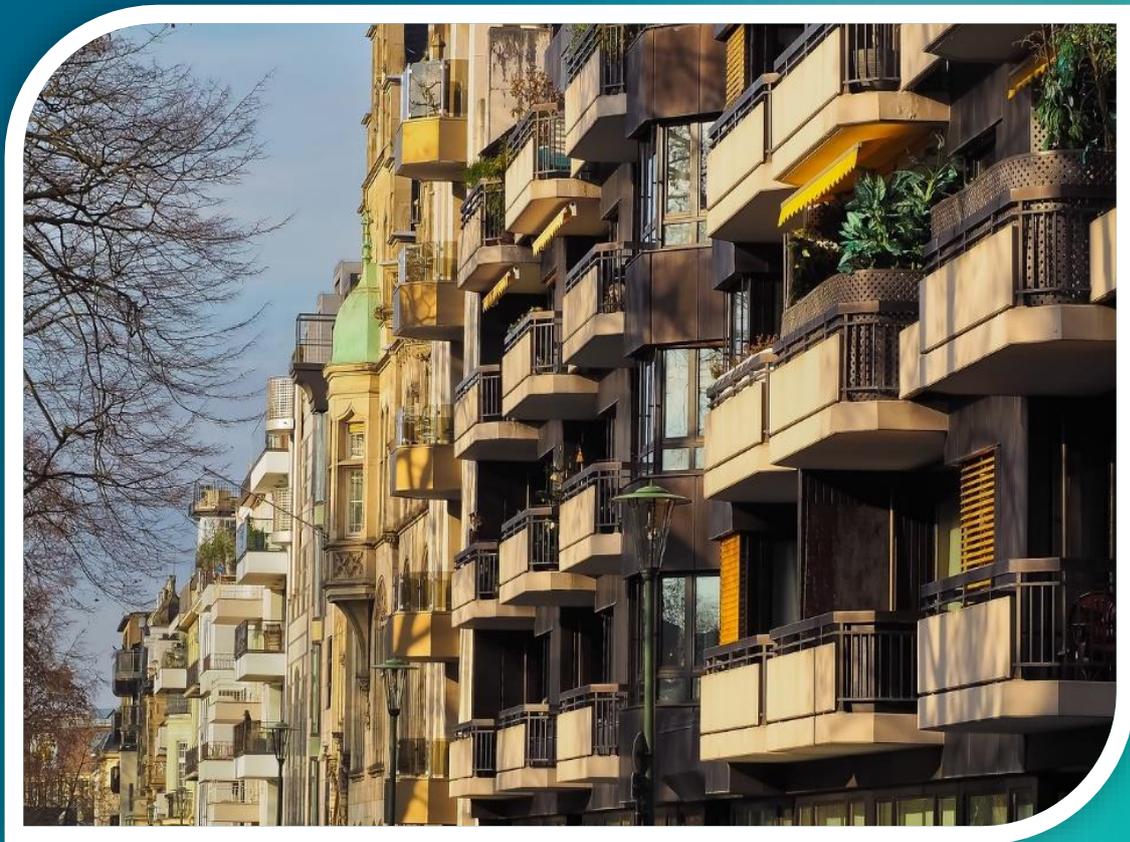


LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

Abschlussbericht

LowEx-Bestand Analyse



Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der wissenschaftlichen Querspanne »LowEx-Bestand Analyse« des thematischen Projektverbunds »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)« zusammen. In diesem Verbund arbeiteten drei Forschungsinstitute mit Herstellern von Heizungs- und Lüftungstechnik und mit Unternehmen der Wohnungswirtschaft zusammen. Gemeinsam wurden Lösungen entwickelt, analysiert und demonstriert, die den effizienten Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabesystemen und Lüftungssystemen bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden zum Ziel haben.

LowEx-Systeme arbeiten durch geringe Temperaturdifferenzen zwischen Heizmedium und Nutzwärme besonders effizient. Wärmepumpen haben dabei erhebliches Potenzial zur Absenkung der spezifischen CO₂-Emissionen bei der Wärmebereitstellung. Für die energetische Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden ist der Einsatz solcher Systeme mit besonderen Herausforderungen und Anforderungen an die Übergabe der Raumwärme, die Warmwasserbereitung und die Nutzung von Umweltwärme verbunden. Diese Herausforderungen werden in LowEx-Bestand adressiert.

Projekt LowEx-Bestand Analyse

Abschlussbericht

LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden ("LowEx-Bestand Analyse")

Datum: 09.03.2023
(leicht redigierte Fassung des Berichts vom 25.10.2022)

Autoren: Constanze Bongs, Jeannette Wapler, Arnulf Dinkel, Marek Miara, Sven Auerswald
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Manuel Lämmle, Stefan Hess, Michael Kropp, Rebekka Eberle, Beatrice Rodenbücher
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, INATECH
Ferdinand Schmidt, Manuel Ruppert, Nicolas Carbonare, Andreas Wagner
KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz- Gemeinschaft

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03SBE0001 A-C

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

www.lowex-bestand.de



Bezeichnung des Vorhabens

LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden,
Teilvorhaben INATECH Uni Freiburg: Systemanalyse;
Teilvorhaben Karlsruher Institut für Technologie: Wirtschaftliche Bewertung und Analyse der Systeme und des Gebäudebestandes und Mitarbeit im IEA-HPP Annex 'Heat Pumps in Multi-Family Buildings'
Teilvorhaben Fraunhofer ISE: Systemsimulationen, Demonstration und Monitoring und Operating Agent im IEA-HPP Annex 'Heat Pumps in Multi-Family Buildings'.

Kurzbezeichnung des Vorhabens

LowEx-Bestand Analyse

Projektlaufzeit:

01.06.2016 bis 28.02.2022

Ressort/Referat:

BMWK IIC6
PTJ-ESN-1

Zuwendungsempfänger

Karlsruher Institut für Technologie KIT
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
e.V., Postfach 200733, 80007 München

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Friedrichstraße 39, 79098 Freiburg

Ausführende Stellen

Karlsruher Institut für Technologie KIT
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Institut für Angewandte Thermofluidik (IATF)
Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (fbta)
Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Abteilung Energieeffiziente Gebäude
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (ALU)
Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg

**Förderkennzeichen
FKZ**

03SBE0001 A

03SBE0001 B

03SBE0001 C

Gemeinsamer
Sachbericht aller drei
Verbundpartner im
vorliegenden
Dokument

Bearbeitung des Verbundprojekts**Karlsruher Institut für Technologie KIT:**

IATF: Ferdinand Schmidt
fbta: Andreas Wagner, Bernd Ebert, Nicolas Carbonare, Silke Schnaidt
IIP: Fritz Braeuer, Manuel Ruppert

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE:

Constanze Bongs, Jeannette Wapler, Arnulf Dinkel, Marek Miara, Manuel Lämmle, Lotta Koch, Sven Auerswald, Mohamed Obid, Jakob Metz

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH

Stefan Hess, Raphael Vollmer, Michael Kropp, Rebekka Eberle, Beatrice Rodenbücher, Manuel Lämmle, Katrin Scharf

Kurzfassung

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der wissenschaftlichen Querspanne »LowEx-Bestand Analyse« des thematischen Projektverbunds »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)« zusammen. In diesem Verbund wurden Lösungen entwickelt, analysiert und demonstriert, die den effizienten Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabesystemen und Lüftungssystemen bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden ermöglichen. Wärmepumpen haben ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen und des Einsatzes fossiler Energieträger bei der Wärmebereitstellung. Für die energetische Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden ist der Einsatz mit besonderen Herausforderungen und Anforderungen hinsichtlich Übergabe der Raumwärme, der Warmwasserbereitung und der Nutzung von Umweltwärme verbunden. LowEx-Systeme arbeiten durch geringe Temperaturdifferenzen zwischen Heizmedium und Nutzwärme besonders effizient.

Die Analyse von Gebäuden und Anlagentechnik zeigt, dass kleinere Mehrfamiliengebäude mit 3-12 Wohneinheiten mit einem Baualter zwischen 1958 bis 1968 den Bestand dominieren. Vorherrschende Heizungstechnik sind zentrale Wärmeversorgungssysteme und Heizkörper zur Wärmeübergabe. Auf Basis dieser Analyse wurden Referenzgebäude definiert und für die weiterführende Simulation unterschiedlicher Wärmepumpensysteme verwendet. Die Fragestellungen orientierten sich hierbei an der Evaluation von Lösungen zur Absenkung von Systemtemperaturen und zur Quellenerschließung.

Um Effizienzpotentiale der Wärmepumpen zu heben, ist eine Absenkung von Systemtemperaturen anzustreben. Für die Raumwärme kann dazu der selektive Austausch einzelner, unterdimensionierter Heizkörper ein kosteneffizienter Weg sein. Für die Trinkwassererwärmung weisen dezentrale Wohnungsstationen sowie Frischwasserstationen mit Ultrafiltration den geringsten Endenergieverbrauch auf. Die Quellenerschließung kann im dicht bebauten urbanen Raum eine kritische Randbedingung darstellen, wenn die verfügbare Fläche zu klein zur Nutzung von Luft und Erdwärme ist. Für diese Fälle können photovoltaisch-thermische Kombi-Kollektoren (PVT-Kollektoren), Mehrquellen-Systeme oder kalte Fernwärmenetze in Betracht gezogen werden.

Bivalente Systeme kombinieren eine Wärmepumpe mit einem fossilen Wärmeerzeuger. Dadurch können Quellen kleiner dimensioniert und Investitionskosten gesenkt werden. Betriebsstrategien für bivalente Systeme wurden für Gebäude mit unterschiedlichen Sanierungsstufen entwickelt und evaluiert. Unterhalb eines Verhältnisses von Strom- zu Erdgaspreis von 2,5 ist die Wärmepumpe auch bei Optimierung der Energiebezugskosten der bevorzugte Wärmeerzeuger im bivalenten System. Die techno-ökonomische Analyse berücksichtigt neben den Investitionskosten auch die Energiebezugskosten und deren (vor Ukraine-Krieg) erwarteter zukünftiger Entwicklung. Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme weisen über den Betrachtungszeitraum kumuliert eine CO_{2,Äq.}-Emissions-Reduktion von mehr als 50 % gegenüber einem Gasbrennwertgerät auf. Bereits bei einer weniger dynamischen Entwicklung der Erdgaspreise als derzeit verzeichnet, zeigen die untersuchten Wärmepumpen-Systeme über den Betrachtungszeitraum deutlich geringere Wärmegestehungskosten als Gas-Brennwertkessel.

An sechs Demonstrationsgebäuden wurden Systemlösungen und technische Weiterentwicklungen von Wärmepumpen und Lüftungstechnik in Bestands-Mehrfamiliengebäuden implementiert und vermessen. Die Monitoringergebnisse weisen gute Effizienzwerte der eingesetzten monovalenten und bivalenten Wärmepumpen-Anlagen nach. Hybridsysteme sind besonders für die stufenweise Sanierung geeignet. Neben Wärmepumpensystemtechnik werden auch dezentrale Lüftungssysteme mit optimierter Regelung demonstriert.

Aus den Projektergebnissen kann gefolgert werden, dass LowEx-Systeme wie Wärmepumpen und dezentrale Lüftungstechnik für den Einsatz im Mehrfamiliengebäudebestand geeignet sind, es aber weiterhin einen großen Aufholbedarf an Praxiserfahrung und Bedarf für weitere Systemstandardisierung gibt.

Abstract

This final report summarizes the results of the scientific cross-section "LowEx-Bestand Analyse" of the thematic project "Low-Ex Concepts for the Heat Supply of Existing Multifamily Buildings (Low-Ex-Bestand)". Solutions that enable the efficient use of heat pumps, heat transfer systems and ventilation systems in the energy modernization of multifamily buildings were developed, analyzed and demonstrated. Heat pumps show a considerable potential for reducing specific CO₂ emissions and the use of fossil fuels in the provision of heat. For the energetic refurbishment of multi-family buildings, the use is associated with special challenges and requirements with regard to the transfer of space heating, the preparation of hot water and the use of environmental heat. LowEx systems work particularly efficiently due to low temperature differences between heating medium and ambient heat source.

The analysis of buildings and system technology shows that smaller multi-family buildings with 3-12 residential units with a construction age between 1958 and 1968 dominate the building stock. The predominant heating technologies are central heat supply systems and radiators as heat emission system. Based on this analysis, reference buildings were defined and used for the further simulation of different heat pump systems. The research questions were oriented towards the evaluation of solutions for the reduction of system temperatures and heat source exploitation.

The reduction of system temperatures is an important measure to leverage efficiency potentials of heat pumps. For space heating, the selective exchange of individual, undersized radiators can be a cost-effective way. For drinking water heating, decentralized apartment stations and fresh water stations with ultrafiltration have the lowest final energy consumption. The availability of ambient heat sources can be critical issue, especially in densely populated urban areas, if the available area is too small for the use of air or geothermal heat alone. In these cases, photovoltaic-thermal combined (PVT) collectors, multi-source systems, or cold district heating networks should be considered as heat sources.

Operating strategies for bivalent systems, that combine heat pumps with fossil peak load heaters, have been developed and evaluated for buildings with different levels of renovation. Below an electricity to natural gas price ratio of 2.5 the heat pump is the predominant heat supplier in the bivalent system when optimizing energy procurement costs. The techno-economic analysis considers investment costs and the energy procurement costs with their expected future development (assumptions taken before the Ukraine war). The examined heat pump systems show a cumulative CO_{2,eq.}-emission-reduction of more than 50 % compared to a gas condensing boiler over the observation period. Even with a less dynamic development of natural gas prices than recorded in 2022, the analysed heat pump systems show significantly lower costs of heat generation than gas condensing boiler.

In six demonstration buildings, system solutions and technical developments of heat pumps and ventilation technology were implemented and measured. The monitoring results demonstrate good efficiency values of the monovalent and bivalent heat pump systems. Hybrid systems are particularly suitable for step-wise refurbishment. In addition to heat pump system technology, decentralized ventilation systems and optimized control are also demonstrated.

It can be concluded that Low-Ex systems such as heat pumps and decentralized ventilation technology are suitable for the application in existing multifamily buildings, but there is still a research need to practical experience in the field and a need for further system standardization.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	5
Abstract.....	6
Inhaltsverzeichnis	7
Nomenklatur	9
1 Einleitung.....	11
1.1 Wärmepumpen in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden	11
1.2 Thematischer Projektverbund »LowEx-Bestand«	12
1.3 Ziele und Aufbau dieses Abschlussberichts	15
2 Bestandsanalyse und Sanierungsprozess	19
2.1 Gebäudetypen und Sanierungsgrade im Bestand	19
2.2 Gebäudetechnik im Bestand	23
2.3 Akteure und Prozesse bei der Sanierung.....	27
2.4 Referenz-Gebäude und Referenz-Wärmebedarfe	30
2.5 Sanierungs-Szenarien	33
2.6 Schlussfolgerungen	35
3 Modellentwicklung und Simulation	37
3.1 Thermohydraulische Modellierung in Dymola/Modelica.....	37
3.2 Modellierung von Wärmepumpensystemen in HEBAP	40
4 Wärmepumpensystemtechnik für Mehrfamilienhäuser im Bestand.....	44
4.1 Herausforderungen für Wärmepumpen im Mehrfamilienhäuser-Bestand	44
4.2 Systemkonzepte	45
4.3 Raumwärme-Übergabe und selektiver Heizkörper-Tausch	52
4.4 Trinkwassererwärmung	55
4.5 Wärmequellen und Verfügbarkeit.....	59
4.6 PVT-Wärmepumpensysteme	61
4.7 Charakteristik des Betriebs bivalenter Wärmepumpensysteme.....	65
4.8 Schlussfolgerungen	81
5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Sanierungspaketen	84
5.1 Investitionskosten für Systemkomponenten und Hüllsanierung.....	84
5.2 Preis- und CO ₂ -Szenarien	86
5.3 Ergebnisse der techno-ökonomischen Bewertung von Sanierungspaketen.....	88
5.4 Serielle Sanierung und Sanierungspfade mit Wärmepumpen-Systemen	92
5.5 Schlussfolgerungen	94
6 Komfort-Untersuchungen und Regelungsentwicklung dezentraler Lüftungstechnik	96
6.1 Komfortuntersuchungen an Deckenstrahlungsheizungen	96
6.2 Dezentrale Lüftungssysteme für Bestandsgebäude	98

6.3	Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungssysteme	99
6.4	Schlussfolgerungen	103
7	Demonstration und Monitoring	105
7.1	Methodik: Monitoring, Datenerhebung und Evaluation	106
7.2	Wohnen-Adorf, Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten	108
7.3	SanBest – Wohnhausanlage in Freiburg.....	124
7.4	Hamburg Bramfeld	130
7.5	Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach	132
7.6	Demo Lüftung in Karlsruhe, KIT: Energy Smart Home Lab	142
7.7	Schlussfolgerungen und Umsetzungsempfehlungen	145
8	Zusammenfassung der Ergebnisse des IEA HPP Annex 50	146
9	Schlussfolgerungen.....	148
Anhang	156

Nomenklatur

Abkürzung	Bedeutung
Abs.	Absatz
Abschn.	Abschnitt
A _N	Nutzfläche
AP	Arbeitspaket
BWP	Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GMH	Großes Mehrfamilienhaus - mehr als 12 Wohneinheiten
H _T	Spezifischen Transmissionswärmeverlust
IfSG	Infektionsschutzgesetz
ISO	International Organization for Standardization
K	Kelvin
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KGF	Konstruktionsgrundfläche/ Konstruktions- Grundfläche
KMH	Kleines Mehrfamilienhaus - 3- 6 Wohneinheiten
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MFH	Mehrfamilienhaus
WP	Wärmepumpe

1 Einleitung

1.1 Wärmepumpen in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

Vor dem Hintergrund der weitreichenden Veränderungen der Energiebezugslage in Deutschland und Europa sowie den Klimaschutzzielen der Bundesregierung werden Wärmepumpen für die Zukunft die Rolle als bedeutendste Wärmeversorgungs-technologie zuerkannt. In Wissenschaft und Politik besteht inzwischen weitgehende Einigkeit, dass eine schnelle Umstellung von fossilen Heizsystemen auf klimagerechtere Technologien der Wärmeversorgung notwendig ist. Neben dem Ausbau und der Dekarbonisierung von Wärmenetzen und dem Entwickeln von Lösungen auf Quartiersebene spielt auch die Einzelversorgung von Gebäuden eine bedeutende Rolle. Hier sind Wärmepumpen ein entscheidender Hebel für erfolgreichen Klimaschutz in Gebäuden sowie eine Möglichkeit der Reduktion des Gasverbrauchs.

Während im Neubausektor bereits jedes zweite eingebaute Heizsystem eine Wärmepumpe ist, wurden in den vergangenen Jahren im Gebäudebestand bei der Heizungsmodernisierung immer noch sehr viele alte Heizkessel durch neue Gas- und Ölkessel ersetzt, die trotz Brennwerttechnik hohe CO₂-Emissionen über viele Jahre festschreiben (Lock-In-Effekt). Demgegenüber haben Wärmepumpenheizungen den großen Vorteil, dass ihre CO₂-Emissionen über die Lebensdauer der Anlage von Jahr zu Jahr in dem Maße sinken, wie der Stromerzeugungsmix erneuerbarer und emissionsärmer wird. In Deutschland lag die Anzahl abgesetzter Wärmeerzeuger im Bestand in der Größenordnung von 800.000 Wärmeerzeugern in 2020, von denen ca. 680.000 Wärmeerzeuger noch Gasgeräte waren.¹ Trotz dessen sind die Absatzzahlen für Wärmepumpen im Bestand stark steigend. Bereits seit 2020 zeichnete sich eine Trendwende ab, da hier erstmals mehr Wärmepumpen im Bestand als im Neubau abgesetzt wurden (2021: 100.000 Wärmepumpen im Bestand, ca. 55.000 Wärmepumpen im Neubau).² Die aktuell benannte Zielmarke der Bundesregierung ist es, dass ab 2024 jährlich 500.000 Wärmepumpen im Gebäudesektor installiert werden. Dies bedeutet einen massiven Anstieg von Wärmepumpen im Bestand - und zwar sowohl in Ein- und Zweifamiliengebäuden, die bisher den Hauptzielmarkt der Gerätehersteller darstellten, als auch in Mehrfamiliengebäuden.

