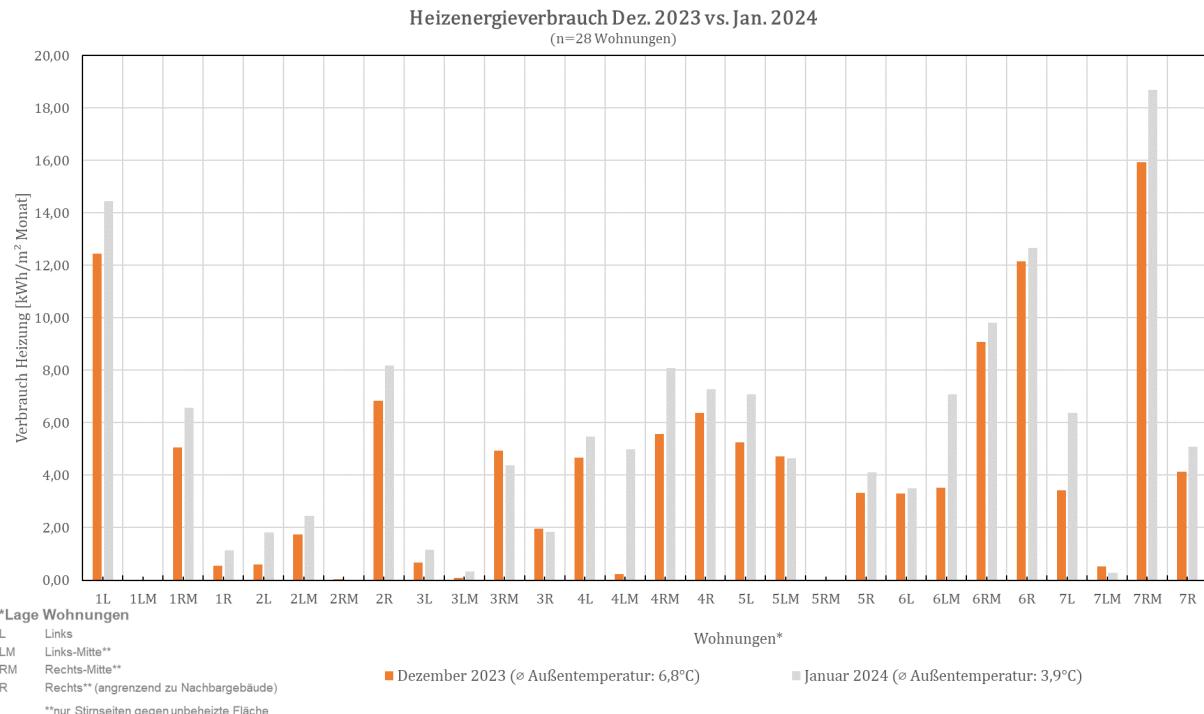


Abbildung 47: Heizenergieverbrauch der 28 Wohnungen im Testgebäude (Dez. 2023 vs. Jan. 2024)

5.2.5 Gegenüberstellung Versuchs- und Kontrollgruppe

Im Folgenden erfolgt eine detaillierte Gegenüberstellung der Heizenergieverbräuche innerhalb der Versuchsgruppe mit smarten Thermostaten und der Kontrollgruppe ohne smarte Thermostaten. Der direkte Vergleich beider Gruppen zielt darauf ab, Unterschiede im Energieverbrauch aufzudecken und mögliche Einsparpotenziale durch die Nutzung smarter Thermostate zu identifizieren. Im Rahmen der Untersuchung werden nicht nur die Verbrauchsdaten der letzten Heizperiode, sondern auch die der vorangegangenen Jahre analysiert.

Beim Vergleich der Verbräuche zwischen Wohnungen mit und ohne Smart Home Ausstattung konnte ein durchschnittlicher Mehrverbrauch von ca. 12% (Januar 2024) und ca. 9% (Dezember 2023) ohne Ausstattung festgestellt werden (s. Abbildung 48 nächste Seite). In die Berechnung wurden Leerstände in einzelnen Monaten nicht einbezogen, sodass diese keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Diese Einsparungen würden sich zum Teil mit den in Kapitel 2.4.3 dargestellten potenziellen Einsparungen decken. Im Rahmen der Evaluierung potenzieller Einsparungen durch das Smart Home Thermostat wurden weitere Analysen durchgeführt, wobei ein Vergleich der Vorjahreswerte der Gruppe mit und ohne Smart Home Ausstattung im Zentrum stand.

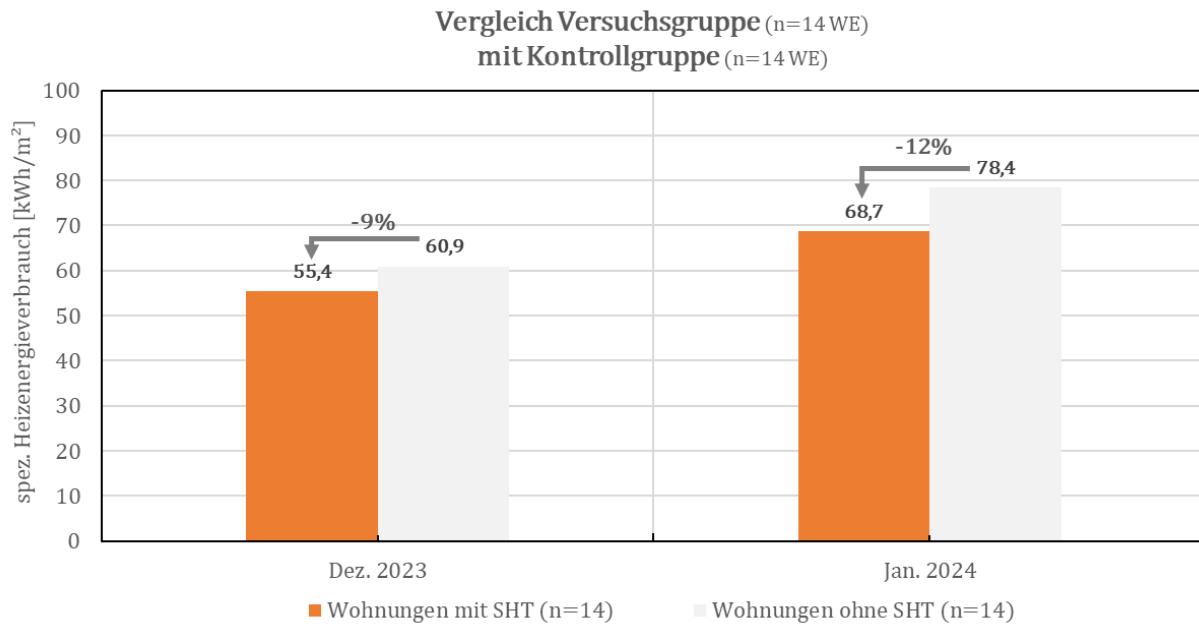


Abbildung 48: Vergleich Versuchsgruppe mit SHT und Kontrollgruppe ohne SHT (Dez. 2023 & Jan. 2024)

In der nachfolgenden Tabelle 25 werden die Heizenergieverbräuche zweier Gruppen dargestellt. Dabei umfasst eine Gruppe die Wohnungen, die mit Smart Home Thermostaten ausgestattet wurden. Des Weiteren beinhaltet die Tabelle Daten zu den Monaten der Heizperiode 2022/2023, bevor die smarten Thermostate installiert wurden. Um eine faire Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Verbrauchswerte jeweils auf die Wohnfläche normalisiert. Die beiden Gruppen umfassen jeweils 14 Wohnungen. Eine Gruppe dient somit als Kontrollgruppe (s. Kapitel 5.1.1 Methodik und Untersuchungsdesign).

Tabelle 25: Gegenüberstellung der spez. Verbräuche Gruppe mit und ohne smarte Thermostate (Heizperiode 22/23 vs. 23/24)

Zeitraum Monat (Ø Außentemperatur)	Versuchsgruppe mit SHT (n=14 Wohnungen)	Kontrollgruppe ohne SHT (n=14 Wohnungen)	Unterschiede beider Gruppen (%)
Nov. 2022 (9,2°C) *	23,5 kWh/m²	30,3 kWh/m²	-22,6%
Dez. 2022 (4,0°C) *	83,5 kWh/m²	92,3 kWh/m²	-9,5%
Jan. 2023 (5,4°C) *	52,1 kWh/m²	69,5 kWh/m²	-25,0%
Nov. 2023 (7,7°C)	35,4 kWh/m²	60,6 kWh/m²	-41,5%
Dez. 2023 (6,8°C)	55,4 kWh/m²	60,9 kWh/m²	-9,0%
Jan. 2024 (3,9°C)	68,7 kWh/m²	78,4 kWh/m²	-12,4%

* Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine smarten Thermostate (SHT) in der Versuchsgruppe installiert. Die Darstellung dieser Kennzahlen dient dem Vergleich der Versuchs- und Kontrollgruppe vor der Installation der SHT.

In der Tabelle 25 werden die prozentualen Unterschiede zwischen beiden Gruppen dargestellt. Dabei stehen negative Prozentwerte für einen Mehrverbrauch der Kontrollgruppe ohne smarte

Thermostate gegenüber der Gruppe mit smarten Thermostaten. Positive Prozentwerte würden für eine Einsparung der Kontrollgruppe stehen. Bei einer Gegenüberstellung der Daten wird ersichtlich, dass die Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate stets einen Mehrverbrauch aufweist, was auch bereits vor der Installation der smarten Thermostate der Fall war. Dies lässt sich anhand der Daten in Tabelle 25 aus der Heizperiode 2022/2023 von November 2022 bis Januar 2023 belegen. Der durchschnittliche Mehrverbrauch in der Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate in der Heizperiode 2022/2023 betrug etwa -19% und ist in der Heizperiode 2023/2024 annähernd gleichgeblieben, mit einem mittleren Mehrverbrauch von ca. -21%. Da in derselben Heizperiode Vergleiche angestellt wurden, kann der Effekt der Außentemperatur vernachlässigt werden. Diese Resultate werfen die Frage auf, ob die Effektivität der smarten Thermostate hinsichtlich der Energieeinsparung gegeben ist.

Des Weiteren wurden die Entwicklungen der Verbräuche innerhalb der Versuchsgruppen im Vergleich zu den beiden Heizperioden untersucht. Dies bedeutet einen Vergleich der Versuchsgruppe vor und nach der Installation der smarten Thermostate. Um die Verbräuche aus den Vorjahren vergleichen zu können, müssen diese zunächst witterungsbereinigt werden. Im Rahmen der Untersuchung wird der Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Verbrauch analysiert und mit einem langjährigen Mittel der letzten 20 Jahre für den jeweiligen Standort normiert. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten nach *VDI 3807 Blatt 1* [117] beschrieben.

Der Verbrauch an Heizenergie in Gebäuden ist maßgeblich von der Außentemperatur abhängig. In Deutschland führen unterschiedliche Wetterverhältnisse dazu, dass der Energieverbrauch für Heizung für dasselbe Gebäude variieren kann. So ist bei wärmeren Temperaturen im Winter ein geringerer Heizenergieverbrauch in der Regel erforderlich als im Vorjahr. Daher ist es schwierig, den Heizenergieverbrauch verschiedener Jahre direkt miteinander zu vergleichen, ohne die Wetterunterschiede zu berücksichtigen. Um einen fairen Vergleich anstellen zu können, ist es erforderlich, den Verbrauch an das jeweilige Wetter anzupassen. Dies wird als Witterungs- bzw. Klimabereinigung bezeichnet. Dies erfolgt mittels sogenannter Gradtagszahlen. Diese zeigen, wie kalt es über einen bestimmten Zeitraum im Vergleich zu einer festgelegten Raumtemperatur war. Auf diese Weise kann der Energieverbrauch witterungsbereinigt verglichen werden. Die Berechnung erfolgt durch Aufsummierung der Differenzen zwischen einer Innenraumtemperatur von 20°C und der täglichen Außentemperatur, wobei lediglich Tage mit einer Außentemperatur unter 15°C (Heizgrenze) berücksichtigt werden (s. Formel (12)).

$$Gtz_{20/15} = \sum_1^z (t_i - t_a) \quad (12)$$

- $Gtz_{20/15}$: Gradtagszahl des jeweiligen gewählten Zeitraums [Kd]
 z: Anzahl der gemessenen Heiztage im betrachteten Zeitraum, Heizgrenze, hier 15°C
 t_i : Mittlere angenommene Raumtemperatur (Innentemperatur), hier 20°C
 t_a : Mittlere Außentemperatur des jeweiligen Heitzages [°C]

Um den aktuellen Energieverbrauch klimabereinigt zu ermitteln, werden die Gradtagszahlen $Gtz_{20/15}$ eines Standorts in Relation zum langjährigen Durchschnitt $Gtz_{20/15m}$ des Standorts gesetzt, welcher vom Deutschen Wetterdienst an mehr als 500 Messstationen erfasst wird [118]. Die Be- trachtung des langjährigen Mittels der Gradtagszahlen $Gtz_{20/15m}$ ermöglicht einen Vergleich der Werte über einen Zeitraum von 20 Jahren. Auf diese Weise lassen sich für jeden Standort spezifi- sche Werte ermitteln, die eine Anpassung des Verbrauchs an die jeweiligen Klimafaktoren ermög- lichen. Das Verhältnis der Gradtagszahlen erlaubt die Berechnung des klimabereinigten Ver- brauchs für den jeweiligen Zeitraum und Standort durch Multiplikation des unbereinigten Ver- brauchs. Die nachfolgende Formel veranschaulicht dies (13):

$$E_{Vhb} = E_{Vh} * \frac{Gtz_{20/15m}}{Gtz_{20/15}} \quad (13)$$

E_{Vhb} : witterungsbereinigter Heizenergieverbrauchs einer Wohnung [kWh/Zeitraum]

E_{Vh} : unbereinigter Heizenergieverbrauchs einer Wohnung [kWh/Zeitraum]

$Gtz_{20/15m}$: Gradtagszahl des langjährigen Mittel für den jeweiligen Standort [Kd]

$Gtz_{20/15}$: Gradtagszahl des jeweiligen Zeitraums [Kd]

In Abbildung 49 werden die witterungsbereinigten spezifischen Verbräuche pro Wohnfläche für beide Versuchsgruppen mit und ohne smarte Thermostate dargestellt. Die Darstellung umfasst je- weils die Heizperioden 2022/2023 und 2023/2024, welche den Zeitraum von November bis Januar umfassen. Darüber hinaus ist auf der Sekundärachse die jeweilige Außentemperatur des Monats dargestellt. Auch im Vergleich der Versuchsgruppe mit smarten Thermostaten und der Kontroll- gruppe ohne Thermostate zeigt sich, dass die Kontrollgruppe in beiden Heizperioden einen höhe- ren Energieverbrauch aufweist. Dies deckt sich auch mit den Kennwerten in Tabelle 25.

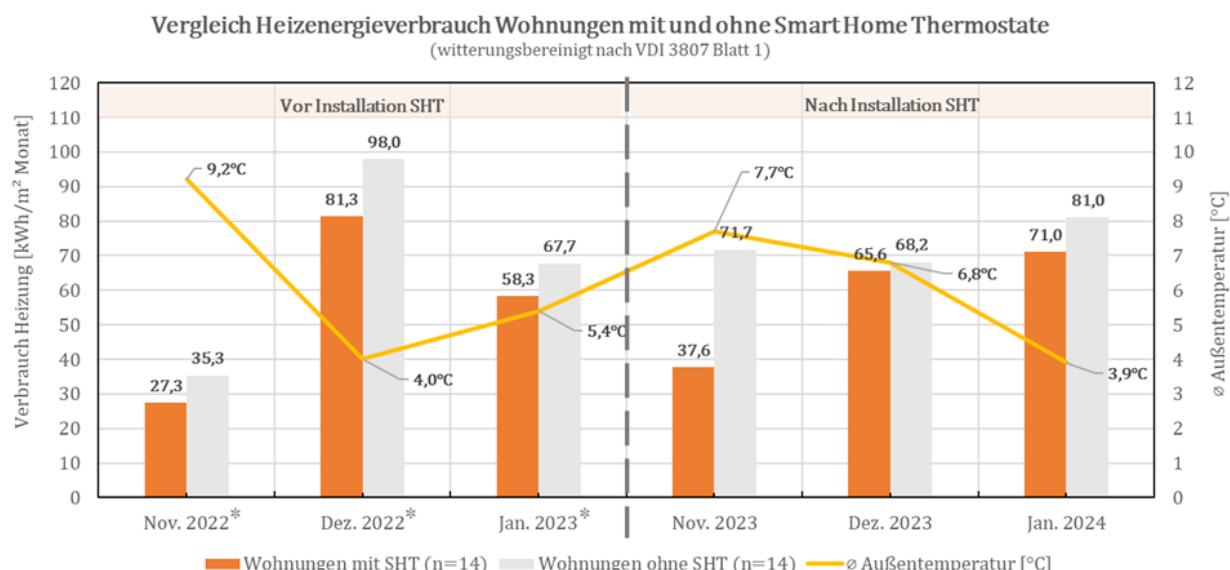


Abbildung 49: Witterungsbereinigter Verbrauch Wohnungen mit und ohne Smart Home (Installation der SHT im Oktober 2023)*

* Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine smarten Thermostate (SHT) in der Versuchsgruppe installiert. Die Darstellung dieser Kennzahlen dient dem Vergleich der Versuchs- und Kontrollgruppe vor der Installation der SHT.

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Veränderungen der Versuchsgruppe mit smarten Thermostaten, wie in Abbildung 50 dargestellt, lassen sich die Veränderungen im Vergleich zu den Vorjahren erkennen. Im Vergleich zum Vorjahr ist im November ein Mehrverbrauch von +38% und im Januar von +22% zu verzeichnen. Im Dezember konnte eine Einsparung von -19% erzielt werden. Im Durchschnitt über die drei Monate wurde für die Versuchsgruppe mit smarten Thermostaten ein Mehrverbrauch von ca. +13% im Vergleich zum Vorjahr festgestellt. Ein ähnlicher Verlauf ist ebenfalls in Abbildung 51 für die Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate zu erkennen. In der Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate beträgt der durchschnittliche Mehrverbrauch über die drei Monate +22% gegenüber der Heizperiode aus dem Vorjahr.

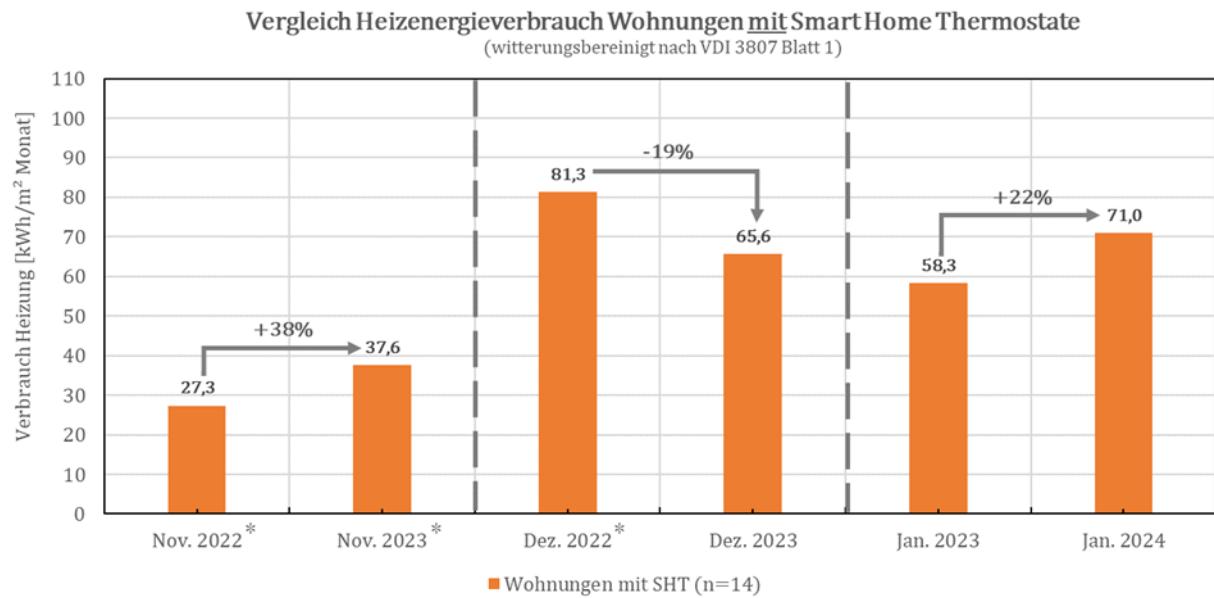


Abbildung 50: Vergleich Heizenergieverbrauch Wohnungen mit Smart Home Thermostate (witterungsbereinigte Verbräuche)*

* Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine smarten Thermostate (SHT) in der Versuchsgruppe installiert. Die Darstellung dieser Kennzahlen dient dem Vergleich der Versuchs- und Kontrollgruppe vor der Installation der SHT.

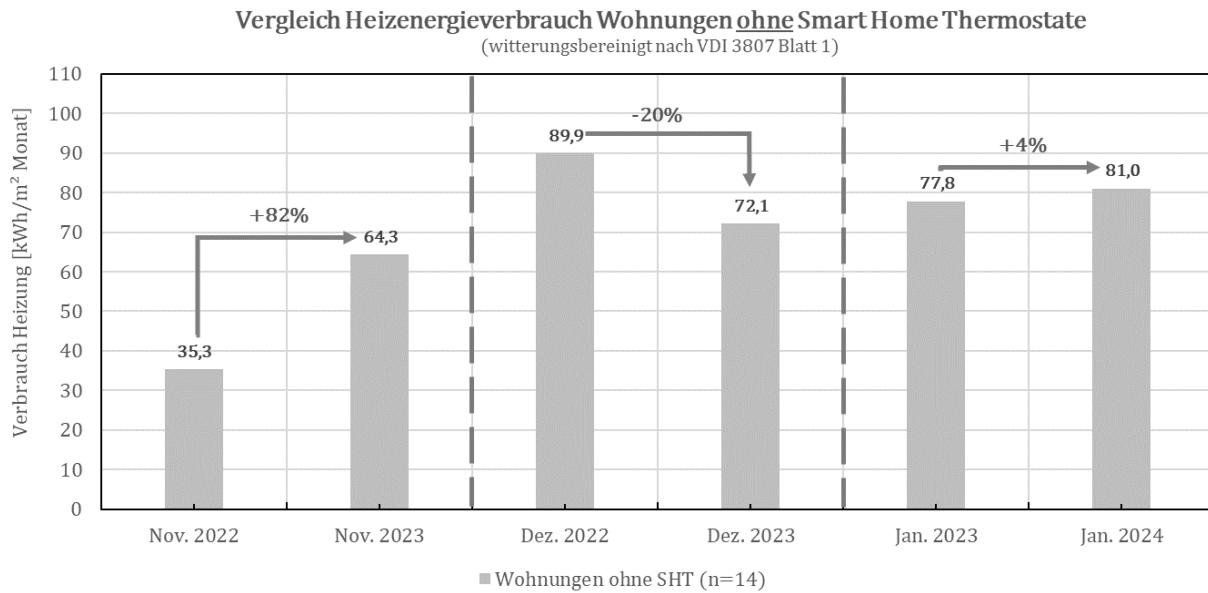


Abbildung 51: Vergleich Heizenergieverbrauch Wohnungen ohne Smart Home Thermostate (witterungsbereinigte Verbräuche)

Ein möglicher Grund für den Anstieg des Verbrauchs beider Gruppen im Vergleich zum Vorjahr könnte in der Energiekrise der vergangenen Jahre begründet sein. Gemäß Angaben des Umweltbundesamtes sind die Gasverbräuche im vierten Quartal des Jahres 2022 um ca. -20% gesunken [119]. Eine Entspannung der Gasmangellage könnte einen Teil des Anstiegs erklären, wodurch die Einsparung auf eine gesellschaftliche Wirkung zurückzuführen wäre.

