



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht zum Vorhaben

BaltBest

Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand

Förderkennzeichen

03ET1616A: EBZ Business School GmbH, Bochum

Projekt-Laufzeit

01.12.2018 bis 30.11.2021

Vorhaben-Name (Langtitel)

EnOB: BaltBest - Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand - Teilvorhaben: Untersuchung und Modellierung der Maßnahmeneffekte durch Nutzerassistenz

Vorhaben-Akronym

BaltBest

Die Verantwortung über die Veröffentlichung dieses Inhaltes liegt bei den Autoren

Projektpartner

- EBZ Business School
- Technische Universität Dresden

Assoziierte Partner

- GDW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen
- Dogewo Dortmunder Gesellschaft für Wohnen mbH
- GWH Immobilien Holding GmbH
- LEG Wohnen NRW GmbH
- Spar- und Bauverein eG Dortmund
- Unternehmensgruppe Nassauische Heimstätte/Wohnstadt
- Vonovia SE
- WBM Wohnungsbaugesellschaft Berlin-Mitte mbH
- Bosch Thermotechnik GmbH
- Danfoss GmbH
- Ista Deutschland GmbH
- Techem GmbH
- Viessmann Werke GmbH & Co. KG

Verbundkoordinator

EBZ Business School GmbH
Springorumallee 20
44795 Bochum

Ansprechpartner und Projektleiter

Prof. Dr. Viktor Grinewitschus Professur für Energiefragen der Immobilienwirtschaft

Tel.: +49 234 9447-266

E-Mail: v.grinewitschus@ebz-bs.de

<http://www.ebz-business-school.de/>

Bearbeiter:

Prof. Dr. Ing. Viktor Grinewitschus
Dr. Katja Lepper
Andre Beblek, M. Sc.
Benjamin Krisemendt, B. Sc.
David Reiners, M. Sc.
Florian Sehr, M. Sc.
Karsten Fransen, M. Sc.
Simon Jurkschat, M. Sc.

Verfasser:

Prof. Dr. Ing. Viktor Grinewitschus
Hannah Kubitza, M. A.
Karsten Fransen, M. Sc.
Simon Jurkschat, M. Sc.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	1
1 Zusammenfassung.....	2
1.1 Motivation.....	5
1.2 Stand der Wissenschaft	7
1.3 Team.....	11
1.3.1 Kurzvorstellung der EBZ Business School GmbH.....	12
1.3.2 Kurzvorstellung der Technischen Universität Dresden	13
1.3.3 Kurzvorstellung der Techem GmbH	14
1.4 Zusammenarbeit mit Dritten	15
1.5 Arbeitsplan	17
1.6 Beschreibung der Liegenschaften und Wärmeerzeuger	18
1.7 Ausstattung der Gebäude mit der Mess-Infrastruktur	24
1.8 IT-Infrastruktur.....	27
1.9 Infrastruktur in den Wohnungen	29
2 Mieterbefragungen	31
2.1 Befragung von Mietern des Vorprojektes der „Allianz für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand“	32
2.2 Interviews in BaltBest ECO2-Liegenschaften	36
2.3 Mieterbefragung zum Thema Heizen, Lüften und Handhabung der smarten Thermostate (n = 134).....	37
3 Nutzerassistenz.....	44
3.1 Hintergrund	44
3.2 Konzept der Hoba-App.....	53
3.3 Verfahren zur Gewinnung von Teilnehmern für die Hoba-App.....	56
3.4 Nutzung der Hoba-Anwendung	58
4 Smarte Thermostate.....	61
4.1 Laboruntersuchung von smarten Thermostaten	61
4.2 Theoretisches Einsparpotenzial von elektronischen Thermostatventilen	73
4.3 Welche Einsparung treten in der Praxis auf?.....	76

4.4	Auswirkung des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Mehrfamilienhäusern	85
5	Betriebseinstellungen und Nutzerverhalten	103
5.1	Einfluss der Betriebseinstellungen auf den Jahresgasverbrauch	105
5.2	Einfluss der Betriebseinstellungen auf das Mieterverhalten	107
5.3	Wahrnehmung der Güte der Betriebsführung durch die Mieter	111
6	Anlagenoptimierung	115
6.1	Bedeutung der Ergebnisse für den deutschen Wohngebäudebestand:	125
7	Kesseltausch	127
7.1	Kesseltausche im BaltBest Projekt	132
7.2	Einfluss der Betriebsführung	134
9	Verwendete Hardware	137
9.1	Grundfos Magna 3 Pumpen	137
9.2	HKV	138
9.3	Wärmemengenzähler	139
9.4	Gasmengenzähler	140
10	Veröffentlichungen und Vorträge	141
10.1	Veröffentlichungen/Fachbeiträge	141
10.2	Vorträge/Präsentationen	142
11	Literaturverzeichnis	145
11.1	Literaturverzeichnis	145
12	Abbildungsverzeichnis	147
13	Tabellenverzeichnis	152

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
WMZ	Wärmemengenzähler
VLT	Vorlauftemperatur
RLT	Rücklauftemperatur
HKV	Heizkostenverteiler
FHKV	Funk-Heizkostenverteiler
Ae / AE	Abrechnungseinheit
nfV	Normierter flächenbezogener Verbrauchswert
InWIS	Institut für Wohnungswesen, Immobilienwirtschaft, Stadt- und Regionalentwicklung
EBZ	Europäisches Bildungszentrum
VL	Vorlauftemperatur
RL	Rücklauftemperatur
mTRV	Manuelles Heizkörperthermostat
eTRV	Elektronisches Heizkörperthermostat
TRV	Heizkörperthermostat
P-Regler	Proportional-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
EnEV	Energieeinsparverordnung

1 Zusammenfassung

Das BaltBest Projekt hatte zum Ziel, zu untersuchen, wie sich durch den Einsatz von niedrig investiven Maßnahmen der Energieverbrauch in Bestands-Mehrfamilienhäusern signifikant senken lässt. Die folgenden Maßnahmen standen dabei im Fokus:

- Optimierung der regelungstechnischen Einstellungen der Heizungsanlagen
- Optimierung des hydraulischen Systems
- Einsatz von Smart Home -Thermostatventilen
- Unterstützung der Mieter bei energieeffizientem Heizverhalten durch ein zeitnahes Feedback über die Energieverbräuche.

Für die Durchführung und Auswertung wurde ein Pool von 100 Mehrfamilienhäusern mit über 7000 Sensoren ausgerüstet. Mit einer zeitlichen Auflösung von 110 Sekunden wurden so mehr als 4 Millionen Telegramme pro Tag versendet, empfangen, gespeichert und ausgewertet.

Über die Projektlaufzeit von drei Jahren war es möglich, einen in seiner Detailtiefe einmaligen Einblick in das Zusammenspiel von Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Nutzerverhalten zu erhaschen. Anhand der erfassten Daten ließen sich Vorschläge für Optimierungsmaßnahmen erarbeiten, die dann in den Bestandsanlagen umgesetzt wurden. Die Wirkung dieser Maßnahmen wurde überprüft und quantifiziert. In 30 der hundert Mehrfamilienhäusern wurden während der Projektlaufzeit von den Wohnungsbaugesellschaften Heizkessel ausgetauscht, so dass auch die Effizienzsteigerung dieser Maßnahme präzise untersucht werden konnte.

Besondere Aufmerksamkeit wurde in dem Projekt dem Heizverhalten der Mieter gewidmet. Zum einen, konnte über die Datenerfassungs-Infrastruktur das Heizverhalten analysiert werden, zum anderen, wurde eine große Anzahl von Wohnungen mit Smart Home Thermostatventilen ausgestattet. So ließ sich auch das Heizverhalten vor und nach der Ausstattung umfassend analysieren, um so Erfolgsfaktoren für Energieeinsparungen mittels dieser Technologie zu ermitteln. Verschiedene Smart Home Systeme wurden auf einem Prüfstand hinsichtlich der Regelgüte und des Energieverbrauchs untersucht. Dabei konnten große Unterschiede identifiziert werden. Für ein besseres Verständnis des Nutzerverhaltens wurden Projektbegleitend immer wieder Mieter-Umfragen durchgeführt. Abschließend wurde ein Gamification Ansatz getestet, bei dem Mieter eine App zur Verfügung gestellt bekommen haben, mittels derer sie einen tagesgenauen Hinweis auf ihren Energieverbrauch und Heizverhalten erhielten.

Die wichtigsten Ergebnisse des Projektes sind die Folgenden:

- Viele Heizungsanlagen im Bestand sind überdimensioniert. Dies erklärt sich zum Teil aus dem Alter der Anlagen und der Tatsache, dass seit dem Anlagen-Einbau verschiedene Maßnahmen zur Optimierung der Gebäudehülle durchgeführt wurden, die Heizungsanlage aber ihre Leistung beibehalten hat. Die zu hohe Leistung erhöht die Anforderungen an eine energieeffiziente Betriebsführung, durch die verhindert wird, dass der Wärmeerzeuger ins Takten gerät. Bei einem Austausch des Heizkessels wird in vielen Fällen die Überdimensionierung nicht beseitigt, sondern die neue Anlage auf eine ähnliche Leistung wie die alte Anlage ausgelegt.
- Viele Heizungsanlagen laufen mit zu hohen Systemtemperaturen. Die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung ist nur in unter 15% der Heizungsanlagen adäquat eingestellt gewesen. Mit den hohen Vorlauftemperaturen sind in der Regel auch hohe Rücklauftemperaturen verbunden, wodurch die Effizienz von Brennwertkesseln in der Regel eingeschränkt wird. Gleichzeitig nehmen mit den hohen Vorlauftemperaturen die Rohrwärmeverluste in einer Liegenschaft zu. Mit der Rohrwärme erfolgt ein unregelmäßiger und ungezählter Wärmeeintrag in das Gebäude, wodurch die Heizkosten-Unterschiede zwischen den Wohnungen zunehmen.
- Durch die hohen Systemtemperaturen ist die Heizleistung, die den Mietern zur Verfügung gestellt wird, in der Regel deutlich zu hoch. Unterschiede im Nutzerverhalten führen zu einer großen Streuung der Verbräuche innerhalb einer Liegenschaft.
- Das Nutzerverhalten hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch. In der Regel streuen die Verbräuche innerhalb eines Gebäudes zwischen den Mietparteien verhältnismäßig stark. Die Verbräuche korrespondieren mit den Betriebsstunden der Heizkörper. Passen Mieter ihre Raumtemperaturen auf den individuellen Bedarf an, indem sie die Thermostatventile mehrfach am Tag verstellen, führt das in der Regel zu niedrigen Verbräuchen.
- Smarte Thermostatventile können den Energieverbrauch in Mehrfamilienhäusern senken. Voraussetzung dafür ist, dass diese sich von den Mietern einfach bedienen lassen und dass sie sachgerecht eingesetzt werden. Von smarten Thermostatventilen profitieren insbesondere Normal- und Vielverbraucher. Haushalte, die bereits einen geringen oder sehr geringen Wärmeverbrauch haben, profitieren im Allgemeinen nicht von smarten Thermostatventilen, deren Verbrauch nimmt durch den Einbau dieser Geräte eher zu.
- Das Projekt hat gezeigt, dass sich durch niedrig investive Maßnahmen der Energieverbrauch in Bestandsgebäuden auf Liegenschaftsebene im Mittel um ca. 15 %, in der Spitze um bis zu 30% senken lässt. Hohe Einsparungen setzen voraus,

dass die gesamte Wärmekette, beginnend beim Wärmeerzeuger, dem hydraulischen System bis hin zur Unterstützung des Nutzers beim energiesparenden Verhalten optimiert wird.

1.1 Motivation

Bis zum Jahr 2050 soll der Wärmebedarf in Gebäuden in der Bundesrepublik nahezu klimaneutral sein. Hierzu müssen die Emissionen im Gebäudebereich bis 2030 auf 70-72 Mio. t CO₂ zurückgehen, dies entspricht einer Minderung gegenüber 1990 um ca. 67%¹. Die Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) zielt darauf ab, dies durch eine Senkung des Energieverbrauches und dem Einsatz regenerativer Energien zu erreichen². Dabei besteht eine wesentliche Herausforderung darin, die Belange des Klimaschutzes mit der Forderung nach bezahlbarem Wohnen zu vereinen. Im Klimaschutzplan der Bundesregierung heißt es dazu: „Die hierzu erforderlichen Lösungen müssen mit den sozialen und wirtschaftlichen Gegebenheiten und den aktuellen Herausforderungen so in Einklang gebracht werden, dass die notwendigen Investitionen vorgenommen werden, ohne das Wohnen unverhältnismäßig zu verteuern“¹. Oftmals ist eine energetische Sanierung mit Steigerungen der Wohnkosten für den Mieter verbunden. Damit kommt den Maßnahmen, die eine annähernd wärmietenneutrale Steigerung der Energieeffizienz ermöglichen, eine besondere Bedeutung zu.

Seit dem Jahr 1990 bis 2015 wurden rund 66%, der von den im GdW organisierten Wohnungsunternehmen verwalteten Gebäude, energetisch modernisiert. Die Anzahl der energetisch modernisierten Wohnungen hat im Zeitraum von 2007 bis 2017 um 10% zugenommen³. Einerseits ist die aktuelle Sanierungsquote von 1% zu gering, um die Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Andererseits lässt sich eine Tendenz beim Energieverbrauch beobachten, welche geeignet ist, die laufenden Maßnahmen zu konterkarieren. In 2016 ist erstmals seit 2005 der witterungsbereinigte, flächenbezogene Verbrauch in Mietwohnungsgebäuden nicht mehr gesunken, sondern gestiegen. Bei gasversorgten Gebäuden von 2015 auf 2016 um 2,8%, bei Gebäuden mit Fernwärme um 3,5% und bei heizölversorgten Gebäuden sogar um 4,7%⁴. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt bemerkenswert, dass die Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz in 2016 nicht reduziert wurden. Die Gründe für das Ausbleiben des Erfolges sind unklar, möglicherweise liegt es durch die Senkung der Energiepreise für Wärme in dem betrachteten Zeitraum, am

¹ Bundesministerium für Umwelt/Naturschutz und nukleare Sicherheit/www.bmu.de, Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2019.

² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWI Broschüre Energieeffizienzstrategie Gebäude – Kurzfassung, 2015.

³ GdW, Wohnungswirtschaftliche Daten und Trends 2016/2017, 2016.

⁴ Techem, Energiekennwerte, 2019.

abnehmenden Interesse an energieeffizienten Verhalten der Bewohner. Mit der aktuellen Entwicklung der Energiepreise dürften hier grundsätzliche Änderungen eintreten.

Das BaltBest Projekt zielte darauf ab, die Energieeffizienz im Bestand zu steigern und hierzu das Einsparpotenzial, welches in der Anlagentechnik und im Nutzerverhalten liegt, mit gering investiven Maßnahmen zu erschließen. Das Projekt lieferte Hinweise, wie wichtig das Zusammenspiel der Anlagentechnik, bestehend aus Wärmeerzeuger und Wärmeverteilung mit der Gebäudehülle ist. So führen energetische Maßnahmen an der Gebäudehülle zu einer Reduzierung des Energie- und Leistungsbedarfes der Wärmeerzeugung und erfordern mindestens eine Neueinstellung der Heizungsanlage zur Reduzierung des Leistungsangebotes. Unterbleibt dies, begünstigt dies die Verschwendung von Energie, die avisierten Einsparungen werden nicht erreicht.

Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, eine hohe Transparenz über die Wirkung von Maßnahmen auf die Energieeffizienz in Gebäuden zu erhalten, insbesondere, wie der Erfolg von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sichergestellt werden kann.

1.2 Stand der Wissenschaft

Heizungsanlagen in Mietwohngebäuden werden nur selten systemtechnisch optimiert betrieben. Der Jahresnutzungsgrad von Bestandsanlagen, der sich über den Endenergieverbrauch und die produzierte Wärmemenge berechnen lässt, ist in verschiedenen Studien ermittelt bzw. anhand von Indikatoren abgeschätzt worden. In der vom EBZ durchgeführten Studie „Anerkannte Pauschalwerte für den Jahresnutzungsgrad von Heizungsanlagen“ wurden die Nutzungsgrade von 2847 Wärmeerzeugern im Feld analysiert. Auffällig war dabei der geringe Jahresnutzungsgrad (JNG) im Mittel von ca. 82%, dabei wiesen Brennwertgeräte die größte Streuung im JNG auf. Für 579 Anlagen wurden mittels einer Regressionsanalyse verschiedene konstruktive Einflussfaktoren auf den JNG quantifiziert. Es blieb eine nicht weiter zu reduzierende Streuung, die auf die Qualität der Betriebsführung als einen weiteren wesentlichen Einflussfaktor zurückgeführt werden kann. Da im Rahmen der Studie keine eigenen Daten erhoben werden konnten, ließen sich die konkreten Einflussfaktoren nicht weiter analysieren⁵. Weitere Beispiele sind das Alfa-Projekt oder die Optimus-Studie⁶. Hier wurde ein Potenzial sichtbar, welches bereits in der Verbesserung der Güte der Wärmeherzeugung liegt. Im alfa-Projekt wurden an Bestandsanlagen Maßnahmen wie hydraulischer Abgleich, Einstellungen der Heizkennlinie, Optimierung der Brennersteuerung und Erneuerung der Pumpe vorgenommen und im Mittel Einsparungen von ca. 7% erzielt⁷. Eine exakte Prognose der erzielbaren Einsparungen ist schwierig, denn die realen Einsparungen in der Praxis schwanken sehr. Grund dafür sind die auftretenden Wechselwirkungen zwischen einzelnen Maßnahmen, die bisher nicht umfassend analysiert worden sind. Die in den vorangegangenen Projekten vorhandene Messtechnik war häufig ungeeignet, für eine Detailanalyse über die gesamte Wärmekette eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung zu stellen. Insbesondere fehlte die Einbeziehung des Nutzerverhaltens. Die in Bestandsgebäuden normalerweise vorhandene Technik erlaubt im besten Fall eine Indikation der Energieeffizienz anhand von Jahreswerten. Während die produzierten Energiemengen der Warmwasserbereitung aufgrund von gesetzlichen Anforderungen erfasst werden, ist dies bei den produzierten Wärmemengen für die Gebäudeheizung selten der Fall. Zeitlich hochauflösende Daten stehen kaum zur Verfügung.

⁵ Grinewitschus, V./Lepper, K., Studie-Anerkannte-Pauschalwerte, 2015.

⁶ Jagnow, K./Wolf, D., Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur Nachhaltige Nutzung von Energiesparpotenzialen.

⁷ BDEW, ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz, 2014.

Dementsprechend klein ist die Transparenz über die Güte der Betriebsführung und die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen⁸.

Die Allianz für einen klimaneutralen Gebäudebestand hat in einem Vorprojekt in 41 Gebäuden verschiedene niedrig investive Maßnahmen durchgeführt (Einbau von Strangreguliertventilen, dynamischen Ventilen am Heizkörper, Einbau smarter Thermostate, Verbrauchsvisualisierung und Assistenz der Bewohner bei der Wohnungslüftung). Die Gebäude wurden mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet und hochauflösende Daten sowohl am Wärmeerzeuger, der Hydraulik bis hin zum raumweisen Verlauf von Temperaturen des Heizkörpers und der Raumluft erhoben. Die Effizienzsteigerungen zeigten eine große Streuung, welche die Prognose der Wirkung von Investitionen in Maßnahmen und den damit verbundenen Erfolgen deutlich erschweren. Es wurde festgestellt, dass insbesondere in Mehrfamilienhäusern erhebliche Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen auftreten. Diese dürfen bei einer Analyse nicht vernachlässigt werden, wenn eine belastbare Aussage über die erzielbaren Einsparungen getätigt werden soll. Es lagen keine Erkenntnisse vor, wie sich die Wechselwirkungen quantifizieren lassen. Unsicherheiten bei der Prognose der erzielbaren Einsparungen führen regelmäßig dazu, dass die Umsetzung der Maßnahmen unterbleibt⁹. So wurden auch im ALFA-Projekt weit weniger Maßnahmen umgesetzt als von den Projektverantwortlichen vorgeschlagen¹⁰.

Die nicht vorhandene Gebäudeleittechnik, in der Informationen über den Betrieb der Anlagen aufgezeichnet und für eine Auswertung genutzt werden könnten, stellt ein wesentliches Problem dar. Die Anlagen werden in regelmäßigen Abständen vom Bezirksschornsteinfeger überprüft, dieser misst die Qualität der Verbrennung (Emissionen und Abgasverluste), die Qualität der Betriebsführung wird nicht überprüft. Da die Energiekosten umlagefähige Kosten sind, die von den Mietparteien getragen werden, war der Anreiz für den Vermieter, die Anlage möglichst effizient zu betreiben, in den vergangenen Jahren nur gering. Man sprach dabei von einem Investor-Nutzer Dilemma. Während der Investor die Kosten der Maßnahme zu tragen hatte, kamen die Einsparungen den Nutzern zugute. Teilweise sind Vermieter dazu übergegangen, den Betrieb der Heizungsanlagen in professionelle Hände zu legen (Umstellung auf gewerbliche Wärmelieferung, bei der Contractoren den Betrieb der Heizungsanlagen übernehmen). Diese haben einen Anreiz, die Anlagen effizient zu betreiben, weil Einsparungen ihnen direkt zugutekommen.

⁸ Grinewitschus, V./Lepper, K./Bebek, A., Projektantrag - BaltBest, 2017.

⁹ Energieeffizient-Wohnen.de Allianz für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand.

¹⁰ BDEW, ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz, 2014.

Von wiederkehrend messpflichtigen Gasfeuerungsanlagen waren Stand 2022 etwa 60 Prozent älter als 20 Jahre¹¹. Da in den letzten 20 Jahren in der Regel am Gebäude Maßnahmen durchgeführt wurden, durch die der Energiebedarf gesenkt wurde (Wärmedämmung, Fenstertausch etc.) sind die Anlagen häufig überdimensioniert¹². Auch die Leistung der Heizkörper in den Wohnungen ist im Allgemeinen höher als notwendig. Dies bietet zum einen ein Potenzial zur Senkung der Temperaturen im Heizsystem, andererseits auch ein erhöhtes Verschwendungspotenzial, wenn die Vorlauf-Temperaturen deutlich über dem Bedarf liegen. Wesentlich für eine hohe Energieeffizienz ist, dass die Anlagentechnik optimal betrieben wird. Wärmeerzeuger verfügen über eine steigende Anzahl von Sensoren, um Temperaturen zu überwachen oder Durchflussmengen zu bestimmen. Hinzu kommen Daten von Sensoren und Aktoren aus Smart Home Systemen in den Wohnungen, die prinzipiell Rückschlüsse auf die Effizienz erlauben. In der Praxis wird diese große Datenmenge nur sehr selten genutzt, um Zusammenhänge auf der Systemebene zu analysieren oder den Anlagenbetrieb systemtechnisch zu optimieren, eine Ausnahme ist das von Techem entwickelte und verwendete adapterm System¹³. Gründe dafür liegen in der hohen Komplexität dieser Zusammenhänge, in der notwendigen aufwendigen Modellierung der Gebäude und im mangelnden Know-How der Anlagenbetreiber hinsichtlich der systemtechnischen Optimierung. So beschränkt sich üblicherweise die Nutzung der Daten aus den Anlagen im Wesentlichen nur für Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie der Anzeige von Fehlermeldungen. Dieses bedeutet, dass lediglich die Ausfallsicherheit gewährleistet wird und nicht eine höhere Effizienz der Anlage erreicht wird.

Simulationsmodelle können helfen, die Abhängigkeiten besser zu verstehen. Für die Modellierung sind detaillierte Kenntnisse über das Gebäude und die installierte Technik erforderlich. Aufgrund der Vielfalt der Gebäude ist diese Methode nur begrenzt anwendbar und sowohl zeit- als auch kostenintensiv. Es bedarf für eine breite Anwendbarkeit in der Praxis die Entwicklung von vereinfachten Modellen, die anhand der erhobenen Messdaten parametrisiert werden können.

Auf Basis der geleisteten Vorarbeiten wurde für das BaltBest Projekt eine Infrastruktur entworfen, mit der umfangreiche Daten über die Betriebsführung der Anlagen sowie die Art der Bedienung und Funktion von Smart Home Systemen in Wechselwirkung mit der

¹¹ Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband, Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks, 2020.

¹² Techem, Energiekennwerte, 2019.

¹³ Techem, Intelligente Heizungssteuerung: adapterm, 2022.

Anlagentechnik erhoben werden konnten. Diese wurden im Projekt für die Erstellung und Parametrierung von entsprechenden Modellen genutzt.

1.3 Team

Das BaltBest Projekt wurde von 2018 bis 2021 durchgeführt und vom BMWi mit einer Summe von 1,1 Millionen Euro gefördert. Im BaltBest Projekt arbeiteten Wohnungsbau-Unternehmen unter Koordination des GdW, außerdem Energiedienstleister, Hersteller von Heizungsanlagen und Regelarmaturen sowie die EBZ Business School und die TU Dresden zusammen (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Klimaallianz

Mitglieder des Projektkonsortium sind der GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen sowie die folgenden Wohnungsunternehmen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Dogewo Dortmunder Gesellschaft für Wohnen mbH
- GWH Immobilien Holding GmbH
- LEG Wohnen NRW GmbH
- Spar- und Bauverein eG Dortmund
- Unternehmensgruppe Nassauische Heimstätte/Wohnstadt
- Vonovia SE
- WBM Wohnungsbaugesellschaft Berlin-Mitte mbH

Von Seiten der Industrie beteiligten sich (in alphabetischer Reihenfolge):

- Bosch Thermotechnik GmbH
- Danfoss GmbH
- Ista Deutschland GmbH
- Techem GmbH
- Viessmann Werke GmbH & Co. KG

Die Forschungsarbeiten wurden von der EBZ Business School (Gesamtprojektleitung) und der TU Dresden durchgeführt. Die genannten Wohnungsunternehmen ermöglichten es, dass in 100 Liegenschaften weitgehende Untersuchungen zur energieeffizienten Betriebsführung durchgeführt werden konnten. Sie ermöglichten einen uneingeschränkten Zugriff auf die Betriebsdaten der Wärmeerzeuger. Des Weiteren wurden Daten der durchgeführten Anlagensanierungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt.

Techem rüstete die Liegenschaften mit einer umfassenden messtechnischen Infrastruktur aus. Die Messinfrastruktur lieferte bereits Ende 2019 täglich etwa 4 Millionen Telegramme. Danfoss rüstete Wohnungen mit Smart Home Ventilen verschiedener Generationen aus, allerdings war kein Zugriff auf die Soll- und Istwerte bzw. Zeitprogramme der Geräte möglich.

1.3.1 Kurzvorstellung der EBZ Business School GmbH

Die EBZ Business School ist eine staatlich anerkannte Hochschule mit Sitz in Bochum. Die EBZ Business School wird von der EBZ Stiftung unter der Trägerschaft des GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen und des Verbandes der Wohnungswirtschaft Rheinland Westfalen sowie des Bundesverband Freier Immobilien- und Wohnungsunternehmen BFW geführt. Im Schwerpunkt der Forschung und Lehre stehen wohnungswirtschaftliche Fragen. Unter der Leitung von Professor Dr. -Ing. Viktor Grinewitschus beschäftigt sich die Forschung hier vermehrt mit Fragestellungen rund um das Thema Energie, perspektivisch mit dem Hintergrund der Klimastrategie 2045. (*EBZ Business School GmbH, 2021*)

Prof. Dr. -Ing. Viktor Grinewitschus studierte Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Nachrichtentechnik an der Universität Duisburg und promovierte dort mit dem Thema „Modellgestützter Entwurf verteilter Systeme“. Von 1990 bis 2012 entwickelte er am Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) in Duisburg Technologien und Produkte für die intelligente Haustechnik und Software-Lösungen für die Systemintegration. Er gründete gemeinsam mit Klaus Scherer 1998 das Fraunhofer-inHaus Zentrum in Duisburg, welches von beiden bis 2012 gemeinsam geleitet wurde. Zum Zeitpunkt seines Ausscheidens kooperierten dort ca. 90 Firmen und sieben Fraunhofer-Institute bei der Entwicklung von Lösungen zur Prozessoptimierung in Gebäuden in den Anwendungsfeldern Wohnen, Facility Management, Office, Hotel und Health Care. Seit 2011 ist er Professor für Technische Gebäudeausrüstung an der Hochschule Ruhr West und seit 2012 darüber hinaus Professor für Energiefragen der Immobilienwirtschaft an der EBZ Business School in Bochum. Seine Forschungs- und Lehrtätigkeiten beziehen sich auf den Einsatz der Gebäude- und

Hausautomatisierung zur Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden und zur Assistenz der Nutzenden z. B. beim Wohnen im Alter. Er hat an verschiedenen Forschungsprojekten zur Nutzerverhalten und deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz (z.B. Suslab NWE) mitgewirkt. Des Weiteren war er beteiligt an der Erprobung von BHKW in einem Feldversuch in Bottrop. Dieses Wissen wird in die Untersuchung, Modellierung und Erarbeitung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und zum Nutzerfeedback eingebracht. Darüber hinaus besitzt das er umfangreiches Wissen über die effizienzbestimmenden Faktoren von Wärmeversorgungsanlagen im Bestand und der Ermittlung der Einflussgrößen anhand der Auswertung von Daten mittels statistischer Methoden im Bereich der HKL. Anhand von über 2000 Jahresverbrauchswerten und Anlagenkonstellationen wurde ein Verfahren für die Ermittlung von Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad von Heizungsanlagen erarbeitet¹⁴.

1.3.2 Kurzvorstellung der Technischen Universität Dresden

An der Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung bestehen langjährige und umfangreiche Erfahrungen in der ganzheitlichen Bewertung von Gebäudetechnischen Systemen. Basierend auf empirischen Daten aus Feld- und Labortests sowie detaillierten Simulationen wurden Analyseverfahren zur Bestimmung von Energieeffizienzkennwerten für Gebäude entwickelt. Die TU Dresden betreibt selbst Messdatenerfassungs- und Monitoringsysteme. Aktuelle für das hier beantragte Projekt relevante Forschungsvorhaben sind beispielsweise: – Verbundvorhaben: EnEff:Stadt - TEK-EKG: Thermisches / Elektrisches Anlagen-EKG von Gebäuden und Quartieren (FKZ 03ET1479A): Es wird ein Werkzeug zur Beurteilung von Versorgungsstrukturen (Liegenschaft / Quartier), bestehend aus einem Plug & Play-fähigen Kurzzeitmesssystem und einer nachgelagerten Analysesoftware, geschaffen. Anhand der Kurzzeitmessungen ist die Versorgungsstruktur zu analysieren sowie die Anlagentechnik mit ihrem Betriebsverhalten zu identifizieren. Die im Projekt erzielten Ergebnisse werden in einer zweistufigen Praxiserprobung getestet und evaluiert. – Verbundvorhaben EnEff: Wärme - Praxiserprobung des Regionalen Virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie - Schwerpunkte: Monitoring und Auswertung (FKZ 03ET1280A): Es wird ein Feldtest mit vernetzten MikroKWK Systemen zur Erprobung eines regionalen, virtuellen Kraftwerks durchgeführt. Das Projekt beinhaltet dabei die Einrichtung der Geräte beim Endnutzer, die Ausstattung dieser mit Mess- und Kommunikationstechnologie

¹⁴ Grinewitschus, V./Lepper, K., Ermittlung von anerkannten Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad (JNG) von Heizungsanlagen, 2015.

sowie die Erprobung und Erstellung von regelungstechnischen Strategien. Besondere Sorgfalt soll auf die Auswertung von Monitoringdaten gelegt werden. – EnEff: Stadt - Verbundvorhaben: Modellhaftes innerstädtisches Gebiet 'Altes Zöllnerviertel' Weimar, Teilvorhaben: Messtechnik und Monitoring (FKZ 03ET1173C) – 'Altes Zöllnerviertel Weimar' Integriertes Monitoring: Versorgung ' Nutzer ' Bauteil (FKZ 03ET1287A): Gesamtziel des beantragten Forschungsprojektes ist es, aufbauend auf den bereits erreichten Erkenntnissen und Vorgehensweisen, einen substanziellen Beitrag zur Bereitstellung einer belastbaren zeitlich hoch aufgelösten Datenbasis für die Planung von Gebäudeenergiekonzepten im Bestand zu leisten. Das betrifft besonders die Schwerpunkte Nutzerverhalten, Baukonstruktion und Anlageverhalten. Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens besteht in der vergleichenden Analyse der verschiedenen Sanierungskonzepte der denkmalgeschützten Mehrfamilienhäuser mit Blick auf Investitions- und Betriebskosten.

1.3.3 Kurzvorstellung der Techem GmbH

Techem ist ein führender Serviceanbieter für smarte und nachhaltige Gebäude. Die Leistungen des Unternehmens decken die Themen Energiemanagement und Ressourcenschutz, Wohngesundheit und Prozesseffizienz in Immobilien ab. Das Unternehmen wurde 1952 gegründet, ist heute mit 3.750 Mitarbeitern in rund 20 Ländern aktiv und hat knapp 12 Millionen Wohnungen im Service. Techem bietet Effizienzsteigerung entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wärme und Wasser in Immobilien an. Die Produkte und Lösungen des Unternehmens vermeiden jedes Jahr rund 8,7 Millionen Tonnen CO₂. Als Marktführer in der Funkfernerfassung von Energieverbrauch in Wohnungen treibt Techem die Vernetzung und die digitalen Prozesse in Immobilien weiter voran. Moderne Funkrauchwarnmelder mit Ferninspektion und Leistungen rund um die Verbesserung der Trinkwasserqualität in Immobilien ergänzen das Lösungsportfolio für die Wohnungswirtschaft. Weitere Informationen finden Sie unter www.techem.de. Im Rahmen des BaltBest Projektes wurde der Infrastrukturaufbau maßgeblich durch Techem erbracht, bzw. begleitet.

1.4 Zusammenarbeit mit Dritten

Ein Projekt mit einer ähnlichen Fragestellung ist das BETA Nord. BETA Nord steht für für Betriebseffizienz technischer Anlagen der Mitgliedsunternehmen des VNW in Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern. Die Kernidee ist, durchlaufendes Monitoring, energetische Betriebsführung und begleitendes Maßnahmenmanagement einen dauerhaft effizienten Betrieb der Anlagen zu erreichen. Ziel war eine dauerhafte Anlagenoptimierung durch die gezielte Behebung von Funktionsstörungen und Minder-Performance. Die Unternehmen des VNW sind auf unterschiedliche Weise in dem BETA-Projekt involviert. Die Beteiligung reicht von dem Aufbau einer selbstständigen Anlagenüberwachung, Optimierung und Effizienzerhalt durch Schulung der EZN bis hin zu einem „Full Service“-Auftrag an die EZN zur Überwachung der Anlagen ¹⁵

Mit den Akteuren des Projektes BETA Nord und des Projektes „Auswirkungen von energetischen Betriebsführungen auf die Kosten von Heizungsanlagen“ wurden regelmäßige Treffen durchgeführt und Erkenntnisse ausgetauscht. (1. Juli 2021, 29.9.2021, 19.1.2022). Auf der Abschlussveranstaltung des Projektes BETA Nord nahm Prof. Grinewitschus teil und stellte dort auch die Ergebnisse des BaltBest Projektes vor. Es wurden Diskussionen über projektübergreifende Problemstellungen, Lösungsansätzen und Handlungsempfehlungen geführt.

Beide Projekte hatten eine etwas unterschiedliche Ausrichtung. BETA Nord hatte den Fokus auf Maßnahmen in im Heizungskeller und betrachtete auch die Betriebsführung von Heizungsanlagen in Kombination mit Anlagen zur Gewinnung von regenerativen Energien. Des Weiteren stand auch die Untersuchung von Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer der Heizungsanlagen im Fokus. BaltBest betrachtete neben der Effizienz der Heizungsanlagen vor allem den Einfluss des Nutzers auf die Effizienz des Gesamtsystems. Während BETA Nord auch Anlagen in EFH und kleinen MFH betrachtete, widmete sich das BaltBest Projekt ausschließlich MFH mit mindestens 4 Wohneinheiten und einem Baujahr vor dem Jahr 2000.

Beide Projekte kamen zu dem Ergebnis, dass es ein grundlegendes Problem bei der Kenntnis der Anlageneffizienz in Gebäuden gibt. Es braucht ein Verfahren, die ein Screening der Anlagen, die Berechnung von Performance-Indikatoren und standardisierte Ableitung von

¹⁵ Schäfers, H./Verbeck, M., Auswirkung von energetischen Betriebsführungen auf die Kosten von Heizungsanlagen, 2022.

Maßnahmen ermöglicht, welche von Wohnungsbau-Unternehmen gehandhabt werden kann. Da eine manuelle Justage der Anlagen mit einem hohen personellen Aufwand verbunden ist, braucht es automatisierbare Verfahren, welchen viele Daten aus dem Gebäude bei der Optimierung berücksichtigen.

1.5 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan des BaltBest Projekts beinhaltet 11 Arbeitspakete, welche schwerpunktmäßig der TUD und/oder der EBZ BS übertragen wurden. Eine Auflistung der Arbeitspakete mit bearbeitender Hochschule wird in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

Index	Arbeitspaket	EBZ	TUD
0	Projektkoordination	X	X
1	Gebäudeauswahl und Messinfrastruktur	X	X
2	Modell- und Kenngrößenentwicklung Wärmeerzeugung		X
3	Modell- und Kenngrößenentwicklung Wärmeübergabe	X	X
4	Entwicklung von Diagnoseverfahren und Optimierungsansätzen	X	X
5	Einstellung der Maßnahmen an den Anlagen	X	X
6	Nutzerassistenz	X	
7	Austausch von Kesselanlagen	X	X
8	Ermittlung der Wirkung der Maßnahmen	X	X
9	Auswertung zusätzlicher Daten von Heizungsanlagen	X	X
10	Maßnahmenkatalog	X	X
11	Hochrechnung auf den deutschen Gebäudebestand	X	X

Tabelle 1: Darstellung der Arbeitspakete inkl. Verantwortlichkeit

Der Arbeitsplan wurde entsprechend der Tabelle erfüllt. Der hier vorliegende Bericht beschreibt die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse der EBZ BS. Die von der TU Dresden durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse werden in einem eigenen Abschlussbericht dargestellt.

1.6 Beschreibung der Liegenschaften und Wärmeerzeuger

Die Projektliegenschaften wurden in Abstimmung mit den beteiligten Wohnungsbau-Unternehmen ausgewählt. Im Hinblick auf die Forschungsziele wurde bei der Auswahl der Gebäude darauf geachtet, dass diese für den Gebäudebestand in Deutschland möglichst repräsentativ sind. Wichtige Kriterien waren dabei Größe, Bausubstanz, Alter und Art des Wärmeerzeugers. So wurden weder Gebäude mit besonders niedrigen oder besonders hohen Energieverbräuchen ausgewählt. Alle ausgewählten Gebäuden wurden über die Techem als Energiedienstleister abgerechnet, so dass für das Projekt auf die Infrastruktur der Techem zurückgegriffen werden konnte. Letztendlich wurden 100 Gebäude für die geplanten Untersuchungen ausgewählt. Die Standorte entsprachen weitgehend der regionalen Verteilung der beteiligten Wohnungsunternehmen. Abbildung 2 zeigt die regionale Verteilung der Standorte der Projektliegenschaften in Deutschland.



Abbildung 2: Standorte der Gebäude

Die Eigenschaften der Gebäude sind im Folgenden charakterisiert. Abbildung 3 zeigt die Anzahl der Wohnungen (Nutzereinheiten) pro Gebäude sowie die beheizte Fläche je Liegenschaft. Ein Großteil der ausgewählten Liegenschaften (80%) besitzt zwischen 10 und 12 Wohnungen (siehe Abbildung 3 links). Die beheizte Fläche der Liegenschaften beträgt zwischen 361,63 m² und 1243 m², dabei besitzen 57% der Liegenschaften eine beheizte Fläche zwischen 500m² und 750m² (s. Abbildung 3 rechts). Abbildung 3

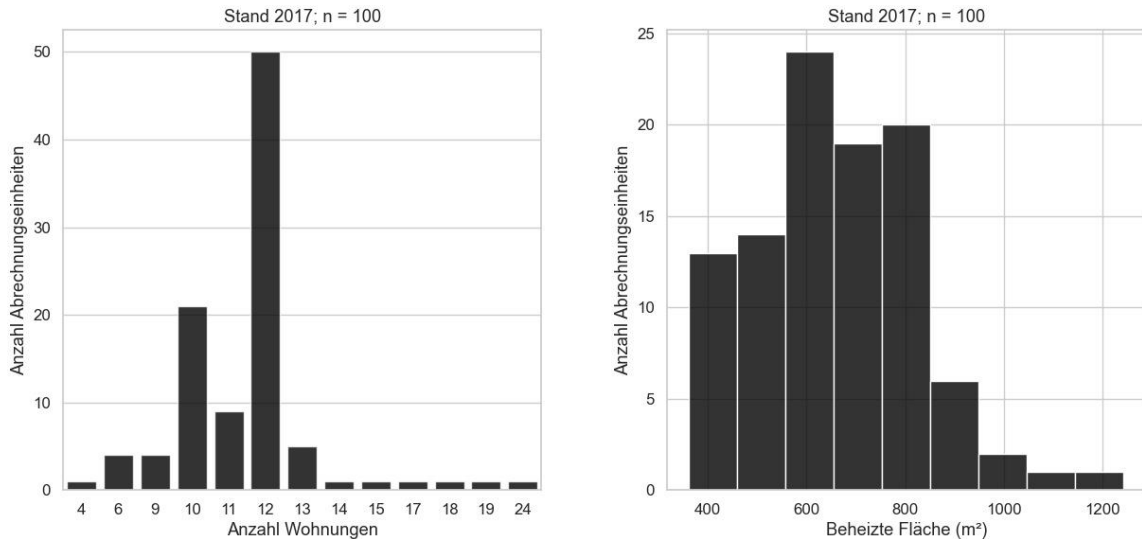


Abbildung 3: Nutzereinheiten & beheizte Fläche je Abrechnungseinheit

Insgesamt wurden 1145 Wohnungen in das Projekt einbezogen. Die genaue Wohnfläche war für 968 Wohnungen bekannt, für 177 Wohnungen lagen keine exakten Daten bzgl. der Wohnfläche vor. Die durchschnittliche Wohnfläche betrug ca. 59 m², die Verteilung der Wohnungsgrößen ist in Abbildung 4 dargestellt.

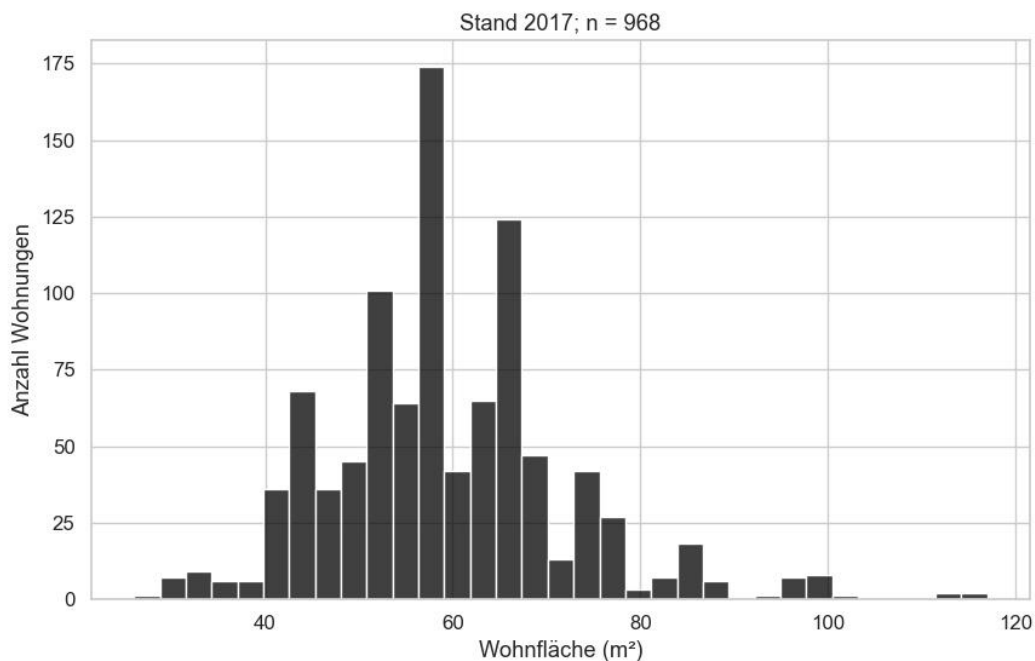


Abbildung 4: Durchschnittliche Wohnfläche je Wohnung

Die Mehrheit (78%) der Liegenschaften verfügte über keine zentrale Trinkwassererwärmung. Diese Auswahl wurde bewusst getroffen, um Effekte des Heizungsbetriebes detailliert untersuchen zu können, ohne dass diese von den Eigenschaften der Warmwasserbereitung überlagert wurden. Zum 31.05.2021 wurden 92 Liegenschaften mit Erdgas, 5 Liegenschaften

mit Fernwärme und 3 Liegenschaften mit Heizöl beheizt. Der große Anteil, der mit erdgasbetriebenen Liegenschaften wurde, bewusst gewählt, da sich der Erdgasverbrauch gut mit hoher zeitlicher Auflösung erfassen lässt, was für die Betriebsoptimierung der Wärmeerzeuger von großer Bedeutung ist. Bei mit Heizöl versorgten Gebäuden ist dies ungleich schwieriger, setzt das Volumenstromzähler für das Heizöl voraus. Es wurden nur wenige mit Fernwärme versorgte Gebäude ausgewählt, da hier die Anforderungen an die Betriebsführung geringer sind. Weitere Auswahlkriterien waren zudem die Verfügbarkeit von Heizkostenabrechnungen aus den Vorjahren sowie eine geringe Fluktuation der Mieter und eine kleine Leerstandsquote.

Mehr als 93 Liegenschaften wurden von Techem-Systemtechnikern während der Heizperiode 2019/2020 begangen und wichtige, für das Projekt relevante Daten der Gebäude erfasst. Die erfassten Informationen wurden vollständig in die Projektdatenbank integriert. So entstand ein Katalog, welcher Informationen zur Bauphysik der Gebäude sowie zur Heizungsanlage (Wärmeerzeuger, Pumpe, Anlagenregelung, Trinkwasserspeicher) soweit vorhanden beinhaltete. Das Baujahr der Liegenschaften und die geschätzten Transmissionskoeffizienten der Gebäudehülle als Ergebnisse der Bestandserhebung sind in der Abbildung 5 dargestellt. Ein Großteil der Gebäude stammt aus den Jahren 1930 bis 1960, aufgrund verschiedener Besitzstandwechsel liegen nur für 60 Liegenschaften Baujahre vor. Dabei weisen die ausgewählten Liegenschaften eine breite Diversifizierung der Bauphysik auf, die berechneten mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten werden (soweit vorliegend) in Abbildung 5 rechts dargestellt.

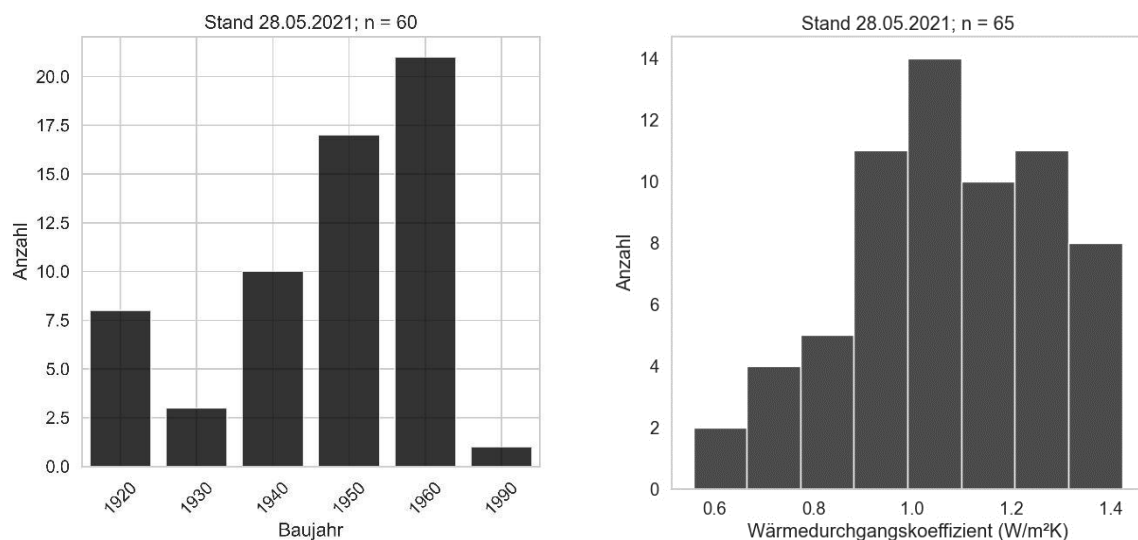


Abbildung 5: Baujahr und mittlerer Transmissionswert

Zu Projektbeginn betrug das durchschnittliche Alter der Wärmeerzeuger 19 Jahre mit einer Standardabweichung von 8 Jahren. Der älteste vor dem Projekt betriebene Kessel stammte aus dem Jahr 1980. Die älteren Kessel waren Niedertemperaturkessel, die neueren Brennwertgeräte. Es wurden im Sommer 2017 vor Projektbeginn 30 Kessel erneuert, für einen Großteil der Anlagen lagen Betriebsdaten aus der Zeit vor dem Kesseltausch vor. In 28 Fällen wurden Niedertemperaturkessel gegen Brennwertgeräte getauscht, in zwei Fällen wurden Brennwertgeräte erneuert. In der folgenden Abbildung wird das (Gas) Kesselbaujahr auf der X-Achse und die Anzahl der installierten Kessel auf der Y-Achse dargestellt, in Rot werden Niedertemperaturkessel und in blau Brennwertkessel abgebildet, Abbildung 6.

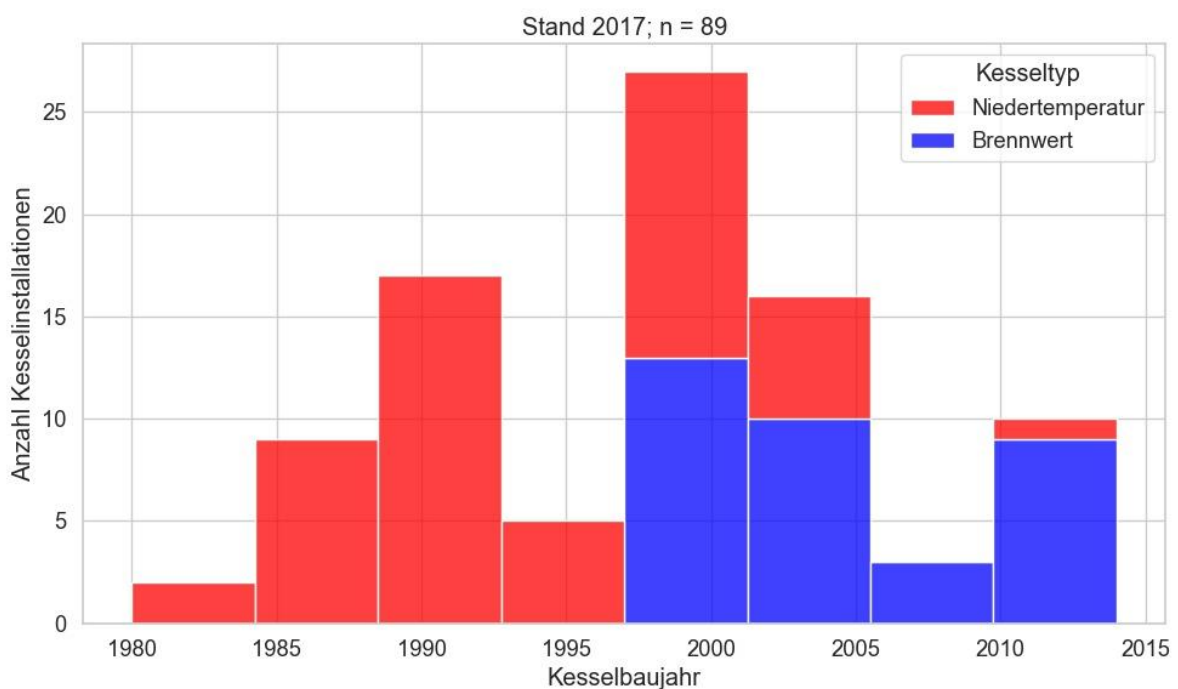


Abbildung 6: Baujahr Wärmeerzeuger

Die Nennwärmeleistung der verbauten Gaskessel betrug 2017 zwischen 22 und 170 kW, im Mittel 65,6 kW bei einer Standardabweichung von 24,84 kW. Mehr als 65% der Kessel haben eine Nennwärmeleistung kleiner als 80 kW. Aussagekräftiger als die absoluten Nennwärmeleistungen ist die Nennwärmeleistung je Fläche, diese wird für die Gaskessel in Abbildung 8 dargestellt. Im Mittel verfügten gasbeheizte Abrechnungseinheiten im Jahr 2017 über eine kesselseitige Nennwärmeleistung von 104 W/m². In der rechten Abbildung 8 wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle gegen die Nennwärmeleistung der Gaskessel im Jahr 2017 aufgetragen. Wenngleich die Streuungen hoch sind, so ist ein Zusammenhang zu erahnen.