In Mehrfamilienbestandsgebäuden ist der Einsatz von Wärmepumpen auch mit besonderen Randbedingungen und Herausforderungen verbunden. Hier werden Wärmepumpen bisher nur in seltenen Fällen eingesetzt. Technische Herausforderungen ergeben sich daraus, dass Mehrfamiliengebäude einen höheren Wärmebedarf aufweisen und damit höhere erforderliche Wärmeleistungen des Wärmeerzeugers benötigen. Weiter sind Mehrfamiliengebäude häufig in dicht bebauten Quartieren anzufinden. Beide Aspekte führen dazu, dass der Erschließung der Umweltwärmequelle eine hohe Bedeutung zukommt und diese eine Limitierung darstellen kann. Weiter erfolgt die Wärmeübergabe in Mehrfamilienbestandsgebäuden zum Großteil mit Heizkörpern (auch älteren Datums), die häufig mit hohen Vorlauftemperaturen betrieben werden. Außerdem erfolgt die Erzeugung von Trinkwarmwasser mehrheitlich zentral mit Warmwasserzirkulation und der Anforderung an die Einhaltung der erforderlichen Temperaturen zum Legionellenschutz. Dies führt in Summe dazu, dass in Mehrfamilienbestandsgebäuden die häufig noch hohen Systemtemperaturen für Heizung und Trinkwarmwasser als zweite Hürde für den Einsatz von Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand angesehen werden. Insofern ergeben sich die zwei thematischen Bereiche „Quellenerschließung“ und „Systemtemperaturen“ als Schwerpunkte in der Entwicklung neuer Lösungen auf systemischer und auf Geräteebe für den Einsatz von Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand.

Auf nicht-technischer Ebene bestehen und bestanden die folgenden Hürden: das Mieter-Vermieter-Dilemma, die bisher niedrigen Kosten fossiler Energie in Kopplung mit einer hohen Anfangsinvestition für Wärmepumpensysteme, mangelnde Erfahrungen in der Planung, der Installation und dem Betrieb

¹ DENA Gebäudereport 2022

² BWP/BDH-Absatzstatistik und Baufertigstellungsstatistik

sowie Unsicherheiten hinsichtlich der Akzeptanz von Temperaturabsenkungen im Heizsystem auf Nutzerseite.

Der Projektverbund LowEx im Bestand hat sich zum Ziel gesetzt, für diesen schwierig zu dekarbonisierenden Sektor Lösungsansätze und Technologien zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung sowie innovative Strategien zur Gebäudelüftung zu entwickeln und zu bewerten. Das Vorhaben wurde im Jahr 2016 begonnen und endete im Februar 2022, vor dem Beginn des Angriffskriegs Russlands gegen die Ukraine und vor der damit völlig veränderten Energiebezugslage in Europa, speziell in Deutschland. Sowohl Gas- und Heizölpreise als auch die Strompreise sind seit Ende Februar 2022 weitaus stärker gestiegen als in allen in diesem Vorhaben betrachteten Wirtschaftlichkeitsszenarien angenommen. Diese im Verlauf des Projekts nicht vermutete Entwicklung verstärkt die Notwendigkeit der beschleunigten Umstellung der Wärmeversorgung hin zur Effizienztechnologie Wärmepumpe, die neben der Nutzung von Umweltwärme zusätzlich einen Energieträgerwechsel ermöglicht. Der vorliegende Endbericht soll daher auch als Hilfestellung für die Umsetzung und zur Einordnung von Lösungsansätzen für Wärmepumpen und Lüftungstechnik im Mehrfamilienhausbestand dienen.

1.2 Thematischer Projektverbund »LowEx-Bestand«

Im Projekt-Verbund »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von sanierten Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)« wurden Lösungen für den Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabe- und Lüftungssystemen in energetisch sanierten Mehrfamiliengebäuden umfassend und in enger Kooperation mit gewerblichen Unternehmen aus der Heiztechnikindustrie und der Wohnungswirtschaft analysiert, entwickelt und demonstriert.

Ziel des Projektverbunds war es, durch die Entwicklung neuer Technologien auf Geräteebene sowie durch die Analyse, Bewertung und Erprobung von Ansätzen auf Ebene des Gesamtsystems Wärmepumpe und Gebäude eine Beschleunigung der Markteinführung und breiten Umsetzung von LowEx-Systemen im Mehrfamilienhausbestand zu erreichen. Zu diesem Zweck gliedert sich der Projektverbund in drei thematische und organisatorische Säulen: Analyse, Technologieentwicklung und Demonstration (Abbildung 1).



Abbildung 1: Projekte und Partner im thematischen Projektverbund »LowEx-Bestand«

Innerhalb des thematischen Projektverbunds stellt das **übergreifende Forschungsprojekt** „LowEx-Bestand Analyse“ die wissenschaftliche und kommunikative Querspanne aller Arbeiten dar. Das Verbundprojekt wurde vom Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) der Universität Freiburg koordiniert. Weitere Verbundpartner sind das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie

das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg. Der vorliegende Endbericht stellt die Ergebnisse aus dieser übergreifenden Aktivität zusammen.

Gegenstand der **Technologieprojekte** war die Technologieentwicklung durch industrielle Partner in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Inhalte der Technologieprojekte sowie die Partner.

In den **Demonstrationsprojekten** war die Umsetzung und messtechnische Begleitung der in den Technologie-Projekten entwickelten Komponenten und Systeme durch Partner aus der Wohnungswirtschaft das Ziel. Diese wurden teilweise durch beispielhafte Sanierungen von Mehrfamilienhäusern begleitet (Wohnungsgesellschaft Adorf), aber auch in bereits teilsanierten Gebäuden angewandt (Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach). Ergebnisse der messtechnischen Begleitung dieser Systeme sind in dem vorliegenden Bericht zusammengefasst.

Die folgenden technischen Lösungsansätze wurden im Rahmen des Projektverbunds vorangetrieben und teilweise bis in die Demonstration gebracht:

- Im Projekt **HTWP** wurde eine Vorentwicklung einer Wärmepumpenlösung für die Leistungsklasse bis 35 kW für den MFH-Bestand auf Basis des natürlichen Kältemittels Propan (R290) vorgenommen. Ziel ist hier auch eine gute Eignung zur Bereitstellung höherer Vorlauftemperaturen. Die Weiterentwicklung hybrider Wärmepumpensysteme (Gaskessel + Wärmepumpen) in Hinsicht auf Systemvereinfachung und die Regelung zur Erreichung einer garantierten CO₂-Einsparung war ebenfalls Gegenstand dieses Projekts. Das Hybridsystem wird im Demonstrator der Wohnungsgesellschaft Adorf betrieben und messtechnisch begleitet.
- Im Projekt **NK4HTWP** wurde eine Wärmepumpe mit einem synthetischen Kältemittel mit niedrigem Treibhausgaspotential (Low-GWP Kältemittel) mit der Zielsetzung der Bereitstellung höherer Temperaturen bei guter Effizienz entwickelt und auf dem Teststand charakterisiert. Das Ziel einer Leistungszahl von COP >2,0 im Betriebspunkt A-7/W55 (Außenlufttemperatur von -7°C und Vorlauftemperatur von 55°C) wurde hier messtechnisch nachgewiesen.
- Das Projekt **Adosan** beschäftigte sich mit der Entwicklung einer Gasadsorptions-Wärmepumpe mit dem Kältemittel Wasser. Hier wurden die Adsorptionsmodule weiterentwickelt sowie die Geräteintegration mit gasflexiblem Brenner (bis zu 30% Beimischung H₂ möglich) und Regelung realisiert. Ein Funktionsmuster mit einer für MFH geeigneten Nennleistung von 40 kW wurde aufgebaut und auf dem Teststand charakterisiert. Mit Jahresheizzahlen von 1,25-1,3 für ein Heizsystem mit Nenn-Systemtemperaturen von 55/45 (T_{VL,Nenn}: 55°C, T_{RL,Nenn}: 45°C) ist die Gasadsorptions-Wärmepumpe deutlich effizienter als ein Gasbrennwertgerät.
- Im Projekt **HEAVEN** wurde ein Mehrquellensystem zur Kombination der Wärmequellen Außenluft und Erdreich mitsamt Quellenhydraulik und vollständiger Regelung entwickelt. Das System wurde in Karlsruhe-Durlach in die Umsetzung gebracht und wird dort weiter betrieben. Weiter wurden optimale Regelungsstrategien für Pendellüfter unter Berücksichtigung von Raumluftqualität, Energiebedarf und Schallpegel entwickelt. Ein Spülluftteststand zur experimentellen Charakterisierung von Pendellüftern wurde aufgebaut und die Lüftungseffektivität im Feld untersucht.
- Das Projekt **FIHLS** entwickelte fassadenintegrierte Lüftungsgeräte sowie wohnungsweise zentrale Lüftungsgeräte. Steuerungsalgorithmen für die Lüftungsgeräte wurden optimiert und Funktionsmuster der Steuerungsplatinen angefertigt. Die Demonstration erfolgt im Mehrfamiliengebäude der Wohnungsgesellschaft Adorf.

Tabelle 1: Übersicht der Einzelprojekte im Projektverbund »LowEx-Bestand«

LiB - Analyse	Titel	FKZ
LowEx-Bestand Analyse („Querspange“)	LowEx-Konzepte zur Wärmeversorgung in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden	03SBE0001
LiB - Technologie	Konzepte	
Bestand-HTWP (Bosch)	Wärmepumpenlösungen für Mehrfamiliengebäude (bivalentes Wärmepumpensystem, Vorentwicklung Propan-Wärmepumpen)	03ET1377
FIHLS (B+H, Kermi, Westaflex)	Fassadenintegrierte Heizung, Lüftung und Sanitär	03ET1401
NK4HTWP (Stiebel Eltron)	Hochtemperatur-Wärmepumpe mit synthetischen Low- GWP Kältemitteln für RW und TWW	03ET1488B
HEAVEN (Viessmann)	Mehrquellen-Systeme und dezentrale Lüftungsgeräte (Regelung und Bewertung)	03ET1540
AdoSan (FAHRENHEIT, Haugg, herrmann burners)	Entwicklung Gas-Adsorptions-Wärmepumpe für die Sanierung	03ET1554
LiB - Demo	Projekte	
Wohnungsgesellschaft Adorf	Demonstration von fassadenintegrierter Lüftung und Wärmepumpen-Hybridanlage in Adorf	03SBE0001
Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach	Energieversorgungskonzept für einen Cluster von fünf Bestands-MFH in Karlsruhe, Demonstration Mehrquellen-Wärmepumpen-System	03ET1590
Bramfeld	Demonstration eines fassadenintegrierten Lüftungssystems & Wärmepumpenversorgung einer Heiz- & TWW-Großanlage in Hamburg Bramfeld	03SBE0001E

1.3 Ziele und Aufbau dieses Abschlussberichts

Die durchgeführten Arbeiten des Verbundprojektes „LowEx-Bestand Analyse“ (übergeordnetes Querspannenprojekt) wurden in sechs Arbeitspaketen bearbeitet, die wiederum in einzelne Aufgaben gegliedert sind. Diese Arbeitspaketstruktur ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Struktur der Arbeitspakete mit Verantwortung.

AP 7 Koordination und Wissenstransfer (INATECH)				
AP 1 (KIT)	AP 2 (ISE)	AP 3 (ISE)	AP 4 (ISE)	AP 5 (KIT)
Analyse des MFH Bestands und des Sanierungsprozesses	Typisierung von LowEx-Systemkonzepten	Modellierung und Simulation von Gesamtsystemen	Demonstration neuartiger LowEx-Konzepte im MFH-Bestand	Ökonomische Analysen zur MFH-Bestandssanierung mit LowEx-Systemen
AP 1.1. Systematische Analyse des Gebäudebestandes (KIT)	AP 2.1 Niedertemperatur-Wärmequellen und ihre Erschließung (INATECH)	AP 3.1 Entwicklung von Modellen (ISE)	AP 4.1 Auswahl der Demogebäude und Technologiezuordnung (ISE)	AP 5.1 Techno-ökonomische Charakterisierung und Bewertung der LowEx Konzepte (KIT, INATECH)
AP 1.2 Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung (KIT)	AP 2.2 Wärmeübergabe und Raumkomfort (KIT)	AP 3.2 Entwicklung und Aufbau numerischer Gesamtsystemmodelle (ISE)	AP 4.2 Durchführung der Sanierung (ISE)	AP 5.2 Hebel für die Energieeffizienz in MFH-Bestandsgebäuden (KIT)
AP 1.3 Technische Anforderungen an die Energieversorgung von MFH (ISE)	AP 2.3 Potenzialanalyse zur Solarisierung der Gebäudehülle (ISE)	AP 3.3 Vorauswahl der LowEx-Konzepte und Komfortbewertung (ISE)	AP 4.3 Monitoring (ISE)	AP 5.3 Modellgestützte Analyse aus verschiedenen Akteursperspektiven (KIT)
AP 1.4 Nicht-technische Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren des Sanierungsprozesses (KIT)	AP 2.4 Technische Analyse von Systemkonzepten (ISE)		AP 4.4 Auswertung Evaluierung (ISE)	
AP 6 IEA-HPP-Annex „Heat Pumps in Multi-Family Buildings“ (ISE)				

Dieser Abschlussbericht soll einen orientierenden Überblick über die im Vorhaben erreichten Ergebnisse geben. Viele Teilergebnisse wurden bereits in wesentlich detaillierterer Form in Berichten zu Arbeitspaketen und Meilensteinen aufbereitet, die auf der Website www.lowex-bestand.de zum Download zur Verfügung stehen. Dieser Bericht ist daher als Manteldokument zu verstehen, das für eine vertiefte Darstellung einzelner Aspekte auf die Teilberichte verweist. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über diese Teilberichte mit Schlagworten zum Inhalt und verweist auf das jeweilige Kapitel dieses Abschlussberichts.

Tabelle 3: Ausführliche Berichte des Projekts, verfügbar auf www.lowex-bestand.de

Analyse MFH-Bestand und Sanierungsprozess	
Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden	AP 1.1
Statistische Analysen des Gebäudebestands; Betrachtung von Gebäudetypologie, Sanierungszuständen und Heizungstechniken (incl. Trinkwarmwasser, Lüftung); Definition repräsentativer Referenzgebäude (108 S.). S. auch Kapitel 2 dieses Berichts.	
Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung	AP 1.2
Ergebnisse von Experteninterviews zu Sanierungsprozessen in der Wohnungswirtschaft; Analyse von Hemmnissen für eine höhere Sanierungsrate und -tiefe; nichttechnische Rahmenbedingungen; Analysen zu typischen neuralgischen Punkten im Modernisierungsprozess zwischen beteiligten Akteuren. Gute Kommunikation mit Mieter*innen als Erfolgsfaktor (134 S.). S. auch Kapitel 2.3 dieses Berichts.	
Technische Anforderungen an MFH	AP 1.3
Zusammenfassung der relevanten Anforderungen aus Gesetzen, Verordnungen und Normen, die bei der Sanierung von MFH zu beachten sind; Bereiche: Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung; Wärmequellenerschließung (Schall, Erdreichnutzung); Wärmebereitstellung; Komfort, Lufthygiene, Fassade, Brandschutz (100 S.). Hintergrund zu Kapitel 2, 4 und 5 dieses Berichts.	
Bewertung v. Wärmeübergabesystemen im Hinblick auf Raumkomfort	AP 2.2
Ergebnisse empirischer Analysen zum Raumkomfort mit Deckenstrahlungsheizungen und Niedertemperatur-Konvektorheizkörpern bei unterschiedlicher Fassadenqualität (78 S.). Hintergrund zu Kapitel 4 dieses Berichts, s. auch Kapitel 6.	
Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort & Luftqualität	AP 2.2
Fokus auf Pendellüfter; Anforderungen an Wohnungslüftung bei Sanierung; Nutzerzentrierte Regelungsstrategien, Forschungsergebnisse zu selbstlernender Regelung (64 S.). Siehe auch Kapitel 6.2 und 7.6 dieses Berichts.	
Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik & Sanierungsszenarien	AP 3.1
Statistisch repräsentative Referenzgebäude nach Baualtersklasse und Sanierungszustand: Eingangsdaten für Gebäudesimulation und Lastzeitreihen aus TRNSYS (44 S.). Siehe auch Kapitel 2.1 und 5 dieses Berichts.	
Typisierung von LowEx-Systemkonzepten	
Quellen-Verfügbarkeit für Wärmepumpen-Systeme in MFH	AP 2.1
Potenzialanalyse der verschiedenen Umweltwärmequellen nach Gebäude- und Stadtraumtyp; beispielhafte Quellendimensionierung; Sensitivitätsanalysen zu Einflussfaktoren; Möglichkeiten für Quellenkombinationen (85 S.). Siehe auch Kapitel 4.5 dieses Berichts.	
Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Sanierungspaketen	AP 5
Identifikation wirtschaftlich und energetisch vorteilhafter Sanierungspakete; Annahmen zu energiewirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen (123 S.).	
Abschlussbericht und Website des IEA Annex 50. Siehe auch Kapitel 8 dieses Berichts.	
	AP 6

Dem Ziel entsprechend, einen einführenden Überblick über die Forschungsthemen und Ergebnisse des Vorhabens zu geben, gliedert sich dieser Abschlussbericht nicht nach Arbeitspaketen, sondern nach den wesentlichen Themenfeldern des Vorhabens.

- Kapitel 2 befasst sich mit der Analyse des Gebäudebestands und der Sanierungsprozesse (AP 1), stellt aber auch bereits die angenommenen Sanierungsszenarien vor, in die Teilergebnisse anderer APs eingeflossen sind.
- Kapitel 3 stellt die wissenschaftlichen Arbeiten in der Simulationsentwicklung vor und beschreibt das im Zuge des Vorhabens am Fraunhofer ISE entwickelte Simulationstool HEBAP.
- Kapitel 4 gibt einen Überblick über die Systemtechnik von Wärmepumpen im MFH-Bestand ausgehend von einer Typologisierung der wichtigsten auftretenden Fälle. Hier werden auch wesentliche Lösungsstrategien wie der selektive Heizkörperaustausch und der Umgang mit zentralen Trinkwassersystemen diskutiert und Potenziale neuartiger Systemtypen (wie PVT-Systemen als Quelle) aufgezeigt.
- In Kapitel 5 wird die techno-ökonomische Bewertung der möglichen Kombinationen von Sanierung der Gebäudehülle und der Heizungstechnik dargestellt und diskutiert.
- Kapitel 6 widmet sich den Themen Nutzerkomfort und dezentrale Lüftungstechnik.
- Kapitel 7 stellt die Ergebnisse der Demonstrationsvorhaben vor
- Kapitel 8 fasst die Ergebnisse des IEA HPP Annex 50 zusammen, zu dem dieses Vorhaben einen deutschen Beitrag darstellt.
- Den Abschluss des Berichts bildet Kapitel 9 mit den wichtigsten Schlussfolgerungen des Vorhabens.

Für eine Kommunikation der Projektergebnisse in eine breite Zielgruppe wird die Projektwebsite www.lowex-bestand.de von den Projektpartnern in deutscher und englischer Sprache angeboten. Bereits während der Projektlaufzeit konnten so die wichtigsten Zwischenergebnisse, Teilberichte, Monitoringergebnisse aus den Demovorhaben sowie berichtenswerte aus dem Projektverbund geteilt werden.

Auf der Website sind folgende Informationen zu finden:

- Allgemeine Informationen zum Gesamtprojekt LowEx-Bestand Analyse und den Technologieprojekten
- Informationen zu den Demonstrationsprojekten. Als Highlight sind dort auch kurze Videos aus den Demonstrationsvorhaben für einen realistischen Eindruck zu finden.
- Download aller veröffentlichten Ergebnisse unter [Downloads/Ergebnisse](#). Dort sind die meisten der in diesem Abschlussbericht referenzierten Dokumente als freier Download verfügbar.
- Eine Handreichung zum Einsatz von Wärmepumpen in teilsanierten Mehrfamiliengebäuden für einen breiten Adressatenkreis (Wohnungswirtschaft, Planer, Energieberater, interessierte Öffentlichkeit) befindet sich in der finalen Abstimmungsphase und wird ebenfalls über die Webseite bereitgestellt werden.



LowEx-Bestand

Mehrfamilienhäuser nachhaltig beheizen – Projekt von Forschung, Heiztechnik-Herstellern und Wohnungswirtschaft

Projekt	News	Analyse ▾	Technologie ▾	Demo ▾	Downloads ▾	Kontakte	Datenschutz	Intern	Sprache: ▾
---------	------	-----------	---------------	--------	-------------	----------	-------------	--------	-------------

<h3>Veranstaltungen</h3> <p>DKV-Tagung 2021</p> <p>Freitag, 19.11.2021</p> <p>Vortrag und Paper: » Techno-ökonomische und ökologische Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand«</p>	Veranstaltungen
	Ergebnisse
	Poster

Abbildung 2: Webpage des Projektverbunds »LowEx-Bestand« www.lowex-bestand.de.