Die Analyse des Heizenergieverbrauchs lässt zwei Aussagen zu. Einerseits konnte eine Einsparung der Gruppe mit smarten Thermostaten im Vergleich zur Kontrollgruppe nachgewiesen werden. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass die Kontrollgruppe bereits im Vorjahr, als noch keine smarten Thermostate installiert waren, einen höheren Verbrauch aufgewiesen hat. Die zweite Aussage bezieht sich auf den Vergleich der Versuchs- und der Kontrollgruppe im Hinblick auf die Veränderung zu den Vorjahren, wobei keine Einsparungen durch den Einsatz von smarten Thermostaten nachgewiesen werden konnten. Stattdessen wurde ein Mehrverbrauch festgestellt, der vermeintlich auf die Energiekrise der vergangenen Jahre zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse lassen keine gesicherten Aussagen über mögliche Einsparungen durch die allgemeine Nutzung smarter Thermostate zu. Vielmehr zeigt sich, dass die beiden Gruppen trotz gleicher Wohnungsanzahl und Wohnungsgröße nicht direkt vergleichbar sind. Dies lässt den Schluss zu, dass das individuelle Heizverhalten einen großen Einfluss auf den Verbrauch hat. Daher wird im weiteren Verlauf der Arbeit das Heizverhalten anhand der vorliegenden Messdaten der smarten Thermostate (Soll- und Ist-Temperaturen, Ventilstellungen und Heizdauer) ausgewertet und eine Einteilung in Heiztypen vorgenommen. Diese Heiztypen werden anschließend mit den Verbräuchen korreliert, um festzustellen, welches Verhalten den größten Einfluss auf den Verbrauch hat (s. Kapitel 5.2.8).

5.2.6 Warmwasserverbrauch

Im Rahmen der Datenerfassung stehen auch Verbrauchsdaten zum Warmwasser jeder Wohnung zur Verfügung, welche im Folgenden analysiert und in Verhältnis zum Heizenergieverbrauch gesetzt werden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass kein direkter Zusammenhang zwischen den smarten Thermostaten und den Verbräuchen für Warmwasser besteht. Dennoch hat der Warmwasserverbrauch einen Einfluss auf die Energiekosten und muss daher sinnvoll in energierelevante Feedbacks integriert werden.

Bei Betrachtung der Heizenergieverbräuche im Verhältnis zu den Warmwasserverbräuchen zeigt sich, dass diese ebenfalls je Wohnung deutlich variieren. In Abbildung 52 sind beispielhaft die Anteile der Verbräuche für Warmwasser und Heizung für Januar 2024 der Versuchsgruppe dargestellt. Da der Warmwasserverbrauch direkt von der Anzahl der Personen im Haushalt abhängt, wurden die Werte auf die Anzahl der Personen sowie auf die beheizte Wohnfläche normiert. Die Normierung der Verbräuche zeigt keinen besonderen Effekt. Stattdessen wird ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen Heizung- und dem Warmwasserverbrauch innerhalb der Wohnungen stark schwankt (s. Abbildung 52). Im Anhang finden sich zudem die absoluten Verbräuche für Heizung und Warmwasser, exemplarisch dargestellt anhand der Messdaten von Januar 2024 (s. Abbildung A 7).

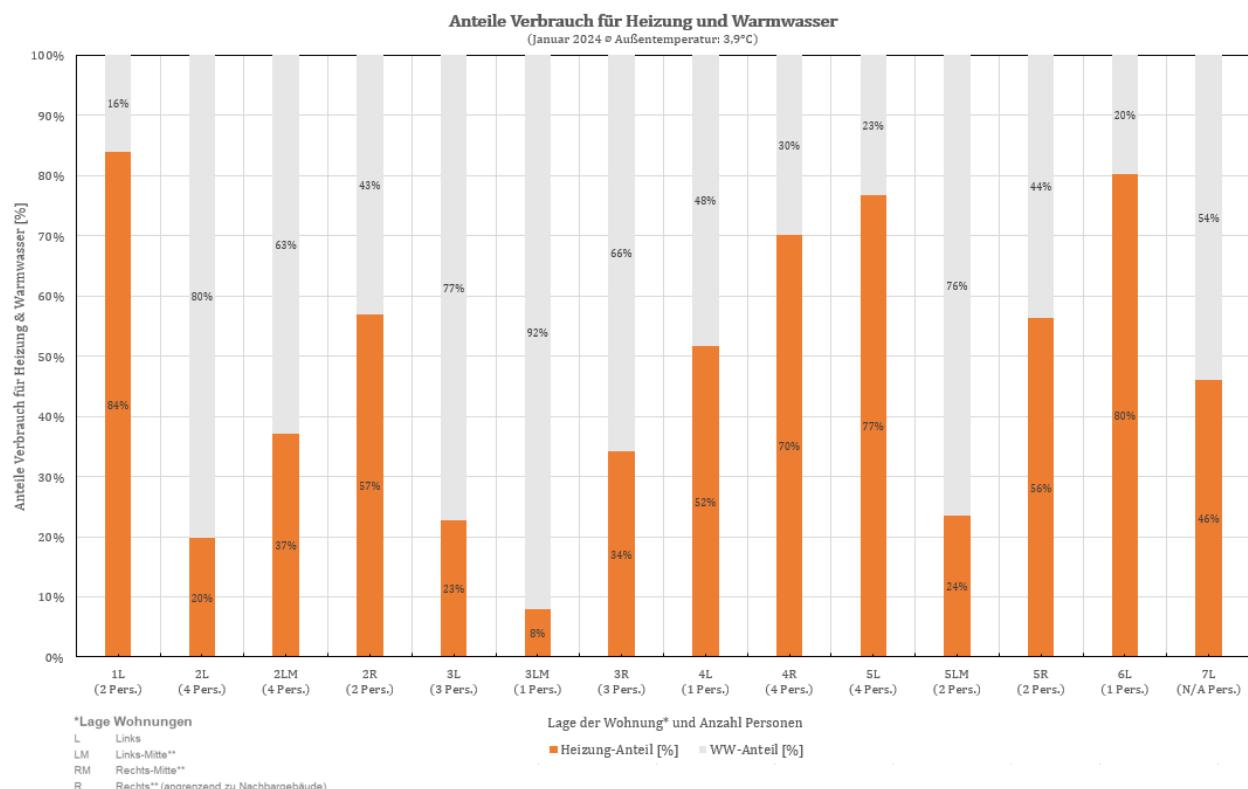


Abbildung 52: Anteile Verbrauch für Heizung und Warmwasser normiert nach Anzahl Personen und Wohnfläche (Jan. 2024)

Die Abbildung 53 präsentiert den prozentualen Anteil des gesamten Verbrauchs für die Heizung und Warmwasser des gesamten Gebäudes. Es lässt sich ableiten, dass der Anteil der Heizung in Abbildung 53 maßgeblich von der Außentemperatur in der Heizperiode 2023/2024 beeinflusst wird. Sofern die Außentemperatur steigt, erhöht sich der Anteil für die Warmwasserbereitung.

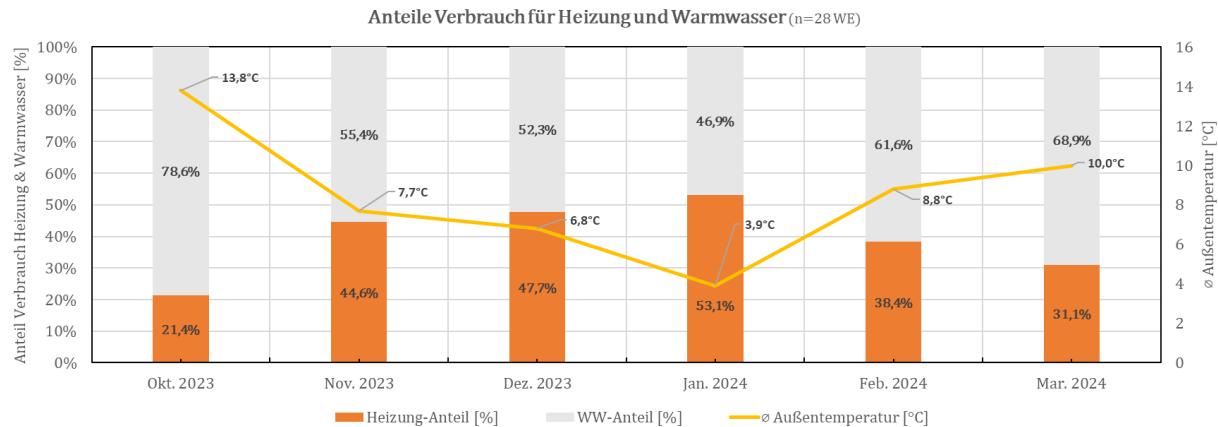


Abbildung 53: Anteile Verbräuche für Heizung und Warmwasser im Verhältnis zur Außentemperatur im Testgebäude

Lediglich in besonders kalten Monaten, wie beispielsweise dem Januar, übersteigt der Verbrauch für die Heizung den der Warmwasserbereitung (s. Abbildung 53). In der Heizperiode 2023/2024 betrug der gemittelte Anteil der Heizung am Gesamtverbrauch rund 40% und der Anteil für die Bereitstellung von Warmwasser lag bei ca. 60%. Der signifikant hohe Anteil für die Warmwasseraufbereitung wird auch in der Darstellung der absoluten Verbräuche in Abbildung 54 ersichtlich. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass der absolute Verbrauchswert für Warmwasser eine geringere Volatilität aufweist als der für Heizung. Der Verbrauch an Warmwasser in diesem Gebäude kann folglich als nahezu konstant bezeichnet werden, sodass sich ein durchschnittlicher Verbrauch von ca. 8.800 kWh pro Monat in der Heizperiode 2023/2024 ergibt.

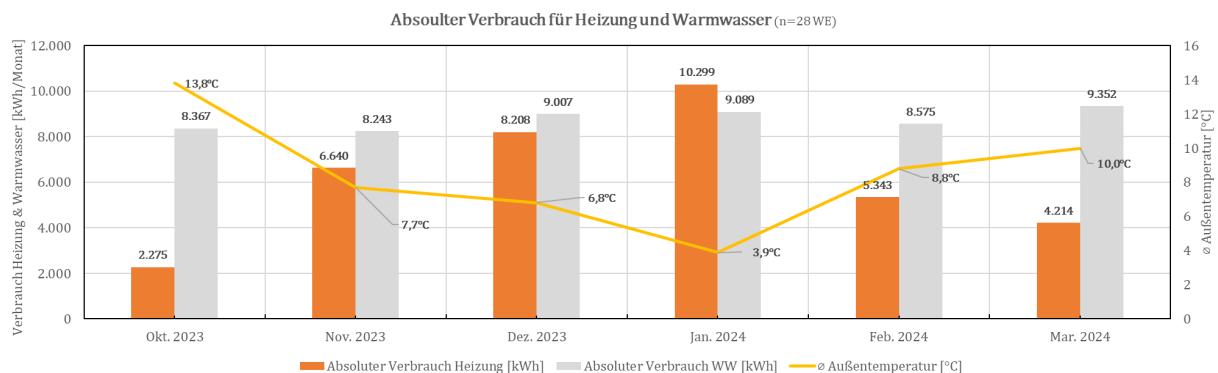


Abbildung 54: Absoluter Verbrauch für Heizung und Warmwasser im Testgebäude

Unter der Voraussetzung, dass der Warmwasserverbrauch über das Jahr hinweg bei gleichbleibender Anzahl an Bewohnern annähernd konstant ist, lässt sich aus dem durchschnittlichen Verbrauch²³ ein spezifischer Jahresverbrauch von ca. 54,2 kWh pro m² Wohnfläche²⁴ und Jahr ableiten. Die Angabe bezieht sich nur auf den Warmwasserverbrauch. Es handelt sich um den vom Messdienstleister ermittelten Endenergieverbrauch.

Eine Veröffentlichung [120] des *Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung* (BBSR) zeigt, dass die Auswertungen von realen Verbrauchsdaten der Messdienstleistungsunternehmen *Techem* und *Brunata* einen durchschnittlichen Warmwasserverbrauch in Mehrfamilienhäusern

²³ Durchschnittliche Warmwasserverbrauch: 8.772 kWh pro Monat; basiert auf den Werten von Okt. 2023-März 2024

²⁴ Wohnfläche des Testgebäudes: 1.941 m² (28 Wohneinheiten)

zwischen 9 und 13 kWh/m²a ergeben. Des Weiteren kann der Trinkwarmwasserbedarf mithilfe einer Näherungsgleichung, welche auf Basis der DIN V 18599 basiert, für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser bestimmt werden, siehe Formel (14) [120].

$$q_{tw} = \left\{ 15 - \left(A_{N,WE,m} * 0,04 \frac{1}{m^2} \right) \right\} \quad (14)$$

q_{tw} : nutzflächenbezogener Trinkwarmwasserwärmeverbrauch [kWh/m²a]

$A_{N,WE,m}$: mittlere Nutzfläche der Wohneinheiten des Gebäudes [m²]

Nebenbedingung: $q_{tw} \geq 7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Die Anwendung der Formel erlaubt die Ermittlung eines theoretischen Bedarfs von 12,2 kWh/m²a für den Trinkwarmwasserbedarf des Testgebäudes. Bei einer Gegenüberstellung des realen Verbrauchs von 54,2 kWh/m²a mit dem errechneten Bedarf wird ersichtlich, dass der reale Verbrauch um mehr als den Faktor drei höher ist als der Normbedarf.

Letzteres veranschaulicht, dass der Anteil des Warmwasserverbrauchs im Testgebäude einen bedeutenden Faktor darstellt. Der Anteil des Verbrauchs für die Heizung könnte zum einen niedriger sein, da das Gebäude bereits teilsaniert wurde und durch die Bauform (Plattenbau) ein günstiges Verhältnis zwischen Hüllfläche und Gebäudevolumen (A/V-Verhältnis) aufweist. Weitere Einflussfaktoren für den hohen Warmwasserverbrauch im Vergleich zur Norm könnten Fehleinstellungen an der Heizungsanlage (z. B. zu hohe Temperaturen) oder ein hoher Verbrauch der Endnutzer (beispielsweise durch Duschen) sein. Aus diesem Grund wird dieser Aspekt bei den geplanten User Feedback berücksichtigt. Ebenso werden im weiteren Projektverlauf Energiesparmaßnahmen untersucht, wie z. B. der Einsatz von Sparköpfen oder die Absenkung der Temperatur bzw. die Anpassung der Zirkulationspumpe.

5.2.7 Luftfeuchtigkeit

Die smarten Thermostate erfassen zusätzlich die relative Luftfeuchtigkeit und ermöglichen die Berechnung des Schimmelpilzrisikos. Schimmelpilzwachstum in Innenräumen stellt eine potenzielle Gefahr für die Bausubstanz und die Gesundheit der Bewohner dar [121]. Die vorliegende Bewertung erlaubt die Ableitung präventiver Maßnahmen, wie etwa die Optimierung der Lüftungs- und Heizgewohnheiten, mit dem Ziel, das Risiko der Schimmelpilzbildung zu reduzieren und somit die Wohnungsumgebung sicherer und gesünder zu gestalten. Im Folgenden werden die Methoden zur Bewertung der Raumluftfeuchte und -temperatur sowie die Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren und dem Auftreten von Schimmelpilzbefall erörtert.

Luftfeuchtigkeit wird allgemein unterschieden zwischen der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit. Die relative Luftfeuchtigkeit drückt das Verhältnis der aktuellen absoluten Luftfeuchtigkeit zur maximal möglichen absoluten Luftfeuchtigkeit bei gleicher Temperatur aus. Sie wird in Prozent angegeben. Der Sättigungspunkt (100% relative Feuchte) ist die maximale Wasserdampfkonzentration, die die Luft bei einer bestimmten Temperatur enthalten kann. Erreicht die Luft 100% relative Feuchte, ist sie gesättigt und weitere Wasserdampzfzufuhr führt zu Kondensation (z. B. Tau

oder Wasserbildung). Die absolute Feuchte bezeichnet die tatsächlich in der Luft enthaltene Wasserdampfkonzentration. Sie wird üblicherweise in Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter Luft (g/m^3) angegeben (s. Formel (17)). [122]

Besonders kritische Stellen in Räumen sind Flächen, die z. B. durch Möbel verdeckt sind und hohe Temperaturunterschiede zwischen Raummitte und Außenwand aufweisen. Dies können im Regelfall sogenannte Wärmebrücken sein. Wärmebrücken sind spezielle Bereiche in der wärmeübertragenden Hülle eines Gebäudes, die aufgrund einer höheren Wärmestromdichte mehr Energie verlieren als benachbarte ungestörte Bauteile. Diese Bereiche werden oft als gestörte Bauteile bezeichnet und stellen Schwachstellen im Wärmeschutz dar, die zu erhöhten Transmissionswärmeverlusten führen können. Mit steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden wurde die Bedeutung von Wärmebrücken als thermische Schwachstellen zunehmend erkannt. Neben energetischen Aspekten beeinflussen Wärmebrücken auch die hygienischen Bedingungen im Innenraum. [123]

Wärmebrücken lassen sich in drei Kategorien einteilen: materialbedingte, konstruktionsbedingte und geometriebedingte Wärmebrücken. Zu den typischen Bauwerken mit Wärmebrücken gehören Fensteranschlüsse, Verbindungen von Innenwänden mit Außenwänden, Böden oder Decken. Ebenfalls die Verbindung der Bodenplatte mit Außenwänden und Fundamenten, Deckenplatten, die in Außenwände hineinragen, Innen- und Außenecken von Fassaden, sowie die Anschlüsse auskragender Bauteile wie Balkone oder Vordächer und die Eckausbildung von Außenwänden an Decken und Dächern. Auch Durchdringungen wie Versorgungsleitungen stellen häufig Wärmebrücken dar. [123]

Durch die höhere Wärmestromdichte sinken die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite der Bauteile, was zu verschiedenen Problemen führen kann. Der höhere Wärmeverlust kann zu einem Kältegefühl im Raum führen und Strahlungsasymmetrien erzeugen, die insgesamt die Behaglichkeit mindern. Aus energetischer Sicht führen Wärmebrücken zu höheren Verlusten in den betroffenen Bereichen, was die Effizienz der Heizung beeinträchtigt. Hygienisch ist die Abkühlung durch Wärmebrücken problematisch, da sie zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte in der raumseitigen Luftsicht führt, was die Bildung von Tauwasser und Schimmelpilzen begünstigt - ein Risiko, das ab etwa 80% relativer Luftfeuchte besteht. Wärmebrücken sind aus bauphysikalischer Sicht problematisch, da sie nicht nur den Energieverbrauch eines Gebäudes erhöhen, sondern auch die Gefahr der Kondensatbildung und damit der Schimmelpilzbildung an diesen kälteren Innenflächen. Daher ist es wichtig, bei der Planung und Ausführung von Gebäuden auf eine möglichst homogene und gut gedämmte thermische Hülle zu achten, um Wärmebrücken zu minimieren. [122]

Als Indikator für die Schimmelgefahr wird in den meisten Fällen die relative Feuchte herangezogen. Für ein gesundes Wohnklima ist eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 60% in der Wohnung empfehlenswert [121]. Je nach Oberflächenmaterial (z. B. Außenwand) kann es bei relativen Luftfeuchten von über etwa 80%, die über einen längeren Zeitraum auf den Oberflächen vorhanden sind, zur Schimmelpilzbildung kommen. Optimale Wachstumsbedingungen treten immer dann auf, wenn es zur Kondensation im oder auf dem Material kommt. Grundlage bietet dabei

die Norm 4108-8 zur Vermeidung von Schimmelwachstum [124]. Schlafräume sollten eine mittlere Raumlufttemperatur von mindestens 16°C aufweisen, um die Feuchteabgabe der schlafenden Personen zu berücksichtigen. Ausnahmen von dieser Regel sind nur zulässig, wenn die Fenster die ganze Nacht geöffnet bleiben [125]. Die nachfolgende Abbildung 55 zeigt den Median der relativen Feuchte für einen Monat, welcher durch die smarten Thermostate in jedem Raum mit Heizkörper erfasst wurde. Dadurch wird gewährleistet, dass die Messdaten über einen längeren Zeitraum im jeweiligen Raum der Wohnung vorliegen.

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	40%	37%	45%		37%
2	58%	63%		62%	63%
3	64%		72%	82%	69%
4	53%		53%	55%	45%
5	72%	62%	73%	69%	69%
6	68%		72%	69%	72%
7	51%	53%		57%	55%
8	45%		45%	45%	43%
9	64%	67%	65%	56%	55%
10	46%	59%		53%	46%
11	56%		57%	64%	54%
12	55%		56%	55%	52%
13	54%		54%	54%	55%
14	61%		66%	55%	33%

Abbildung 55: Relative Luftfeuchte [%] der Wohnungen je Raum basierend auf dem monatlichen Median - Jan.2024

Die Auswertung der erfassten Messwerte erlaubt die Identifikation von kritischen Räumen bzw. Wohnungen, die über einen längeren Zeitraum eine hohe relative Luftfeuchtigkeit aufweisen. Zur weiteren Bewertung werden im Folgenden der Partialdruck²⁵, der Sättigungsdruck²⁶ sowie die absolute Feuchte²⁷ mithilfe der durch das smarte Thermostat erfassten Messwerte ermittelt. Die Näherungsformeln für den Partialdruck (s. Formel (15)) und den Sättigungsdruck (s. Formel (16)) erlauben die Bestimmung der absoluten Feuchte in Gramm pro Kubikmeter Luft für jeden Raum (s. Formel (17)).

$$\rho_D = \varphi * \rho_{sat}(\theta_{Raum}) \quad (15)$$

$$\rho_{sat}(\theta_{Raum}) = 610,5 * e^{\frac{17,269 * \theta_{Raum}}{237,3 + \theta_{Raum}}} \quad (16)$$

²⁵ Der Wasserdampfpartialdruck bezeichnet den Anteil des Gesamtdrucks der Luft, der durch Wasserdampf verursacht wird [122].

²⁶ Der Sättigungsdruck bezeichnet die maximale Menge an Wasserdampf, die Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann, bevor Kondensation eintritt und Wasser aus der Luft als Tau ausfällt [122].

²⁷ Die absolute Feuchte oder auch Wasserdampfkonzentration stellt ein Maß für die tatsächliche Masse an Wasserdampf in der Luft dar [122].

ρ_D : Wasserdampfpartialdruck [Pa]

$\rho_{sat}(\theta_{Raum})$: Wasserdampfsättigungsdruck bei Raumtemperatur gilt für $\theta_{Raum} \geq 0^\circ\text{C}$ [Pa]

φ : Relative Luftfeuchtigkeit [%]

θ_{Raum} : Lufttemperatur im Raum [$^\circ\text{C}$]

$$c_D = \frac{\rho_D}{R_D * T} \quad (17)$$

c_D : Absolute Feuchte – Wasserdampfkonzentration [kg/m^3]

R_D : Spezifische Gaskonstante für Wasserdampf ($R_D = 461,5$) [$\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$]

T: Thermodynamische Temperatur ($T = \theta_{Raum} + 273,15$) [K]

Die berechnete Wasserdampfkonzentration aller Räume sind in der nachfolgenden Abbildung 56 dargestellt. Die in berechneten Partialdrücke aller Räume sind in Abbildung A 8 im Anhang zu finden.

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	6,6	6,5	6,5		7,5
2	9,4	8,6		8,9	9,8
3	9,0			9,4	10,5
4	9,6			9,2	9,4
5	11,9	10,8	11,6	11,0	11,1
6	10,4		10,3	9,7	10,2
7	8,5	8,9		8,8	8,8
8	7,8		7,8	7,5	7,5
9	11,8	11,9	10,4	11,5	11,5
10	9,0	9,6		8,8	8,5
11	10,9		10,1	9,6	9,4
12	10,4		10,4	9,4	9,8
13	9,4		9,1	8,2	8,6
14	10,8		10,1	9,4	10,7

Abbildung 56: Wasserdampfkonzentration der absoluten Feuchte [g/m^3] - Jan. 2024

Die Kennwerte für die absolute Feuchte basieren auf dem monatlichen Median, wobei hier exemplarisch der Januar 2024 betrachtet wird (s. Abbildung 56). Bei einer Betrachtung aller Wohnungen fällt auf, dass die absolute Feuchte zwischen ca. 6 und 12 Gramm pro Kubikmeter Luft schwankt. Insbesondere die Wohnungen und Räume mit einer hohen relativen Feuchte (s. Abbildung 55) weisen tendenziell eine hohe absolute Feuchte auf. Dennoch muss auch die Raumtemperatur berücksichtigt werden, da bei einer höheren Raumtemperatur auch mehr Wasser in der Luft aufgenommen werden kann (s. Ist-Temperaturen in Abbildung 37). Ein Beispiel hierfür ist die Wohnung 9, die trotz einer durchschnittlichen hohen absoluten Feuchte von über $11 \text{ g}/\text{m}^3$ auch hohe Ist-Temperaturen aufweist. Aus diesem Grund wird zur Bewertung der Schimmelgefahr die niedrigste

zulässige Innenoberflächentemperatur berechnet, wobei die folgende Formel zu berücksichtigen ist (s. Formel (18)).