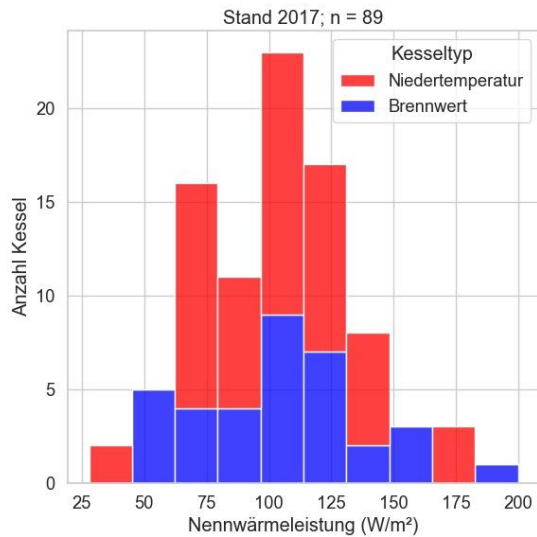


Abbildung 7: Spezifische Nennwärmeleistung

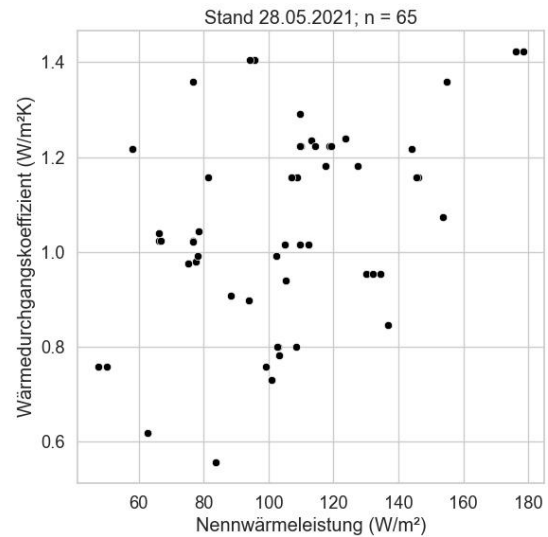


Abbildung 8: U-Wert gegen spezifische Nennwärmeleistung

Die Wärmeschutzverordnung 1984 sah vor, dass der mittlere U-Werte der Gebäudehülle $< 1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ nicht überschritten werden sollte. Für diesen Gebäudetyp, bei beheizbaren Nutzflächen zwischen 500 m^2 und 1000 m^2 , lässt sich die notwendige Heizlast mit ca. 90 W/m^2 abschätzen, siehe Tabelle 2. Vergleicht man diese Werte mit den Leistungen der Wärmeerzeuger der Projektliegenschaften, sind die Wärmeerzeuger eher großzügig dimensioniert.

Beheizbare Nutzfläche	Heizlast in W/m^2					
		2002 bis ab 2009	1995 bis 2001	1984 bis 1994	1978 bis 1983	1977 bis
100	38	45	67	99	115	163
125	38	45	67	98	114	162
150	37	44	66	98	114	161
200	37	44	65	97	113	160
300	36	43	64	95	110	157
500	33	40	60	90	105	150
1000	32	39	59	88	103	148
1500	31	38	58	87	101	145
2000	30	37	56	85	99	143
3000	28	35	54	82	95	138

Tabelle 2: Heizlast in Abhängigkeit von der beheizbaren Nutzfläche (in Anlehnung an Nationaler Anhang zu DIN EN 15378)¹⁶

¹⁶ *Haustec*, Wie funktioniert eigentlich eine Heizlast im Bestand?, 2022.

Die eher großzügig gewählte Dimensionierung des Wärmeerzeugers gilt auch für neuere Anlagen, Abbildung 9. Wie in Tabelle 2 dargestellt, haben auch die neueren Wärmeerzeuger keine kleinere Heizleistung als die älteren Anlagen.

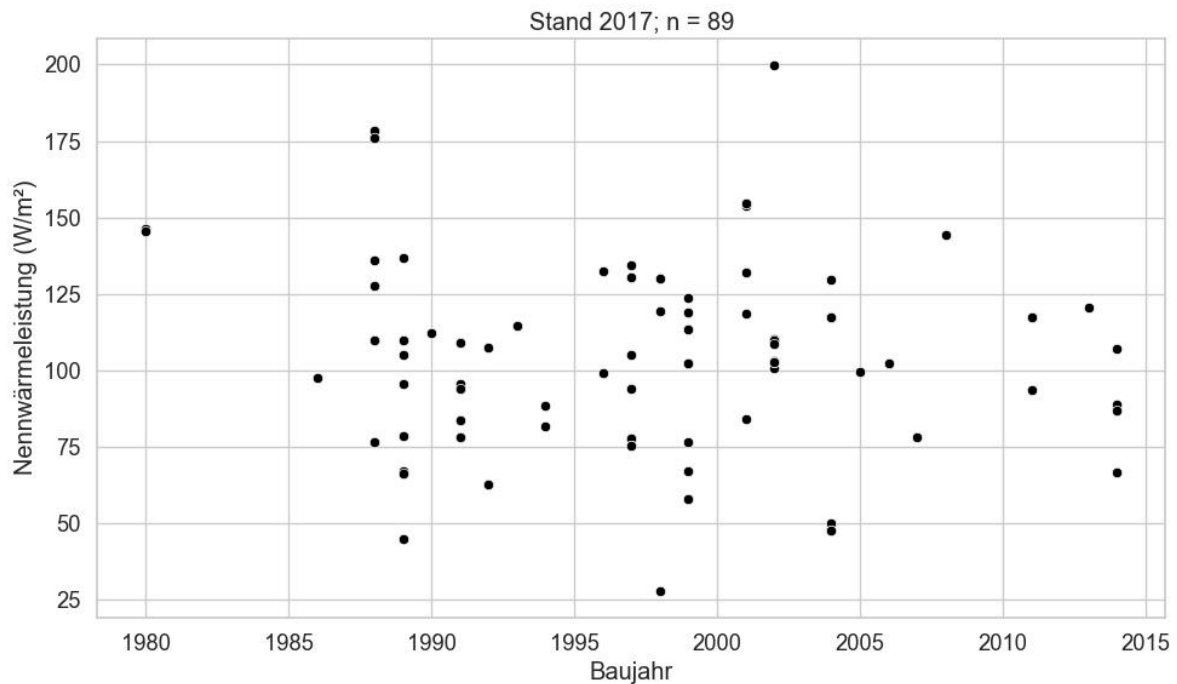


Abbildung 9 :Nennwärmeleistung in Abhängigkeit vom Baujahr des Wärmeerzeugers.

Die meisten verbauten Kessel (77%) stammen von den Herstellern Viessmann, Buderus und Vaillant, andere Hersteller wie Wolf, ATAG, Junkers oder Brötje wurden zusammen in 23% der Projekt-Liegenschaften verbaut. Zum Projektstart waren 54 Gaskessel Niedertemperaturkessel und 35 Brennwertkessel. 36 Kessel wurden atmosphärisch mit Luft versorgt, weitere 53 verfügten über ein Gebläse.

1.7 Ausstattung der Gebäude mit der Mess-Infrastruktur

Die Projektliegenschaften wurden im Hinblick auf die notwendige Ausstattung, in Zusammenarbeit mit der Techem GmbH, untersucht und bewertet. Ziel war es, alle Liegenschaften mit einer Messinfrastruktur auszurüsten, welche die zeitliche Erfassung (110 Sekunden Intervall) folgender Messgrößen und Ableitungen ermöglichte:

- Endenergieverbrauch
- Wärmemengen (Heizwärme und Trinkwasserwärme)
- Volumenströme
- Heizleistungen
- Vorlauftemperaturen
- Rücklauftemperaturen
- Abgastemperaturen
- Zu- und Ablufttemperaturen
- Oberflächentemperaturen des Wärmeerzeugers
- Hilfsenergieeinsätze inkl. Pumpenleistung & Förderhöhe
- Außentemperaturen
- Heizkörpertemperaturen

Zur Ausstattung der Projektliegenschaften mit der notwendigen Messhardware wurde, in Abstimmung mit der Techem GmbH und den Wohnungsbauunternehmen, ein Ausstattungsplan entwickelt. Es konnten 73 von 79 Gebäuden aus dem Vorgängerprojekt übernommen werden. In diesen war nur eine Erweiterung der Messinfrastruktur nötig. Zusätzlich kamen 27 Gebäude neu hinzu, welche vollständig mit einer Messinfrastruktur ausgestattet werden mussten. Dieser Prozess konnte im Frühjahr 2020 abgeschlossen werden. In den Liegenschaften wurden insgesamt Impulsgeber für 92 Gasmengenzähler, 108 Wärmemengenzähler, 29 Grundfos Magna3-Pumpen, 1245 Temperatursensoren und 226 Datensammler neu installiert (s. Abbildung 10).

Ziel	Status	Offen	%
100 Liegenschaften 		0	100%
92 Gaszähler 		0	100%
108 Wärmemengenzähler 		0	100%
29 Pumpen 		0	100%
1.245 Temperatur-Sensoren (Keller) 		0	100%
226 Datensammler 		0	100%

Abbildung 10: Ausstattung der Liegenschaften mit Messhardware

Die Messinfrastruktur erzeugte und verarbeitete Ende 2019 bereits ca. 4 Millionen Telegramme täglich. In Abbildung 11 wird beispielhaft der Heizungskeller einer BaltBest Liegenschaft inkl. zusätzlich installierten Sensorik dargestellt.

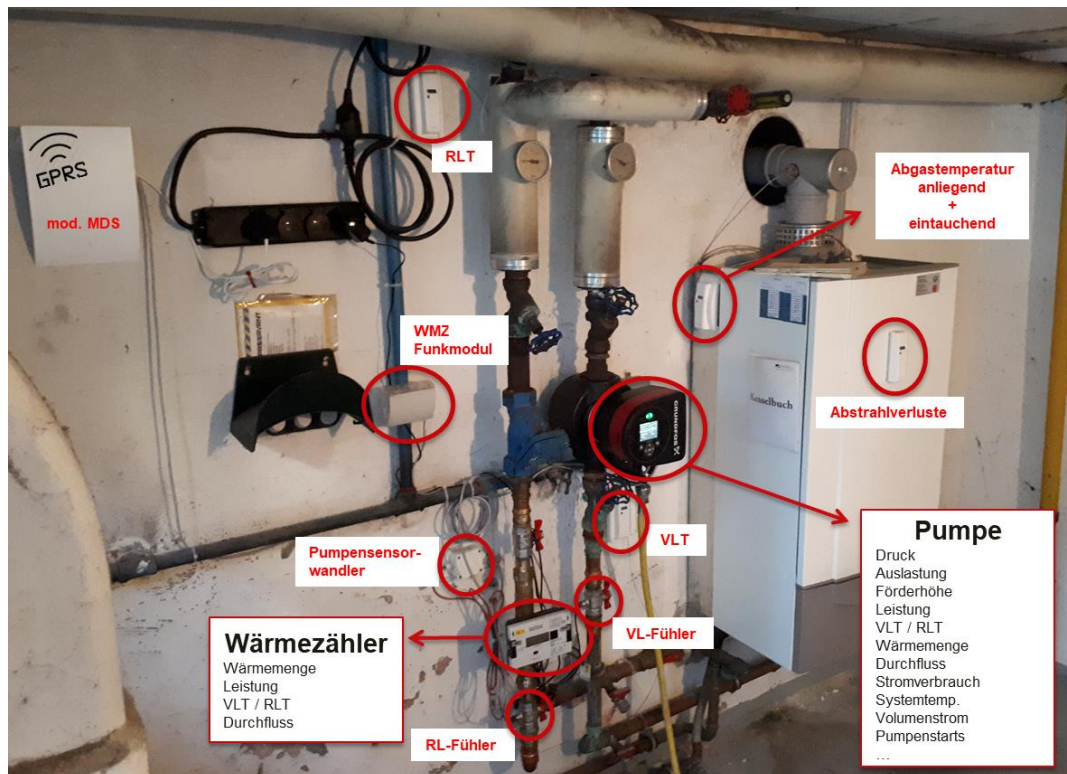


Abbildung 11: Beispiel für Messhardware in einer Liegenschaft

Um eine kosteneffiziente Ausstattung der Projektliegenschaften zu ermöglichen, wurden nicht alle Liegenschaften mit Grundfos Magna3 Pumpen und Wärmemengenzählern am Heizwasser ausgerüstet, sondern drei Ausstattungslinien definiert:

	Variante 1: Vollausstattung	Variante 2: Grundfos Pumpe	Variante 3: Wärmemengenzähler
Anzahl Liegenschaften	7	23	70
Grundfos Magna3 - Pumpe	X	X	
Wärmezähler am Heizstrang	X		X

Tabelle 3: Ausstattungslinien

Im Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass die Messgenauigkeit einiger Sensoren, besonders der verbauten Magna3 - Pumpen und der Gasmengenzähler nicht für die hohe zeitliche Auflösung der Energieverbräuche geeignet waren. Bei einer Betrachtung der erfassten Messdaten mit hoher zeitlicher Auflösung kam es bei diesen Sensoren zu einem Quantisierungsrauschen. So konnten z.B. manche Gasmengenzähler nur in je 100 Liter Volumendifferenzen ausgelesen werden. Zu einer Diagnose mit einer Dauer von mehreren Stunden, z.B. einem Tag war die Messgenauigkeit der Sensoren jedoch i.d.R. (abhängig vom Gasverbrauch) ausreichend.

1.8 IT-Infrastruktur

Zu Projektbeginn wurden die Projektliegenschaften durch Techniker der Techem GmbH aufgesucht und umfassend untersucht. Es wurde für jede Liegenschaft eine Anlagenanalyse durchgeführt, die Bauphysik erfasst, ein Heizungs-Check durchgeführt, Abgasmessungen vorgenommen, der Ist-Zustand der Anlagenregelung zum Aufnahmezeitpunkt erfasst, die Parametrierung der Umwälzpumpe erfasst, ein grober Grundriss angefertigt und soweit vorhanden sonstige Anlagen wie z.B. Trinkwasserspeicher etc. erfasst. Die wichtigsten bei den Begehungen erfassten Daten wurden in der Projektdatenbank gespeichert, weitere Daten in Begehungsprotokollen erfasst.

Die von der Messinfrastruktur in Echtzeit erfassten Messdaten wurden stündlich durch die GPRS-fähigen Masterdatensammler über Mobilfunk an ein Rechenzentrum der Techem GmbH geschickt. Dort wurden die Messdaten automatisiert verarbeitet und zur Übertragung an die EBZ Business School und die TU Dresden vorbereitet. Die Übertragung der Messdaten an die EBZ BS erfolgte täglich und an die TUD wöchentlich. Schematisch wird dieser Prozess in Abbildung 12 dargestellt.

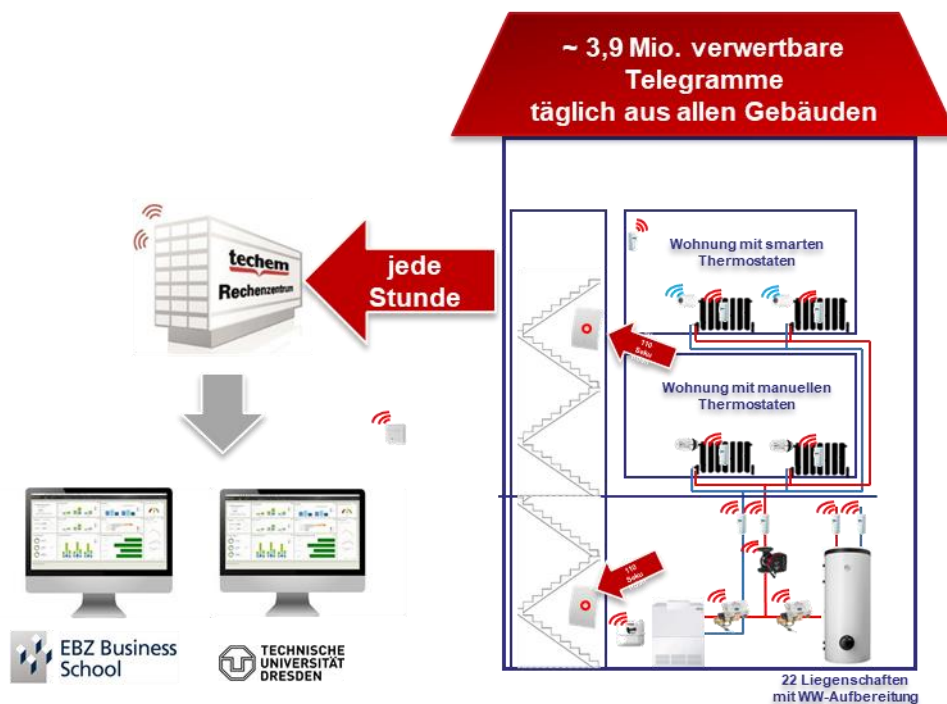


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Datenübertragung einer BaltBest Liegenschaft

Zur Datenverarbeitung wurde auf Seiten der EBZ BS ein Linux-Server mit 512 Gigabyte Arbeitsspeicher, 2 x Intel Xeon Gold 6226 mit jeweils 12 Kernen, einem SSD / HDD Speichersystem mit einer Gesamtkapazität von 20 Terabyte und gleichem Server im

Replikationsmodus als Backup System eingesetzt. Als Datenbank kam PostgreSQL ¹⁷ mit verschiedenen Erweiterungen wie z.B. Timescale ¹⁸ zum Einsatz. Die laufende Betreuung und Anpassung der Datenbank erfolgte während der Projektlaufzeit durch Datenbankspezialisten.

Aufbau eines Monitoring-Systems zur Sicherung der Datenqualität

Um die Quantität und Qualität der erfassten Messdaten sicherzustellen, wurde ein Monitoring-System entwickelt und auf einem Server der EBZ Business School implementiert. In Abbildung 12 sind die Auswertungen dargestellt, die durch das Monitoring-System ermöglicht wurden. Das Monitoring ermöglichte es Störungen in der Mess- / oder IT-Infrastruktur zeitnah zu erkennen, zu lokalisieren und zu beseitigen. Im Projektverlauf konnte so eine hohe Qualität und Quantität der Messdaten erreicht werden.

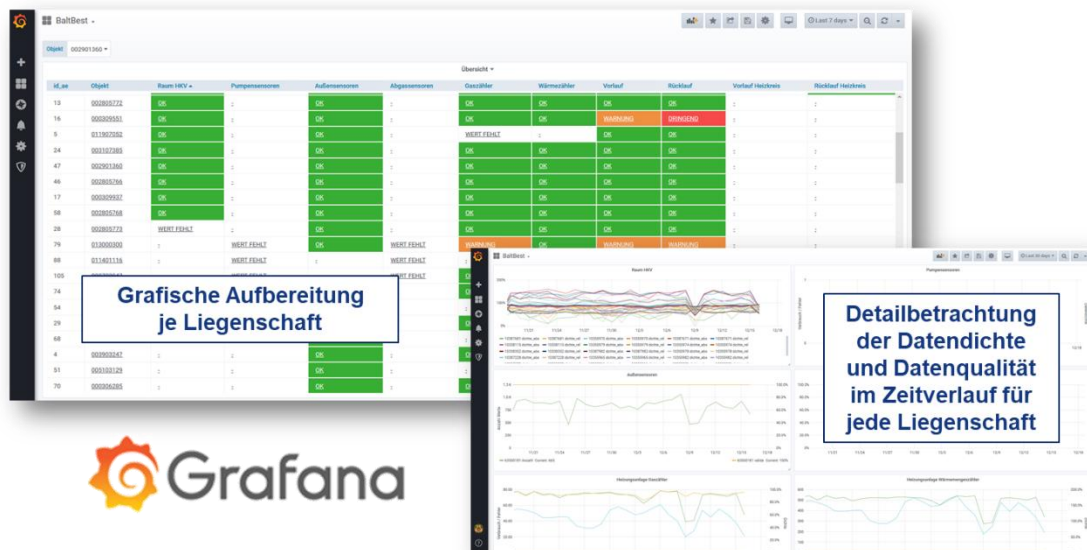


Abbildung 12: Datenmonitoring und Qualitätssicherung

¹⁷ Group, PostgreSQL Global Development, PostgreSQL, 2021.

¹⁸ TimescaleDB, Time-series data simplified, 2021.

1.9 Infrastruktur in den Wohnungen

Im Balt-Best Projekt standen die anonymisierten Daten von Heizkostenverteilern aus 1145 Wohnungen zur Verfügung, um das Heizverhalten von Mietern im Detail untersuchen zu können. Ein grundlegendes Verständnis des Nutzerverhaltens ist notwendig, um Maßnahmen entwickeln zu können, mit denen sich der Energieverbrauch in Mehrfamilienhäusern nachhaltig senken lässt.



Abbildung 13.: Techem Funk-Heizkostenverteiler

Der anteilige Wärmeverbrauch einer Wohnung in einer Liegenschaft wird über elektronische Heizkostenverteiler mit Funk von Techem ermittelt. Hierzu wird mit zwei Sensoren permanent die mittlere Heizkörpertemperatur und die luftseitige Raumtemperatur gemessen. Durch die Kenntnis über den Heizkörper kann aus den Messwerten eine Wärmemengen-Näherung in Form eines Verbrauchswert bestimmt werden. Die Infrastruktur des BaltBest Projektes zeichnet aus, dass der Verbrauchswert nicht nur zu einem bestimmten Stichtag übermittelt wird, sondern täglich.

Um den Heizenergieverbrauch einer Nutzereinheit weitestgehend unabhängig von der Bauphysik, der Anlagentechnik und Betriebseinflüssen des Wärmeerzeugers bewerten zu können, wird nach VDI 2077 der normierte flächenbezogene Verbrauchswert verwendet. Der normierte flächenbezogene Verbrauchswert nfv_j beschreibt das Verhältnis zwischen den auf Nutzereinheitenebene erfassten Verbrauchseinheiten Z_j und der beheizten Fläche der Nutzereinheit A_j sowie der Summe der in der Liegenschaft erfassten Verbrauchseinheiten und der Summe der beheizten Fläche der Liegenschaft, siehe Gleichung 1:

$$nfv_j = \frac{\frac{Z_j}{A_j}}{\left(\frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)} \quad \text{Gl.1}$$

Dabei bedeutet ein normierter flächenbezogener Verbrauchswert größer 1, dass die entsprechende Nutzereinheit je beheizter Fläche mehr Verbrauchseinheiten benötigt als der Durchschnitt der Nutzereinheiten in der betrachteten Liegenschaft. Auf diese Weise lassen sich die in einer Wohnung erfassten Verbrauchseinheiten im Verhältnis zu den anderen Wohnungen an der Liegenschaft darstellen. Diese Darstellung ist unabhängig von der

Witterung. Zu beachten ist, dass in der Praxis die Abrechnung nicht nur über die Heizkostenverteiler Einheiten erfolgt, sondern ein Teil der Heizkosten anteilig der jeweiligen Wohnfläche einer Wohnung umgelegt wird. Der Anteil der Wärmekosten, welcher über die Verbrauchseinheiten umgelegt wird, beträgt in der Regel zwischen 50 und 70%. Die Aufteilung ist gerechtfertigt, da in der Praxis Wärmeströme zwischen den Wohnungen auftreten und die Heizungsrohre Wärme im Gebäude abgeben. Betrachtet man nur die Verteilung der Heizkostenverteiler-Einheiten, so erhält man ein Maß für die von den Heizkörpern in einer Wohnung abgegebene Wärmemenge. Dies korrespondiert aufgrund des Verteilungsschlüssels nicht zwangsläufig mit den Wärmekosten. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde kein Verteilungsschlüssel entsprechend der Wohnfläche angewandt, da sich so das Nutzerverhalten und deren Wirkung auf den Energieverbrauch besser analysieren lassen. Stattdessen wurden die in den Wohnungen angefallenen Verbrauchseinheiten genutzt, um zentralerfasste Wärme- oder Gasmengen direkt umzulegen.

Um eine automatisierte Auswertung der Betriebsdaten von Heizkörpern zu ermöglichen, wurde folgender Sachverhalt angenommen:

- Ist die Heizkörpertemperatur kleiner als 25°C und ist die Temperaturdifferenz zwischen der vom HKV erfassten innenseitigen und der luftseitigen Temperatur am Heizkörper kleiner als 3 Kelvin, wird er als inaktiv angenommen.
- Ist die Heizkörpertemperatur größer als 25°C und ist die Temperaturdifferenz zwischen der vom HKV erfassten innenseitigen und der luftseitigen Temperatur am Heizkörper größer als 3 Kelvin, wird er als aktiv angenommen.

2 Mieterbefragungen

Um das Heizverhalten der Mieter (im Folgenden auch als Teilnehmer, Befragte oder Nutzer bezeichnet) besser zu verstehen und damit verbundene Energieeinsparpotenziale zu erkennen, wurden während des Projektes verschiedene Mieterbefragungen durchgeführt:

2018: Interviews zum Umgang mit ECO-1 TRV (n=7)

2019: Umgang mit Smart Home Systemen (ECO-1) (n=14)

2019: Nutzerverhalten mTRV, Erwartungen an eTRV (n=18)

2020: Befragungen zum Heiz- und Lüftungsverhalten (n=134)

2020: Befragung der zum Hoba-System eingeladenen Mieter (n=43)

Die erfassten Informationen halfen, die in den Wohnungen beobachteten Verhaltensweisen besser zu verstehen. Bedingt durch den Datenschutz war eine direkte Kontaktaufnahme der EBZ BS zum Mieter nicht möglich. Die Befragungen wurden daher im Unterauftrag der EBZ BS durch das Meinungsforschungsinstitut InWIS Forschung & Beratung GmbH durchgeführt. Die Fragebögen wurden von der EBZ Business School entworfen und in Abstimmung mit der InWIS Forschung & Beratung GmbH überarbeitet. Die Befragung zur Hoba-Anwendung wird im Kapitel Nutzerassistenz gesondert behandelt.

2.1 Befragung von Mietern des Vorprojektes der „Allianz für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand“

Interviews zum Umgang mit ECO-1 TRV (n=7)

Im Jahr 2018 wurden mit ausgewählten Mietern Interviews zu der Handhabung von smarten Thermostaten des Typs ECO-1 der Firma Danfoss durchgeführt. Die smarten Thermostatventile wurden im BaltBest Vorprojekt installiert und eine Heizperiode lang vermessen. 7 Mieter äußerten den Wunsch, dass die bei ihnen installierten smarte Thermostate wieder deinstalliert und durch konventionelle Thermostate ersetzt werden sollten. Um herauszufinden, was die Ursache für diesen Wunsch war, wurden mit diesen Mietern Interviews durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass es Probleme bei der Bedienung der smarten Thermostate gab. In einigen Fällen konnte dies auf eine unzureichende Einweisung seitens der Monteure zurückgeführt werden, in anderen Fällen war die Bedienung und die Ablesbarkeit des kleinen Displays am Gerät aufgrund der Montagesituation für die Mieter nur schwer durchführbar. Der größte Teil der Thermostate bei den betreffenden Mietern wurde wunschgemäß zurückgebaut, bei zwei Haushalten wurde alternativ das Nachfolgemodell ECO-2 der Firma Danfoss installiert. Das Modell ECO-2 zeichnete sich dadurch aus, dass die Bedienung durch Drehen am Gerät ähnlich wie bei einem konventionellen Thermostatventil erfolgen konnte, das Display auf der Oberseite des Thermostatventils angebracht und somit auch bei räumlich beengten Situationen ablesbar war. Darüber hinaus ließen sich die Thermostatventile mittels einer App auf dem Smartphone programmieren.

Umgang mit Smart Home Systemen (ECO-1) (n=14):

Im April 2019 wurden 14 Mieter, die zuvor ECO-1 Systeme nutzten telefonisch durch das InWIS interviewt. Befragt wurden die Mieter unter anderem zum Heiz-, Lüftungs- und Verbrauchsverhalten, der Einstellung zum Thema Energieeffizienz und Motivation sowie der Nutzung, der im Projekt ausgebrachten smarten Thermostate bzw. die Erwartung an die entsprechende Technik.

Abbildung 14 zeigt die Antworten der Mieter zum Heizverhalten. Der Großteil der befragten Mieter (ca. 60%) schätzt das eigene Heizverhalten als energiesparend ein. Nahezu 25% richten ihrer Einschätzung nach ihr Heizverhalten dagegen auf Komfort aus.

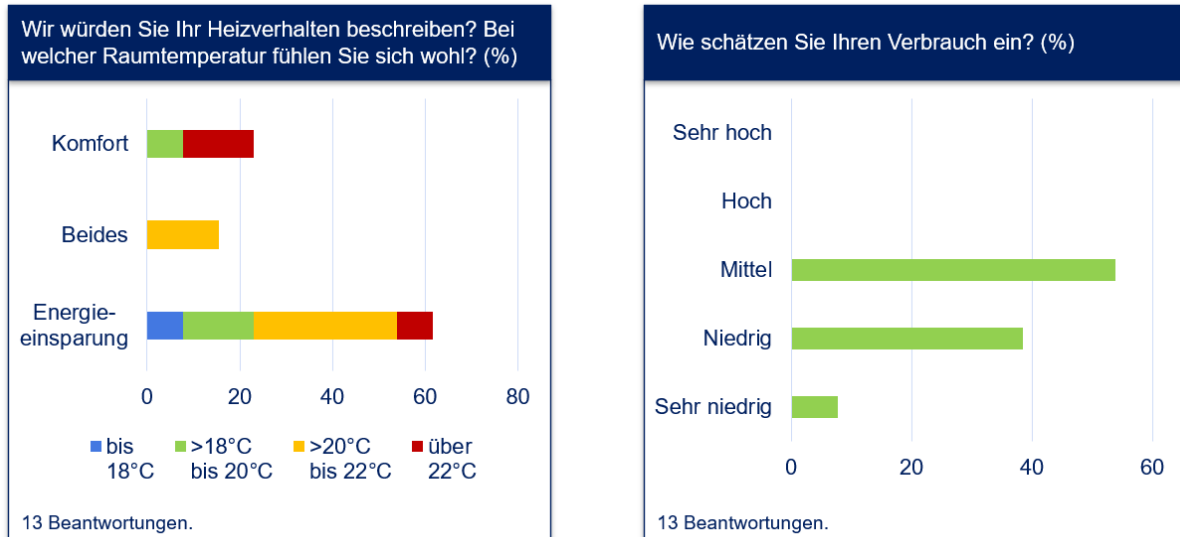


Abbildung 14: Mieterbefragung 1 - Heizverhalten und Verbrauchseinschätzung

Interessant ist, dass dennoch kein befragter Mieter seinen Verbrauch als hoch oder sehr hoch einschätzt. 54% vermuten, dass sie durchschnittlich viel verbrauchen. Die restlichen 46% Mieter gingen davon aus, dass ihr Verbrauch niedrig (38%) bis sehr niedrig (8%) war. Die Mieter wurden weiter zu ihrem Lüftungsverhalten befragt. Die Hälfte der Befragten gab an, dass sie Stoßlüften. 28% lüften ausschließlich über das Kippen der Fenster, 21% lüften sowohl über Stoß- wie auch Kipplüftung. Ca. 65% der Befragten gaben an, dass sie keine Absenkung der Raumtemperaturen an den Heizkörpern vornehmen, wenn sie lüften. Das ist hinsichtlich der Energieeffizienz als bedenklich einzuschätzen, da etwa 28% angaben, über 30 Minuten lang zu lüften. Etwa 21% gaben sogar an, dass der Lüftungsvorgang mehr als 60 Minuten dauert und dabei die Raumtemperatur am Thermostat nicht abgesenkt wird. Es bestehen also Einsparpotenziale im Hinblick auf das Lüftungsverhalten der Befragten, welches durch entsprechendes Equipment (Thermostate, die eigenständig Lüftungsvorgänge erkennen und die Temperatur entsprechend absenken) und durch eine Assistenz der Nutzer zu einem energieeffizienteren Verhalten, siehe Abbildung 15.

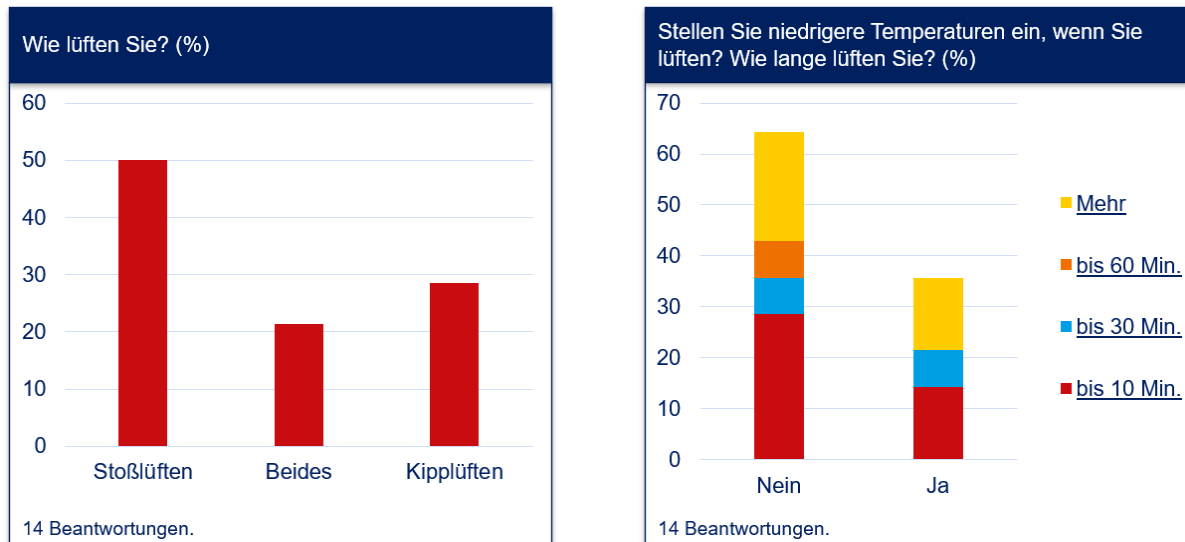


Abbildung 15: Mieterbefragung 1 - Lüftungsverhalten

Ein zu hebendes Potenzial besteht zudem durch Schulung der Nutzer im Umgang mit den smarten Thermostaten. Die Hälfte der Nutzer hatte nicht das Gefühl, die smarten Thermostate nach der erfolgten Einweisung selbstständig bedienen zu können. Mehr als die Hälfte dieser Nutzer wurde weniger als 5 Minuten lang eingewiesen. Nur ein Bruchteil dieser Nutzer gab an, dass Ihnen die Möglichkeit der Programmierung von Zeitprogrammen dargestellt wurde, siehe Abbildung 16.

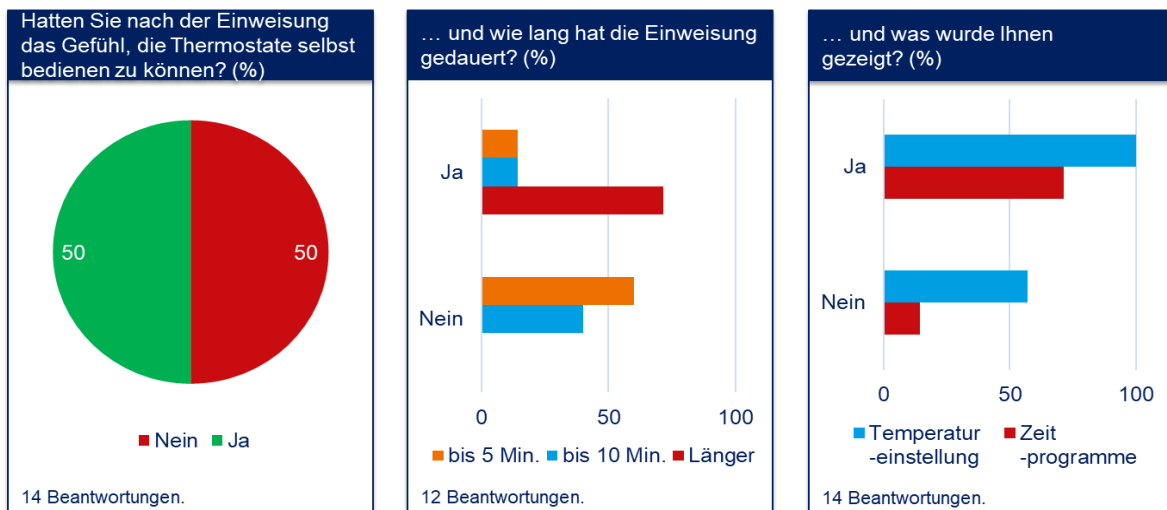


Abbildung 16: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten

Jeweils 79% bzw. 67% gaben an, keine weitere Unterstützung durch die Familie oder weiteres Informationsmaterial zu benötigen. 90% der Befragten gaben an, dass eine Demonstration vor Ort für Sie die ideale Form der Einweisung wäre, siehe Abbildung 17.

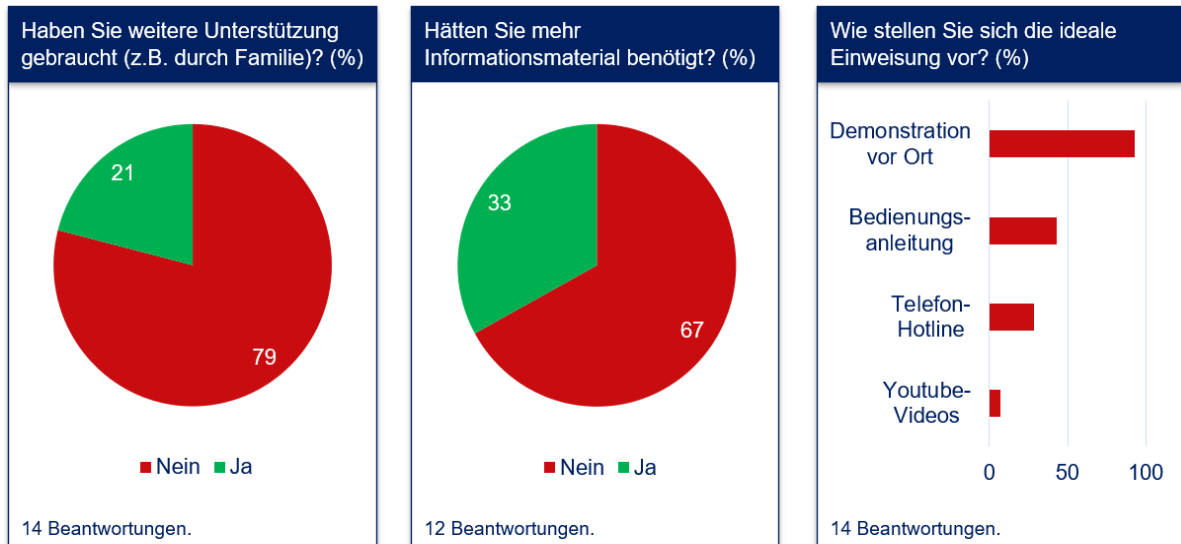


Abbildung 17: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten 2

Auf die Frage, wie häufig sie Änderungen an den Einstellungen der smarten Thermostaten vornehmen würden, gaben mehr als 50% der Mieter an, dass Einstellungen nur nach der Installation bzw. nie vorgenommen werden würden (Abbildung 18).

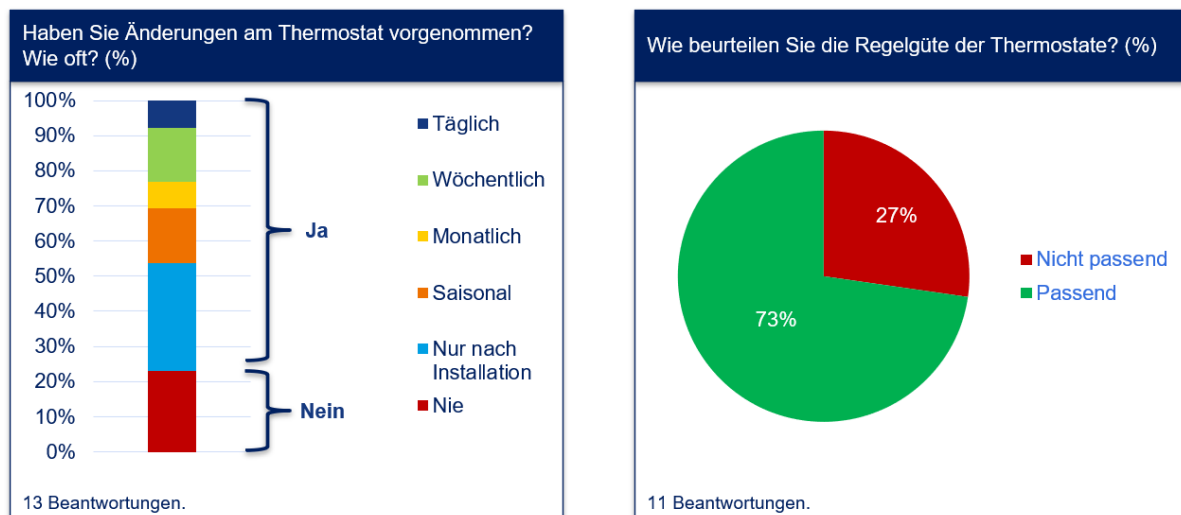


Abbildung 18: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten 3

Ca. 73% der befragten Mieter empfanden die Regelgüte der smarten Thermostate als passend.

2.2 Interviews in BaltBest ECO2-Liegenschaften

Im Oktober 2019 wurden die fünf Liegenschaften, die im Rahmen des BaltBest Projektes mit smarten Thermostaten ausgestattet werden sollten, besucht, um Raumtemperatursensoren zu installieren und mit den Mietern über Ihre Erwartungshaltung bzgl. der ECO2-Thermostate zu sprechen. Die Mieter sollten sich dabei in die Gruppen „sehr sparsam“, „sparsam“ und komfort-orientiert“ einteilen. Die Angaben der Mieter in der Befragung wurden mit den Messdaten der installierten Raumtemperatursensoren verschnitten. Die Selbsteinschätzung der Mieter wird in Abbildung 19 über den gemessenen Raumtemperaturen im Bad rot, in der Küche grün, dem Schlafzimmer türkis und dem Wohnzimmer lila dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Selbsteinschätzung der Mieter nur bedingt zu den gemessenen Raumtemperaturen passt. Während in den Nutzereinheiten (Mieter) der Nummern 161, 158 & 992 die Selbsteinschätzungen „sparsam“ bzw. „komfort-orientiert“ durch die Raumtemperaturen verifiziert werden können, sind die Selbsteinschätzungen der Nutzereinheiten Nummer 1607 (komfortorientiert, Raumtemperaturen aber eher niedrig) bzw. Nummer 915 (sparsam, aber Raumtemperaturen eher hoch) anhand der gemessenen Raumtemperaturen nicht nachvollziehbar. Während einige Mieter ihr Verbrauchsverhalten treffend einschätzen, können viele Mieter dies nicht. Für die Mieter wird das Einschätzen Ihres Verbrauchsverhalten auch durch das späte Feedback mittels der Heizkostenabrechnung erschwert. Hinzu kommt, dass die Vorauszahlungen der Heizkosten häufig sehr großzügig ausgelegt werden, so dass auch bei einem energieintensiven Heizverhalten häufig keine Heizkostennachzahlungen notwendig ist.

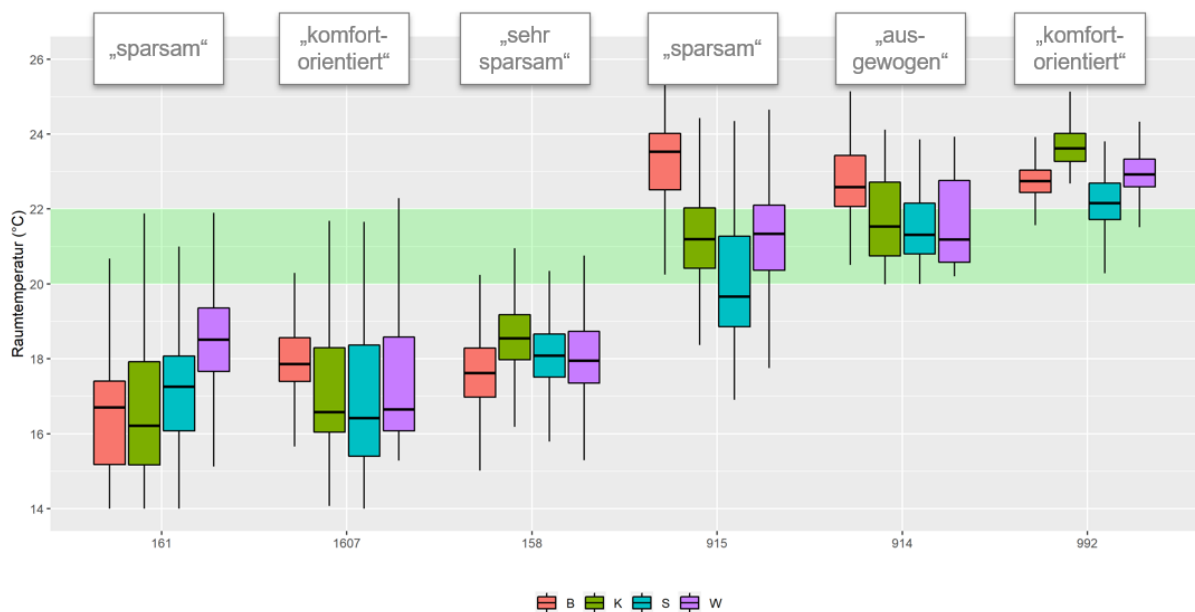


Abbildung 19: Mieterbefragung 2 – Selbsteinschätzung und Raumtemperaturen

2.3 Mieterbefragung zum Thema Heizen, Lüften und Handhabung der smarten Thermostate (n = 134)

Für das Jahr 2020 war eine umfassende Befragung aller Mieter im Projekt geplant. Hierfür wurden 2019 Vereinbarungen zur Auftragsdatenverarbeitungen (ADVs) mit den wohnungswirtschaftlichen, assoziierten Projektpartnern abgeschlossen. Es wurden entsprechende Fragebögen entworfen und mit dem InWIS abgestimmt.

Im Frühjahr 2020 begann die umfassende Befragung der Mieter durch das InWIS. Bis Anfang März 2020 konnten 134 Mieter erreicht werden. Aufgrund der Coronakrise zeigten sich viele Mieter irritiert über die Befragung im ersten Lockdown. Um weiteren Unmut bei den Mietern zu vermeiden, welche Sorgen um Ihren Job, Familie und die eigene Gesundheit hatten, wurde die Befragung daher vorzeitig beendet.

Um die Allgemeingültigkeit der gewonnen Informationen zu prüfen, wurden demografische Daten erfasst. Ein Großteil (76%) der befragten Mieter war zwischen 21 und 60 Jahre alt. Es wurden nur sehr wenige jüngere Mieter befragt (1%), Mieter älter als 60 Jahre stellten mit insgesamt 23% eine Minderheit. Eine knappe Mehrheit von 52% der Mieter waren weiblich, 1% divers und 47% männlich. Etwas mehr als die Hälfte der Befragten gab an, in einer Gemeinschaft von mind. 2 Personen zu leben. Dabei stellen Haushalte mit mehr als 2 Personen mit insgesamt 17% eine Minderheit dar (s. Abbildung 20).

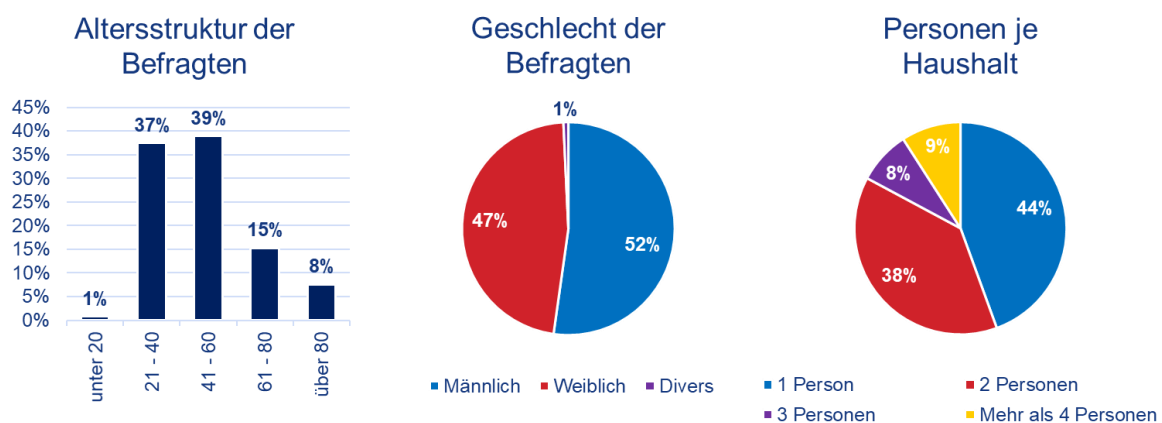


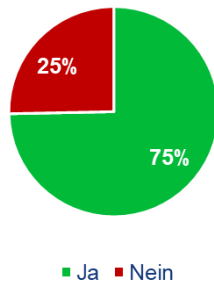
Abbildung 20: Demografischer Hintergrund der Mieterbefragung 2020

Wunschtemperaturen und Heizverhalten

In der Befragung gaben drei Viertel der Mieter an, die Raumtemperatur zu messen und konkrete Temperaturwünsche für verschiedene Räume zu besitzen. Die Wunschraumtemperatur im Wohnzimmer beträgt etwa 21°C im Median, während im Schlafzimmer im Median etwa 18°C gewünscht werden. In der Befragung wurde nicht

zwischen Wunschttemperaturen am Tag und in der Nacht unterschieden, Beschäftigungsverhältnisse und Beschäftigungsart wurden nicht erfragt (s. Abbildung 21).

Welcher Anteil der Befragten misst die Raumtemperatur?



Wunschtemperatur der Befragten

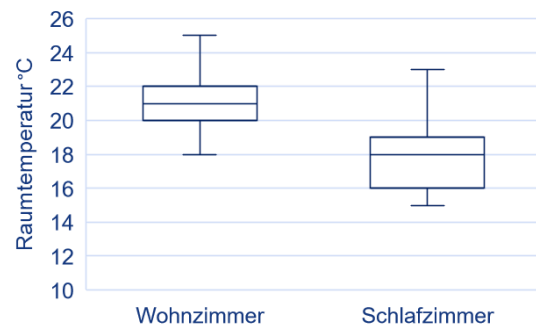


Abbildung 21: Wunschräumtemperatur Mieterbefragung 2020

Um zu ergründen, ob und wie die Befragungsteilnehmer die gewünschten Raumtemperaturen erreichen, wurden diese zu Ihrem Heizverhalten befragt. Eine Mehrheit von 62% der Befragten gab an, die Thermostateinstellungen an den Heizkörpern täglich zu ändern. Während 7% der Mieterangaben, dies wöchentlich zu tun, gaben 31% der Mieter an, die Thermostate nur saisonal zu bedienen.

Weiterhin wurde gefragt, ab welcher Abwesenheitsdauer die Mieter die Thermostateinstellungen verändern. Mehr als 88% gaben an, die Thermostateinstellung bei einer Abwesenheit von einigen Tagen zu verändern, 72% gaben an, dies bereits bei einem Tag Abwesenheit zu tun und 53% bereits bei einigen Stunden Abwesenheit.

Um die Gründe für das Unterlassen des Eingriffes bei längerer Abwesenheit zu klären, wurden die Mieter befragt, warum Sie die Einstellungen der Thermostate nicht anpassen. Daraufhin gaben 11% der Mieter an, dass sie den Nutzen des Absenkbetriebes hinterfragen würden, weitere 11% gaben an, den Eingriff zu vergessen und 5% scheuten den Aufwand der Einstellungsänderungen. Hier zeigt sich das Potenzial, durch eine gezielte Aufklärung der Mieter und die Verwendung intelligenter Absenkbetriebe den Heizenergieverbrauch der Mieter zu reduzieren (s. Abbildung 22).

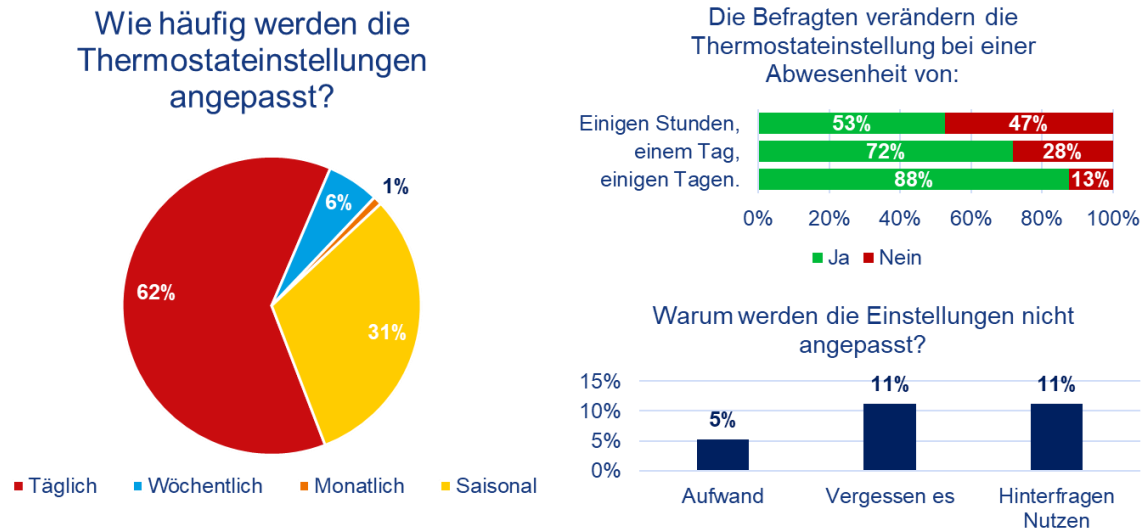


Abbildung 22: Änderung der Thermostatstellung Mieterbefragung 2020

Lüftungsverhalten

Eine Mehrheit von 73% der Befragungsteilnehmern gab an, regelmäßig nach definierter Uhrzeit zu lüften, weitere 57% gaben an, zu lüften, um die Luftqualität zu verbessern.

Etwa ein Fünftel der Befragungsteilnehmer (21%) gaben an, das Lüften zur Temperaturregulierung einzusetzen, also überschüssige Wärme ablüften zu wollen. Mit 54% gab eine knappe Mehrheit der Mieter an, zumeist stoßzulüften, d.h. 46% lüften nach Selbstangabe auf Kipp, siehe Abbildung 23.