2 Bestandsanalyse und Sanierungsprozess

2.1 Gebäudetypen und Sanierungsgrade im Bestand

Der deutsche Gebäudebestand ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl älterer Gebäude, die zur Sanierung anstehen. Von den in diesem Projekt betrachteten Mehrfamilienhäusern (MFH) sind ca. 80 % älter als 30 Jahre (gebaut bis 1987); etwa 40 % sind älter als 60 Jahre (Walberg et al. 2011). Im Hinblick auf eine grundlegende Sanierung stehen neben Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung diverse weitere Punkte im Fokus, wie z.B. Ergänzung von barrierefreien Erschließungsflächen, Verbesserung von Schallschutz, Anpassung der Wohnungsgrößen an aktuelle Wohnbedürfnisse etc. Viele dieser Maßnahmen lassen sich nur schwer gegeneinander abgrenzen, häufig führt sogar eine Kombination von Maßnahmen zu einer Verbesserung des Sanierungserfolges.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1.1 wurde deshalb in einer frühen Projektphase der Frage nachgegangen, ob und wie sich bestehende Mehrfamilienhäuser nach ihrem Baualter hinsichtlich Grundrisstypologie und Bauform, sowie technischer Gebäudeausrüstung und energetischem Standard klassifizieren bzw. typisieren lassen. Dazu wurden diverse Studien und statistische Erhebungen ausgewertet. Eine daraus möglicherweise resultierende Regelmäßigkeit bei der Sanierung der Typgebäude könnte somit als Entscheidungshilfe für zukünftige Sanierungsprojekte dienen und die Sanierungsprozesse beschleunigen. Die aufbereiteten Informationen dienen im weiteren Verlauf des Projekts dazu, repräsentative MFH-Typen – sog. LowEx-Referenzgebäude – zu definieren (siehe Kapitel 2.4) und darauf zugeschnittene LowEx-Systeme zu entwickeln.

Mehrfamilienhäuser mit drei oder mehr Wohneinheiten machen 54 % (bezogen auf Wohnungen) bzw. 41 % (bezogen auf die Wohnfläche) des gesamten deutschen Gebäudebestands aus (siehe Abbildung 3). Mit einem Anteil von ungefähr 94 % besitzen die meisten MFH 3 bis 12 Wohneinheiten pro Gebäude. Somit scheint es sinnvoll, im Projekt vorrangig Gebäude dieser Größe weiter zu untersuchen. Diese sind zu ähnlichen Anteilen (bezogen auf die Wohnungsanzahl) im Besitz von Privatpersonen, Wohnungseigentümergeinschaften und Wohnungsunternehmen.

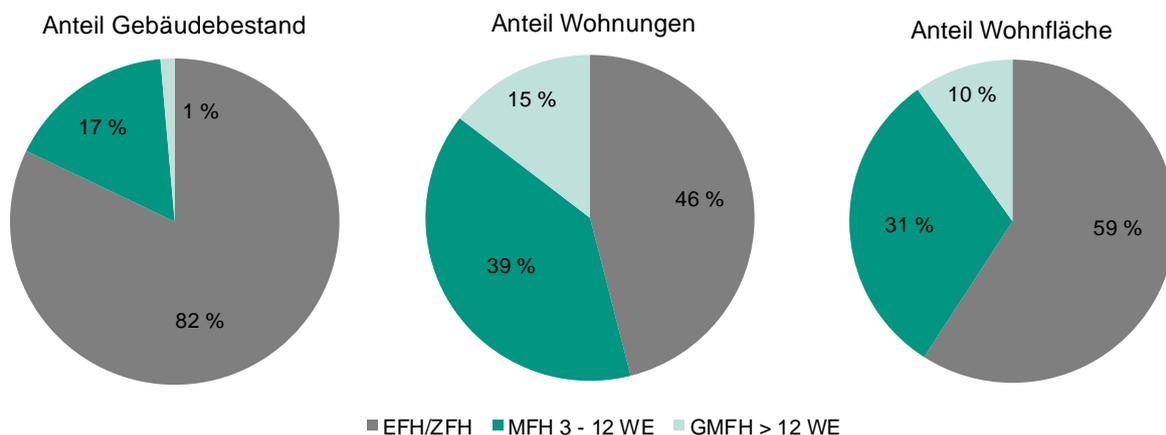


Abbildung 3: Anteile der Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH/ZFH), der Mehrfamilienhäuser mit drei bis 12 Wohneinheiten (MFH 2 – 12 WE) und der großen Mehrfamilienhäuser mit mehr als 12 Wohneinheiten (GMFH > 12 WE) am deutschen Gebäudebestand. (Eigene Darstellung nach Bürger et al. 2016).

Die größte Gruppe unter den Mehrfamilienhäusern mit 3 bis 12 Wohneinheiten stellen hierbei mit einem Anteil von ca. 20 % die zwischen 1958 und 1968 errichteten Gebäude; diese werden der Baualtersklasse (BAK) E zugeordnet. Bei den großen Mehrfamilienhäusern mit 13 oder mehr Wohneinheiten stellen die Gebäude aus der Baualtersklasse F (1969-1978) mit ca. 25 % die größte Einzelgruppe des Bestandes (siehe Abbildung 4).

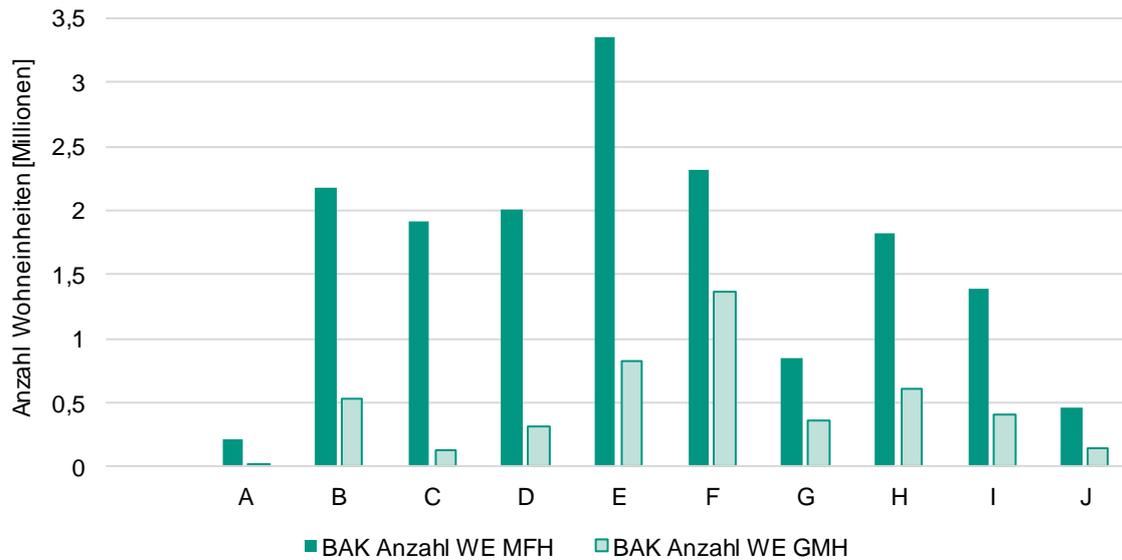


Abbildung 4: Anzahl von Wohneinheiten aufgeteilt nach MFH (3 – 12 WE) und GMH (> 12 WE) gemäß Baualtersklassen (BAK). (Eigene Darstellung nach Loga et al. 2015a).

Bezüglich der städtebaulichen Struktur kann – mit Ausnahme der Baualtersklasse A – keine vorherrschende Form ermittelt werden. Siedlungen wurden ab 1900 sowohl als Blockrand- als auch als Zeilenbebauung ausgeführt, wobei ca. 47 % der MFH freistehend und 53 % in geschlossener Bebauung sind. Somit kann auf dieser Basis auch kein Rückschluss auf eine mögliche Gebäudeorientierung gezogen werden. Eine Analyse der Fensterflächenausrichtung lässt ebenfalls keine klare Aussage zur typischen Gebäudeorientierung einer BAK zu. Auch von im Projekt UrbanReNet untersuchten Stadtraumtypen kann kein Rückschluss auf die Baualtersklassen gezogen werden, da der Bebauungsgrad des Nettobaulandes (Grundstücke ohne öffentliche Erschließung/ Infrastruktur) und die Höhe der Bebauung zu sehr variiert (Hegger et al. 2012). In Bezug auf das geothermische sowie das photovoltaische und solarthermische Potential gilt, dass eine Angabe für einzelne Stadtraumtypen zwar gemacht werden kann, der Bezug auf das Gebäudebualter aber nicht öffentlich zugänglich ist.

Die Gebäudeerschließungen von Mehrfamilienhäusern mit bis zu 12 Wohneinheiten sind vorrangig als Zwei- und Dreispänner ausgeführt und sind in der Regel zwischen 20 und 24 m lang (Zweispänner) bzw. zwischen 12 und 15 m breit und zwischen 20 und 30 m lang (Dreispänner) (siehe Abbildung 5). Die Anzahl der Geschosse von Mehrfamilienhäusern nahm über die Jahrhundertwende vom 19. ins 20. Jahrhundert im Mittel um etwa ein Geschoss auf drei bis vier Geschosse zu. Ab den 1960er Jahren erhöhte sich die Obergrenze um ein weiteres Geschoss. Die Geschosszahl liegt seither zwischen drei und fünf Geschossen. Zu Beginn der Aufzeichnung wurden Mehrfamilienhäuser ausschließlich mit Satteldächern ausgeführt. Bereits in den 20er Jahren kam die Bauform des Flachdachs hinzu. Ab den 1980er Jahren werden zudem vermehrt Pultdächer ausgeführt. Die Gebäude sind über alle Baualtersklassen mehrheitlich unterkellert. Der Platzbedarf von Treppenhäusern in MFH wurde anhand geltender Bauordnungen und Normen hergeleitet mit dem Ergebnis, dass nicht barrierefreie Treppenhäuser zwischen 22 und 29 m² und Treppenhäusern mit Aufzug zwischen 26,5 und 33,5 m² Platz benötigen

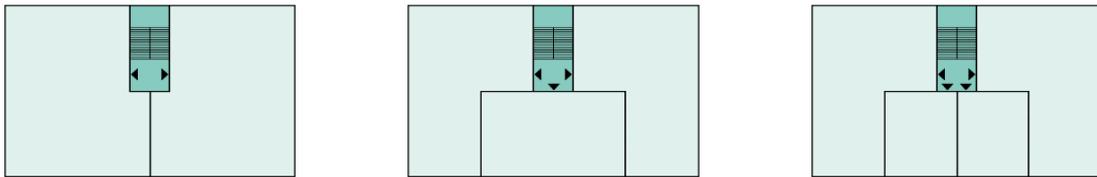


Abbildung 5: Schematische Darstellung von Zwei- (links), Drei- (Mitte) und Vierspänner (rechts).

Zwei Drittel der Wohneinheiten in Mehrfamiliengebäuden mit mehr als drei Wohneinheiten weist eine Wohnfläche von 40 bis 79 m² auf. Die meisten der kleinen Wohnungen in dieser Gruppe – mit einer Wohnfläche von 40 bis 49 m² – sind Ein- und Zweizimmerwohnungen (zzgl. Küche und Bad). Die 10 m² größeren Wohnungen (50 bis 59 m²) sind Ein- bis Dreizimmerwohnungen. Die größten Wohnungen des o.g. Bereichs (60 bis 79 m²) sind Zwei- bis Dreizimmerwohnungen. Die Wohnungen mit Flächen von 40 bis 69 m² werden vorrangig von Singles bewohnt. Die größeren Wohnungen mit einer Wohnfläche bis 79 m² werden zumeist von Paaren ohne oder mit Kindern bewohnt. Typische Raumgrößen für verschiedene Wohnräume sowie Norminnentemperaturen wurden ebenfalls erfasst.

Die Analyse der thermischen Gebäudehülle zeigt, dass Fenster im MFH-Bestand mit knapp 90 % überwiegend mit Zwei-Scheiben-Verglasung (ca. ein Drittel ohne Wärmeschutzverglasung) verbaut sind (siehe Abbildung 6). Bei ca. 54 % der MFH ist eine Dämmung der Außenwand vorhanden, ca. 82 % haben ein gedämmtes Dach oder eine gedämmte Obergeschosdecke und bei ca. 37 % ist der Fußboden bzw. die Kellerdecke gedämmt. Die Außenwände von Mehrfamilienhäusern sind zu 65 % aus einschaligem und zu 24 % aus zweischaligem Mauerwerk (8 % Betonfertigteile, Großtafelbauweise und Plattenbau, 3 % sonstige). Betrachtet man die Entwicklung der U-Werte über die Zeit, so erkennt man, dass bereits frühzeitig eine Verbesserung im Dachbereich erfolgte und auch bei Wand und Boden kontinuierlich verbesserte wurde. Lediglich bei Fenster und Türen wurde erst in den letzten 20 bis 25 Jahren deutliche Verbesserungen erreicht.

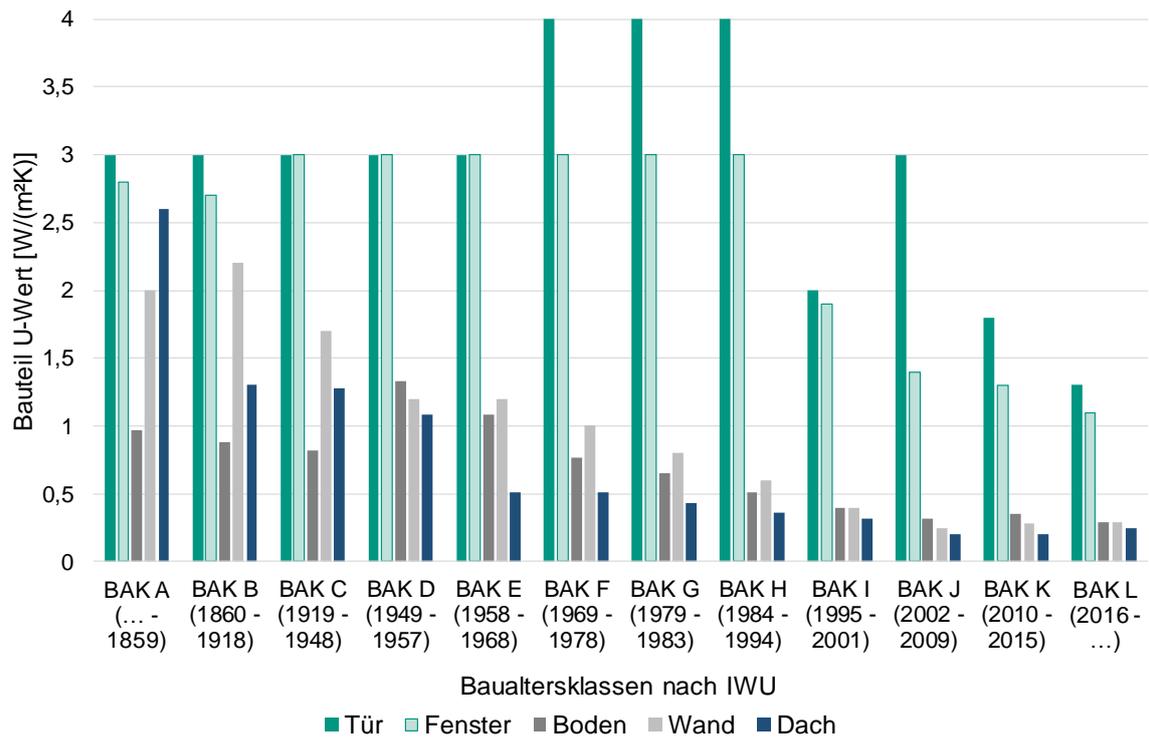


Abbildung 6: Entwicklung der Bauteil-U-Werte der MFH-Bestandsgebäude über die Baualterklassen (BAK).
(Datenbasis: Loga et al. 2015a).

In Abbildung 7 sind über alle Baualterklassen die mittleren U-Werte der Bauteile für den Bestandszustand, eine konventionelle Sanierung (nach EnEV 2014/16) sowie eine ambitionierte Sanierung (orientiert an Passivhaus-Standard) dargestellt. Im Bestand ist – analog zur Verbesserung der U-Werte der flächenmäßig dominierenden Bauteile (Dach, Boden, Wand) – eine kontinuierliche Verbesserung der mittleren U-Werte (über alle Bauteile) bis zur Baualterklasse J erkennbar; in den nachfolgenden beiden Baualterklassen ist ein Einschwingen des U-Wertes zu sehen. Betrachtet man hingegen die möglichen mittleren U-Werte, die sich durch eine konventionelle Sanierung ergeben, sieht man, dass sich durch eine energetische Verbesserung der Gebäudehülle – zumeist ohne dramatische Eingriffe in die Konstruktion – die unterschiedliche Qualität der bisherigen Bauteilaufbauten verschiedener Baualterklassen weitestgehend egalisieren lässt. Die Spreizung kann auf 0,3 W/(m²K) reduziert werden. Nach Durchführung einer ambitionierten Sanierung ist praktisch kein Unterschied der ursprünglichen Bauteilqualität zwischen den verschiedenen Baualterklassen mehr erkennbar.

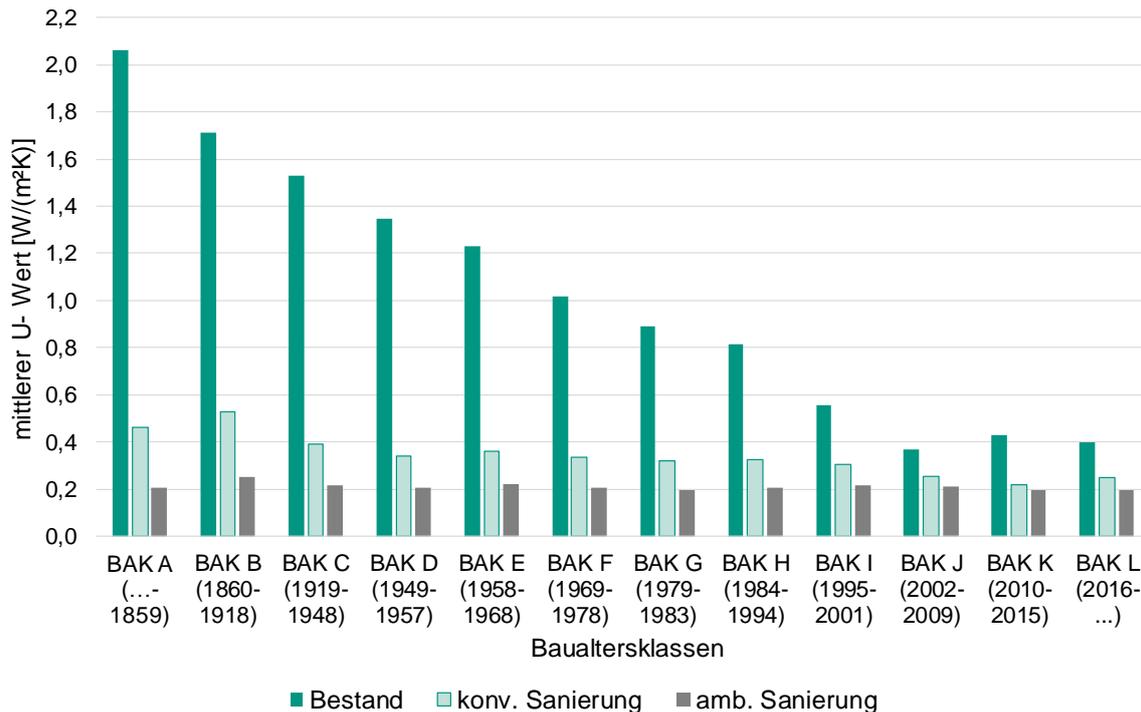


Abbildung 7: Mittlere U-Werte der Gebäudehülle nach Baualtersklassen für die Szenarien Bestand, konventionelle Sanierung und ambitionierte Sanierung. (Loga et al. 2015a).

Schließlich wurden noch anhand der in der deutschen Wohngebäudetypologie angegebenen, von den Baualtersklassen abhängigen Bauteilaufbauten, typische Sanierungsdauern für diverse Schichtpakete eines Bauteils ermittelt. Unberücksichtigt bleibt bei diesem überschlägigen Ermittlungsverfahren eine etwaige Änderung des Bauteilaufbaus bei bereits erfolgten Sanierungen.