Die Berechnung der niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperatur erfolgt unter Berücksichtigung des kritischen Wasserdampfsättigungsdrucks an der raumseitigen Bauteiloberfläche. Dieser wird in der Regel mit 80% relativer Luftfeuchtigkeit angesetzt (s. DIN 4108-8), um einem Schimmelbefall an der Bauteilinnenoberfläche vorzubeugen. Die nachfolgende Näherungsformel nach [122] erlaubt die Bestimmung der niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperatur.

$$\theta_{Innen,zul.} = \begin{cases} 237,3 * \ln\left(\frac{\rho_{sat}}{610,5}\right) & \rho_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa} \\ 17,269 - \ln\left(\frac{\rho_{sat}}{610,5}\right) & \\ 265,5 * \ln\left(\frac{\rho_{sat}}{610,5}\right) & \rho_{sat} < 610,5 \text{ Pa} \\ 21,875 - \ln\left(\frac{\rho_{sat}}{610,5}\right) & \end{cases} \quad (18)$$

mit

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_D}{\varphi_{max}}$$

$\theta_{Innen,zul.}$: niedrigste zulässige Innenoberflächentemperatur [°C]

ρ_{sat} : kritischer Wasserdampfsättigungsdruck an der raumseitigen Bauteiloberfläche [Pa]

ρ_D : raumseitiger Wasserdampfpartialdruck [Pa], siehe Formel (15)

φ_{max} : maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit, ($\varphi = 80\%$) [%]

In Abbildung 57 sind die niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperaturen für jeden Raum der Wohnungen aufgeführt. Sobald diese Temperatur erreicht wird, besteht ein Risiko der Schimmelbildung ($\varphi > 80\%$). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich dabei um ein vereinfachtes Verfahren handelt, bei dem Wandaufbauten und Wärmeleitfähigkeit vernachlässigt werden. Das primäre Ziel der Bewertung besteht in der Identifikation von Räumlichkeiten, die potenziell von Schimmel befallen sein könnten, und auf deren regelmäßiges Lüften und Heizen als Maßnahme hinweisen. Die in Abbildung 57 dargestellten Kennwerte wurden ebenfalls wie die Abbildungen zuvor über eine bedingte Formatierung eingefärbt. Dabei entsprechen die roten Einfärbungen kritischen Räumen, die bereits ab einer vermeintlich hohen Temperatur hohe Feuchtegehalte aufweisen. Die grünen Einfärbungen können als unkritisch betrachtet werden, da die niedrigste zulässige Innenoberflächentemperatur im Vergleich gering ausfallen kann, bis ein kritischer Feuchtegehalt erreicht wird.

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	8,6	8,3	8,1		10,7
2	13,9	12,3		13,0	14,4
3	13,1		13,6	16,3	15,6
4	14,2		13,7	13,9	13,3
5	17,5	16,1	17,1	16,3	16,4
6	15,4		15,2	14,3	15,0
7	12,4	13,1		12,8	12,8
8	11,1		11,1	10,4	10,6
9	17,5	17,7	15,5	17,2	17,2
10	13,4	14,2		12,9	12,4
11	16,3		15,0	14,1	14,0
12	15,5		15,6	13,9	14,6
13	14,0		13,3	11,7	12,4
14	16,1		14,9	13,9	16,6

Abbildung 57: Niedrigste zulässige Innenoberflächentemperatur [°C] – Jan. 2024

In Abbildung 58 wird die Differenz der niedrigste zulässigen Innenoberflächentemperatur, ab der Schimmelrisiko besteht, mit der durchschnittlichen Ist-Temperatur gebildet. Die Differenz resultiert aus der Gegenüberstellung der Kennwerte aus Abbildung 57 und Abbildung 37. Dabei wird in Wohnung 3 bereits die zulässige Innenoberflächentemperatur über einen längeren Zeitraum im Schlafzimmer unterschritten, was auf eine Schimmelgefahr hindeutet.

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	10,7	11,8	8,8		12,2
2	5,2	3,6		4,0	3,7
3	3,6		1,7	-0,4	2,4
4	6,4		6,6	6,0	9,1
5	1,8	4,0	1,5	2,5	2,3
6	2,5		1,6	2,3	1,7
7	6,9	6,4		5,3	6,0
8	9,0		9,0	9,0	9,7
9	3,5	2,9	3,2	5,7	6,0
10	9,0	4,9		6,6	8,7
11	5,7		5,4	3,5	6,4
12	6,0		5,7	6,0	6,9
13	6,2		6,2	6,3	6,0
14	4,3		3,0	5,8	14,8

Abbildung 58: Differenz zwischen zulässiger Innenoberflächentemperatur und Ist-Temperatur im Raum - Jan.2024

Die Messdaten der relativen Feuchtigkeit und der gemessenen Ist-Temperatur in den jeweiligen Räumen geben Aufschluss über den Zustand im Hinblick auf das Schimmelrisiko. Mit den dargestellten Näherungsformeln können die absolute Feuchte und die niedrigste zulässige Innenoberflächentemperatur berechnet werden. Eine längerfristige Betrachtung, basierend auf den Durchschnittswerten von Feuchtigkeit und Temperatur auf Monats Basis, erlaubt die Identifikation von

Bedingungen, unter denen Schimmel am ehesten entsteht. Diese Einsichten sind von entscheidender Bedeutung, um proaktiv Maßnahmen gegen die Schimmelbildung ergreifen zu können. Um der Schimmelpilzbildung frühzeitig entgegenzuwirken, wird ein Grenzwert von 3°C für das vorhandene Gebäude empfohlen. In diesem Zusammenhang werden drei Bewertungsstufen der Luftfeuchtigkeit basierend auf der Differenz zwischen der mittleren Ist-Temperatur und der niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperatur $\theta_{Innen,zul.}$ empfohlen. Der Grenzwert kann je nach Bausubstanz angepasst werden. Die Grenzwerte sowie die Einordnung in drei Bewertungsstufen zwischen der Ist-Temperatur und der berechneten niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperatur $\theta_{Innen,zul.}$ für Schimmelwachstum sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Bewertung der Luftfeuchtigkeit und Einordnung Schimmelrisiko je Raum (Jan.2024 und Vormonat in Klammern)

Bewertung Feuchte (Einordnung)	Δ Ist-Temp. und $\theta_{Innen,zul.}$ (Grenzwerte von - bis)	Häufigkeit (Anzahl der Räume)
In Ordnung	$> 3^{\circ}\text{C}$	49 (43)
Bedenklich	$> 0^{\circ}\text{C}$ bis $\leq 3^{\circ}\text{C}$	13 (19)
Gefahr	$\leq 0^{\circ}\text{C}$	1 (1)

Die Anwendung der Bewertungsstufen auf die Testhaushalte ergibt folgendes Bild in der Bewertung der Luftfeuchtigkeit in den Wohnungen exemplarisch am Beispiel des Monats Januar 2024 (s. Abbildung 59 nächste Seite).

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	i.O.	i.O.	i.O.		i.O.
2	i.O.	i.O.		i.O.	i.O.
3	i.O.		Bedenklich	Gefahr	Bedenklich
4	i.O.		i.O.	i.O.	i.O.
5	Bedenklich	i.O.	Bedenklich	Bedenklich	Bedenklich
6	Bedenklich		Bedenklich	Bedenklich	Bedenklich
7	i.O.	i.O.		i.O.	i.O.
8	i.O.		i.O.	i.O.	i.O.
9	i.O.	Bedenklich	i.O.	i.O.	i.O.
10	i.O.	i.O.		i.O.	i.O.
11	i.O.		i.O.	i.O.	i.O.
12	i.O.		i.O.	i.O.	i.O.
13	i.O.		i.O.	i.O.	i.O.
14	i.O.		Bedenklich	i.O.	i.O.

Abbildung 59: Bewertung der Luftfeuchtigkeit und Schimmelgefahr in Räumen (Jan. 2024)

Die Messwerte der Raumtemperatur und der Luftfeuchtigkeit am Heizkörper zeigen, dass in der Mehrzahl der Räume (ca. 78%) keine Schimmelgefahr besteht (*in Ordnung*). Das bedeutet, dass die Ist-Temperatur und Luftfeuchtigkeit im jeweiligen Raum über einen längeren Zeitraum unter

den Grenzwerten (φ von 80%) für Schimmelrisiko liegen. Bei ca. 20% der Räume ist das Schimmelpilzrisiko *bedenklich* und bei einem Raum besteht ein erhöhtes Schimmelpilzrisiko (*Gefahr*), siehe auch Abbildung 59 mit der Übersicht der bewerteten Räume.

Die Analyse der Messdaten der smarten Thermostate erlaubt eine Bewertung, welche eine Vorbeugung von Schimmelbildung ermöglicht. Daher wird die Nutzung des hergeleiteten Bewertungssystems empfohlen, welches auf der Analyse von Durchschnittstemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und der errechneten niedrigsten zulässigen Innenoberflächentemperatur basiert. Die ideale relative Luftfeuchtigkeit in Wohnräumen liegt zwischen 40% und 60%. Regelmäßiges Stoßlüften, das Vermeiden von hoher relativer Luftfeuchtigkeit sowie das Halten der Raumtemperaturen auf mindestens 16°C sind Maßnahmen, die das gesunde Raumklima fördern.

5.2.8 Entwicklung von Heiztypen

Zur präzisen Beschreibung von Verhaltensweisen zum Heizen, die durch Messdaten der smarten Thermostaten ermittelt worden sind, wurden sogenannte Heiztypen entwickelt. Dabei konnten die im Pretest identifizierten Typen (s. Kapitel 5.1.3) aufgegriffen werden und durch die Daten des Anwendungstest plausibilisiert werden. Die nachfolgenden **Heiztypen** basieren auf Messdaten, welche mithilfe der smarten Thermostate erfasst worden sind. Die entwickelten Heiztypen lassen sich wie folgt kategorisieren: *Eco-Heizer*, *Nicht-Heizer*, *Durch-Heizer* und *Hoch-Heizer*. Im Anschluss erfolgt eine Korrelation der Heiztypen mit den tatsächlichen Verbräuchen. Die Verbräuche wurden ebenfalls kategorisiert und nach **Verbrauchstypen** (s. Kapitel 5.2.4) sortiert. Beide Typen werden im weiteren Verlauf miteinander korreliert. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse darüber ziehen, in welchem Umfang das individuelle Heizverhalten den Verbrauch beeinflusst. Zudem wird auf diese Weise ein besseres Verständnis des Energieverbrauchs ermöglicht und dient als Grundlage für Feedback in die Wohnungen zurückzuspielen.

Die Analyse der Messdaten smarter Thermostate ermöglicht die Identifikation verschiedener Heizverhaltensmuster, die eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von energieeffizienten Strategien und personalisierten Heizplänen einnehmen. In dieser Arbeit werden die Verhaltensweisen nach Heiztypen klassifiziert, die sich in vier Heiztypen unterteilen lassen. Es gibt den Heiztyp der intensiven Nutzer, die häufig und viel heizen (*Hoch-Heizer*), den Typ der angepassten Nutzer, die moderat und bedarfsgerecht heizen (*Eco-Heizer*), den Typ der zurückhaltenden Nutzer, die selten oder gar nicht heizen (*Nicht-Heizer*), und den Typ der kontinuierlichen Nutzer, die ohne Unterbrechung heizen (*Durch-Heizer*). Die Klassifizierung beruht auf zwei wesentlichen Parametern: der Bewertung der **Heizdauer** und der Bewertung der eingestellten **Soll-Temperatur** (s. Kapitel 5.2.1). Es folgt Beschreibung und Definition der einzelnen Heiztypen:

Der Heiztyp **Hoch-Heizer** zeichnet sich durch eine durchschnittliche lange Heizdauer von hohen eingestellten Temperaturen sowie allgemein durch die Einstellung höherer Soll-Temperaturen aus (s. Tabelle 27). Dies impliziert eine Präferenz für einen hohen Wärmebedarf im Wohnraum, wobei in der Regel keine Absenkungen durch beispielsweise Heizpläne oder sonstige Absenkungen der Raumtemperatur erfolgen.

Im Gegensatz dazu präferieren **Eco-Heizer** kürzere Heizdauern von einem spezifischen Temperaturbereich und moderatere Soll-Temperaturen (s. Tabelle 27). Dieser Heiztyp scheint ein ausgeprägtes Bewusstsein für Energieeffizienz und eine Präferenz für umweltfreundliche Heizmethoden zu haben. Dieses Verhalten kann auf die aktive Nutzung von Zeitschaltprogrammen und bedarfsgerechtem Heizen zurückgeführt werden.

Der Heiztyp der **Nicht-Heizer** nutzt Heizkörper nur minimal oder gar nicht. Dies lässt sich anhand kurzer Heizdauern und niedriger eingestellter Soll-Temperaturen erkennen (s. Tabelle 27). Das Verhalten kann durch verschiedene Faktoren bedingt sein, beispielsweise monetäre Anreize, persönliche Präferenzen für kühlere Temperaturen oder längere Abwesenheitszeiten von der Wohnung.

Der Heiztyp der **Durch-Heizer** ist dadurch gekennzeichnet, dass die Heizdauer der niedrig eingestellten Soll-Temperaturen vergleichsweise kurz ist, während die Nutzungszeiten für hoch eingestellte Temperatur-Niveaus hoch sind (s. Tabelle 27).

Die Einstufung bezüglich der Heizdauer basiert primär auf der eingestellten Soll-Temperatur, welche in drei Temperaturbereiche unterteilt werden. Die Bildung der Bereiche erfolgt anhand der durchschnittlichen eingestellten Raumtemperatur aller Räume einer Wohnung. Der erste Bereich „*Nicht Heizen*“ umfasst alle Soll-Temperaturen unter 16°C, was bedeutet, dass bei diesen Einstellungen die Heizung in der Regel abgeschaltet bleibt. Der zweite Bereich, die als „*Eco Heizen*“ bezeichnet wird, bezieht sich auf Temperaturen, die gleich oder höher als 16°C, aber unter 20,5°C liegen. Dies entspricht einer energiesparenden Heizweise. Die dritte und letzte Kategorie, „*Hoch Heizen*“, wird für Einstellungen ab 20,5°C verwendet. Sie indiziert, dass die Heizung auf einer hohen Stufe läuft. Im Anschluss erfolgt eine Aufsummierung der Anzahl der eingestellten Solltemperaturen für den jeweiligen Temperaturbereich über den definierten Zeitbereich. Um einen Vergleichswert \hat{h}_j zu bilden, werden die aufsummierten Heizdauern über alle Wohnungen für den jeweiligen Temperaturbereich zunächst normiert. Dies erfolgt, da die normierten Werte als Indikator für hohe Betriebsstunden dienen. Die entsprechenden Formeln sind in (19) und (20) dargestellt.

$$\hat{h}_j = \frac{h_{j,\Delta T}}{\bar{h}} \quad (19)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n h_{j,\Delta T} \quad (20)$$

\hat{h}_j : normierte Heizdauer für einen Temperaturbereich [-]

$h_{j,\Delta T}$: Anzahl Stunden für einen Temperaturbereich [h]

\bar{h} : Mittelwert Anzahl Stunden für einen Temperaturbereich [h]

n: Anzahl der Wohnungen

Auf diese Weise kann ein Kennwert gebildet werden, der von jeder Wohnung für alle drei Temperaturbereiche (s. Tabelle 27 Grenzwerte) einen Vergleichswert liefert. Die Kennwerte für die drei Temperaturbereiche geben Aufschluss über die Dauer der Einstellung eines bestimmten Temperaturbereichs im Vergleich zum Durchschnitt der übrigen Wohnungen. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung, welche sich nach der normierten Heizdauer \hat{h}_j für jeden der drei Temperaturbereiche richtet. Die Grenzwerte für die Heiztypen (*Nicht-Heizer*, *Eco-Heizer*, *Hoch-Heizer* und *Durch-Heizer*) sind in Tabelle 27 (nächste Seite) dargestellt.

Tabelle 27: Kurzbeschreibung der Grenzwerte zur Einordnung Heizverhaltenstypen nach Heizdauer und Soll-Temperatur

Heiztyp	Beschreibung	Grenzwerte
Hoch Heizer	Soll-Temperatur $\geq 20^\circ\text{C}$ und der Temperaturbereich muss überdurchschnittlich häufig auf diese Werte eingestellt sein	- $\geq 20,5^\circ\text{C}$ - $\hat{h}_j \geq 1,5$
Eco Heizer	Soll-Temperatur $\geq 16^\circ\text{C}$ und $< 20^\circ\text{C}$ und der Temperaturbereich muss überdurchschnittlich häufig auf diese Werte eingestellt sein	- $\geq 16^\circ\text{C}$ bis $< 20,5^\circ\text{C}$ - $\hat{h}_j \geq 1,5$
Nicht Heizer	Soll-Temperatur $< 16^\circ\text{C}$ und der Temperaturbereich muss überdurchschnittlich häufig auf diese Werte eingestellt sein	- $< 16^\circ\text{C}$ - $\hat{h}_j \geq 1,5$
Durch-Heizer	Soll-Temperatur $< 16^\circ\text{C}$ und der Temperaturbereich muss selten häufig auf diese Werte eingestellt sein	- $< 16^\circ\text{C}$ - $\hat{h}_j < 0,5$

Die in Kapitel 5.2.4 präsentierte Kategorisierung des Verbrauchsverhaltens anhand des Heizenergieverbrauchs erlaubt eine detaillierte Einteilung, um Nutzergruppen entsprechend ihres Heizenergieverbrauchs im Vergleich zu den anderen Wohnungen im Gebäude zu analysieren. Die Einordnung in fünf Kategorien: *Power-User*, *Viel-Verbraucher*, *Normal-Verbraucher*, *Sparfüchse* und *Nicht-Heizer*, ermöglicht eine präzise Analyse des Heizverhaltens. Die Klassifizierung erfolgt durch die Normierung des durchschnittlichen Verbrauchs. Der spezifische Verbrauch für das Heizen wird dabei in Relation zu den Wohnverhältnissen (Wohnfläche) gesetzt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 5.2.4.

Im Rahmen der vorliegenden Methodik erfolgt eine Gegenüberstellung der erstellten Typen, welche das Heiz- und Verbrauchsverhalten bewerten. Ziel ist es, potenzielle Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Typen zu identifizieren. Das Vorgehen basiert auf einem systematischen Vergleich beiden Typen, dessen Ansatz in Abbildung 60 (nächste Seite) schematisch visualisiert ist. Darüber hinaus werden in dieser Untersuchung sowohl das Verhalten und die Einstellungen der Nutzer an smarten Thermostaten als auch der Heizenergieverbrauch (Verbrauchstypen) berücksichtigt. Im Anschluss erfolgt eine Gegenüberstellung der erfassten Daten mit den Verbrauchsmustern, wobei Rückschlüsse zum Verbrauch sowie Ableitungen von Maßnahmen zur Optimierung möglich sind.

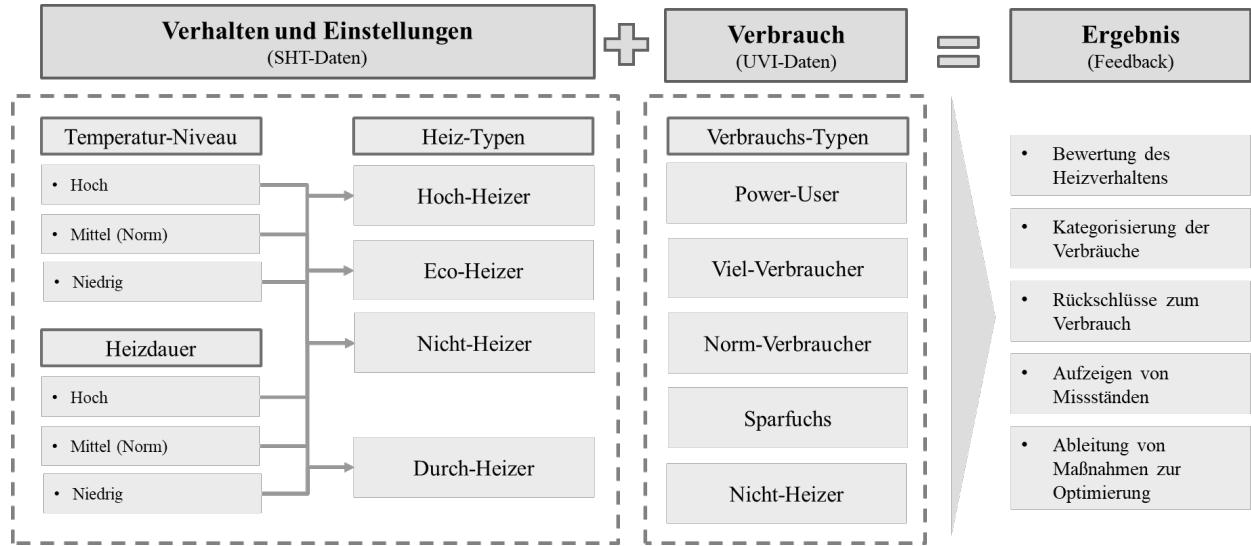


Abbildung 60: Schematische Darstellung Analysemethode der Heiz- und Verbrauchstypen zur Bildung von Feedback

Das Resultat dieses Prozesses ist eine fundierte Bewertung des Heizverhaltens, welche Rückschlüsse auf den potenziellen Energieverbrauch der Haushalte zulässt. Darüber hinaus ermöglichen diese Auswertungen die Identifikation möglicher Mängel oder defekter Geräte. Basierend auf der Klassifizierung der Heiztypen können schließlich Empfehlungen für ein sparsameres und effizienteres Heizverhalten abgeleitet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, gezielte Maßnahmen zu ergreifen, die nicht nur eine Reduktion des Energieverbrauchs bewirken, sondern auch einen Beitrag zu einem umweltbewussten Wohnen leisten.

Die nachfolgende Tabelle 28 präsentiert exemplarisch die Datensätze für Januar 2024. Zum einen werden die Verbrauchstypen aus den UVI-Daten und zum anderen die Heiztypen, welche aus den Daten der smarten Thermostate stammen, dargestellt. Die Eingruppierung in die oben genannten Heiztypen erfolgt gemäß der Bestimmung der Heizdauer in Tabelle 27 sowie der Soll-Temperatur in Tabelle 19. Des Weiteren werden die absoluten Heizenergieverbräuche der jeweiligen Wohnungen sowie der normierte Verbrauchswert dargestellt (s. Kapitel 5.2.4).

Tabelle 28: Heiz- und Verbrauchstypen (Jan. 2024) der ausgestatteten Wohnungen

WE [Nr.]	Heiz-Typ [Heizdauer]	Heiz-Typ [Soll-Temp.]	Verbrauch [kWh]	\hat{v}_j^{28} [-]	Verbrauchs-Typ²⁹ [-]
1	Hoch-Heizer	Hoch-Heizer	1.091	2,9 (3,1)	Power-User
2	-	Nicht-Heizer	137	0,4 (0,2)	Sparfüchse (Nicht-Heizer)
3	Nicht-Heizer	Eco-Heizer	155	0,5 (0,4)	Sparfüchse
4	Eco-/Hoch-/Durch-Heizer	Eco-Heizer	618	1,7 (1,7)	Viel-Verbraucher
5	Nicht-Heizer	Nicht-Heizer	88	0,2 (0,2)	Sparfüchse (Nicht-Heizer)
6	Nicht-Heizer	Eco-Heizer	21	0,1 (0,0)	Nicht-Heizer
7	-	Eco-Heizer	139	0,4 (0,5)	Sparfüchse
8	Eco-/Durch-Heizer	Eco-Heizer	413	1,1 (1,2)	Normal-Verbraucher
9	Hoch-Heizer	Hoch-Heizer	550	1,5 (1,6)	Normal-Verbraucher (Viel.)
10	Hoch-/Durch-Heizer	Eco-Heizer	534	1,4 (1,3)	Normal-Verbraucher
11	Hoch-Heizer	Eco-Heizer	293	0,9 (1,2)	Normal-Verbraucher
12	-	Eco-Heizer	311	0,8 (0,8)	Normal-Verbraucher
13	Eco-/Durch-Heizer	Nicht-Heizer	265	0,7 (0,8)	Normal-Verbraucher
14	-	Nicht-Heizer	482	1,3 (0,9)	Normal-Verbraucher

Die Zuordnung in Tabelle 28 der Heiztypen zu den Verbrauchstypen zeigen ähnliche Tendenzen auf, z. B. *Hoch-Heizer* tendieren zu einem zu einem hohen Verbrauch (*Power-User* und *Viel-Verbraucher*). Hingegen weisen die *Nicht-* und *Eco-Heizer* oftmals einen geringen bis normalen Verbrauch auf (*Nicht-Heizer*, *Sparfüchse* und *Normal-Verbraucher*). Bei den Wohnungen 2, 7, 12 und 14 konnte keine Bewertung der Heizdauer vorgenommen werden, da lediglich mittlere Heizdauern über die Normierung der Werte erfasst wurden und damit keine eindeutige Einsortierung in die drei Heiztypen erfolgen konnte. Es ist zu beobachten, dass insbesondere Wohnungen mit einem geringen Verbrauch keinem Heiztypen zugeordnet werden konnten, die durch das Kriterium der Heizdauer definiert ist. In diesem Fall erfolgt die Bewertung der Soll-Temperatur, wodurch die Verbräuche entsprechend widergespiegelt werden.