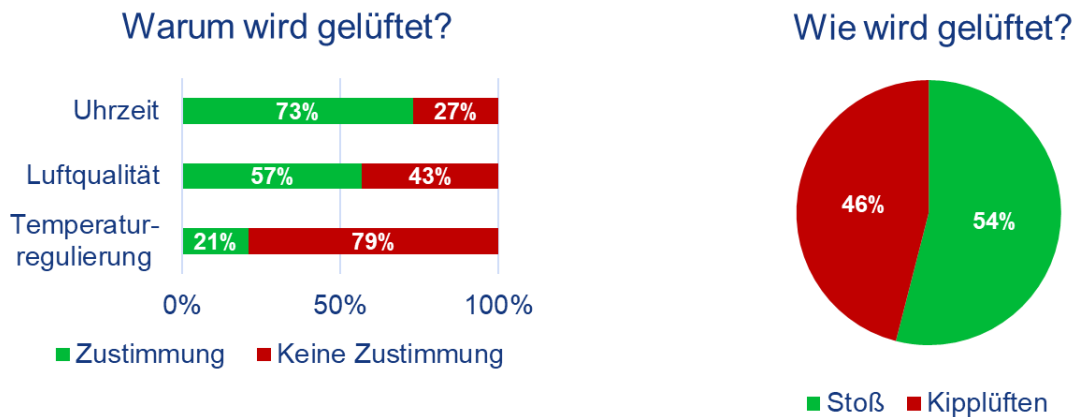


Abbildung 23: Gründe und Art des Lüftens - Mieterbefragung 2020

Es stellte sich heraus, dass die Mieter sehr unterschiedlich lang und häufig lüften. Während einige Mieter nur einmal täglich und weniger als 5 Minuten lüften, gibt es weitere Mieter, welche mehr als viermal am Tag und jeweils länger als eine Stunde lüften. Die meisten Befragten gaben jedoch an, 2-3-mal für eine Dauer von nicht mehr als jeweils 30 Minuten pro Tag zu lüften (s. Abbildung 24).

Wie oft und wie lange wird gelüftet?

	Bis 5 Minuten	Bis 10 Minuten	Bis 30 Minuten	Bis 1 Stunde und mehr	Mehr als 1 Stunde
1 mal	2 %	4 %	5 %	4 %	3 %
2 mal	3 %	24 %	12 %	1 %	3 %
3 mal	6 %	11 %	3 %	0 %	2 %
4 mal	1 %	5 %	3 %	0 %	1 %
> 4 mal	0 %	4 %	1 %	0 %	3 %

Abbildung 24: Anzahl und Dauer Lüftungsvorgänge - Mieterbefragung 2020

Zudem wurden die Teilnehmer gefragt, wie sie ihr eigenes energetisches Verhalten beschreiben würden. Eine Minderheit von 12% der Befragten gab an, sich komfortorientiert zu verhalten. Etwas weniger als die Hälfte (44%) der Befragten beschrieben ihr Verhalten als ausgewogen und weitere 44% gaben an, sich sparsam zu verhalten.

Um zu untersuchen, wie sich Mieter verhalten welche sich als sparsam einschätzen, folgt eine Auswertung der obigen Fragestellungen ausschließlich für diese Gruppe. Mit 49% gaben weniger als die Hälfte der sparsamen Mieter an, Stoßzulüften und immerhin 15% sagten aus, zur Temperaturregulierung zu lüften. Die nach Selbstangaben sparsamen Mieter gaben an, die Thermostatstellung weniger häufig zu ändern. Es zeigte sich, dass die Mieter ihr eigenes Verhalten nur bedingt korrekt bewerten können. Nicht zu unterschätzen ist aber auch der Einfluss der Erwartungshaltung, auf das Antwortverhalten der Befragungsteilnehmer. Die Ergebnisse werden in Abbildung 25 dargestellt.

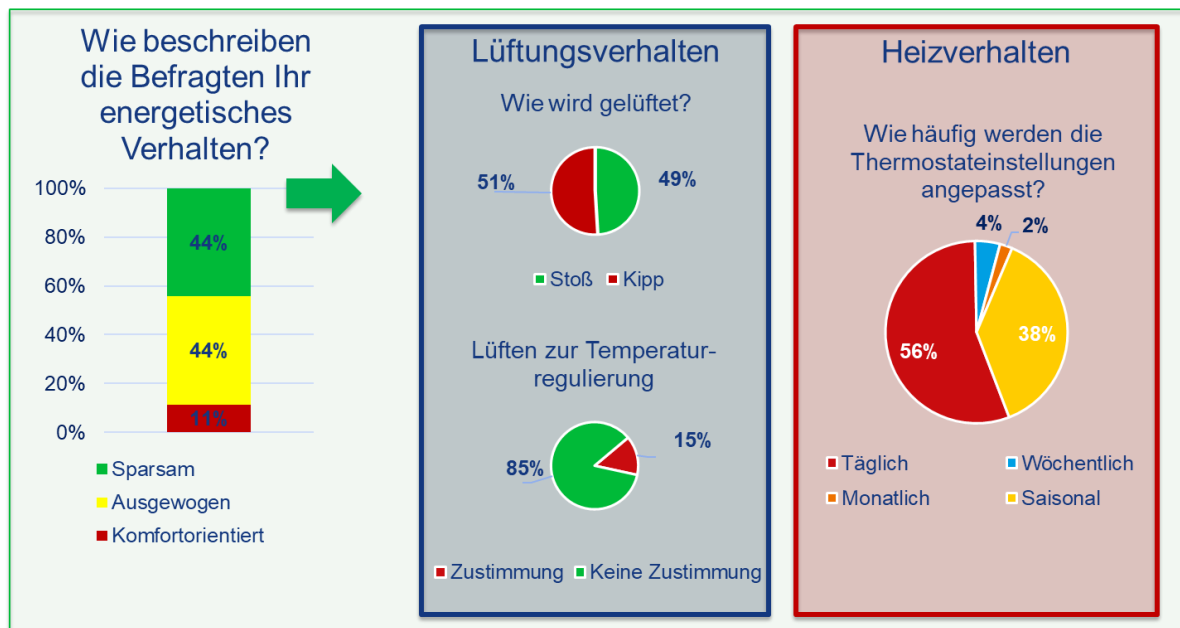


Abbildung 25: Selbsteinschätzung energetisches Verhalten- Mieterbefragung 2020

Verbreitung smarter Thermostate in den Wohnungen

Um den Verbreitungsgrad von smarten Thermostaten abschätzen zu können, wurden die Mieter befragt, ob Sie bereits über smarte Thermostate verfügen. Diese Frage bejahten 19% der Teilnehmer. Dabei stellte sich heraus, dass die Hälfte der Mieter mit smarten Thermostaten diese durch das Vorgängerprojekt bekommen hatten, während sich die andere Hälfte selbst ausstattet hatte. Unter den Mietern, welche sich selbst mit smarten Thermostaten ausgestattet haben, waren die Hersteller Homematic, Bosch und Eurotronic sehr verbreitet, (s. Abbildung 26). Bei späteren Untersuchungen konnte anhand der Daten aus den Heizkostenverteilern nachgewiesen werden, dass die Gruppe, welche sich die smarten Thermostate selbst gekauft hatten, die Programmiermöglichkeiten auch tatsächlich nutzen.

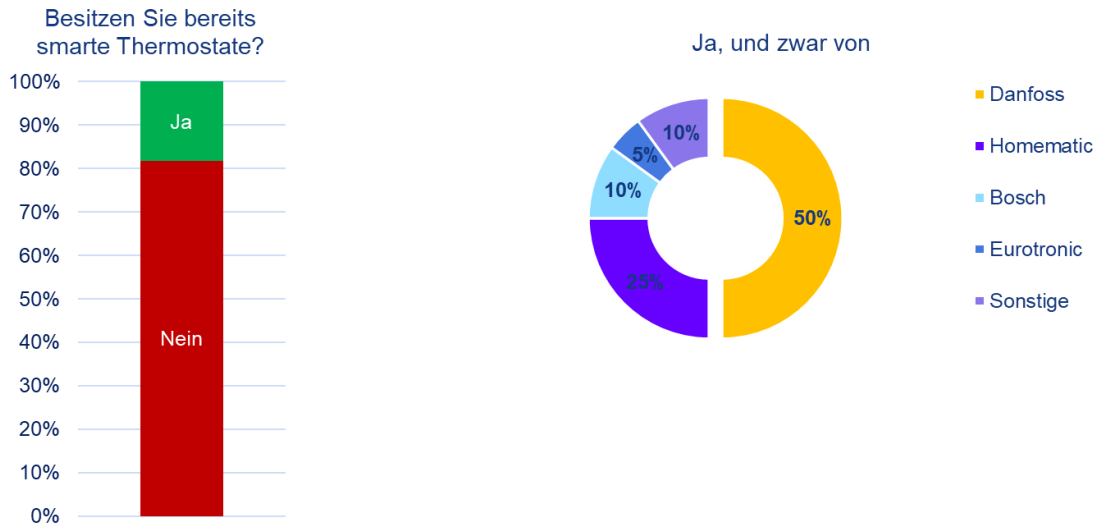


Abbildung 26: Verbreitung smarter Thermostate - Mieterbefragung 2020

Mit 81% besaß die Mehrheit zum Zeitpunkt der Befragung noch keine smarten Thermostate. Diese Gruppe, wurde gefragt, ob sie bereits über die Anschaffung von smarten Thermostaten nachgedacht hätte. Es zeigte sich, dass nur eine Minderheit von 23% bereits über die Anschaffung von smarten Thermostaten nachgedacht hatte (s. Abbildung 27).

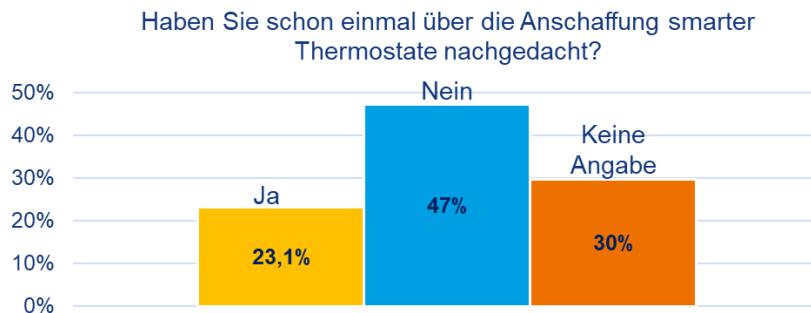


Abbildung 27: Verbreitung smarter Thermostate - Mieterbefragung 2020

Mehr als die Hälfte der Befragten war nicht bereit, selbstständig in smarte Thermostate zu investieren. War eine grundsätzliche Investitionsbereitschaft vorhanden, orientierte sich diese an Geräten im Low-Cost-Bereich, weniger als 2% der Teilnehmer würden mehr als 50€ für ein smartes Thermostat ausgeben (s. Abbildung 28). Im Vergleich: Der Preis für ein marktübliches Thermostat der Fa. Tado liegt bei ca. 70€.

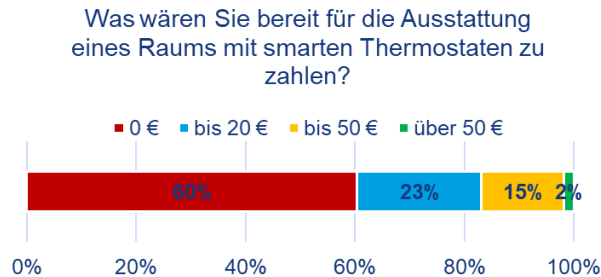


Abbildung 28: Investitionsbereitschaft smarte Thermostate- Mieterbefragung 2020

Das Interesse, smarte Thermostate kostenlos zu testen, war bei den Befragten – insb. jüngeren männlichen Befragten – vorhanden. Mehr als 59% der Befragten bekundeten Interesse, nur etwas weniger als ein Drittel der Befragten gab an, kein Interesse an smarten Thermostaten zu haben (s. Abbildung 29)

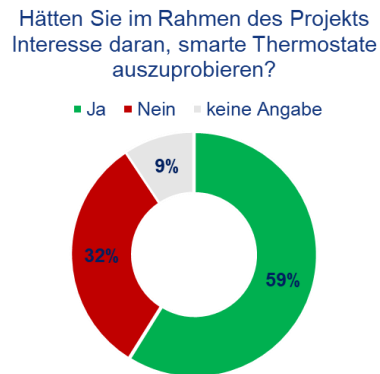


Abbildung 29: Interesse an smarten Thermostaten - Mieterbefragung 2020

Fazit:

Mieter haben ein großes Interesse an energiesparenden Technologien. Diese Technologien sollten intuitiv und einfach bedienbar sein und den Mieter bei Bedarf mit Feedbacks unterstützen, denn Mieter können ihr aktuelles Verhalten bzgl. der Energieeffizienz nur schwer einschätzen. Dabei geben bereits 75% der Befragten an, ihre Raumtemperaturen zu messen, diese waren meist kleiner 22°C. Zwei Drittel der Befragten gaben an, täglich Einstellungsänderungen an den Thermostaten vorzunehmen, um z.B. Absenkbetriebe während der Abwesenheit einzustellen. Laut Umfrageergebnis tat die Mehrheit der Mieter das bereits bei kürzeren Abwesenheitsdauern. Bei den Befragten besteht ein Interesse an smarten Thermostaten, bei ca. 40% der Befragten ist eine Zahlungsbereitschaft vorhanden. Diese orientiert sich an Preisen für Low-Cost-Geräte. Teilweise haben sich die Befragten bereits selbst Geräte angeschafft. Die meisten Befragten lüften, um die Luftqualität zu verbessern und nach einem Zeitplan. Ein Fünftel lüftet jedoch auch, um die Raumtemperatur zu regulieren. Nur etwas mehr als die Hälfte der Befragten gibt an, Stoß zu lüften.

3 Nutzerassistenz

Aus den vorausgegangenen Analysen der Messdaten und Mieterbefragung wurde ersichtlich, dass Mietern durch ihr Verhalten beim Heizen und Lüften den Energieverbrauch ihrer Wohnungen wesentlich beeinflussen können. Auswirkungen von z.B. Dauerlüften oder geringer Interaktion mit den Thermostaten war ihnen nicht bewusst. Mieter benötigen Unterstützung, wenn es darum geht ungünstiges Verhalten zu erkennen und günstiges Verhalten zu fördern. Daher wurde beschlossen im Rahmen des BaltBest Projektes ein Assistenzsystem für die Mieter zu entwickeln. Dieses System sollte die Mieter auf Einsparmöglichkeiten hinweisen und helfen persönliche Sparziele zu erreichen.

3.1 Hintergrund

Im Jahr 2020 begann die Konzeptionierungsphase des Assistenzsystems, welches zunächst als System zur Unterstützung der Mieter und des Facility-Managements gedacht war. Geplant war zunächst eine Pilotphase, bei welcher vor allem die Mieter (welche mit smarten Thermostaten ausgerüstet werden sollten) unterstützt werden sollten. Das Konzept sah vor, zunächst die Mieter mit hohem Verbrauch zu identifizieren, diese gesondert zu betreuen und ein Bewusstsein für energieeffizientes Heizen zu schaffen. Des Weiteren sollte der tatsächliche Gebäude-Heizenergiebedarf ermittelt und Optimierungsvorschläge an Techem, bzw. das Facility Management (anhand des Abgleichs der Nutzerzufriedenheit und der Messdaten) übermittelt werden. In dieser frühen Konzeptionierungsphase wurde ein Webinterface mit zwei visuellen Ebenen jeweils für die Mieter (im Weiteren auch als Nutzer oder Anwender bezeichnet) und das Facility-Management angedacht. Dieses sollte dialogfähig sein, d.h. durch die EBZ BS bereitgestellte Informationen abbilden und Feedback der Anwender an die EBZ BS rückmelden. Im ersten Schritt wurde hierzu das Messdaten-Updateverfahren von wöchentlichen Updates auf tägliche Updates umgestellt. Das ursprüngliche Konzept wird in der Abbildung 30 schematisch dargestellt.

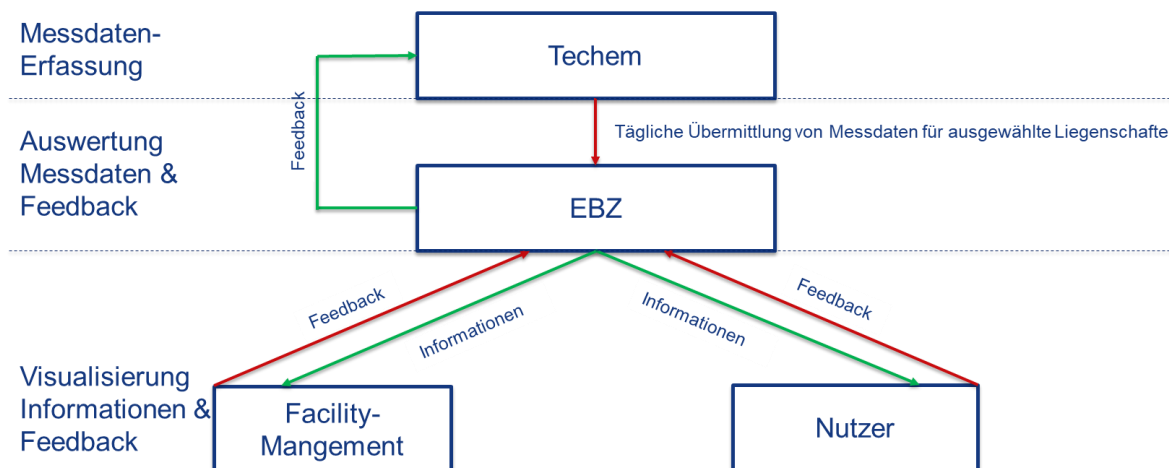


Abbildung 30: Frühes Konzept Feedbacksystem

Nutzern sollte ein Newsfeed, ein persönlicher Verbrauchsverlauf, eine Einordnung Ihres Verbrauchs in eine Nutzergruppe, Verhaltensvorschläge und allgemeine Informationen wie z.B. Tipps zum energieeffizienten Heizen bereitgestellt werden. Nutzer sollten ihre Zufriedenheit mit der Funktion der Heizungen der Wohnung und Oberfläche in Form von Smileys zurückmelden und die Möglichkeit bekommen, einen Fragebogen mit aktuellen Fragen zu beantworten. Das Facility-Management sollte Informationen, wie z.B. eine Bewertung des Betriebs der Heizungsanlage, eine Bewertung der Auslegungsgröße der Anlagen, Anlagenausfällen, Änderungen der Betriebsführung und die durchschnittliche Zufriedenheit der Nutzer erhalten. Idealerweise hätte das Facility-Management Ausfälle, vorgenommene Änderungen der Betriebsführung und bauliche Änderungen zurückgemeldet (s. Abbildung 31).

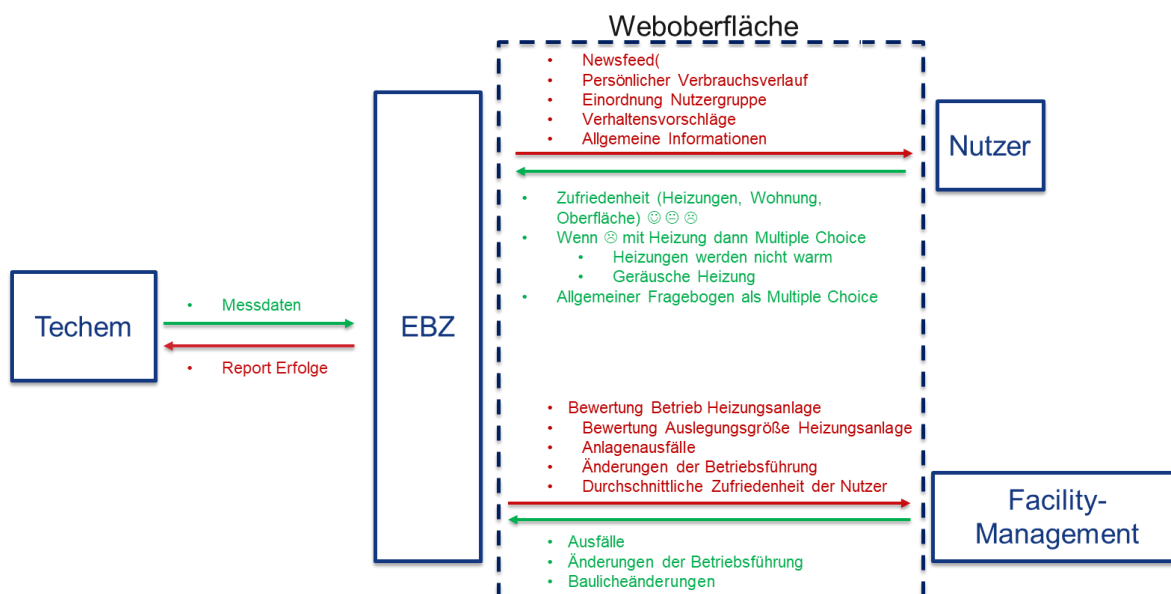


Abbildung 31: Frühes Konzept der Datenströme im Feedbacksystem

Die frühen Konzepte der Webinterfaces sahen wie in der folgenden Abbildung 32 aus. Ein Schwerpunkt der Darstellung war, sämtliche Informationen möglichst einfach visuell darzustellen.

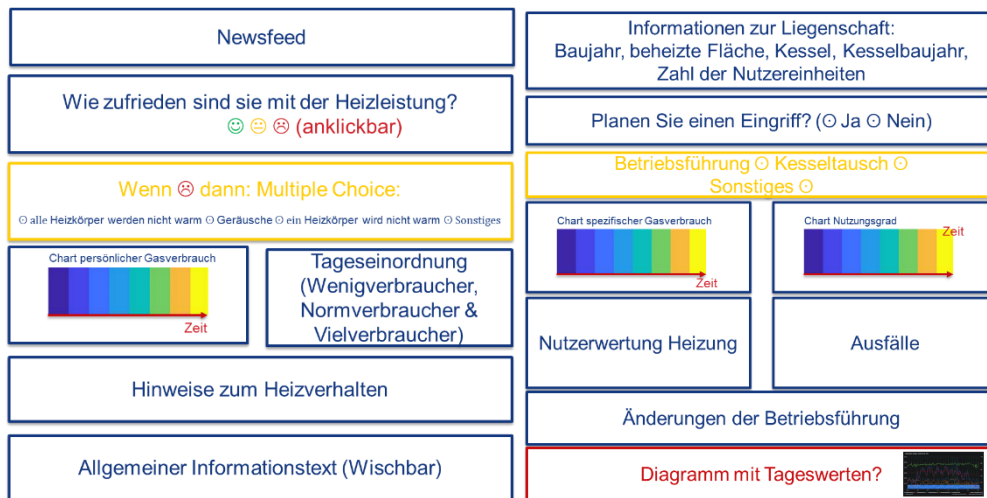


Abbildung 32: Frühes Konzept des Webinterface

Weitere frühe Konzepte unterschieden sich vor allem in der Art der Kommunikation. Die Visualisierung von Verhalten soll einfach zu begreifen sein und eine zeitliche Dimension aufweisen (s. Abbildung 33).

Beispiele:

Klimazonenmodell:

In Abhängigkeit der Raumtemperatur wird dem Raum eine Klimazone zugeordnet.



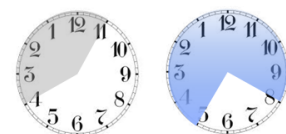
Heizkörperdarstellung:

Darstellen der Betriebszeit der Heizkörper als Füllstand und der Verbrauchseinheiten als Farbe, darstellen welche Heizkörper wie genutzt werden.



Uhrmodell:

Darstellen der erfassten Betriebszeiten mit einer Farbgebung in Abhängigkeit der Verbrauchseinheiten/Innentemperatur/ Parameter je Heizkörper.



Partnerstadt:

Darstellen einer Stadt mit ähnlicher Temperatur, wie der beheizte Raum. Die Vergangenheit könnte als eine Art Weltreise Tagebuch genutzt werden, z.B. Montag Paris, Dienstag Madrid....

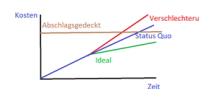
Abbildung 33: Frühe Konzepte Verhaltensvisualisierung

Kommuniziert werden sollten auch Verbrauchswerte z.B. in Form einer virtuellen Heizkostenabrechnung, dem Vergleich mit den Nachbarn, einer Art persönlichem Energiesparausweis, einem Vergleich mit dem Verbrauch eines Autos oder dem Ausstoß von Treibhausgasemissionen (s. Abbildung 34).

Beispiele:

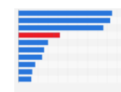
Virtuelle Heizkostenabrechnung:

Erstellen einer Heizkostenprognose auf Basis des Verbraucherverhaltens. Jeweils vom Heizperiodenbeginn bis zum Heizperiodenende. Kosten je kWh/h und Aufteilung aus den Vorjahresabrechnungen entnehmen. Würde bei einem gewählten monatlichen Abschlag eine Nachzahlung fällig?



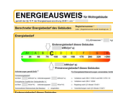
Vergleich mit den Nachbarn:

Anonymes Ranking zwischen den Nutzern, in welchem jeweils der Nutzer nur seine eigene Position sieht. Die absolute Position der letzten Tage kann als Graph dargestellt werden.



Energiesparausweis:

In welche Effizienzklasse würde die Abrechnungseinheit fallen wenn nur der Nutzer diese beheizen würde?



Tachonadelmodell:

Zeigt an wie lange der Nutzer pro Euro Heizen kann.



Emissionsmodell:

Berechnet den CO₂-Wert Ausstoß des Nutzers je Zeitraum (Jahr/Heizperiode/Tag/Stunde).



Abbildung 34: Frühe Konzepte Verbrauchsvisualisierung

Ein Problem bei der direkten Mieterkommunikation war, dass die EBZ BS aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen nicht direkt über die Mieteranschriften verfügte und daher nicht direkt mit den Mietern/ Nutzer interagieren konnte. Zur Lösung des Problems wurde das InWIS eingebunden. Während die EBZ BS Nutzerdaten besaß, diese aber keiner Adresse, sondern nur einem Index zuordnen konnte, konnte das InWIS mit Hilfe der Techem GmbH diesen Index einer Mieteranschrift zuordnen. D.h. die EBZ BS definierte die Nutzergruppe, diese wurde vom InWIS zugeordnet und angeschrieben, der Nutzer registrierte sich mit einem Code, welcher dem, der EBZ BS bekannten Index zugeordnet werden konnte und konnte nun direkt mittels eines Pseudonyms mit der EBZ BS interagieren (s. Abbildung 35).

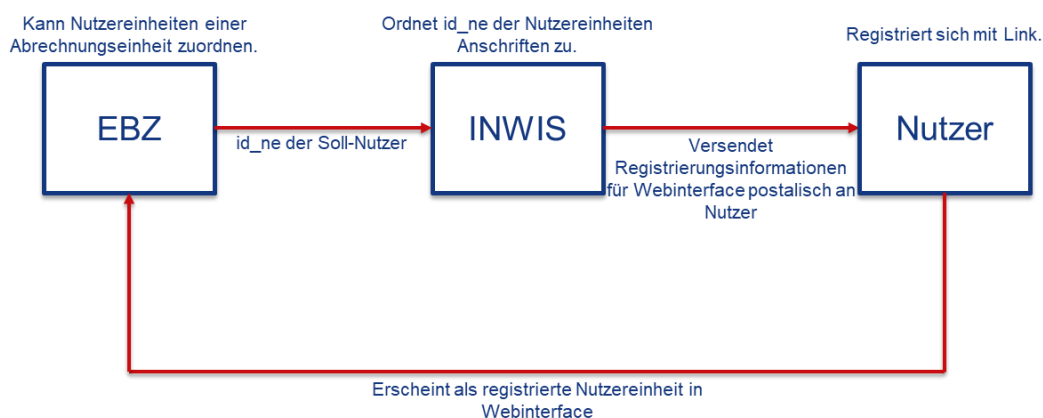


Abbildung 35: Konzept zur Nutzerkommunikation

Nach internen Debatten wurden die bisherigen Ideen verworfen und die Problemstellung neu durchdacht. Es wurde entschieden, einen stärkeren Gamification-Ansatz zu verfolgen. Ein Grund von vielen Gründen dafür war, dass sich das neue Konzept stärker abheben sollte, denn bisherige ähnliche Mieterportale erzielten nur geringe Nutzungsquoten.

Im Laufe der Beobachtung des Mieterverhaltens anhand von Messdaten und Befragungen zeigte sich, dass viele Mieter nicht energieeffizient heizen. Oftmals geschah der falsche Umgang mit Heizungen, smarten Thermostaten oder auch Fenstern durch Unwissenheit. Ziel des zu entwickelnden Feedback-Kanals musste es sein, Mietern zeitnah Informationen zu Ihrem Heizverhalten bereitzustellen und die Konsequenzen des Heizverhaltens darzulegen. Außerdem sollten aus dem Verhalten des Mieters abgeleitete Verhaltensvorschläge zur Reduzierung des Heizenergieverbrauchs dargestellt werden. Der Mieter sollte durch einen ansprechenden Aufbau und transparente Darstellung motiviert werden, sein Heizverhalten zu optimieren. Da sich gezeigt hat, dass häufig wenige Mieter einen großen Teil der in einer Liegenschaft bereitgestellten Endenergie konsumieren, lag der Fokus darauf, besonders diese Gruppe von Mietern zu motivieren ihr Heizverhalten zu hinterfragen. Zur Bereitstellung eines Kanals wurden zunächst Indikatoren für eine Verhaltensbewertung entwickelt, diese wurden in einer PostgreSQL 12 basierten Datenbank eingebracht. Als Kanal zum Mieter wurde zunächst über eine Webseite nachgedacht. Durch die heterogene Zusammensetzung der Mieter waren jedoch sowohl sprachliche Barrieren als auch Verständnisschwierigkeiten im Umgang mit der Weboberfläche zu erwarten.

Zentrale technische Anforderungen war die Nutzung der EBZ-Serverinfrastruktur und die direkte Interaktion mit der EBZ-Datenbank. Um den Zwischenstand zu dokumentieren und die Reaktion von Testgruppen auf die Weboberfläche zu prüfen, sollten Mock-Ups der Oberfläche entworfen werden. Für einen definierten Katalog von Heizverhalten, Konsequenzen des Heizverhaltens sowie Handlungsempfehlungen sollten Visualisierungen entworfen und verwendet werden.

Zur Umsetzung des Vorhabens wurden die Webdesigner Handt&Wolber hinzugezogen. In einem ersten gemeinsamen Workshop wurde der Nutzen der Anwendung für den Mieter (s. Abbildung 36) herausgearbeitet. Neben dem Ziel, effizienteres Heizen zu erreichen, sollte der Nutzer emotional für das energieeffiziente Heizen begeistert werden (s. Abbildung 36).

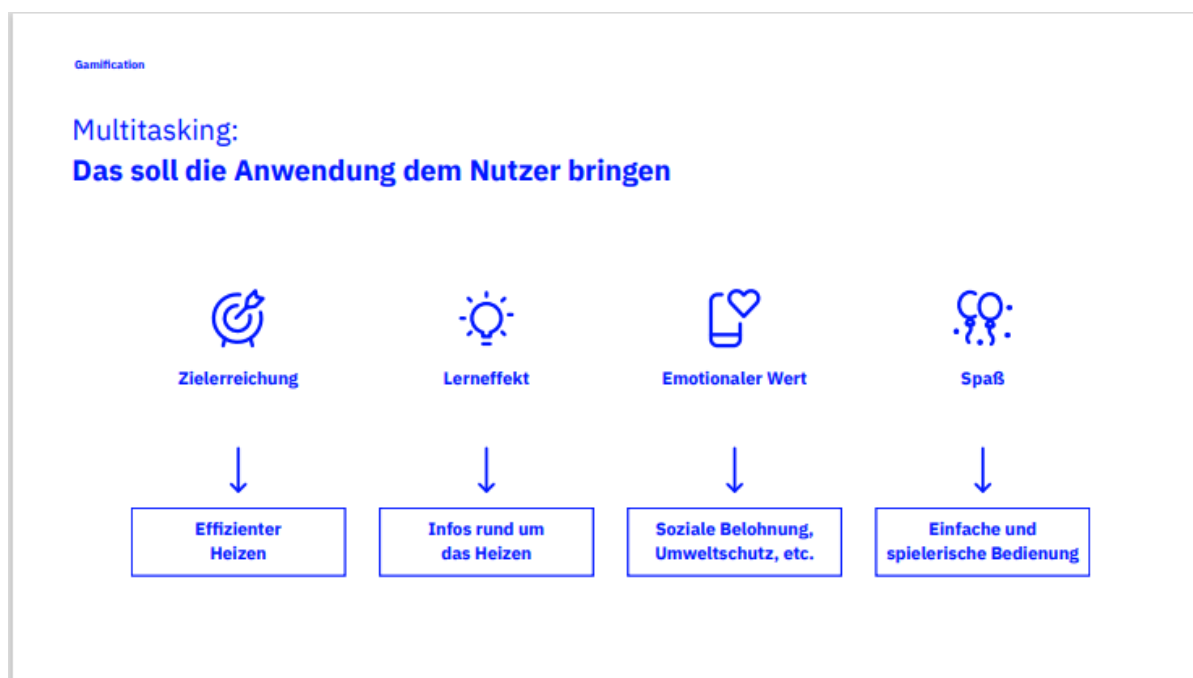


Abbildung 36: Nutzen der Anwendung für den Mieter

Eine weitere Fragestellung war, wie eine möglichst langfristige Motivation zur Nutzung der Assistenz erreicht werden könnte. Statt hierbei auf direkte extrinsische Faktoren, wie z.B. Gutscheine oder andere materielle Vergütungen zu setzen, sollten Nutzer durch intrinsische Faktoren wie z.B. dem Ehrgeiz, eine Aufgabe zu meistern motiviert werden (s. Abbildung 37).

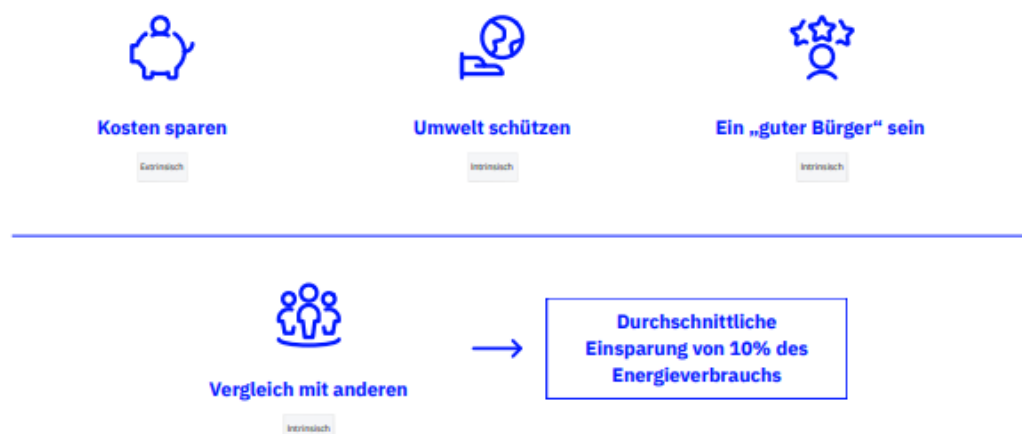


Abbildung 37: Langfristige Motivation

Es wurde das Fazit gezogen, dass ein spielerischer Ansatz gegenüber Alternativen schon existierenden Produkten mit mäßigem Erfolg, ein vielversprechender Weg sein könnte (s. Abbildung 38).

Gamification

Wissenschaftliche Studie: Was motiviert uns zur Verhaltensänderung?



Quelle: Wesley Schultz, California State University (2007)

Abbildung 38: Motive für Verhaltensänderungen

Die frühen von Handt&Wolber präsentierten Konzepte waren der Energiecoach, die magische Heizungswelt und die Heizungsbörse. Das Konzept des Energiecoaches war dabei folgendes: Der eigene Energieverbrauch wird erfasst und in den direkten Vergleich mit dem der Nachbarn oder vergleichbaren Haushalten gestellt. Dadurch entsteht das Bedürfnis, energieeffizienter zu sein als die Nachbarn. Ein "Energiecoach" hilft dabei, den Energieverbrauch zu senken (s. Abbildung 39).



Abbildung 39: Konzept Energiecoach

Im Konzept der magischen Heizungswelt soll der Nutzer die versteckten Energiesparpotenziale im Entdeckermodus erforschen. Die verschiedenen Räume der Nachbarschaft werden als

Landkarte dargestellt. Räume können freigeschaltet werden, indem Aufgaben erfüllt werden. Es können Objekte und Erfahrungswerte gesammelt werden. Ein Ranking und Austausch zwischen den Teilnehmern sind möglich (s. Abbildung 40).



Abbildung 40: Konzept Magische Heizungswelt

Ein weiteres Konzept war die Heizungsbörse. Es handelt sich um eine fiktive, interaktive Börse mit Kursen, welche aus den Heizungsdaten der Nachbarschaft berechnet werden. Täglich kann auf sparsame Haushalte gewettet werden. Neben der Börsenfunktion gibt es Handlungsempfehlungen, Bilanzen & Prognosen zu Kosten und Verbrauch, um als Haushalt attraktiv für die Heizungsbörse zu bleiben (s. Abbildung 41).



Abbildung 41: Konzept Heizungsbörse

Die vorgestellten Konzepte wurden diskutiert und bewertet. Das Konzept des Energiecoaches hob sich nicht ausreichend von den existierenden Konzepten ab, daher wurde diesem Ansatz nur eine geringe Erfolgswahrscheinlichkeit zugesprochen. Gegen das Konzept der magischen Heizungswelt sprach der demografische Hintergrund der Mieter. Das Konzept der virtuellen Heizungsbörse sorgte für angeregte Diskussionen, aber letztlich konnte man sich auch mit diesem Konzept nicht vorstellen, einen großen Anteil von Mietern zur Teilnahme zu motivieren. Stattdessen wurde das Tamagotchi-Spielprinzip in den Vordergrund gerückt (s. Abbildung 42).

Handt & Wolber

Die Grundidee

Das Tamagotchi-Prinzip



Abbildung 42: Konzept Tamagotchi

3.2 Konzept der Hoba-App

Basierend auf der Tamagotchi-Idee entstand die Hoba-App. Das Ziel, energieeffizient zu heizen sollte durch das Wachstum und Wohlbefinden eines virtuellen Wesens, dem Hoba, personifiziert werden. Wird keine Energie gespart, soll das Wesen nicht wachsen können und Unwohlsein verkünden. Wird jedoch Energie gespart, soll das Wesen wachsen und seine Eigenschaften ändern. Zu Beginn wird das virtuelle Wesen Hoba durch eine Backstory eingeführt. Es kommt aus einer fernen Welt und strandet vor der Haustür des Nutzers (s. Abbildung 43).



Abbildung 43: Backstory

Durch das Beantworten einer täglichen Quizfrage sollte Wissen bei den Mietern bzgl. energieeffizienten Heiz- & Lüftungsverhalten aufgebaut werden. Dabei wurden Punkte bei richtiger Beantwortung einer Frage vergeben, welche dem Wesen als "Futter" dienten. Wissen für das Quiz konnte in den Tipps zum Sparen abgerufen werden. Dort gab es allgemeine Hinweise, aber auch Tipps bzgl. des optimalen Verhaltens in Küche, Badezimmer, Schlafzimmer, Wohnzimmer und Kinderzimmer. Das Wesen selbst kommunizierte mittels Sprechblasen und animierten Emotionen sein Wohlbefinden. Fühlte sich Hoba wohl und wurde gut ernährt konnte es sich weiterentwickeln. Insgesamt gab es fünf Level, in welchen Hoba sich von einem hilfsbedürftigen, niedlichen, kleinen Wesen zu einem erwachsenen Energiespar-Alien entwickelte. Das aktuelle Level und der Levelfortschritt wurden oben links in der Statusanzeige abgebildet (s. Abbildung 44).

Handt & Wolber

Home Eine Übersicht

Das Zuhause als zentraler Ort

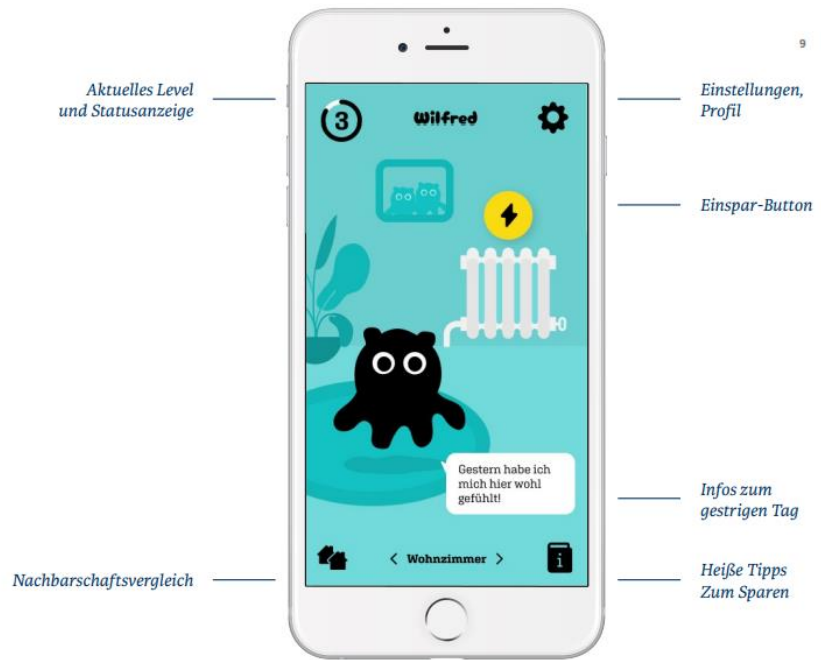


Abbildung 44: Nutzerassistenz - Hauptmenü

Neben dem eigenen Level sollten die Nutzer im Nachbarschaftsvergleich einen Einblick erhalten, wie sich die Wesen der Nachbarschaft entwickeln. Für jeden Raum wurden auf der Basis der Heizkörper-HKV-Daten (Temperaturen & Verbrauchseinheiten) in den Kategorien Betriebszeit, Auslastung, Nachtabenkung, Heiztemperatur & Bedienung 0-5 Punkte vergeben (s. Abbildung 45). D.h. je Heizkörper konnten insgesamt 25 Punkte erreicht werden. Weil in den einzelnen Räumen unterschiedlich viele Heizkörper standen, passierte es, dass je Raum mehr oder weniger Punkte zu erreichen waren. Damit ergab sich auf Liegenschaftsebene das Problem, dass Nutzereinheiten mit vielen Räumen potenziell mehr Punkte sammeln konnten als Nutzereinheiten mit weniger Räumen. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Punkte um die Anzahl der Heizkörper gewichtet.

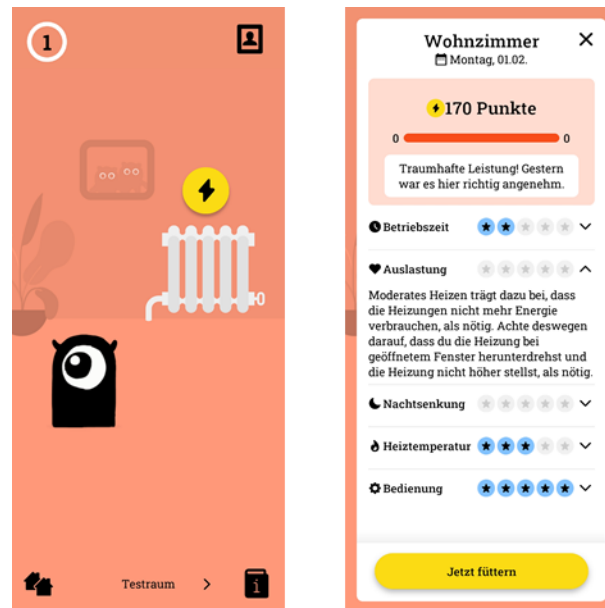


Abbildung 45: Nutzerassistenz - Verhaltensbewertung

Sämtliche Berechnungen für die Anwendung liefen auf einer PostgreSQL-Datenbank der EBZ Business School. Die Interaktion zwischen der Datenbank folgte unter Wahrung hoher Datenschutzansprüche mittels der PostgRest Schnittstelle.

3.3 Verfahren zur Gewinnung von Teilnehmern für die Hoba-App

Zur Nutzung der Anwendung wurden 518 Mieter in 5 Gruppen eingeladen. Die Einladung erfolgte mittels eines eigenen Rundschreibens für jede Gruppe und wurde durch einen Einladungslink und eine persönliche Anrede auf den jeweiligen Mieter zugeschnitten. Der Einladungslink stellte dabei die Verknüpfung zwischen der Wohnung des Mieters und der in der Wohnung installierten Technik (Heizkostenverteiler) her.

Die Rundschreiben wurden in Zusammenarbeit von Handt&Wolber sowie der EBZ Business School entworfen und durch das InWIS an die Mieter verschickt. Der Einladungslink konnte als QR-Code eingescannt werden und leitete den Mieter direkt zur Anwendung im jeweiligen App-Store (IOS und Android), in welchen die Hoba-App auf das Smartphone runtergeladen werden konnte. Zwei Beispiele für diese Rundschreiben werden in Abbildung 46 dargestellt. Mit verschiedenen Briefen sollte geprüft werden, was optisch und informativ am besten von den Mietern angenommen wird. Mit den Briefen wurde auf verschiedene Motivationen wie z.B. den Umweltgedanken, monetäre Aspekte, Neugierde etc. eingegangen.

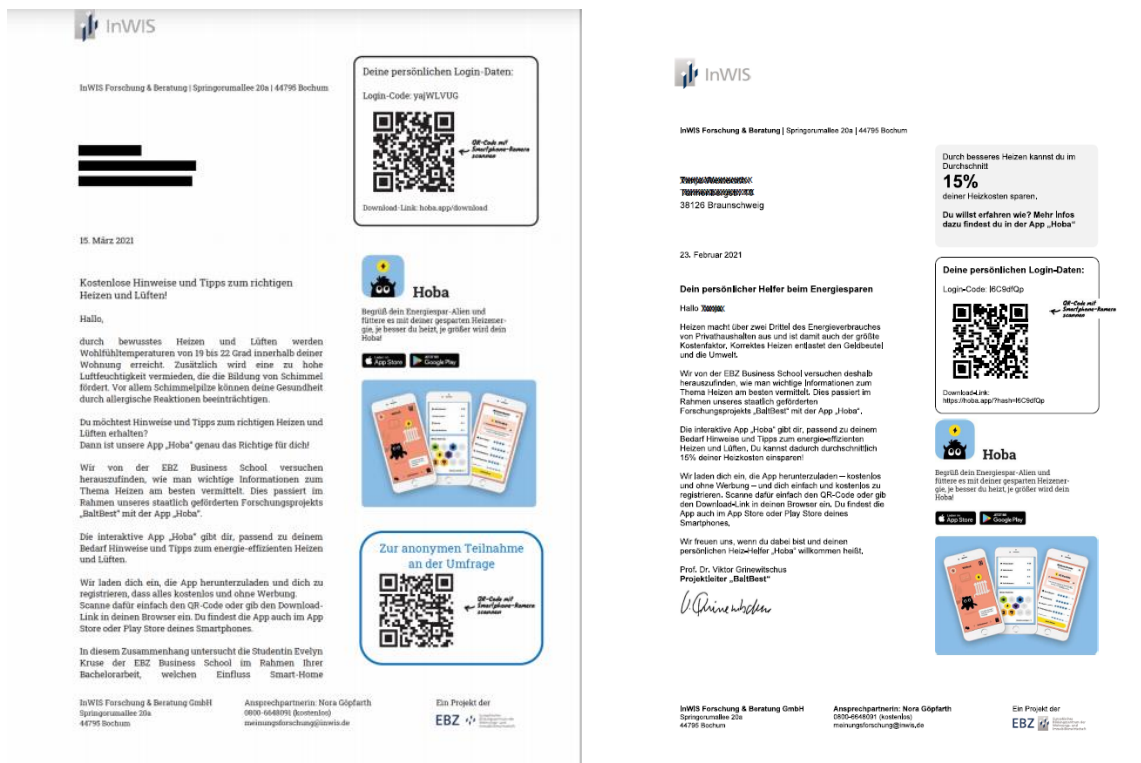


Abbildung 46: Rundschreiben

Neben den Rundschreiben wurden in den Liegenschaften der Wohnungsbaugesellschaften informative Werbeplakate angebracht. Ein Werbeplakat ist in der Abbildung 47 dargestellt. In dem Werbeplakat wurde auf die durch die CO₂-Abgabe steigenden Heizkosten aufmerksam gemacht und die Anwendung plakativ dargestellt.

RICHTIG HEIZEN, GELD SPAREN!

Seit 2021 sind die CO₂-Kosten gestiegen. Damit wird auch Heizen teurer, was Sie allerdings erst am Ende des Jahres auf der Heizkostenabrechnung sehen und darüber staunen werden. Heizen macht über zwei Drittel des Energieverbrauchs von Privathaushalten aus und ist damit auch der größte energetische Kostenfaktor.

Wir von der EBC Business School – University of Applied Science möchten Sie im Rahmen eines vom Bundesministerium geförderten Forschungsprojekts beim korrekten Heizen unterstützen. Dafür haben wir Hoba entwickelt.

Hoba ist eine kostenlose App, die

- Sie dabei unterstützt, bis zu 15% Ihrer Heizkosten zu sparen.
- Hinweise und Tipps zum energieeffizienten Heizen und Lüften gibt.
- Spaß macht, denn durch energieeffizientes Handeln erhalten Sie Fortschrittspunkte für Ihren Hoba und können ihn beim Warten zusehen.

Bei Fragen stehen wir gerne unter der kostenfreien Rufnummer 0800-6640991 zur Verfügung. Viel Spaß beim richtigen Heizen und Sparen wünschen wir Ihnen.

Prof. Dr.-Ing. Viktor Kriewitz
Professur für Energieeffizienz
an der EBC Business School

Simon Anlauf, Master of Science
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
an der EBC Business School

Laden Sie die App kostenlos und ohne Ihre persönlichen Daten zu übertragen. Sie erhalten die App über den QR-Code oder gehen den Downloadlink in der App Store oder Play Store. Die kostenlose App ist in der App Store und Play Store. Die kostenlose App ist in der App Store und Play Store.

Heruntergeladen von der App Store oder Play Store.



Abbildung 47: Hoba Plakat

3.4 Nutzung der Hoba-Anwendung

Von 518 angeschriebenen Mietern installierten nur sechs Mieter die Anwendung (s. Abbildung 48). Da diese Ausbeute insgesamt sehr unbefriedigend war, wurde in Zusammenarbeit mit dem InWIS eine Befragung der angeschriebenen Mieter durchgeführt, um die Gründe dafür zu ermitteln.

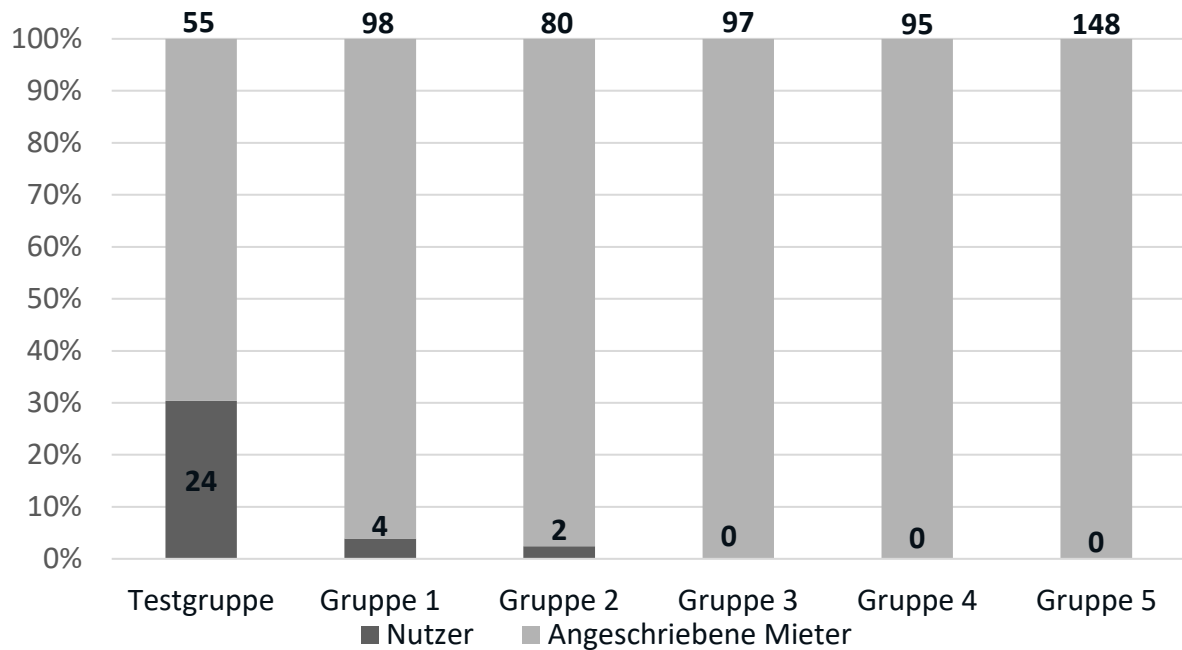


Abbildung 48: Nutzung Hoba-Anwendung

Befragung zur Anwendung

Im Anschluss an das Versenden der Einladungen wurden 43 der 518 angeschriebenen Mieter interviewt. Ziel war die Aufklärung der geringen Installationsrate, denn aufgrund der geringen Installationsrate war eine Auswertung der Wirkung der Hoba-Anwendung nicht möglich. Daher wurde zunächst untersucht, wie das Einladungsschreiben von den Mietern aufgenommen wurde. Etwas mehr als die Hälfte der Befragten (53,5%) gaben an, sie hätten den Brief als Werbung wahrgenommen. Ein weiteres Drittel (30,2%) interessierte sich nicht für den Brief (s. Abbildung 49).

Wie haben Sie den Brief wahrgenommen? (n = 43)

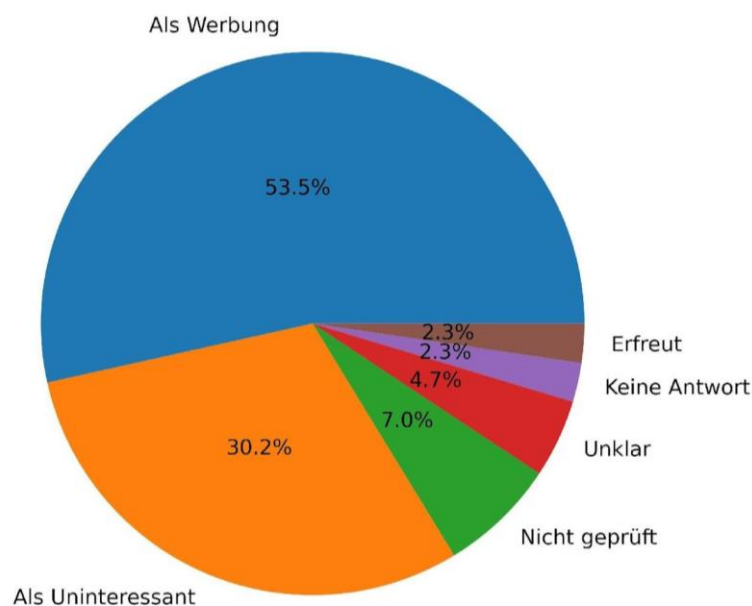


Abbildung 49: Wahrnehmung des Anschreibens

Die Mieter wurden gefragt, ob Sie verstanden hätten, um was es sich bei der Hoba-Anwendung handeln würde. Es zeigte sich, dass eine Mehrheit von 53,5 % nicht verstanden hatten, dass es sich bei Hoba um einen persönlichen Heizassistenten handelt, siehe Abbildung 50.