2.2 Gebäudetechnik im Bestand

Im Arbeitspaket 1.1 wurden ebenfalls verfügbare Daten zur Anlagentechnik im MFH-Bestand zusammengetragen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Raumheizung. Daneben wurden die Trinkwarmwassererwärmung und die Lüftung betrachtet. Außerdem wurde der aktuelle Stand der Nutzung erneuerbarer Energien in Mehrfamilienhäusern untersucht. Von besonderem Interesse für das Gesamtprojekt war dabei, inwieweit in Mehrfamilienhäusern zentrale oder dezentrale Anlagentechniken über die Zeit erhalten bleiben oder ob in bestimmten Gebäudetypen ein Wechsel von dezentraler zu zentraler Technik leichter möglich ist als in anderen. Zusammen mit dem Bericht zu Arbeitspaket 1.3 (Technische Anforderungen an Energieversorgung und Gebäudehülle von Mehrfamilienhäusern) liefern die Ergebnisse des Arbeitspakets 1.1 die Grundlage für die Sanierungsszenarien und Technologieentwicklungen in diesem Projekt.

Die Anlagentechnik lässt sich nicht so gut nach dem Baualter klassifizieren. Insbesondere bei der Heizungstechnik wurde bereits sehr früh, ab ca. 1850, eine breite Spanne diverser Systeme entwickelt und am Markt etabliert. Selbst bei Kenntnis der am häufigsten eingesetzten Technik in einem bestimmten Zeitfenster lässt sich daraus nur schwer ein Rückschluss auf die heute verbaute Technik in dem aus derselben Zeit stammenden Gebäude ziehen. Der Grund dafür ist, dass die Lebensdauer der Anlagentechnik in der Regel deutlich geringer ist als die des umhüllenden Gebäudes.

Die Wärmeübergabe an den Raum erfolgt mit knapp 87 % in den meisten Gebäuden durch Heizkörper. Flächenheizungen, die mit einem niedrigeren Temperaturniveau betrieben werden können, spielen bisher nur in neueren Gebäuden (v.a. Neubau ab 2005) eine Rolle (vgl. Tabelle 4). Eine weitergehende Analyse zeigt, dass der Anteil von Heizkörpern in Mehrfamilienhäusern (KMH - 3 bis 6 Wohneinheiten, MMH - 7 bis 12 Wohneinheiten, GMH - mehr als 12 Wohneinheiten) jeweils über 90% beträgt; der von Fußbodenheizungen zwischen 1 und 4 % und Öfen 3 bis 6 %, wobei Öfen nur noch in Gebäuden mit

einem Baujahr vor 1984 vorzufinden sind. Luftheizungen sind in Mehrfamiliengebäuden kaum vorhanden.

Tabelle 4: Wärmeübergabesysteme in Wohngebäuden nach Diefenbach et al. 2010.

Gebäudetyp	Heizkörper	Fußbodenheizung	Luftheizung
Wohngebäude	86,7 %	12,6 %	0,7 %
Altbau bis 1978	95,7 %	3,3 %	0,7 %
Neubau ab 2005	34,4 %	64,4 %	1,2 %

In den im Gebäudebestand am häufigsten vertretenen Gebäuden MMH 1958-68 und GMH 1969-78 erfolgt die Wärmeübergabe ausschließlich über Heizkörper, in KMH 1958-68 in 96 % der Gebäude (Diefenbach et al. 2010; Dengler und Schickanz 2012). Die Wärmeverteilung in allen Gebäuden ist relativ alt.

Grundsätzlich ist über die Hälfte der Heizungsanlagen in MFH veraltet und birgt ein enormes Energieeinsparpotenzial. Demnach beträgt das Durchschnittsalter der Heizungen in MFH etwa 20 Jahre. Somit sind Heizungsanlagen in MFH im Schnitt deutlich älter als in Ein- und Zweifamilienhäusern mit einem Durchschnittsalter von knapp 16 Jahren. Neuere Anlagen (ab dem Jahr 2000) machen 43 % des Bestands aus, 54 % der Anlagen wurden vor dem Jahr 2000 eingebaut (3 % keine Angabe) (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2019).

Der Bestand von ca. 33 Millionen Feuerungsanlagen ist in Abbildung 8 dargestellt. Von den ca. 5,5 Millionen Ölheizungen beruhen lediglich 702.000 Anlagen auf der energieeffizienteren Brennwerttechnik, welche seit ca. 1985 marktreif ist. Bei den knapp 14 Millionen Gasheizungen sind Heizwert- und Brennwert-Anlagen etwa zu gleichen Teilen vertreten. Weitere 5 % des Bestands entfallen auf Gas-Warmwasserheizer und Gas-Raumheizer. Feuerungsanlagen mit festen Brennstoffen (hauptsächlich Einzelfeuerungsanlagen) sind mit ca. 12 Millionen ebenfalls sehr häufig verbaut, zum Großteil in Ein- und Zweifamilienhäusern.

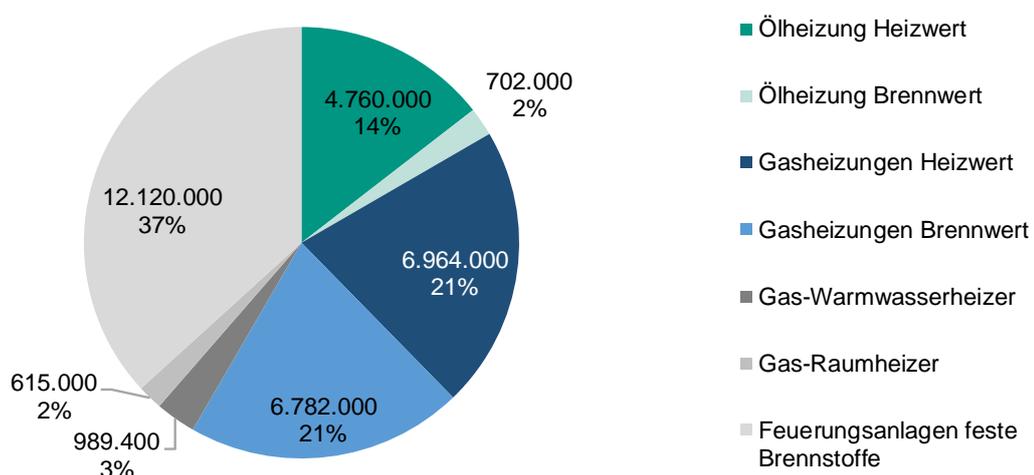


Abbildung 8: Zusammensetzung des Feuerungsanlagenbestands in Deutschland (Datenbasis: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2019).

Analysiert man Heizungsanlagen nach der Bezugsart, so erkennt man aus Abbildung 9, dass Heizwärme in Mehrfamilienhäusern überwiegend zentral bereitgestellt wird, gefolgt von Fernwärme. Die 14,1 % Wohnungs- bzw. Etagenheizungen bestehen zu 93,6 % aus Erdgas-Thermen. Hierbei ist der Wechsel auf eine andere Heizungsart oder einen anderen Haupt-Energieträger schwieriger als bei zentralen Anlagen. Bei den zusammengefassten 63 % von Block- und Zentralheizungen (Abbildung 9,

links) entfallen 67,1 % auf Erdgas-Heizkessel, 26 % auf Heizöl-Kessel, 3,2 % auf Holz- bzw. Biomasse-Heizkessel, 1,3 % auf Flüssiggas-Heizkessel und 1,1 % auf elektrische Wärmepumpen (0,3 % sonstige). Abbildung 9, rechts enthält aktuellere Daten und zeigt einen Anstieg der Fernwärme um mehr als 5%.

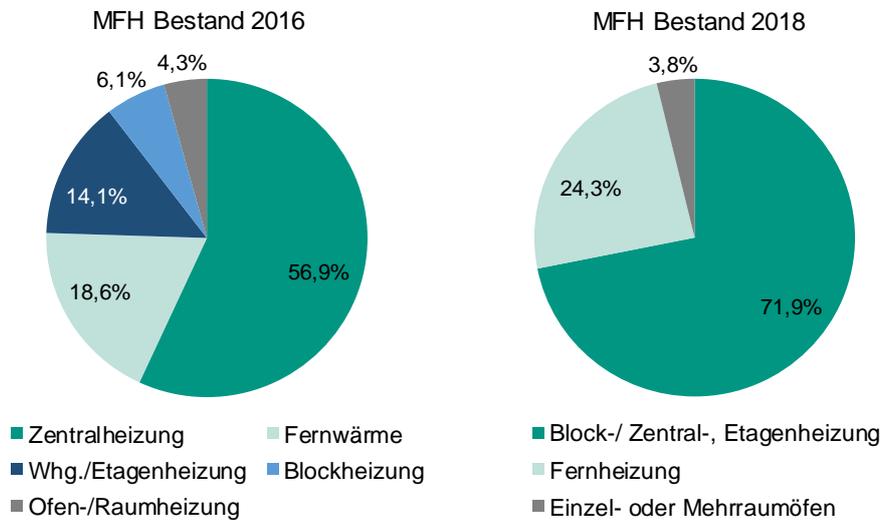


Abbildung 9: Beheizungsart in Mehrfamilienhäusern. (links: Gebäudebestand 2016 nach Cischinsky und Diefenbach 2018b, rechts: Gebäudebestand 2018 nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2019).

Je nach Quelle finden sich im Detail z.T. größere Unterschiede in der Verteilung der Beheizungsart, im Trend decken sich jedoch die Ergebnisse: je kleiner ein MFH, desto größer der Anteil eines zentralen Wärmeverteilensystems. Eine Fernwärmeversorgung ist vorwiegend bei mittleren und großen MFH relevant. Blockheizungen spielen mit 2 % bei allen MFH-Typen nur eine untergeordnete Rolle. Auch der Anteil wohnungsweiser Beheizung (Einzel-/Mehrraumöfen) ist mit 4- 9 % sehr gering.

In über der Hälfte der für dieses Projekt relevanten Gebäude ist damit zu rechnen, dass ein zentrales Wärmeverteilensystem vorhanden ist. Der Einsatz neuer LowEx-Heizungssysteme ist insbesondere in zentral beheizten Gebäuden vergleichsweise leicht umzusetzen, da die Wärmeverteil- und Übergabesysteme zwar ggf. saniert, aber in der Regel nicht neu eingebaut werden müssen. Auch der Ersatz dezentraler, wohnungsweiser Heizungen durch LowEx-Heizsysteme birgt Potenzial – bei Beibehaltung der dezentralen Struktur z.B. durch eine kleine Wärmepumpe. Bei einer Zentralisierung besteht die Herausforderung in der notwendigen nachträglichen Installation eines Wärmeverteilensystems. Eine Möglichkeit dafür ist das Verlegen von Leitungen in der Fassaden-Dämmschicht, wie es im Technologieprojekt „Fassadenintegrierte Heizung, Kühlung, Lüftung und Sanitär (FIHLS“) beschrieben und analysiert wird.

Hauptenergieträger für Heizungsanlagen in MFH ist mit mehr als 56% Gas, gefolgt von Fernwärme (Cischinsky und Diefenbach 2018b). In Abbildung 10 ist die Verteilung der Energieträger für die Beheizung im gesamten Gebäudebestand, in kleineren MFH (3-9 Wohnungen) und in größeren MFH (über 9 Wohnungen) dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass vor allem in größeren MFH mit 42 % verstärkt Fernwärme zum Einsatz kommt. Ölheizungen werden in MFH im Vergleich zum gesamten Gebäudebestand weniger eingesetzt. Stromheizungen haben in allen drei Kategorien einen Anteil von bis zu 4 %. Bei den sonstigen Energieträgern dominiert Umweltwärme bzw. Abluftwärme mit 74 %. Seit 2011 ist bei letzteren insgesamt ein starker Anstieg zu verzeichnen, was auf den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen (Nutzung von Umweltwärme bzw. Abluftwärme) vor allem in Ein- und Zweifamilienhäusern zurückzuführen ist.

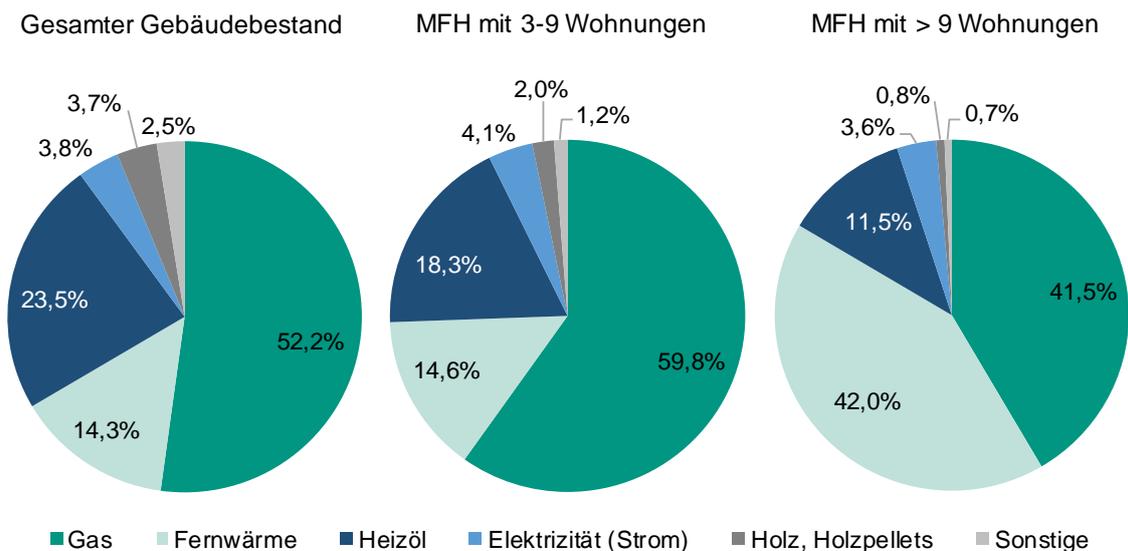


Abbildung 10: Hauptenergieträger im Gebäudebestand (Datenbasis: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2019).

Die Warmwasserbereitstellung in MFH erfolgt zu 70 % in den meisten Wohnungen kombiniert mit der zentralen Raumwärmebereitstellung. Strom- und Gasdurchlauferhitzer stellen mit 63 % und 17 % die häufigsten separaten Trinkwarmwasser-Systeme dar, gefolgt von Elektro-Warmwasser-Speichern (12%) (BBSR 2017, Diefenbach et al. 2010). In 31 % der KMH, 35 % der MMH und 28 % der GMH wird das TWW separat bereitgestellt (Diefenbach et al. 2010; Dengler und Schick Tanz 2012). In den in diesem Projekt detaillierter betrachteten Baualtersklassen ist der Anteil bei den KMH 1958-68 mit 39 % und MMH 1958-68 mit 44 % höher als der Durchschnitt aller Baualtersklassen, bei den GMH 1969-78 hingegen mit 25 % etwas niedriger.

Mechanische Lüftungsanlagen sind bisher in den wenigsten Gebäuden installiert. 4,2 % der MFH haben eine mechanische Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung und 1,2 % mit Wärmerückgewinnung (Cischinsky und Diefenbach 2018b). Zentrale und dezentrale mechanische Lüftung gewinnt jedoch bei Sanierungen der Gebäudehülle immer mehr an Bedeutung, insbesondere, weil durch eine dichtere Gebäudehülle der Infiltrationsluftwechsel minimiert wird und ein nutzungsunabhängiger Mindestluftwechsel gewährleistet werden muss. Darüber hinaus sind ambitionierte energetische Standards oftmals nur durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erreichbar. Betrachtet man Gebäude mit Baujahr ab 2010 (alle Gebäudetypen), wird dieser Trend deutlich: bereits 30,4 % dieser Gebäude haben eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, was einer Steigerung um den Faktor 10 entspricht. 5,7 % haben eine mechanische Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung (Cischinsky und Diefenbach 2018).

Erneuerbare Energien (insbesondere Photovoltaik- und Solarthermieanlagen) sind in Mehrfamiliengebäuden noch nicht weit verbreitet (Diefenbach et al. 2010; Dengler und Schick Tanz 2012). Auf lediglich 4 % der KMH, 1 % der MMH und 2 % der GMH (je alle Baualtersklassen) sind Solaranlagen installiert, bei den MMH und GMH handelt es sich ausschließlich um Photovoltaikanlagen. Bei den KMH mit einer Solaranlage haben Photovoltaikanlagen einen Anteil von 31 %, Solarthermieanlagen von 63 % und in 6 % der Fälle sind beide Arten installiert. Die in KMH installierten Solarthermieanlagen dienen in 55 % der Fälle der reinen Trinkwarmwasserbereitung und in 45 % der Fälle auch der Heizungsunterstützung.

Nach der Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 (Cischinsky und Diefenbach 2018b) ist keine Unterscheidung zwischen KMH, MMH und GMH möglich. Jedoch wird für MFH allgemein eine Quote von Solaranlagen von ca. 10 % angegeben, was eine deutliche Steigerung des Solaranlagenaufkommens darstellt. 4,6 % der MFH haben eine Photovoltaikanlage und 6,8 % eine Solarthermieanlage. Daraus geht hervor, dass bei ca. 1,5 % der MFH sowohl eine Photovoltaikanlage

als auch eine Solarthermieanlage installiert ist. Von den Solarthermieanlagen sind ca. 56 % zur reinen Trinkwarmwasserbereitung und ca. 44 % dienen der Heizungsunterstützung und Trinkwarmwasserbereitung (Cischinsky und Diefenbach 2018b).

Siehe dazu auch Abschlussberichte zu AP 1.1 "Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden" sowie zu AP 1.3 "Technische Anforderungen an Mehrfamiliengebäude".

2.3 Akteure und Prozesse bei der Sanierung

In diesem Arbeitspaket wurde der Modernisierungsprozess als Grundlage für die Beurteilung der Umsetzbarkeit verschiedener LowEx-Ansätze beleuchtet. Insbesondere wurde untersucht, wie der Modernisierungsprozess in der Realität abläuft, welche Akteure daran beteiligt sind und welche Entscheidungen wann und von wem getroffen werden. Daneben wurde der Einfluss nichttechnischer Faktoren auf den Modernisierungsprozess und auf den Einsatz neuer Technologien bestimmt.

Im Laufe bzw. spätestens am Ende des Nutzungszyklus eines Gebäudes steht der Eigentümer vor der Entscheidung, was mit dem Objekt zukünftig geschehen soll. Modernisierung, aktiver oder passiver Bestandserhalt, Verkauf oder der Abriss sind mögliche Varianten, über die er entscheiden muss. Daneben können auch Schäden an einzelnen Bauteilen oder der Ausfall technischer Anlagen Auslöser für Teilsanierungen oder energetische Verbesserungen z.B. durch Systemwechsel sein.

Zahlreiche Mehrfamilienhäuser, die in der Nachkriegszeit bis in die 1970er bzw. 1980er Jahre hinein errichtet wurden, befinden sich im Moment in dieser für ihre weitere Entwicklung entscheidenden Phase (Streck 2011). Gemessen an heutigen Standards weisen die Gebäude meist Defizite im Wärme- und Schallschutz, in der Wärmeversorgung/-bereitstellung, in der Grundrissgestaltung und in der Barrierefreiheit für ältere Bewohner auf (Leutner et al. 2005). Zugleich liegen in diesen Quartieren auch große Qualitäten wie die Nähe zur Innenstadt oder die oft starke Durchgrünung. Zudem sind die Wohnungsbestände der Nachkriegszeit wichtig für die Versorgung einer Kommune mit bezahlbarem Wohnraum in großer Zahl.

Im Rahmen dieser Untersuchung soll beleuchtet werden, wie die Variantenbildung zur Fortentwicklung der Wohnungsbestände bei den Eigentümern vonstattengeht, welche Einflussfaktoren dabei welche Gewichtung erfahren und wer in die Entscheidungsfindung involviert ist. Darüber hinaus sollen für die Variante der Modernisierung der Prozess, die beteiligten Akteure, deren Interaktion und die neuralgischen Stellen im Projektablauf näher untersucht werden.

Zunächst wurden relevante Entscheidungen und Aktionen, die bei einem Modernisierungsvorhaben anstehen, hinsichtlich der Beteiligten, ihren Abhängigkeiten und des zeitlichen Auftretens erfasst, bewertet und visualisiert. Zudem soll überprüft werden, an welchen Stellen ggf. existierende Leitfäden oder Tools ergänzt werden können und es soll herausgearbeitet werden, welches das beste Werkzeug für ein optimales Handling der Prozesse ist und wie dieses entwickelt werden sollte.