²⁸ \hat{v}_j , normierter Verbrauchswert: Ein Wert von 1 entspricht dem durchschnittlichen Verbrauch für diesen Monat. Die Angaben in den Klammern zeigen die Verbrauchstypen im Vergleich zum Vormonat an (s. Kapitel 5.2.4).

²⁹ Angaben in den Klammern zeigen die Verbrauchstypen im Vergleich zum Vormonat an.

Des Weiteren ist von Interesse, dass die als *Durch-Heizer* kategorisierten Wohnungen (s. Wohnung 4, 8, 10 und 13) einen überdurchschnittlich hohen Verbrauch aufweisen. Es wird angenommen, dass mithilfe von Zeitplänen und einer optimierten, bedarfsgerechteren Beheizung der Wohnung Energieeinsparpotenziale realisiert werden können. Abbildung 61 präsentiert die Anteile am gesamten spezifischen Verbrauch aller Wohnungen nach Heiztypen. Es zeigt sich, dass insbesondere die *Hoch-* und *Durch-Heizer* Typen einen Anteil von nahezu 60% am Heizenergieverbrauch aufweisen. Bei der Zuordnung der Heiztypen anhand der Heizdauer konnte festgestellt werden, dass 14% des gesamten Heizenergieverbrauchs keinem Heiztyp zugeordnet werden konnten (n/a).

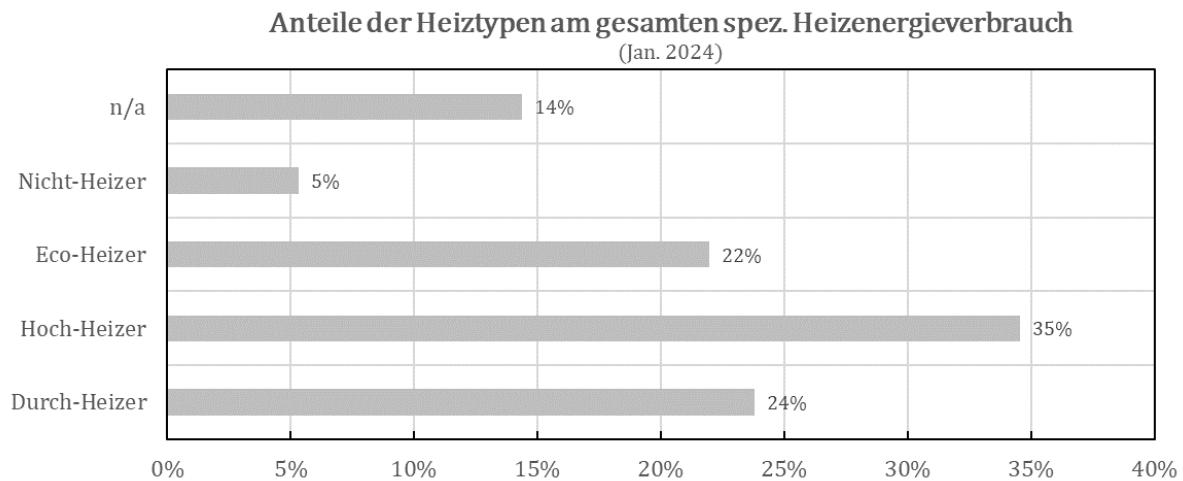


Abbildung 61: Anteile der Heiztypen am gesamten spezifischen Heizenergieverbrauch - Jan. 2024

Ein Sonderfall zeigt sich in Wohnung 8 (s. Tabelle 28), in welcher drei Heiztypen der Heizdauer zugeordnet wurden. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Räume unterschiedlich stark und lange beheizt werden und sich damit drei Heiztypen als zutreffend erweisen.

Bei der Betrachtung der Veränderungen der Verbrauchstypen zum Vormonat (s. Tabelle 28 Angaben in Klammern) fällt auf, dass es keine großen Veränderungen des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes gibt. Lediglich drei Verbrauchstypen haben sich verändert, wobei die Differenz sehr gering ist ($\Delta \hat{v}_j$ 0 bis 0,4). Daraus lässt sich schließen, dass sich das Heizverhalten gegenüber dem Vormonat kaum verändert hat.

Die entwickelte Bewertungsmethode zur Klassifizierung von Heiztypen basiert auf einer Vielzahl unterschiedlicher Kriterien, darunter die Heizdauer und die eingestellte Soll-Temperatur. Die Zusammenführung der Heiztypen mit dem Verbrauch zeigt eine Korrelation. Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere Personen, die ihre Räume intensiv beheizen (*Hoch-* und *Durch-Heizer*) einen hohen Verbrauch aufweisen. Dies lässt den Schluss zu, dass das individuelle Heizverhalten einen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch hat. Der Verbrauch wird durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren bestimmt, wie anhand des Heizverhaltens unterschiedlicher Heiztypen demonstriert wird. Mithilfe der Heiztypen ist es möglich, Empfehlungen und Feedback je Heiztyp zu geben und dabei wesentliche Funktionen der smarten Thermostate zu nutzen.

5.2.9 Ergebnisdiskussion

Im Rahmen des Anwendungstests mit Smart Home Thermostaten in einem realen Testgebäude konnte empirisch untersucht werden, inwiefern Messdaten aus den smarten Thermostaten gesammelt werden können und wie diese weiterhin zur Kategorisierung des Heizverhaltens von Nutzen sind. Im Rahmen des Analyse- und Auswertungskonzepts wurden diverse Methoden zur Bewertung des Heizverhaltens angewendet. Des Weiteren konnte im Rahmen des Anwendungstests auf unterjährige Verbrauchsinformationen auf monatlicher Basis zurückgegriffen werden. Die Datenerhebung erfolgte mittels elektronischer Heizkostenverteiler, welche durch den Messdienstleister bereitgestellt wurden.

Die Analyse der Soll- und Ist-Temperaturen, welche von smarten Thermostaten erfasst werden, erlaubt eine Bewertung der **Temperatur-Niveaus**, bietet wertvolle Einblicke in z. B. Präferenzen von eingestellten Temperaturen und gibt Hinweise auf mögliche Unregelmäßigkeiten im Heizverhalten (z. B. durch gemessene Raumtemperaturen). Des Weiteren wurde die Schwankung anhand der Standardabweichung bewertet, was Rückschlüsse auf ein schwankendes, moderates oder konstantes Heizverhalten zulässt. Dabei konnten jedoch keine direkten Abhängigkeiten zu den entwickelten Heiztypen festgestellt werden.

Ein wesentlicher Aspekt ist der **Offset**, der Versatz zwischen den eingestellten Soll-Temperaturen und den tatsächlich gemessenen Ist-Temperaturen (s. Kapitel 5.2.2). Diese Differenz kann Aufschluss über das Regelverhalten der smarten Thermostate geben und Hinweise auf Fehlfunktionen oder Bedienungsfehler liefern, beispielsweise durch verdeckte Heizkörper oder permanente offene Fenster. Trotz der Tatsache, dass die genannten Abweichungen im Rahmen des Feldtests erfasst wurden (s. Tabelle 22), ist es möglich, dass weitere, bislang unbekannte Gründe für die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Temperaturen existieren, die im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt wurden. In dem Anwendungstest wurde die Analyse von Temperaturschwankungen, etwa durch die Betrachtung der Standardabweichung zwischen Soll- und Ist-Werten (s. Kapitel 5.2.1), nicht im Detail betrachtet, da die Temperatur-Niveaus auf Wohnungsebene aus dem Mittelwert mehrerer Räume berechnet wurden. Eine Untersuchung auf Raumbene könnte jedoch noch präzisere Einblicke bieten. Es bleibt jedoch die Frage offen, inwiefern diese detaillierten Informationen über das Heizverhalten für die Mieter tatsächlich von Nutzen sind.

Die Analyse der von smarten Thermostaten erfassten **Ventilstellungen** erlaubt die Identifikation von Heizgewohnheiten in Wohnungen. Dabei konnte beobachtet werden, dass Wohn- und Schlafzimmer im Vergleich zu Bädern und Küchen stärker beheizt werden (s. Abbildung 39 und Abbildung 40). Diesbezüglich lässt sich beispielsweise eruieren, welche Räumlichkeiten am intensivsten beheizt werden. So kann die Wärmeverteilung den Bewohnern zeigen, welcher Raum die meiste Heizenergie benötigt. Diese Kenntnis der Wärmeverteilung kann hilfreich sein, wenn Räume stärker beheizt werden, die eigentlich nicht oder weniger stark beheizt werden sollten. Dies kann der Fall sein, wenn der Zeitplan für einen Raum nicht aktualisiert wird, weil sich die Lebensumstände geändert haben, z. B. durch den Auszug einer Person.

Ein wesentlicher Aspekt ist, dass aufgrund des Übertragungintervalls der Smart Home Thermostate (alle 5-Minuten) nur der aktuelle Zustandswert übertragen wird. Ventilbewegungen innerhalb

des Zeitraums werden nicht erfasst. Die Abtastrate der Thermostate kann aus Gründen der Batterielebensdauer nicht erhöht werden. An dieser Stelle könnte eine dauerhafte Stromversorgung durch ein Netzteil Abhilfe schaffen, was jedoch von den Herstellern von Smart Home Geräten in der Praxis nur selten umgesetzt wird. Eine Erhöhung des Sendintervalls könnte zudem für eine Fenster-Offen-Erkennung von Nutzen sein, da diese ebenfalls geöffnete Fenster innerhalb der Abtastrate nicht erkennt. Dennoch kann festgehalten werden, dass für die Bildung der Heiztypen nach der entwickelten Methodik das Sendeintervall von fünf Minuten als ausreichend erachtet wird. Diese Lösung stellt einen adäquaten Kompromiss zwischen dem Nutzen und der zu verarbeitende Datenmenge dar.

Des Weiteren wurden Daten zum **Warmwasserverbrauch** erhoben, welche durch die unterjährige Verbrauchsinformation ermöglicht wurden (s. Kapitel 5.2.6). Die Auswertung der Daten ergab, dass die Verbräuche für Warmwasser für die Heizperiode 2023/2024 einen Anteil von ca. 60% des Energieverbrauchs ausmachen. In Relation zum durchschnittlichen Energieverbrauch privater Haushalte in Deutschland für Wohnen macht der Verbrauch an Warmwasser lediglich einen Anteil von ca. 15% aus [126]. Zudem übersteigt der hochgerechnete spezifische Warmwasserverbrauch von 54,2 kWh/m²a den berechneten Normbedarf von 12,2 kWh/m²a deutlich. Mögliche Gründe dafür können ein hoher nutzergetriebener Verbrauch oder Fehleinstellungen an der Heizungsanlage für die Warmwasserbereitstellung sein. Daher wird empfohlen, diesen Aspekt ebenfalls zu adressieren, um an dieser Stelle Einsparpotenziale zu erheben. Mögliche Maßnahmen wären beispielsweise die Wartung der Heizungsanlage und die Installation von Duschsparköpfen, welche den Wasserdurchfluss reduzieren und somit den Warmwasserbedarf senken. Des Weiteren können Suffizienz-Maßnahmen in Erwägung gezogen werden, die das Warmwassersparen fördern.

Ein weiterer Zusatznutzen, der sich durch die Datenerfassung der smarten Thermostate ergab, war die Analyse der **Luftfeuchtigkeit** je Raum (s. Kapitel 5.2.7). Die Auswertung der Daten ermöglicht es Räume darzustellen, die über einen langen Zeitraum eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit aufweisen, was Schimmelrisiko begünstigt. Des Weiteren konnte mithilfe der gemessenen Raumtemperatur und der anliegenden relativen Feuchtigkeit die minimal zulässige Innenoberflächentemperatur für jeden Raum bestimmt werden, bei deren Unterschreitung eine Bewertung des Schimmelrisikos vorgenommen werden konnte. Bei 20% der untersuchten Räume wurde eine bedenkliche Luftfeuchtigkeit festgestellt, wobei in einem Raum Anzeichen für eine Schimmelpilzbildung vorhanden waren ($\phi > 80\%$). Die Grenzwerte zwischen der minimal zulässigen Innenoberflächentemperatur und der gemessenen Ist-Temperatur sollten je nach Gebäude und Baustandard angepasst werden. Aufgrund der breiten Datenbasis, auf der die berechneten Kennwerte basieren, können die Ergebnisse als guter Indikator zur Vorbeugung von Schimmelbildung betrachtet werden. Eine Validierung durch eine Besichtigung der Wohnungen wurde jedoch nicht durchgeführt.

Die Auswertung der **Heizenergieverbräuche** ermöglichte eine Überprüfung der vermuteten Einsparungen durch die Nutzung smarte Thermostate (s. Kapitel 5.2.4 und 5.2.5). Dabei ließ sich jedoch kein Einfluss auf den Heizenergieverbrauch durch die Nutzung smarter Thermostate nachweisen. Im Rahmen des durchgeföhrten Anwendungstests wurde eine Versuchsgruppe mit smarten Thermostaten (n=14 Wohnungen) ausgestattet und mit einer Kontrollgruppe (n=14 Wohnungen) ohne smarte Thermostate aus demselben Gebäude verglichen. Im direkten Vergleich zeigten

sich Einsparungen von 9 bis 12%. Diese Ergebnisse stimmen ungefähr mit den Resultaten aus der Literatur [70] überein, welche durch den Vergleich von Wohnungen mit smarten Thermostaten und ohne smarte Thermostate zu Einsparungen von 15,5% kam. Diese Beobachtungen wurden jedoch im durchgeführten Anwendungstest durch den Abgleich der Verbräuche aus Vorjahren relativiert. Dieser offenbarte, dass die Kontrollgruppe generell auch bereits in den Vorjahren mehr Energie verbrauchte als die Versuchsgruppe. Der Vergleich der Verbräuche aus Vorjahren wies zudem auf eine Verbrauchssteigerung in beiden Versuchsgruppen hin, die auf eine sparsamere Verhaltensweise der Nutzer aufgrund der Energiekrise in der Heizperiode 2022/2023 zurückgeführt werden, kann. Diese führte zu einer Einsparung von ca. 20% durch sparsames Verhalten im Rahmen der Energiekrise.

Im Rahmen der Evaluierung der Verbrauchswerte der Vorjahre wurde eine **Witterungsbereinigung** durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Jahre zu gewährleisten. Die Nichterreichung von Einsparungen durch die Nutzung von smarten Thermostaten kann durch verschiedene Faktoren bedingt sein. Dazu zählt beispielsweise das individuelle Komfortbedürfnis aber auch das Wissen über ein sparsames Heizen. Des Weiteren können **Rebound-Effekte** auftreten, die beispielsweise durch eine leichtere Ansteuerung oder durch ein falsches Wissen über die Funktion der Thermostate bedingt sein. Ähnliche Erfahrungen wurden auch in der Studie [68] gemacht, welche aufzeigt, dass Einsparungen hauptsächlich erzielt werden, wenn die Thermostate sachgemäß genutzt werden, einschließlich der Nutzung von Automationen wie Zeitplänen und Fernsteuerung zur Absenkung der Temperaturen. Des Weiteren wird in dieser Studie [68] die Relevanz eines ausgeprägten Energiebewusstseins sowie eines grundlegenden Verständnisses der Funktionsweise des Systems für die Realisierung von Einsparungen betont. Bedauerlicherweise konnten im Rahmen des durchgeführten Anwendungstests keine Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche spezifischen Funktionen, wie etwa Zeitpläne oder Ortungsdienste, von den Nutzern während der Heizperiode verwendet wurden. Des Weiteren konnten keine aussagekräftigen Beobachtungen zum Energiebewusstsein der Teilnehmenden durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass die Einführung des Systems sowie Sprachbarrieren einen Einfluss auf die Nutzung des smarten Thermostats und damit auf die Ergebnisse des Heizenergieverbrauchs hatten. Dies veranschaulicht die Relevanz der Erhebung weiterer Daten zur Evaluierung des Heizverhaltens, um den Nutzer in puncto sparsamen Verhaltens zu unterstützen.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist, dass den Teilnehmern vollständige Nutzungsfreiheit des Systems gewährt wurde. Dies lässt den Schluss zu, dass die Teilnehmer ihr Heizverhalten mit den smarten Thermostaten nicht verändert haben. Ein alternativer Forschungsansatz wurde von der Studie [71] präsentiert, welche eine Steuerung von smarten Thermostaten durch ein zentrales System vorsah. Dies resultierte in einer deutlichen Einsparung von 20 bis 25%. Die Studie [72] hat aufgezeigt, dass insbesondere die Reduktion der Raumtemperatur bei Abwesenheit signifikante Einsparungen ermöglicht. Die dargelegte Erkenntnis soll insbesondere den identifizierten **Heiztypen** der „*Durch-Heizer*“ (s. Kapitel 5.2.8) als Rückmeldung gegeben werden, da bei dieser Gruppe ein besonders hohes Einsparpotenzial aufgrund ihres hohen Heizenergieverbrauchs angenommen wird.

Im Rahmen des durchgeführten Anwendungstests konnte erstmals eine Bewertung des Heizverhaltens sowie eine Korrelation mit monatlichen Verbrauchsdaten auf Basis von Messdaten von smarten Thermostaten in hoher Auflösung (alle 5-Minuten) vorgenommen werden (s. Kapitel 5.2.8). Die dabei entwickelten Heiztypen basieren auf dem Nutzungsverhalten und den Einstellungen der smarten Thermostate, beispielsweise auf der gewählten Soll-Temperatur der Räume. Des Weiteren ermöglichten die Messdaten eine Bewertung der Heizdauer, die in jedem Raum für unterschiedliche Temperaturbereiche anfiel. Die entwickelten Heiztypen geben Aufschluss über das durchschnittliche Verhalten der gesamten Wohnung. Eine raumspezifische Analyse wurde jedoch nicht durchgeführt, könnte jedoch mit Hilfe der Daten umgesetzt werden. Für eine raumspezifische Analyse müssten, die derzeit für Durchschnittswerte über mehrere Räume definierte Grenzwerte jedoch überdacht werden. Es bleibt jedoch fraglich, ob eine raumspezifische Bewertung pro Raum für die verschiedenen Heiztypen praktikabel wäre, da dies möglicherweise zu viele Informationen für die Endnutzer darstellen könnte. In Zukunft könnte eine weitere Aggregation auf Raumbene (je Heizkörper) erfolgen. Zudem ist ein Abgleich mit den Verbrauchsdaten möglich, die aktuell lediglich auf Wohnungsebene aggregiert sind. Nach Rücksprache mit dem Messdienstleister besteht jedoch die Möglichkeit, diese Daten auch auf Raumbene zur Verfügung zu stellen. Die Analyse auf Raumbene ermöglicht zwar detaillierte Einblicke, wirft jedoch die Frage nach dem praktischen Nutzen solch detaillierter Informationen für die Mieter auf.

Die identifizierten **Heiztypen** lassen sich wie folgt kategorisieren: *Hoch-Heizer*, *Eco-Heizer*, *Nicht-Heizer* und *Durch-Heizer*. Die Klassifizierung erlaubt eine detaillierte Analyse des Nutzerverhaltens hinsichtlich des Energieverbrauchs und stellt eine Grundlage für gezieltes Feedback zur Optimierung des Heizverhaltens der Bewohner. Die Analyse offenbart, dass Hoch-Heizer und Durch-Heizer tendenziell höhere Energieverbräuche aufweisen, was auf ein Bedürfnis nach konstant hoher Wärme ohne Temperaturabsenkungen hinweist. Im Gegensatz dazu lässt sich bei *Eco-Heizern*, die kürzere Heizdauern präferieren und ihre Soll-Temperaturen moderat einstellen, sowie bei *Nicht-Heizern*, die ihre Heizung minimal oder nicht nutzen, ein ausgeprägtes Bewusstsein für Energieeffizienz bzw. Kostengefühl vermuten.

Es sei darauf verwiesen, dass die als Durch- und Hoch-Heizer klassifizierten Haushalte höhere Energieverbräuche aufweisen (s. Abbildung 61). Dies lässt auf ungenutzte Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz durch bedarfsgerechteres Heizen schließen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass zum Zeitpunkt der Erhebung keine bzw. eine falsche Nachtabsenkung am Heizungskessel eingestellt war. Die Korrelation zwischen Heiz- und Verbrauchstypen unterstreicht die Notwendigkeit einer individuellen Betrachtung und eines gezielten Managements des Heizverhaltens, um den Energieverbrauch zu optimieren. Die Nutzung von Zeitplänen sowie die Anpassung der Heizgewohnheiten an den tatsächlichen Bedarf könnten zu Energieeinsparungen führen.

Die im Rahmen des Pretests mit smarten Thermostaten aufgestellten Heiztypen (vgl. Kapitel 5.1.3 und Tabelle 16) konnten nur teilweise umgesetzt werden, da die Datenlage für *Zeitplan-Heizer* keine Angabe der eingestellten Zeitpläne zuließ. Zudem konnte nicht unterschieden werden, ob am Thermostat manuelle Interaktionen und Änderungen vorgenommen wurden. Somit konnte auch der Heiztyp des *Manuell-Heizers* nicht überprüft werden. Im weiteren Projektverlauf wird daran gearbeitet, die weiteren Zusatzinformationen aus den Smart Home Thermostaten, wie die

Verwendung von Automationen und Zusatzfunktionen durch z. B. Geofencing-Ortungsdienste, zu ermitteln und mit dem Verbrauch zu korrelieren.

Die angewandte Methode der Datenerfassung sowie die daraus entwickelten Heiztypen stellen eine solide Grundlage für die Entwicklung personalisierter Feedback-Strategien und Maßnahmen dar. Die Möglichkeit, durch den Einsatz von Feedback und Verbrauchsvisualisierungen Energie einzusparen, wird auch durch Studien gestützt, die den Einsatz dieser Methoden zur Verbrauchsvisualisierung untersuchen (s. Kapitel 2.4.2). Die personalisierten Rückmeldungen basieren auf den zuvor erstellten Auswertungen zum Heizverhalten und den daraus abgeleiteten Heiztypen. Konkret sind dies z.B. Rückmeldungen über monatliche Kennwerte (Solltemperatur, gemessene Temperatur, Heizdauer, Luftfeuchtigkeit und Bewertung des Schimmelrisikos). Diese Kennwerte sollen zusammen mit den Verbrauchswerten in grafischen Darstellungen verwendet werden, um komplexe Informationen über den Energieverbrauch leicht verständlich zu machen. Dies könnte den Bewohnern helfen, Muster zu erkennen und gezielte Veränderungen vorzunehmen, wie z. B. sparsamere Solltemperaturen oder die Nutzung von Zeitplänen durch Absenkung der Raumtemperatur bei Abwesenheit.

In der abschließenden Betrachtung lässt sich festhalten, dass trotz des Ausbleibens von Nachweisen signifikanter Einsparungen durch den Einsatz smarter Thermostate innerhalb des Untersuchungszeitraums die Analyse der Verbrauchsdaten aufschlussreiche und individuelle Verbrauchsmuster zutage gefördert hat. Die entwickelte Methode zur Datenerfassung aus smarten Thermostaten liefern aufschlussreiche Heiztypen und bieten wertvolle Einblicke in das Verbrauchsverhalten. Diese unterstreichen die Bedeutung personalisierter Ansätze zur Optimierung des Energieverbrauchs in Wohngebäuden. Die Herausforderung der weiteren Forschungsarbeiten ist es, die gewonnenen Informationen aus den smarten Thermostaten sowie die daraus abgeleiteten Heizprofile und -typen so aufzubereiten, dass Mieter damit befähigt werden, ihr Heizverhalten zu optimieren. Dies könnte beispielsweise über Incentivierung und Anreize, wie zum Beispiel Wettbewerbe, erreicht werden. Wie bereits die Energiekrise 2022 demonstriert hat, sind Einsparungen durch angepasstes Nutzerverhalten möglich.