Haben Sie verstanden, um was es sich bei Hoba handelt? (n = 43)

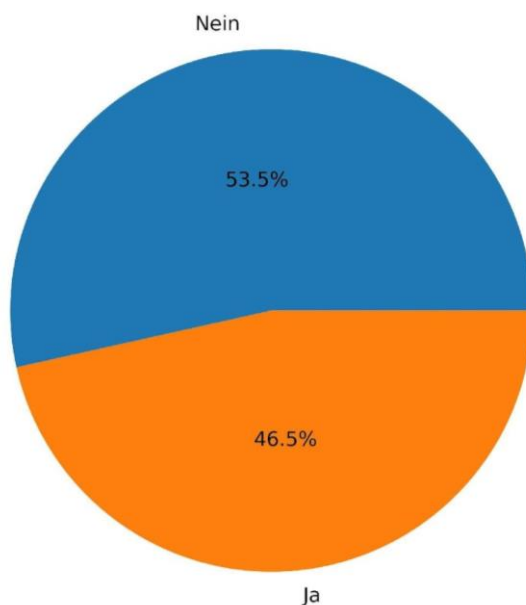


Abbildung 50: Verständnis der Ambitionen

Darüber hinaus sagten drei Viertel der Mieter (74,4%) aus, dass Sie kein Interesse an Informationen zum energieeffizienten Heizen hätten. Begründet wurde das mangelnde Interesse mit vermeintlich geringen Heizkosten im Vergleich zu den anderen Mietern, der

epidemiologischen Situation, bereits vorhanden Anwendungen und dem Hinterfragen des Nutzens. Es wurde anonymisiert geprüft, welche Unterschiede beim Heizenergieverbrauch zwischen den an Energiespartipps Interessierten (25,6 % der Befragten) und den Nichtinteressierten bestand. Die Nichtinteressierten hatten einen um ca. 30 % höheren Heizenergieverbrauch, bezogen auf den normierten, flächenbezogenen Verbrauchswert. Diejenigen, die beim Heizverhalten unterstützt werden können, werden so oftmals nicht erreicht.

4 Smarte Thermostate

Smarte Thermostate, auch elektronische Thermostate genannt, übernehmen die Funktion eines manuellen Heizkörperthermostates. Statt einer Wunschzahl stellt ein Nutzer eine Raumtemperatur ein, welche dann mithilfe des smarten Thermostates erreicht und gehalten wird. Gegenüber dem klassischen Heizkörperthermostat verfügen smarte Thermostate über zusätzliche Funktionen. Je nach Gerät können z.B. Absenkbetriebe oder Anwesenheitsbetriebe eingestellt und erkannt oder gewünschte Raumtemperaturen schon aus der Ferne mittels eines Smartphones eingestellt werden. Am Markt sind unterschiedlichste Geräte mit vielen Ausstattungsvarianten und Funktionen erhältlich. Bei den verfügbaren Geräten sind Heizenergieeinsparungen i.d.R. nur durch die Nutzung von Absenkbetrieben erreichbar.

4.1 Laboruntersuchung von smarten Thermostaten

Neben den Untersuchungen der smarten Thermostate im Feldversuch wurden marktübliche Systeme im Labor auf Ihre Eignung und Güte geprüft und untersucht. Weil die EBZ BS über keine eigenen Prüfstände und damit Möglichkeiten zur Untersuchung der smarten Thermostate unter Laborbedingungen verfügt, wurde die Hochschule Ruhr West nach einem zuvor durchgeführten Vergabeverfahren beauftragt, diese Untersuchungen durchzuführen. Die Hochschule Ruhr West verfügt über einen modernen Prüfstand, an dem die relevanten Daten zur Beurteilung der Arbeitsweise eines Thermostats (u.a. Volumenstrom, Temperaturen, Druckverluste, elektrische Kenngrößen) hochauflösend erfasst und verschiedene Einsatzszenarien simuliert werden können. Bei den Laboruntersuchungen wurden die Schwerpunkte Benutzerfreundlichkeit, Stromversorgung und Laufzeit, Schallemissionen, Sprungantwortverhalten, Messgenauigkeit der Temperatursensoren und das hydraulische Verhalten der smarten Thermostate untersucht. Nach einer Prüfung der Marktsituation (Stand Sommer 2020) wurden folgende Systeme ausgewählt:

- Bosch Thermostat AA
- Danfoss ECO2 (im Folgenden als Danfoss ECO bezeichnet)
- Homematic IP HmIP-eTRV-2
- Hora Smartdrive MX
- Viessmann ViCare Radiator Valve

Benutzerfreundlichkeit:

Die Benutzerfreundlichkeit ist schwer objektiv zu erfassen, was sie aber nicht weniger relevant macht. Eine einfache Installation kann über die Akzeptanz der Nutzer entscheiden. So wird ein

kompliziertes System seltener bedient oder wesentliche Einstellungen, wie das Zeitprogramm, werden nicht genutzt. In der Laboruntersuchung wurden alle aufgezählten Thermostate montiert – installiert – geprüft und demontiert. Auffälligkeiten wurden vermerkt. Wenn es keinerlei Auffälligkeiten gibt, ist das als positiv zu bewerten. Die Bewertungen der Apps für IOS und Android sollen hierbei als zusätzliches Maß für die Benutzerfreundlichkeit dienen.

- Bosch Thermostat AA
 - Einfache Montage und Inbetriebnahme
 - Für das Einrichten der Smarthome Zentrale ist ein mobiles Endgerät erforderlich
 - Bewertung der Smartphone App: IOS: 4,5 / 5 Sterne, Android: 4,3/5
- Danfoss ECO2
 - Inbetriebnahme nicht ohne mobiles Endgerät möglich
 - Verbindung mit App per Bluetooth sehr langsam, bricht gelegentlich ab, instabile Verbindung auch nach Kopplung
 - Das Thermostat verlor manchmal die Adaptierung
 - Bewertung der Smartphone App: IOS: 4,2 / 5 Sterne, Android: 3,4/5
- Homematic IP HmIP-eTRV-2
 - Einfache Montage und Inbetriebnahme
 - Problemlose Verbindung zur Zentrale
 - Mobiles Endgerät zur Einrichtung der Zentrale erforderlich
 - Bewertung der Smartphone App: IOS: 2,8 / 5 Sterne, Android: 3,4/5
- Hora Smartdrive MX
 - Einfache Montage und Inbetriebnahme
 - Das Thermostat verlor manchmal die Adaptierung
 - Verbindung zur Zentrale (EnOcean) nicht möglich aufgrund fehlender Zentrale
 - Bewertung der Smartphone App: Keine Hauseigene App. Es müssen Lösungen von Drittherstellern verwendet werden, welche mit dem EnOcean Standard kompatibel sind.
- Viessmann ViCare Radiator Valve
 - Einfache Montage und Inbetriebnahme
 - Komplizierte Demontage
 - Verbindung zur Zentrale nicht möglich aufgrund fehlender Zentrale
 - Bewertung der Smartphone App: IOS: 4,4 / 5 Sterne, Android: 4,4/5

Die Montage der Thermostate war bei allen Herstellern einfach möglich. Nur das ECO2 benötigte ein mobiles Endgerät zur Inbetriebnahme. Sobald erweiterte Funktionen wie Zeit- und Urlaubsprogramme genutzt werden sollen oder die Verbindung zu einer Smart Home

Zentrale hergestellt werden soll setzen alle Hersteller auf das Smartphone. Etwa 81% aller Deutschen besitzen nach einer Studie aus dem Jahr 2019 ein Smartphone, weshalb diese Voraussetzung bei den meisten Nutzern erfüllt sein wird¹⁹. Eine Ausnahme bildet das System von Hora, welches keine eigene App besitzt und daher alternative Lösungen gefunden werden müssen. Es war bei jedem Thermostat möglich, die Raumtemperatur manuell zu verstellen, weshalb die Bedienung grundsätzlich auch ohne Smartphone möglich ist. Die Verbindung mit dem Smart Home System oder der herstellereigenen App war mit Ausnahme des Danfoss ECO schnell und unkompliziert. Bei dem Danfoss ECO war die Herstellung der Verbindung sehr langsam und es kam zu Abbrüchen. Die Bedienung des Thermostats in der jeweiligen App wurde nicht im Rahmen der Laboruntersuchung bewertet. Einen Anhaltspunkt über den Gesamteindruck der App kann die Bewertung im App Store (IOS) oder Play Store (Android) geben. Dort stechen vor allem die Viessmann ViCare und Bosch Smart Home App hervor.

Sprungantwortverhalten

Um das Sprungantwortverhalten der Thermostate zu ermitteln, wurden alle Thermostate zunächst auf Ihre maximale Solltemperatur gestellt, sodass der Massenstrom maximiert wurde. Folgend wurde die Solltemperatur schlagartig auf den kleinsten einstellbaren Wert geändert und mit einer Stoppuhr gemessen, nach welcher Zeit kein Durchfluss vom Wärmemengenzähler²⁰ gemessen wird. Alle Thermostate reagierten auf die Sollwertänderung, indem das Ventil in einem Vorgang komplett geschlossen wurde. Die Dauer der Reaktion bis zum vollständigen Schließen des Ventils ist in Abbildung 51 dargestellt.

¹⁹ <https://www.marktforschung.de/>, Acht von zehn Menschen in Deutschland nutzen ein Smartphone, 2019.

²⁰ Diehl Ultramess H Typ 775, Messungenauigkeit im betrachteten Bereich 2-4%

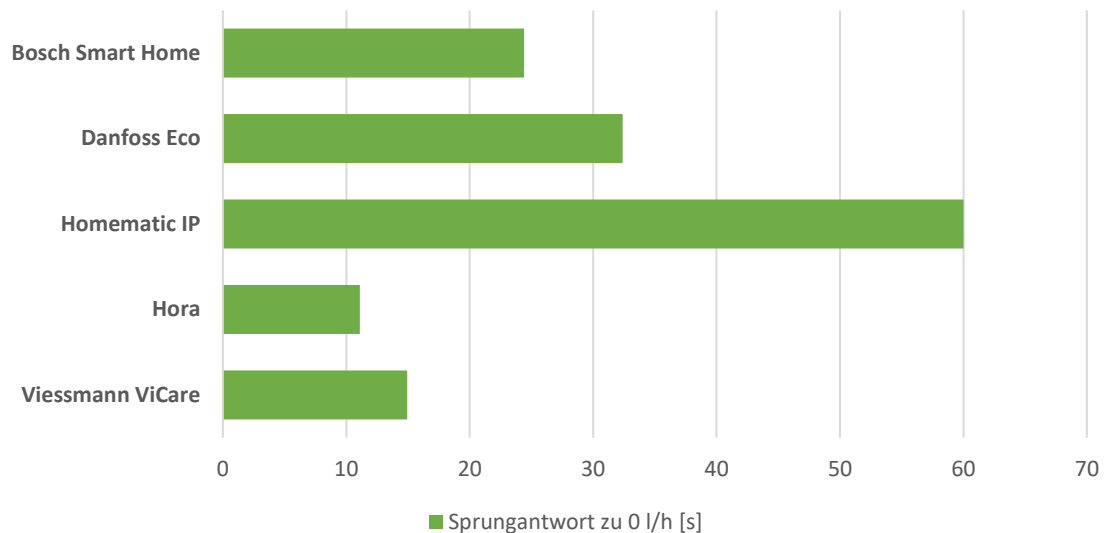


Abbildung 51: Sprungantwortverhalten smarter Thermostate von maximaler auf minimale Ventilstellung

Das Thermostat von Homematic IP benötigt mit 60,0 s am längsten bis zur vollständigen Schließung. Dagegen war das Thermostat von Hora mit 11,1s am schnellsten.

Der Wärmemengenzähler besaß jedoch eine Messverzögerung von etwa 6 s, was in der Betrachtung zu berücksichtigen ist.

Stromversorgung

Alle untersuchten Thermostate wurden von zwei AA-Batterien mit Strom versorgt. So konnte ein Batterie-Adapter, welcher über ein Netzteil versorgt wurde, für die Stromversorgung aller Thermostate eingesetzt werden. Dadurch wurden vergleichbare Bedingungen gewährleistet. Die Messungen der Spannung U und Stromstärke I wurden mit einem Multimeter durchgeführt. Daraus wurde die benötigte Leistung nach $P=U \cdot I$ berechnet. In den Messungen wird zwischen Standby Zeit und aktiver Zeit, in der das Ventil verstellt wird, unterschieden. Eine kleinere Leistungsaufnahme ist in diesem Kontext als positiv zu werten, weil bei identischer Stromversorgung mit längeren Batterielebensdauern zu rechnen ist. Aufgrund teils erheblicher Schwankungen der Standby-Leistung wurden Mittelwerte über den Versuchszeitraum gebildet. Diese sind in Abbildung 52 dargestellt.

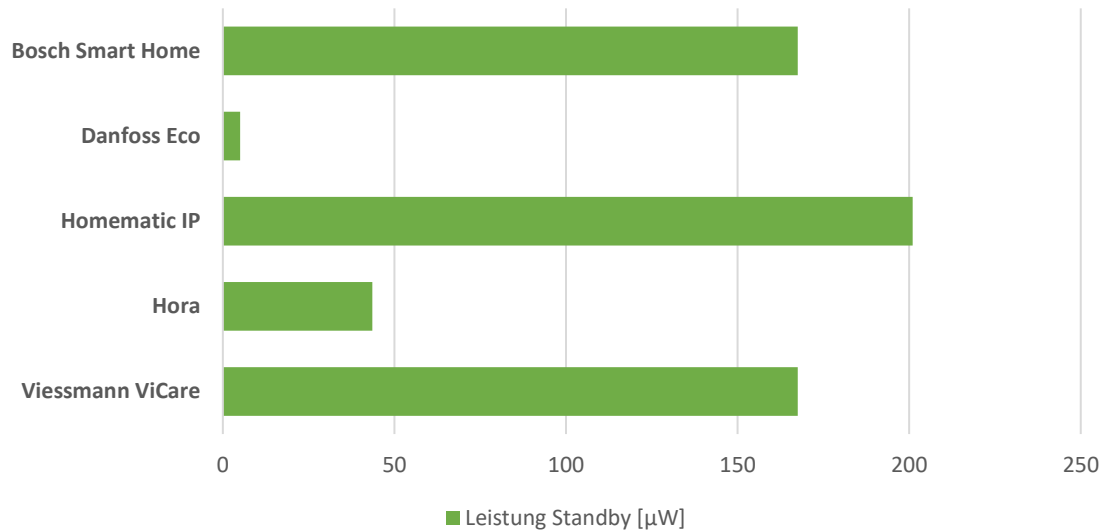


Abbildung 52: Leistungsaufnahme der untersuchten Thermostate im Standby

Die Leistungsaufnahme der Thermostate unterscheiden sich erheblich. Die höchste Leistungsaufnahme hatte das Thermostat von Homematic IP mit 201 µW. Danach kam das Viessmann ViCare und dem Bosch Smart Home System mit jeweils 168 µW. Das Hora System benötigte mit 44 µW etwa ein Viertel der Leistung. Den mit Abstand kleinsten Standby-Verbrauch hatte das Danfoss Eco mit 5 µW. Dieser Wert war allerdings so gering, dass er aufgrund der Messtoleranz des Multimeters in Frage gestellt werden muss. Davon ausgehend, dass die beiden AA-Batterien in Reihe verschaltet wurden, erzeugen sie $2 \times 1,5V = 3V$ Spannung. So ergab sich eine Stromstärke von:

$$I = \frac{5\mu W}{3V} = 1,6 / \mu A \quad \text{Gl.2}$$

Bei einer Auflösung von 0,1 µA und besagten Schwankungen konnte die Messung Ungenauigkeiten aufweisen, was jedoch nichts an der Tatsache ändert, dass die Leistungsaufnahme mit Abstand am geringsten war, selbst wenn eine maximale Messungenauigkeit vorliegen sollte.

Abbildung 53 zeigt die Leistungsaufnahme der untersuchten Thermostate im aktiven Betrieb. Auch hier gab es nennenswerte Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen. Die Modelle von Bosch (174 mW) und Hora (184 mW) benötigen die meiste Energie, gefolgt von Homematic IP und Viessmann mit jeweils 117 mW. Das Danfoss Eco Thermostat hatte erneut mit großem Abstand die geringste Leistungsaufnahme von nur 40 mW.

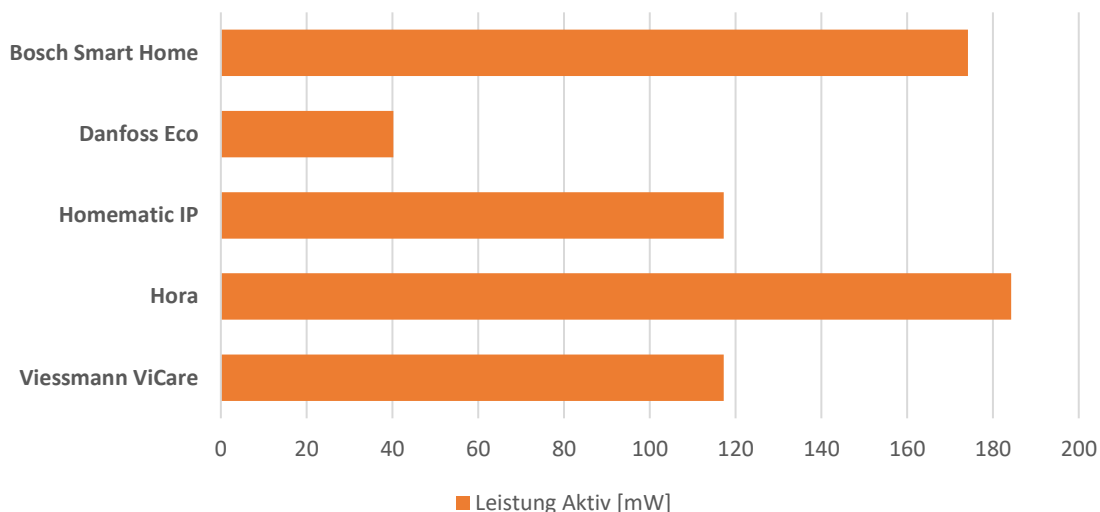


Abbildung 53: Leistungsaufnahme der untersuchten Thermostate im aktiven Betrieb

Aus der Leistungsaufnahme P_{aktiv} und der Sprungantwort-Zeit $t_{\text{Sprungantwort}}$ konnte die benötigte elektrische Energie $E_{\text{Sprungantwort}}$ bestimmt werden, die für einen Schaltvorgang notwendig ist:

$$E_{\text{Sprungantwort}} = P_{\text{aktiv}} * t_{\text{Sprungantwort}} \quad \text{Gl.3}$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 54 zu sehen. Die elektrische Energie bei den verschiedenen Thermostaten hat sich im Vergleich zu der elektrischen Leistung angeglichen. Danfoss, Hora und Viessmann lagen auf einem vergleichbaren Niveau von etwa 1,3 bis 2,0 Ws. Bosch Ia mit 4,3 Ws deutlich höher und Homematic IP mit 7,0 Ws am höchsten.

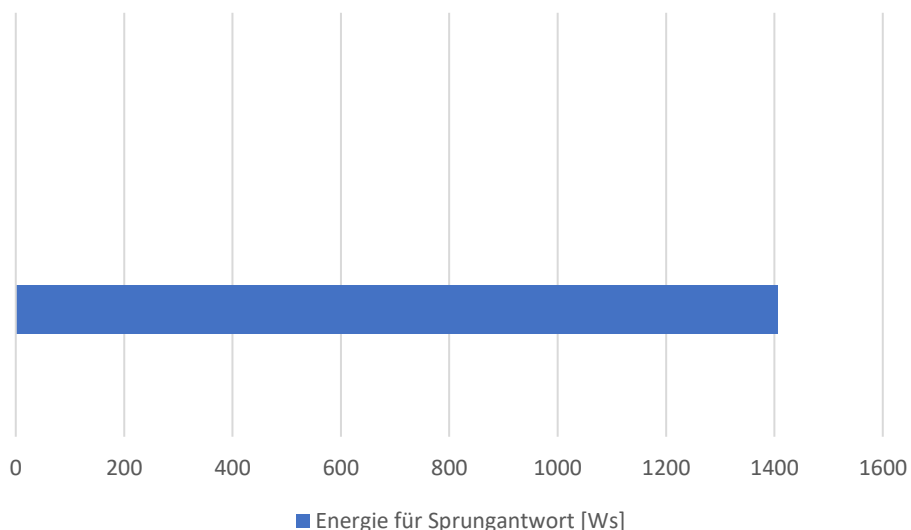


Abbildung 54: Benötigte Energie für Sprungantwort der untersuchten Thermostate

Die Stromversorgung war bei allen Anbietern identisch, daher konnte die Batterie-Lebensdauer der Thermostate über die Leistungsaufnahme abgeschätzt werden. Dafür war

eine Kombination der Leistung in Standby und aktiven Zeiten notwendig. Die aktive Leistungsaufnahme war jedoch, anders als bei herkömmlichen Thermostaten, stark von dem Regelverhalten der Thermostate abhängig. Wenn das Thermostat häufig nachjustieren musste, wird die erwartete Lebensdauer auf Kosten einer höheren Regelgüte sinken. Weil hierüber keine verlässlichen Daten vorliegen, kann nur vermutet werden, dass das Thermostat mit der geringsten Leistungsaufnahme die längste Batterie-Lebensdauer besitzt. In diesem Experiment war es das Danfoss ECO.

Schallemissionen

Die Schallemissionen wurden während des Standby sowie während der Verstellung des Ventils gemessen. Zum Einsatz kam ein Schalldruckpegelmessgerät²¹, welches frontal mit 2 cm Abstand vom Thermostat platziert wurde. Alle Smart-Home Thermostate wiesen während des Standby keine vom Hintergrundgeräusch messbare Schallemission auf. Das Hintergrundgeräuschniveau betrug in allen Tests etwa 41 dB(A). Allerdings waren alle Thermostate während des aktiven Betriebs hörbar und auch messbar, wie in Abbildung 55 zu sehen ist.

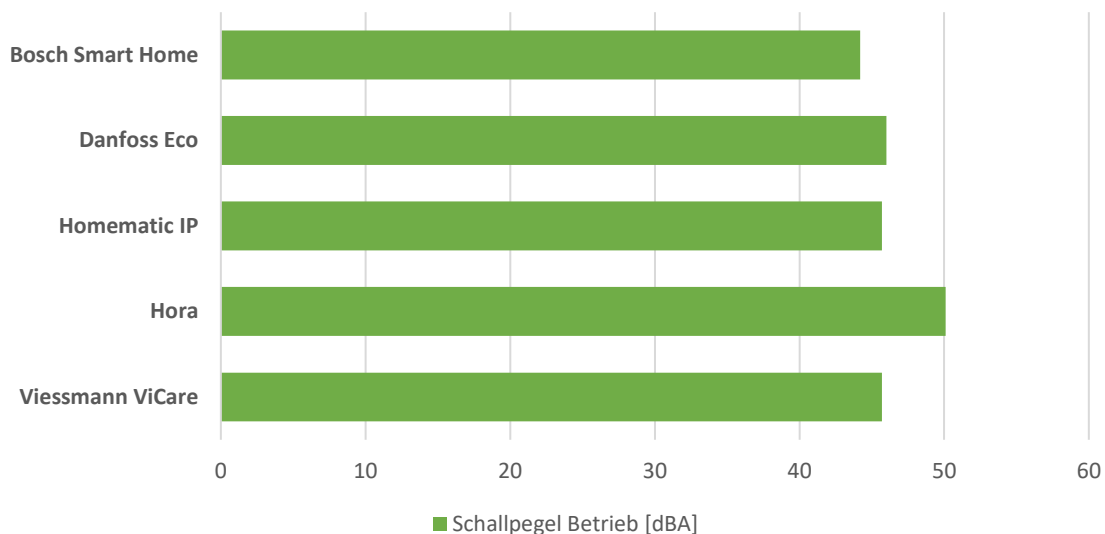


Abbildung 55: Schallemissionen der untersuchten Thermostate

Es war ersichtlich, dass das Thermostat von Bosch mit 44,2 dB(A) am leisesten arbeitet. Mit 50,1 dB(A) arbeitete das Thermostat von Hora am lautesten.

Die übrigen Thermostate sind alle etwas lauter als das Thermostat von Bosch, aber deutlich leiser als das Thermostat von Hora. In Anbetracht der Messgenauigkeit des Schallpegelmessgeräts wiesen diese drei Thermostate in etwa den gleichen Schallpegel auf.

²¹ Testo 815, Messgenauigkeit laut Bedienungsanleitung ± 1 dB

Untersuchung der Raumtemperatur-Sensoren

Die Regelgüte der smarten Thermostate ist stark von der Ermittlung der tatsächlichen Raumtemperatur, welche die Regelgröße darstellt, abhängig. Daher sollte in der Laboruntersuchung die Präzision der Thermoelemente untersucht werden.

In dem Versuch war es nur bei den Thermostaten von Bosch und Danfoss möglich, die Raumtemperatur auszulesen. Bei den übrigen Geräten scheiterte das Auslesen der Temperatur wie schon erwähnt, an der Einrichtung der Zentrale oder dem Vorhandensein einer Zentrale.

Insgesamt waren die Ergebnisse der Differenzmessung der Raumtemperatur zwischen dem 1-Wire Temperatursensor²² und dem ausgelesenen Wert aus den Thermostaten sehr gemischt und kaum reproduzierbar. Deshalb wurde hier nur die mittlere absolute Abweichung des Thermostats von Bosch mit 3,6% und die leicht höhere mittlere absolute Abweichung des Thermostats von Danfoss mit 6,3% erwähnt. In den Messungen entstand der Eindruck, dass sich der Temperatursensor der Thermostate im Gegensatz zum 1-wire Temperatursensor eher träge verhält. Die Messgenauigkeit des 1-wire Temperatursensors kombiniert mit der Trägheit der Thermostate und der Nichtreproduzierbarkeit der Ergebnisse macht diese Messung nur bedingt aussagekräftig.

Untersuchung der Ventilstellung in Abhängigkeit der Raumtemperatur

Um das hydraulische Verhalten der Thermostate zu testen, wurde ein Versuchsaufbau entworfen, welcher es ermöglichte, die Temperatur, um den Thermostatkopf unabhängig von der Durchflussmenge bzw. der Ventilposition zu regeln und zu messen. Dazu wurde mit Hilfe von HT-Rohren ein kleiner Raum um die Thermostate gebaut, in welchem die Temperatur messbar und regelbar war. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 56 skizziert. Das Thermostat war an einem Heizkörper angeschlossen. Seitlich am Thermostat war der 1-wire Temperatursensor mittig befestigt. Über die beiden Geräte wurde ein HT-Rohr Konstrukt geschoben und hinter dem Thermostat möglichst dicht mit Stoff abgeschlossen. Im hinteren Teil des HT-Rohrs war eine Heizfolie platziert, welche den durch das Rohr erzeugten Raum beheizte. Die Heizung war hinter einer Biegung installiert, um direkte Wärmestrahlung auf das Thermostat und den 1-wire Temperatursensor zu verhindern.

²² DS18B20, Messgenauigkeit laut Spezifikation $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

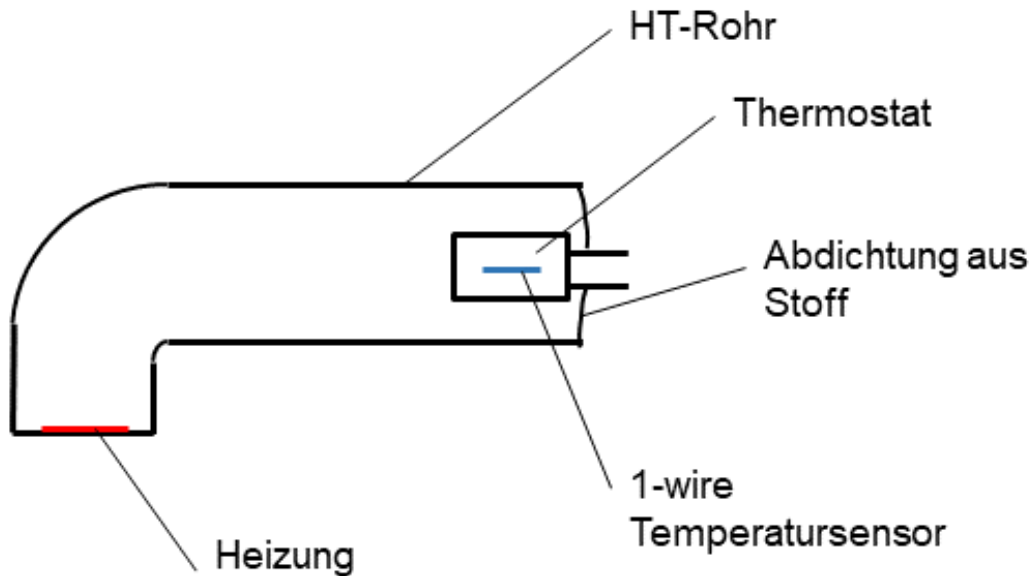


Abbildung 56: Skizze des Versuchsaufbaus zur hydraulischen Messung

Das HT-Rohr besaß zunächst Raumtemperatur. Am Thermostat wurde die kleinstmögliche Solltemperatur eingestellt, bei der die Durchflussmenge maximal war. Danach wurde die in einer SPS umgesetzte Regelung der Temperatur aktiviert. Die Regelung war so eingestellt, dass die Temperatur im HT-Rohr diskret alle 30 Minuten um $0,5^{\circ}\text{C}$ stieg. Die Solltemperatur des Smart-Home-Thermostats blieb den ganzen Versuch über unverändert. Dabei wurde die gemessene Temperatur und der Durchfluss von der SPS aufgezeichnet. Nachdem der Durchfluss auf 0 l/h gefallen war, wurde der Versuch beendet. Aus den aufgenommenen Daten ließ sich der Zusammenhang zwischen Temperaturdelta von Ist-Temperatur zu Soll-Temperatur des Thermostats und dem Durchfluss darstellen. Dieser Zusammenhang gab Aufschluss über das Regelverhalten der Thermostate.

Von den fünf untersuchten Thermostaten zeigten das Danfoss (s. Abbildung 57) und Hora (s. Abbildung 58) Thermostat ein kontinuierliches Regelverhalten, während die Thermostate von Bosch (s. Abbildung 59), Homematic (s. Abbildung 60) und Viessmann (s. Abbildung 61) ein diskretes also stark stufiges Verhalten zeigten. Ein kontinuierliches Regelverhalten erforderte eine ständige Nachjustierung des Ventils, weshalb ein höherer Stromverbrauch vermutet werden kann. Dafür konnte die Raumtemperatur präziser gehalten werden.

Alle Thermostate haben auf die steigende negative Abweichung von Soll- zu Ist-Temperatur mit einer Drosselung des Volumenstroms reagiert, um die abgegebene Wärmeleistung zu reduzieren.

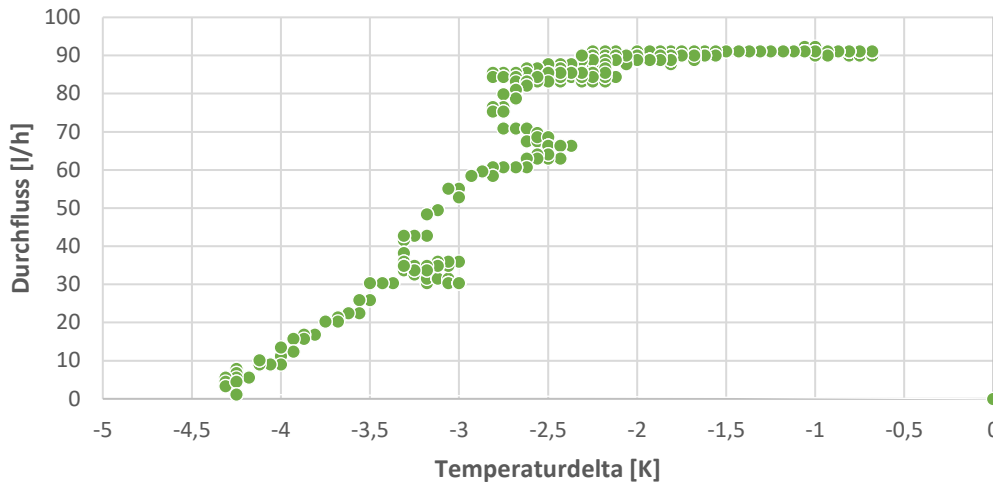


Abbildung 57: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Danfoss ECO

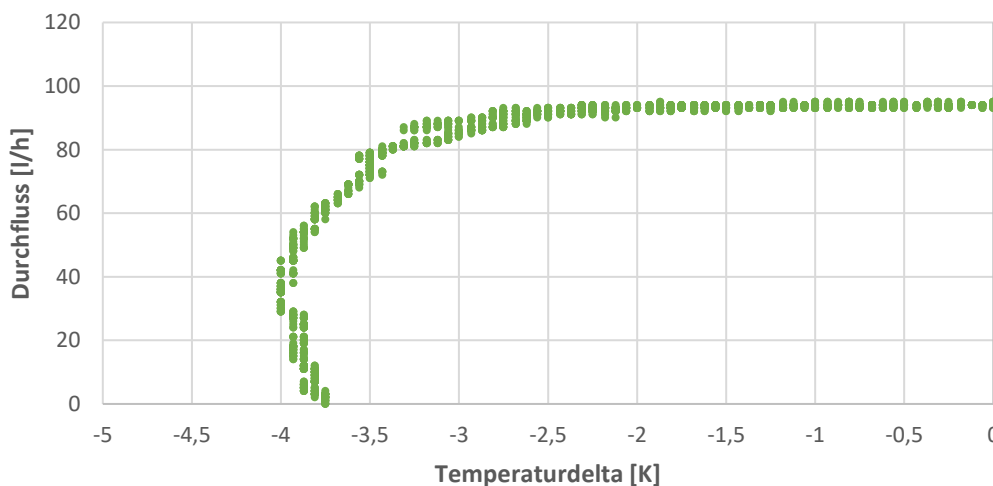


Abbildung 58: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Hora Thermostat

Das Danfoss ECO reagierte ab einer Temperaturdifferenz von etwa -1,5 K, drosselt den Volumenstrom jedoch erst ab einer Differenz von -2 K deutlich. Der Volumenstrom sank mit erheblichen Schwankungen linear, bis eine Temperaturdifferenz von etwa -4 K erreicht war. Die Schwankungen könnten auf ein unsauberes Regelverhalten schließen lassen.

Das Hora Thermostat reagierte erst ab einer Temperaturdifferenz von -2,5 K, wo es langsam den Volumenstrom drosselte. Die Drosselung wurde immer stärker bis zu einem Punkt bei etwa -3,75 bis -4 K Abweichung, wo das Ventil komplett geschlossen wurde.

Der Vorteil einer späten Reaktion lag darin, dass die Batterien weniger oft belastet wurden, jedoch wurden dabei größere Abweichungen der Raumtemperatur in Kauf genommen. Die

zunehmend stärker werdende Reaktion des Hora Thermostats könnte dafür sorgen, dass bei geringen Wärmeverlusten die Raumtemperatur konstant gehalten wird, jedoch auf größere Wärmeverluste, beispielsweise nach dem Lüften, adäquat reagiert wird.

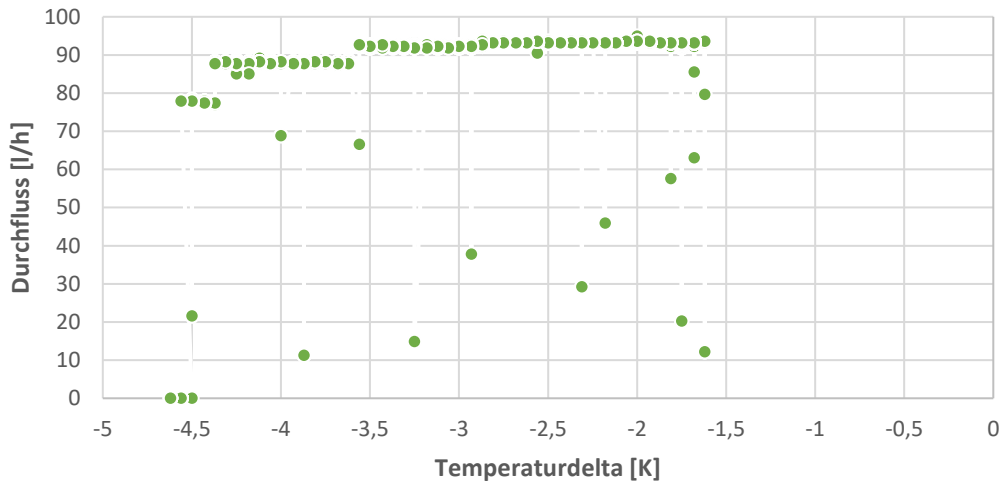


Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Bosch Thermostat

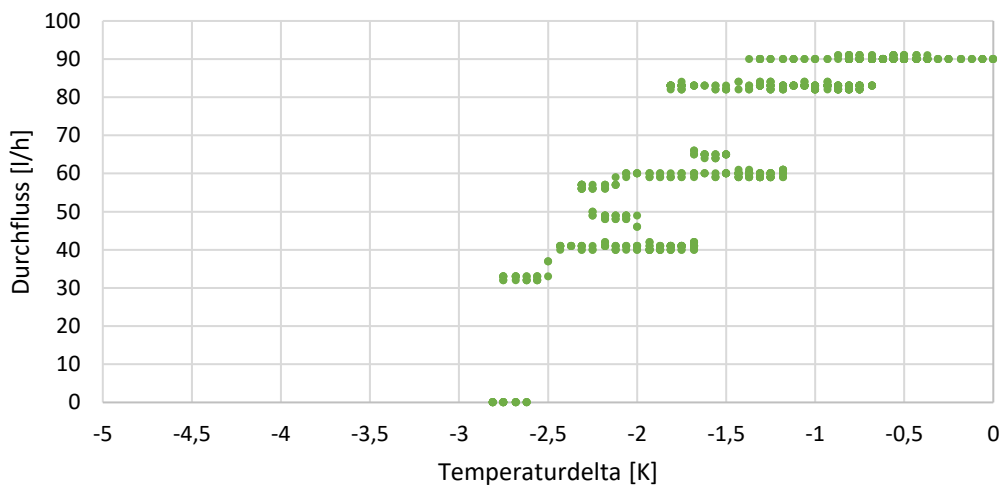


Abbildung 60: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Homematic Thermostat

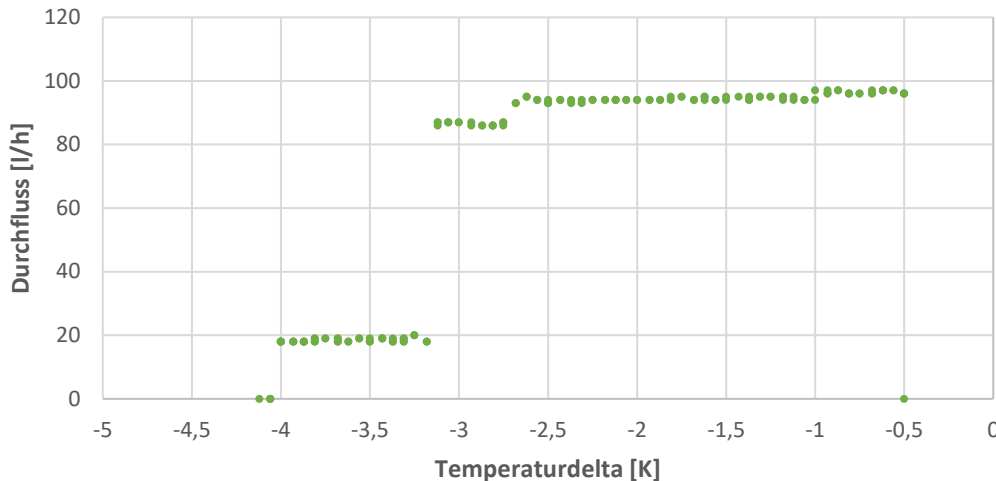


Abbildung 61: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Viessmann Thermostat

Das Thermostat von Bosch reagierte ab einer Temperaturdifferenz von -3,5 K und schloss ab -4,5 K, Homematic reagierte bereits bei etwa -0,5 K und schloss bei -2,75 K. Das von Viessmann reagierte ab etwa -2,6 K und schloss bei -4 K. Die drei Hersteller besaßen eine unterschiedliche Anzahl von Stufen, in denen der Durchfluss geregelt wurde. Werden die Positionen ganz geöffnet, ganz geschlossen und die jeweiligen Stufen dazwischen mitgezählt kommen Bosch und Viessmann auf 4 Stufen und Homematic auf 8.

Bosch differenzierte die Ventilstellung lediglich bei nahezu geöffneter Stellung, zeigte aber ansonsten ein beinahe binäres Verhalten. Das binäre Verhalten wurde weiter durch die späte erste Reaktion verstärkt, woraufhin das Ventil nach nur einem Kelvin Regelbereich vollständig schloss. Das Viessmann Thermostat war dem von Bosch ähnlich, besaß aber noch eine Zwischenstufe kurz vor der vollständigen Schließung des Ventils. Homematic hatte viele Stufen über den gesamten Ventilweg hinweg verteilt, die sich allerdings stark überschneiden. Es könnte sein, dass Homematic dem Ventil eine Mindestzeit in einer bestimmten Ventilstellung vorschreibt, um Strom zu sparen.

4.2 Theoretisches Einsparpotenzial von elektronischen Thermostatventilen

Simulationsergebnisse

Um das Potenzial elektronischer Thermostate zu untersuchen, wurden Simulationen durchgeführt. Dazu wurde ein vereinfachtes thermisches Modell eines 6-Familienhaus erstellt und verschiedene Szenarien simuliert. Die Wohnungen wurden als gleich groß angenommen, die thermischen Eigenschaften der Außenwände wurden berücksichtigt, der Einfachheit halber bestanden die Wohnungen jeweils aus einem großen Raum, die thermischen Transmissionswiderstände zwischen den Wohnungen wurden mit den typischen U-Werten für Bestandsgebäude angenommen. Mit diesem Simulationsmodell wurden verschiedene Szenarien untersucht.

Szenario 1: Ein Mieter besitzt smarte Thermostate, die anderen Wohnungen haben manuelle Thermostate und werden durchgehend geheizt.

Der Mieter mit den smarten Thermostaten programmiert ein Absenkprogramm (22:00-6:00 Uhr, 10:00 Uhr -16:00 Uhr jeweils Absenkung auf 16 °C, ansonsten 20 °C, die Außentemperatur beträgt 0 °C). Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass sich in diesem idealen Falle in der innenliegenden Wohnung im 1. OG Einsparungen von 32 % erzielen lassen. Allerdings profitiert der Mieter von Wärmegewinnen aus den Nachbarwohnungen, deren Verbrauch um ca. 3,5% bis 6,5 % ansteigt. Mehr als 2/3 der eingesparten Wärme kommen aus den Nachbarwohnungen, der Gesamtverbrauch der Liegenschaft sinkt nur um 0,6%. Ohne die Wärmeströme aus den Nachbarwohnungen wären höhere Einsparungen auf Liegenschaftsebene zu erwarten (s. Abbildung 62).

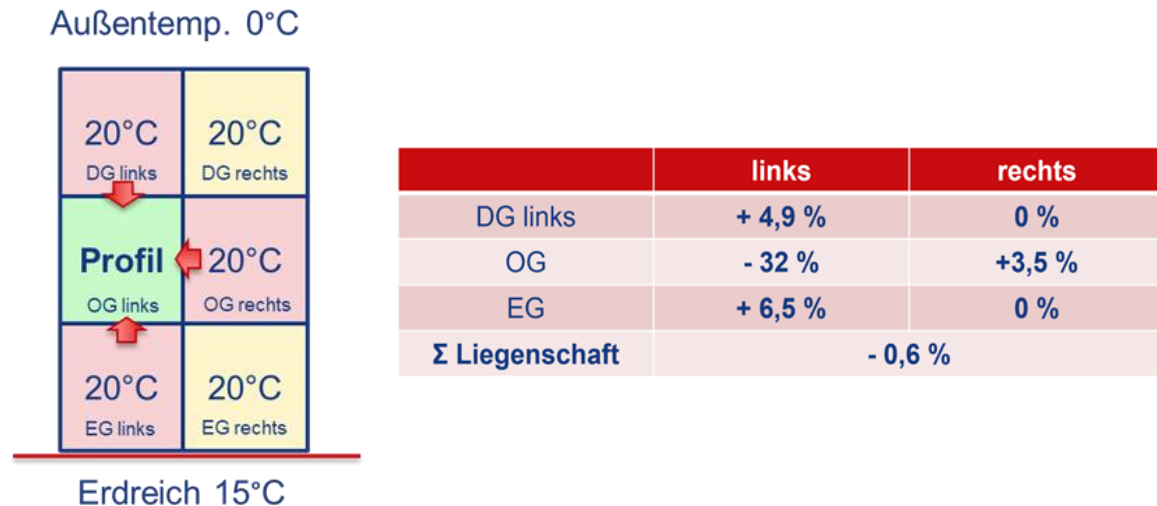


Abbildung 62: Szenario 1 - Lage der Wohnungen sowie deren Einsparungen bzw. Mehrverbräuche

Szenario 2: Alle Mieter verfügen über smarte Thermostate und nutzen die gleichen Profile für den Absenkbetrieb.

Alle Mieter besitzen smarte Thermostate und programmieren ein Absenckprogramm (22:00-6:00 Uhr, 10:00 Uhr -16:00 Uhr jeweils Absenkung auf 16 °C, ansonsten 20 °C, die Außentemperatur beträgt 0 °C). In diesem Falle sind die Wärmeströme zwischen den Wohnungen ausgeglichen, es ergeben sich aber für die Wohnungen unterschiedliche Einsparpotenziale, da unterschiedlich große Umschließungsflächen in Abhängigkeit der Lage der Wohnung im Gebäude vorhanden sind. Je größer diese Umschließungsflächen sind, desto größer ist das Einsparpotenzial durch das Einstellen der Profile. Die höchsten Einsparungen haben die Dachgeschoss-Wohnungen mit 17,8%, die niedrigsten die innenliegenden Wohnungen (5,1%). Die Einsparung der Wohnung im 1. OG links reduzieren sich deutlich, wenn, wie hier angenommen, die Nachbarn ein identisches Profil fahren (s. Abbildung 63).

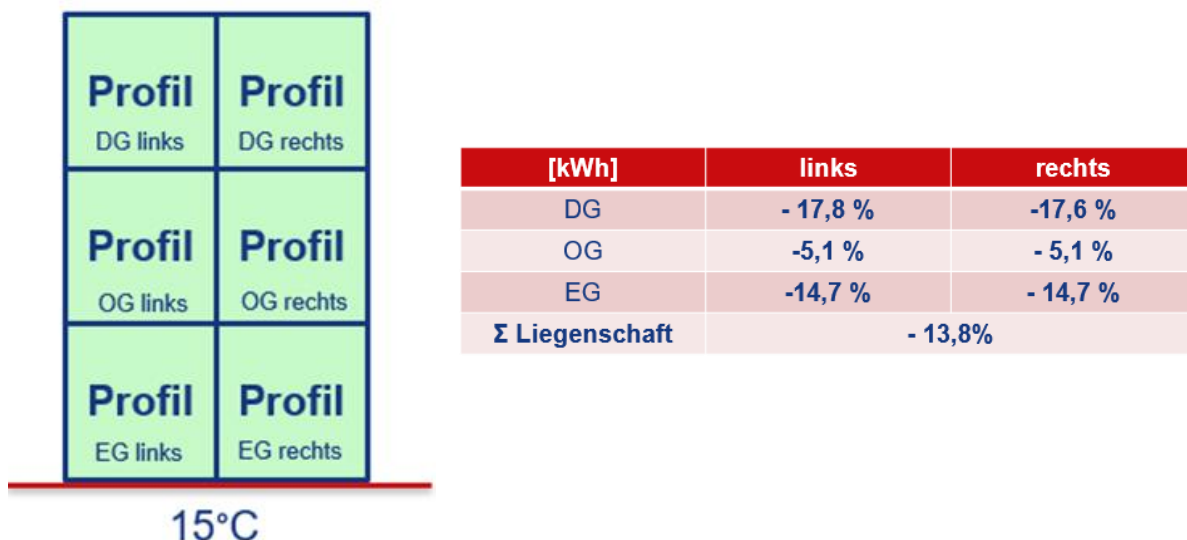


Abbildung 63: Szenario 2 - Lage der Wohnungen sowie deren Einsparungen bzw. Mehrverbräuche

Fazit

Es wurde deutlich, dass die einzelnen Wohnungen in Mehrfamilienhäusern thermisch gekoppelt sind. Die Wärmeübergänge durch die Trennwände und Decken/Fußböden zwischen den Wohnungen waren groß. Werden Temperaturprofile in nur einer Wohnung gefahren, treten in der Wohnung nennenswerte Einsparungen auf. Allerdings erhöhte sich der Verbrauch in den Nachbarwohnungen, sodass nur geringe Einsparungen auf Gebäudeebene zu verzeichnen waren. Wurden Zeitprofile synchron in den Wohnungen eingestellt, so waren die Einsparungen auch auf Gebäudeebene sichtbar, da es nicht zur Kompensation der Einsparungen durch Wärmeströme innerhalb des Gebäudes kommt.

4.3 Welche Einsparung treten in der Praxis auf?

Im Rahmen des Vorgängerprojektes wurden Danfoss ECO Thermostate in 135 Wohnungen an 576 Heizkörpern verbaut, diese wurden von den Mietern seit 2016 genutzt. Die vorgefunden Heizkörpernutzungsarten wurden prozentual in der Abbildung 64 dargestellt. Es wurde zwischen den drei beobachteten Heizperioden 2016/2017, 2017/2018 und 2018/2019 unterschieden. Dabei musste beachtet werden, dass der Status der ECO-Thermostate an den Heizkörpern nicht gesichert ist, d.h. es ist unklar, ob die Thermostate durch die Mieter demontiert wurden. Als Referenz wurden, die nicht durch das Vorgängerprojekt ausgestatteten Heizkörper betrachtet. Der Anteil der dauerhaft inaktiven Heizkörper war bei Nutzern mit ECO1-Thermostaten geringer. Nur 10% bis 14% der Nutzer aktivierten Zeitprogramme an den ECO1-Thermostaten. Der Großteil der Heizkörper wurde flexibel und händisch bedient oder war inaktiv. Auch bei den Referenzheizkörpern konnte ein geringer Anteil von Zeitprogrammen erkannt werden. Dies deckte die durch die Mieterbefragung erkannte Tatsache, dass ein Teil der Mieter sich bereits selbstständig mit smarten Thermostaten ausrüstete.

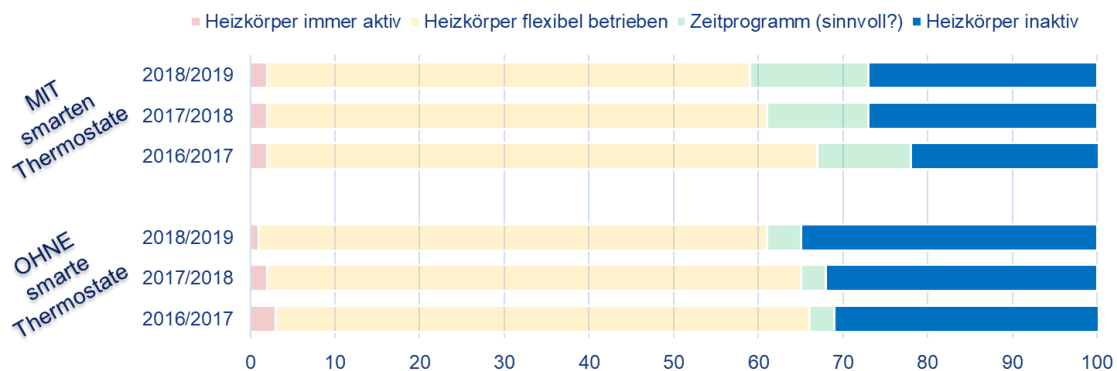


Abbildung 64: Thermostat- & Heizkörpernutzung

Der geringe Anteil von programmierten Thermostaten warf die Frage auf, ob die Nutzer, welche im Vorprojekt mit Danfoss Eco-Thermostaten ausgerüstet wurden, in der Lage waren diese zu programmieren. Durch die allgemeine Befragung der Mieter des Vorgängerprojektes wurde bereits erarbeitet, dass Mieter sich nur selten in der Lage sahen die ECO1-Thermostate zu programmieren.

Ausstattung von fünf Liegenschaften mit Danfoss ECO2-Thermostaten

Zusammen mit dem Partner Danfoss wurden außerdem 5 Abrechnungseinheiten in Köln und Wuppertal mit der neuesten Generation smarter Thermostate, des Typ „Danfoss ECO2“ ausgerüstet. Gegenüber den Thermostaten vom Typ „Danfoss ECO“ wurde die Bedienbarkeit der Thermostate verbessert. Zeitprogramme konnten nun bequem mittels eines

Smartphones programmiert werden. Das Design der Thermostate war analog zu manuellen Thermostaten gewählt und die Batterielaufzeit wurde verbessert. Gegenüber dem Ansatz des Vorgängerprojektes sollte im BaltBest Projekt die vollständige Ausstattung untersucht werden. Die Ausstattung der Liegenschaften (Abrechnungseinheiten 15, 21, 23, 47, 50) fand im September und Oktober 2020 statt. Von insgesamt 60 Wohnungen in den 5 Abrechnungseinheiten wurden 56 zentral beheizt, 54 derzeit bewohnt und 45 mit ECO2-Thermostaten ausgestattet, siehe Abbildung 65.