Daran anschließend wurden die nichttechnischen Rahmenbedingungen, die Einfluss auf den Modernisierungsprozess haben, beleuchtet. Im Rahmen dieser Analyse wurden rechtliche, ökonomische und nutzerbezogene Einflüsse auf den Modernisierungsprozess herausgearbeitet.

Dieses breite Themenspektrum wurde auf Grundlage von Forschungsarbeiten zu Störungen und Optimierungen des Bauablaufs (Ahrens et al. 2010, Hofstadler 2014, Sommer 2016) aus der Baubetriebslehre und dem Baumanagement fokussiert auf die Frage, wie und auf welcher Datengrundlage Entscheidungsträger ihre Entscheidungen zwischen verschiedenen Fortentwicklungs- bzw. Modernisierungsvarianten treffen.

Auf Basis einer Literaturrecherche wurde für die Beantwortung der Forschungsfragen die Methode des Interviews gewählt, um unverzerrt-authentische Informationen zu gewinnen, die im Moment der Befragung aufgezeichnet werden können. Allerdings ist in Anbetracht der großen Zahl an Wohnungsunternehmen, die auf dem deutschen Wohnungsmarkt agieren, die ausführliche Befragung einer repräsentativen Zahl an Akteuren im Rahmen des Projektes nicht möglich. Deshalb wurde für die Beantwortung der Forschungsfragen das Verallgemeinerungsdesign in der Variante 'QUAL → quant'

gewählt, was bedeutet, dass eine prioritäre qualitative Studie mit anschließender, ergänzender quantitativer Studie durchgeführt wird (Kuckartz 2014).

Zuerst wurden die qualitativen Daten in Form von Experteninterviews gewonnen, dabei ist das Design auf Exploration angelegt, um die Handlungs- und Entscheidungslogiken hinter einer Modernisierung zu verstehen. Da für qualitative Studien die Fallzahlen klein sind und die Ergebnisse nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden können, auch wenn sie sehr plausibel erscheinen, wird im Anschluss an die qualitative Studie eine quantitative Studie durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Ergebnisse auch über den kleinen Kreis der Forschungsteilnehmer hinaus Gültigkeit besitzen. Letztere konnte im Rahmen des Projekts jedoch nicht durchgeführt werden.

Für die qualitative Studie wurden in leitfadengestützten Expertengesprächen mit Vertretern von zehn Wohnungsunternehmen, die ihre Sicht als Eigentümer, Bauherren und Planer wiedergaben, im Zeitraum von Juli 2017 bis Juni 2019 die Handlungslogiken beim Fällen relevanter Entscheidungen in Modernisierungsvorhaben von Mehrfamiliengebäuden erfasst. Um die verschiedenen Unternehmensformen und -größen zu berücksichtigen, wurden neun Klassen gebildet (privatwirtschaftliches Wohnungsunternehmen (WU), kommunales/kirchliches/öffentliches WU und Genossenschaft; je klein (<5.000 WE), mittel (5.000 - 15.000 WE) und groß (>15.000 WE)), für die jeweils mindestens ein Vertreter befragt wurde, verteilt über ganz Deutschland. Lediglich die Klasse der Genossenschaft/groß blieb unbesetzt, da keine Genossenschaft mit mehr als 15.000 Wohneinheiten in Deutschland existiert. Der Wohnungsbestand des kleinsten befragten Wohnungsunternehmens umfasst 192 Einheiten, der des größten 119.00 Einheiten. Keines der befragten Unternehmen ist börsennotiert, alle agieren lokal bzw. regional.

Die Gespräche wurden aufgezeichnet, anschließend transkribiert, anonymisiert und analysiert. Aus der generalisierenden Analyse ergab sich ein uneinheitliches Bild der Vorgehensweisen bei der Fortentwicklung der Bestände, es lässt unterschiedlichste Präferenzen von Modernisierungsmaßnahmen, deren Bündelung und zeitlicher Umsetzung erkennen. Dabei ist meist nicht einmal innerhalb eines Unternehmens eine einzige Vorgehensweise vorherrschend, sondern sie wird je nach Objekt, Standort, Mieterklientel etc. individuell festgelegt. Eine Immobilie scheint ebenso wie ihre Modernisierung ein Maßanzug zu sein, weshalb allgemeingültige Aussagen zum Vorgehen bei Modernisierungen schwer zu treffen, allenfalls Tendenzen zu beobachten sind.

Die Analyse der Antworten auf die **erste Forschungsfrage, wie professionelle Anbieter von Wohnraum Entscheidungen über die Fortentwicklung ihrer Bestände treffen**, ergab folgende Aussagen:

- Die Modernisierung ist bei allen befragten Wohnungsunternehmen die am häufigsten gewählte Fortentwicklungsvariante.
- Die Sicherung der Vermietbarkeit des Bestandes ist die primäre Zielsetzung bei der Modernisierung.
- Die typischsten Modernisierungsmaßnahmen sind Maßnahmen an der thermischen Hülle, z.B. Dämmung sowie Fenstertausch, gefolgt von Maßnahmen zur Verbesserung der Barrierefreiheit für eine älter werdende Mieterschaft.
- Mit dem Einsatz von Wärmepumpen im Bestand bestehen kaum Erfahrungen, Skepsis gegenüber deren Einsatz ist hingegen weit verbreitet. Werden Lüftungsanlagen eingebaut, dann sind dies in der Regel zentrale Abluftanlagen mit Zuluftzufuhr über Fenster oder andere Elemente.
- Wirtschaftliche Anforderungen an den Einsatz innovativer technischer Systeme sind
 - die über individuell unternehmensintern festgelegte Verfahren nachgewiesene Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen sowie
 - geringe Betriebskosten, im Speziellen geringe Wartungskosten.
- Technische Anforderungen an den Einsatz innovativer technischer Systeme sind eine hohe Effizienz, Wartungsarmut, Verfügbarkeit erfahrener, mit der Technologie vertrauter Wartungsfirmen und möglichst die zentrale Zugänglichkeit zu den relevanten Bereichen der Technik.

Die **zweite Forschungsfrage nach dem Einfluss nichttechnischer Rahmenbedingungen auf die Fortentwicklungs- bzw. Modernisierungsentscheidung der Bestände** umfasst Aussagen zur Finanzierung, rechtlichen Hemmnissen einer Modernisierung und der Rolle des Mieters. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- In der günstigen Zinsphase werden langfristige Zinsbindungen angestrebt.
- Das Vorhandensein einer Förderung ist für die Wahl bzw. Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen unterschiedlich wichtig, die Fördermittel der KfW werden am häufigsten in Anspruch genommen.
- Die befragten Vermieter gaben an, auf die finanzielle Belastbarkeit ihrer Mieter bei der Modernisierungsmieterhöhung Rücksicht zu nehmen. Die Ermittlung der tatsächlich verlangten Mietsteigerungsrate nach der Modernisierung erfolgt unterschiedlich: häufig eingesetzt werden freiwillige Kappungen über die gesetzlichen Vorgaben hinaus, gelegentlich Staffelmietserhöhungen oder Mieterhöhungen auf die Zielmiete erst bei Mieterwechsel, bzw. Erniedrigung der Betriebskosten.
- Rechtliche Bestimmungen, die ggf. Modernisierungsmaßnahmen beeinflussen, sind z.B. formelle Anforderungen des Mietrechts bei Modernisierungsmieterhöhungen, Anforderungen der Energieeinsparverordnung bzw. die Anforderungen des Denkmalschutzes oder Brandschutzes in den jeweiligen Landesbauordnungen oder kommunale Stellplatzverordnungen bei Aufstockungen.
- Intensive Informationsangebote an die Mieter im Vorfeld und intensive Betreuung während der Bauphase erhöhen die Zustimmung der Mieter zu den Maßnahmen. Verstärkter persönlicher Kontakt wird bei hoher Ablehnung der geplanten Maßnahmen eingesetzt, ggf. werden geplante Maßnahmen ausgesetzt oder verschoben. Insgesamt ist die Wichtigkeit der Mieter im Modernisierungsprozess allen Unternehmen bewusst.

Die **dritte Forschungsfrage beschäftigt sich mit dem üblichen Ablauf einer Modernisierung und den relevanten Entscheidungen im Modernisierungsprozess:**

- Eine Modernisierung läuft üblicherweise im bewohnten Zustand ab.
- Umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen innerhalb der Wohnungen werden im bewohnten Zustand i.d.R. nicht durchgeführt.
- Unternehmensinterne Expertise für die Planung und Koordination von Modernisierungsmaßnahmen ist in acht von zehn befragten Wohnungsunternehmen vorhanden.
- Unternehmensinterne Akteure bzw. Gremien, die eine entscheidende Rolle bei der Wahl der umzusetzenden Modernisierungsvariante spielen, sind die Vorstände bzw. die Geschäftsführung, Aufsichtsräte und bei Genossenschaften die Vertreterversammlungen. Externe Gremien sind das Denkmalamt, die Baurechtsbehörde und das Bauamt.
- Als neuralgisch am Modernisierungsprozess anzusehen ist der Mieter bzw. die Kommunikation mit den Mietern. Die schriftliche und mündliche Information der Mieter und deren Unterstützung sind entscheidende Größen für eine erfolgreiche Modernisierung.
- Ein Monitoring der technischen Systeme im Nachgang wird als wichtig angesehen, durchgeführt wird es teilweise in hochaufgelöster Form oder in gröberer Auflösung z.B. durch den Hausmeister.

Werkzeuge für ein optimales Handling der Prozesse sind auf verschiedenen Ebenen des Modernisierungsprozesses bei den Wohnungsunternehmen im Einsatz. Zum einen sind hier auf strategischer Ebene die Portfoliomanagementsysteme zu nennen, die z.B. von meviso, IGIS, SAP oder in selbstprogrammierter Form im Einsatz sind. Sie enthalten z.T. nur technische Bestandsdaten, z.T. aber auch eine Kombination von technischen und wirtschaftlichen Daten. Auf operativer Ebene für den Bauprozess kommt Projektmanagement-Software zur Termin- und Kostenüberwachung zum Einsatz bzw. künftig voraussichtlich vermehrt auch BIM Software, von der ein effizienteres Schnittstellenmanagement erwartet wird und die evtl. auch für die Gebäudebewirtschaftung von Interesse sein wird. In Zukunft könnte zudem auch das Stakeholder Management an Wichtigkeit gewinnen. Bei den befragten Wohnungsunternehmen war deutlich zu sehen, dass intensive Information

der Mieter und gute Kommunikation zwischen allen an einem Modernisierungsprojekt Beteiligten ein Erfolgsfaktor bei anstehenden Modernisierungsprojekten ist.

Vergleiche dazu Abschlussbericht zu AP 1.2 und 1.4 "Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung".

2.4 Referenz-Gebäude und Referenz-Wärmebedarfe

Auf Grundlage des Kapitels 2.1 wurden für weitere Untersuchungen Referenz-Mehrfamiliengebäude definiert und in TRNSYS zur Erzeugung von Lastreihen modelliert. Hierbei wurde der Fokus auf die Baualtersphasen (BAP) 1958-78 und 1979-94 gelegt, da hier der größte Anteil des Gebäudebestandes in Deutschland und eine hohe Sanierungsdringlichkeit vorliegt. Auf Basis eines realen Mehrfamiliengebäudes aus den 1960ern, wurden nach dem Baukastenprinzip (konstanter Grundriss der einzelnen Wohnungen, s. Abbildung 11) ein kleines (KMH), mittleres (MMH) und großes Mehrfamilienhaus (GMH) definiert. Die Gebäude werden vereinfacht sowohl für die BAP 1958-78 sowie BAP 1979-94 genutzt. Die isometrische Außenansicht der Referenz-Gebäude sind in Abbildung 12 und die geometrischen Gebäudeparameter in Tabelle 5 dargestellt.

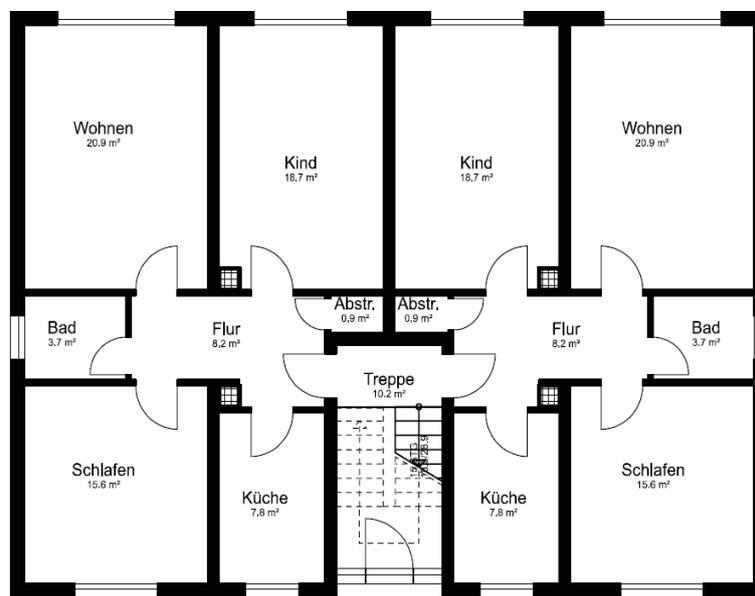


Abbildung 11: Grundriss des KMH mit 4 Wohneinheiten auf 2 Stockwerken.

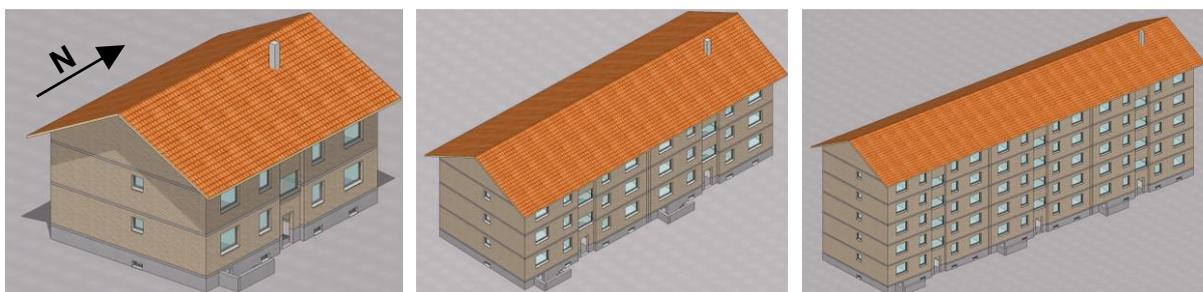


Abbildung 12: Isometrische Außenansicht der Referenz-Gebäude. Links: kleines MFH mit 4 Wohneinheiten auf 2 Stockwerken. Mitte: mittleres MFH mit 12 Wohneinheiten auf 3 Stockwerken. Rechts: großes MFH mit 30 Wohneinheiten auf 5 Stockwerken.

Tabelle 5: Geometrische Gebäudeparameter der Referenzgebäude.

Kenngroße	KMH	MMH	GMH
Anzahl Vollgeschosse	2	3	5
Anzahl Wohneinheiten	4	12	30
Anzahl Treppenhäuser	1	2	3
Keller	Vorhanden & Unbeheizt		
Dachraum	Vorhanden & Unbeheizt (Satteldach)		
Gebäudeorientierung	Nord-Süd (Giebelseite)		
Gebäudemaße	11,9 m x 16,1 m	11,9 m x 32,1 m	11,9 m x 48,1 m
Geschosshöhe	2,75 m		
Konditionierte Wohnfläche pro WE	75,7 m ² (ohne Treppenhaus)		
Konditionierte Wohnfläche	302 m ²	908 m ²	2270 m ²
Nettogrundfläche	323,2 m ²	969,5 m ²	2423,7 m ²
Transparente Fassade	44 m ²	128 m ²	316 m ²
Opake Fassade	264 m ²	598 m ²	1334 m ²

Für die Energiebedarfsberechnung wurden auf Basis vorhandener Literatur energetische Gebäudeparameter festgelegt. Hierzu gehören neben den Wärmedurchgangskoeffizienten für die verschiedenen Sanierungsstufen auch die Randbedingungen für die Energiebedarfsrechnungen. Die vom Sanierungsgrad abhängigen U-Werte sind in Tabelle 6 dargestellt. Hier kann zwischen dem Erbauungszustand (E), aktuellem Ist-Zustand (Bestandszustand B), der standardmäßigen GEG-Sanierung (S) und einer ambitionierteren Sanierung mit U-Werten in Anlehnung an eine Passivhaus-Sanierung (P) unterschieden werden. Abweichend zum Passivhaus-Standard wird in der Wärmebedarfs-Berechnung jedoch keine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung berücksichtigt. Die untersuchten Sanierungsszenarien sind in Kapitel 2.5 beschrieben.

Die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung mit TRNSYS für die wichtigsten Sanierungs-Zustände sind in Abbildung 13 dargestellt.

Tabelle 6: U-Werte der opaken Bauteile und Verglasungsarten basierend auf Literatur (Loga et al. 2015b; Cischinsky und Diefenbach 2018a; Loga et al. 2005).

	Erbauungs-Zustand (E)		Bestands-Zustand (B)		GEG-Sanierung (S)		Anlehnung an Passivhaus-Sanierung (P)	
	U-Wert [W/(m²K)]		U-Wert [W/(m²K)]		U-Wert [W/(m²K)]		U-Wert [W/(m²K)]	
	BAP 1958-78							
Außenwand	1,12		0,31		0,23		0,13	
Oberste Geschossdecke	0,60		0,26		0,6		0,6	
Dach	1,60		1,60		0,19		0,13	
Unterster Geschossboden	1,32		0,39		0,30		0,20	
Fenster	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert
	0,87	4,7	0,6	1,9	0,6	1,3	0,5	0,7
	BAP 1979-94							
Außenwand	0,65		0,65		0,20		0,13	
Oberste Geschossdecke	0,43		0,43		0,16		0,13	
Dach	1,60		1,60		0,19		0,13	
Unterster Geschossboden	0,67		0,67		0,30		0,20	
Fenster	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert	g-Wert	U-Wert
	0,87	4,7	0,6	1,9	0,6	1,3	0,5	0,7

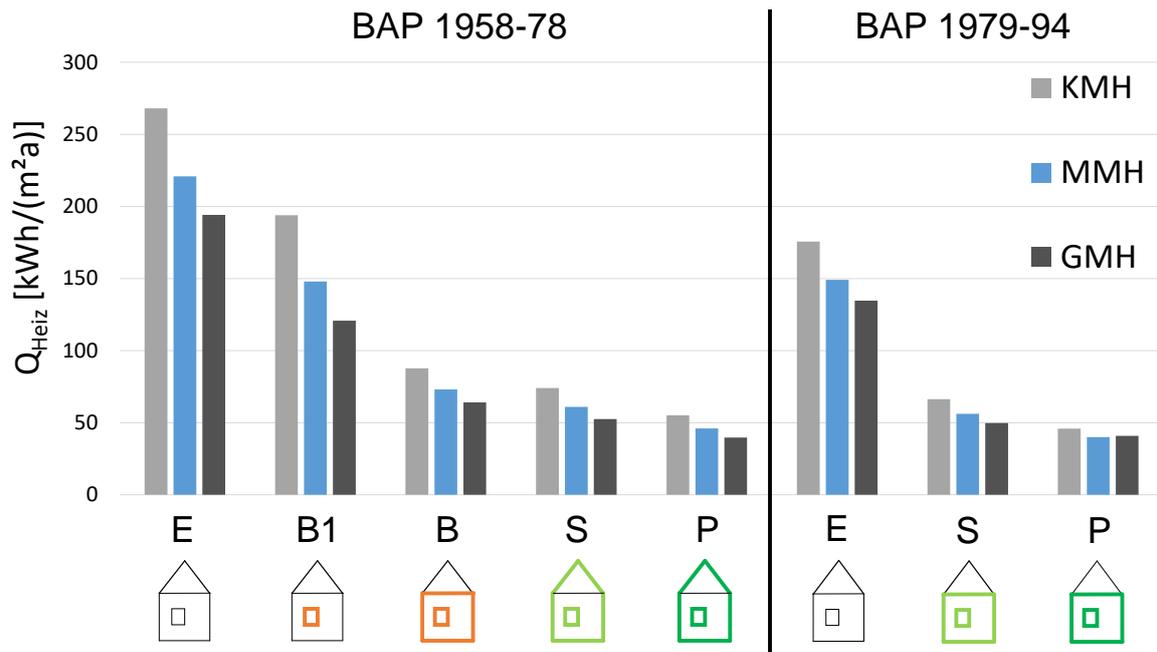


Abbildung 13: Spez. Heizwärmebedarf für die Referenz-Gebäude aus TRNSYS Simulationen (Haussymbole zeigen Sanierungszustand: Erbauungszustand E = schwarz, Bestand B = orange, GEG-Sanierung S = hellgrün, Anlehnung an Passivhaus-Sanierung P = dunkelgrün).