Im Folgenden wird dargelegt, welche Nutzergruppen neben den direkten Nutzern ebenfalls von Smart Home Thermostaten profitieren können. Dazu zählen beispielsweise Energieberater, Gebäudetechniker, Immobilienbesitzer und Immobilienverwalter der Wohnungswirtschaft.

Durch Freigabe der Daten aus den smarten Thermostaten kann mithilfe der entwickelten Heizprofiltypen eine individuelle Energieberatung durchgeführt werden. Weiterhin könnte ein **Energieberater** damit einen spezifischen Energiesparplan bzw. Automatisierungsplan für den Haushalt erstellen und auf etwaige Probleme, die aus den Daten ersichtlich werden (z. B. durchheizen bei Abwesenheit, dauerhaft geöffnete Fenster, zugestellte Heizkörper usw. s. Tabelle 22 oder Schimmelrisiko s. Kapitel 5.2.7) informieren und aufklären.

Um eine einheitliche Verfügbarkeit der Daten aus smarten Thermostaten zu gewährleisten, werden folgende Implikationen an die **Hersteller** von Smart Home Thermostaten gerichtet: Die Bereitstellung der Daten bzw. offene Schnittstellen zum Auslesen von Sensordaten und die Entwicklung

spezifischer Lösungen für die Wohnungswirtschaft. Die Lösungen sollten nicht nur den Endkunden im Fokus haben, sondern auch das Energiemanagement des gesamten Gebäudes berücksichtigen. In diesem Kontext könnten Themen wie eine bedarfsgerechte Kesselsteuerung und ein hydraulischer Abgleich durch Daten von smarten Thermostaten zukünftig eine entscheidende Rolle spielen. Des Weiteren wäre die Weiterentwicklung der Stromversorgung für die smarten Thermostate zu erwägen, da der Wartungsaufwand durch die Verwendung von Batterien als hoch einzustufen ist. In diesem Kontext sind mögliche Lösungen selbstversorgende Geräte (sog. Energy Harvesting) denkbar, die beispielsweise durch Peltier-Elemente Energie zur Datenübertragung erzeugen. Als weitere Möglichkeit wäre eine feste Stromversorgung in Erwägung zu ziehen.

Eine weitere Anregung an die **Messdienstleister der Wohnungswirtschaft** wäre, die Funktionalität von digitalen Heizkostenverteilern auf smarte Thermostate zu übertragen. Damit könnte im Sinne Nachhaltigkeit ein vernetztes Gerät am Heizkörper eingespart werden. Bei der Konzeption ist eine Vielzahl von technischen und juristischen Aspekten zu berücksichtigen, darunter insbesondere der Manipulationsschutz und die eichgerechte Messung. Eine weitere Möglichkeit, diese These zu überprüfen, wäre, hochauflösende Messungen von Ventilstellungen am Thermostat als Hilfsgröße zur Bestimmung für den Heizenergieverbrauch zu untersuchen. Die in Abbildung 41 dargestellten Tendenzen zwischen den Daten der Heizkostenverteiler und der Ventilstellungen weisen bereits eine gewisse Ähnlichkeit auf (s. Kapitel 5.2.3). Diese Entwicklung könnte auch positive Auswirkungen auf die Nebenkosten der Wohnungen haben, da eine zusätzliche Messeinrichtung (Heizkostenverteiler) entfällt. Alternativ könnte darüber nachgedacht werden die smarten Thermostate (Investitionskosten) auf die Mieter umzulegen. Die Mieter würden neben der für die Abrechnung erforderlichen Messung zusätzlich von der Fernsteuerbarkeit und Automatisierbarkeit der Heizkörper profitieren.

Ein weiterer Zusatznutzen besteht in der Messung der Luftfeuchtigkeit je Raum. Dieser Aspekt könnte ebenfalls für die Wohnungswirtschaft von Interesse sein. Dabei können zum einen Mieter frühzeitig über Gefahren informiert werden bzw. könnte auch eine automatische Abluftanlage an die Messwerte der smarten Thermostaten gekoppelt sein. Damit können Bauschäden vermieden werden.

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine detaillierte Analyse des Heizverhaltens von Mietern unter Zuhilfenahme smarter Thermostate als neues Instrument der Datenerhebung. Die Erfassung spezifischer Parameter wie Temperatur-Niveaus, Soll-Ist-Vergleiche der Raumtemperaturen, Ventilöffnungen am Heizkörper sowie Heizenergieverbrauch und Luftfeuchtigkeit erlaubt eine die Identifikation von Heiztypen sowie die genaue Bewertung des individuellen Heizverhaltens. Die gewonnenen Erkenntnisse offenbaren sowohl ineffiziente Heizmuster als auch technische Mängel im System, welche unmittelbar zur Optimierung der Heizeffizienz genutzt werden können. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können individualisierte Feedback-Strategien entwickelt werden, die auf dem spezifischen Heiztypen basieren. Diese könnten den Bewohnern ein Instrument an die Hand geben, mit dessen Hilfe sie ihren Energieverbrauch verstehen und gezielt optimieren können. Die Einteilung in Heiztypen verdeutlicht, dass durch bewusstere Heizgewohnheiten ein Beitrag zur Reduktion des Heizenergieverbrauchs geleistet werden kann.

Die praktische Durchführung und Auswertung in einem realen Testgebäude veranschaulichten die Umsetzbarkeit und den Nutzen solcher Analysen. Die Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Gebäude sowie die Nutzung der Methode zur Bestimmung der Heiztypen stellen vielversprechende Perspektiven zur Skalierung der positiven Effekte auf einem größeren Maßstab dar. Letztendlich zeigt diese Arbeit, dass Smart Home Thermostate weit über ihre einfache Funktion der Temperaturregelung hinausgehen und als Schlüssel-Technologien für eine nachhaltigere und energieeffizientere Zukunft der Gebäudebewirtschaftung dienen können.

5.3 Zwischenfazit: Anwendungstest mit Smart Home Technologien

Der vorliegende Anwendungstest demonstriert den Nutzen von Smart Home Technologien zur Datenerhebung und zur Analyse des Heizverhaltens. In 14 der 28 Wohnungen eines Mehrfamilienhauses wurden während der Heizperiode 2023/2024 Daten durch smarte Thermostate erhoben werden konnten. Im Rahmen der Untersuchung werden erstmals Daten zum Heizverhalten in hoher Auflösung durch Smart Home Thermostate erfasst und mit den monatlichen Verbrauchswerten der unterjährigen Verbrauchsinformationen korreliert. Die Nutzung der smarten Thermostate ermöglichte die detaillierte Erfassung von Informationen zum Heizverhalten.

Die Untersuchung umfasste unter anderem die Analyse der eingestellten und gemessenen **Temperatur-Niveaus** in jedem Raum. Die Auswertung der Daten ergab, dass die aussagekräftigsten Erkenntnisse aus der abgeleiteten Heizdauer der eingestellten Soll-Temperaturen gewonnen werden konnten (s. Kapitel 5.2.1). Des Weiteren ermöglichte der Vergleich der Soll- und Ist-Temperaturen (**Offset**) in den Räumen eine Evaluierung des Regelverhaltens der smarten Thermostate sowie eine Identifikation von Problemen im Heizungssystem oder Fehlverhalten der Nutzer (s. Kapitel 5.2.2). Eine weitere wesentliche Kenngröße, die aus den Datensätzen der smarten Thermostate extrahiert werden kann, sind die erfassten Ventilöffnungen am Heizkörper. Auf diese Weise lässt sich eruieren, welche Räume am intensivsten beheizt werden. Der Vergleich der Ventilöffnungen mit dem Heizenergieverbrauch ergab ein abhängiges Verhalten (s. Kapitel 5.2.3).

Ein weiterer Vorteil der smarten Thermostate besteht in der Möglichkeit, die relative Luftfeuchtigkeit zu messen. Dadurch kann das Risiko der Schimmelbildung bewertet werden. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage von Datensätzen, welche über einen längeren Zeitraum von je einem Monat (basierend auf 5-Minuten-Werten) erfasst wurden. Die Berechnung erfolgt gemäß der *Norm 4108-8 zur Vermeidung von Schimmelwachstum*. Es konnte ein Raum identifiziert werden, in dem Schimmelgefahr besteht, sowie 20% der Räume, bei denen ein bedenkliches Risiko für Schimmel besteht (s. Kapitel 5.2.7). Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Warmwasserverbrauch für das Testgebäude mit 54,2 kWh/m²a den typischen Normverbrauch um Faktor größer drei übersteigt (s. Kapitel 5.2.6).

Aus den ausgewerteten Sensordaten der smarten Thermostate konnten vier unterschiedliche Heiztypen entwickelt werden, die auf der Heizdauer und eingestellten Soll-Temperaturen basieren (s. Kapitel 5.2.8). Diese sind:

- Durch-Heizer
- Hoch-Heizer
- Eco-Heizer
- Nicht-Heizer

Die Korrelation der Heiztypen mit dem spezifischen Verbrauch ermöglichte die Detektion von Mustern im Heizverhalten. Die durchgeführte Untersuchung ergab, dass das individuelle Heizverhalten und nicht die Lage der Wohnung den größten Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Die Wohnungen, in denen smarte Thermostate installiert sind, wiesen einen geringeren Verbrauch auf als die Kontrollgruppe ohne smarte Thermostate. Allerdings ist aufgrund der geringen Stichprobe

und den in den Vorjahren geringeren Verbrauch der Versuchsgruppe keine valide Aussage zu Einsparungen möglich. Des Weiteren wurde ein Mehrverbrauch im Vergleich zur letzten Heizperiode festgestellt, was auf Einspareffekte der Energiekrise zurückzuführen ist (s. Kapitel 5.2.5).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Nutzung der Daten aus smarten Thermostaten eine Vielzahl an Auswertungen ermöglicht und damit Feedback-Strategien zur Optimierung des Energieverbrauchs erlaubt. Der Abgleich mit den realen Verbräuchen aus der unterjährigen Verbrauchsinformation erlaubt ebenfalls die Gewinnung wichtiger Erkenntnisse, welche den Nutzern dabei helfen, ihren Verbrauch und ihr Verhalten einzuschätzen. Die Untersuchung unterstreicht die Relevanz eines besseren Verständnisses für effizientes Heizen und liefert grundlegende Erkenntnisse für zukünftige Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in Haushalten.

6 Fazit und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Kernkapitel zur V2H-Simulation (Kapitel 4) sowie der Datenerhebung und Analyse der Heizenergieeffizienz im Rahmen eines Anwendungs-tests (Kapitel 5) einer kritischen Bewertung und Diskussion unterzogen. Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung der zu Beginn aufgestellten Forschungsfragen und es werden Implikationen für die Praxis sowie weitere Forschungsarbeiten abgeleitet. Abschließend werden Schnittstellen und Synergieeffekte zwischen den beiden Anwendungsfeldern zum Energiemanagement aufgezeigt.

6.1 Fazit: V2H-Simulation

Nachfolgend wird die untersuchte Rolle des bidirektionalen Ladens von V2H (Vehicle-to-Home) bei der Steigerung des Autarkiegrades moderner Einfamilienhäuser zusammengefasst. Durch umfangreiche Simulationen wurde die zentrale Forschungsfrage untersucht und beantwortet:

- *Inwiefern kann bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen den Autarkiegrad in einem modernen Einfamilienhaus steigern?*

Methodik und Simulationsergebnisse

Die durchgeführten Simulationen basieren auf einem für Deutschland typischen Referenzhaushalt und dienen der Bewertung verschiedener Szenarien und Sensitivitäten. Dabei wurden Last- und Erzeugungsprofile mit einer Auflösung von 15 Minuten über ein ganzes Jahr detailliert analysiert. Die Ergebnisse belegen am Beispiel eines modernen Einfamilienhauses (s. Referenzhaushalt), dass durch den Einsatz von bidirektionalem Laden im Vergleich zu unidirektionalem Laden ein erhöhter Autarkiegrad (+10,6%) erzielt werden.

Um die Genauigkeit und Aussagekraft der Simulationen weiter zu verbessern, wird die Integration realer Verbrauchsprofile vorgeschlagen. Hierbei könnten Daten aus Smart Metern in das Simulationstool einfließen, was eine realistischere Betrachtung und zielgerichtete Empfehlungen für Haushalte ermöglicht. Der generische Ansatz ermöglicht die Integration verschiedener Lastprofile in das Tool.

Eine Erweiterung des Simulationstools auf größere Mehrfamilienhäuser oder Quartiere wird als mögliche Weiterentwicklung gesehen. Derzeit ist die Simulation auf ein einzelnes Fahrzeug in einem Einfamilienhaus beschränkt, weshalb eine Erweiterung der Datenbasis notwendig wäre. Diese Entwicklungen könnten insbesondere für Betreiber von Ladeeinrichtungen von Interesse sein, da sie eine breitere Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen würden.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Ladeleistung beim bidirektionalen Laden eine zentrale Rolle spielt. Insbesondere Ladeschwellen, wie die Ladegrenze von 6 Ampere, können sich als Hemmnis für das solare Laden erweisen. Liegt die PV-Erzeugung unter der Ladegrenze, ist eine ausreichende Ladung des BEV nicht gewährleistet, was insbesondere bei kleinen PV-Anlagen mit oft nur begrenzten Ladezeiten zu Problemen führen kann. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen, dass die Kapazität der BEV-Batterie keine signifikante Auswirkung auf den Autarkiegrad eines Haushalts hat (s. Kapitel 4.3.4). Wichtiger sind hingegen die Lade- und Entladeleistungen: Eine niedrige Ladeleistung wirkt sich positiv

auf den Autarkiegrad (+10% im Vergleich zum unidirektionalen Laden) aus, da im BEV mehr Energie zwischengespeichert werden kann (s. Kapitel 4.3.4). Darüber hinaus führen längere Verfügbarkeiten des BEVs zu einer gesteigerten Energieabgabe an den Haushalt, was den Eigenverbrauchsanteil erhöht und somit den Autarkiegrad (+12% im Vergleich zum unidirektionalen Laden) weiter verbessert.

Regulatorische und technische Herausforderungen

Ein Hindernis für die breite Einführung von V2H ist derzeit der regulatorische Rahmen, insbesondere im Hinblick auf die Doppelbelastung von zwischengespeichertem Strom. Darüber hinaus ist die Beibehaltung der Eigenschaften erneuerbarer Energien gemäß EEG bei der Speicherung im Fahrzeug von Bedeutung. Technisch bietet die ISO 15118-20 eine Basis für die sichere Übertragung von Daten und Energie [127], es fehlen jedoch noch übergreifende Richtlinien und Anreize.

Sozioökonomische Implikationen

Die Relevanz sozioökonomischer Faktoren für die Akzeptanz und Implementierung des bidirektionalen Ladens darf nicht unterschätzt werden. Die durchgeführte Simulation hat gezeigt, dass die Lebensdauer (Vollladezyklen) der Batterie im BEV im angenommenen Referenzhaushalt (s. Kapitel 4.3.1) durch bidirektionales Laden kaum beansprucht wird. Im Vergleich zum Fahrbetrieb treten deutlich höhere Belastungen der Batterie zu, während die Beanspruchung im stationären Betrieb deutlich geringer ausfällt. Dennoch sollten weitere Forschungsarbeiten zu Nutzerakzeptanz und der Bereitschaft, das eigene Fahrzeug für Energiemanagement im Haushalt oder sogar netzdienlich zur Verfügung zu stellen, erforscht werden. Es ist fraglich, ob die Erhöhung der Autarkie bei den heutigen Strompreisen als Motivation ausreicht oder ob weitere Verpflichtungen oder monetäre Anreize z. B. zur Netzstabilisierung oder zur Erhöhung der Strompreise notwendig sind.

Vorteile für Netzbetreiber und Haushalte

Bidirektionales Laden bringt nicht nur finanzielle Vorteile für die Haushalte durch geringere Energiekosten, sondern bietet auch den Netzbetreibern die Möglichkeit der Netzstabilisierung. Elektrofahrzeuge können als temporäre Energiespeicher dienen und zur Glättung von Lastspitzen beitragen.

Aus Kundensicht ergeben sich durch bidirektionales Laden eine Reihe finanzieller und praktischer Vorteile. Kunden können ihre Energiekosten senken, indem sie in Zeiten hoher Strompreise auf die im Fahrzeug gespeicherte Energie zurückgreifen, anstatt Strom aus dem Netz zu beziehen. Dies resultiert in einer Maximierung der Stromnutzung der eigenen PV-Anlage sowie einer Steigerung des Autarkiegrades des Haushalts. Darüber hinaus kann das BEV als Notstromquelle in Fällen von Stromausfällen fungieren. Die Teilnahme an V2G-Programmen kann zudem durch finanzielle Anreize seitens Netzbetreiber attraktiv gemacht werden. Dies könnte beispielsweise zu direkten Vergütungen oder Steuervorteilen für die Eigentümer des BEV führen. Des Weiteren können Haushalte mit keiner oder einer lediglich kleinen PV-Anlage sogenannte dynamische Stromtarife in Erwägung ziehen, welche sich an den aktuellen Börsenstrompreisen orientieren. Die

Voraussetzung hierfür ist, dass die BEV oder Wallbox ansteuerbar ist für etwaige Schaltvorgänge, was auch für alle weiteren V2G-Anwendungen gilt, die zuvor genannt worden sind.

Weiterentwicklung und Integration

In der V2H-Simulation wurden diverse Parameter analysiert, darunter die Batteriekapazität des BEV, die Ladeleistung und die zeitliche Verfügbarkeit des Fahrzeugs in variablen Szenarien. Der Einfluss der Photovoltaikleistung wurde im Referenzhaushalt als konstante angesetzt, jedoch wird davon ausgegangen, dass leistungsstärkere oder unterschiedlich ausgerichtete Photovoltaikanlagen die Autarkie positiv beeinflussen könnten. Der modulare Aufbau des Tools bietet Flexibilität zur Integration anderer Erzeugerprofile. Dennoch wäre die Nutzung hochauflöster Datensätze sinnvoll, um Lastspitzen präziser zu untersuchen. Die Simulation wird maßgeblich durch die Last- und Nutzungsprofile geprägt, wobei dynamische Fahrprofile zukünftige Entwicklungen unterstützen könnten. Die Verfügbarkeit des BEV erweist sich als zentral für den Autarkiegrad, während variable Stromtarife und V2G-Modelle neue Potenziale bieten. Das Tool sollte zukünftig durch dynamischere Fahrprofile und umfassendere Ladestrategien realistischer und anpassungsfähiger für unterschiedliche Haushalte untersucht werden.

Fazit und Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass V2H-Systeme das Potenzial haben, die Autarkie von Haushalten deutlich zu erhöhen und die Integration erneuerbarer Energien zu verbessern. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Optimierung von Ladestrategien und flexiblen Nutzungskonzepten konzentrieren, um das volle Potenzial dieser Technologie auszuschöpfen.

Die Einbindung von bidirektionalem Laden ermöglicht die Entlastung und Stabilisierung des Stromnetzes, die verbesserte Integration von Erneuerbaren Energien sowie die direkten finanziellen und praktischen Vorteile für Haushalte machen das bidirektionale Laden zu einer Schlüsseltechnologie in der Energie- und Mobilitätswende. In Anbetracht dieser Potenziale kann das Simulationstool für V2H mit bidirektionalem Laden als nützliches Tool für die zukünftige Entwicklung in den Bereichen Elektromobilität und Home Energy Management betrachtet werden. Die Ergebnisse des Simulationstools legen nahe, dass insbesondere bei hoher Anwesenheit des BEV der Autarkiegrad positiv beeinflusst wird. Des Weiteren ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Ladeeinrichtungen (Wallboxen) auch bei geringen Ladeleistung arbeiten sollten, um selbst die kleinsten Erzeugnisse der PV-Anlage in den Speicher des BEV einzuspeisen.

Die Forschungsfrage, wie bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen den Autarkiegrad moderner Einfamilienhäuser erhöhen kann, wurde durch Simulationen beantwortet. Diese zeigten, dass bidirektionales Laden den Autarkiegrad des ausgewählten Referenzhaushalts um 10,6% erhöhen kann. Trotz regulatorischer und technischer Herausforderungen bietet bidirektionales Laden finanzielle Vorteile für Haushalte. Das Simulationstool zeigt das Potenzial der Technologie und liefert Grundlagen für zukünftige Entwicklungen, insbesondere im Hinblick auf Ladestrategien und Nutzerakzeptanz.

6.2 Fazit: Anwendungstest mit Smart Home Technologien

Im Rahmen des Anwendungstests mit Smart Home Technologien wurde eine Methodik entwickelt und angewendet, mit der die nachfolgende Forschungsfrage beantwortet werden konnte:

- *Inwiefern können Smart Home Thermostate zur Datenerhebung und Analyse beitragen, um die Heizenergieeffizienz in Wohngebäuden zu verbessern?*

In einem empirischen Anwendungstest wurde der Einsatz von Smart Home Thermostaten zur Erfassung und Analyse der Heizenergieeffizienz in einem realen Testgebäude untersucht. Die gewonnenen Daten wurden zur Kategorisierung des Heizverhaltens und zur Korrelation mit monatlichen Verbrauchsdaten verwendet. Der methodische Ansatz ermöglicht die Erstellung von Heiztypen für verschiedene Wohnungen, die auf alle Gebäudetypen übertragbar sind, sowie die Klassifizierung von flächenbezogenen Verbrauchswerten. Erstmals wurde der Einsatz von smarten Thermostaten als Datensammler zur Erfassung hochaufgelöster Heizverhaltensdaten realisiert und mit unterjährigen Verbrauchsinformationen korreliert. In einem Mehrfamilienhaus mit 28 Mietwohnungen wurden 14 Wohnungen nahezu vollständig mit Smart Home Thermostaten ausgestattet, um detaillierte Einblicke zu erhalten. Es wurden Auswertungen der Messdaten und Klassifizierungen des Heizverhaltens vorgenommen. Folgende Parameter wurden näher untersucht:

- Bewertung der Temperatur-Niveaus
- Soll-Ist-Vergleich (Offset) der Raumtemperaturen
- Ventilöffnungen am Heizkörper
- Heizenergieverbrauch (Verbrauchsverhalten)
- Bewertung der Luftfeuchtigkeit (Schimmelgefahr)

Analyse der Raumtemperaturen deckt Fehlverhalten auf

Durch die Analyse der durchschnittlichen Temperaturen pro Wohnung konnte eine Bewertung des Temperatur-Niveaus vorgenommen werden. Darüber hinaus erlaubt die Visualisierung der Datensätze auf Raumbene genauere Rückschlüsse auf das individuelle Heizverhalten, die für weitere Feedbacks genutzt werden können.

Die Ermittlung des Offsets zwischen Soll- und Ist-Temperatur hat gezeigt, dass die Regelung der smarten Thermostate gut funktioniert und in einigen Fällen auf ein Fehlverhalten (dauerhaft geöffnete Fenster/Türen oder andere Wärmequellen) der Nutzenden hinweist. Dabei ist darauf zu achten, dass die Anzahl der Datensätze (z. B. Soll-Temperaturen) entscheidend für die Qualität der Aussage ist. Darüber hinaus können anhand der Kennwerte auch defekte Komponenten an der Heizung identifiziert werden.

Smarte Thermostate als Indikator für die Verteilung des Verbrauchs in Wohnungen

Durch die Betrachtung der Ventilöffnungen der smarten Thermostate konnten Tendenzen für die Verteilung des Wärmeverbrauchs erkannt werden. So können Aussagen darüber getroffen werden, in welchem Raum der Wohnung am meisten geheizt wird. Damit ist die erfasste Ventilöffnung am smarten Thermostat ein Indikator für Anteile des Wärmeeinsatzes in einer Wohnung. Es ist jedoch anzumerken, dass die Messintervalle alle 5-Minuten für eine genaue Bestimmung der Verteilung

nicht ausreichen. Der Vergleich der Ventilöffnungen mit dem Heizenergieverbrauch ergab ein abhängiges Verhalten. Zur Validierung sollen zukünftig weitere Vergleiche mit realen Verbrauchsdaten durchgeführt werden.