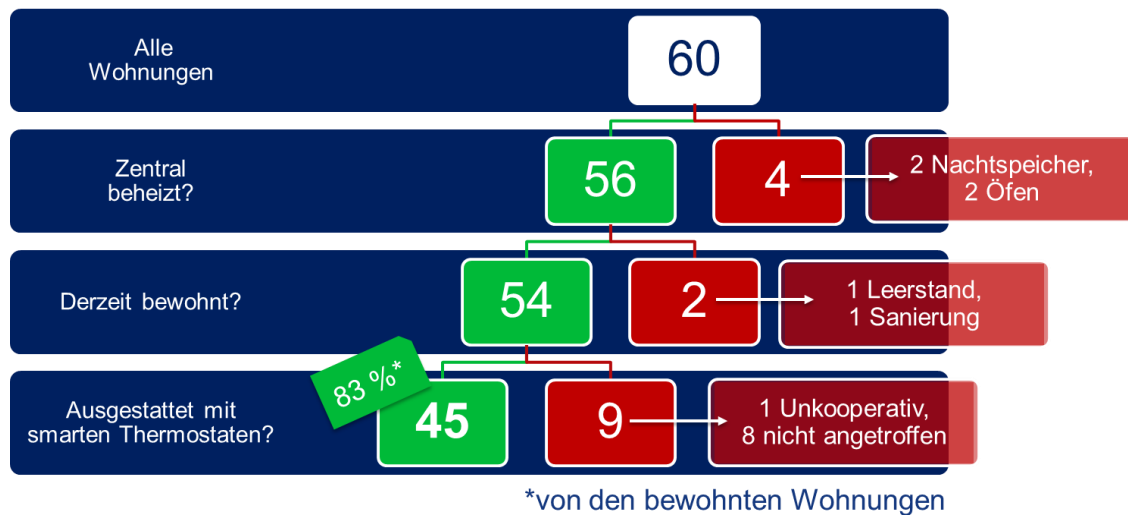


Abbildung 65: Ausstattungsgrad mit smarten Thermostaten

Bei der Ausstattung handelte es sich um eine Maßnahme, welche von 83% der ausgewählten Mieter mitgetragen wurde, nur ein Mieter verweigerte sich aktiv dem Einbau. Weitere acht Mieter konnten trotz mehrfachen Versuchen nicht angetroffen werden.

In einer Liegenschaft (Abrechnungseinheit 50) wurde eine Vollaussattung aller Mieter mit ECO2-Thermostaten erreicht, in den Abrechnungseinheiten 15, 21, 23 & 47 konnten insgesamt 11 Wohnungen nicht betreten werden. Zwei dieser Wohnungen wurden nicht bewohnt und 9 Mieter konnten nicht angetroffen werden oder zeigten sich unkooperativ. Die anteilige Ausstattung der fünf Liegenschaften wurde in Abbildung 66 dargestellt.

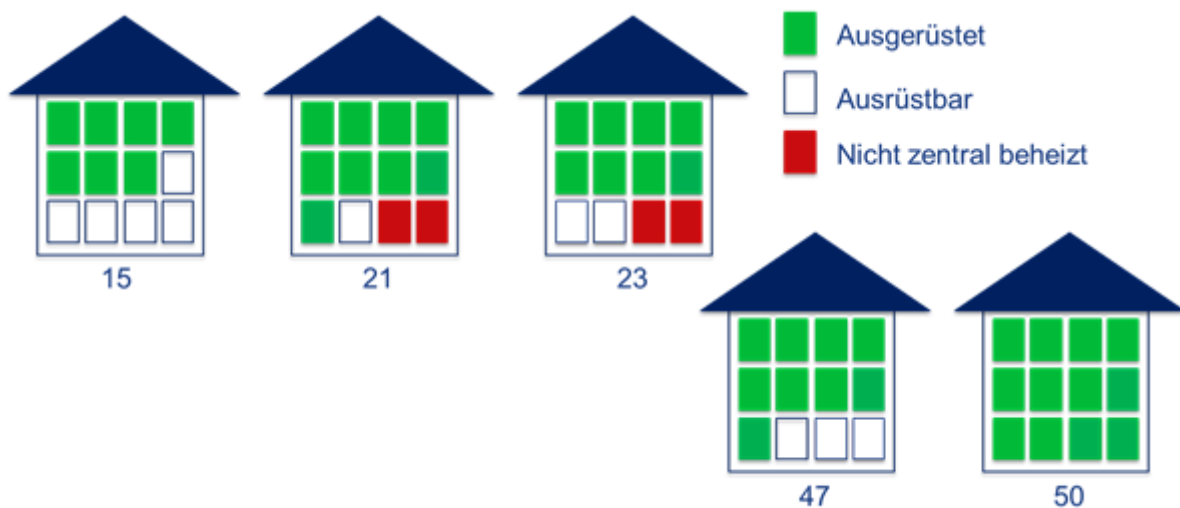


Abbildung 66: Ausstattung der einzelnen Liegenschaften

Der Einfluss (der ECO2-Thermostate) auf den Energieverbrauch wurde über einen Zeitraum von zwei Heizperioden (vor der Installation/nach der Installation) detailliert vermessen. Analog zu den durchgeführten Simulationen wurden die folgenden Szenarien betrachtet:

Szenario 1: Teilausstattung der Wohnungen mit smarten Thermostatventilen

In einem 12-Familienhaus (Liegenschaft 15) wurden vor Beginn der Heizperiode 20/21 7 Wohnungen mit smarten Thermostatventilen ausgestattet, 5 Wohnungen behielten die manuellen Thermostatventile. Verglichen wurde nun der Verbrauch der Heizperiode 19/20 (X-Achse) mit dem Verbrauch in der Heizperiode 20/21 (Y-Achse). Ob und wieviel eine Wohnung in der Heizperiode 20/21 mehr oder weniger verbrauchte, wurde durch die Lage der Punkte, die jeweils eine Wohnung repräsentieren, in dem Koordinatensystem der Abbildung 67 abgebildet. Verbrauchte eine Wohnung wenig, liegt sie nahe am Ursprung. Wohnungen, die in der Periode 20/21 weniger verbrauchten als in 19/20, liegen unterhalb der roten Diagonalen. Wohnungen mit smarten Thermostaten wurden durch blaue Punkte, Wohnungen mit manuellen Thermostaten durch rote Punkte abgebildet. Die Angaben wurden witterungsbereinigt. Während die Verbräuche der Wohnungen mit manuellen Thermostaten weitgehend unverändert (bei einer leichten Steigerung) blieben, waren bei 4 der Wohnungen mit smarten Thermostaten Einsparungen zu verzeichnen, in zwei Wohnung waren die Einsparungen deutlich (in den im grünen Kreis eingezeichneten Wohnungen von 24% bzw. 47%). Allerdings war es in zwei Wohnungen mit smarten Thermostaten zu, wenn auch geringen, Mehrverbräuchen gekommen. In einer Wohnung hatte sich der Verbrauch nicht geändert.

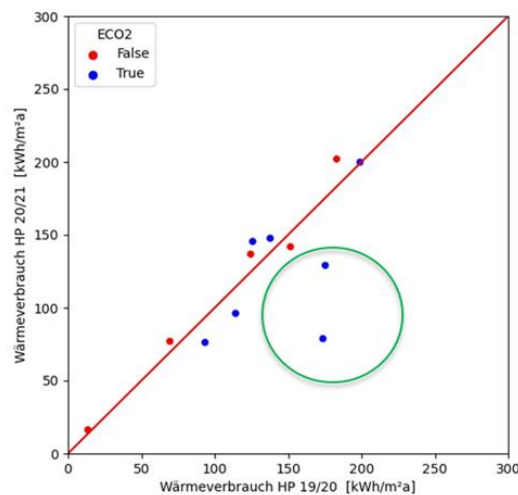


Abbildung 67: Änderungen der Verbräuche in den Wohnungen von der Heizperiode 19/20 zu 20/21

Szenario 2: Vollausrüstung der Wohnungen mit elektronischen Thermostatventilen

In einem 12-Familienhaus (Abrechnungseinheit 50) wurden vor Beginn der Heizperiode 20/21 alle Wohnungen mit smarten Thermostatventilen ausgerüstet. In 6 Wohnungen blieb der Verbrauch weitgehend unverändert, bei einer Wohnung kam es zu Mehrverbräuchen, bei 5 Wohnungen zu deutlichen Einsparungen (grüner Kreis, Abbildung 68), der Spitzenwert lag hier bei ca. 47% (Reduzierung des Verbrauches von 150 kWh/(m²*a) auf 80 kWh/(m²*a)).

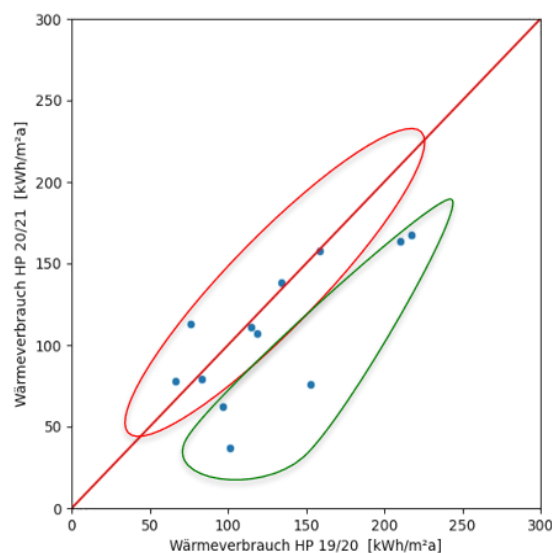


Abbildung 68: Änderungen der Verbräuche in den Wohnungen von der Heizperiode 19/20 zu 20/21

Übersicht über alle Verbrauchsänderungen in mit dem Thermostatventil ECO2 (Danfoss) ausgestatteten Wohnungen

Abbildung 69 zeigt die Verbrauchsänderungen aller Wohnungen in den Gebäuden, die mit dem smarten Thermostatventil ECO2 ausgestattet wurden (Liegenschaften 15, 21, 23, 47, 50). Es ist zu erkennen, dass es in den Wohnungen zu Mehr- und zu Minderverbräuchen kam, aber die Wohnungen mit den Minderverbräuchen - mit 25 zu 16 - in der Mehrheit waren.

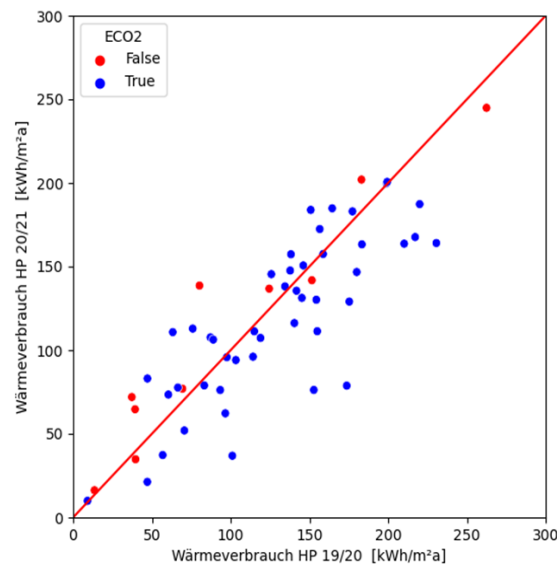


Abbildung 69: Verbrauchsänderungen in Wohnungen, die mit dem smarten Thermostat ECO2 ausgestattet wurden

Bei der Betrachtung der Ergebnisse war zu beachten, dass es in den Mietwohnungen in der Heizperiode 20/21 einen Corona-Effekt gegeben hat. In den Referenzliegenschaften des BaltBest Projekts (11 Liegenschaften mit 122 Wohnungen) haben die Betriebsstunden der Heizkörper zugenommen, ohne dass Änderungen an der Ausstattung vorgenommen wurden. Es wurde angenommen, dass durch Lock-Down die Anwesenheitszeiten in den Wohnungen zugenommen haben und sich dies auch auf den Energieverbrauch ausgewirkt. Im Mittel nahmen die Verbräuche in den BaltBest Referenzliegenschaften um 5% zu. In den Wohnungen, die mit smarten Thermostaten ausgerüstet wurden, haben die Betriebsstunden der Heizkörper dagegen abgenommen. Da die Verbräuche mit den Betriebsstunden der Heizkörper (Abbildung 70) korrelierten, war es in diesen Wohnungen zu Einsparungen gekommen (7% gegenüber den Referenzliegenschaften).

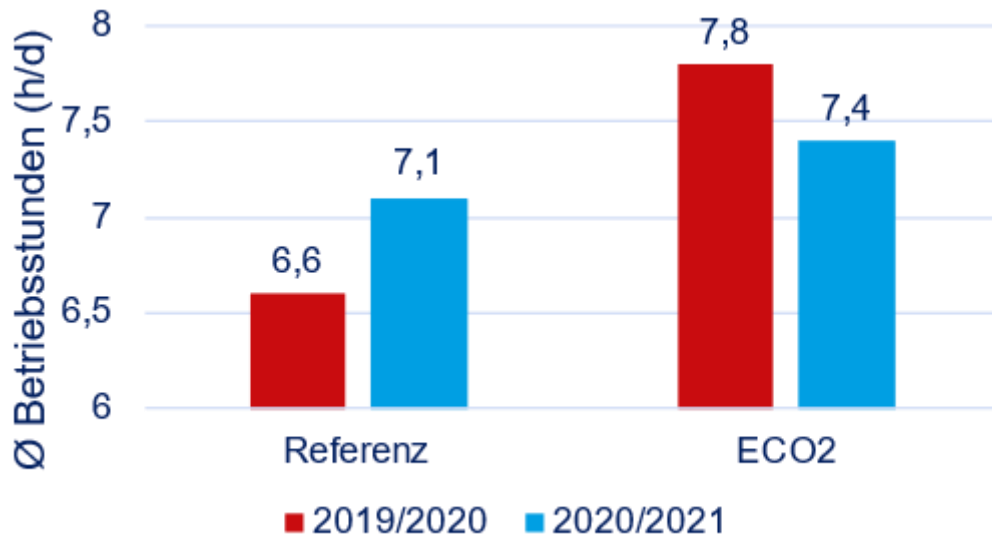


Abbildung 70: Änderungen der Heizkörper-Betriebsstunden in Referenz- und ausgestatteten Wohnungen

Wie lassen sich die Streuungen bei den Einsparungen erklären?

Die Tatsache, dass sich ein smartes Thermostatventil programmieren lässt, sagt nichts darüber aus, ob das Ventil in der Praxis auch wirklich programmiert wird. In der Regel wurde unterstellt, dass durch den Einsatz der smarten Thermostate der Energieverbrauch in den Wohnungen gesenkt werden kann.

Zur Untersuchung der realen Nutzung der smarten Thermostate wurde im BaltBest Projekt auf die Messdaten der modifizierten Heizkostenverteiler zurückgegriffen. Mit einer Abtastrate von 110s wurden durch diese, die luftseitige und innenseitige Heizkörpertemperaturen erfasst. Auf diese Weise war es möglich, die konkrete Nutzung der Thermostatventile zu erfassen und auszuwerten ob bei smarten Thermostaten ein Zeitprogramm aktiv war. Manuell lässt sich dieses gut erkennen, wenn die gemessenen Temperaturen in Form eines Carpet-Plots dargestellt werden. Die folgenden drei Abbildungen (TODO Querverweise) geben Beispiele für verschieden betriebene Heizkörper: Einer mit Zeitprogramm, ein inaktiver und ein manuell betriebener Heizkörper. Es wird jeweils der Zeitraum vom 1.1.2021 bis zum 31.1.2021 dargestellt. Dabei wird die innenseitige Heizkörpertemperatur als Carpet-Plot dargestellt.

In Abbildung 71 ist zu erkennen, dass die Heizkörpertemperatur gegen 6 Uhr morgens ansteigt und gegen 23 Uhr absinkt. Das Programm war an allen Tagen gleich, eine Änderung des Ablaufes an einzelnen Wochentagen oder Wochenenden ist nicht zu sehen. Gegenüber dem manuellen Thermostatventilen zeichnete sich ein programmiertes Thermostatventil durch ein wiederkehrendes Verhalten aus. Dabei war zu beachten, dass die Programmierung durch

manuelle Eingriffe übersteuert werden kann. In diesem Beispiel ist dies am 29.01.2021 zu beobachten. Für den Zeitraum 16 Uhr bis ca 19:30 Uhr wurde der Heizkörper abgeschaltet.

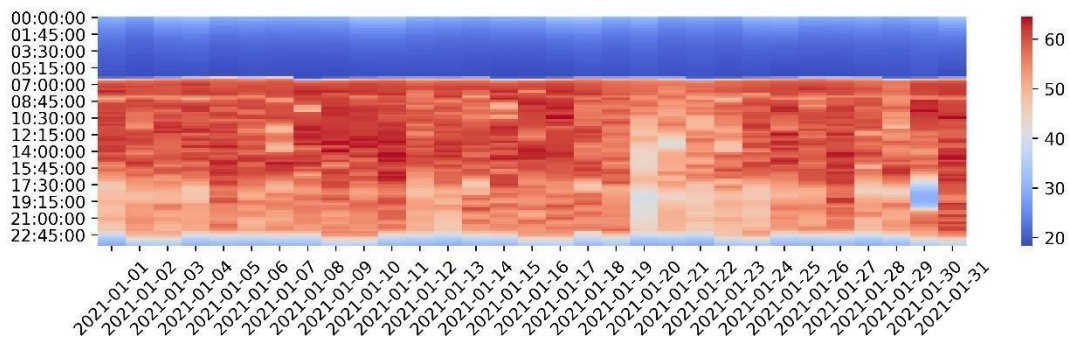


Abbildung 71: Heizkörperzeitprogramm

Abbildung 72 weist den Verlauf eines weitgehend inaktiven Heizkörpers auf, welcher mit einem manuellen Thermostat ausgerüstet war. Der Heizkörper war nur wenige Betriebsstunden aktiv. Während der Betriebszeiten erhitze sich der Heizkörper schnell. Dieses Profil ist typisch für Thermostatventile, die nur sporadisch geöffnet und schnell wieder geschlossen werden. Es ist kein wiederkehrendes Muster zu erkennen.

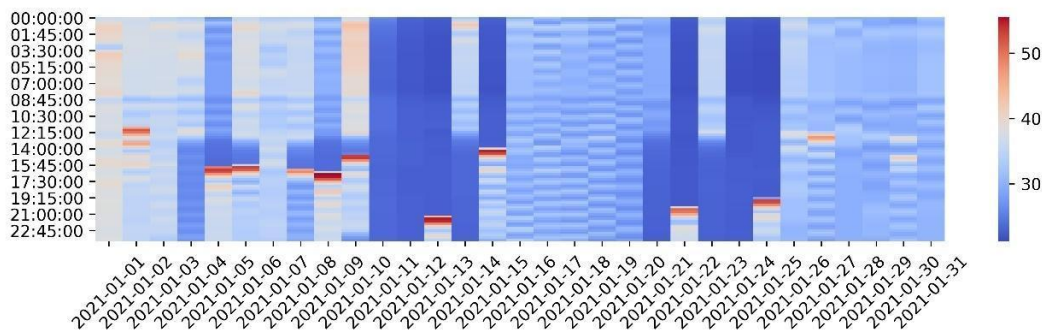


Abbildung 72: Inaktiver Heizkörper

Abbildung 73 zeigt den typischen Verlauf für ein manuell betriebenes Thermostatventil. Die Betriebszeiten des Heizkörpers, als auch die Zeiträume, bei denen der Heizkörper abgeschaltet war, können gut erkannt werden. Vor allem nachts (von 00:00 bis 08:45 Uhr) wurden die Folgen der unregelmäßigen Bedienung sichtbar. An vielen Tagen ist der Heizkörper ausgeschaltet, es wird Energie gespart. Jedoch passiert es häufig, dass der Heizkörper nachts weiter betrieben wurde, obwohl kein

offensichtlicher Nutzen für die Wärme bestand. Wenn das der Fall ist, bleibt der Heizkörper oft auch für mehrere Tage am Stück eingeschaltet.

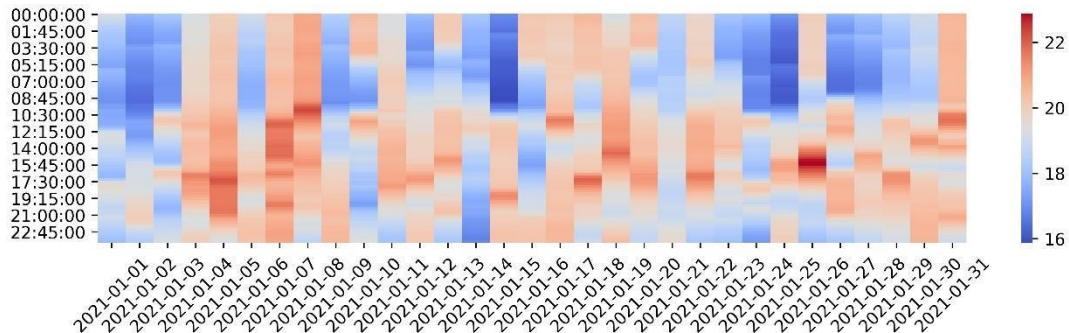


Abbildung 73: Händisch betriebener Heizkörper

Schwankungen der Heizkörpertemperatur trotz geschlossenem Ventil ergeben sich z.B. durch Lüftung oder weitere Wärmequellen. Zur Unterscheidung der Thermostatnutzung wurde ein Algorithmus entwickelt, mit welchem der Verlauf der heizkörperseitigen Temperatur und die Temperaturdifferenz zur Luft auf Regelmäßigkeiten durchsucht werden konnte.

Bei den Auswertungen wurden folgende Betriebszustände der Heizkörper in den Daten identifiziert:

- Heizkörper mit zeitvariantem Verhalten (keine Programmierung),
- dauerhaft aktive Heizkörper,
- dauerhaft inaktiven Heizkörper sowie
- Heizkörpern mit einem erkennbarem Zeitprogramm.

Die folgende Grafik (Abbildung 74) zeigt den Anteil der smarten Thermostate, bei denen über nennenswerte Zeiträume ein Zeitprogramm erkannt werden konnte. Bei der Version ECO1 war dies nur bei 14% der smarten Thermostate der Fall, bei der verbesserten Version ECO2 waren es immerhin 30% der Geräte, die programmiert wurden. In der Regel wiesen die programmierten Geräte die höheren Einsparungen auf. Dies zeigte, wie wichtig es ist, dass die smarten Thermostate auch bestimmungsgemäß benutzt werden.

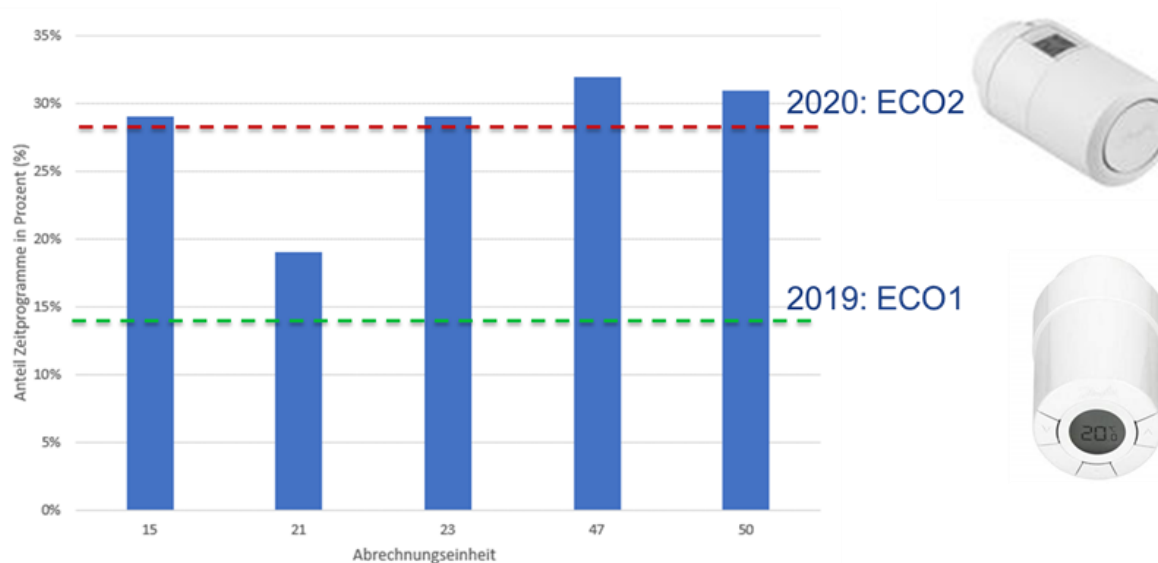


Abbildung 74: Anteil der smarten Thermostate mit Zeitprogrammen bei den Versionen ECO1 und ECO2

Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen im BaltBest Projekt haben gezeigt, dass smarte Thermostate in der Lage sind, Energie zu sparen. Im BaltBest Projekt betrugen die Einsparungen über alle Thermostattypen und Wohnungen gegenüber den Referenzliegenschaften ca. 7 %. Es war dabei zu beachten, dass während der Untersuchungen die Brennstoffpreise stabil und aus heutiger Sicht niedrig waren. Da die Einsparung entscheidend davon abhing, ob und in welchem Umfang Mieter motiviert waren, die Programmierfunktionen der smarten Thermostate zu nutzen, ist anzunehmen, dass, wenn man heute die Messungen wiederholt, die Einsparungen höher ausfallen würden. Im BaltBest Projekt wurde auch deutlich, dass eine Überversorgung der Gebäude durch zu hohe Vorlauftemperaturen der Heizungsanlage Verschwendung von Energie begünstigt. Smarte Thermostate kennen die Soll- und Istwerte in den einzelnen Wohnungen und Räumen. Damit liegen Kenngrößen vor, mit denen sich die Heizung deutlich bedarfsgerechter steuern lässt als das heute über eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung möglich ist. Dazu bedarf es aber eines wohnungsübergreifenden Datenaustausches zwischen den smarten Thermostaten und der Heizungsanlage, was von den heutigen Produkten bisher nicht unterstützt wird.

4.4 Auswirkung des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Mehrfamilienhäusern

Die Auswertungen haben gezeigt, dass es eine klare Korrelation zwischen den Betriebsstunden der Heizkörper in einer Wohnung und den Verbrauchseinheiten, die über Heizkostenverteiler errechnet werden, gibt. Abbildung 75 zeigt die Abhängigkeit des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes von den durchschnittlichen Betriebsstunden aller Heizkörper in einer Wohnung. Hierzu wurden die Daten von 759 Wohnungen im Jahr 2021 ausgewertet. Es war zu erkennen, dass im Mittel ab ca. 4 Betriebsstunden pro Heizkörper die Wohnungen einen überdurchschnittlichen Verbrauch aufwiesen. Dabei wiesen die Verbrauchswerte eine große Streuung auf, die vermutlich mit den bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes zusammenhängen.

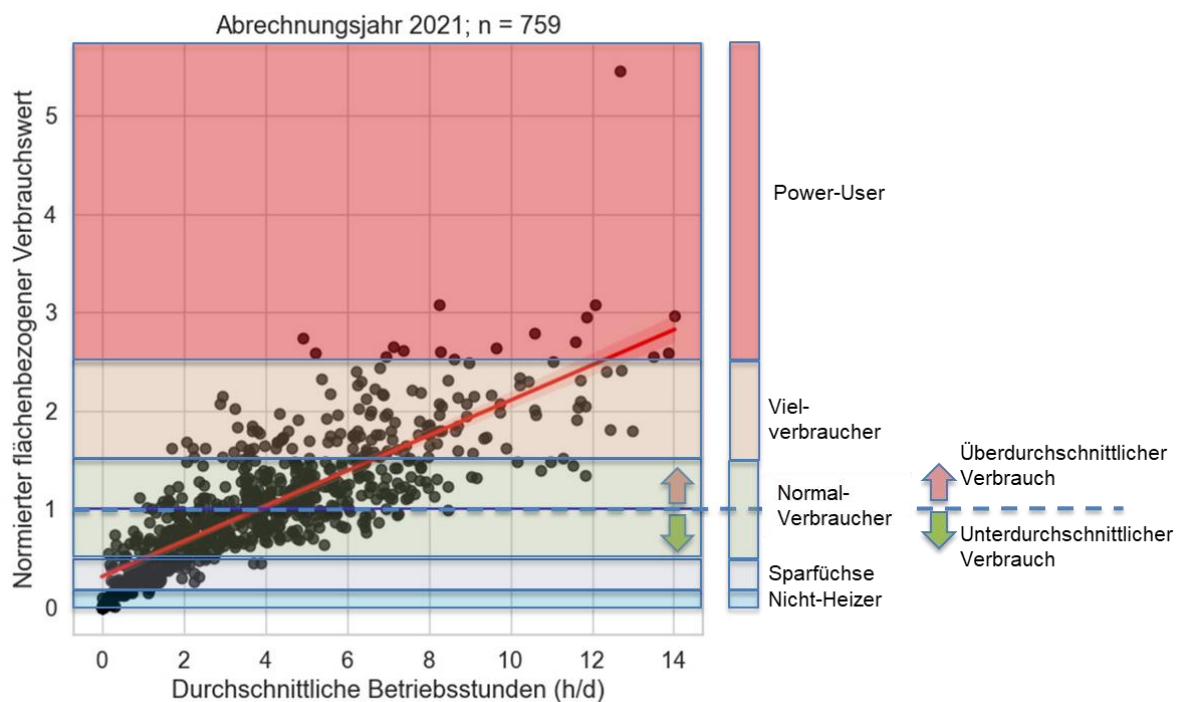


Abbildung 75: Normierter flächenbezogener Verbrauchswert der Wohnungen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Heizkörper-Betriebsstunden innerhalb einer Wohnung

Im Folgenden wurde versucht, die Mieter der 759 Wohnungen anhand ihres Heizverhaltens in 5 verschiedene Kategorien einzuordnen:

- Nicht-Heizer: Heizkörper werden nur in Ausnahmefällen eingeschaltet ($nfV < 0,2$, $n=56$, 7% der Mieter)
- Sparfüchse: Nur wenige Räume der Wohnung werden geheizt, diese auch nur für die Zeiträume, in denen eine Nutzung stattfindet. ($0,2 \leq nfV < 0,5$, $n=100$, 13% der Mieter)

- Normalheizer: Der größte Teil der Heizkörper in der Wohnung ist für längere Zeiträume in Betrieb, moderate Heizleistung, Abschaltzeiträume erkennbar. ($0,5 \leq \text{nfV} < 1,5$, $n=454$, 60 % der Mieter)
- Vielverbraucher: Der größte Teil der Heizkörper in der Wohnung ist für längere Zeiträume in Betrieb, hohe Heizleistung, wenige Abschaltzeiträume erkennbar ($1,5 \leq \text{nfV} < 2,5$, $n=131$, 17 % der Mieter)
- Power-User: Der Energieverbrauch dieser Gruppe ist deutlich überdurchschnittlich, Heizkörper sind die meiste Zeit eingeschaltet, auch die Luftwechselrate in der Wohnung ist aufgrund des Lüftungsverhalten überdurchschnittlich ($2,5 \leq \text{nfV}$, $n=18$, 2% der Mieter)

Was bewirken Smart Home Systeme bei den verschiedenen Heiztypen?

Will man den Energieverbrauch in Wohnungen durch Änderung des Nutzerverhaltens senken, besteht der größte Hebel darin, die durchschnittlichen Betriebsstunden der Heizungen zu reduzieren. Es gibt eine große Streuung des nfV-Wertes bei gleichen Betriebsstunden (s. Abbildung 75). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auch andere Effekte eine Rolle spielen (z.B. reale Leistung der Heizkörper). Trotzdem bleiben die Betriebsstunden einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf den Verbrauch. Zu einer Reduzierung der Betriebsstunden können sowohl Tipps zum energiesparenden Heizverhalten als auch Smart Home Thermostatventile einen wichtigen Beitrag liefern. Nicht alle Maßnahmen werden bei allen Mietern gleichermaßen wirken, da sich deren Heizverhalten erheblich unterscheidet.

Nicht-Heizer

Bei der Kategorie der Nicht-Heizer haben Smart Home Systeme keine positive, sondern eher eine negative Wirkung auf den Energieverbrauch. Hinterlegte Zeitprogramme führen zu einer Beheizung von Räumen zu Zeitpunkten, in denen seitens der Mieter normalerweise keine Heizung erfolgen würde. Der Energieverbrauch beim Nachrüsten von Smart Home Systemen bei dieser Kategorie von Mietern steigt eher an.

Sparfüchse - Geringverbraucher

Die Sparfüchse unter den Mietern heizen üblicherweise heute schon nicht mehr als notwendig. Es ist von einem sehr bewussten Heizverhalten auszugehen, die Zusammenhänge beim energiesparenden Verhalten dürfen für einen Großteil dieser Gruppe als bekannt vorausgesetzt werden. Smart Home Systeme führen bei dieser Kategorie von Mietern nicht unbedingt zu einer Reduzierung der Heizenergie-Verbräuche, sondern helfen dem Mieter, das persönliche Zeitprofil komfortabel zu optimieren.

Normalheizer

Normalheizer zeichnen sich dadurch aus, dass eine gleichmäßige Wärmeverteilung in der Wohnung vorliegt und sich ein Großteil der Heizkörper in der Heizperiode in Betrieb befindet. Smarte Thermostatventile können für diese Nutzergruppe einen signifikanten Beitrag leisten, da sich nun die Temperaturprofile in den einzelnen Räumen besser auf den jeweiligen Bedarf anpassen lassen.

Vielverbraucher

Vielverbraucher haben einen überdurchschnittlich hohen Energieverbrauch. Die Anzahl der Betriebsstunden der Heizkörper ist hoch, die hohen Verbräuche lassen sich nicht nur durch höhere Raumtemperaturen erklären. Das Lüftungsverhalten spielt bei hohen Verbräuchen ebenfalls eine signifikante Rolle. Vielverbraucher können von smarten Thermostatventilen profitieren, wenn diese die Anzahl der Betriebsstunden der Heizkörper durch Zeitprogramme reduzieren und Funktionen zum energieeffizienten Lüften unterstützen (z.B. die Heizkörper abschalten, wenn das Fenster geöffnet wird).

Power-User

Power-User weisen einen extrem überdurchschnittlichen Energieverbrauch auf. Diese Gruppe hat die höchsten Heizkörper-Betriebsstunden. Die resultierenden Mehrverbräuche lassen sich nicht nur über die höheren Temperaturen in der Wohnung erklären, ein wenig sachgerechtes Lüften (z.B. Kipplüften über längere Zeiträume) ist notwendig, um die hohen Verbräuche zu erreichen. Smarte Thermostatventile können einen wesentlichen Beitrag leisten, wenn sie offenstehende Fenster erkennen und die Heizkörper während der Lüftungszeiträume abschalten. Ein Feedback über den eigenen Energieverbrauch, insbesondere auch der Vergleich mit den Nachbarn, die geringere Verbräuche aufweisen, hat hier vermutlich eine hohe Wirkung.

In fünf Liegenschaften wurden 46 von 56 Wohnungen mit Danfoss ECO-2 Thermostaten ausgerüstet. Zunächst wurden die 46 Mietparteien mit smarten Thermostaten gemäß der vorher genannten Klassifizierung eingeteilt, während die zehn verbleibenden Wohnungen im Folgenden als Referenzgruppe dienten:

- 2 Nicht-Heizer (4% der Wohnungen)
- 5 Geringverbraucher (9 % der Wohnungen)
- 41 Normalverbraucher (73% der Wohnungen)
- 8 Vielverbraucher (14% der Wohnungen)

Der Kategorie der Power-User konnte kein Mieter zugeordnet werden.

Die Verbräuche der Mieter der verschiedenen Kategorien haben sich durch den Einbau der smarten Thermostatventile wie folgt geändert (s. Abbildung 76).

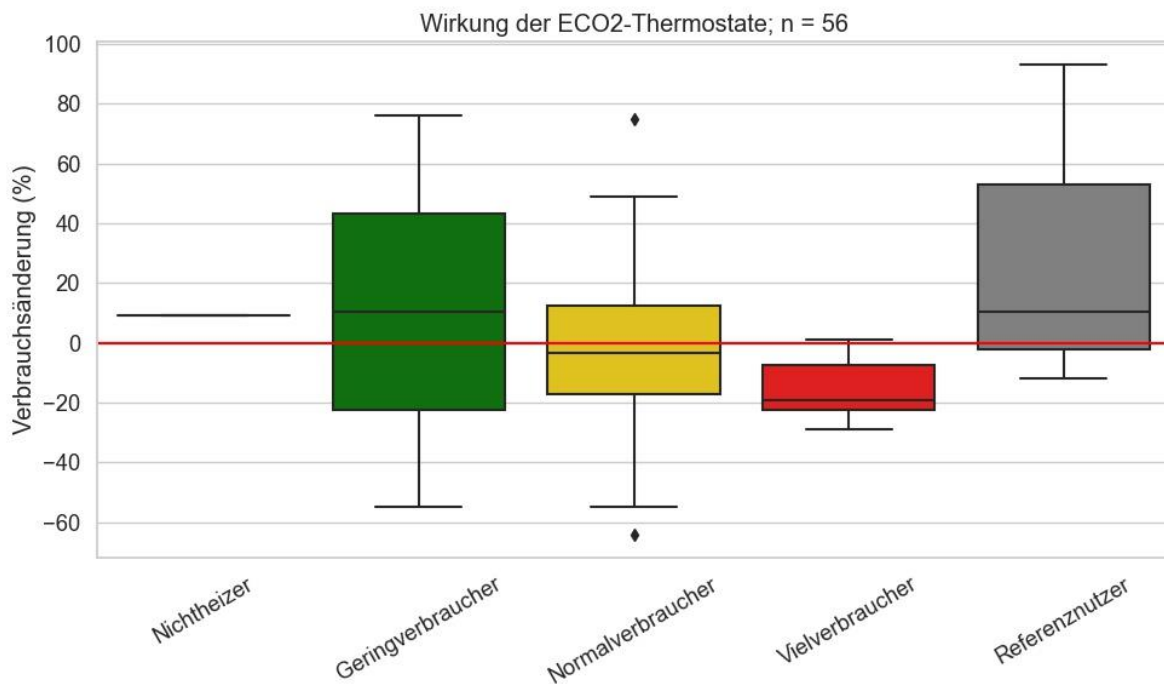


Abbildung 76: Verbrauchsänderung in den ECO2-Liegenschaften

Es ist zu erkennen, dass bei den Nichtheizern und Geringverbrauchern die Energieverbräuche nach dem Einbau der smarten Thermostate angestiegen sind. Die Normalverbraucher und die Vielverbraucher konnten nach dem Einbau der smarten Thermostate hingegen Einsparungen erzielen. Die Referenzgruppe wies deutlich gestiegene Verbräuche auf. Dies kann zum einen auf den Corona-Effekt zurückzuführen sein: Die Verbräuche in den Liegenschaften im BaltBest Projekt, bei denen keine Maßnahmen ergriffen wurden, haben von der Heizperiode 2019/2020 zu der Heizperiode 2020/2021 um 5 % zugenommen. Erklärbar ist dies durch die höhere Anwesenheitszeit der Mieter durch Home-Office und Home-Schooling. Zum anderen haben Simulationen ergeben, dass der Einsatz smarter Thermostate in Verbindung mit einer deutlichen Profilierung der Temperaturen zu Mehrverbräuchen in den unmittelbar angrenzenden Wohnungen führen kann. Verantwortlich sind die Wärmeströme zwischen den Wohnungen, da die Innenwände in einem Mehrfamilienhaus üblicherweise nicht zusätzlich isoliert sind.

Nutzergruppe	Anzahl der Wohnungen	Änderung des Verbrauches (witterungsbereinigt)
ausgestattete Nichtheizer	1	+8,8%
ausgestattete Geringverbraucher	2	+10,6%
ausgestattete Normalverbraucher	36	-6,7%
ausgestattete Vielverbraucher	7	-16,1%
nicht ausgestattete Referenzgruppe	10	+15,2%

Tabelle 4: Änderung der Energieverbräuche in den Gruppen nach Einbau der smarten Thermostate

Wodurch lassen sich die Einsparungen erklären?

Betrachtet man die Änderungen der Betriebsstunden der Heizkörper in den Wohnungen (Abbildung 77), so ergibt sich das folgende Bild: Bei den Nichtheizern und Geringverbrauchern, sowie der Referenzgruppe, gab es keine signifikanten Änderungen bei den Betriebsstunden der Heizkörper, trotzdem sind die Verbräuche angestiegen. Bei den Normalverbrauchern ist das Bild indifferent. Bei einigen Mietern haben die Betriebsstunden der Heizkörper abgenommen, bei anderen zugenommen. Bei den Vielverbrauchern war das Bild eindeutig, die Betriebsstunden der Heizkörper und damit die Verbräuche haben abgenommen. Der Anstieg der Verbräuche bei den Nichtheizern, den Geringverbrauchern und den Referenznutzern ist möglicherweise auf den verringerten Wärmetransport aus den Nachbarwohnungen zurückzuführen.

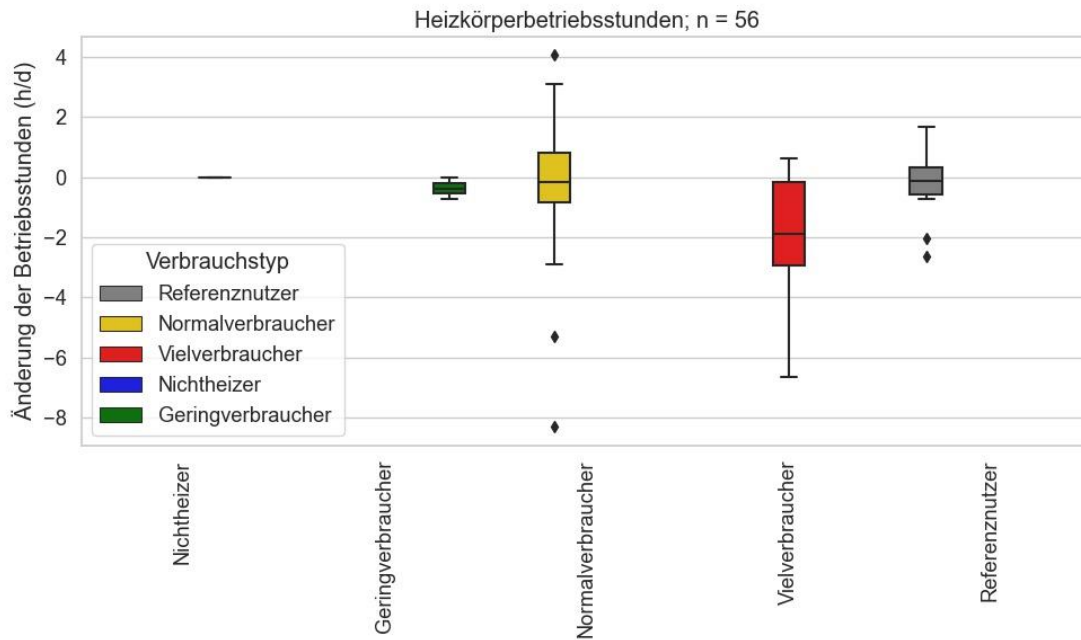


Abbildung 77: Betriebsstundenänderung in den ECO2 Liegenschaften

Abbildung 78 zeigt die Veränderungen der Heizkörper-Betriebsstunden und der Verbräuche auf Wohnungs-Ebene für die verschiedenen Verbrauchstypen (farblich unterschieden). Der Zusammenhang zwischen Heizkörper-Betriebsstunden und den Verbräuchen ist deutlich zu erkennen, wenngleich der Zusammenhang nicht linear ist und es kleinere Abweichungen gibt. Auch ist deutlich zu erkennen, dass es gerade bei Normalverbrauchern Licht und Schatten gibt. Während in einigen Wohnungen hohe Einsparungen erzielt werden konnten, ist in anderen Wohnungen ein deutlicher Verbrauchsanstieg zu verzeichnen gewesen. Für eine flächendeckende Senkung des Energieverbrauches durch den Einbau smarter Thermostate

ist eine Betreuung der Mieter und ggf. ein zeitnahes Feedback über die auftretenden Verbrauchsänderungen unabdingbar.

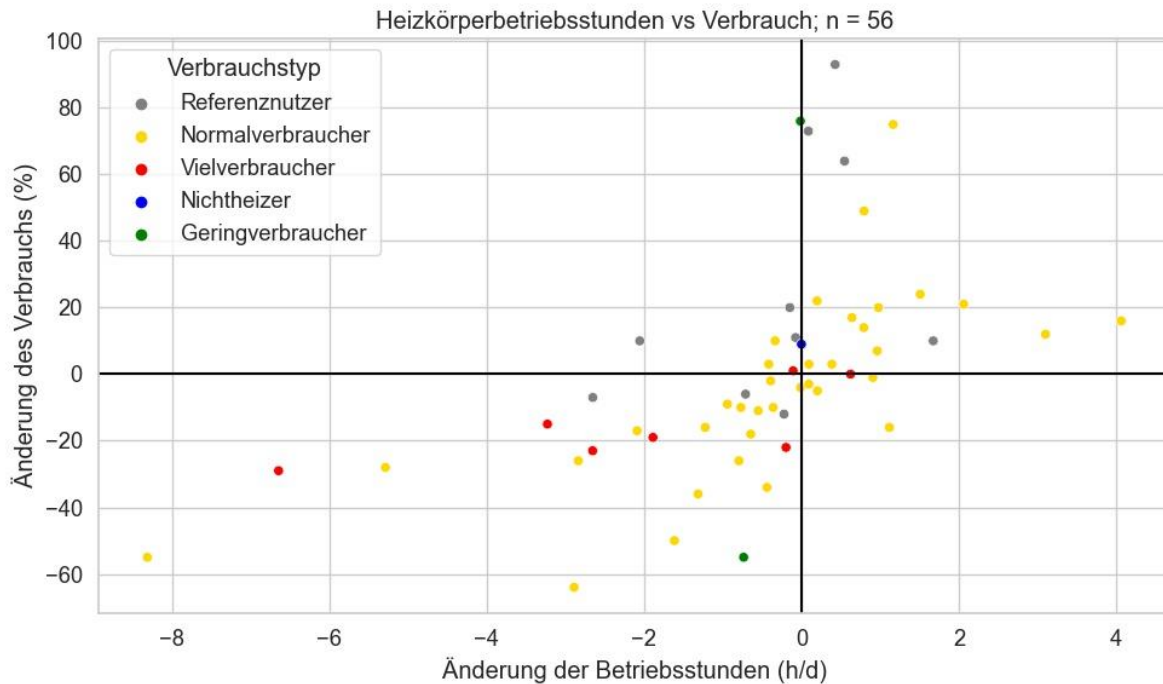


Abbildung 78: Änderung Betriebsstunden gegen Verbrauchsänderung

Anhand der Daten aus den Heizkostenverteilern und der Wärmemengenzähler wurde die absolute Verbrauchsänderung in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ errechnet. Es wird deutlich, dass die Änderungen bei den Nicht- und Geringheizern in absoluten Zahlen kleiner sind als bei den Normalheizern und Vielverbrauchern. Für die Gesamteinsparungen sind die Veränderungen bei den Nicht- und Geringheizern nicht signifikant. Es geht im Wesentlichen darum, das Verhalten der Normal- und Vielverbraucher positiv zu beeinflussen (s. Abbildung 79).

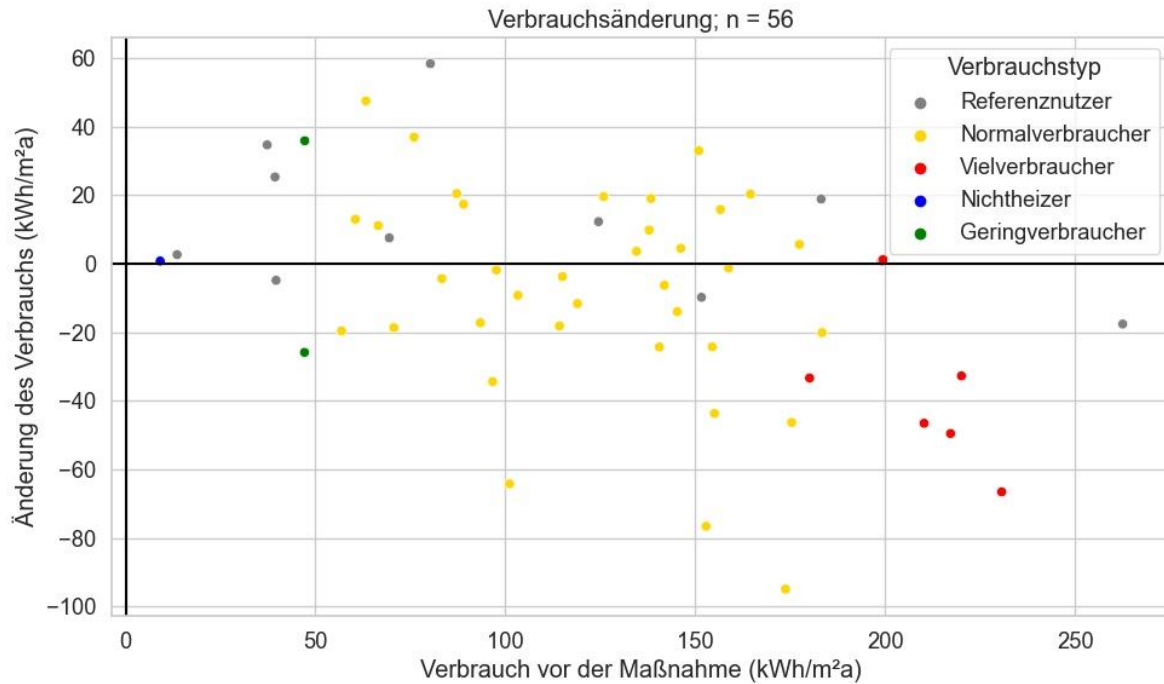


Abbildung 79: Verbrauchsänderung gegen Status Quo

Zur Verdeutlichung sind in der folgenden Abbildung die Änderungen aus Heizkörperebene im Vergleich der Heizperiode vor dem Einbau smarter Thermostate und nach dem Einbau der smarten Thermostate dargestellt. Jeder Punkt repräsentiert einen Heizkörper in den ausgerüsteten Liegenschaften, die Farbe des Punktes ordnet den Heizkörper einem Verbrauchstyp zu. Liegt ein Punkt unter der Diagonalen, so haben die Betriebsstunden des jeweiligen Heizkörpers abgenommen, liegt ein Punkt über der Diagonale, so haben die Betriebsstunden des Heizkörpers nach der Ausstattung mit smarten Thermostaten zugenommen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Heizkörperbetriebsstunden durch den Einbau smarter Thermostate im Mittel abgenommen haben, es aber eine erhebliche Anzahl von Heizkörpern gibt, bei denen die Betriebsstunden zugenommen haben (s. Abbildung 80).

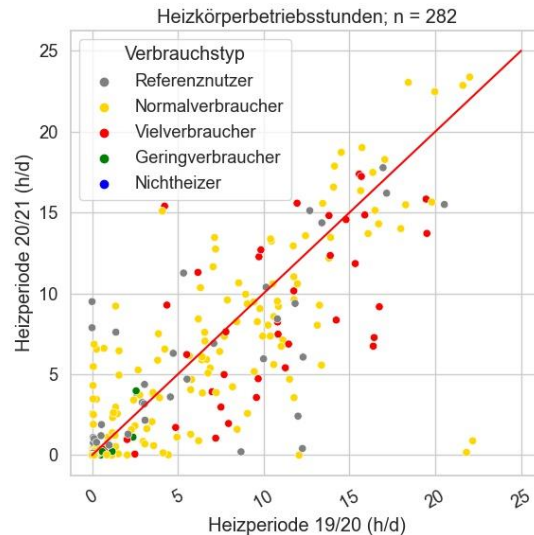


Abbildung 80: Änderung Heizkörperbetriebsstunden

Hat sich die Abhängigkeit der Verbrauchseinheiten durch den Einbau der smarten Thermostate geändert?

Abbildung 81 zeigt die Abhängigkeiten der Verbrauchseinheiten auf den Heizkostenverteiler in Abhängigkeit der Betriebsstunden. Die blauen Punkte repräsentieren den Zeitraum vor, die roten Punkte den Zeitraum nach der Ausstattung. Wie bereits beschrieben gibt es eine Streuung der Werte, was auf unterschiedliche Heizkörpertemperaturen im eingeschalteten Zustand der Heizkörper zurückzuführen ist. Die Regressionsgeraden für den Zeitraum vor und nach der Ausstattung haben die gleiche Steigung. Es ist daher anzunehmen, dass sich das Regelverhalten kaum geändert hat.

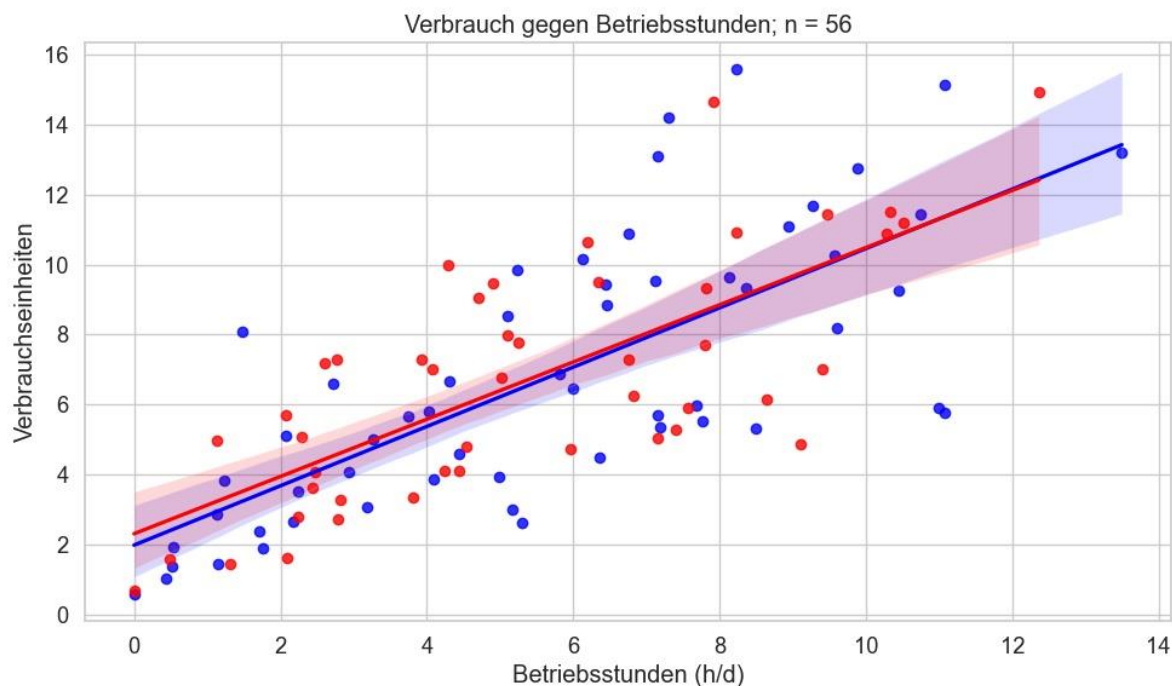


Abbildung 81: Betriebsstunden und Verbrauchseinheiten nach dem Einbau

Führen Einsparungen auf Wohnungsebene durch smarte Thermostate zwangsläufig zu signifikanten Einsparungen auf Liegenschaftsebene?