Der Bedarf an Trinkwarmwasser hängt primär von der Anzahl der Bewohner ab und ist damit unabhängig von der Gebäudegröße und vom Sanierungs-Zustand. Der Wärmebedarf zur Deckung der Zirkulationsverluste ändert sich ebenfalls nicht mit dem Sanierungs-Zustand. Nur in der Variante Passivhaus wird angenommen, dass eine Sanierung der Dämmung der Zirkulationsleitung vorgenommen wird. Die Simulation der dynamischen Lastzeitreihen wurden mit dem Simulations-Programm SynPRO des Fraunhofer ISE durchgeführt. Der Jahreswärmebedarf für die Trinkwarmwassererzeugung der drei Referenz-Mehrfamilienhäuser beträgt:

- KMH: 3,6 MWh/a; 11,8 kWh/(m²a)
- MMH: 10,4 MWh/a; 11,5 kWh/(m²a)
- GMH: 26,7 MWh/a; 11,8 kWh/(m²a)

Detailliertere Informationen sind im Bericht zu AP 3.1 dokumentiert.

2.5 Sanierungs-Szenarien

Für technische, ökologische und ökonomische Analysen einer Gebäudesanierung ist es entscheidend, den Ausgangszustand des Gebäudes zu kennen, sowie welche Sanierungsmaßnahmen (an Gebäudehülle, Heizsystem etc.) zu welchem Zeitpunkt bereits durchgeführt wurden und zukünftig geplant sind.

Für die Analyse des Einsatzes von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern im Projektverbund LowEx-Bestand wurden für jeden Gebäudetyp fünf verschiedene Sanierungsszenarien an der Gebäudehülle definiert (main, min, part, mix, max), die in Abbildung 14 zusammengefasst sind. Ausgangspunkt der Analyse ist das Jahr 2020. Die graphische Übersicht zeigt den Zustand des MFH vom Erbauungsjahr (1970 bzw. 1990) bis 2045 an, wodurch der Zeitpunkt vergangener als auch zukünftiger Sanierungsmaßnahmen dargestellt wird. Zum besseren Verständnis sind in Tabelle 7 die wichtigsten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (Fenster, Wand, oberste Geschossdecke, Dach, unterster Geschossboden) beschrieben.

Für Details zu den einzelnen Sanierungsmaßnahmen und -szenarien wird auf den Bericht zu AP 3.1 verwiesen.

Tabelle 7: Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (Fenster, Wand, oberste Geschossdecke, Dach, unterster Geschossboden).

BAP	Codierung	Abbildung*	Beschreibung
1958-78	B1		Unsanierter Zustand, Austausch von Fenstern wegen überschrittener Nutzungsdauer (im Jahr 2000)
	B		Energetische Sanierung in der Vergangenheit (im Jahr 2000)
	S		Komplettsanierung nach GEG mit B1 als Ausgangssituation
	S6		Komplettsanierung nach GEG mit B als Ausgangssituation
	P		Komplettsanierung nach Passivhausstandard mit B1 als Ausgangssituation
	P1		Komplettsanierung nach Passivhausstandard mit B als Ausgangssituation
1979-94	E		Erbauungszustand
	S		Komplettsanierung nach GEG, Dach nicht erneuert wegen intakter Dacheindeckung
	P		Komplettsanierung nach Passivhausstandard
* E (Bauzustand): schwarz, B (aktueller Zustand): orange, S (GEG-Sanierung): grün, P (Sanierung auf U-Werte vergleichbar mit Passivhausstandard): blau			

BAK	Szenario	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040
							Betrachtungszeitraum (2020-2045)		
1958-78	70_main	E			B1		S/P		
	70_min	E			B1			S/P	
	70_part	E			B1		S1...S4		
	70_mid	E			B			S6/P1	
	70_max	E			B		S6/P1		
1979-94	90_main			E			S/P		

Abbildung 14: Übersicht über die Sanierungs-Szenarien für die Gebäudehülle mit zurückliegenden und zukünftigen Sanierungsmaßnahmen (Betrachtungszeitraum gelb markiert).

2.6 Schlussfolgerungen

Gebäudebestandsanalyse

- Ca. 94 % des Mehrfamilienhausbestandes besteht aus Gebäuden mit 3-12 Wohneinheiten pro Gebäude. Die größte Gruppe hieraus (ca. 20 %) sind zwischen 1958 und 1968 errichtete Gebäude.
- Es ist keine vorherrschende Form bezüglich der städtebaulichen Struktur ersichtlich (mit Ausnahme des Baualters bis 1859); die Gebäudeerschließungen von MFH mit bis zu 12 Wohneinheiten sind vorrangig als Zwei- und Dreispänner ausgeführt, die Geschosszahl liegt zwischen drei und fünf Geschossen.
- Zwei Drittel der Wohneinheiten in MFH mit mehr als drei Wohneinheiten weist eine Wohnfläche von 40 bis 79 m² auf.
- Zur Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle wurden zunächst Maßnahmen im Dachbereich und in der Folge auch bei Wand und Boden ergriffen. Lediglich bei Fenstern und Türen wurden erst in den letzten 20 bis 25 Jahren deutliche Verbesserungen erreicht. Der mittlere U-Wert der o.g. Baualtersklasse liegt bei 1,2 W/m²K.

Gebäudetechnik im Bestand

- Das Durchschnittsalter von Heizungen in MFH beträgt etwa 20 Jahre.
- Heizwärme in Mehrfamilienhäusern wird überwiegend zentral bereitgestellt, gefolgt von Fernwärme. Hauptenergieträger ist mit mehr als 56% Gas, gefolgt von Fernwärme (letztere insbesondere in größeren MFH).
- Die Wärmeübergabe an den Raum erfolgt mit knapp 87 % in den meisten Gebäuden durch Heizkörper.
- Die Warmwasserbereitstellung in MFH erfolgt mit 70 % kombiniert mit der zentralen Raumwärmebereitstellung. Strom- und Gasdurchlauferhitzer stellen mit 63 % und 17 % die häufigsten separaten Trinkwarmwasser-Systeme dar.
- Mechanische Lüftungsanlagen sind bisher in den wenigsten Gebäuden installiert.

Akteure und Prozesse

- Primäre Zielsetzung von Wohnungsunternehmen bei der Modernisierung ist die Sicherung der Vermietbarkeit des Bestandes; die typischsten Modernisierungsmaßnahmen sind Maßnahmen an der thermischen Hülle, gefolgt von Maßnahmen zur Verbesserung der Barrierefreiheit.
- Wirtschaftliche (gemäß unternehmensintern festgelegter Verfahren) und technische Anforderungen an den Einsatz innovativer technischer Systeme sind geringe Betriebskosten, insbesondere Wartungskosten, sowie hohe Effizienz, Wartungsarmut sowie erfahrene Wartungsfirmen.
- Finanzielle Belastbarkeit der Mieter wird bei der Modernisierung berücksichtigt (z.B. freiwillige Kappungen über die gesetzlichen Vorgaben hinaus, Staffelmietterhöhungen).

- Anforderungen des Mietrechts, der Energieeinsparverordnung, der Stellplatzverordnung bzw. des Denkmalschutzes oder Brandschutzes beeinflussen Modernisierungsentscheidungen und -maßnahmen.
- Modernisierungen (außer sehr umfangreiche Maßnahmen innerhalb der Wohnungen) laufen üblicherweise im bewohnten Zustand ab.
- Als neuralgisch am Modernisierungsprozess anzusehen ist der Mieter bzw. die Kommunikation mit den Mietern; die Information der Mieter und deren Unterstützung sind entscheidende Größen für eine erfolgreiche Modernisierung.

Referenzgebäude und Sanierungsszenarien

- Zur Erzeugung von Lastreihen wurden auf Basis eines realen Mehrfamiliengebäudes aus den 1960ern drei Referenzgebäude, ein kleines (KMH), mittleres (MMH) und großes Mehrfamilienhaus (GMH) modelliert. Der Fokus lag dabei auf den Baualterklassen 1958-78 und 1979-94.
- Für die Energiebedarfsberechnung wurden auf Basis vorhandener Literatur Wärmedurchgangskoeffizienten für die verschiedenen Sanierungsstufen sowie die entsprechenden Randbedingungen festgelegt. Der Bedarf an Trinkwarmwasser wurde an der Anzahl angenommener Bewohner festgemacht.
- Für die Analyse des Einsatzes von Wärmepumpen in wurden für jeden Gebäudetyp fünf verschiedene Sanierungsszenarien an der Gebäudehülle definiert (main, min, part, mix, max).

3 Modellentwicklung und Simulation

3.1 Thermohydraulische Modellierung in Dymola/Modelica

3.1.1 Modellentwicklung Wärmepumpensysteme

Für umfassendere Untersuchungen der Wärmepumpensysteme erfolgten weitere Modellierungen in Dymola/Modelica. Dies ermöglicht eine detaillierte, thermohydraulische Simulation mit realistischen Regelungsmethoden. Dazu wurde ein generisches Wärmepumpensystem aufgebaut, das je nach Anwendungsfall mit verschiedenen Wärmequellen, Gebäudemodell, Backup-Wärmeerzeuger, Pufferspeicher, Hydraulik, Steuerung, Wärmeübergabesystem zur Raumheizung sowie Trinkwassererwärmung parametrisiert werden kann (vgl. Abbildung 15).

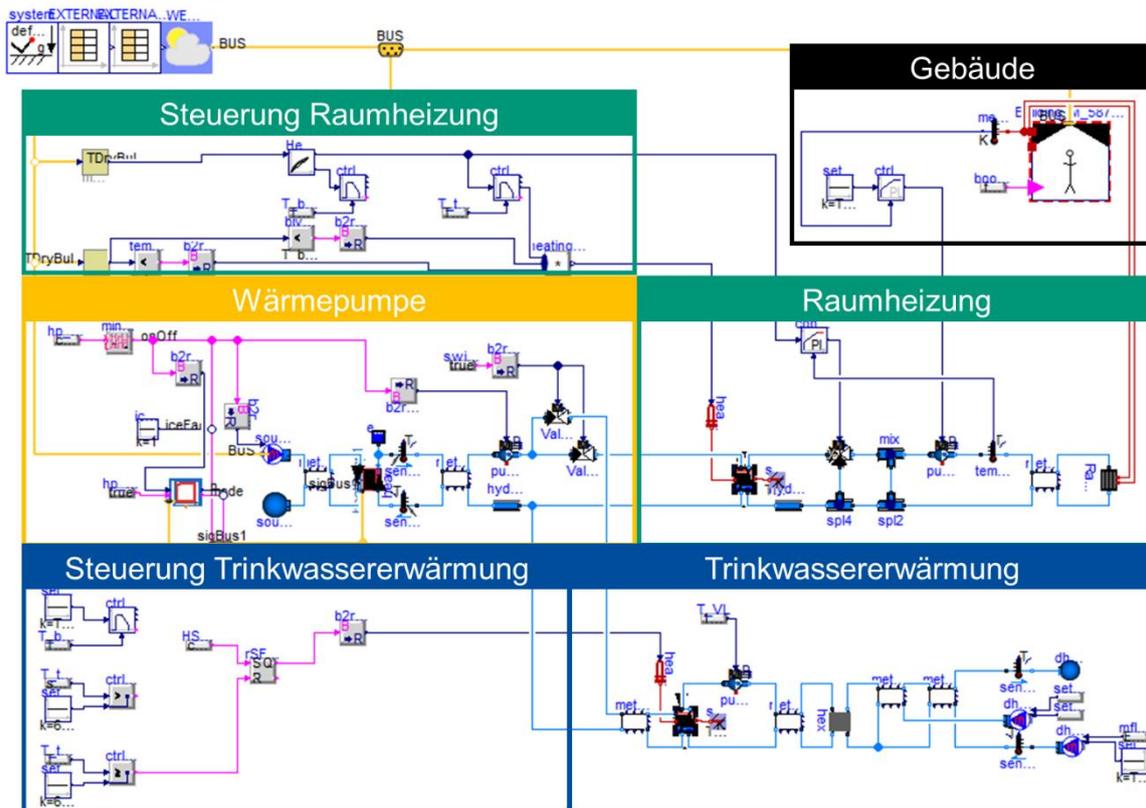


Abbildung 15: Schaubild Wärmepumpensystem (Luft/Wasser-Wärmepumpe) zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Dymola/Modelica.

Das Gebäudemodell basiert auf der DIN EN ISO 13790 und wurde mit den in Kapitel 2.4 beschriebenen Lastprofilen validiert. Das Modell berücksichtigt Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung sowie solare und interne Gewinne. Aufgrund der ähnlichen Raumtemperaturen und Nutzungsprofilen betrachtet das dynamische 5R2C-Netzwerk alle Wohnungen als thermisches Einzonen-Modell. Als Wetterdaten können TRY-Datensätze oder standortspezifische Wetterdaten aus der Meteonorm-Datenbank eingesetzt werden.

Das Modell ist so konzipiert, dass es je nach Anwendung unterschiedlich konfiguriert werden kann. So sind verschiedene Quellen, Wärmeübergabesysteme zur Raumheizung und Varianten zur Trinkwassererwärmung im Modell implementiert. Neben Luft und Erdwärme können auch PVT-Kollektoren und ein Mehrquellensystem simuliert werden. Zur Raumwärmeübergabe stehen Röhrenradiatoren, Plattenheizkörper, Niedertemperaturradiatoren und Deckenheizungen zur Verfügung. Die Trinkwassererwärmung kann mit Hilfe eines TWW-Speichers mit internem Wärmeübertrager, mit zentraler Frischwasserstation mit Speicher (Durchflusssystem) oder durch den Einsatz von dezentralen Frischwasserstationen (Wohnungsstationen) mit zentralem Speicher erfolgen.

Für die dynamische Simulation der Wärmepumpe werden Leistungskennfelder für COP und Heizleistung als Funktion der Quell- und Vorlauftemperatur gemäß Abbildung 16 mit entsprechenden Temperaturgrenzen verwendet. Dadurch wird die momentane Wärmepumpenleistung in jedem Zeitschritt genau modelliert. Darüber hinaus können auch detailliertere Wärmepumpenmodelle wie in Kapitel 3.1.2 oder in Velte et al. (2022) beschrieben untersucht werden.

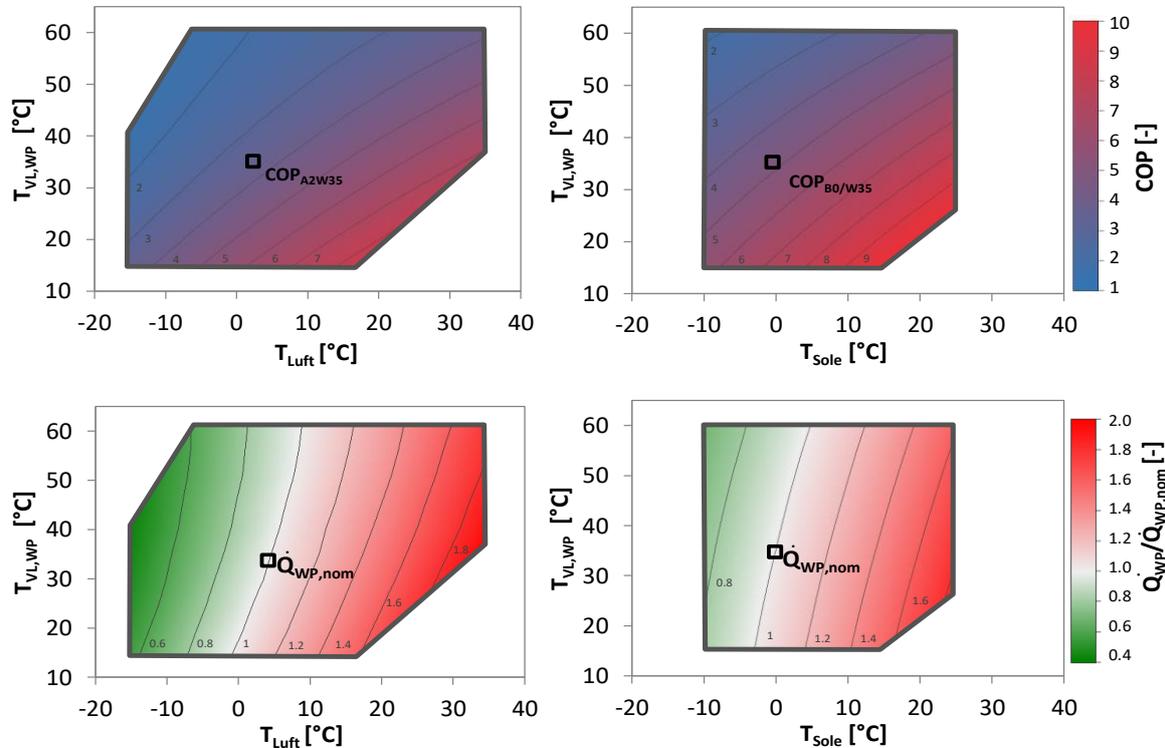


Abbildung 16: Wärmepumpen Leistungskennfelder für COP (oben) und relativer Wärmepumpenleistung $\dot{Q}_{WP}/\dot{Q}_{WP,nom}$ (unten) und Einsatzgrenzen als Funktion der Vorlauf- und Quellen-Temperatur (links: Luft/wasser-Wärmepumpe; rechts: Sole/Wasser-Wärmepumpe) (Lämmle et al. 2022).

Die Wärmepumpenanlage kann monoenergetisch, monovalent oder bivalent als Hybridwärmepumpensystem ausgeführt und simuliert werden. Je nach Auslegung der Wärmepumpe liefert der sekundäre Wärmeerzeuger die benötigte Wärme in Zeiten, in denen die Leistung der WP nicht ausreicht, um den gesamten Wärmebedarf zu decken oder wenn die WP die erforderlichen Vorlauf-Temperaturen nicht liefern kann.

Die Steuerung der Anlage ist ebenfalls in Modelica implementiert. Das System wird mit einer TWW-Vorrangschaltung betrieben. Die Regelung der Vorlauftemperatur im Heizkreis erfolgt außentemperaturabhängig per Heizkurve. Der Betrieb der Wärmepumpe wird durch PI-Regler mit Hysterese zur Reduzierung der Taktung über die jeweilige Temperatur im Speicher gesteuert. Die Regelung des sekundären Wärmeerzeugers erfolgt durch einen zweiten PI-Regler in Kaskade.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die relevanten Komponentenmodelle des Wärmepumpensystems. Es werden hauptsächlich Komponentenmodell aus den frei zugänglichen Bibliotheken Buildings (Wetter et al. 2014), AixLib (Müller et al. 2016) und IBPSA (IBPSA 2018) verwendet. Das selbst entwickelte Erdwärmesonden-Modell verwendet ein vertikal und radial diskretisiertes Bodentemperaturprofil und berechnet damit den dynamischen Wärmeaustausch zwischen jedem Fluid- und Boden-Knoten unter der Annahme eines konstanten Wärmeübertragungskoeffizienten. Zur Modellierung von thermisch aktivierten Bauteilen (Deckenheizung) muss eigentlich ein dreidimensionales, instationäres Wärmeleitungsproblem gelöst werden. In Koschenz und Lehmann (2000) ist eine Methode dargestellt, mit der die Berechnung stark vereinfacht werden kann. Diese ist bereits in TRNSYS implementiert und wurde von Jacob (2012) in ein Modelica-Modell überführt.

Tabelle 8: Verwendete Komponenten und Modelle des Wärmepumpensystems in Dymola/Modelica.