Entwicklung einer Methodik für den kennzahlenbasierten Vergleich von Wohnungen

Die Analyse der Heizenergieverbräuche in einem siebengeschoßigen Mehrfamilienhaus mit 28 Wohneinheiten basierte auf Daten der Heizkostenverteiler und offenbarte individuelle Verbrauchsmuster der Bewohner. Die Darstellung des spezifischen Heizenergieverbrauchs für jede Etage und Wohnung ergab, dass keine direkte Korrelation zwischen der Lage einer Wohnung und ihrem Verbrauch besteht, sondern dass das individuelle Heizverhalten der Bewohner den ausschlaggebenden Faktor darstellt. Auch wenn die Wohnungsstrukturen ähnlich sind, konnten anhand der normierten Verbrauchswerte unterschiedliche Heiztypen identifiziert werden, die unabhängig von der Wohnungsgröße bewertet werden können. Des Weiteren ermöglichte der Einsatz normierter flächenbezogener Verbrauchswerte ein Benchmarking jeder Wohnung im Vergleich zum Durchschnitt aller Wohnungen, wodurch eine detaillierte Kategorisierung des Heizenergieverbrauchs erzielt wurde.

Die Gegenüberstellung von Wohnungen mit und ohne Smart Home Thermostate zeigt zwar Unterschiede (Einsparungen) im Energieverbrauch, die jedoch durch die Analyse der Vorjahre widerlegt worden sind. Dies lässt den Schluss zu, dass smarte Thermostate nur bei sachgemäßer Bedienung dazu beitragen, Energie einzusparen. Dazu können aus den entwickelten Heiztypen und Kennwerten Feedbacks für die Nutzer erstellt werden. Die Hilfestellungen geben Aufschluss darüber, wie die smarten Thermostate sachgemäß durch Zeitpläne oder weitere Automationen für ein bedarfsgerechtes Heizen einzusetzen sind.

Analyse des Warmwasserverbrauchs und der Luftfeuchtigkeit bringt weiteren Mehrwert

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der Warmwasserverbrauch in der Heizperiode 2023/2024 einen durchschnittlich hohen Anteil von ca. 50% ausmacht und im weiteren Projektverlauf ebenfalls in das Feedback einbezogen werden soll. Die Lage der Wohnungen im Gebäude konnte kein besonderer Effekt auf den Verbrauch zugeordnet werden, vielmehr ist der individuelle Verbrauch bzw. das Heizverhalten ein Treiber für den Verbrauch im Testgebäude. Die in den smarten Thermostaten verbauten Sensoren zur Luftfeuchtigkeit ermöglichen weitere sinnvolle Auswertungen. Im Rahmen des Anwendungstest konnte durch die Messung der aktuellen Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit die Luftqualität bzw. das Schimmelpilzrisiko über einen längeren Zeitraum beurteilt werden.

Heiztypen erlauben Rückschlüsse zum Verbrauch

Die vorliegende Untersuchung belegt den Einsatz von Smart Home Thermostaten zur Generierung wichtiger Daten zum Heizverhalten. Die Analyse dieser Daten ermöglichte die Entwicklung von vier verschiedenen Heiztypen: *Hoch-Heizer*, *Eco-Heizer*, *Nicht-Heizer* und *Durch-Heizer*. Die Klassifizierung erfolgte anhand der Heizdauer und der eingestellten Soll-Temperatur, wodurch eine Einsicht in das Nutzerverhalten hinsichtlich des Heizenergieverbrauchs gewonnen werden konnte. Die Heiztypen korrelieren nachweisbar direkt mit dem Verbrauch.

Die Darstellung der Ergebnisse der Heiztypen in Tabelle 28 verdeutlicht, dass die Mehrheit der Heiztypen einem ähnlichen Verbrauchsmuster folgen. Dabei weisen *Eco-* und *Nicht-Heizer* tendenziell einen niedrigeren Verbrauch auf. Besonders die Gruppe der identifizierten *Hoch-* und *Durch-Heizer* weist einen erhöhten durchschnittlichen Verbrauch auf. Es wird angenommen, dass mithilfe von Zeitplänen und einer optimierten, bedarfsgerechteren Beheizung der Wohnung Energieeinsparpotenziale realisiert, werden können. Die Heiztypen liefern wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung von Feedback-Strategien, die darauf abzielen, Haushalten zu helfen, ihren monatlichen Energieverbrauch zu verstehen und zu optimieren.

Smart Home Thermostate liefern relevante Daten zum Heizverhalten und bieten die Grundlage für Feedback zum Heizenergieverbrauch

Aus möglichen Abhängigkeiten zwischen Verbrauch und Verhalten soll in weiteren Schritten des Forschungsprojektes *Smart User Interfaces*³⁰ das Feedback für die Mieter abgeleitet und visualisiert werden. Übergeordnetes Ziel ist es, den Mietern ein besseres Verständnis für ihr Heizverhalten zu vermitteln und sie bei der Verbesserung der Heizenergieeffizienz zu unterstützen. Die Erhebung und Analyse der Datensätze von Smart Home Thermostaten kann auf andere Mietwohnungen übertragen und zur Generierung von Feedback genutzt werden. Insbesondere ist ein Vergleich (Gamification-Ansatz) der Mieter in unterschiedlichen Wohnungen und Parametern (Lage, Wohnfläche, Anzahl der Bewohner) möglich. Die im Rahmen des Anwendungstests entwickelten und identifizierten Heiztypen veranschaulichen exemplarisch, dass mithilfe von Assistenzsystemen wie smarten Thermostaten eine intelligente Steuerung des Heizenergieverbrauchs möglich ist. Des Weiteren tragen die gesammelten Daten dazu bei, das Heizverhalten langfristig zu überwachen und nachhaltig zu informieren, falls hohe Verbräuche oder Defekte identifiziert werden. Diese neue Messmethode ermöglicht die Darstellung von Daten und Kennzahlen, die zuvor nicht verfügbar waren. Die gewonnenen Erkenntnisse sind von großem Nutzen und ermöglichen nicht nur die Kontrolle der Kosten, sondern kann auch aktiv dazu beitragen, den Verbrauch und damit die Emissionen zu reduzieren und einen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Smart Home Thermostate entscheidend zur Erhebung und Analyse von Heizdaten beitragen können, um die Heizenergieeffizienz in Wohngebäuden zu verbessern. Durch die Erfassung spezifischer Parameter wie Raumtemperatur, Ventilstellungen und Luftfeuchtigkeit konnten verschiedene Heiztypen, wie Hoch-, Eco-, Nicht- und Durch-Heizer, identifiziert werden. Diese Klassifikationen ermöglichen ein tieferes Verständnis für das Heizverhalten der Mieter und bieten die Grundlage für die Entwicklung individualisierter Feedback-Strategien. Die Integration solcher Technologien hat gezeigt, dass bewusstere Heizgewohnheiten erheblich zur Reduzierung des Heizenergieverbrauchs beitragen können.

Die Forschungsfrage, inwieweit Smart Home Thermostate zur Verbesserung der Heizenergieeffizienz beitragen können, wurde durch einen Anwendungstest in einem Mehrfamilienhaus beantwortet. Der empirische Anwendungstest in einem Mehrfamilienhaus hat die Umsetzbarkeit dieses Ansatzes demonstriert und unterschiedliche Verbrauchsmuster der Bewohner aufgezeigt, wobei das individuelle Verhalten den größten Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Die gesammelten

³⁰ Forschungsprojekt [Smart User Interfaces](#)

Daten lassen nicht nur Rückschlüsse auf ineffiziente Heizmuster zu, sondern ermöglichen auch die Identifikation technischer Mängel, die zur Optimierung genutzt werden können. Zudem erlaubt die Korrelation der Heizverhaltensdaten mit Verbrauchsdaten aus der unterjährigen Verbrauchsinformation präzisere Rückschlüsse und unterstützt die Ausarbeitung von Energiesparplänen. Die Ergebnisse zeigen, dass Smart Home Thermostate über die reine Temperaturregelung hinaus als Datensammler einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Heizenergieeffizienz für ein nachhaltiges Gebäudeenergiemanagement leisten können.

Zukünftige Entwicklungen sollten darauf abzielen, die verfügbaren Daten für eine umfassendere Unterstützung der Bewohner zu nutzen, um sie zu effizienteren Heizverhalten zu motivieren. Des Weiteren könnten energiebasierte Gamification-Ansätze zur weiteren Optimierung des Verbrauchs beitragen. Schließlich liefern Smart Home Thermostate essenzielle Daten, die nicht nur Kosten kontrollierbar, sondern auch die Emissionen reduzierbar machen, was einen maßgeblichen Beitrag zur Energiewende leisten könnte.

6.3 Allgemeine Schlussfolgerungen, Synergieeffekte und Ausblick

Im Kontext von Energiemanagement im Haushalt spielt das BEV auf elektrischer Ebene sowohl als Verbraucher als auch als Speicher eine bedeutende Rolle. Das entwickelte Simulationstool für ein V2H-System hat am Beispiel eines typischen Referenzhaushalts aufgezeigt, dass moderne, elektrifizierte Haushalte durch den Einsatz eines bidirektionalen BEV den Autarkiegrad steigern können. Weiterentwicklungspotenzial besteht in der Auswahl weiterer Ladestrategien, wie beispielsweise durch gesteuertes Laden und der Priorisierung durch z. B. dynamische Tarife. Des Weiteren wurden Einflussfaktoren identifiziert, die einen unmittelbaren Einfluss auf den Autarkiegrad haben. Diese sollten mit realen Datensätzen validiert werden, da zum Beispiel zum größten Teil statische Fahrprofile eingesetzt wurden. Die Adaption der Erzeugungs- und Lastprofile ermöglicht die Simulation unterschiedlicher Haushalte im Tool. Dadurch ist eine Übertragbarkeit der Methodik gegeben. Insgesamt hat sich gezeigt, dass bidirektionales Laden ein enormes Potenzial bietet und über den Haushalt hinweg ein sinnvoller Baustein der Energiewende sein kann.

Der empirische Anwendungstest zur Steigerung der Heizenergieeffizienz mit Smart Home Thermostaten hat gezeigt, dass sich smarte Thermostate eignen, um das individuelle Heizverhalten zu bewerten. Obgleich keine direkten Erkenntnisse über die Einsparungen von smarten Thermostaten nachgewiesen werden konnten, erlauben die hochauflösenden Messdaten eine detaillierte Analyse des Heizverhaltens hinsichtlich des Energieverbrauchs. Des Weiteren konnten durch die Messdaten Hinweise für eine nicht optimal eingestellte oder defekte Heizungsanlage identifiziert werden. Die entwickelten Heiztypen stellen eine Grundlage für nutzerspezifisches Feedback zum Heizverhalten dar. Damit ist der Grundstein für weitere Forschungsarbeiten gelegt, die den Einfluss der Verbrauchsvisualisierung und aktiven Feedbackgestaltung zum Heizverhalten untersuchen. Die Ergebnisse der verbrauchsstarken Heiztypen *Hoch-* und *Durch-Heizer* legen nahe, dass gerade bei diesen Nutzergruppen ein hohes Einsparpotenzial vermutet wird. Smart Home Thermostate können durch Funktionen wie z. B. Zeitpläne und weitere Automationen bei der Umsetzung eines effizienten Heizens unterstützen. Insofern kann die Methodik zur Datenerhebung von Smart Home Messdaten als Instrument zur Analyse des Heizverhaltens und Steigerung der Heizenergieeffizienz genutzt werden.

Die Schnittstellen und Synergieeffekte zwischen dem bidirektionalen V2H-Laden und der Datenerhebung durch smarte Thermostate können beispielsweise durch ein zentralisiertes Energie-Management-System im Haushalt zusammengebracht werden. Durch die Datensammlung und -analyse des Heizverhaltens, welche durch smarte Thermostate erbracht werden, können beispielsweise Betriebsweisen von elektrischen Wärmepumpen optimiert werden. Der Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden mit konventionellen Heizkörpern ist unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Diesbezüglich sei auf den Praxisleitfaden für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern verwiesen [128]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Prognosen über den Energiebedarf zu erstellen. In Zeiten, in denen der Anteil Erneuerbarer Energien gering ist, kann die Energie aus dem BEV zur Wärmepumpenversorgung verwendet werden, um sich an der Energiewende zu beteiligen. In Abbildung 62 erfolgt eine schematische Darstellung der Systemkomponenten beider betrachteten Anwendungsfelder.

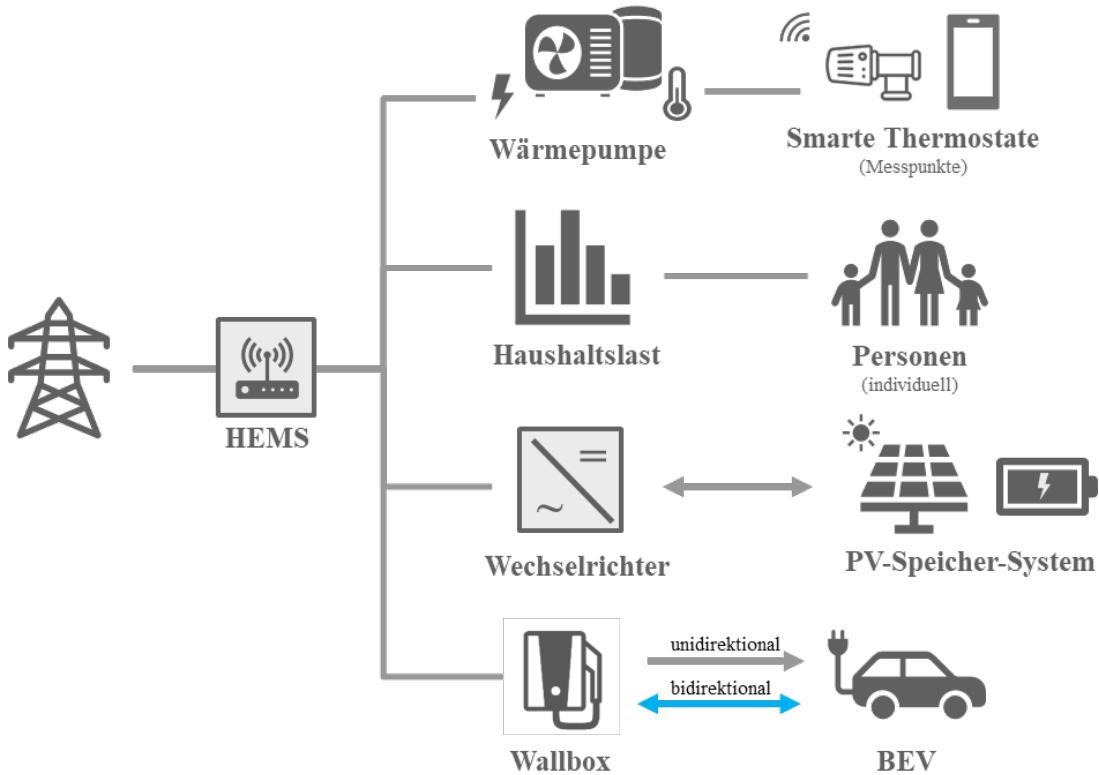


Abbildung 62: Veranschaulichung Energie-Management-System Haushalt mit Smart Home Technologien und V2H-System

Bei Haushalten mit PV-Anlagen besteht die Möglichkeit, die im Fahrzeug gespeicherte Energie zur Maximierung des Eigenverbrauchs zu nutzen. Die tagsüber produzierte Solarenergie wird im BEV gespeichert und kann zu einem späteren Zeitpunkt für Heizzwecke genutzt werden, beispielsweise durch Wärmepumpen. Des Weiteren können Daten der smarten Thermostate dazu beitragen, Vorhersagemodelle zu erstellen, welche die Heizleistung bedarfsgerecht je nach Heiztyp berechnen.

Die Integration eines zentralen Energiemanagements im Haushalt bietet viele Vorteile. Durch die effiziente Steuerung der Energieflüsse können Haushalte ihre selbst erzeugte Energie optimal nutzen. Die Kombination von bidirektionalem Laden (V2H) und intelligenter Heizungssteuerung (Smart Home Thermostate) trägt dazu bei, den Eigenverbrauch zu maximieren und die Abhängigkeit von externen Energiequellen deutlich zu reduzieren. Im Simulationsmodell konnte für den Referenzhaushalt eine Steigerung der Autarkie um 10% nachgewiesen werden. In Kombination mit smarten Thermostaten können so wichtige Daten gesammelt werden, die für die Erstellung von Modellen zur genauen Vorhersage des Heizenergiebedarfs auf der Grundlage individueller Heizvorlieben genutzt werden können. Diese Ansätze tragen nicht nur zur Erhöhung des Autarkiegrades bei, sondern führen auch zu Effizienzsteigerungen und Energiekosteneinsparungen.

Nachfolgend sind die **Vorteile** stichpunktartig zusammengefasst:

- Zentrale Steuerung der Energieflüsse für eine effiziente Energienutzung
- Maximierung des Eigenverbrauchs durch bidirektionales Laden und intelligente Heizungssteuerung

- Nutzung intelligenter Thermostate zur Datenerfassung und Modellierung des Energiebedarfs
- Effizienzsteigerung und Kostensenkung durch personalisierte Energieprognosen

Andererseits bringt die Einführung eines zentralen Energiemanagementsystems im Haushalt einige Herausforderungen mit sich. Zum einen erfordert die Implementierung erhebliche finanzielle Investitionen und ein hohes Maß an technischem Know-how, was für viele Haushalte eine Hürde darstellen kann. Darüber hinaus gibt es häufig Schnittstellenprobleme aufgrund unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle und Standards der eingesetzten Systeme, die die Integration erschweren und zu Kompatibilitätsproblemen führen können, die den reibungslosen Betrieb beeinträchtigen. Nicht zuletzt hängt der Erfolg maßgeblich von der Bereitschaft der Nutzer ab, sich aktiv mit den Technologien auseinanderzusetzen und ihr persönliches Verhalten an die neuen Anforderungen anzupassen, was nicht immer selbstverständlich ist, wie auch die Erkenntnisse aus dem Anwendungstest mit Smart Home Thermostaten zeigen.

Nachfolgend sind die **Nachteile** stichpunktartig zusammengefasst:

- Hohe Investitionen und technisches Know-how erforderlich
- Schnittstellenprobleme durch unterschiedliche Kommunikationsprotokolle und -standards
- Abhängigkeit des Erfolgs vom Nutzerverhalten und der Anpassungsbereitschaft

Weiterhin ist anzumerken, dass die Integration der beiden Anwendungsbereiche mit einigen Herausforderungen verbunden ist. Zum einen werden in modernen Einfamilienhäusern eher Fußbodenheizungen als klassische Heizkörper mit intelligenten Thermostaten eingesetzt. Zwar können auch Fußbodenheizungen über eine Smart Home Steuerung angesteuert werden, jedoch agiert dieses System in der Regel deutlich trüger. Darüber hinaus stellt sich auch die Frage der Bezahlbarkeit eines zentral gesteuerten Energiemanagementsystems für Miethaushalte, da diese in der Regel über geringere finanzielle Mittel verfügen als Haushalte in Einfamilienhäusern.

Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen sollte eine detaillierte Analyse der Wirtschaftlichkeitsaspekte für beide Anwendungsfelder in Betracht gezogen werden. Dazu gehört die Bewertung der Anfangsinvestitionen im Vergleich zu den langfristigen Kosteneinsparungen durch eine verbesserte Energieeffizienz. Darüber hinaus sollte untersucht werden, wie sich zentrales Energiemanagementsystem auf Faktoren wie den thermischen Komfort und die Wahlfreiheit der Nutzer auswirken. Diese Parameter spielen eine entscheidende Rolle für die Nutzerakzeptanz. Während verbesserter Komfort die Akzeptanz fördern kann, kann eine eingeschränkte Wahlfreiheit potenziell das Gegenteil bewirken. Das Verständnis dieser Dynamiken ist entscheidend, um das volle Potenzial der Technologien auszuschöpfen und sicherzustellen, dass sie von den Nutzern positiv aufgenommen werden.

Insofern bieten die beiden unterschiedlichen Anwendungsfelder Schnittstellen und Synergieeffekte zwischen V2H und Smart Home Thermostaten, wodurch sich spannende Möglichkeiten für die zukünftige Gestaltung von Energiemanagementsystemen in privaten Haushalten ableiten lassen. Sie verdeutlichen den zunehmenden Trend zur Digitalisierung und Vernetzung im Bereich der Energieeffizienz und fördern nachhaltige Energiekonzepte für das Energiemanagement im Haushalt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, *Energieverbrauch privater Haushalte*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- [2] European Commission, *Energy Performance of Buildings Directive: Aiming to achieve a fully decarbonised building stock by 2050, the Energy Performance of Buildings Directive contributes directly to the EU's energy and climate goals*. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [3] Bundesministerium der Justiz (BMJ), *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG): Anlage 10 (zu § 86) Energieeffizienzklassen von Wohngebäuden*. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_10.html (accessed: Sep. 5 2023).
- [4] Bundesamt für Justiz, *HeizkostenV - Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten*. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/heizkostenv/BJNR002610981.html> (accessed: Oct. 30 2023).
- [5] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Ed., "Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland: Basisdaten und Einflussfaktoren," 2019.
- [6] A. Aretz, S. Gährs, and J. Knoefel, "Prosumer-Potenziale NRW 2030: Studie für die Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen," 2017.
- [7] Umweltbundesamt, Ed., "Entwicklung des Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Energien: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)," 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeerzeugung-aus-erneuerbaren-energien>
- [8] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeughängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen*. [Online]. Available: https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ27/fz27_202404.xlsx?__blob=publicationFile&v=5
- [9] S. Leonhardt, T. Neumann, D. Kretz, T. Teich, and M. Bodach, Eds., *Innovation und Kooperation auf dem Weg zur All Electric Society*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [10] K. Wisser, *Gebäudeautomation in Wohngebäuden (Smart Home): Eine Analyse der Akzeptanz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5598646>
- [11] A. Nacer, B. Marhic, and L. Delahoche, "Smart Home, Smart HEMS, Smart heating: An overview of the latest products and trends," in *The 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC'17): May 07-09, 2017, Batna 2 University, Batna, Algeria*, Batna, Algeria, 2017, pp. 90–95.
- [12] S. Ali, T. N. Malik, and A. Raza, "Risk-Averse Home Energy Management System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91779–91798, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994462.

- [13] L. Canale, A. R. Di Fazio, M. Russo, A. Frattolillo, and M. Dell'Isola, "An Overview on Functional Integration of Hybrid Renewable Energy Systems in Multi-Energy Buildings," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1078, 2021, doi: 10.3390/en14041078.
- [14] B. Aschendorf, *Energiemanagement durch Gebäudeautomation: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.
- [15] U. Zafar, S. Bayhan, and A. Sanfilippo, "Home Energy Management System Concepts, Configurations, and Technologies for the Smart Grid," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119271–119286, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005244.
- [16] A. B. Brush, B. Lee, R. Mahajan, S. Agarwal, S. Saroiu, and C. Dixon, "Home automation in the wild," in *Conference proceedings and extended abstracts / the 29th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems: CHI 2011, Vancouver, BC, May 7 - 12, 2011*, Vancouver, BC, Canada, 2011, p. 2115.
- [17] A. Jouannic, A. Weil, and R. Lopez, "Accelerating the energy transition with Home Energy Management: Why the HEM market is at a tipping point in Europe," 2020.
- [18] European Commission, *Fit für 55 - Green Deal: Der EU-Plan für den grünen Wandel*. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55/>
- [19] T. Kern, P. Dossow, and E. Morlock, "Revenue opportunities by integrating combined vehicle-to-home and vehicle-to-grid applications in smart homes," *Applied Energy*, vol. 307, p. 118187, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118187.
- [20] B. Wille-Haussmann, A. Groß, and M. Antretter, *Leitfaden Bidirektionales Laden: Status, Trends und Potenziale*, 2023. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/leitfaden-bidirektionales-laden.pdf>
- [21] M. Sterner and I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, 2014.
- [22] N. Starcevic, "Status quo und eine Potenzialanalyse zur Einsparung von Heizenergie durch die Nutzung der unterjährigen Verbrauchsinformation im deutschen Mietwohngebäudebestand: Masterarbeit," 2023.
- [23] L.-A. Brischke, M. Over, H. Parnow, J. Barth, and S. Walter, *Verständliche monatliche Heizinformation als Schlüssel zur Verbrauchsreduktion: Leitfaden für Messdienstleister, Wohnungswirtschaft und Verbraucher:innen*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/verstaendliche-monatliche-heizinformation-als> (accessed: Oct. 25 2023).
- [24] T. Rehm and T. Schneiders, *Technologie-Screening: Smart Energy Technologien für Haushalte*: (:unav), 2022. [Online]. Available: <https://epb.bibl.th-koeln.de/frontdoor/index/index/docId/1989>
- [25] Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH and M. Krödel, "Smart Home: Wohngebäude intelligent vernetzt," 2016.
- [26] Florian Allerding, "Organic Smart Home: Energiemanagement für Intelligente Gebäude," 2014.
- [27] Y. Xiao and M. Watson, "Guidance on Conducting a Systematic Literature Review," *Journal of Planning Education and Research*, vol. 39, no. 1, pp. 93–112, 2019, doi: 10.1177/0739456X17723971.