Die Verbräuche in den 5 Liegenschaften, die mit smarten Thermostatventilen ausgestattet wurden, haben sich nach dem Einbau wie folgt entwickelt:

Nr. der Liegenschaft	Absoluter Verbrauch (vor Einbau) in kWh/m ²	Änderung des Verbrauchs nach Einbau (witterungsbereinigt)
15	130,2	-7%
21	128,4	+0,13%
23	66141	+0,41%
47	106732	+1,21%
50	136865	-15%

Tabelle 5: Änderung der Verbräuche auf Liegenschaftsebene nach dem Einbau smarter Thermostate

In zwei Liegenschaften waren signifikante Änderungen des witterungsbereinigten Verbrauches, auch auf Liegenschaftsebene, zu erkennen. In den anderen Liegenschaften gab es keine nennenswerte Verbrauchsänderung. Bei der Betrachtung der Verbrauchsänderungen war zu beachten, dass es von der Heizperiode 2019/2020 zu der Heizperiode 2020/2021 einen Corona-Effekt gab, d.h. die Verbräuche in den Liegenschaften im BaltBest Projekt, bei denen

keine Maßnahmen ergriffen wurden, haben um 5% zugenommen. Damit konnte ein gleichbleibender Verbrauch schon als positives Einsparergebnis betrachtet werden.

Fazit

Ob und in welchem Umfang es durch den Einsatz von Smart-Home-Thermostatventilen zu einer Reduzierung der Energieverbräuche kommt, lässt sich nur schwer abschätzen. Eine wesentliche Rolle dabei spielt die Zusammensetzung der Mieterschaft bzw. der Zugehörigkeit der Mieter zu verschiedenen Heiztypen. Nicht alle Mieter werden gleichermaßen vom Einsatz von Smart Home Systemen profitieren. Da die Gruppe der Heiztypen, die üblicherweise von smarten Thermostatventilen profitieren, größer ist, als die Gruppe der Nichtheizer und Geringverbraucher ist und diese Gruppen deutlich höhere Verbräuche haben, ist eine Abnahme der Verbräuche auf Liegenschaftsebene zu erwarten. Es ist zu beachten, dass in diesen Gruppen die Einsparungen von Mieter zu Mieter stark schwanken und dass es auch zu Mehrverbräuchen kommen kann. Eine Einweisung und Betreuung der Mieter in der ersten Nutzungsphase ist ein wichtiger Erfolgsfaktor.

Wahrnehmung der Güte der Betriebsführung durch die Mieter

Wie zuvor beschrieben wurde, bestehen große Unterschiede hinsichtlich der Handhabung zwischen dem Danfoss ECO1 und seinem Nachfolgemodell, dem ECO2. Im Folgenden werden Einflüsse auf das Nutzerverhalten aufgrund der unterschiedlichen Bedienbarkeit untersucht.

Wie zuvor beschrieben wurde, bestehen große Unterschiede hinsichtlich der Handhabung zwischen dem Danfoss ECO1 und seinem Nachfolgemodell, dem ECO2. Im Folgenden werden Einflüsse auf das Nutzerverhalten aufgrund der unterschiedlichen Bedienbarkeit untersucht.

Verbrauchsverhalten ECO1-Thermostate

In Abbildung 82 wird der normierte flächenbezogene Verbrauchswert der folgenden Heizperiode über der Referenzheizperiode dargestellt, dabei wird die Punktgröße durch den Anteil der Zeitprogramme, je Nutzereinheit, in der Referenzheizperiode und die Farbe durch den Trend zwischen den Heizperioden definiert. Liegt ein Punkt unterhalb gepunkteten Diagonallinie hat der normierte flächenbezogene Verbrauchswert der Nutzereinheit zur folgenden Heizperiode abgenommen. Ist ein Punkt rot, wurden in der Nutzereinheit und der folgenden Heizperiode weniger Zeitprogramme eingesetzt. Ist ein Punkt groß, ist der Anteil der Heizkörper mit Zeitprogrammen in der Referenzheizperiode hoch. Aus der Darstellung kann abgeleitet werden, dass kein klarer Trend der Reduzierung des normierten flächenbezogenen Verbrauchswert durch den Einsatz von Zeitprogrammen erkennbar ist. Es

zeigte sich, dass viele Nutzer, die 2016 mit smarten Thermostaten ausgestattet wurden, von Beginn an keine Zeitprogramme eingestellt hatten, diese sind auf der linken Seite der Abbildung als kleine Punkte dargestellt. Die um die Diagonale trichterförmigen, schwarzen Linien, markieren den verfahrensbedingten Unsicherheitsbereich. Liegt ein Punkt zwischen den beiden Linien liegt die Änderung im Bereich der statistischen Unsicherheit.

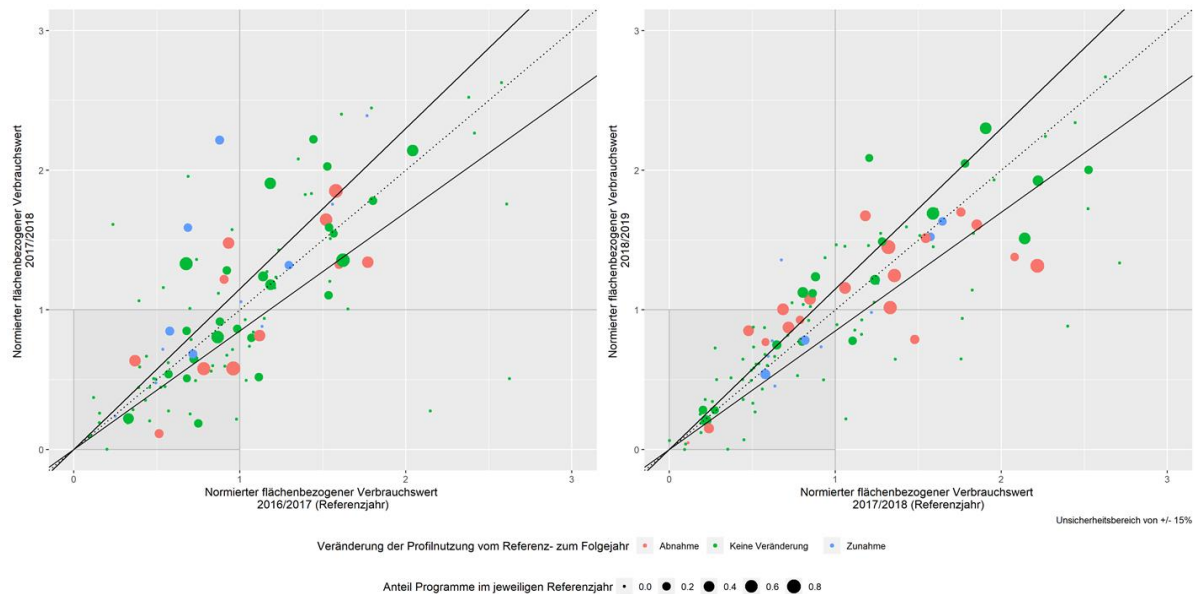


Abbildung 82: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes und der Nutzung von Zeitprogrammen

In Abbildung 83 wird, nach dem Schema der Darstellung in Abbildung 82, der normierte flächenbezogene Verbrauchswert der folgenden Heizperiode über der Referenzheizperiode dargestellt. Dabei wird die Punktgröße durch die durchschnittliche, anteilige Betriebszeit der Heizkörper in der Nutzereinheit der Referenzheizperiode und die Farbe durch die Zunahme bzw. Abnahme zur Folgeheizperiode dargestellt. D.h. ist ein Punkt groß, ist die durchschnittliche anteilige Betriebszeit in der Referenzheizperiode hoch. Ist ein Punkt rot, nahm die durchschnittliche anteilige Betriebszeit zur folgenden Heizperiode ab. Es kann beobachtet werden, dass die Betriebszeit mit dem normierten flächenbezogenen Verbrauchswert korreliert. Nimmt die Betriebszeit ab, sinkt der normierte flächenbezogene Verbrauchswert.

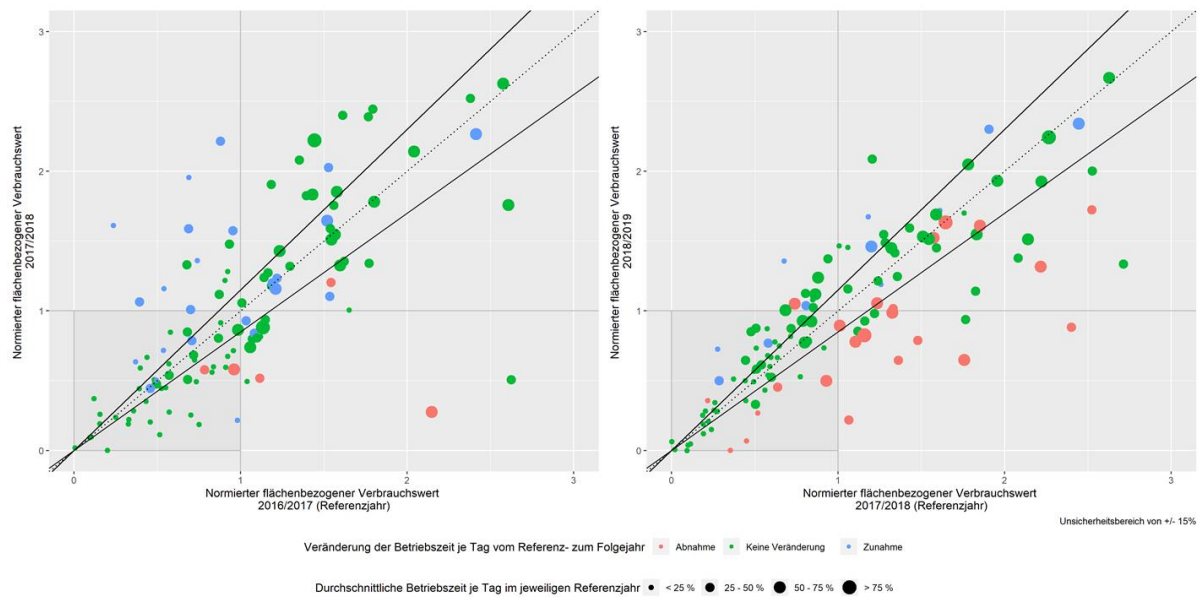


Abbildung 83: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes und der Heizkörperbetriebszeit je Tag

Abbildung 84 erweitert die Abbildung 83 um den Aspekt, des Ausbaus von smarten Thermostaten, (bekannt) ausgebaute Thermostate werden in dieser Abbildung teiltransparent dargestellt. Im Zeitverlauf ist erkennbar, dass Nutzer mit hohen Betriebszeiten und hohen normierten flächenbezogenen Verbrauchswerten mit Abschluss des Vorgängerprojekts einen Ausbau der Systeme wünschten und im Anschluss in Betriebszeiten und Verbrauch sanken.

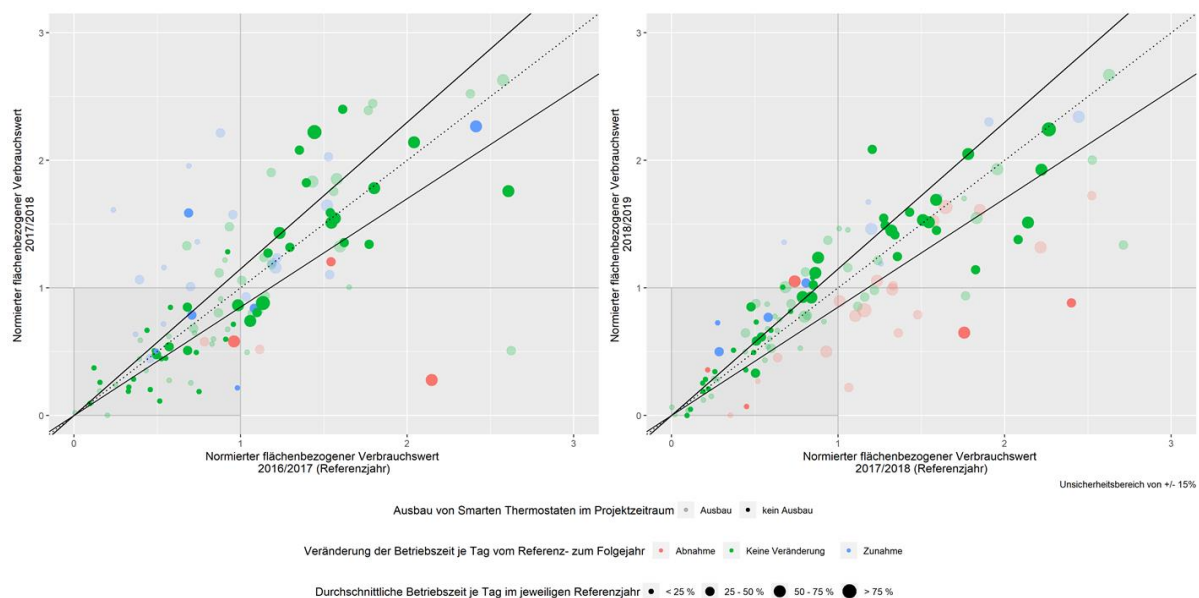


Abbildung 84: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes, der Heizkörperbetriebszeit je Tag und dem Thermostatausbau

Der Zusammenhang zwischen der Verwendung der im Vorgängerprojekt verbauten smarten Thermostate und einer im Durchschnitt erhöhten Betriebszeit und damit nach dem in Abbildung 82 dargestellten Zusammenhang erhöhten normierten flächenbezogenen

Verbrauchswert, wird auch in Abbildung 85 deutlich. Die Tagesbetriebsstunden eines Heizkörpers, sind der Zeitraum, in welchem der Heizkörper betrieben wurde. Die Tagesbetriebsstunden sind bei Nutzereinheiten mit smarten Thermostaten, des Typen Danfoss ECO1 durchschnittlich höher, als in den nicht ausgerüsteten Nutzereinheiten. Während die Tagesbetriebsstunden bei Nutzereinheiten mit manuellen Thermostaten mit steigender Außentemperatur sinken, sind diese bei Nutzereinheiten mit smarten Thermostaten konstant hoch.

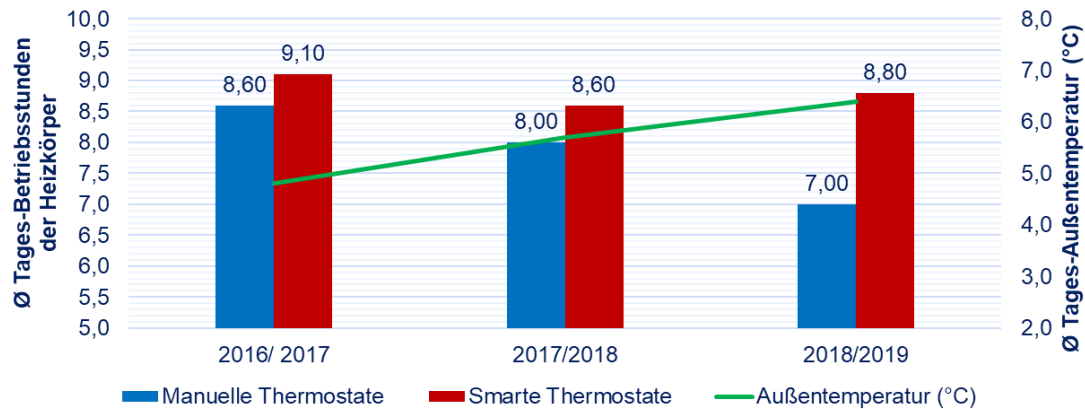


Abbildung 85: Durchschnittliche Tages-Betriebsstunden nach Thermostattyp

Die durch das Vorgängerprojekt verbauten smarten Thermostate erfüllten sich die Erwartungen an mögliche Energieeinsparungen nur bedingt, während einige Nutzereinheiten Heizenergie sparten, wurde bei anderen Nutzereinheiten ein Mehrverbrauch beobachtet. Auf Liegenschaftsebene konnten keine Einsparungen durch den Einsatz der ECO1-Thermostate beobachtet werden, die meisten Thermostate wurde nicht programmiert, viele Mieter wünschten den Austausch der ECO1-Thermostate gegen, die vorher verwendeten manuellen Thermostate.

Verbrauchsverhalten ECO2-Thermostate

Durch die Coronakrise 2020-2022 wird privater Wohnraum anders und verstärkt genutzt. Dabei ist die Änderung der Nutzung nicht beständig, sondern vom Pandemieverlauf abhängig. Einen großen Einfluss auf die Wohnraumnutzung hatten z.B. die Lockdowns, Reisewarnungen und der Wandel der Arbeitswelt. Die Unbeständigkeit der Nutzung des Wohnraums führte zu einer Unbeständigkeit des Wärmebedarfs und Wärmeverbrauches, dies erschwerte die Untersuchung des Einflusses von Maßnahmen auf den Wärmeverbrauch.

Es wurde daher zunächst der Einfluss der Coronakrise auf 11 Referenzliegenschaften in welchen keinerlei Änderungen vorgenommen wurden, bilanziert. Hierzu wurde der Gesamtheizenergieverbrauch der Liegenschaften in der Heizperiode 2019/2020 (vor der Coronakrise) mit dem Gesamtheizenergieverbrauch in der aktuellen Heizperiode (2020/2021)

witterungsbereinigt verglichen. In den Referenzliegenschaften stieg der witterungsbereinigte Energieverbrauch um 5%. Der Gesamtenergieverbrauch wurde zu gleichen Anteilen über die Verbrauchseinheiten und beheizte Fläche auf die einzelnen Nutzereinheiten der 11 Liegenschaften aufgeteilt (s. Abbildung 86).

Auf der x-Achse dargestellt, der Energieverbrauch je Wohnung in der Heizperiode 2019/2020, auf der y-Achse der Energieverbrauch je Wohnung in der Heizperiode 2020/2021. Die Farbe eines Punktes stellt jeweils die Liegenschaft dar. Liegt ein Punkt unterhalb der Diagonalen und außerhalb des gestrichelten Toleranzbereiches wurde in dieser Nutzereinheit weniger Heizenergie verbraucht als in der vorherigen Heizperiode. Vier Nutzereinheiten verbrauchten weniger Heizenergie, in der Mehrheit der Nutzereinheiten wurde mehr verbraucht.

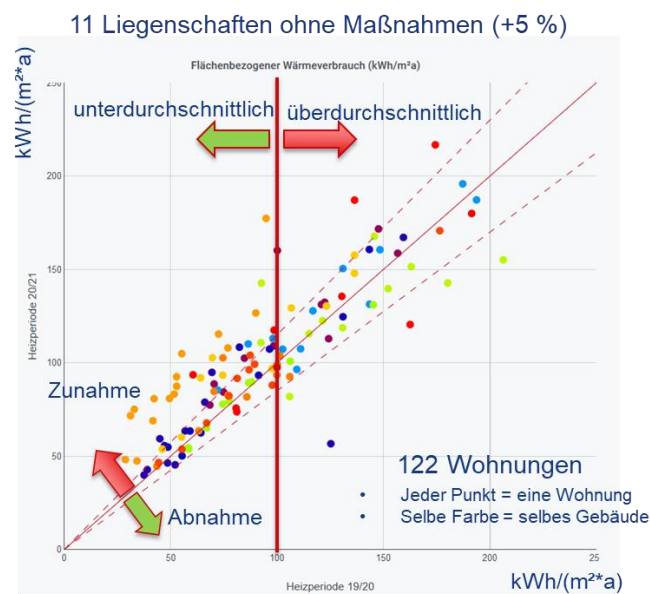


Abbildung 86: Energieverbrauch in Referenzwohnungen, Coronakrise

In den Liegenschaften mit ECO2-Thermostaten nahm der witterungsbereinigte Energieverbrauch gegenüber der vorherigen Heizperiode um 2% ab (s. Abbildung 87).

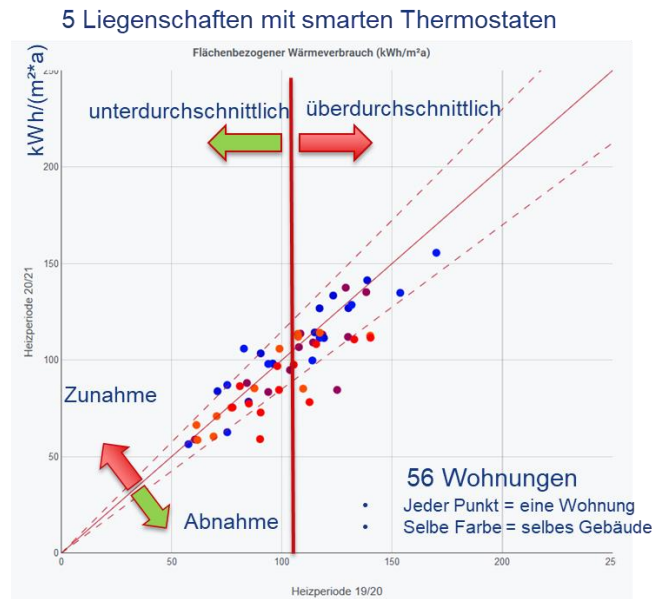


Abbildung 87: Energieverbrauch ECO2-Wohnungen, Coronakrise

Während es nur eine Wohnung gibt, die signifikant mehr Heizenergie verbraucht hat, konnten in einer Vielzahl von Wohnungen der Heizenergieverbrauch gesenkt werden. Die Senkung des Energieverbrauches erfolgte bei smarten Thermostaten durch gezielte Absenkbetriebe/ Ausschaltbetriebe und damit durch eine Reduktion der Betriebszeit bzw. zeitliche Steuerung der Wärmeleistung.

Zur Untersuchung der Betriebszeit wurde der Quotient der durchschnittlichen Heizkörperbetriebszeit der Heizperiode 2021/2020 zur durchschnittlichen Heizkörperbetriebszeit der vorherigen Heizperiode gebildet und die vorherigen Grafiken farblich eingefärbt. In Nutzereinheiten mit einem erhöhten Heizenergieverbrauch wurden Heizkörper länger betrieben (s. Abbildung 88).

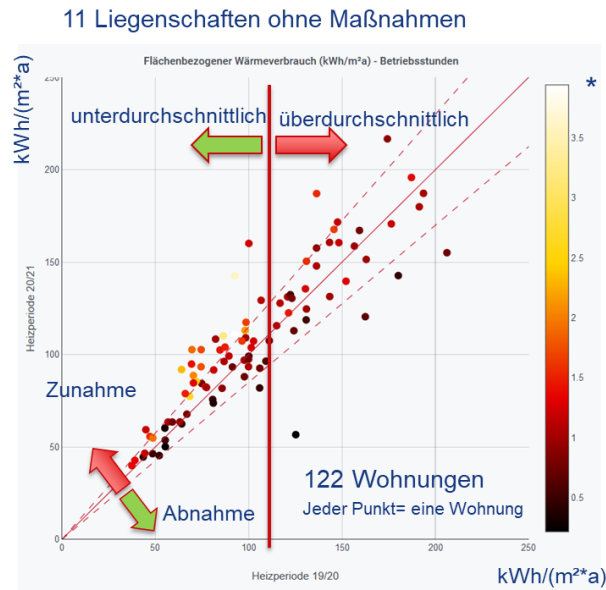


Abbildung 88: Betriebsstunden Referenzwohnungen, Coronakrise

In den 5 Liegenschaften mit ECO2-Thermostaten zeigte sich, dass vor allem jene Nutzereinheiten Heizenergie sparten, welche Betriebsstunden reduzierten (s. Abbildung 89).

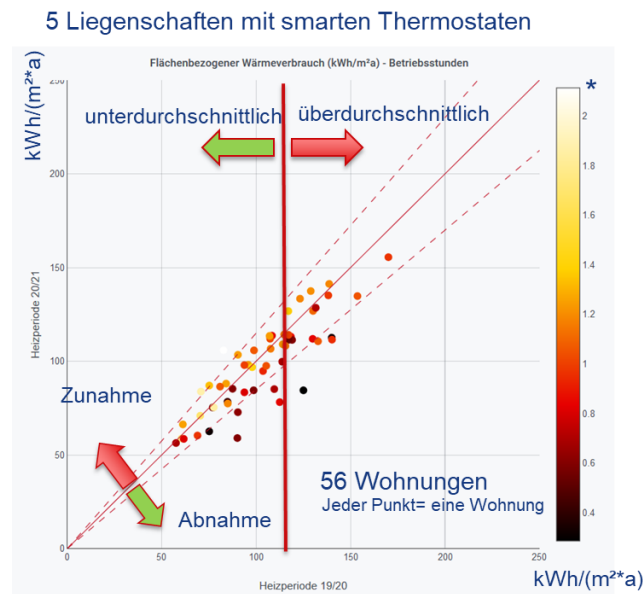


Abbildung 89: Betriebsstunden ECO2-Wohnungen, Coronakrise

Die durchschnittlichen Betriebsstunden je Heizkörper konnten in den Liegenschaften mit ECO2 Thermostaten gegenüber der vorherigen Heizperiode um 5% reduziert werden. In den Vergleichsgruppen (Referenz, ECO1) nahmen die durchschnittlichen Heizkörperbetriebsstunden im gleichen Zeitraum zu (s. Abbildung 90).

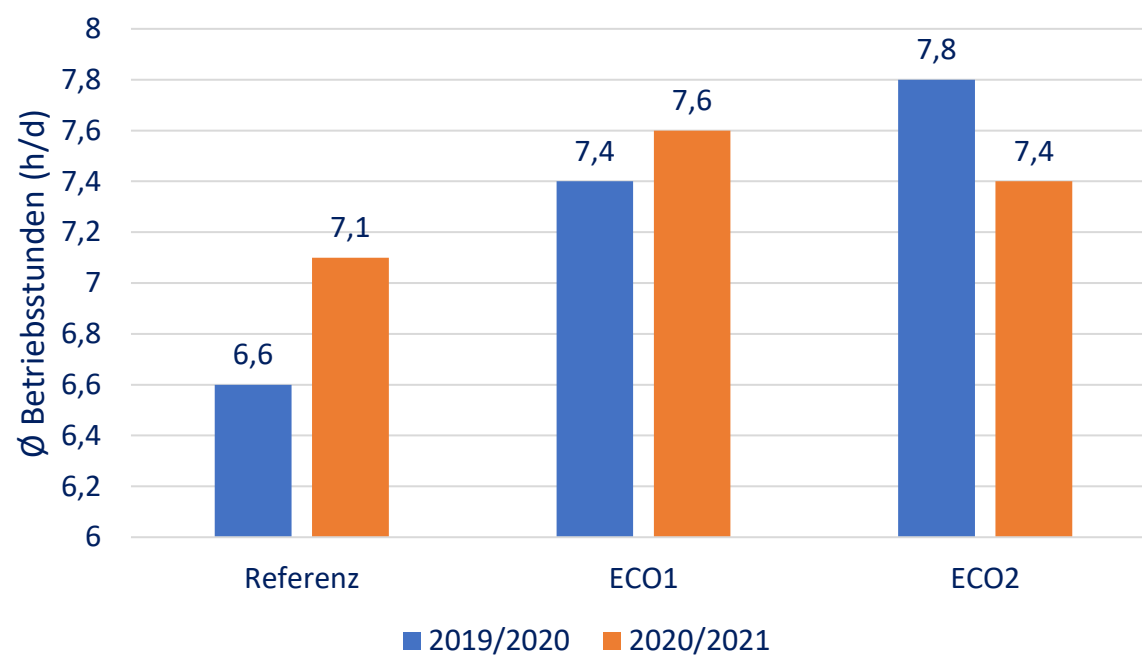


Abbildung 90: Betriebsstunden Vergleichsgruppen

5 Betriebseinstellungen und Nutzerverhalten

Im BaltBest Projekt wurde ebenfalls untersucht, welchen Einfluss die Heizkessel-Betriebsführung auf das Nutzerverhalten hat. Grundsätzlich verfügen Wärmeerzeuger über eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung, d.h. die Vorlauftemperatur wird an die Außentemperatur über die sogenannte Heizkennlinie angepasst. Die Grundidee besteht darin, die Leistung der Heizkörper an den Wärmebedarf anzupassen. Nimmt die Außentemperatur ab, wird in den Räumen eine größere Heizleistung zur Kompensation der steigenden Transmissions- und Lüftungsverluste benötigt. Dieser Zusammenhang ist in Näherung linear, d.h. wenn sich die Temperaturdifferenz zwischen der Raumtemperatur und der Außentemperatur verdoppelt, wird die doppelte Heizleistung benötigt. Um das zu erreichen, wird die Übertemperatur, d.h. die Temperaturdifferenz zwischen dem Heizkörper und der Raumtemperatur ebenfalls verdoppelt. Für die Parametrierung der Heizkennlinie wird zum einen die Steilheit bzw. Neigung oder Steigung definiert. Diese drückt aus, um wieviel Kelvin die Vorlauftemperatur ansteigt, wenn die Außentemperatur um ein Kelvin abnimmt. Die Steilheit hängt von Bauphysik und Heizflächen ab, wird z.B. eine gut gedämmte Liegenschaft mit einer großflächigen Fußbodenheizung beheizt, ist ein Wert von 0,3 bis 0,5 einzustellen, während in einer bestandsüblichen Liegenschaft mit Heizkörpern ein Wert von 1,4 üblich ist. Dann beträgt bei der Auslegungstemperatur von -15°C die Vorlauftemperatur ca. 70°C , ein weiterer Parameter ist die sog. Raumsolltemperatur. Dieser Parameter definiert das Komfortniveau, d.h. welche Raumtemperatur unabhängig von der Außentemperatur gehalten werden soll. In der Praxis bewirkt die Änderung der Raumsolltemperatur eine Verschiebung der Heizkennlinie nach oben oder unten. So wird z.B. bei einer Nachtabenkung der Sollraumtemperatur um 5 K die Heizkennlinie um 5 K nach unten verschoben.

Um die Einstellung der Heizkennlinien der Gebäude im BaltBest Projekt im Vergleich darzustellen, wurde die Darstellungsform in Abbildung 91. entwickelt. Dabei werden die Einstellung der Heizkennlinien durch den Wert der Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur von 20°C (X-Achse) und den Wert der Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur von 0°C (Y-Achse) in Abbildung 91 dargestellt. Die Werte wurden aus dem realen Betriebsverhalten der Wärmeerzeuger, anhand der über die Messinfrastruktur erfassten Vorlauftemperatur und der Außentemperatur rekonstruiert, die in der Heizperiode 20/21 vom 01.10.2020 bis zum 30.04.2021 aufgezeichnet wurden. Jeder Punkt in der Abbildung charakterisiert somit die Einstellung der Heizkennlinie eines Wärmeerzeugers. Für die Bewertung der Güte der Einstellungen wurden in der Abbildung drei Bereiche farblich gekennzeichnet:

- Grün: Die Vorlauftemperatur ist bei 20°C Außentemperatur kleiner als 40°C und bei einer Außentemperatur von 0°C kleiner als 60°C. Die Einstellung der Heizungsanlage entspricht dem Standard.
- Hellrot: Die Vorlauftemperatur liegt bei 20°C Außentemperatur zwischen 40°C und 45 °C und bei einer Außentemperatur von 0°C zwischen 60 °C und 70°C. Das Gebäude ist leicht übertsorgt.
- Rot: Die Vorlauftemperatur ist bei 20°C Außentemperatur größer als 45 °C und bei einer Außentemperatur von 0°C größer als 70°C. Das Gebäude ist deutlich übertsorgt, insbesondere bei hohen Außentemperaturen

Heizkennlinien in der Nähe der Diagonale besitzen keine Abhängigkeit von der Außentemperatur. Das heißt, dass die entsprechenden Kessel als Konstanttemperaturkessel betrieben werden. In der Praxis wird dies durch hohe Steilheit der Kennlinien in Verbindung mit einer hohen Raumsolltemperatur erreicht. Insgesamt lässt sich erkennen, dass der größte Anteil der Heizungsanlagen mit zu hohen Vorlauftemperaturen gefahren wird.

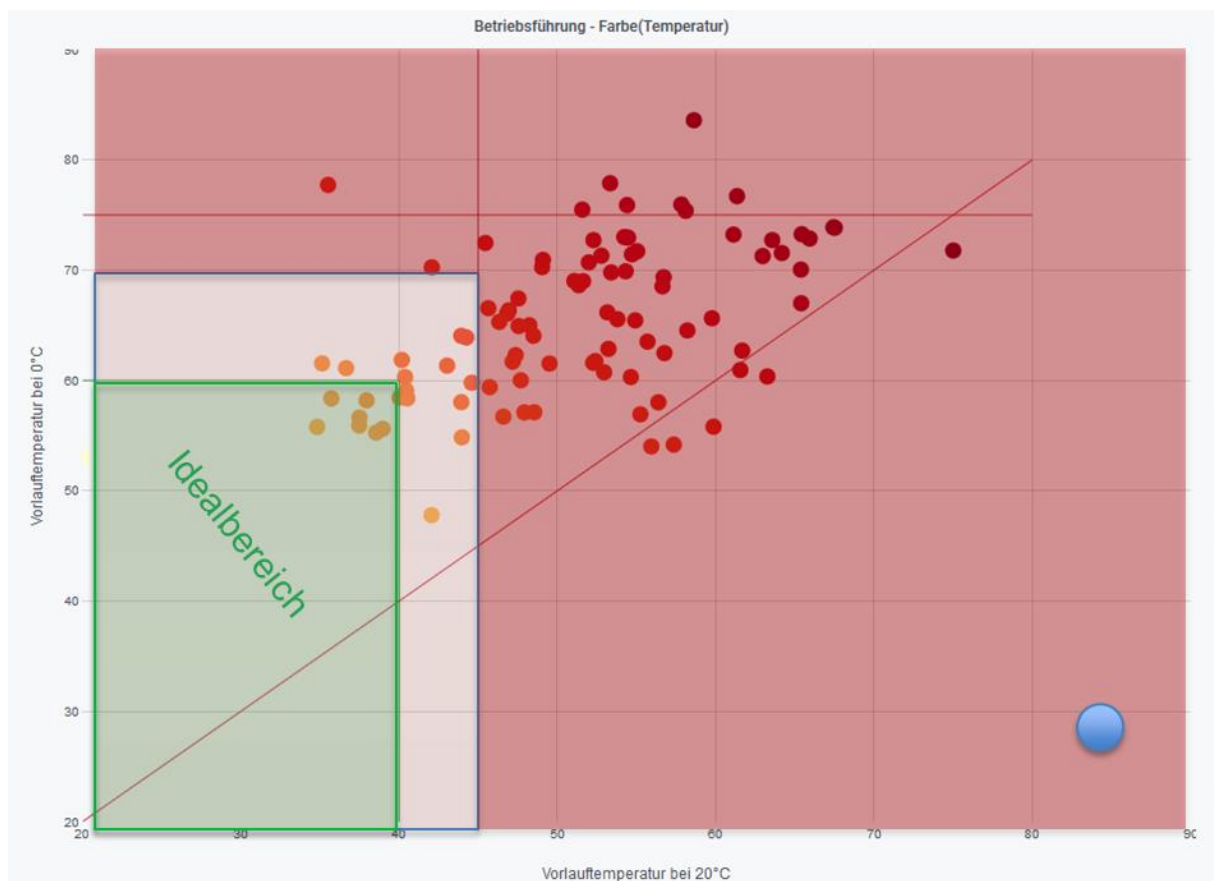


Abbildung 91: Vorlauftemperaturkompass

5.1 Einfluss der Betriebseinstellungen auf den Jahresgasverbrauch

Ziel einer witterungsgeführten Heizungsanlagen-Regelung ist es, für die verschiedenen Außentemperaturen während einer Heizperiode adäquate Heizleistung zur Verfügung zu stellen, indem die Vorlauftemperatur mittels der Heizkennlinie an die Außentemperatur angepasst wird.

Die Idee stammt aus den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts, als Raum-Heizkörper keine Thermostatventile besaßen und die Heizleistung in den Räumen manuell über die Einstellung des Volumenstromes mittels eines Heizkörperventils gesteuert wurde. Wurde das Heizkörperventil komplett geöffnet, hing die Raumtemperatur direkt von der Vorlauftemperatur ab. Je höher die Vorlauftemperatur war, desto höher wurde die Raumtemperatur. War also eine Heizkennlinie schlecht eingestellt, so wurde mehr Wärme bereitgestellt als bei jeweiliger Witterung nötig wäre, um eine angemessene Raumtemperatur zu halten. Eine Überversorgung führte dazu, dass überschüssige Wärme durch Öffnen der Fenster abgelüftet wurde.

Heute verfügen Heizkörper im Wohnbereich über dezentrale Regeleinrichtungen, meist Thermostatventile. Thermostatventile verschließen und öffnen den Heizwasser-Zufluss zum Heizkörper in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der Ist-Raumtemperatur und der Soll-Raumtemperatur und passen so den Wärmestrom des Heizkörpers an den Wärmebedarf des Raums an. Eine zu hohe Vorlauftemperatur führt jetzt nicht mehr zwangsläufig zu einer hohen Raumtemperatur, da das Thermostatventil beim Erreichen der Soll-Raumtemperatur schließt. Andererseits öffnet das Thermostatventil beim "Kippen" des Fensters durch den damit verursachten Abfall der Raumtemperatur und versucht, die erhöhten Lüftungsverluste zu kompensieren. Werden die Heizkörper durch nicht adäquate Einstellungen der Heizkennlinie überversorgt, kann das Fenster über lange Zeiträume offenstehen, ohne dass es zu einem nennenswerten Abfall der Raumtemperatur kommt. Dabei entweicht allerdings deutlich mehr Heizleistung nach draußen. Wird ein Kessel als Konstanttemperaturkessel betrieben, hat der Heizkörper bei einer Außentemperatur von 10°C eine Leistung, die erst bei -15°C benötigt würde. Das Potenzial für Energieverschwendung ist erheblich.

Im Projekt wurde untersucht, welchen Einfluss die Einstellung der Heizkennlinie auf den Energieverbrauch hat, wenn zeitgleich Thermostate als dezentrale Regeleinrichtungen installiert sind. Wird durch zu hohe Vorlauftemperaturen und damit einer hohen potenziellen Wärmebereitstellung auch mehr Wärme verbraucht?

Methodik

Zur Beurteilung dieser Fragestellung wurden witterungsbereinigte Gasverbräuche und Heizkennlinien von 62 Abrechnungseinheiten mit Daten aus der Heizperiode 20/21 ausgewertet. Anhand der Aufzeichnung der Vorlauf- und Außentemperaturen wurden die Heizkennlinien rekonstruiert und nach dem in Kapitel 6 beschriebenen Schema in die Kategorien grün, d.h. gut eingestellt, hellrot d.h. leichte Überversorgung und rot d.h. starke Überversorgung unterteilt. Dann wurde ausgewertet, welchen spezifischen Energieverbrauch in den einzelnen Liegenschaften vorlagen.

Ergebnis

Dargestellt werden die Ergebnisse der Analyse in Abbildung 74 in drei Violin-Plots. Violin-Plots stellen die Kerndichte-Verteilung der Untersuchungsgröße spiegelsymmetrisch dar. In den Bereichen, wo der Bauch des Plots breit ist, liegt eine Häufung vor.

- Abrechnungseinheiten mit gut eingestellter Heizkennlinie (grün, $n=8$) verbrauchten im Durchschnitt $95 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bei einem mittleren Wärmedurchgangswert der Hülle von $1,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Leicht übertensorgten Abrechnungseinheiten (hellrot, $n=44$) verbrauchten im Durchschnitt $131 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bei einem mittleren Wärmedurchgangswert von $1,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Deutlich übertensorgte Abrechnungseinheiten (rot, $n=10$) verbrauchten im Schnitt $134 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bei einem mittleren Wärmedurchgangswert von $1,07 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

D.h. bei den Abrechnungseinheiten, bei denen die Heizkennlinien gut eingestellt waren, lag der Energieverbrauch etwa 30% niedriger als bei den übertensorgten Abrechnungseinheiten. Der Mehrverbrauch der weniger gut eingestellten Abrechnungseinheiten lässt sich kaum durch die nur geringfügig schlechteren mittleren Wärmedurchgangswerte der Gebäudehüllen erklären. Obwohl weitere Einflüsse wie z.B. ungleich verteilte Leerstände, Heiztypen etc. hier nicht abschließend untersucht werden können, indiziert die Auswertung doch, dass eine gut eingestellte zentrale Witterungsführung (Heizkennlinie) auch bei vorhandenen dezentralen Raumtemperatur-Regeleinrichtungen energetisch notwendig ist und zu Einsparungen führt. Festzuhalten ist, dass bei den Liegenschaften mit gut eingestellten Heizungsanlagen keine extremen Ausreißer mit Energieverbräuchen $> 160 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ auftraten, bei den übertensorgten Liegenschaften war dies sehr wohl der Fall.

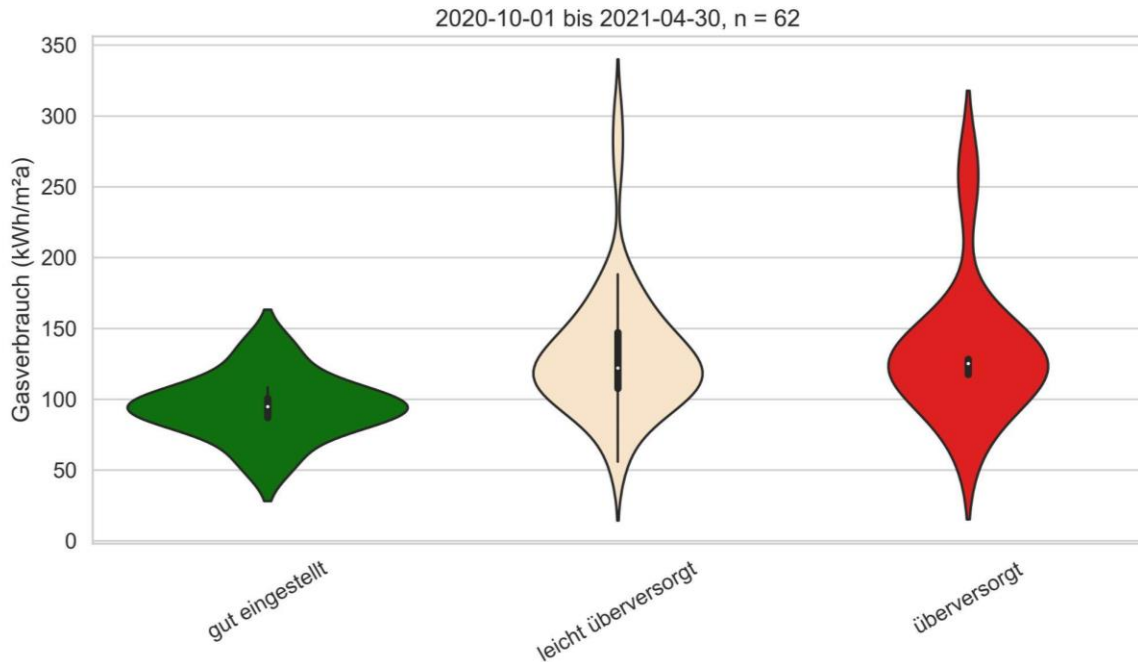


Abbildung 92: Jahresgasverbrauch gegen Betriebsführung

5.2 Einfluss der Betriebseinstellungen auf das Mieterverhalten

Der Energieverbrauch einer Liegenschaft hängt auch vom Nutzerverhalten ab. Durch Verhaltensweisen wie z.B. Dauerlüften, Dauerheizen etc. beeinflussen Mieter den Jahresenergieverbrauch einer Liegenschaft erheblich. Es wurde untersucht, ob sich Mieter in Liegenschaften mit unterschiedlicher Wärmebereitstellung (über die Einstellung der Heizkennlinie) unterschiedlich verhalten. Eine gut eingestellte Heizkennlinie bedeutet, dass weniger Heizleistung zur Verfügung gestellt wird, doch führt dieser Sachverhalt tatsächlich dazu, dass Mieter weniger Heizenergie verbrauchen?

Methodik

Die Mieter einer Liegenschaft wurden in die vorher genannten Gruppen eingeteilt. Zur Vereinfachung werden die bereits bekannten Verbrauchergruppen Vielverbraucher und Poweruser zusammengefasst. Zu dieser Gruppe gehörten alle Mieter mit einem flächenbezogenen normierten Verbrauchswert ≥ 1.5 . Zunächst wird untersucht, ob der Anteil der Vielverbraucher sich in Abrechnungseinheiten mit gut eingestellten Heizkennlinien kleiner, d.h. dass die Verbrauchs-Streuung unter den Mietern geringer ist.

Ergebnis

In Abbildung 93 wird der Anteil der Vielverbraucher je Abrechnungseinheit auf der Y-Achse dargestellt, es wird unterschieden zwischen Abrechnungseinheiten mit gut eingestellten Heizungskennlinien, leicht überversorgten und überversorgten Abrechnungseinheiten. In Abrechnungseinheiten mit gut eingestellten Heizungsanlagen (grün, n=8) ist der Anteil der Mieter, die besonders viel Heizenergie verbrauchen etwa 5%-10% geringer als in den überversorgten Abrechnungseinheiten. D.h. liegt ein Verschwendung-Potenzial durch überhöhte Vorlauftemperaturen vor, so wird dies durch einen Teil der Mieter (die zusätzlichen Vielverbraucher) genutzt. Es kommt zu Mehrverbräuchen.

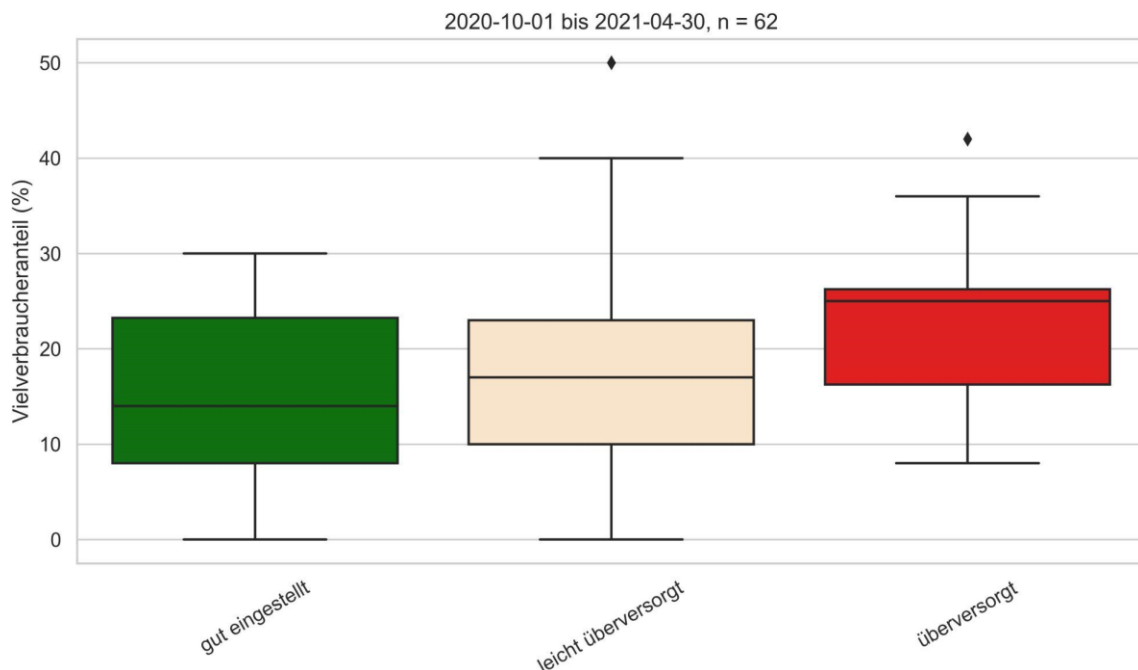


Abbildung 93: Vielverbraucheranteil nach Betriebseinstellungen

Doch wie gehen Mieter in Abrechnungseinheiten gut eingestellten Heizungskennlinien mit ihren Heizungen um? Wird länger geheizt, um die geringeren Heizleistungen auszugleichen und längere Aufheizzeiten zu vermeiden?

Methodik

Bei unregelmäßigem Heizkörpern hängt die Leistung des Heizkörpers direkt von der Vorlauftemperatur ab: Sinkt die Vorlauftemperatur, dann sinkt die Leistung des Heizkörpers. In der Praxis werden Heizkörper mittels Thermostaten, in der Regel P-Regler bzw. PI-Regler (Smarte Thermostate) geregelt. Trotz hoher Vorlauftemperaturen können daher geringe Heizkörperleistungen und damit Raumtemperaturen erzielt werden. Durch hohe Vorlauftemperaturen und entsprechende Regelcharakteristika kann jedoch z.B. der Aufheizvorgang verkürzt werden oder es kann zu einem Überschwingen der Raumtemperatur,

etc. kommen. Bei geringen Vorlauftemperaturen kann es zudem notwendig sein, länger oder dauerhaft zu heizen, da die notwendige Heizleistung zur schnellen Erhöhung des Temperaturniveaus nach einer Absenkung nicht vorliegt. Für die Auswertung werden die durchschnittlichen Tages-Heizkörper-Betriebsstunden je Abrechnungseinheit, d.h. die Zeit, in der Heizkörper im Mittel in einer Abrechnungseinheit je Tag in der Heizperiode 20/21 betrieben wurden, ermittelt.

Ergebnis

In Abrechnungseinheiten mit gut eingestellter Heizkennlinie wurden die Heizkörper im Median 6 Stunden je Tag betrieben (s. Abbildung 94) und damit etwas länger als in den überversorgten Abrechnungseinheiten. Mieter in Liegenschaften mit gut eingestellten Heizungskennlinien und dadurch geringeren Vorlauftemperaturen und geringeren möglichen Heizleistungen passten ihr Heizverhalten an, um trotzdem das gewünschte Komfortniveau zu erreichen.

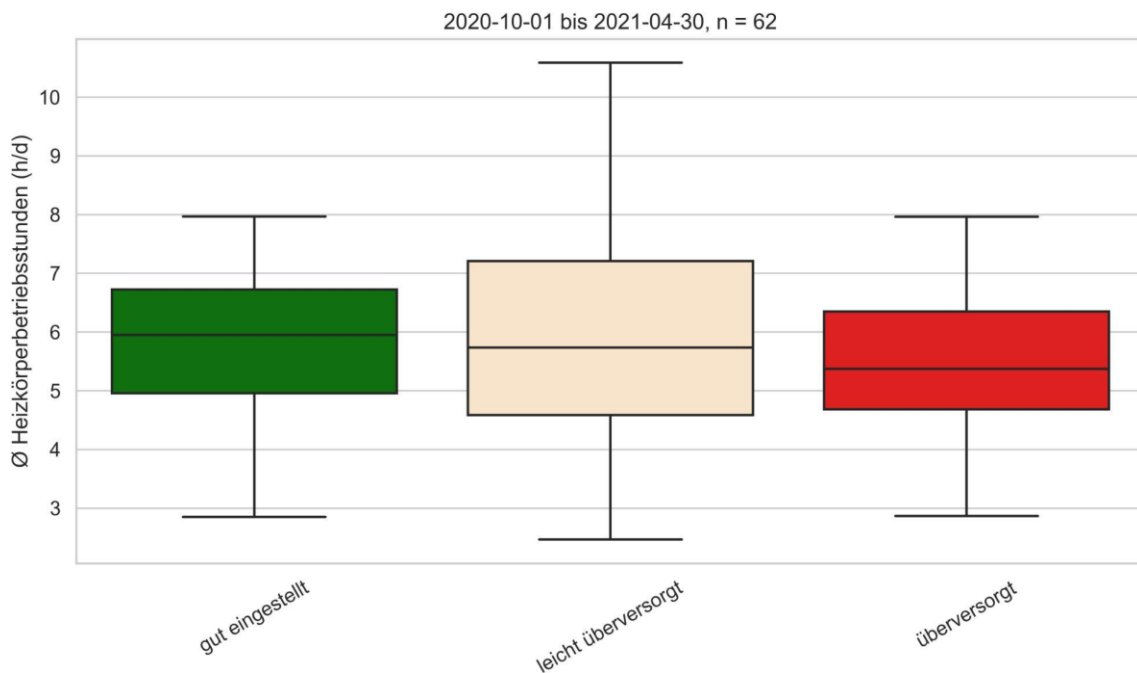


Abbildung 94: Tagesheizkörperbetriebszeit nach Gruppen

Es konnte vorher gezeigt werden, dass Mieter von gut eingestellten Heizungskennlinien profitieren und auf Abrechnungseinheiten-Ebene i.d.R. weniger Energie verbraucht wird, dass in diesen Abrechnungseinheiten weniger Mieter besonders viel Heizenergie verbrauchen und dass die geringen Temperaturniveaus zu höheren Heizkörper-Betriebszeiten führen.

Wie kommt es bei geringen Vorlauftemperaturen und damit geringen Heizkörperleistungen trotzdem zu hohen Heizenergieverbräuchen?

Es liegt nahe, dass Vielverbraucher in Abrechnungseinheiten mit geringerem Verschwendungspotenzial, d.h. gut eingestellten Heizungskennlinien, besonders lange heizen müssen, um hohe Verbräuche zu erreichen, denn aufgrund der geringeren Vorlauftemperaturen ist die Heizkörperleistung beschränkt.