Komponente	Modelica Modell	Beschreibung
Wetterdaten	TMY3Reader (Buildings)	Meteonorm (Version 7.1.11)
Gebäudemodell	Eigenes Modell	Modifiziertes Ein-Zonen-Gebäudemodell nach DIN EN ISO 13790
WP	HeatPump (AixLib)	Fixed-Speed Wärmepumpen-Modell
Erdwärmesonde	Eigenes Modell	Doppel U-Rohr Wärmeübertrager
Heizkurve	HotWaterTemperatureReset (Buildings)	
Steuerung	PIDHysteresisTimer (Buildings)	PI-Regler mit Hysterese
Raumheizung	Heizkörper: RadiatorEN442_2 (IBPSA) Deckenheizung: Eigenes Modell	Auslegung der Wärmeübertragungs-Fläche zur Deckung des Heizbedarfs Deckenheizung: Modell für thermisch aktivierte Bauteile
Zapfung	-	Synthetisch generierte Profile mit synPro
TWW-Zirkulation	-	Zirkulationsleitung mit unterer Verteilung; Auslegung nach DIN 1988-300
Backup-Wärmeerzeuger	Integriert im Speichermodell	Gaskessel oder Heizstab
Speicher	BufferStorage (AixLib)	10-Schichten Pufferspeichermodell
FriWa zentral / dezentral	HeatExchanger (AixLib)	Wärmeübertrager-Modell mit konstanter Effizienz

Zur Verifikation der entwickelten Simulations-Tools erfolgte eine Cross-Validierung zwischen dem hier beschriebenen Wärmepumpensystem und dem HEBA-Tool (s. 3.2). Trotz unterschiedlicher Detaillierungsgrade weicht die JAZ als zentrale Bewertungsgröße bei gleichen Randbedingungen unter 1 % bei der Raumheizung und unter 3 % bei der Trinkwassererwärmung ab. Ergebnisse des Modelica-Modells sind in Kapitel 4.3, 4.4 und 4.6 zu finden. Außerdem wurde das Modell für die Auslegung des Mehrquellensystems im Projekt HEAVEN (s. Kapitel 7.5) und zur Untersuchung neuer Wärmepumpen-Konzepte (vgl. Kapitel 4) verwendet.

3.1.2 Modellentwicklung einer Hybrid-Adsorptionswärmepumpe mit transkritischem CO₂-Kreislauf

Nach dem Wechsel von Prof. H.-M. Henning und eines Teils des LiB-Projektteams vom KIT an die Universität Freiburg wurden die am KIT verbleibenden Teile der Arbeitsgruppe am Fachgebiet Strömungsmaschinen in das Institut für Angewandte Thermofluidik (IATF) integriert. Um eine gute Arbeitsteilung mit dem Fraunhofer ISE und der Uni Freiburg als neuem Verbundpartner zu ermöglichen, erfolgte am KIT-IATF eine Fokussierung der Modellierungsarbeiten auf Hybridwärmepumpensysteme, insbesondere auf ein neuartiges System mit transkritischem CO₂-Kreislauf und Adsorptions-Hilfskreislauf (gemäß Patent DE 10 2018 109 577 B3 des KIT).

Heute marktverfügbare Hybridwärmepumpen bestehen üblicherweise aus einer Luftwärmepumpe für die Grundlast und einem Gas-Spitzenlastkessel unter einer gemeinsamen Anlagenregelung. Das hier verfolgte Konzept basiert auf einer thermodynamischen Integration eines transkritischen CO₂-Kompressionszyklus, der durch eine große Temperaturspreizung am Gaskühler gekennzeichnet ist, und

einem Adsorptions-Hilfszyklus zur Effizienzsteigerung des CO₂-Zyklus. Die Kopplung der Zyklen erfolgt über einen Schichtwärmespeicher (siehe Schema in Abbildung 17).

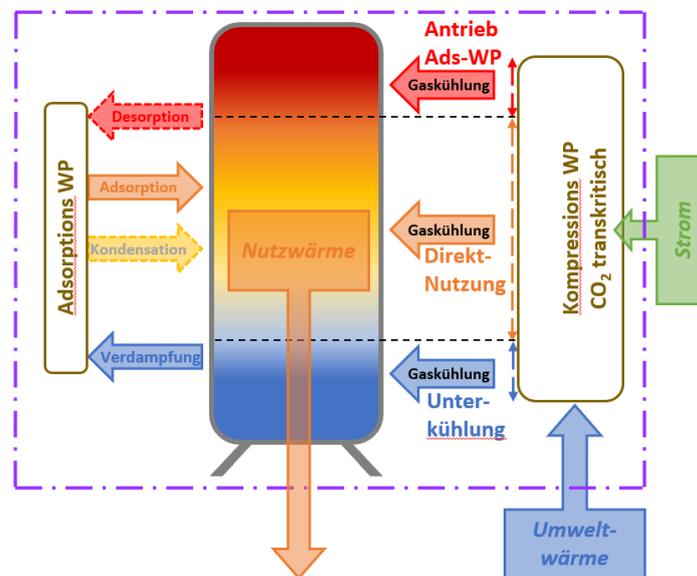


Abbildung 17: Schema der Hybridwärmepumpe.

Aufgrund der engen Integration der Teilprozesse in diesem System und der thermodynamischen Besonderheiten des transkritischen Zyklus ist hier eine detaillierte dynamische Modellierung sowohl des CO₂-Kältekreis als auch des Adsorptionskreises erforderlich. Für den CO₂-Kältekreis wurde die TIL-Bibliothek (von TLK Energy) verwendet. Für die Komponentenmodelle des Adsorptionskreises konnte auf Vorarbeiten aus dem Technologieprojekt „AdoSan-LXB“ zurückgegriffen werden. Das Schichtspeichermodell wurde am KIT entwickelt (Masterarbeit E. Prijic) und an eigene Messergebnisse angepasst auf Basis eines Modells der KU Leuven. Auf der Adsorptionsseite ist die Ankopplung aller drei Temperaturniveaus an einen Schichtwärmespeicher neuartig. Hier wurde bisher nur eine rudimentäre Regelung des Adsorptionsprozesses implementiert, die noch nicht zu dem erwarteten Effizienzsprung des Systems führt (Masterarbeit H. Coote). Aufgrund des Ausscheidens zweier Mitarbeiter im Projektverlauf konnten diese Regelungs-Fragestellungen nicht weiterverfolgt werden, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

3.2 Modellierung von Wärmepumpensystemen in HEBAP

Das Simulationswerkzeug HEBAP (Heating Energy Balancing Program) wurde entwickelt, um alternative Wärmeversorgungssysteme für Mehrfamiliengebäude im Bestand in Hinsicht ihres CO₂-Einsparpotentials und der Energiebezugskosten auslegen und vergleichen zu können. Zielsetzung des Werkzeugs ist die Evaluierung der Dimensionierung und des Betriebs von Wärmepumpen im Hybridsystem (bivalentes System aus Wärmepumpe und Gaskessel) sowie der Vergleich mit den zwei Referenzsystemen monoenergetische Wärmepumpe sowie Gasbrennwertkessel. Die abgebildeten Systemkonzepte repräsentieren Versorgungskonzepte mit zentraler Anlagentechnik für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser. Eine parallele Abbildung und Berechnung der verschiedenen Systeme in einem Simulationslauf ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Durchführung einer größeren Anzahl an Simulationsläufen. Die folgenden Systemkonzepte sind umgesetzt:

- Gasbrennwertkessel als Referenzsystem
- Monoenergetisches Wärmepumpensystem (Wärmepumpe + Heizstab)
- Bivalentes Wärmepumpensystem (Wärmepumpe + Gasbrennwertkessel) mit den folgenden Betriebsstrategien (vgl. Abschnitt 4.7):

- Bivalent paralleler Betrieb
- Bivalent alternativer Betrieb mit Minimierung der CO₂-Emissionen
- Bivalent alternativer Betrieb mit Minimierung der Energiebezugskosten

HEBAP wurde für die in den Abschnitt 4.7 und Kapitel 5 beschriebenen Analysen der Auswirkung unterschiedlicher Betriebsstrategien und Systemauslegung auf die Effizienz und die Energiebezugskosten des Wärmepumpensystems genutzt. HEBAP ist in Python implementiert und modular aufgebaut. Abbildung 18 zeigt die Tool-Architektur schematisch sowie die Inputs und Outputs.

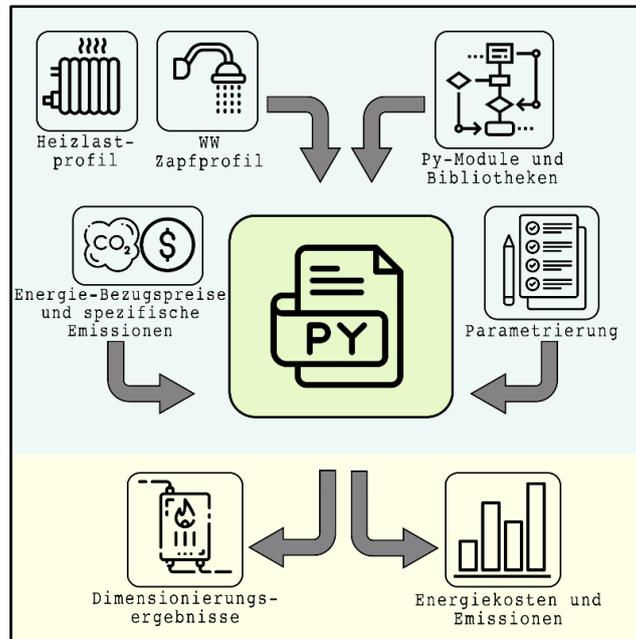


Abbildung 18: Struktur des HEBAP-Tools mit Eingaben (blau) und Ausgaben (gelb).

Externe Inputs sind ein Heizlastprofil, ein Warmwasserzapfprofil, Annahmen für Energiebezugskosten (Strom, Gas) und spezifische CO₂-Emissionsäquivalente der Energieträger. In einer Komponentenbibliothek (Python) sind Funktionen und Modelle der einzelnen Systemkomponenten des Heizsystems enthalten. Diese Komponentenbibliothek enthält z.B. die Abbildung der Wärmepumpe, des Gaskessels sowie des Wärmeentzugs aus dem Erdreich für die Simulation des Erdreich-Wärmepumpensystems.

Das Berechnungswerkzeug ist in zwei Teile unterteilt: Das erste Modul befasst sich mit der Dimensionierung der Komponenten des Heizungssystems. Die Parametrierung des Heizsystems wird dem eigentlichen Rechen-Kernel als Input übergeben, kann aber auch über eine direkte manuelle Eingabe erfolgen. Das zweite Modul enthält die eigentliche Systemsimulation. Als Ergebnisse dieser Simulation werden insbesondere die über ein Jahr bilanzierten CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten des Systems ermittelt. Diese sowie die Ergebnisse der Dimensionierung wurden im Projekt als Eingangsgrößen für die techno-ökonomische Analyse (Kapitel 5) genutzt.

3.2.1 Systemauslegung

Die Auslegung der Systemkomponenten ist der erste Schritt zur Berechnung der Emissionen und Energiekosten.

Die Auslegung der Wärmepumpe folgt der VDI-Richtlinie VDI 4645 (Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Planung Errichtung Betrieb). Maßgeblich für die Auslegung ist die Gebäudeheizlast im Auslegungspunkt zuzüglich des Zuschlags für die Trinkwassererwärmung (Energiebedarf für die Trinkwassererwärmung). Zunächst wird ein Standard-Warmwasserprofil, welches die Anzahl der Gebäudebewohner berücksichtigt, analysiert und der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung ermittelt. Da der Warmwasserverbrauch nicht von der Außentemperatur abhängt, ist die hierfür zu berücksichtigende Last unabhängig vom Auslegungspunkt.

Weiter wird die Gebäudeheizlast am Auslegungspunkt ermittelt. Die Wärmepumpenheizleistung berücksichtigt die Summe der Gebäudeheizlast am Auslegungspunkt und des Zuschlags für die Trinkwassererwärmung sowie zusätzlich eventuelle Sperrzeiten (dann höhere Leistung erforderlich). Auch für das monoenergetische System wird die Wärmepumpe nicht auf die Normheizlast bei Normaußentemperatur dimensioniert, sondern die Bivalenztemperatur für die Auslegung herangezogen. In der Mehrzahl der Rechnungen im vorliegenden Projekt wurde mit einer typischen Bivalenztemperatur von -5°C als Basisauslegung gerechnet. Da die Wärmepumpenleistung in Datenblättern üblicherweise bei A2/W35 (Außentemperatur 2°C , Vorlauftemperatur 35°C) angegeben wird, erfolgt zwecks Standardisierung eine Umrechnung auf diese äquivalente Wärmepumpengröße anhand von Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Bivalenzpunkt unter Zuhilfenahme von Herstellerangaben.

Die Dimensionierung des Warmwasserspeichers sowie des Pufferspeichers wird ebenfalls auf Basis der VDI 4645 vorgenommen. Das Volumen des Warmwasserspeichers wird auf der Grundlage des höchsten Tages-Warmwasserbedarfs berechnet, während das Volumen des Pufferspeichers auf der Grundlage der Nennleistung der Wärmepumpe berechnet wird (Faktor: $20 \text{ l/kW}_{\text{nenn}}$).

3.2.2 Systemsimulation

Nach erfolgter Auslegung der Systemkomponenten können die Simulationen mit HEBAP durchgeführt und in einem Post-Processing ausgewertet werden. In den Rechenläufen wird die Wärmebereitstellung der verschiedenen Wärmeerzeuger (Wärmepumpe, Gasbrennwertkessel, Heizstab) in den abgebildeten System- und Betriebskonfigurationen ermittelt. Ergebnisgrößen sind u.a. die erzeugten Wärmemengen der Wärmeerzeuger (Gasbrennwertkessel, Wärmepumpen, Heizstab) und die benötigten Energieaufwände (Erdgas, Strom). Im Post-Processing werden als Hauptkenngrößen die CO_2 -Emissionen und die Energiekosten für die verschiedenen Systemkonfigurationen und Betriebsmodi abgeleitet.

Erzeugung der Raumwärme

Der Raumwärmebedarf wird direkt dem Wärmelastprofil des Gebäudes entnommen und auf den in der Simulation angegebenen Zeitschritt umgerechnet. Zunächst wird davon ausgegangen, dass die Wärmeerzeugung durch einen generischen Wärmeerzeuger erfolgt. Dieser theoretische generische Wärmeerzeuger ist nicht in der Kapazität begrenzt und ihm ist noch kein Wärmeerzeugertyp (WP, Gasbrennwertkessel) zugewiesen. Auf Basis der Heizkurve des Gebäudes werden die Vorlauf- und Rücklaufsolltemperaturen im Raumheizbetrieb ermittelt. Dann wird der erforderliche Wärmeerzeuger-Wärmestrom unter Berücksichtigung der Speicherverluste des Pufferspeichers und der angeforderten Heizleistung (aus dem Lastprofil) berechnet. Dies erfolgt für jeden Zeitschritt.

Mit dem so ermittelten notwendigen Erzeugerwärmestrom sowie den Vor- und Rücklauftemperaturen in allen Zeitschritten berechnet das Programm die Deckung durch die unterschiedlichen Wärmeerzeuger (Wärmepumpe, Gasbrennwertkessel, Heizstab) in Abhängigkeit von der Betriebsart (monoenergetisch, bivalent-parallel oder bivalent-alternativ). Entweder die Wärmepumpe, die Zusatzheizung oder beide liefern die gewünschte Heizleistung an das Gebäude.

Warmwassererzeugung

Aus dem Zapfprofil wird der Warmwasser-Wärmebedarf ermittelt und dem Warmwasserspeicher entsprechend entnommen, ebenso wie die zur Überwindung der Zirkulationsverluste erforderliche thermische Leistung. Der Speicher wird als Mehrknoten-Schichtenspeicher abgebildet, wobei die Vorlaufleitung der Frischwasserstation (FWS) in der obersten Schicht, die Rücklaufleitung für die Zirkulation in der mittleren Schicht und der Rücklauf der Frischwasserstation in der untersten Schicht liegt. Der Regelablauf auf der Warmwasserseite wird mit einem Hystereseregler unter Berücksichtigung der Betriebsgrenzen der Wärmepumpe betrieben.

Zusammenführung von Warmwasser- und Raumwärmeerzeugung

Nach der getrennten Berechnung der beiden Betriebsarten (Raumwärme und Warmwasser) werden die Ergebnisse in einem Zeitintervall ausgewertet, das der Simulationsschrittzeit entspricht. Die Wärmeerzeugung wird zusätzlich in einem stündlichen Zeitschritt ausgewertet, um die Wärmeerzeugung auf die Wärmepumpe und den zweiten Wärmeerzeuger je nach Betriebsart aufzuteilen. Übersteigt die Gesamterzeugung die Kapazität der Wärmepumpe, wird sie im bivalenten Parallelbetrieb auf die Wärmepumpe und den Kessel aufgeteilt. Im bivalenten Alternativbetrieb wird die Gesamterzeugung, sobald sie die Wärmepumpenleistung übersteigt, vollständig dem Kessel zugewiesen.

Schaltkriterium für Wärmepumpeneinsatz im bivalenten System

Im bivalenten *Parallelbetrieb* gibt HEBAP der Wärmepumpe gegenüber dem zweiten Wärmeerzeuger den Vorrang. Der zweite Wärmeerzeuger deckt nur die Anteile der Last, die aufgrund begrenzter Leistung der Wärmepumpe von dieser nicht abgedeckt werden können.

Im bivalenten *Alternativbetrieb* sind zwei Optimierungsmöglichkeiten umgesetzt. Es können entweder die CO₂-Emissionen oder die Energiebezugskosten minimiert werden. Dieser Optimierungsprozess wird durch die Effizienz der Wärmeerzeuger im jeweiligen Betriebspunkt und das Verhältnis der a) CO₂-Faktoren oder b) der Energiebezugskosten der Endenergieträger Strom und Gas bestimmt. Dieses Aufwandsverhältnis wird im Folgenden r_{fuel} (Fuel Ratio) genannt und ist wie folgt definiert:

$$r_{fuel, cost} = \frac{p_{elec}}{p_{gas}}$$

$$r_{fuel, CO_2} = \frac{CI_{elec}}{CI_{gas}} \cdot f_{gcv, ncv}$$

mit	r_{fuel}	-	Aufwandsverhältnis (Fuel-Ratio)
	p_{elec}	Cent/kWh	Bezugskosten pro Einheit Strom
	p_{gas}	Cent/kWh	Bezugskosten pro Einheit Erdgas (Bezug auf Brennwert)
	CI_{elec}	g/kWh _{el}	Spezifischer Emissionsfaktor (CO ₂ -eq) des Stroms
	CI_{gas}	g/kWh _{Hi}	Spezifischer Emissionsfaktor (CO ₂ -eq) des Erdgases (Bezug auf Heizwert)
	$f_{gcv, ncv}$	-	Umrechnungsfaktor von Heizwert auf Brennwert für Erdgas (Wert: 1,1 kWh _{Hi} / kWh _{Hi})

Die Annahmen für die verschiedenen Zeitpunkten (Jahren) zugeordneten Bezugskosten und spezifischen Emissionsfaktoren sind in Tabelle 18 zusammengestellt und erläutert.

Um im alternativ bivalenten Betrieb über die Umschaltung zwischen Wärmepumpe und Gasbrennwertgerät zu entscheiden, wurde ein Schaltkriterium f_{opt} definiert. Das Schaltkriterium f_{opt} ist das Produkt des Aufwandsverhältnisses r_{fuel} (Fuel Ratio) und des Verhältnisses der Effizienzen der Wärmeerzeuger im aktuell vorliegenden Betriebspunkt. Das Schaltkriterium wird in jedem Zeitschritt ausgewertet.

$$f_{opt} = r_{fuel} \cdot \frac{\eta_{boiler}}{COP_{HP}}$$

mit	f_{opt}	-	Schaltkriterium (Wärmepumpenvorrang bei $f_{opt} \leq 1$)
	η_{boiler}	-	Wirkungsgrad des Heizkessels (bezogen auf den Brennwert)
	COP_{HP}	-	Leistungszahl der Wärmepumpe

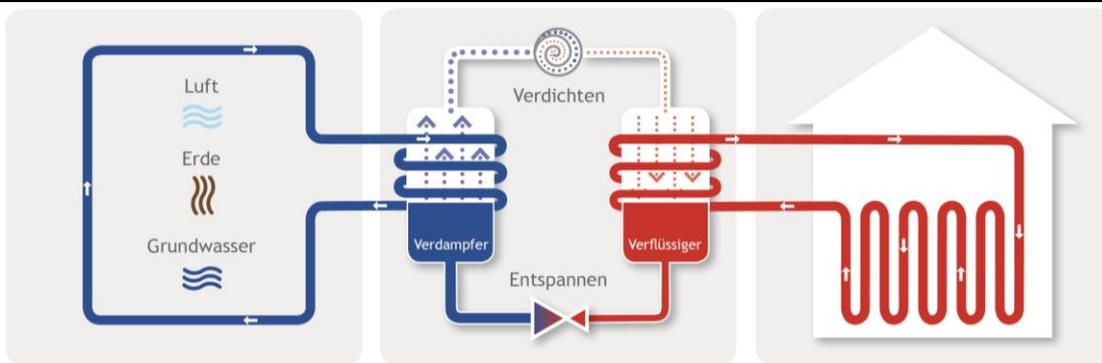
Die Wärmepumpe wird betrieben, wenn das Schaltkriterium f_{opt} gleich oder kleiner als eins ist. In diesem Fall liefert die Wärmepumpe die angeforderte Heizleistung mit einem geringeren Aufwand (CO₂-Emissionen oder Bezugskosten) als der Gasbrennwertkessel und die Wärmepumpe hat Vorrang.