- [28] F. Dziopa and K. Ahern, "A Systematic Literature Review of the Applications of Q-Technique and Its Methodology," *Methodology*, vol. 7, no. 2, pp. 39–55, 2011, doi: 10.1027/1614-2241/a000021.
- [29] A. J. Onwuegbuzie and R. Frels, *Seven steps to a comprehensive literature review: A Multimodal and Cultural Approach*: SAGE, 2016.
- [30] O. Ouramdane, E. Elbouchikhi, Y. Amirat, F. Le Gall, and E. Sedgh Gooya, "Home Energy Management Considering Renewable Resources, Energy Storage, and an Electric Vehicle as a Backup," *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2830, 2022, doi: 10.3390/en15082830.
- [31] Nymoen Håvard, T. Kimpel, and C. Kaschade, "Initiative "Bidirektionales Laden" Positionspapier zu notwendigen regulatorischen Anpassungen im Kontext des bidirektionalen Ladens," 2022.
- [32] S. Henßler, "Bidirektionales Laden: Umfassender Leitfaden | Elektroauto-News.net: Welche Arten des bidirektionalen Ladens gibt es?," *Elektroauto-News.net*, 21 Apr., 2023. <https://www.elektroauto-news.net/wissen/bidirektionales-laden>
- [33] C. Köllner, "Wann kommt bidirektionales Laden von E-Autos?," *springerprofessional.de*, 25 Apr., 2022. <https://www.springerprofessional.de/ladeinfrastruktur/elektrofahrzeuge/wann-kommt-bidirektionales-laden-von-e-autos-/18217570>
- [34] T. Paulsen, "Das Elektroauto als Stromspeicher fürs Haus: So funktioniert bidirektionales Laden," *ADAC*, 28 Dec., 2023. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/bidirektionales-laden/>
- [35] F. Brosi, *Methode zur Erzeugung eines erweiterten Konformitätstests für Kommunikationsprotokolle am Beispiel der ISO 15118*. Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [36] R. Petri, *Bidirektionales Laden: Energiewende mit E-Fahrzeug-Akkus ermöglichen*. [Online]. Available: <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/mobility/bidirektionales-laden>
- [37] W. Rudschies, "Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden," *ADAC*, 13 Sep., 2022. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>
- [38] K. Imolauer, *Bidirektionales Laden – Möglichkeiten, Risiken und Chancen*. [Online]. Available: <https://www.roedl.de/themen/erneuerbare-energien/2022/februar/bidirektionales-laden>
- [39] M. Rosekeit, B. Lunz, D. U. Sauer, and R. W. de Doncker, *Bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge als Energiespeicher im Smart Grid*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/260020123_Bidirektionales_Ladegerat_für_Elektrofahrzeuge_als_Energiespeicher_im_Smart_Grid
- [40] FfE München, "BDL Use Case Eigenverbrauchsoptimierung Steckbrief," München, 2021. [Online]. Available: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/11/Steckbrief_Eigenverbrauchsoptimierung.pdf
- [41] E.ON SE, *Bi-Clever zeigt revolutionäres Potenzial von bidirektionalem Laden*. [Online]. Available: <https://www.eon.com/de/innovation/innovation-in-aktion/innovation-news/bi-clever-zeigt-revolutionaeres-potenzial-von-bidirektionalem-laden.html> (accessed: Sep. 4 2023).

- [42] V. Heinisch, L. Göransson, R. Erlandsson, H. Hodel, F. Johnsson, and M. Odenberger, "Smart electric vehicle charging strategies for sectoral coupling in a city energy system," *Applied Energy*, vol. 288, p. 116640, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116640.
- [43] L. Stepien, "Bidirektionales Laden in Wohnquartieren," (in De;de), *ATZ Automobiltech Z*, vol. 125, no. 9, pp. 18–23, 2023, doi: 10.1007/s35148-023-1636-y.
- [44] O. Almughram, S. Ben Slama, and B. Zafar, "Model for Managing the Integration of a Vehicle-to-Home Unit into an Intelligent Home Energy Management System," *Sensors*, vol. 22, no. 21, p. 8142, 2022, doi: 10.3390/s22218142.
- [45] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "DENA - Gebäudereport 2022: Zahlen, Daten, Fakten," 2021. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Gebaeudereport_2022.pdf
- [46] L. Beier and C. Bantle, *Wie heizt Deutschland 2023?: Studie zum Heizungsmarkt*. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/energie/studie-wie-heizt-deutschland/>
- [47] D. Bohne, *Gebäudetechnik und technischer Ausbau von Gebäuden*, 12th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.
- [48] E. Böllin, *Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden: Komponenten, Systeme, Anlagenbeispiele*, 1st ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [49] *Thermostatische Heizkörperventile - Anforderungen und Prüfung*, 215:2019, Deutsches Institut für Normung e.V., 2019.
- [50] A. Aretz et al., *Erfassung und Bewertung des Energiesparpotenzials von digitalen Anwendungen im Strom-und Wärmebereich: Abschlussbericht zum Projekt DETECTIVE - Energieeinsparung durch Digitalisierung*, 2023. [Online]. Available: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/publikationen/fkz_03ei5204_schlussbericht_detective_i_ii_ergebnisse_i%c3%96w_ifeu.pdf
- [51] Verbraucherzentrale NRW, *Heizkosten sparen: Thermostat richtig einstellen und wechseln | Verbraucherzentrale.de*. [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/heizen-und-warmwasser/heizkosten-sparen-thermostat-richtig-einstellen-und-wechseln-7940>
- [52] G. Gao and K. Whitehouse, "The self-programming thermostat: optimizing setback schedules based on home occupancy patterns," in *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, Berkeley California, 2009, pp. 67–72.
- [53] E. Barrett and S. Linder, "Autonomous HVAC Control, A Reinforcement Learning Approach," in *Machine learning and knowledge discovery in databases: European conference, ECML PKDD 2015, Porto, Portugal, September 7-11, 2015; proceedings*, 2015, pp. 3–19. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-23461-8_1
- [54] Techem Messtechnik GmbH, *Der Heizkostenverteiler, das unbekannte Wesen*. [Online]. Available: <https://www.techem.com/at/de/newscenter/alle-beitraege/heizkostenverteiler> (accessed: Feb. 10 2024).
- [55] BauNetz, "PMV | Gesund Bauen | Glossar | Baunetz_Wissen," *BauNetz*. <https://www.bau-netzwissen.de/glossar/p/pmv-2350493> (accessed: Sep. 1 2024).
- [56] DIN EN ISO 7730:2006-05, *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und*

- des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO_7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO_7730:2005, Berlin.
- [57] Umweltbundesamt, *Richtiges Heizen schützt das Klima und den Geldbeutel*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur#gewusst-wie> (accessed: Oct. 30 2023).
- [58] Zangheri, Serrenho, and Bertoldi, "Energy Savings from Feedback Systems: A Meta-Studies' Review," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3788, 2019, doi: 10.3390/en12193788.
- [59] I. Vassileva, E. Dahlquist, F. Wallin, and J. Campillo, "Energy consumption feedback devices' impact evaluation on domestic energy use," *Applied Energy*, vol. 106, pp. 314–320, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.059.
- [60] U. Gnewuch, S. Morana, C. Heckmann, and A. Maedche, "Designing Conversational Agents for Energy Feedback," in *Lecture Notes in Computer Science, Designing Conversational Agents for Energy Feedback*, U. Gnewuch, S. Morana, C. Heckmann, and A. Maedche, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 18–33.
- [61] K. Carrie Armel, A. Gupta, G. Shrimali, and A. Albert, "Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 213–234, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.08.062.
- [62] P. Hoffmann, G. Frey, M. Friedrich, S. Kerber-Clasen, J. Marschall, and M. Geiger, "Praxistest "Moderne Energiesparsysteme im Haushalt"," 2012.
- [63] M. Klobasa, J. Schleich, and S. Götz, "Welche Einspareffekte lassen sich durch Smart Metering erzielen: Ergebnisse eines Feldversuchs," 2012.
- [64] A. Huterer, J. Artho, and U. Vogel, "Benutzergerechte Assistenz- und Motivationssysteme BAM: Feldversuch," 2020.
- [65] A. Podgornik, B. Sucic, and B. Blazic, "Effects of customized consumption feedback on energy efficient behaviour in low-income households," *Journal of Cleaner Production*, vol. 130, pp. 25–34, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.009.
- [66] Dietlinde Quack, Ran Liu, Jens Gröger, "Smart Home – Energieverbrauch Smart Home - Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte," 2019.
- [67] D. Schäuble, A. Marian, and L. Cremonese, "Conditions for a cost-effective application of smart thermostat systems in residential buildings," *Applied Energy*, vol. 262, p. 114526, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114526.
- [68] T. Schneiders, T. Rehm, C. Strohm, and M. Deimel, "Smart Home Field Test – Investigation of Heating Energy Savings in Residential Buildings," in *2018 7th International Energy and Sustainability Conference (IESC): 17-18 May 2018*, Cologne, 2018, pp. 1–8.
- [69] B. Mailach and B. Oschatz, "Kurzstudie Energieeinsparungen Digitale Heizung," 2017.
- [70] K. Lennerts and T. Kropp, "Energieeinsparpotenzial (Bereich Wärme) für Mieter durch den Einsatz Smarter Heizkörperthermostate: Fallstudie," (in de), 2194-1629, 2023, doi: 10.5445/IR/1000157856.
- [71] D. Kretz, O. Scharf, and F. P. Schröder, "Heizenergieeinsparung durch effiziente Gebäude-digitalisierung und smarte Quartiersvernetzung," in pp. 213–237.
- [72] V. Grinewitschus, H. Kubitza, K. Fransen, and S. Jurkschat, "BaltBest - Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand: Abschlussbericht," 2022.

- [73] S. Jurkschat, F. F. Sehr, K. Fransen, A. Beblek, and V. Grinewitschus, "Measurement Data-Based Estimation of the Suitability of Existing Properties for the Operation of x to Water Heat Pumps Using a Seed of 100 Multi-Family Houses and Different Power Shifting Approaches," *Energies*, vol. 16, no. 21, p. 7352, 2023, doi: 10.3390/en16217352.
- [74] H. Stopps and M. F. Touchie, "Residential smart thermostat use: An exploration of thermostat programming, environmental attitudes, and the influence of smart controls on energy savings," *Energy and Buildings*, vol. 238, p. 110834, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110834.
- [75] S. Schlitzberger, "Studie zum Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz von elektronischen Thermostaten," 2016.
- [76] V. Grinewitschus, "Temperaturen runter, Gebäudeeffizienz hoch," *Haufe*, 30 Sep., 2021. https://www.haufe.de/immobilien/wohnungswirtschaft/baltbest-effizienz-von-heizanlagen_260_552050.html (accessed: Jun. 12 2022).
- [77] J. Lu *et al.*, "The smart thermostat," in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Zürich Switzerland, 2010, pp. 211–224.
- [78] T. Nowak, "European heat pump market," 2021. [Online]. Available: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/european-heat-pump-market>
- [79] SolarPower Europe, Ed., "EU Market Outlook for Solar Power," 2021. [Online]. Available: <https://www.solarpowereurope.org/eu-market-outlook-for-solar-power-2021-2025-report/>
- [80] European Environment Agency (EEA), *New registrations of electric vehicles in Europe*. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles> (accessed: Feb. 11 2022).
- [81] infas Institut für Sozialwissenschaft GmbH, *Mobilität in Deutschland – MiD: Ergebnisbericht*. [Online]. Available: <https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/publikationen2017.html> (accessed: Oct. 27 2023).
- [82] Statistisches Bundesamt, *57 % der im Jahr 2022 gebauten Wohngebäude heizen mit Wärme pumpen: Pressemitteilung Nr. N034 vom 12. Juni 2023*. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N034_31121.html (accessed: Oct. 23 2023).
- [83] K. H. Beelich and H.-H. Schwede, *Denken-Planen-Handeln: Grundtechniken für zweckmäßiges Lernen und Arbeiten; mit vielen Erläuterungen und Anwendungsbeispielen*, 1983.
- [84] N. Pflugradt, *LoadProfileGenerator: Version 7.2*. [Online]. Available: <https://www.loadprofilegenerator.de/>
- [85] Valentin Software GmbH, *PV*SOL premium 2022 Release 7*, 2022.
- [86] M. Hinterstocker, B. Eberl, and S. von Roon, *Weiterentwicklung des Standardlastprofilverfahrens Gas*. München, 2015.
- [87] S. Birk, C. Brosig, and E. Waffenschmidt, *Auswirkungen von Sektorkopplungsmaßnahmen im zukünftigen innerstädtischen Niederspannungsnetz*, 2018. [Online]. Available: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/events/eninnov2018/files/pr/session_e5/pr_birk.pdf
- [88] V. Quaschning, "Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation," in *Regenerative Energiesysteme*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015, pp. 178–271.

- [89] M. Müller, T. Kern, A. Ostermann, and P. Dossow, "Bidirektionales Lademanagement (BDL): Intelligentes Zusammenspiel von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Energiesystem," 2023. [Online]. Available: <http://ffe.de/wp-content/uploads/2023/03/BDL-Abchlussbericht.pdf>
- [90] P. Dossow and M. Hampel, "Synergies of Electric Vehicle Multi-Use: Analyzing the Implementation Effort for Use Case Combinations in Smart E-Mobility," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2424, 2023, doi: 10.3390/en16052424.
- [91] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität - Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, 2020.
- [92] T. Kaschub, "Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragersteuerung," 2017.
- [93] N. Orth, J. Weniger, and L. Meissner, "Empfehlungen zur Auslegung von Solarstromspeichern: Forschungsgruppe Solarspeichersysteme der Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin," 2022.
- [94] Dr. Harry Wirth | Fraunhofer ISE, "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland," [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
- [95] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Ed., "Qualitätsbericht: Verkehr in Kilometern (VK), (Inländerfahrleistung)," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/vk_methodik/vk_qualitaetsbericht_202106_pdf.pdf;jsessionid=EE41E05BF6953835D1377304F70218B2.live21303?__blob=publicationFile&v=4
- [96] *Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge*, DIN EN IEC 61851-1, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2019.
- [97] M. Kausche, "Sensitivitätsanalyse," in *Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen*: Springer Gabler, Wiesbaden, 2018, pp. 71–78. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19581-6_5
- [98] W. Rudsches, "Elektroauto mit eigenem Solarstrom laden: So klappt's," *ADAC*, 13 Jan., 2023. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/e-auto-solarstrom-laden/> (accessed: Sep. 5 2023).
- [99] A. Kampker and H. H. Heimes, *Elektromobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024. [Online]. Available: <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/76776>
- [100] EnBW Energie Baden-Württemberg AG, *Die Ladeleistung von Elektroautos einfach erklärt | EnBW*. [Online]. Available: <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/laden/die-ladeleistung-eines-elektroautos/>
- [101] European Council, *Rat und Parlament erzielen Einigung über Energieeffizienz-Richtlinie*. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/10/council-and-parliament-strike-deal-on-energy-efficiency-directive/> (accessed: Oct. 30 2023).
- [102] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Ed., "Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019," 2019. [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=72
- [103] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand*.

- [104] A.-K. Kreutzmann and C. Kluge, *Studiendesign*. [Online]. Available: <https://wikis.fu-berlin.de/display/fustat/Studiendesign#Studiendesign-Hypothesenbildung> (accessed: Jun. 9 2022).
- [105] S. Albers, Ed., *Methodik der empirischen Forschung*, 3rd ed. Wiesbaden: Gabler, 2009.
- [106] *VDI 2077 Blatt 3.5: Verbrauchskostenabrechnung für die technische Gebäudeausrüstung*, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., May. 2018.
- [107] S. Verbeke, D. Aerts, G. Reynders, Y. Ma, and P. Waide, "Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings," 2020.
- [108] C. Baedeker, C. Liedtke, and M. J. Welfens, "Green Economy as a Framework for Product-Service Systems Development: The Role of Sustainable Living Labs," in *Living Labs*: Springer, Cham, 2017, pp. 35–52. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-33527-8_4
- [109] C. Baedeker *et al.*, "Interactive Design to Encourage Energy Efficiency in Offices: Developing and Testing a User-Centered Building Management System Based on a Living Lab Approach," *Sustainability*, vol. 12, no. 17, p. 6956, 2020, doi: 10.3390/su12176956.
- [110] J. Kunde, *Heizen in Zahlen: Daten & Fakten im Überblick*. [Online]. Available: <https://www.heizung.de/ratgeber/diverses/heizen-in-zahlen-daten-und-fakten-im-ueberblick.html> (accessed: Oct. 7 2023).
- [111] Testo SE & Co. KGaA, Ed., "Mini-Datenlogger Temperatur: Datenblatt: testo 174T," 2022.
- [112] tado GmbH, *tado° Funk-Temperatursensor Spezifikationen*. [Online]. Available: <https://www.tado.com/ch-de/funk-temperatursensor-spezifikationen>
- [113] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, and R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispieldichte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks"*, 2nd ed. Darmstadt: IWU, 2015. [Online]. Available: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brocchure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf
- [114] Verbraucherzentrale NRW e.V., *Heizung optimieren und Heizkosten sparen | Verbraucherzentrale.de*. [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/heizen-und-warmwasser/heizung-optimieren-und-heizkosten-sparen-30096> (accessed: Oct. 30 2023).
- [115] Verivox GmbH, *Optimale Raumtemperatur – Überall die ideale Temperatur | VERIVOX*. [Online]. Available: <https://www.verivox.de/gas/themen/raumtemperatur/> (accessed: Oct. 30 2023).
- [116] H. Schiefer and F. Schiefer, *Statistik für Ingenieure: Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [117] *VDI 3807 - Verbrauchskennwerte für Gebäude - Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser*, Verein Deutscher Ingenieure, Association of Engineers.

- [118] Deutscher Wetterdienst, *Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsausweise*. [Online]. Available: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html;jsessionid=B493232DA4770D1E301E89B8D5FC20D8.live31082?nn=16102> (accessed: Oct. 26 2023).
- [119] Umweltbundesamt, *Strom- und Gasverbrauch ab der zweiten Jahreshälfte 2022 gesunken*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/strom-gasverbrauch-ab-der-zweiten-jahreshaelfte>
- [120] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Ed., "Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden," 2017.
- [121] Verbraucherzentrale NRW e.V., *Schimmel in der Wohnung: Das können Sie tun*. [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/umwelt-haushalt/wohnen/schimmel-in-der-wohnung-das-koennen-sie-tun-6794> (accessed: Oct. 30 2023).
- [122] W. M. Willems, K. Schild, and D. Stricker, *Formeln und Tabellen Bauphysik: Wärmeschutz - Feuchteschutz - Klima - Akustik - Brandschutz*, 4th ed. Wiesbaden: Springer Springer Vieweg, 2016.
- [123] BauNetz, "Wärmebrücken: Grundlagen | Bauphysik | Wärmeschutz | Baunetz_Wissen," *BauNetz*. <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/waermeschutz/waermebruecken-grundlagen-4385171> (accessed: Sep. 1 2024).
- [124] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Beiblatt 2: Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele*, 4108-2, Deutsches Institut für Normung e.V., 2019.
- [125] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden*, 4108-8, Deutsches Institut für Normung e.V., 2022.
- [126] Statistisches Bundesamt, *Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen im Jahr 2020 um 0,9% gesunken*. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_542_85.html
- [127] International Organisation for Standardisation, "ISO 15118-20:2022 Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements," vol. 1, p. 561, 2022.
- [128] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "Praxisleitfaden für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern: Status Quo. Erfahrungen. Möglichkeiten," 2024. [Online]. Available: https://www.gebaeudeforum.de/fileadmin/gebaeudeforum/Downloads/Leitfaden-Handbuch/Leitfaden_Waermepumpen-in-Mehrfamilienhaeusern.pdf

Anhang

- Entscheidungsschema für Vehicle-to-Home Ladefälle
- V2H-Visualisierung des Referenzhaushalts für einen exemplarischen Wochenendtag
- Daten zum Gebäudeaufbau und Bauphysik des Testgebäude
- Spez. Heizenergieverbrauch des Testgebäudes (Sankey-Diagramm) – Jan. 2024
- Vergleich der anteiligen Verbrauchsdaten und Ventilöffnungen je Wohnung – Dez. 2023
- Absoluter Verbrauch Heizung und Warmwasser im Testgebäude – Jan. 2024
- Wasserdampfpartialdruck [Pa] je Wohnung und Raum – Jan. 2024
- Vergleich Verbrauchsdaten und Ventilöffnungen – Jan. 2024

V2H-Simulation: Ladefälle

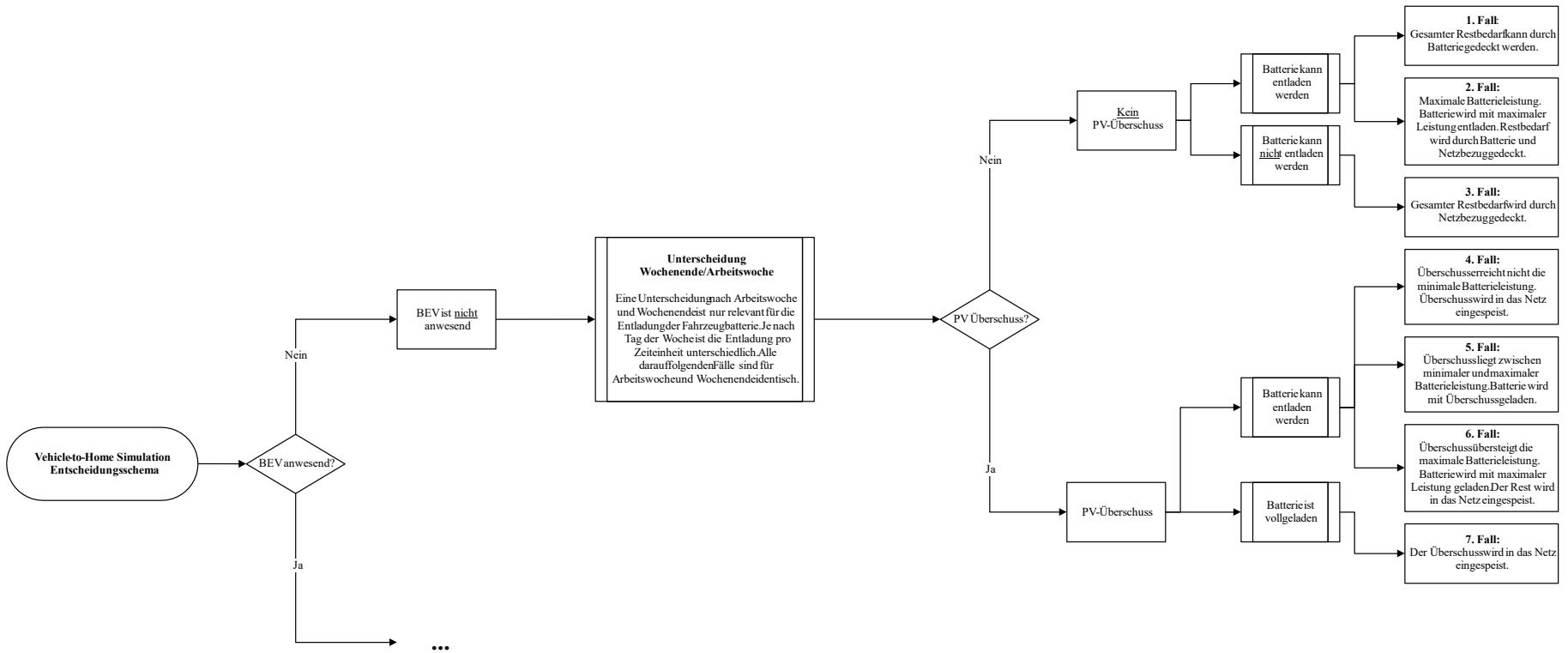


Abbildung A 1: V2H-Simulation - Ladefälle - BEV Abwesend (Ausschnitt 1 von 3)