Um das genauer zu untersuchen, wurde das Heizverhalten der Gruppe der Vielverbraucher genauer untersucht. Dazu wurde das Verhältnis der Heizkörper-Betriebsstunden (Betriebsstunden-Verhältnis) von Vielverbrauchern zum Durchschnitt in der jeweiligen Abrechnungseinheit ermittelt. Die Verteilung dieses Wertes ist in Abbildung 95 auf der Y-Achse aufgetragen. Das Betriebsstunden-Verhältnis ist in den überversorgten Abrechnungseinheiten deutlich weniger ausgeprägt als in den Abrechnungseinheiten mit gut eingestellten Heizungskennlinien. D.h. Mieter müssen in gut eingestellten Liegenschaften besonders lange heizen, um zum Vielverbraucher zu werden. Umgekehrt reichen überversorgten Gebäuden weniger Heizkörper-Betriebsstunden, um zum Vielverbraucher zu werden. Überversorgte Gebäude reagieren deutlich empfindlicher auf unterschiedliches Heizverhalten.

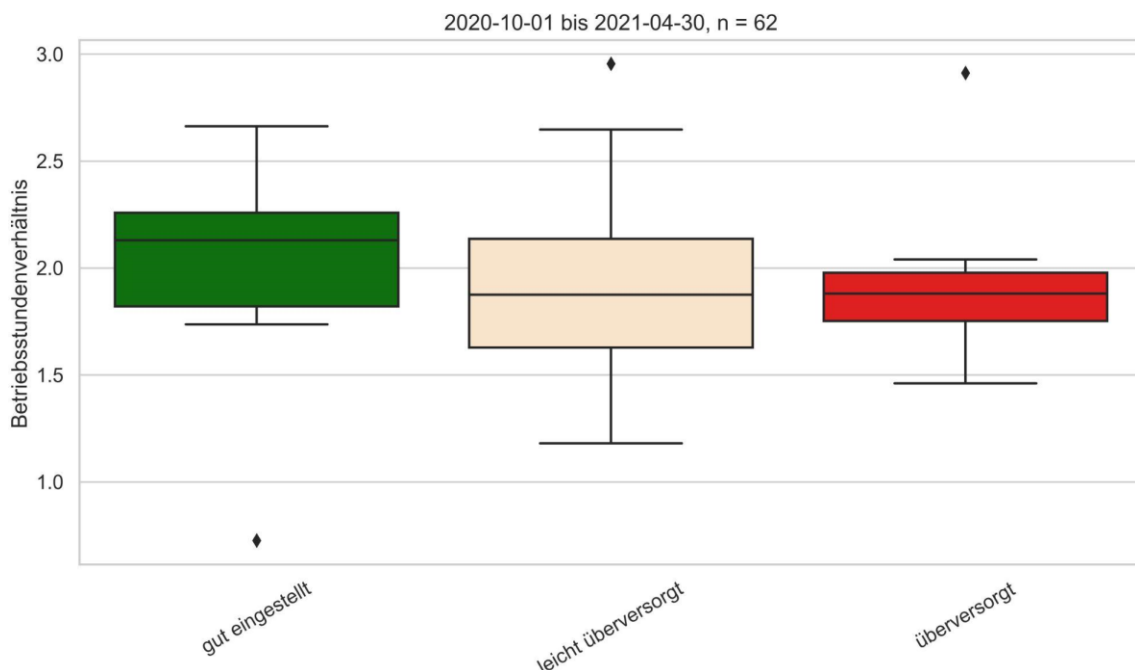


Abbildung 95: Relative Betriebsstunden von Vielverbrauchern in Abhängigkeit der Einstellung der Heizungsanlage

5.3 Wahrnehmung der Güte der Betriebsführung durch die Mieter

Die Untersuchungen der Einstellung der Heizungsanlage haben gezeigt, dass die Heizkennlinien nicht adäquat eingestellt sind. Dadurch sind die Vorlauftemperaturen üblicherweise wesentlich höher, als sie bei der entsprechenden Witterung sein müssten. Auch wurde festgestellt, dass die Reduzierung der Vorlauftemperaturen teilweise zu Beschwerden seitens der Mieter führte, so dass vorgenommene Optimierungen wieder zurückgenommen wurden. Im Rahmen einer Mieterbefragung wurde ermittelt, ob und in welchem Umfang eine Überversorgung des Gebäudes durch zu hohe Vorlauftemperaturen durch die Mieter wahrgenommen wird. Dabei wurde die Einschätzung der Mieter, ob die Temperaturen der Heizungsanlage richtig eingestellt wären, in Relation zu der mittleren Abweichung der Heizkennlinie von der idealen Solltemperatur gestellt (s. Abbildung 96). Zur Ermittlung der idealen Solltemperatur, wurde eine Heizkennlinie mit einer Steilheit von 1,4 und einer einem Fußpunkt von 30°C angenommen.

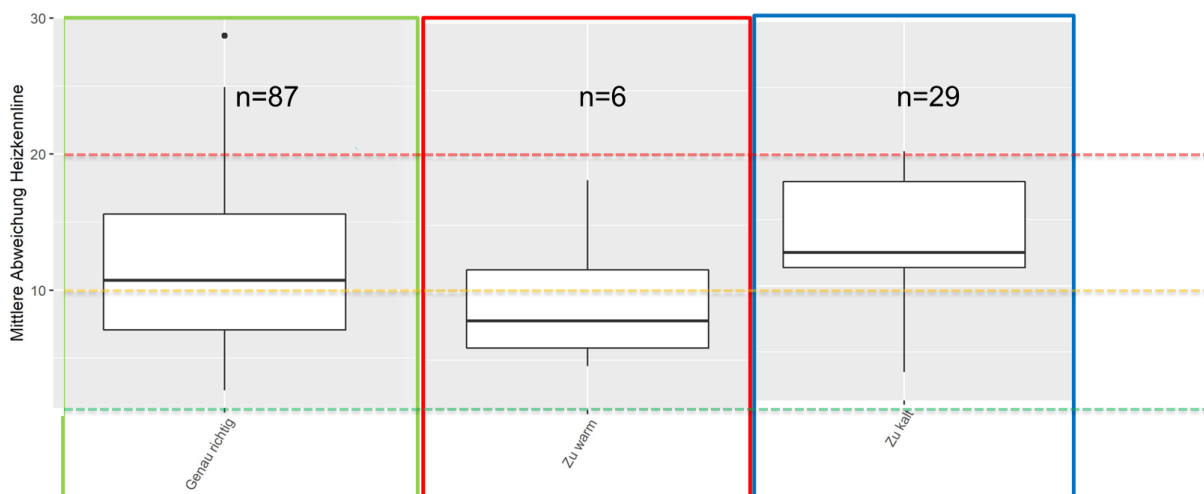


Abbildung 96: Bewertung der Einstellungen der Heizungsanlage in Abhängigkeit der mittleren Abweichung der Heizkennlinie von einem Idealwert.

Der überwiegende Teil der Mieter hielt die Einstellung der Heizungsanlage für korrekt, obwohl die Vorlauftemperatur im Mittel um mehr als 10 Kelvin von der idealen Einstellung abwich. Sechs Mieter empfanden die Einstellung der Heizungsanlage als zu warm. Die Auswertung (s. Abbildung 97) zeigt, dass diese Gruppe nur unterdurchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper hat und konsequenterweise auch einen unterdurchschnittlichen normierten flächenbezogenen Verbrauchswert. Diese Gruppe profitiert sicherlich auch von Wärme-Einträgen in der Wohnung, die nicht durch Heizkostenverteiler erfasst werden.

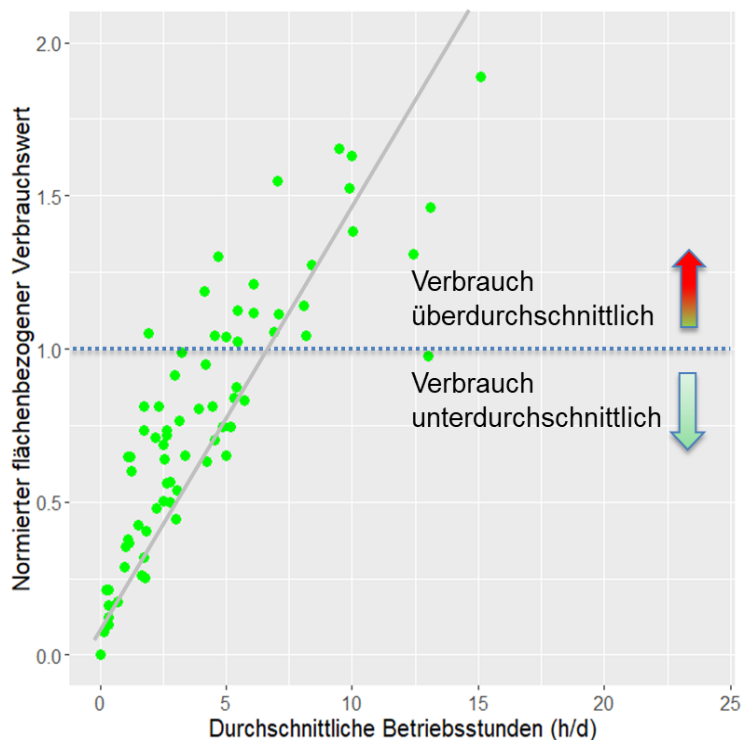


Abbildung 97: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte, bei Befragten die Ihre Heizungsanlage als genau richtig eingestellt empfanden

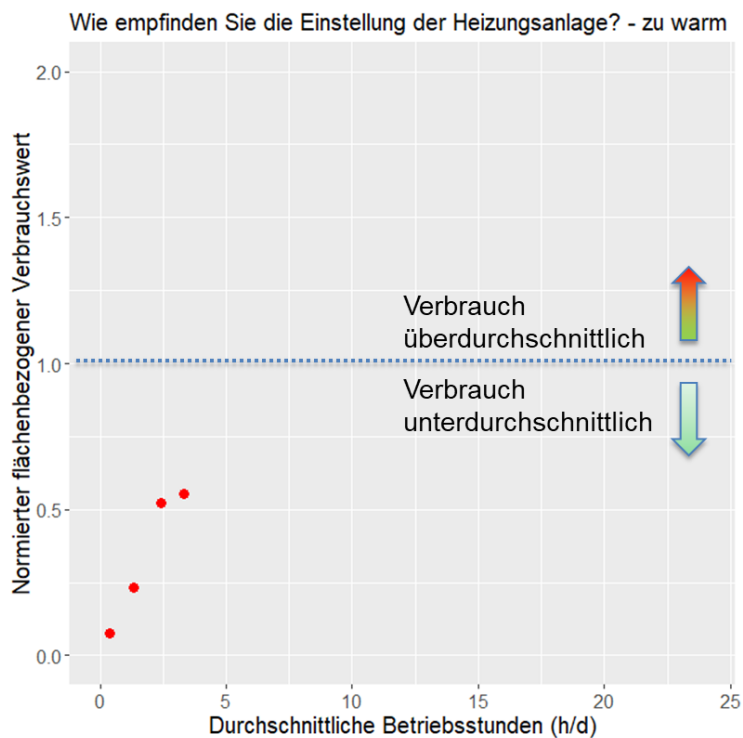


Abbildung 98: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte, bei Befragten die Ihre Heizungsanlage als zu warm empfanden

29 Mieter empfanden die Einstellung der Heizungsanlage als subjektiv zu kalt. Dies erscheint widersprüchlich, da in diesen Gebäuden die höchsten mittleren Abweichungen der Vorlauftemperaturen von der Idealtemperatur vorlagen. Grundsätzlich unterscheidet sich die Verteilung der Heizkörper Betriebsstunden und der korrespondierenden, normierten, flächenbezogenen Verbrauchswerte nicht signifikant von den Mietern, die mit der Einstellung der Heizungsanlage zufrieden sind (s. Abbildung 99). Erstaunlicherweise haben ca. ein Drittel der Befragten nur eine unterdurchschnittliche Anzahl von Heizkörper-Betriebsstunden (s. Kreis in Abbildung 99).

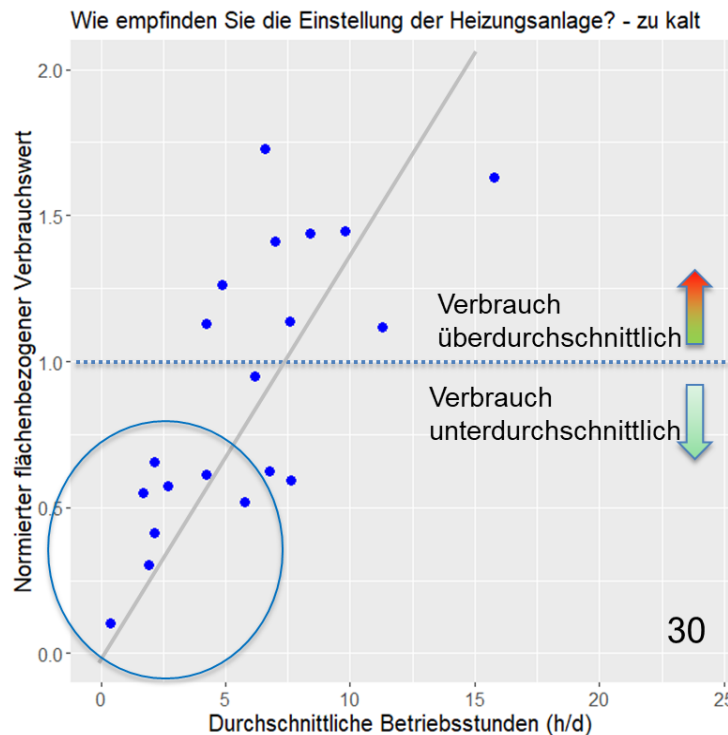


Abbildung 99: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte bei Befragten, denen die Heizungsanlage auf zu niedrige Temperaturen eingestellt ist.

Bei den Befragten, die die Temperatur in der Heizung als zu niedrig empfanden, ist eine Gruppe zu erkennen, die trotz hoher Heizkörper-Betriebsstunden niedrigere normierte flächenbezogene Verbrauchswerte aufweisen, als es nach den Heizkörper Betriebsstunden zu erwarten gewesen wäre. (s. Abbildung 100, Ellipse). Dies kann ein Indikator dafür sein, dass es hydraulische Probleme in der Anlage gibt. Somit würden die Heizkörper in den Wohnungen prinzipiell laufen, aber nicht die notwendige Heizleistung besitzen.

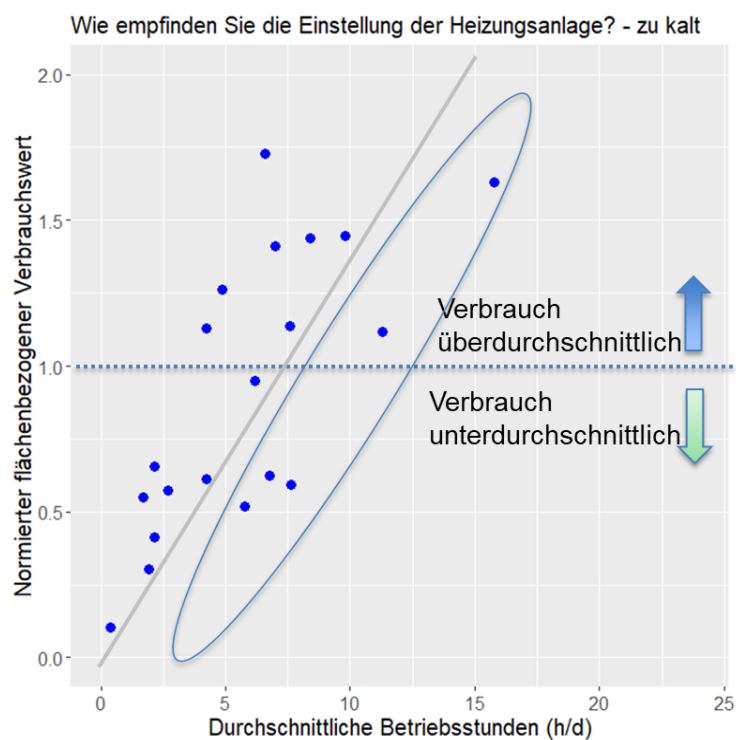


Abbildung 100: Einfluss des Thermostattyps auf das Verbrauchsverhalten

6 Anlagenoptimierung

Mieter zeigten ein sehr vielfältiges Heiz- und Lüftungsverhalten. Einige Mieter heizten nicht oder kaum, um Energie zu sparen, bei diesen Mietern ist der Wärmetransfer aus Nachbarwohnungen oder über Rohrwärme besonders hoch. Andere Mieter heizten bei gekippten Fenstern oder passten ihr Heizverhalten nur bedingt an den eigenen Bedarf an, z.B. indem sie die Raumtemperaturen beim Verlassen der Wohnung reduzierten.

Es konnte gezeigt werden, dass Verhaltensweisen, die zu einem Mehrverbrauch führen, in übertensorgten Abrechnungseinheiten besonders häufig auftreten. Zudem waren Verbräuche, zwischen den Mietern in diesen Abrechnungseinheiten besonders ungleich verteilt. Der spezifische Wärmeverbrauch ist in übertensorgten Abrechnungseinheiten bis zu 30% erhöht gegenüber gut versorgten. Die Gründe für eine Übertensorgung sind vielfältig, vielfach werden Heizungskessel schon bei der Installation sehr großzügig dimensioniert und parametrisiert.

Vermutlich werden Mieterbeschwerden bzgl. "zu kalter Heizkörper" auch nicht immer ausreichend auf Stichhaltigkeit geprüft, stattdessen wird dann das Temperaturniveau der Vorlauftemperatur durch einen Servicetechniker ungeprüft erhöht. Nicht vom Projektteam induzierte Eingriffe von Haustechnikern zur Erhöhung der Effizienz der Betriebsführung konnten während des Projektes nicht beobachtet werden, das Gegenteil schon. D.h. die Betriebseinstellungen eines Kessels verschoben sich bei Service-Einsätzen immer weiter von einem effizienten Betriebsmodus hin zur Übertensorgung, welche die Mieter offensichtlich zufrieden stellte.

Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass Mieter grundsätzlich kein Interesse an einer energieeffizienten Betriebsführung haben und nicht bereit sind, (kleine) Komforteinbußen hinzunehmen. In Kooperation mit dem InWIS durchgeführte Umfragen in den Projektliegenschaften zeigten, dass z.B. die meisten Mieter keinerlei Probleme mit der einer Sommerabschaltung der Heizungsanlagen hatten. Trotzdem wurden in den Abrechnungseinheiten des BaltBest Projektes im Jahr 2020 nur 12 von 67 Anlagen weniger als 10 Tage in den Sommermonaten Juni, Juli und August betrieben (s. Abbildung 101). In einigen Abrechnungseinheiten wurde an Sommertagen mit einer Außentemperatur von mehr als 20°C bis zu 10% des Jahreswärmeverbrauchs umgesetzt (s. Abbildung 102). Es ist davon auszugehen, dass, um prophylaktisch Beschwerden einzelner Mieter aus dem Weg zu gehen, die Heizungsanlagen im Sommer nicht abgeschaltet wurden. Die Wirkung auf den Energieverbrauch und damit auf die Heizkosten, ist für Mieter, als auch für die Leitung der

Wohnungsunternehmen nicht transparent. Die Motivation der Servicetechniker, die Anlagen im Sommer abzuschalten, ist dementsprechend gering.

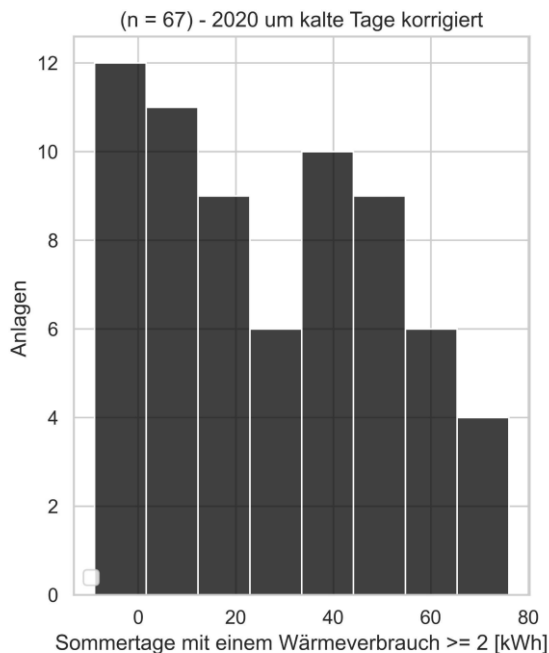


Abbildung 101: Sommerliche Heizungsaktivität

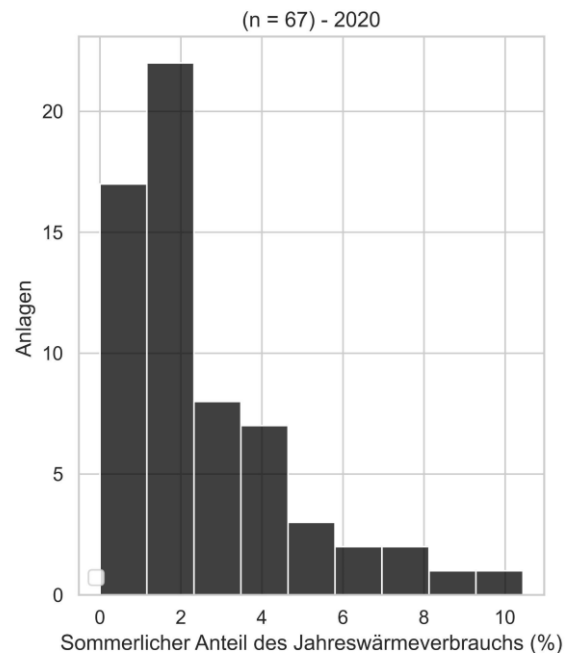


Abbildung 102: Sommerlicher Verbrauchsanteil

Ähnliches zeigte sich bei der Thematik der Nachtabenkung. Gemeinsam mit dem InWIS durchgeführte Umfragen zeigten, dass eine Mehrheit der Mieter Nachtabenkungen akzeptiert, trotzdem waren diese in den Projektliegenschaften kaum aktiviert. Oftmals wird als Grund genannt, dass aufgrund der unterschiedlichen Bedürfnisse der Mieter wegen ganz unterschiedlicher Anwesenheitszeiten (z.B. bei Mietern, die in Nachtschicht arbeiten) das Einstellen von effektiven Nachtabenkungen nicht möglich wäre. Es konnte aber auch festgestellt werden, dass an einigen Anlagen Zeitprogramme aktiviert waren, die aber aufgrund der falsch eingestellten Heizkennlinien keinerlei Wirkung auf das Temperaturniveau in der Nacht hatten.

Im BaltBest Projekt wurde eine systematische Einstellung der Heizungsanlagen durchgeführt, um den Energieverbrauch zu senken. Die EBZ BS und die TU Dresden erarbeiteten Vorschläge für die Änderungen der Betriebsparameter, welche von Servicetechnikern der Techem GmbH und der EnergieServicePlus GmbH in den Abrechnungseinheiten umgesetzt wurden. Im Zeitraum von Februar 2020 bis Mai 2021 wurden 79 Optimierungen durchgeführt.

Die durchgeführten Optimierungen sind in Abbildung 103 im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die Farbe zeigt, wer die jeweiligen Optimierungsvorschläge erarbeitet hatte.

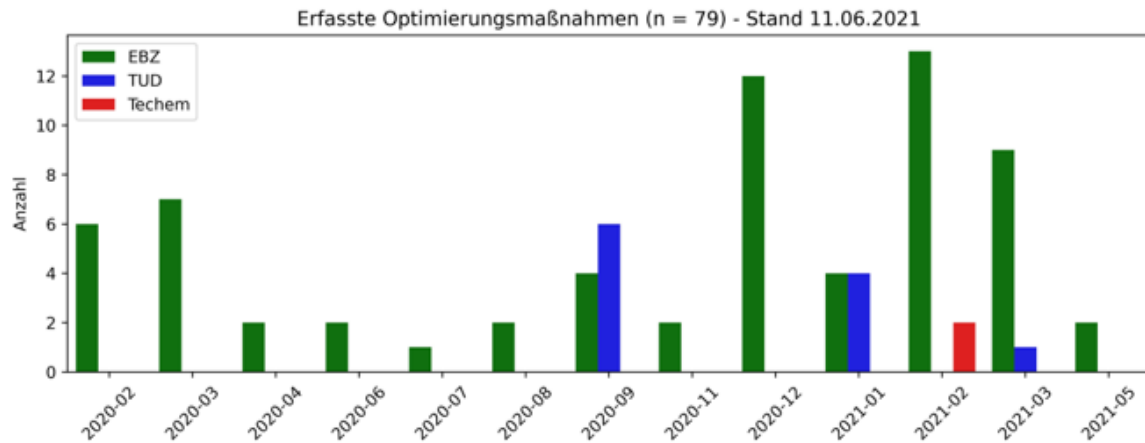


Abbildung 103: Durchgeführte Optimierungen

Zur Untersuchung der Wirkung durchgeführter Maßnahmen wurden die 79 Anlagen-Optimierungen in 47 Abrechnungseinheiten mit 354 einzelne Maßnahmen durchgeführt. Die nicht optimierten Anlagen bildeten, dabei die Referenzgruppe.

Die Betriebsparameter, welche Grundlage der Optimierungsvorschläge waren, sind im Folgenden beschrieben:

- Die Neigung (auch Steilheit oder Steigung) einer Heizkennlinie beschreibt, um wie viele Kelvin sich die Vorlauftemperatur bei einer Änderung der Außentemperatur um ein Kelvin ändert. Zweck des Parameters ist es, eine ausreichende Leistung bereitzustellen, um die von der Außentemperatur abhängigen Transmissions- und Lüftungsverluste auszugleichen.
- Mit der Soll-Raumtemperatur (auch Tagestemperatur, Fußpunkt-Temperatur, etc. genannt) wird das Fußpunkt-Vorlauftemperatur-Niveau einer Heizkennlinie eingestellt. Die Soll-Raumtemperatur beschreibt, welche Raumtemperatur sich einstellt, wenn alle Ventile der Heizkörper geöffnet sind.
- Mit der Parallelverschiebung (auch Niveauverschiebung etc.) wird die Heizkennlinie i.d.R. entlang der Y-Achse verschoben. Wird eine Heizkennlinie parallel verschoben, wird das Leistungsniveau (Außentemperatur unabhängig) angehoben oder gesenkt. Dies beeinflusst die Soll-Raumtemperatur.
- Zeitprogramme ermöglichen es, Vorlauftemperatur-Absenkbetriebe einzustellen. Meist werden diese genutzt, um die Vorlauftemperatur nachts abzusenken und eine Nachtabenkung zu erzielen. Hierzu wird entweder eine Absenk-Betriebstemperatur oder eine Absenk-Parallelverschiebung eingestellt. Um unerwünschte Betriebszustände zu vermeiden, kann die Vorlauftemperatur durch die Kessel-Maximaltemperatur / -Minimaltemperatur beschränkt werden.

- Mit der Sommerabschaltung kann bestimmt werden, ob ein Heizkessel während der Sommermonate eingeschaltet werden soll. An kühleren Sommertagen kann es dazu kommen, dass sich der Heizkessel einschaltet und Wärme produziert, obwohl die Wärmedämmung und -kapazität des Hauses noch genügt, um ein angemessenes Raumklima zu halten.
- Über die Förderhöhe wird der Pumpendruck eingestellt. In Abhängigkeit der Widerstände im Rohrleitungsnetz stellt sich durch Vorgabe der Förderhöhe ein Heizwasser-Volumenstrom ein.

Ein großer Bedarf bestand bei der Einstellung Heizkennlinie, d.h. vor allem der Neigung und Soll-Raumtemperatur, hierdurch konnten die Vorlauftemperatur-Niveaus bedeutend abgesenkt werden. Zu Beginn des Projektes gab es den BaltBest Liegenschaften kaum wirksame Nachtabsenkbetriebe. Ein Nachtabsenkbetrieb ist wirksam, wenn die Vorlauftemperatur so weit abgesenkt wird, dass das Leistungsniveau sinkt. In der Praxis konnte beobachtet werden, dass Nachtabsenkbetriebe durch die automatische Öffnung der Thermostatventile bei sinkenden Raumtemperaturen zu steigenden Heizwasser-Volumenströmen führten, wodurch sich das Leistungsniveau kaum änderte. Eine nennenswerte Absenkung fand erst statt, wenn bei vollständig geöffneten Thermostatventilen die Raumtemperatur nicht mehr gehalten werden kann. Die durchgeführten Einzelmaßnahmen werden in Abbildung 104 dargestellt.

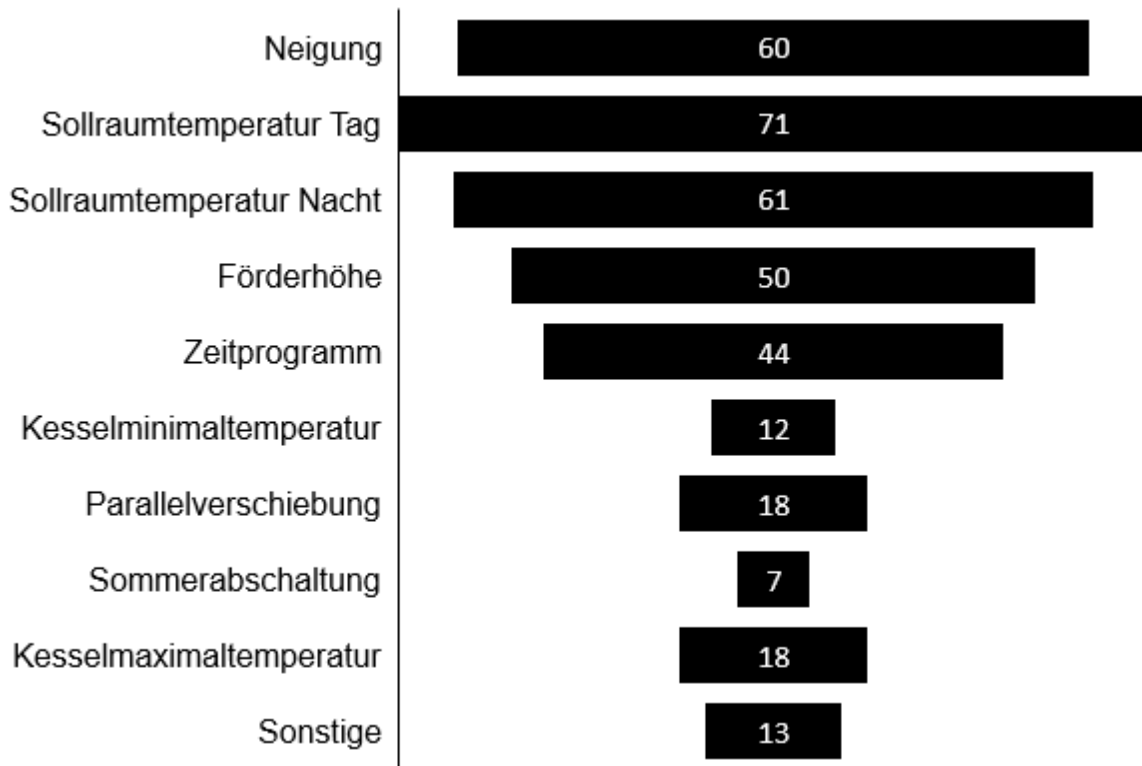


Abbildung 104: Anzahl und Art der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen

Der Optimierungserfolg wird durch den Vergleich des witterungsbereinigten Gasverbrauchs innerhalb eines Zeitraums von jeweils 2 Wochen vor und nach der Optimierung bestimmt. Optimierungsmaßnahmen, die in einem Zeitraum mit durchschnittlichen Temperaturen größer als 15°C durchgeführt wurden (Frühjahr, Sommer und Winter) ließen sich mit dem Verfahren nicht betrachten und wurden in den folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt. Von 79 durchgeführten und dokumentierten Optimierungen konnten 57 weiter analysiert werden. Durch das Fitting der Wärmebereitstellung an den Wärmebedarf konnten zudem Rücklauftemperaturen reduziert werden. Aufgrund der geringeren Rücklauftemperaturen konnte der Brennwert-Effekt besser genutzt werden. Der Nutzungsgrad der Brennwertkessel stieg im Durchschnitt um 1,8% an. Die Nutzungsgrad-Änderung streute dabei stark, wie in Abbildung 105 dargestellt wird. Während einige Maßnahmen zu einer Verschlechterung des Nutzungsgrades geführt haben, wurde der Nutzungsgrad bei den meisten Maßnahmen verbessert. Das Ziel der Optimierungsmaßnahmen war die Reduktion des Gasverbrauches durch eine Anpassung der Wärmebereitstellung an den Wärmebedarf.

Da keine baulichen Änderungen durchgeführt wurden, sind Änderungen des Nutzungsgrades, die über eine Reduktion der Bereitschaftsverluste und eine bessere Nutzung des Brennwert-Effektes hinausgehen nicht erklärbar. Trotzdem wurde bei zwei Maßnahmen eine Zunahme

des Nutzungsgrades um mehr als 15% festgestellt. Um nicht zu stark vom Projektscope abzuweichen, wurden diese Sondereffekte nicht weiter untersucht.

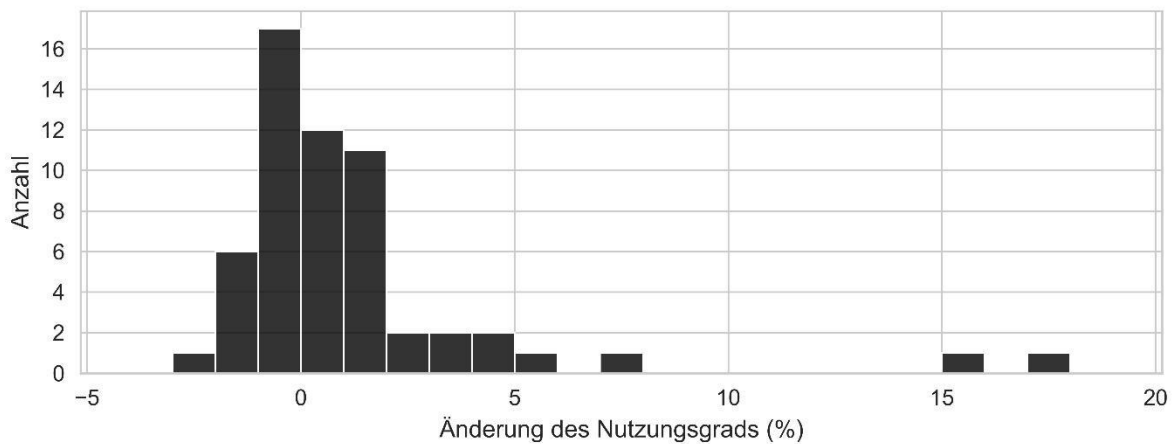


Abbildung 105: Einfluss der Optimierungen auf den Nutzungsgrad (n = 57)

Der witterungsbereinigte Gasverbrauch konnte im Durchschnitt um 6,3% bei einer Standardabweichung von 6,7% gesenkt werden (s. Abbildung 83). Sechs Optimierungen haben zu einem Mehrverbrauch von 5-15% geführt, weitere 17 Optimierungen führten zu moderaten Mehrverbräuchen von bis zu 10%. Auf der anderen Seite konnten in 37 Optimierungsmaßnahmen bis zu 40% des Gasverbrauchs eingespart werden (s. Abbildung 106).

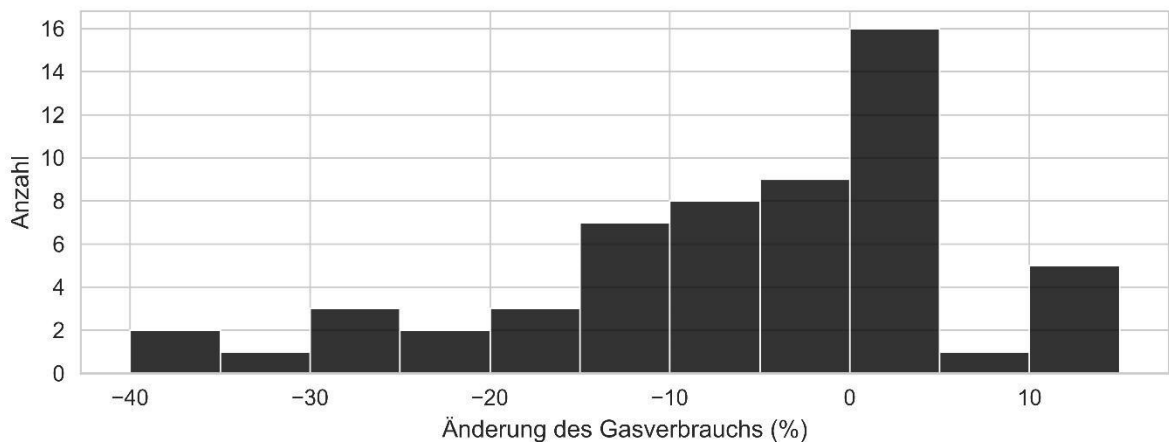


Abbildung 106: Einfluss der Optimierungen auf den Gasverbrauch

Durch die Optimierungsmaßnahmen konnte der Gasverbrauch stärker reduziert werden, als es durch die Änderung des Nutzungsgrades erklärbar wäre. D.h. eingespart wurde vermutlich durch die Reduktion der Verluste bei der Wärmeverteilung und eine Reduzierung des Verschwendungspotenzials durch Nutzerverhalten. In Abbildung 107 wird dies verdeutlicht, die Änderung des Gasverbrauchs wird auf der X-Achse gegenüber der Änderung des

Nutzungsgrades auf der Y-Achse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Änderung des Gasverbrauches nicht signifikant mit der Änderung des Nutzungsgrades korreliert.

Im Rahmen der 57 untersuchten Optimierungen konnte der Nutzungsgrad nur geringfügig beeinflusst werden, während der Wärmebedarf effektiv gesenkt werden konnte.

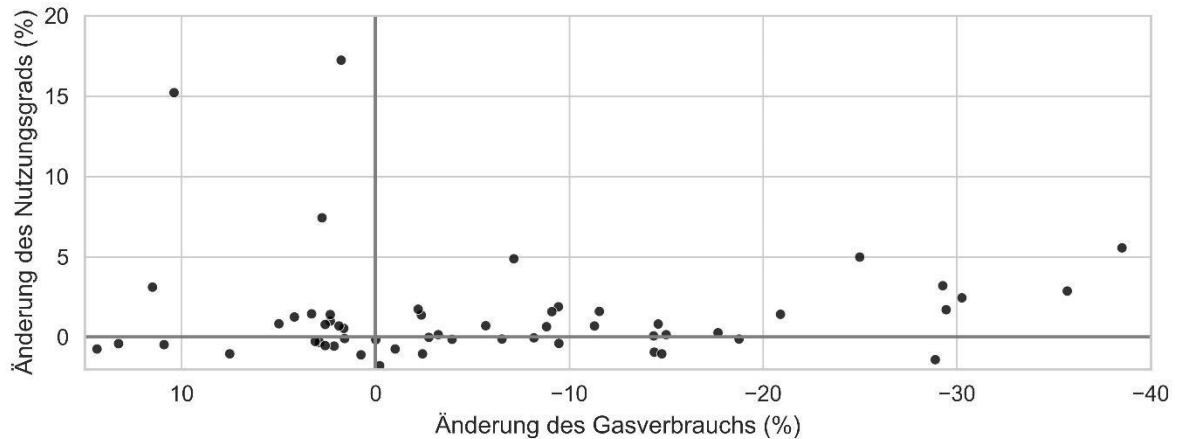


Abbildung 107: Zusammenhang der Änderung des Gasverbrauchs und des Nutzungsgrads

Zur Aufschlüsselung der für einen Optimierungs-Erfolg oder -Misserfolg entscheidenden Faktoren wurden die Optimierungsmaßnahmen in folgende drei Gruppen aufgeteilt:

1. Erfolgreiche Optimierungsmaßnahmen (Erfolg, Einsparungen >3%, n=26)
2. Optimierungsmaßnahmen (Keine Änderung, -3%>Einsparung >3%, n=11)
3. Fehlgeschlagene Optimierungsmaßnahmen (Misserfolg, Einsparungen <-3%, n=20)

Bei erfolgreichen Optimierungsmaßnahmen konnten im Mittel 14,6% Gas eingespart werden, während Misserfolge im Mittel zu einem Mehrverbrauch von 8,9% führten. Die Einsparungen nach Gruppe werden in Abbildung 108 dargestellt, der Mittelwert wird durch ein grünes Dreieck markiert.

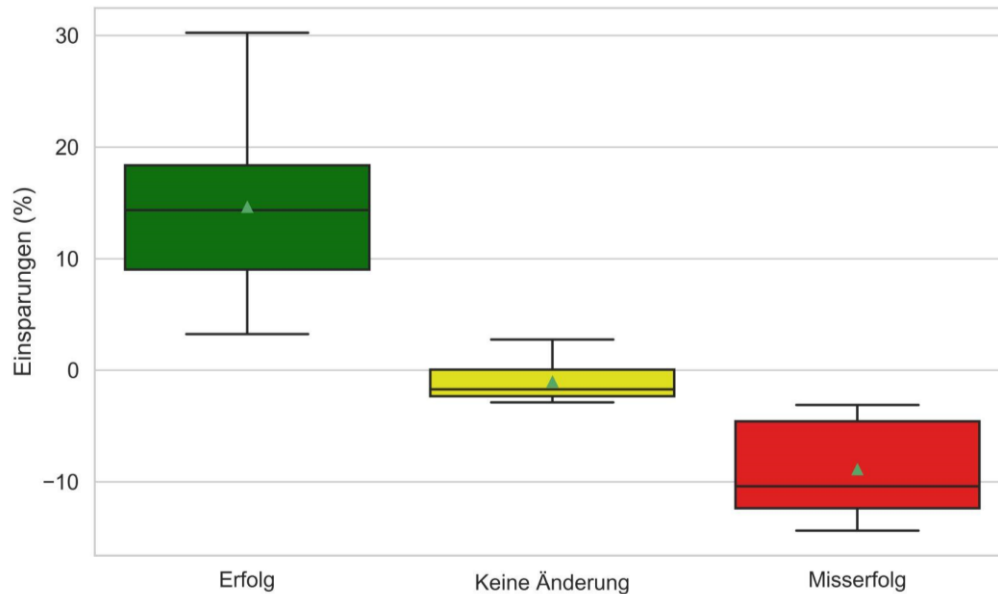


Abbildung 108: Optimierungsmaßnahmen nach Erfolg

Wichtigste Maßnahmen der Optimierungen waren die Einstellung von Heizkennlinien und Absenkbetrieben, hierdurch wurden die durchschnittliche Vorlauftemperatur während der Betriebszeit gesenkt und so die potenzielle Wärmebereitstellung reduziert.

Es zeigte sich, dass der Optimierungs-Erfolg und die Änderung der durchschnittlichen Vorlauftemperatur miteinander korrespondieren. Eine Absenkung der Vorlauftemperatur um im Schnitt 5 Kelvin führte zu einer erfolgreichen Optimierungsmaßnahmen. Wurde die Vorlauftemperatur erhöht, führte das in der Regel zu Mehrverbräuchen und zu einem Misserfolg der Optimierung (s. Abbildung 109). Zur Optimierung wurden i.d.R. nur Liegenschaften mit Optimierungspotenzial ausgewählt, Kriterien waren unter anderem hohe Vorlauftemperaturen, keine oder nur eine geringfügige Witterungsabhängigkeit der Vorlauftemperatur, hohe Gasverbräuche etc. Die Kriterien führten zu einer relativen Vergleichbarkeit der Status-Quo-Bedingungen wie z.B. der Vorlauftemperatur bei 0°C Außentemperatur.

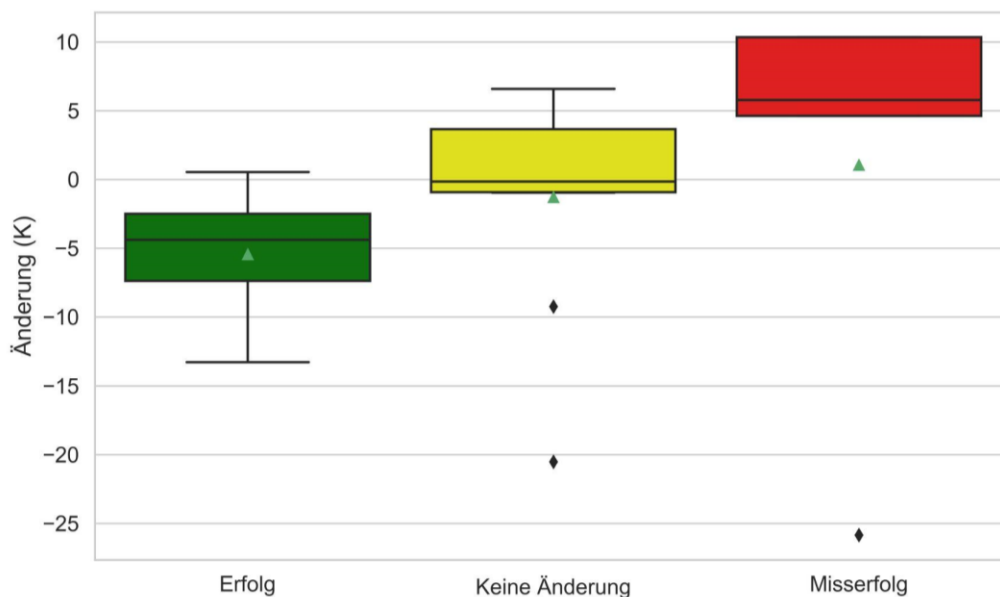


Abbildung 109: Änderung der Vorlauftemperatur nach Gruppen

Diese wird in Abbildung 110 für die unterschiedlichen Gruppen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese Vorlauftemperatur für alle Gruppen etwa zwischen 60°C und 70°C lag und die später erfolgreichen Optimierungsmaßnahmen schon vor dem Eingriff etwas geringere Vorlauftemperaturen aufwiesen. Das zeigte, dass das Einspar-Potenzial bei den weniger erfolgreichen Optimierungsmaßnahmen vermutlich noch nicht ausgeschöpft wurde, denn das Senken von Vorlauftemperaturen führte offenbar zu einer Reduktion des Gasverbrauches, zeitgleich nahmen die durchschnittlichen Vorlauftemperaturen in diesen Gruppen jedoch mit dem Gasverbrauch zu.

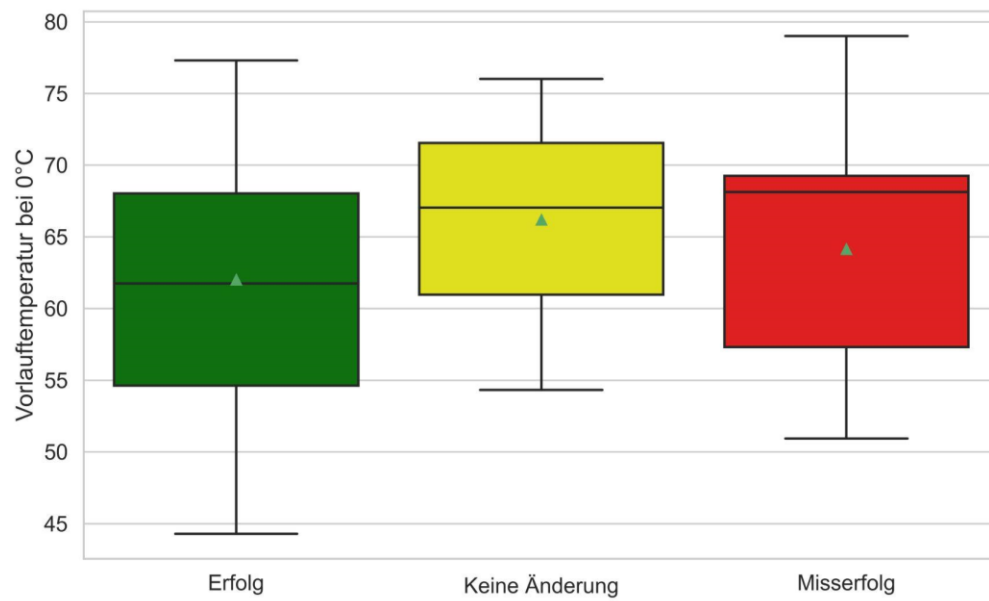


Abbildung 110: Status Quo – Vorlauftemperaturen

6.1 Bedeutung der Ergebnisse für den deutschen Wohngebäudebestand:

Die im Projekt erzielten Optimierungsergebnisse sind relevant für Mehrfamilienhäuser mit mehr als drei Wohnungen, welche vor dem Jahr 2002 gebaut worden sind und mit Gas beheizt werden. Die in Deutschland bis 2009 gebauten Wohngebäude werden in Abbildung 111 dargestellt. Insgesamt verfügte Deutschland bis 2009 über 3,233 Millionen Wohngebäude mit mehr als drei Wohnungen (MFH + AB), davon wurden 97% bis zum Jahr 2002 gebaut.

construction		SFH	TH	MFH	AB	sum	fraction
year class		number of buildings (1000)					
1	... 1859	330	148	54	0.6	533	3 %
2	1860 ... 1918	966	492	442	28.7	1929	11 %
3	1919 ... 1948	1131	710	388	7.4	2236	12 %
4	1949 ... 1957	859	447	356	17.3	1679	9 %
5	1958 ... 1968	1509	633	586	34.0	2762	15 %
6	1969 ... 1978	1507	611	412	50.1	2580	14 %
7	1979 ... 1983	704	335	146	15.0	1200	7 %
8	1984 ... 1994	1160	652	309	28.7	2150	12 %
9	1995 ... 2001	1035	619	244	20.9	1919	11 %
10	2002 ... 2009	775	384	85	7.6	1251	7 %
sum		9976	5030	3023	210	18239	100 %
fraction		55 %	28 %	17 %	1 %	100 %	

Abbildung 111: Deutscher Wohngebäudebestand

Die bis zum Jahr 2002 gebauten Wohngebäude mit mehr als 3 Wohnungen verfügen über 1,407 Milliarden m² beheizte Fläche, siehe Abbildung 112.

construction		SFH	TH	MFH	AB	sum	fraction
year class		living space (million m ²)					
1	... 1859	46	19	16	0.7	82	2 %
2	1860 ... 1918	135	62	163	35.8	396	11 %
3	1919 ... 1948	150	82	129	7.9	370	10 %
4	1949 ... 1957	116	52	125	17.0	309	9 %
5	1958 ... 1968	218	76	225	47.1	567	16 %
6	1969 ... 1978	233	79	169	86.7	569	16 %
7	1979 ... 1983	110	45	64	21.9	240	7 %
8	1984 ... 1994	178	85	133	34.8	431	12 %
9	1995 ... 2001	158	80	104	25.5	368	10 %
10	2002 ... 2009	119	52	39	10.4	220	6 %
sum		1463	633	1168	288	3552	100 %
fraction		41 %	18 %	33 %	8 %	100 %	

Abbildung 112: Wohnfläche im deutschen Wohngebäudebestand²³

Verteilung der Beheizungstypen über die beheizte Fläche angenommen, so werden 917,4 Millionen m² mit Gas beheizt²⁴. Nach dem Techem Energiekennwertebericht ist bei diesen Flächen mit einem witterungsbereinigten, durchschnittlichen Gasverbrauch von 142 kWh/m²a zu rechnen²⁵. Es ergibt sich ein Gasverbrauch der Bestandsmehrfamilienhäuser von 130,3 TWh/a und ein Ausstoß von (bei einem angenommenen spezifischen CO₂ Ausstoß von 202 g/kWh Erdgas²⁶) 26,3 Millionen Tonnen CO₂. Unter der Annahme, dass Anlagen so lange optimiert werden, bis eine Optimierung zu Einsparungen führt, werden 14,6% mögliche Einsparungen gegenüber dem Status-Quo angenommen. Damit könnten jährlich im deutschen Mehrfamilienhausbestand durch das Einführen eines Monitoringsystems und der Durchführung von Optimierungsmaßnahmen 19 TWh und 3,84 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden.

²³ Bundesamt, S., Bautätigkeit und Wohnungen, 2020.

²⁴ Dipl.-Ing. Hermann Bliesener, So sieht es aus: Deutschlands typisches Mehrfamilienhaus, 2020.

²⁵ Techem, Energiekennwerte, 2019.

²⁶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), www.bmu.de, Verordnung über die Emissionsberichterstattung nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz für die Jahre 2021 und 2022, 2020.

7 Kesseltausch

Der Heizkessel (im Folgenden auch Heizkessel oder Feuerungskessel) ist das Herz der Heizungsanlagen-Technik. Zur Bereitstellung von Wärme werden Energieträger wie z.B. H-Gas, Heizöl, L-Gas, etc. verbrannt. Im gesamten deutschen Mehrfamilienhaus-Bestand werden 65% der Kessel mit Erdgas und 21% mit Heizöl befeuert (s. Abbildung 111). Im BaltBest Projekt werden 92% der Kessel mit Erdgas und 3% mit Heizöl befeuert (s. Abbildung 112).

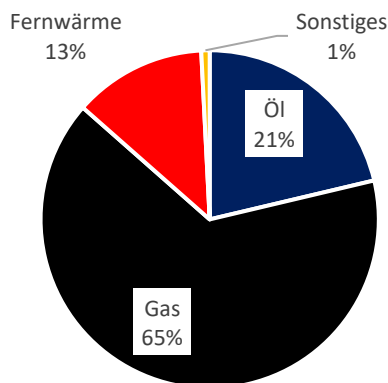


Abbildung 111: Energieträger für die Wärmeversorgung im deutschen Bestand²⁷

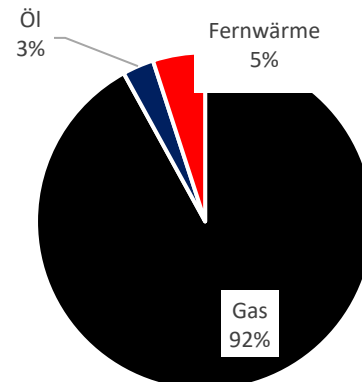


Abbildung 112: Energieträger im BaltBest Projekt

Feuerungskessel, welche den im Abgas enthaltenen Wasserdampf zur Warmegewinnung auskondensieren, werden als Brennwertkessel bezeichnet. Gegenüber Niedertemperaturkesseln können ca. 11% höhere theoretische Nutzungsgrade erzielt werden. Aufgrund des höheren maximalen Nutzungsgrads von Brennwertkesseln sind Heizkessel, die älter als 30 Jahre sind, nach der EnEV 2014 außer Betrieb zu nehmen. In den Abrechnungseinheiten des BaltBest Projektes wurden Brennwertkessel ab dem Jahr 1999 verbaut und setzten sich ab Mitte der 2000er Jahre gegenüber Niedertemperaturkesseln durch. Der aktuelle Stand (2021) des BaltBest Bestandes wird in Abbildung 113 dargestellt. In Schwarz wird die Anzahl der verbauten Niedertemperaturkessel und in Rot die Anzahl der Brennwertkessel dargestellt.

²⁷ Dipl.-Ing. Hermann Bliesener, So sieht es aus: Deutschlands typisches Mehrfamilienhaus, 2020.

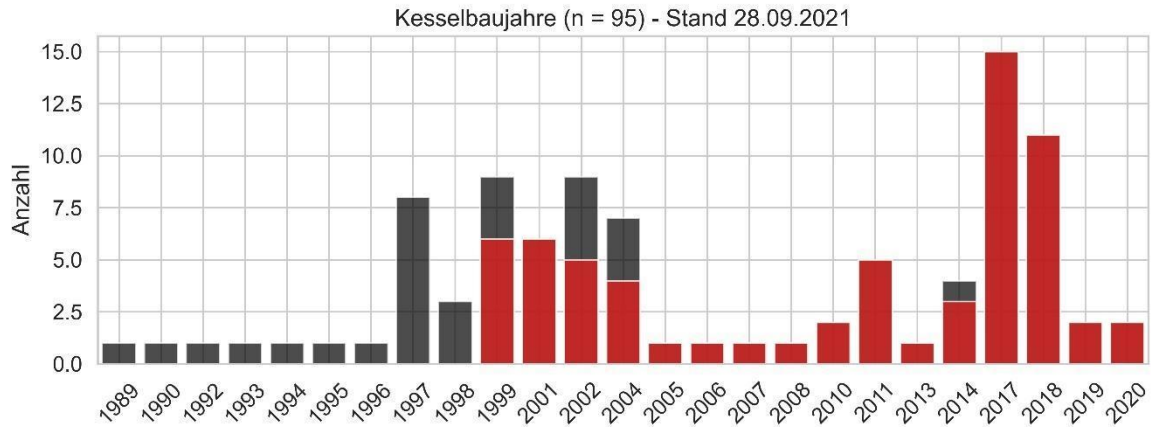


Abbildung 113: Baujahre und Art der der Heizkessel in den BaltBest Liegenschaften

Für die Auswahl eines neuen Heizkessels sind unter anderem der Sanierungszustand des Gebäudes, das vorhandene Heizungssystem (Heizkörper, Wärmeübergabe), der Standort des Gebäudes und die zu beheizende Fläche relevant.

Die mittlere Nennwärmeleistung der BaltBest Kessel beträgt Stand 2021 66 kW (s. Abbildung 114 a) und korreliert schwach mit der beheizten Fläche und dem Kesselalter (s. Abbildung 114b), hier wird die beheizte Fläche auf der X-Achse, die Nennwärmeleistung auf der Y-Achse und das Kesselalter farblich eingefärbt dargestellt.

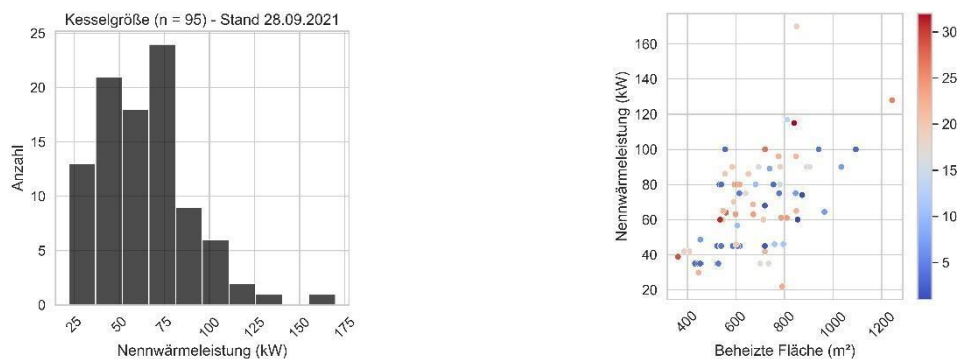


Abbildung 114: Auslegung Wärmeerzeuger: a) Nennwärmeleistung, b) Beheizte Fläche – Nennwärmeleistung - Kesselalter

Die Leistung der Heizkessel in den Liegenschaften wird über deren Volllastbetriebsstunden verglichen. Eine Volllastbetriebsstunde Vh_a berechnet sich aus dem Verhältnis der im Bezugszeitraum produzierten Wärmemenge $Q_{ges(a)}$ zur Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers $\dot{Q}_{max}$.

$$Vh_a = \frac{Q_{ges(a)}}{\dot{Q}_{max}} \quad \text{Gl.4}$$

Hersteller empfehlen die Kesselgröße so zu wählen, dass Kessel im Jahr etwa 1700 – 2300 Volllastbetriebsstunden erreichen. Im Jahr 2020 konnten für 61 Abrechnungseinheiten

Messdaten zur Berechnung der Volllaststunden erfasst werden (s. Abbildung 115). Die meisten Wärmeerzeuger erreichten 2020 weniger als 1700 Volllaststunden. Die geringen Volllaststunden deuten auf eine Überdimensionierung der Wärmeerzeuger hin. Moderne Gaskessel können ihre Leistung häufig stufenlos in einem breiten Leistungsbereich modulieren, d.h. Leistungen liefern, welche deutlich unter der angegebenen Nennwärmeleistung liegen, ohne dass hierfür einen Start-Stopp-Betrieb durchlaufen werden muss. In der Praxis wurde der mögliche Modulationsbereich durch die Leistungsanforderung der Liegenschaft häufig unterschritten, so dass der Kessel doch ins Takten des Brenners gerät. Typischerweise geschah dies am Rand der Heizperiode oder bei nicht erfolgter Sommerabschaltung auch im Sommer.

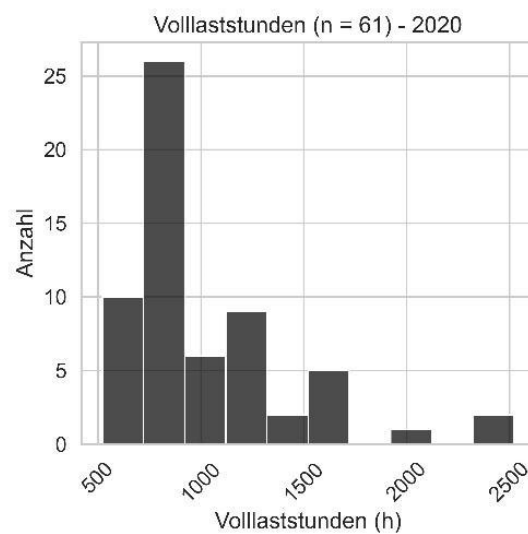


Abbildung 115: Volllaststunden BaltBest

Durch den einsetzenden Start-Stopp-Betrieb verschlechterte sich der Nutzungsgrad deutlich. Eine Auswertung der erreichten Volllaststunden nach Baujahr zeigte, dass die Wärmeerzeuger auch in der Vergangenheit zu groß ausgelegt wurden (s. Abbildung 116).

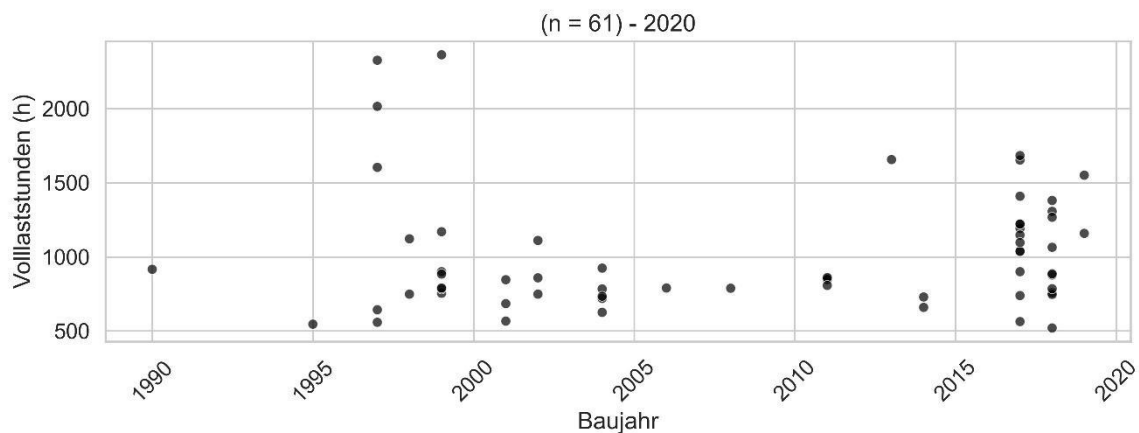


Abbildung 116: Volllaststunden gegen Anlagenbaujahr

In Abbildung 117 sind die Volllaststunden auf der X-Achse und der Nutzungsgrad auf der Y-Achse dargestellt. Anlagen, welche 2000 Volllaststunden erreichten, besaßen tendenziell auch einen hohen Nutzungsgrad. Allerdings gibt es zu wenige Heizkessel mit ausreichend vielen Volllaststunden, um diesen Trend mit Sicherheit zu belegen. Trotz geringen Auslastungen mit weniger als 1000 Volllaststunden produzieren einige Kessel mit hohen Nutzungsgrade Wärme, bei einem großen Teil der Kessel führt eine geringe Auslastung jedoch zu geringen Nutzungsgraden. Ist ein überdimensionierter Kessel einmal verbaut, können Maßnahmen zur Optimierung der Betriebsführung, welche den Wärmeverbrauch senken, die Kesselauslastung reduzieren. Wird ein Kessel deshalb häufiger außerhalb des Modulations-Bereiches betrieben, sinkt die Effizienz der Wärmebereitstellung. Bei überdimensionierten Kesseln kann daher ein Zielkonflikt zwischen einem Optimum der Wärmebereitstellung und einer effizienten Wärmebereitstellung bestehen.

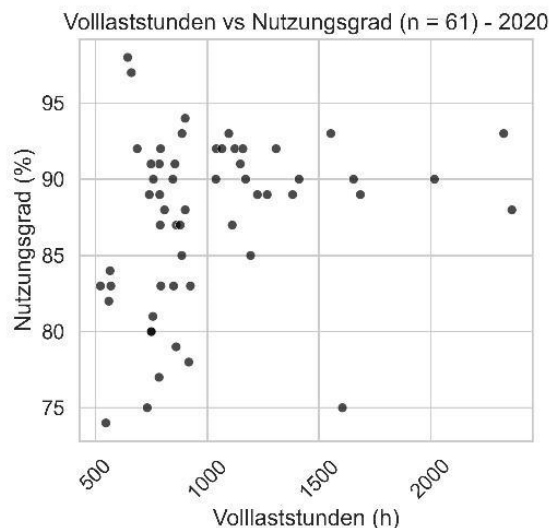


Abbildung 117: Volllaststunden vs. Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad wurde wesentlich von der Fähigkeit des Kessels beeinflusst, den Brennwerteffekt zu nutzen. Die Nutzungsgrade der BaltBest Kessel lagen 2020 bei Brennwertkesseln im Median bei 90% (n=39) und bei Niedertemperaturkesseln im Median bei 80 % (n=13). Damit sind Brennwert-Kessel in der Praxis deutlich effizienter als Niedertemperaturkessel. Zu beachten ist aber, dass die Brennwertkessel zudem deutlich jünger sind (s. Abbildung 113 & Abbildung 118).

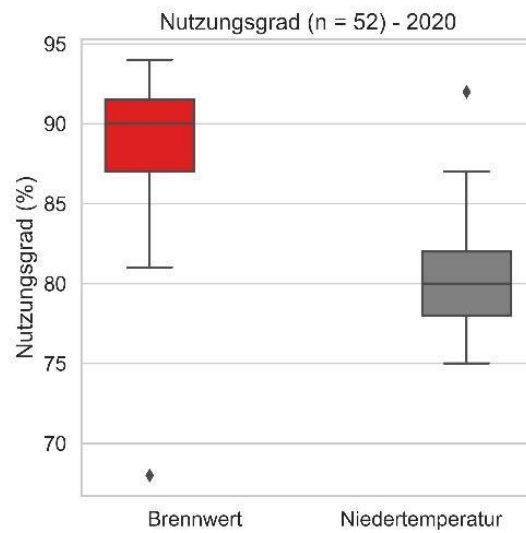


Abbildung 118: Vergleich der Nutzungsgrade Brennwert- zu Niedertemperaturkessel

7.1 Kesseltausche im BaltBest Projekt

Die beteiligten Wohnungsunternehmen führten in den BaltBest Liegenschaften bis Ende 2020 30 Kesseltausche durch. Der erste Kesseltausch wurde vor dem Projektstart im Juni 2017 durchgeführt, aufgrund der durch das Vorgängerprojekt teilweise schon vorhandenen Infrastruktur konnte auch dieser frühe Kesseltausch messtechnisch begleitet werden, der Zeitverlauf der Kesseltausche wird in Abbildung 119 dargestellt.

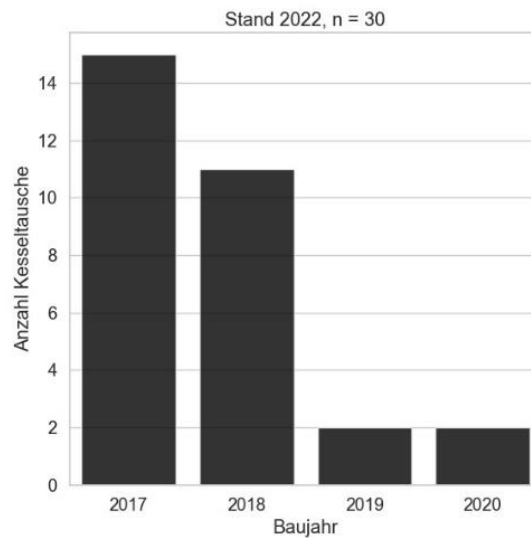


Abbildung 119: Kesseltausche im Zeitverlauf

Bei 16 Kesseltauschen wurde der ursprüngliche Kessel gegen einen Kessel mit geringerer Nennwärmeleistung getauscht, bei 8 Tauschen wurde die Nennwärmeleistung nur marginal oder nicht geändert und in 6 Fällen wurde die Nennwärmeleistung gesteigert (s. Abbildung 120).

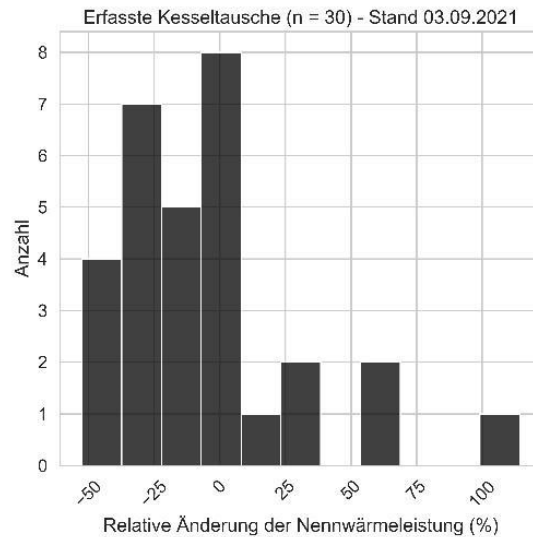


Abbildung 120: Änderung der Nennwärmeleistung

Eine große Zahl der Kesseltausche wurde bereits vor dem Beginn des BaltBest Projektes durchgeführt, die meisten zudem außerhalb der Heizperiode. Zur energetischen Bewertung eines Kessels-Tausches wird der spezifische Gasverbrauch einer Abrechnungseinheit in den Heizperioden vor und nach dem Tausch untersucht. Hilfreich ist hier, dass Kesseltausche i.d.R. außerhalb der Heizperioden durchgeführt wurden. Für die vorliegenden Kesseltausche ergibt sich eine Reduzierung des Gasverbrauches um 15,84% $\pm$ 14,74% Standardabweichung. Bei den ursprünglichen Gaskesseln handelte es sich ausschließlich um Niedertemperaturkessel, welche gegen Brennwertgeräte getauscht wurde (s. Abbildung 121).

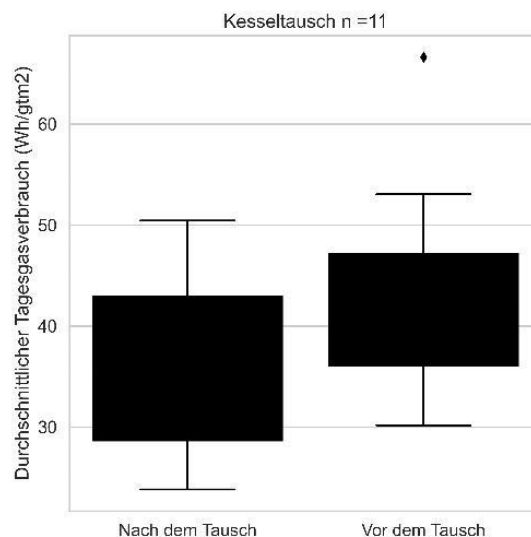


Abbildung 121: Änderung Gasverbrauch bei Kesseltauschen

7.2 Einfluss der Betriebsführung

Die Betriebsführung hatte einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg oder Misserfolg eines Kesseltausches. Anhand von drei Beispielen wurden die in der Praxis üblichsten Szenarien dargestellt:

1. Steigerung des Gasverbrauchs und Nutzungsgrades,
2. Nutzungsgradsteigerung und geringe Reduktion des Gasverbrauchs und
3. Nutzungsgradsteigerung und Reduktion des Gasverbrauchs.

Die Ergebnisse der Kesseltausche der drei Beispiele werden in Tabelle 6 aufgelistet.

	Beispiel 1 – 01.11.2018	Beispiel 2 – 27.02.2018	Beispiel 3 – 03.09.2018
Änderung des Ø Nutzungsgrades (%)	82 → 86 (+5%)	72 → 88 (+22%)	74 → 88 (+19%)
Änderung des Ø spezifischer Gasverbrauch ($\frac{kWh}{m^2a}$)	105 → 110 (+5%)	133 → 126 (-5%)	123 → 90 (-27%)

Tabelle 6: Auswirkungen der Kesseltausche in drei Beispielanlagen

Ein neuer Kessel führt nicht immer zu einem geringeren Gasverbrauch (s. Beispiel 1). Der Nutzungsgrad konnte gesteigert werden, allerdings stieg auch der Gasverbrauch in der Liegenschaft an. Im Beispiel 2 konnte durch den Kesseltausch der Nutzungsgrad deutlich gesteigert werden (um 22%), allerdings sank der Gasverbrauchs nur um 5%. Im dritten Beispiel wurde durch den Kesseltausch der Nutzungsgrad um 19% gesteigert und der Gasverbrauch in der Liegenschaft um 27% gesenkt.

Zur Untersuchung der aufgetretenen Effekte wurden die Betriebsführungen der drei Beispielanlagen verglichen. Um die Heizkennlinie darzustellen, ist jeweils in den Abbildungen Abbildung 122, Abbildung 123 und Abbildung 124 auf der X-Achse die Außentemperatur und auf der Y-Achse die Vorlauftemperatur aufgetragen. Die einzelnen Punkte stehen für Stunden-Mittelwerte. Die roten Messdaten stehen hierbei für Betriebspunkte vor und die blauen nach der Sanierungsmaßnahme.

Beispiel 1

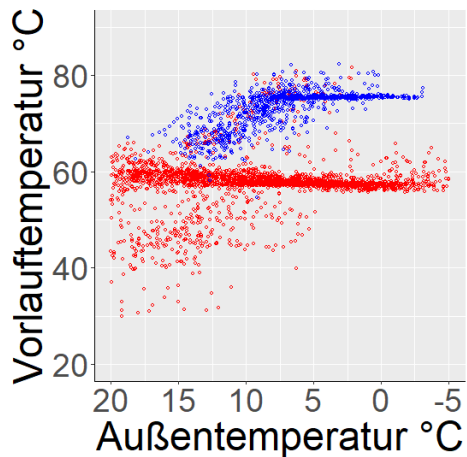


Abbildung 122: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 1

Vor der Sanierung lag keine Witterungsführung vor, die Vorlauftemperatur betrug außentemperaturunabhängig etwa 60°C.

Das Vorlauftemperaturniveau stieg nach dem Kesseltausch an, schon bei 10°C Außentemperatur wurden 75°C Vorlauftemperatur erreicht.

Der bereinigte Gasverbrauch lag nach der Sanierung über dem Ursprungsniveau, obwohl der Nutzungsgrad durch den modernen Kessel um 5% anstieg. Vermutlich stieg der Wärmeverbrauch durch das höhere Vorlauftemperaturniveau an.

Beispiel 2

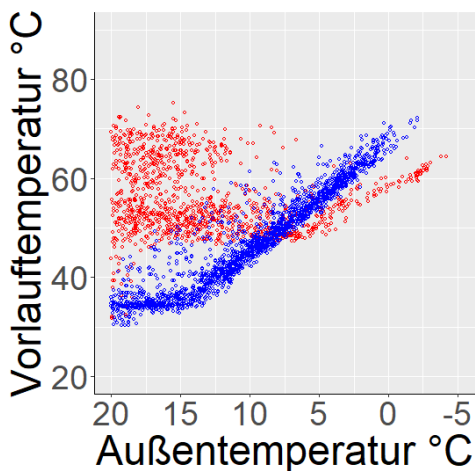
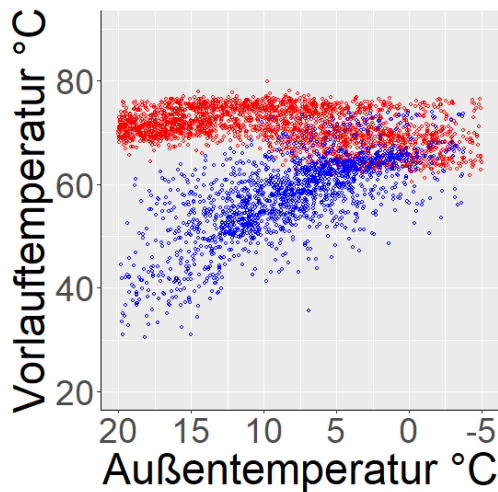


Abbildung 123: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 2

Vor der Sanierung wies die Vorlauftemperatur insbesondere bei hohen Außentemperaturen eine große Streuung auf. Die Vorlauftemperatur betrug zwischen 50°C und 70°C. Ab 5°C Außentemperatur stellte sich eine erkennbare Heizkennlinie auf einem Niveau zwischen 50°C und 60°C ein. Nach der Sanierung betrug die Vorlauftemperatur bei höheren Außentemperaturen konstant 35°C. Sie stieg auf 65 °C bei 0 °C Außentemperatur. Eine verbesserte Betriebsführung ergab sich vor allem bei hoher Außentemperatur, bei geringen Außentemperaturen wurde das Verschwendungspotenzial gesteigert.

Beispiel 3



Vor der Sanierung wies die Anlage eine sehr hohe konstante Vorlauftemperatur von etwa 70-75°C auf. Nach der Sanierung wurde eine Heizkennlinie eingestellt.

Abbildung 124: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 3

Zusammenfassung

Die Heizungsanlagen in den untersuchten Liegenschaften im BaltBest Projekt wurden nicht optimal betrieben. Dies war unabhängig von Alter und Art des Kessels (s. Kapitel 6 und Kapitel 7). Heizungsanlagen waren häufig überdimensioniert, bei einem Kesseltausch wurde die Nennwärmeleistung nur zögerlich angepasst. Effizienzpotenziale werden so nicht erschlossen, Wärmeerzeuger in nicht optimalen Betriebszuständen betrieben. Zudem wird die Betriebsführung der Heizkessel nur schlecht oder gar nicht auf die Witterung und das Gebäude angepasst. Das Problem besteht sowohl vor als auch nach dem Austausch der Kessel. Neue Heizkessel können ihr Potenzial bei schlecht eingestellter Betriebsführung nicht in vollem Umfang nutzen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Rücklauftemperatur über 57°C liegt, da dann der Brennwerteffekt nicht genutzt werden kann.

9 Verwendete Hardware

9.1 Grundfos Magna 3 Pumpen

Im BaltBest Projekt wurden 29 AE mit intelligenten, frequenzgesteuerten Pumpen ausgestattet. Hierfür wurden Magna 3 Pumpen von Grundfos verwendet. Die Pumpen sind in der Lage die Förderleistung automatisch der Anlagenkennlinie anzupassen. Dadurch wird der Stromverbrauch erheblich verringert. Zusätzlich verfügen die Pumpen über eine Schnittstelle, welche 50 verschiedene Werte übermittelt. Von diesen Daten wurden die Nachfolgenden im Projekt verwendet:

- Vor- und Rücklauftemperatur
- Volumenstrom
- Förderhöhe
- Stromstärke
- Spannung
- Wärmeleistung
- elektrische Leistung
- Pumpenstarts

So konnte die Datendichte des Projekts verbessert werden, was insbesondere dann wichtig war, wenn kein WMZ in der gleichen Liegenschaft vorhanden waren. Die zeitliche Auflösung der Messdaten beträgt etwa 2 Minuten. Mit Ausnahme der Wassertemperaturen sind keine Messtoleranzen bekannt. Die Toleranz der Temperaturen beträgt $\pm 2^{\circ}\text{C}$ in einem Bereich von $35\text{-}90^{\circ}\text{C}$, welcher in Heizkreisen üblich ist.

9.2 HKV

Die Heizkostenverteiler der Techem GmbH funktionieren unter normalen Einsatzbedingungen auf Heizkörpern montiert, wo sie auf der innenliegenden Seite die mittlere Temperatur des Heizkörpers ablesen und auf der außenliegenden Seite die Raumtemperatur. So kann die Wärmeabgabe des Heizkörpers angenähert und in Form von Verbrauchseinheiten an Techem gesendet werden. Für das Vorgänger Projekt wurden die HKV so modifiziert, dass eine direkte Übertragung von Temperaturen möglich war. Dadurch konnten die HKV als Temperatursensoren eingesetzt werden. Es war sogar möglich, externe Temperatursensoren anzuschließen. Dadurch konnten auch schwer erreichbare Messungen, wie die der Abgastemperatur, durchgeführt werden. Dadurch waren vielfältige Temperaturmessungen möglich:

- Vor- und Rücklauftemperatur
- Oberflächentemperatur Wärmeerzeuger
- Abgastemperatur
- Heizkörpertemperatur
- Heizungsraumtemperatur
- Außentemperatur

Die Messwerte wurden in einem Zeitintervall von 110 s an den Masterdatensammler übertragen.

9.3 Wärmemengenzähler

Als Wärmemengenzähler (WMZ) wurde das Modell *Diehl Sharky 775* verwendet. Die WMZ erfassen die Vor- und Rücklauftemperatur, sowie den Volumenstrom. Aus den Messwerten kann die Wärmemenge ermittelt werden. Die Messdaten werden in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute gesendet. Die Toleranzen liegen bei einem Volumenstrom größer $\dot{V}/\dot{V}_{Nenn} = 0,1$ in einem Bereich von etwa $\pm 1\%$, wie Abbildung 125 zeigt.

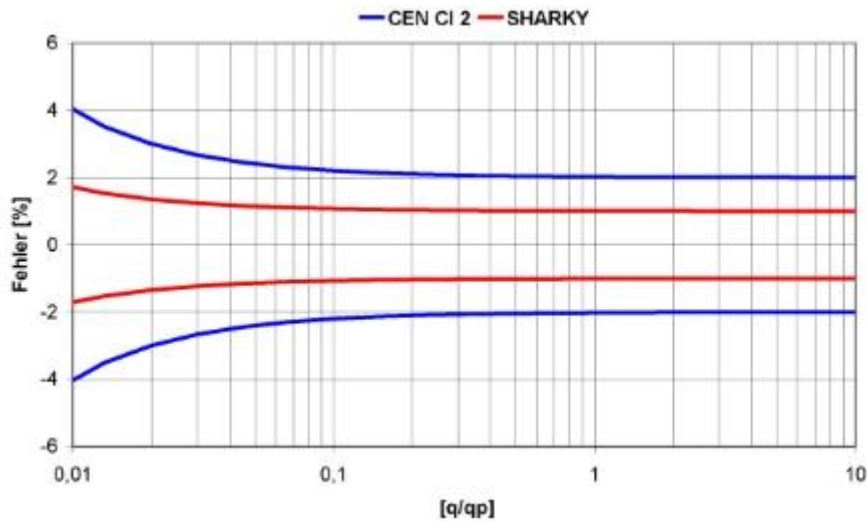


Abbildung 125: Messtoleranzen Diehl Sharky 775 WMZ²⁸

²⁸ Diehl Stiftung & Co. KG, Benutzerhandbuch Diehl Sharky 775, 2019.

9.4 Gasmengenzähler

Die Gasmengenzähler gehören den Stadtwerken, der Austausch oder jegliche Manipulation ist gesetzlich verboten. Einen zweiten Gasmengenzähler zu installieren wäre wirtschaftlich nicht sinnvoll und mit großem Aufwand verbunden. Deshalb wurden Impulsgeber auf die bereits vorhandenen Gasmengenzähler aufgeschaltet. Je nach vorhandenem Gasmengenzähler wurde einer aus vier verschiedenen Impulsgebern (Tabelle 7) verwendet:

Honeywell Elster IN Z61	Honeywell Elster IN ZU	Itron 951-858-04	Itron Cyble Sensor V2
------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------	----------------------------------

Tabelle 7: Verwendete Impulsgeber zur Aufschaltung auf die Gasmengenzähler

Die Impulsgeber ermittelten den Gasverbrauch nicht, sondern teilten mit, wann der bereits vorhandene Gaszähler eine Umdrehung des Zählrads absolviert hat. Daher liegt die Präzision der Messung bei der bereits vorhandenen Hardware und ist nicht beeinflussbar. Eine Umdrehung des Zählrads bedeutet einen Anstieg des Verbrauchs um 0,1 m³ oder 1 m³.

10 Veröffentlichungen und Vorträge

10.1 Veröffentlichungen/Fachbeiträge

1. V. Grinewitschus: Smart Cities und Immobilienwirtschaft. Die Immobilienwirtschaft, 10/2019
2. V. Grinewitschus: Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung in Gebäuden. Forschung für die Praxis, Band 21. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2020.
3. V. Grinewitschus Gebäudesteuerung: Immer noch ein Thema für die Branche?! Die Wohnungswirtschaft 3/2020, Haufe Verlag.
4. V. Grinewitschus: Wohnungswirtschaft zwischen Klimaschutz und bezahlbarem Wohnen. Wohnungswirtschaft heute. digital. Ausgabe 11 /2020, verfügbar unter <https://wohnungswirtschaft-heute.de/wp-content/uploads/2020/02/Smart-Home-Wohnungswirtschaft-zwischen-Klimaschutz-und-bezahlbarem-Wohnen.pdf>
5. V. Grinewitschus, K. Lepper, S. Jurkschat: Energieeffizienz durch smarte Gebäudetechnik. DW Die Wohnungswirtschaft 9/2020
6. V. Grinewitschus: Weniger CO₂-Emissionen durch smarten Betrieb der Gebäudetechnik. Der Immobilienbrief Ruhr, 2/2021
7. V. Grinewitschus, K. Fransen, S. Jurkschat: Temperaturen runter, Effizienz hoch, DW Die Wohnungswirtschaft 5/2021
8. V. Grinewitschus, Thomas Ruhnau, Simon Jurkschat, Andre Beblek: Wärmewende im Bestand: Maßnahmenmix hilft, Kosten zu sparen. DW Die Wohnungswirtschaft 9/2021
9. V. Grinewitschus: Digitalisieren wir endlich die Gebäude! DW Die Wohnungswirtschaft 5/2022, Haufe Verlag

10.2 Vorträge/Präsentationen

1. V. Grinewitschus, K. Lepper: Allianz für den klimaneutralen Wohngebäudebestand: Do's and don'ts beim Einsatz smarterer Techniken zur Nutzerunterstützung. Energieforum West, Bochum 21.1.2019
2. V. Grinewitschus, K. Lepper: Vorstellung der Ergebnisse des Pilotprojekts der Allianz für den klimaneutralen Wohngebäudebestand. Bundeswirtschaftsministerium Berlin, 12.4.2019
3. V. Grinewitschus: Big Data und Betriebskosten: Wenn das Wohnungsunternehmen wüsste, was das Wohnungsunternehmen weiß. Arbeitskreis Betriebskostenmanagement, Frankfurt, 5.9.2019
4. V. Grinewitschus: Technische Gebäudeausstattung-Ein Bericht aus der Forschung. Fresh-Up für Immobilientechniker, Bochum, 19.9.2019
5. V. Grinewitschus: Klimaschutz im Gebäudebetrieb: Wirkung verschiedener Maßnahmen im Gebäudebestand. Arbeitskreis Gemeinsam im Quartier, 15.11.2019
6. V. Grinewitschus: Smart Cities und die Wohnungs- und Immobilienwirtschaft, Forum Soziale Stadtentwicklung des VdW Bayern, Bamberg, 20.0.2020
7. V. Grinewitschus, K. Lepper, S. Jurkschat: Weniger CO₂-Emissionen durch betreutes Heizen, Webinar der EBZ Business School, 12.8.2020
8. V. Grinewitschus: Inhouse-Schulung Fachkraft für Energieberatung, Schwerpunkt Anlagentechnik in Gebäuden EBZ Akademie, 22.9.2020
9. V. Grinewitschus: Geringinvestive Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Heizungsanlagen, Online-Seminar IVV Immobilien vermieten und verwalten, 27.9.2020
10. V. Grinewitschus: CO₂-Minderungspotenziale in der Anlagentechnik für Mehrfamilienhäuser
Entwicklungstrends und Erfahrungen, 5. Fachforum Wohnungswirtschaft, Hannover, 27.10.2020
11. V. Grinewitschus: Neue Konzepte zur Verbindung von Fordern und Fördern: Kommentierung aus immobilienwirtschaftlicher Sicht. Runder Tisch: Neue Impulse zum nachhaltigen Klimaschutz im Gebäudebestand, Deutscher Verband, 20.10.2020
12. V. Grinewitschus, K. Lepper, S. Jurkschat: Forschungsprojekt BaltBest, Bundesarbeitsgemeinschaft Immobilienunternehmen der Privatwirtschaft, 24.11.2020

13. V. Grinewitschus, S. Jurkschat: Nutzerverhalten und der menschliche Faktor: Erkenntnisse aus dem BaltBest-Projekt. Runder Tisch: Neue Impulse zum nachhaltigen Klimaschutz im Gebäudebestand, Deutscher Verband, 21.1.2021
14. V. Grinewitschus, S. Jurkschat, K. Fransen: Weniger CO₂-Emissionen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse des Forschungsprojektes BaltBest. EBZ Führungskräfteforum, 20.5.2021
15. V. Grinewitschus, S. Jurkschat, K. Fransen: Weniger CO₂-Emissionen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse des Forschungsprojektes BaltBest. Jahrestagung der Initiative Wohnen 2050, 5.5.2021
16. V. Grinewitschus, S. Jurkschat, K. Fransen: Methoden zur energetischen Effizienzsteigerung der Wärmeversorgungssysteme in Mehrfamilienhäusern. Ergebnisse des Forschungsprojektes Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand (BaltBest), Essener Energieforum, 10.6.2021
17. V. Grinewitschus, S. Jurkschat, K. Fransen: Forschung trifft Praxis: Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand (BaltBest), BBA Betriebskostenkonferenz, Berlin, 16.6.2021
18. V. Grinewitschus: Wie gelingt der Einstieg in die Dekarbonisierung? Vollversammlung der Sparte „Immobilienunternehmen der Privatwirtschaft“ Düsseldorf, 22.6.2021
19. V. Grinewitschus: Dekarbonisierung des Gebäudebetriebs als Treiber der Digitalisierung in Mehrfamilienhäusern der Wohnungswirtschaft, 25. Expertenrunde SmartHomeNRW, online, 24.6.2021
20. V. Grinewitschus: Dekarbonisierungsstrategien für die Wohnungswirtschaft, VdW/VdWg-Fachtagung „Bau/Technik“ am 14./15.07.2021, Magdeburg
21. V. Grinewitschus: Potenziale des energieeffizienten, smarten Gebäudebetriebs Erkenntnisse des Forschungsprojektes BaltBest. BMVI Dialogreihe „Digitalisierung nachhaltig gestalten“, 14.9.2021
22. V. Grinewitschus: BaltBest: Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens. GdW-Bankenfrühstück, 1.9.2021, Berlin
23. V. Grinewitschus: Mehr Feedback bitte! Die Wirkung des Nutzers auf die Energieeffizienz von Gebäuden, 6. Fachforum Wohnungswirtschaft: Hannover, 26.10.2021
24. V. Grinewitschus: Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von Heizungsanlagen im Bestand (BaltBest), Abschlussveranstaltung BaltBest, EBZ Bochum, 17.11.21
25. V. Grinewitschus: Eine Stellschraube auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand Effizienzpotenzial von Heizungsanlagen im Bestand (BaltBest)

Einfluss der Betriebsführung – auch *auf* das Nutzerverhalten. Digitale Konferenz
Wohnungsbaugenossenschaften VNW 17.2.2022

26. V. Grinewitschus: Smart Building: Status, Potenziale, Lösungen, Projekte, Ängste und Hindernisse. Berliner Wirtschaftsgespräche, 29.3.2022
27. V. Grinewitschus: Und was tut der Nutzer? Mehr Feedback bitte!
Einblick in die Ergebnisse des Forschungsprojektes „BaltBest“:
Abschlussveranstaltung Beta-Projekt: Vom BETA-Projekt zum BETA-Prinzip, VNW
1.3.2022
28. V. Grinewitschus: Antworten auf die Energiekrise: Digitale Instrumente zur Senkung der
CO₂-Emissionen in Mehrfamilienhäusern durch niedriginvestive Maßnahmen. DigiKon
Süd 2022, VdW, vbw 26.4.2022, Neu-Ulm
29. V. Grinewitschus: BaltBest - Einfluss der Betriebsführung auf die Effizienz von
Heizungsanlagen im Bestand (Schnellumsetzbare Effizienzgewinne zur Einsparung
von Öl und Gas). 3. Kongress Energiewendebauen, 10.6.2022, Wuppertal
30. V. Grinewitschus, S. Jurkschat, K. Fransen, F. Sehr: Energy efficient heating Systems.
EBZ/EFL-Sommer School: Climate resilient Homes and Communities for Europe
working together for a just transition, 06.07.2022, Bochum

11 Literaturverzeichnis

- BDEW (ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz, 2014):* ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz, 2014
- Bundesministerium für Umwelt/Naturschutz und nukleare Sicherheit/www.bmu.de* (Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2019): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung 2019,
<https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf> [Zugriff: 2022-07-18]
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BWMi Broschüre Energieeffizienzstrategie Gebäude – Kurzfassung, 2015):* BWMi Broschüre Energieeffizienzstrategie Gebäude – Kurzfassung 2015,
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energieeffizienzstrategie-gebäude-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=7> [Zugriff: 2022-07-18]
- Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband* (Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks, 2020): Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks 2020
- Diehl Stiftung & Co. KG* (Benutzerhandbuch Diehl Sharky 775, 2019): Benutzerhandbuch Diehl Sharky 775, 2019
- Dipl.-Ing. Hermann Bliesener* (So sieht es aus: Deutschlands typisches Mehrfamilienhaus, 2020): So sieht es aus: Deutschlands typisches Mehrfamilienhaus (2020),
<https://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb_So_sieht_es_aus_Deutschlands_typisches_Mehrfamilienhaus_3593523.html> [Zugriff: 2022-07-21]
- Energieeffizient-Wohnen.de Allianz für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand* (Energieeffizient-Wohnen.de Allianz für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand),
<<https://www.energieeffizient-wohnen.de/>> [Zugriff: 2021-05-28]
- GdW (Wohnungswirtschaftliche Daten und Trends 2016/2017, 2016):* Wohnungswirtschaftliche Daten und Trends 2016/2017 2016,
<https://www.gdw.de/uploads/pdf/publikationen/d_u_t/GdW-DT-2016_web.pdf> [Zugriff: 2022-07-18]
- Grinewitschus, Viktor/Lepper, Katja* (Ermittlung von anerkannten Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad (JNG) von Heizungsanlagen, 2015): Ermittlung von anerkannten Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad (JNG) von Heizungsanlagen, 2015

- (Studie-Anerkannte-Pauschalwerte, 2015): Studie-Anerkannte-Pauschalwerte 2015, <<https://vedec.org/wp-content/uploads/2021/11/Studie-Anerkannte-Pauschalwerte.pdf>> [Zugriff: 2022-07-18]
- Grinewitschus, Viktor/Lepper, Katja/Beblek, Andre* (Projektantrag - BaltBest, 2017): Projektantrag - BaltBest, 2017
- Group, PostgreSQL Global Development* (PostgreSQL, 2021): PostgreSQL, in: PostgreSQL, 2021, <<https://www.postgresql.org/>> [Zugriff: 2021-06-01]
- Haustec* (Wie funktioniert eigentlich eine Heizlast im Bestand?, 2022): Wie funktioniert eigentlich eine Heizlast im Bestand? (2022), <<https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/wie-funktioniert-eigentlich-eine-heizlast-im-bestand>> [Zugriff: 2022-07-19]
- <https://www.marktforschung.de/> (Acht von zehn Menschen in Deutschland nutzen ein Smartphone, 2019): Acht von zehn Menschen in Deutschland nutzen ein Smartphone (2019), <<https://www.marktforschung.de/aktuelles/marktforschung/acht-von-zehn-menschen-in-deutschland-nutzen-ein-smartphone/>> [Zugriff: 2022-07-20]
- Institute for Housing and Environment* (TABULA – Scientific Report Germany, 2012): TABULA – Scientific Report Germany: Further Development of the German Residential Building Typology 2012, <https://episcopus.eu/fileadmin/tabula/public/docs/scientific/DE_TABULA_ScientificReport_IWU.pdf> [Zugriff: 2022-07-21]
- Jagnow, Kati/Wolf, Dieter* (Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur Nachhaltige Nutzung von Energiesparpotenzialen): Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur Nachhaltige Nutzung von Energiesparpotenzialen: Technische Optimierung und Energieeinsparungen, <https://www.hydraulischer-abgleich.de/fileadmin/user_upload/Kurzbericht-Technik.pdf> [Zugriff: 2022-07-18]
- Schäfers, Hans/Verbeck, Moritz* (Auswirkung von energetischen Betriebsführungen auf die Kosten von Heizungsanlagen, 2022): Auswirkung von energetischen Betriebsführungen auf die Kosten von Heizungsanlagen: Abschlussbericht 2022
- Techem* (Energiekennwerte, 2019): Energiekennwerte 2019
- (Intelligente Heizungssteuerung: adapterm, 2022): Intelligente Heizungssteuerung: adapterm, <<https://www.techem.com/de/de/energieeffizienz/adapterm>> [Zugriff: 2022-07-19]
- TimescaleDB* (Time-series data simplified, 2021): Time-series data simplified, 2021, <<https://www.timescale.com/>> [Zugriff: 2021-06-01]

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimaallianz	11
Abbildung 2: Standorte der Gebäude	18
Abbildung 3: Nutzereinheiten & beheizte Fläche je Abrechnungseinheit	19
Abbildung 4: Durchschnittliche Wohnfläche je Wohnung	19
Abbildung 5: Baujahr und mittlerer Transmissionswert	20
Abbildung 6: Baujahr Wärmeerzeuger	21
Abbildung 7: Spezifische Nennwärmeleistung	22
Abbildung 8: U-Wert gegen spezifische Nennwärmeleistung	22
Abbildung 9 :Nennwärmeleistung in Abhängigkeit vom Baujahr des Wärmeerzeugers.....	23
Abbildung 10: Ausstattung der Liegenschaften mit Messhardware	25
Abbildung 11: Beispiel für Messhardware in einer Liegenschaft	25
Abbildung 12: Datenmonitoring und Qualitätssicherung	28
Abbildung 13.: Techem Funk-Heizkostenverteiler	29
Abbildung 14: Mieterbefragung 1 - Heizverhalten und Verbrauchseinschätzung	33
Abbildung 15: Mieterbefragung 1 - Lüftungsverhalten.....	34
Abbildung 16: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten	34
Abbildung 17: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten 2	35
Abbildung 18: Mieterbefragung 1 - Einweisung und Umgang mit smarten Thermostaten 3	35
Abbildung 19: Mieterbefragung 2 – Selbsteinschätzung und Raumtemperaturen	36
Abbildung 20: Demografischer Hintergrund der Mieterbefragung 2020	37
Abbildung 21: Wunschräumtemperatur Mieterbefragung 2020	38
Abbildung 22: Änderung der Thermostatstellung Mieterbefragung 2020	39
Abbildung 23: Gründe und Art des Lüftens - Mieterbefragung 2020	39
Abbildung 24: Anzahl und Dauer Lüftungsvorgänge - Mieterbefragung 2020	40
Abbildung 25: Selbsteinschätzung energetisches Verhalten- Mieterbefragung 2020	41
Abbildung 26: Verbreitung smarter Thermostate - Mieterbefragung 2020.....	42
Abbildung 27: Verbreitung smarter Thermostate - Mieterbefragung 2020.....	42
Abbildung 28: Investitionsbereitschaft smarte Thermostate- Mieterbefragung 2020	43
Abbildung 29: Interesse an smarten Thermostaten - Mieterbefragung 2020	43
Abbildung 30: Frühes Konzept Feedbacksystem.....	45
Abbildung 31: Frühes Konzept der Datenströme im Feedbacksystem.....	45
Abbildung 32: Frühes Konzept des Webinterface	46
Abbildung 33: Frühe Konzepte Verhaltensvisualisierung	46
Abbildung 34: Frühe Konzepte Verbrauchsvisualisierung	47
Abbildung 35: Konzept zur Nutzerkommunikation	47

Abbildung 36: Nutzen der Anwendung für den Mieter	49
Abbildung 37: Langfristige Motivation	49
Abbildung 38: Motive für Verhaltensänderungen	50
Abbildung 39: Konzept Energiecoach	50
Abbildung 40: Konzept Magische Heizungswelt	51
Abbildung 41: Konzept Heizungsbörse	51
Abbildung 42: Konzept Tamagotchi	52
Abbildung 43: Backstory	53
Abbildung 44: Nutzerassistenz - Hauptmenü	54
Abbildung 45: Nutzerassistenz - Verhaltensbewertung	55
Abbildung 46: Rundschreiben	56
Abbildung 47: Hoba Plakat	57
Abbildung 48: Nutzung Hoba-Anwendung	58
Abbildung 49: Wahrnehmung des Anschreibens	59
Abbildung 50: Verständnis der Ambitionen	59
Abbildung 51: Sprungantwortverhalten smarter Thermostate von maximaler auf minimale Ventilstellung	64
Abbildung 52: Leistungsaufnahme der untersuchten Thermostate im Standby	65
Abbildung 53: Leistungsaufnahme der untersuchten Thermostate im aktiven Betrieb	66
Abbildung 54: Benötigte Energie für Sprungantwort der untersuchten Thermostate	66
Abbildung 55: Schallemissionen der untersuchten Thermostate	67
Abbildung 56: Skizze des Versuchsaufbaus zur hydraulischen Messung	69
Abbildung 57: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Danfoss ECO	70
Abbildung 58: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Hora Thermostat	70
Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Bosch Thermostat	71
Abbildung 60: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Homematic Thermostat	71
Abbildung 61: Zusammenhang zwischen Soll-Temperatur Abweichung und Durchfluss beim Viessmann Thermostat	72
Abbildung 62: Szenario 1 - Lage der Wohnungen sowie deren Einsparungen bzw. Mehrverbräuche	74
Abbildung 63: Szenario 2 - Lage der Wohnungen sowie deren Einsparungen bzw. Mehrverbräuche	75
Abbildung 64: Thermostat- & Heizkörpernutzung	76

Abbildung 65: Ausstattungsgrad mit smarten Thermostaten.....	77
Abbildung 66: Ausstattung der einzelnen Liegenschaften.....	78
Abbildung 67: Änderungen der Verbräuche in den Wohnungen von der Heizperiode 19/20 zu 20/21	79
Abbildung 68: Änderungen der Verbräuche in den Wohnungen von der Heizperiode 19/20 zu 20/21	79
Abbildung 69: Verbrauchsänderungen in Wohnungen, die mit dem smarten Thermostat ECO2 ausgestattet wurden	80
Abbildung 70: Änderungen der Heizkörper-Betriebsstunden in Referenz- und ausgestatteten Wohnungen.....	81
Abbildung 71: Heizkörperzeitprogramm.....	82
Abbildung 72: Inaktiver Heizkörper	82
Abbildung 73: Händisch betriebener Heizkörper	83
Abbildung 74: Anteil der smarten Thermostate mit Zeitprogrammen bei den Versionen ECO1 und ECO2	84
Abbildung 75: Normierter flächenbezogener Verbrauchswert der Wohnungen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Heizkörper-Betriebsstunden innerhalb einer Wohnung	85
Abbildung 76: Verbrauchsänderung in den ECO2-Liegenschaften	88
Abbildung 77: Betriebsstundenänderung in den ECO2 Liegenschaften.....	90
Abbildung 78: Änderung Betriebsstunden gegen Verbrauchsänderung.....	91
Abbildung 79: Verbrauchsänderung gegen Status Quo	92
Abbildung 80: Änderung Heizkörperbetriebsstunden.....	93
Abbildung 81: Betriebsstunden und Verbrauchseinheiten nach dem Einbau	94
Abbildung 82: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes und der Nutzung von Zeitprogrammen	96
Abbildung 83: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes und der Heizkörperbetriebszeit je Tag	97
Abbildung 84: Zusammenhang des normierten flächenbezogenen Verbrauchswertes, der Heizkörperbetriebszeit je Tag und dem Thermostatausbau	97
Abbildung 85: Durchschnittliche Tages-Betriebsstunden nach Thermostattyp.....	98
Abbildung 86: Energieverbrauch in Referenzwohnungen, Coronakrise	99
Abbildung 87: Energieverbrauch ECO2-Wohnungen, Coronakrise.....	100
Abbildung 88: Betriebsstunden Referenzwohnungen, Coronakrise	101
Abbildung 89: Betriebsstunden ECO2-Wohnungen, Coronakrise	101
Abbildung 90: Betriebsstunden Vergleichsgruppen	102
Abbildung 91: Vorlauftemperaturkompass.....	104
Abbildung 92: Jahresgasverbrauch gegen Betriebsführung.....	107

Abbildung 93: Vielverbraucheranteil nach Betriebseinstellungen	108
Abbildung 94: Tagesheizkörperbetriebszeit nach Gruppen.....	109
Abbildung 95: Relative Betriebsstunden von Vielverbrauchern in Abhängigkeit der Einstellung der Heizungsanlage	110
Abbildung 96: Bewertung der Einstellungen der Heizungsanlage in Abhängigkeit der mittleren Abweichung der Heizkennlinie von einem Idealwert.	111
Abbildung 97: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte, bei Befragten die Ihre Heizungsanlage als genau richtig eingestellt empfanden	112
Abbildung 98: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte, bei Befragten die Ihre Heizungsanlage als zu warm empfanden.....	112
Abbildung 99: Durchschnittliche Betriebsstunden der Heizkörper und der korrespondierenden normierten flächenbezogenen Verbrauchswerte bei Befragten, denen die Heizungsanlage auf zu niedrige Temperaturen eingestellt ist.	113
Abbildung 100: Einfluss des Thermostattyps auf das Verbrauchsverhalten	114
Abbildung 101: Sommerliche Heizungsaktivität	116
Abbildung 102: Sommerlicher Verbrauchsanteil	116
Abbildung 103: Durchgeführte Optimierungen	117
Abbildung 104: Anzahl und Art der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen.....	119
Abbildung 105: Einfluss der Optimierungen auf den Nutzungsgrad (n = 57)	120
Abbildung 106: Einfluss der Optimierungen auf den Gasverbrauch	120
Abbildung 107: Zusammenhang der Änderung des Gasverbrauchs und des Nutzungsgrads	121
Abbildung 108: Optimierungsmaßnahmen nach Erfolg	122
Abbildung 109: Änderung der Vorlauftemperatur nach Gruppen	123
Abbildung 110: Status Quo – Vorlauftemperaturen.....	124
Abbildung 111: Energieträger für die Wärmeversorgung im deutschen Bestand	127
Abbildung 112: Energieträger im BaltBest Projekt	127
Abbildung 113: Baujahre und Art der Heizkessel in den BaltBest Liegenschaften	128
Abbildung 114: Auslegung Wärmeerzeuger: a) Nennwärmeleistung, b) Beheizte Fläche – Nennwärmeleistung - Kesselalter	128
Abbildung 115: Volllaststunden BaltBest	129
Abbildung 116: Volllaststunden gegen Anlagenbaujahr	129
Abbildung 117: Volllaststunden vs. Nutzungsgrad	130
Abbildung 118: Vergleich der Nutzungsgrade Brennwert- zu Niedertemperaturkessel	131
Abbildung 119: Kesseltausche im Zeitverlauf	132

Abbildung 120: Änderung der Nennwärmeleistung	133
Abbildung 121: Änderung Gasverbrauch bei Kesseltauschen	133
Abbildung 122: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 1.....	135
Abbildung 123: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 2.....	135
Abbildung 124: Betriebsführung im Kesseltausch, Beispiel 3.....	136
Abbildung 125: Messtoleranzen Diehl Sharky 775 WMZ	139

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der Arbeitspakete inkl. Verantwortlichkeit.....	17
Tabelle 2: Heizlast in Abhängigkeit von der beheizbaren Nutzfläche (in Anlehnung an Nationaler Anhang zu DIN EN 15378).....	22
Tabelle 3: Ausstattungslinien.....	26
Tabelle 4: Änderung der Energieverbräuche in den Gruppen nach Einbau der smarten Thermostate	89
Tabelle 5: Änderung der Verbräuche auf Liegenschaftsebene nach dem Einbau smarter Thermostate	94
Tabelle 6: Auswirkungen der Kesseltausche in drei Beispielanlagen.....	134
Tabelle 7: Verwendete Impulsgeber zur Aufschaltung auf die Gasmengenzähler.....	140