Anhang

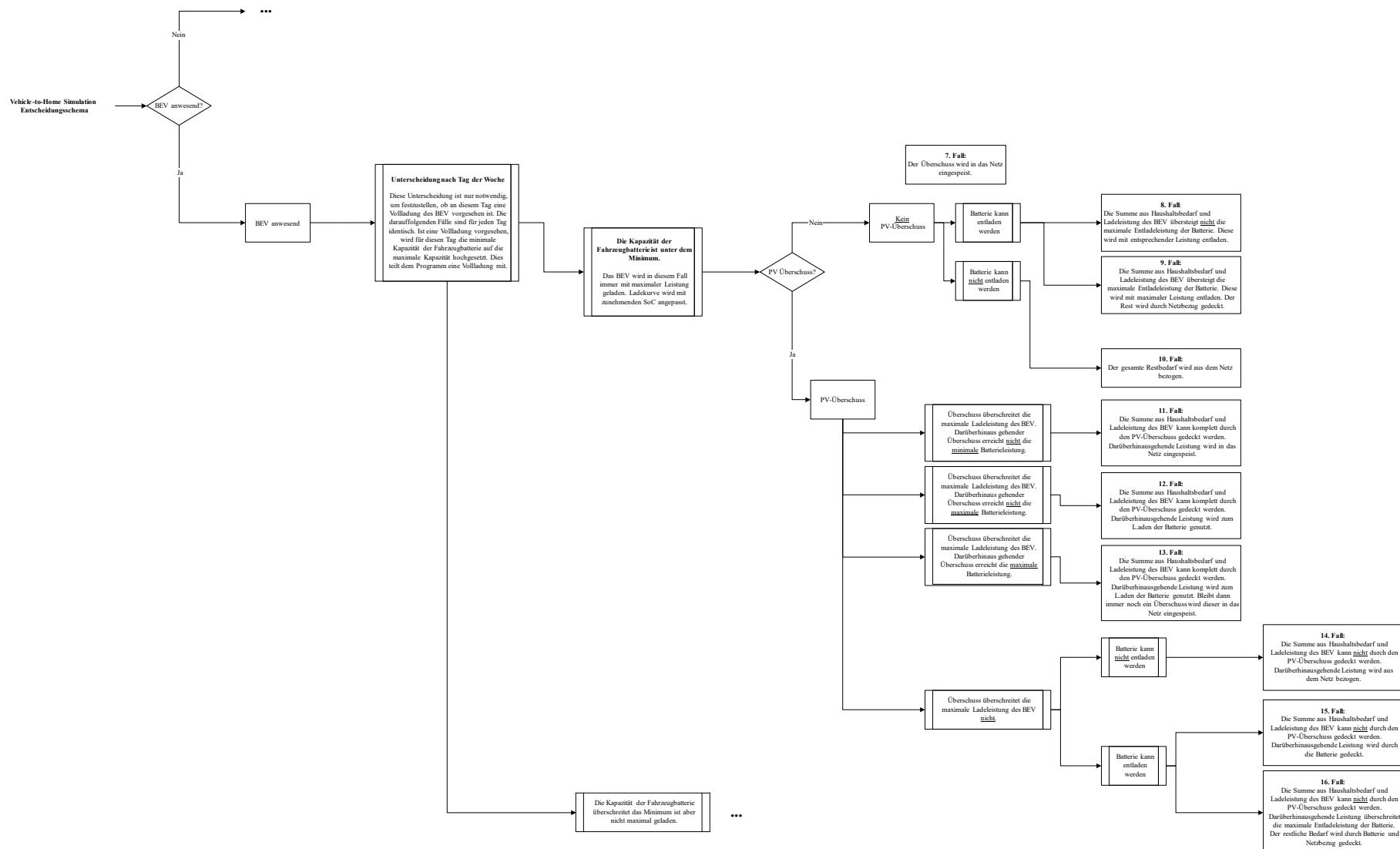
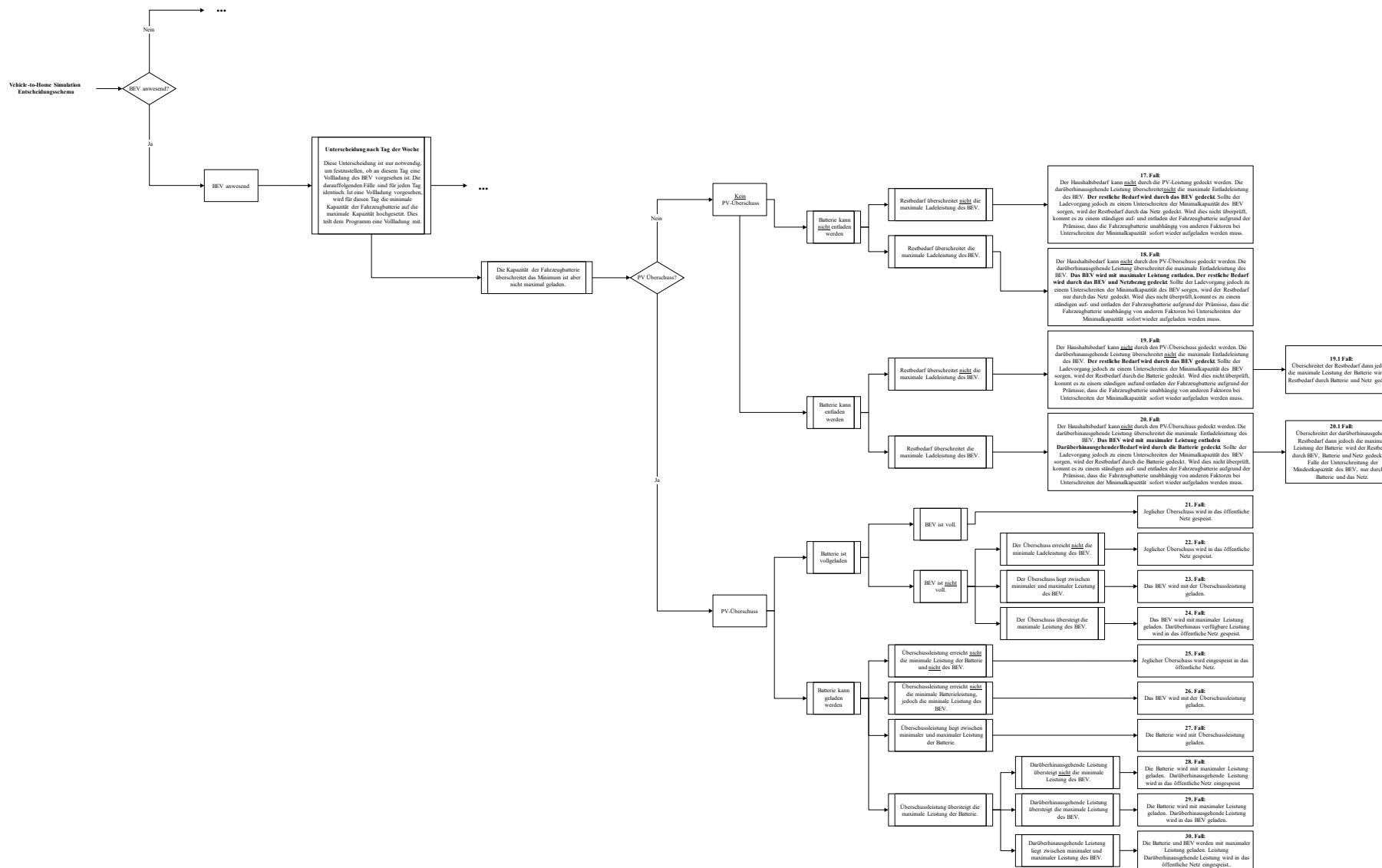


Abbildung A 2: V2H-Simulation - Ladefälle - BEV Anwesend 1-2 (Ausschnitt 2 von 3)

Anhang



V2H-Simulation: Wochenendtag

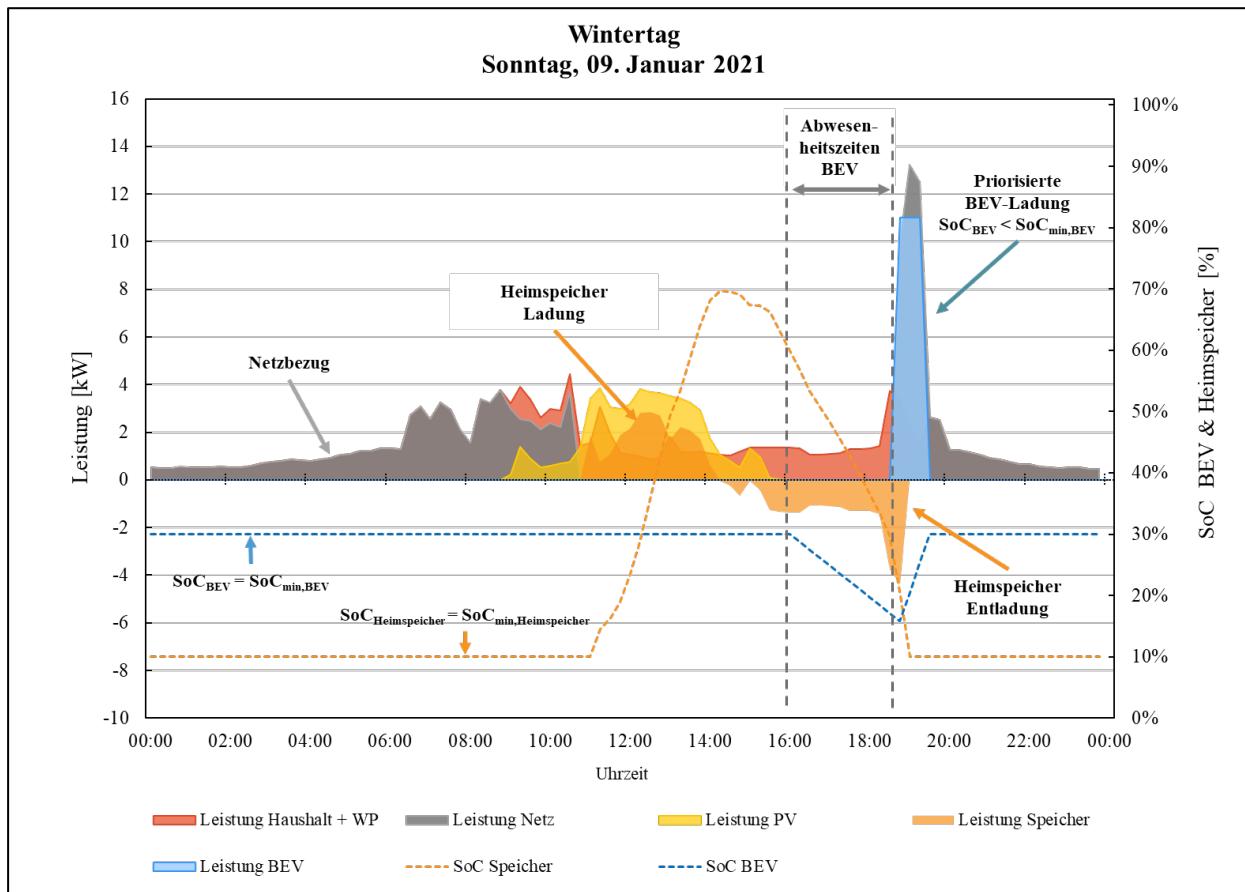


Abbildung A 4: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios mit der Leistungs- und SoC-Kurve am Sonntag, 09. Januar 2021

SHT-Anwendungstest: Gebäudedaten

Tabelle A 1: Daten zum Gebäudeaufbau und Bauphysik

Bauteil	Wärmeleitfähigkeit (λ) / Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)
Außenwand EG	<ul style="list-style-type: none"> - 20 cm Betonplatte - 18 cm Dämmung $\lambda = 0,035 \frac{W}{mK}$ - U-Wert: $0,180 \frac{W}{m^2K}$
Außenwand Etage 1-7	<ul style="list-style-type: none"> - 15 cm Betonplatte - 1 cm Luftabstand - 18 cm Dämmung $\lambda = 0,035 \frac{W}{mK}$ - U-Wert: $0,181 \frac{W}{m^2K}$
Dach	<ul style="list-style-type: none"> - 15 cm Stahlbeton - 20 cm Gefälledämmung $\lambda = 0,035 \frac{W}{mK}$ - U-Wert: $0,168 \frac{W}{m^2K}$
Türen und Fenster	<ul style="list-style-type: none"> - Kunststofffenster - U-Wert $1,3 \frac{W}{m^2K}$

SHT-Anwendungstest: Heizenergieverbrauch

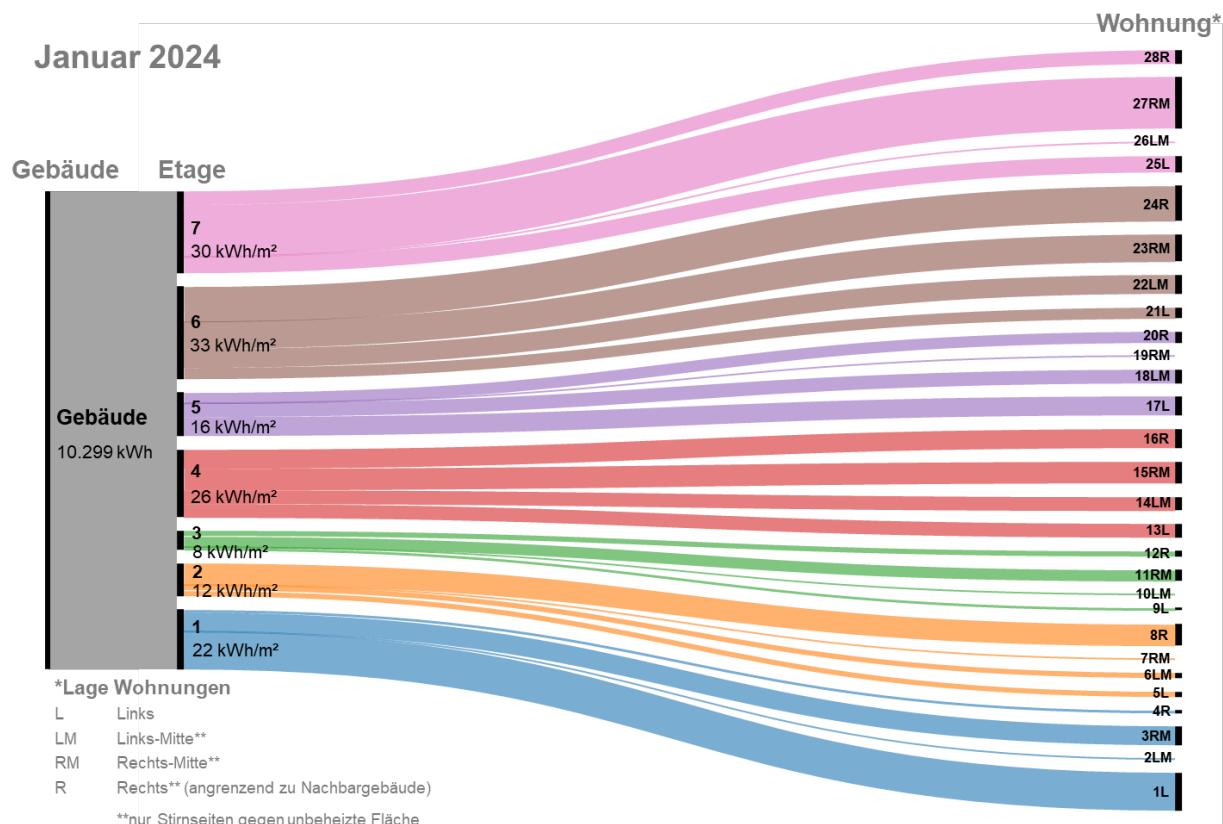


Abbildung A 5: spez. Heizenergieverbrauch (Nutzenergie) Januar 2024 nach Etagen und Wohnungen (n=28 Wohnungen)

SHT-Anwendungstest: Ventilöffnungen

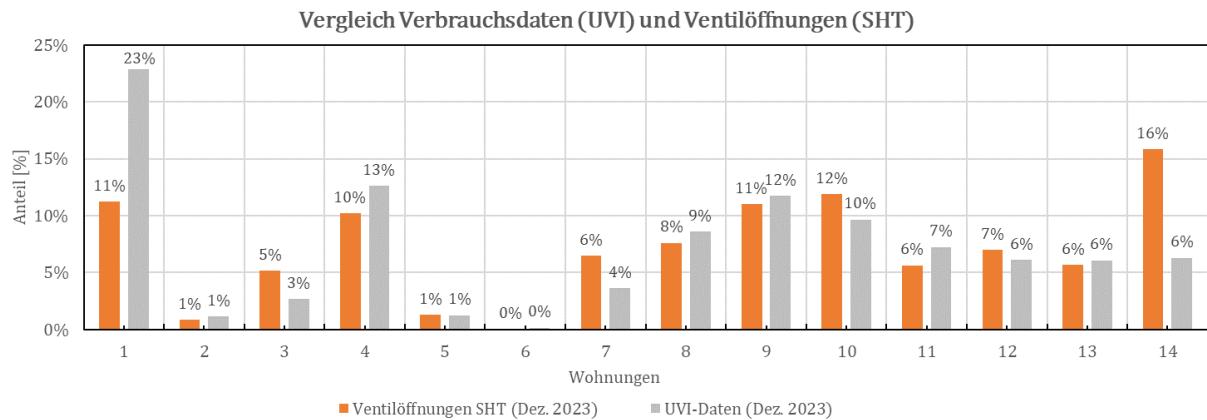


Abbildung A 6: Vergleich der anteiligen Verbrauchsdaten (UVI) und Ventilöffnungen (SHT) je Wohnung (Dez. 2023)

SHT-Anwendungstest: Warmwasserverbrauch

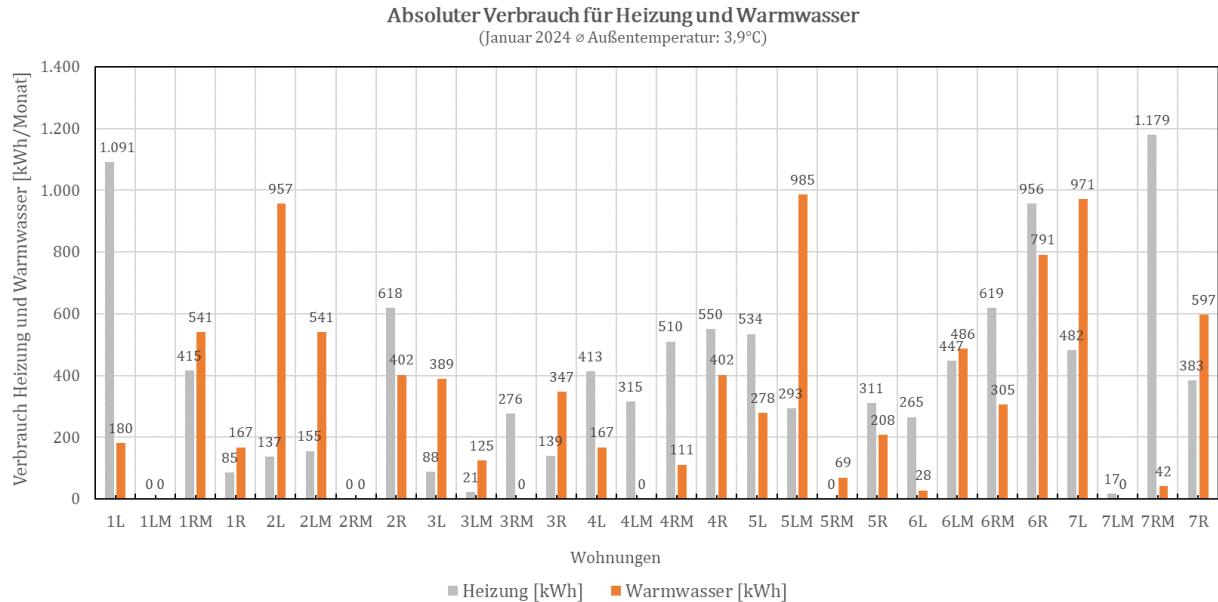


Abbildung A 7: Absoluter Verbrauch Heizung und Warmwasser im Testgebäude - Jan. 2024

SHT-Anwendungstest: Wasserdampfpartialdruck

Apartment ID	Bad	Kinderzimmer	Küche	Schlafzimmer	Wohnzimmer
1	893,4	874,4	863,5		1028,9
2	1268,3	1141,9		1194,9	1312,0
3	1201,6		1245,7	1485,4	1412,7
4	1296,6		1249,9	1272,0	1222,3
5	1602,1	1464,8	1556,2	1486,6	1489,1
6	1400,4		1384,3	1302,4	1366,2
7	1148,7	1208,3		1181,9	1183,8
8	1057,9		1054,2	1009,0	1021,2
9	1598,2	1616,2	1406,1	1566,6	1568,8
10	1228,2	1299,0		1189,4	1150,5
11	1479,6		1365,4	1286,2	1279,2
12	1409,6		1419,5	1272,7	1332,7
13	1278,5		1225,0	1099,5	1154,2
14	1466,6		1352,8	1273,2	1508,6

Abbildung A 8: Wasserdampfpartialdruck [Pa] je Wohnung und Raum - Jan. 2024

SHT-Anwendungstest: Vergleich Verbrauchsdaten und Ventilöffnungen

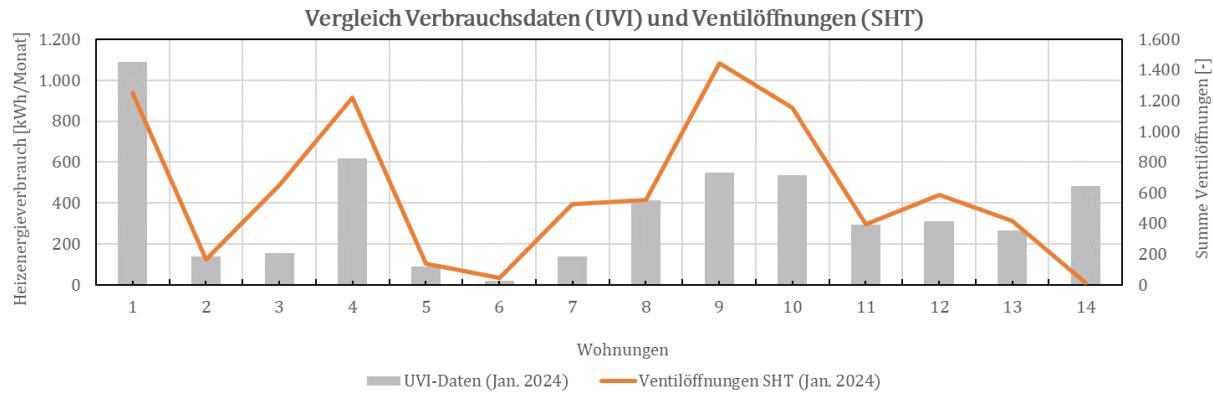


Abbildung A 9: Vergleich der Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Etagen sortiert) – Jan. 2024

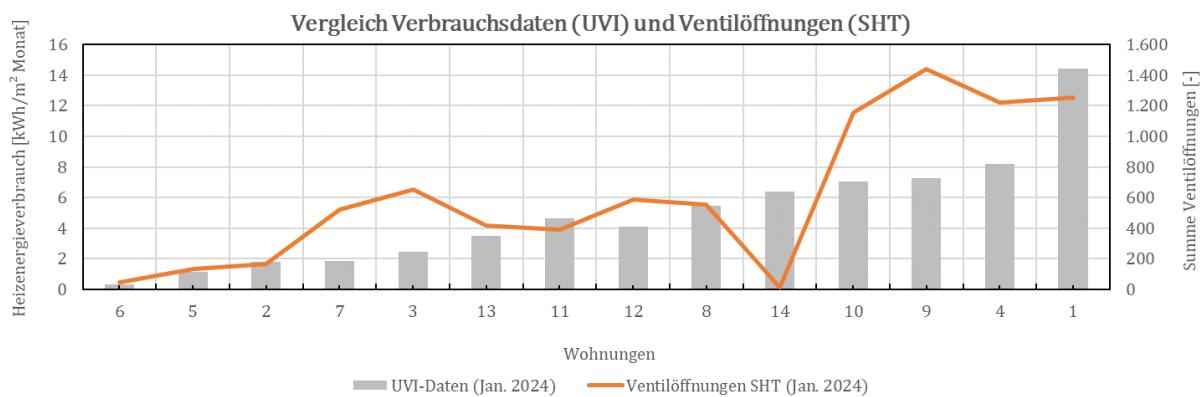


Abbildung A 10: Vergleich der spez. Heizenergieverbräuche und Ventilöffnungen (nach Verbrauch sortiert) – Jan. 2024