4 Wärmepumpensystemtechnik für Mehrfamilienhäuser im Bestand

4.1 Herausforderungen für Wärmepumpen im Mehrfamilienhäuser-Bestand

Technische Herausforderungen für den Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienbestandsgebäuden ergeben sich insbesondere aus den thematischen Bereichen „Quellenerschließung“ und „Systemtemperaturen“, die im Rahmen des Projekts besonders untersucht wurden. Im Folgenden sind die wesentlichen Herausforderungen und Lösungsansätze für diese dargestellt, gegliedert nach Verortung im Wärmeversorgungssystem (Wärmequelle, Wärmepumpe, Wärmevertei- und übergabe).

Tabelle 9: Herausforderungen und Lösungsansätze für Wärmepumpen im Bestand



Bildquelle: BWP

Wärmequellenanlage	Wärmepumpe	Wärmevertei- und Übergabesystem
Herausforderungen		
<ul style="list-style-type: none"> • Erschließung der Wärmequelle • Luft-WP: Schallemission und Aufstellort • Sole-WP: Flächenverfügbarkeit für Bohrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung auf klimafreundliche Kältemittel (z.B. Propan) • Bereitstellung höherer Temperaturen bei guter Effizienz • Größere Leistungsklassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Absenkung von Systemtemperaturen (TWW+RW) • Weiternutzung von Bestandshydraulik • Nutzerakzeptanz für geringere Vorlauf-temperaturen
Lösungsansätze		
<ul style="list-style-type: none"> • Quellenerschließung über die Gebäudehülle • PVT-Kombikollektoren • Multivalente Quellsysteme • Bivalente Systeme 	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung von Propan-Wärmepumpen und Sicherheitskonzepten • Kaskadierung von Wärmepumpen • Standardisierung von Systemlösungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Selektiver Heizkörperaustausch und hydraulischer Abgleich • Weiterentwicklung Planungsmethodik • Dezentrale Frischwasserstationen • Zentrale Frischwasserstation und Ultrafiltration • Nutzerzentrierte Systeme

In den folgenden Abschnitten werden die im Projekt genauer untersuchten Lösungsansätze vorgestellt, klassifiziert und bewertet.

Zunächst wird eine Klassifizierung von Systemlösungen für Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand vorgestellt. Diese fasst mögliche Systemkombinationen in fünf Lösungsfamilien zusammen, wobei eine Bandbreite von vollständig zentralen Systemen hin zu dezentralen raumweisen Systemen abgebildet wird. Weiter werden die Möglichkeiten zur Bereitung von Frischwarmwasser und systemische Ansätze zur Absenkung der Trinkwarmwassertemperaturen benannt.

Um Systemtemperaturen der Bereitstellung von Raumwärme abzusenken, gleichzeitig aber möglichst bestehende Übergabesysteme / Bestandsheizkörper weiter zu nutzen, kann als niedrig-investive Maßnahme ein selektiver Austausch von Heizkörpern evaluiert werden. Das Potential der Absenkung von Temperaturen sowie der Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe wird anhand des Demonstrationsgebäudes in Karlsruhe-Durlach als häufig anzutreffendem Gebäudetyp evaluiert.

Eine Simulationsstudie vergleicht verschiedene Systemvarianten der Trinkwarmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus. Evaluierte Systeme sind ein monoenergetisches Wärmepumpensystem mit TWW-Speicher, Systeme mit zentraler Frischwasserstation mit und ohne Ultrafiltration sowie wohnungsweise dezentrale Frischwasserstationen.

Hinsichtlich der Quellenerschließung wird zunächst allgemein das Potential zu Quellenerschließung für Wärmepumpen in verschiedenen Stadtraumtypen vorgestellt. Weiter wird als Möglichkeit der Nutzung der Gebäudehüllfläche zu Quellenerschließung der Einsatz von thermisch-photovoltaischen Kombi-Kollektoren im Bestand-MFH evaluiert. Es wird gezeigt, dass im evaluierten Typgebäude eine ausreichende Dachfläche für die Quellerschließung über PVT-Kollektoren vorhanden sind.

Bivalente Systeme können durch eine kleinere Dimensionierung der Wärmepumpe und sowie die Nutzung eines zusätzlichen Gaskessels auch eine Lösungsmöglichkeit bei begrenzter Quellenverfügbarkeit und Anforderung hoher Systemtemperaturen sein. Betriebsvarianten bivalenter Systeme werden für die im Projekt definierten Kosten- und Emissions-Szenarien vorgestellt.

4.2 Systemkonzepte

4.2.1 Systematisierung von Systemkonzepten in Mehrfamilienhäusern

Für den breiten Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern werden für die Zukunft Standardlösungen unverzichtbar sein. Zur Kategorisierung möglicher Implementierungsvarianten von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern hat die Internationale Energieagentur (IEA) eine Arbeitsgruppe eingesetzt (IEA HPP Annex 50), die sich zum Ziel gesetzt hat, zur Kategorisierung eine sogenannte „solutions matrix“ zu entwickeln.¹ Die vorgeschlagene Kategorisierung und vereinfachte schematische Visualisierung ermöglicht einen Überblick der Möglichkeiten von Wärmepumpenlösungen in Mehrfamilienhäusern (Abbildung 19). Sie zielt darauf ab, die Komplexität des Lösungsraums zu reduzieren und Eigentümer von Mehrfamilienhäusern Orientierung zu geben, wenn eine Entscheidung über ein neues Heizsystem ansteht.

¹ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/solution-matrix/>

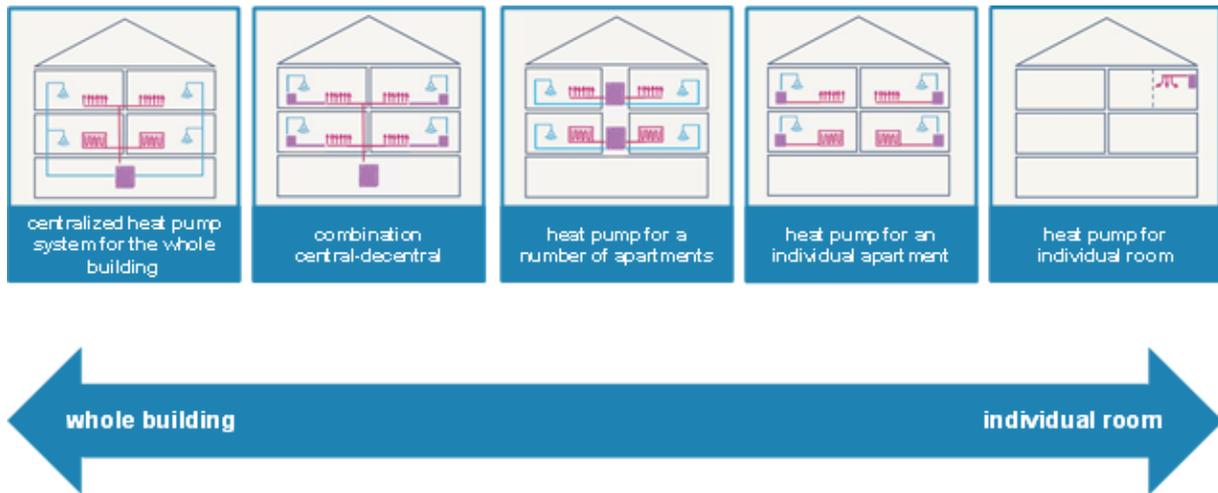


Abbildung 19: Allgemeine Klassifizierung der Lösungen in Mehrfamilienhäusern.

Eine Vielzahl von umgesetzten Wärmepumpenanlagen in unterschiedlichen Typen von Mehrfamilienhäusern bestätigt die Machbarkeit dieser Lösung. Besonders die Beispiele aus großen europäischen Städten wie London, Genf oder Amsterdam bestätigen, dass Wärmepumpen sowohl in neuen als auch in alten und oftmals nicht sanierten Hochhäusern eingesetzt werden können.¹ Inzwischen haben auch viele Firmen eigene, oft sehr innovative Lösungen für den Einsatz der Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern entwickelt. Beispiele von möglichen Lösungsansätzen werden im Folgenden beschrieben.

Ein wichtiger Punkt bei der Klassifizierung von Wärmepumpensystemen ist die Definition der Ebene, auf der die Integration realisiert wird. Dies reicht von komplett zentralen bis hin zu vollständig dezentralen Installationen mit unterschiedlichen Arten von Zwischenlösungen. Diese erste Klassifikationsebene besteht aus fünf sogenannten "Lösungsfamilien". Diese generischen Gruppen werden in den folgenden kurz beschrieben.

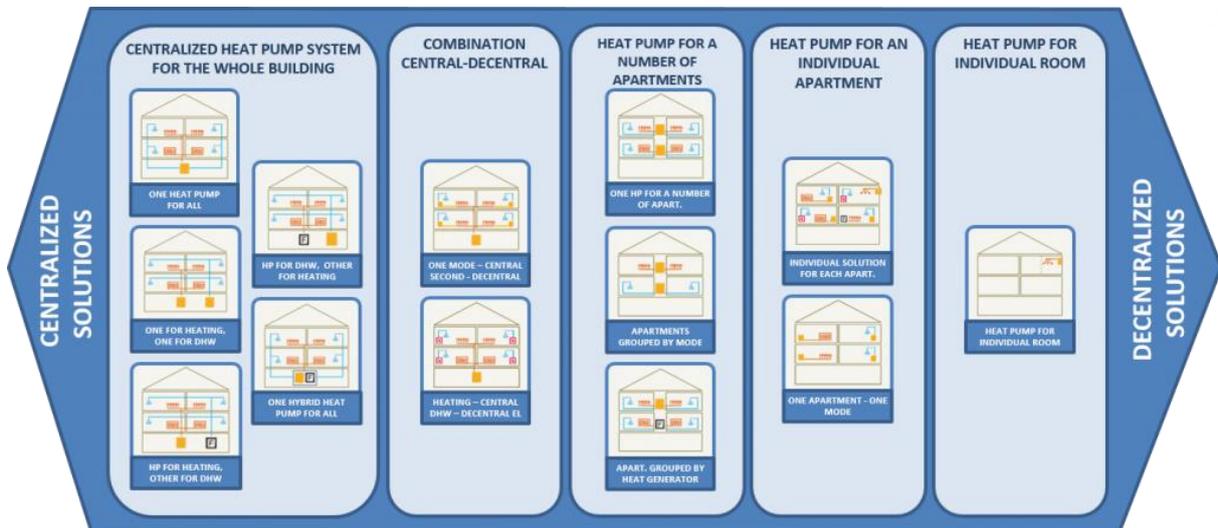


Abbildung 20: Klassifizierung von Wärmepumpenlösungen in fünf Familien mit 13 Lösungen.

Familie 1 - "Zentrale Wärmepumpensysteme für das Gesamtgebäude"

- Lösung 1.1: Eine zentrale Wärmepumpe für das gesamte Gebäude für Heizung und Trinkwasser.

¹ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/case-studies/>

- Lösung 1.2: Eine separate Wärmepumpe je Modus: eine WP für Raumheizung, eine für Trinkwassererwärmung
- Lösung 1.3: Wärmepumpe für Heizung, ein anderes Gerät für Trinkwassererwärmung
- Lösung 1.4: Wärmepumpe für Trinkwassererwärmung, ein anderes Gerät für Heizung
- Lösung 1.5: Eine Hybrid-Wärmepumpe für Raumheizung und Trinkwasser für das gesamte Gebäude

Familie 2 - "Kombination von zentralen und dezentralen Lösungen"

- Lösung 2.1: Ein zentrales Wärmepumpensystem für eine Betriebsart (z.B. Raumheizung) und dezentrale Wärmepumpen für die zweite Betriebsart (z.B. Warmwasser).
- Lösung 2.2: Eine zentrale Wärmepumpe für Raumheizung, dezentral direktelektrische Warmwasserbereitung

Familie 3 - "Wärmepumpen für bestimmte Wohneinheiten"

- Lösung 3.1: Eine Wärmepumpe für mehrere Wohneinheiten, typischerweise gruppiert nach Stockwerk
- Lösung 3.2: Wohneinheiten gruppiert nach WP-Modus. Ein Wärmepumpensystem in einem Modus (Raumheizung oder Trinkwasser) für mehrere Wohneinheiten, typischerweise gruppiert nach Stockwerk
- Lösung 3.3: Wohneinheiten gruppiert nach Wärmeerzeuger. Wohneinheiten werden nach Wärmeerzeuger zusammengeschlossen, typischerweise gruppiert nach Stockwerk

Familie 4 - "Wohnungsweise Wärmepumpen"

- Lösung 4.1: Jede Wohnung hat ein individuelles Konzept für Raumheizung und Warmwasserbereitung.
- Lösung 4.2: Eine Dezentrale Wärmepumpe je Betriebsart pro Wohneinheit

Familie 5 - "Einzelraum-Wärmepumpe"

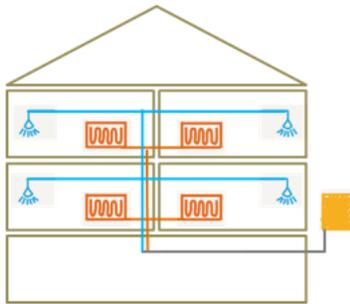
- Lösung 5.1: Eine Wärmepumpe für Raumheizung (oder -kühlung) je Einzelraum der Wohneinheit

Weiterführende Informationen können auf der Website des IEA HPP Annex 50 gefunden werden: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50>

4.2.2 Grundkonzepte Aufstellungsort

Bei Außenluft/Wasser-Wärmepumpen lassen sich unterschiedliche Bauarten (Kompaktgerät und Splitgerät) und unterschiedliche Möglichkeiten für den Aufstellungsort unterscheiden. Bei Kompaktwärmepumpen (auch Monoblock genannt) befinden sich alle Komponenten des Wärmepumpengerätes – wie auch bei Sole-Wärmepumpen - in einem Gehäuse. Diese können innen oder außen aufgestellt werden. Splitgeräte hingegen bestehen aus einer Außen- und einer Inneneinheit, die durch Kältemittelleitungen miteinander verbunden sind. Die Bewertung der Aufstellungsvarianten ist von der konkreten baulichen Situation geprägt (Dott und Afjei 2014, Primas et al. 2014). Auch für Sole/Wasser-Wärmepumpen bieten sich unterschiedliche Aufstellungsmöglichkeiten. Die folgende Zusammenstellung zeigt mögliche Aufstellungsorte von Wärmepumpen bei zentralen und semi-zentralen Versorgungskonzepten.

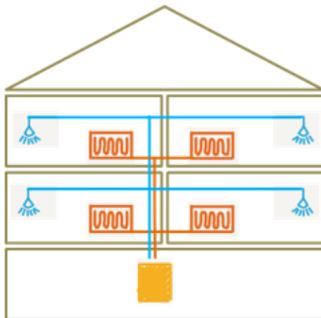
Aufstellung im Außenraum



Die Aufstellung von Außenluft/Wasser-Wärmepumpen im Außenraum ist eine etablierte und – bei naher Aufstellung am Gebäude - vergleichsweise günstige Lösung. Der bauliche Aufwand und Platzbedarf im „Heizungskeller“ ist geringer als bei einer innenaufgestellten Wärmepumpe; die Schallbelastung im Außenraum ist höher. Ausschlaggebend für die Schallbelastung ist neben dem Schalleistungspegels des Gerätes, der Aufstellort und die Nutzung zusätzlicher Lärmschutzmaßnahmen. Eine weitere Herausforderung bietet die gestalterische Integration in den Außenraum. Ein ansprechendes Geräte-Design oder das Vergeben bzw. Integrieren der Wärmepumpe hinter baulichen Elementen (Zäune, Bepflanzungen, Schuppen u.a.) bieten örtlich angepasste Lösungsansätze.

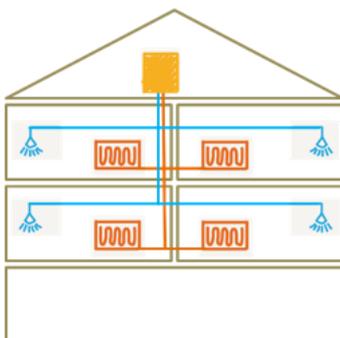
Als eine Variante der Aufstellung der Wärmepumpe kann eine Heiztechnikzentrale außerhalb des Gebäudes errichtet werden. Dies bietet auch die Möglichkeit die Haustechnikzentrale als vorgefertigte Gesamteinheit anliefern zu lassen.

Innenaufstellung im Kellergeschoss



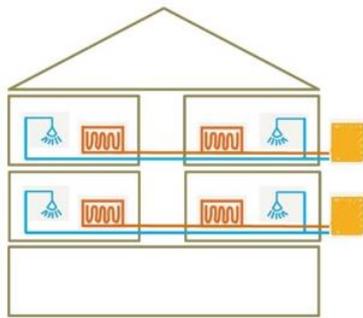
Die Innenaufstellung erfordert nicht nur für die Aufstellung der Wärmepumpe selber sondern auch wegen der voluminösen Luftkanäle einen höheren Platzbedarf im Heizungsraum. Ist ein großer Heizungsraum mit großen Fenstern oder Luftschächten, die sich für Luftführung eignen, vorhanden, ist der Aufwand gering. Beengte Platzverhältnisse, komplizierte Luftführungen und Wanddurchbrüche erhöhen den Aufwand teils erheblich, oder stehen dem Einbau einer Wärmepumpe im Gebäude entgegen. Bei korrekter Ausführung ist die Schallbelastung im Außenraum geringer als bei außen aufgestellten Wärmepumpen.

Aufstellung im Dachbereich



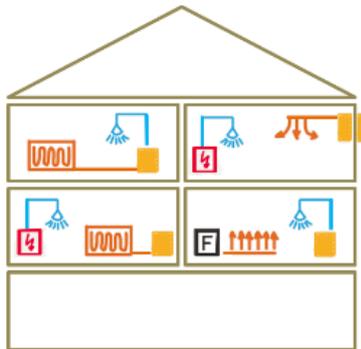
Die Aufstellung der Wärmepumpe im Dachbereich stellt höhere bauliche und schallschutztechnische Anforderungen als die zuvor genannten Varianten. Dies betrifft sowohl Maßnahmen zur Vermeidung der Körperschallübertragung als auch der Entwicklung und Verbreitung von Luftschall im Außenraum. Zudem ist die Statik zu beachten. Die Lösungsmöglichkeiten für die Wahl der Wärmepumpe (Monoblock oder Splitgerät) sowie für die Luftführung über Giebelseite und/oder Dachfläche sind von der konkreten baulichen Situation abhängig.

Aufstellung an Gebäudefassade



Für Gebäude mit einfacher Hülle bietet sich im Zuge der Hüllsanierung mit vorgefertigten Elementen die Option, Gebäudetechnik zu integrieren. Ein Lösungsansatz ist dezentrale Wärmepumpen in Fassaden-Balkonsysteme zu integrieren, die jeweils mehrere oder alle Wohnungen einer Etage mit Wärme versorgen. Die Nutzung von Außenluft als Wärmequelle kann aufgrund der Schallbelastung eine Herausforderung darstellen. Bei Nutzung von Erdreich oder PVT-Kollektoren kann die Rohrleitung in der Fassadenebene erfolgen.¹

Aufstellung in den Wohnungen



Für den Fall wohnungsweiser Wärmepumpen erfolgt die Aufstellung innerhalb der Wohnungen. In jeder Wohnung wird ausreichend Platz für die Installation der Wärmepumpe benötigt. Außenluft ist die naheliegendste Wärmequelle für wohnungsweise Wärmepumpenlösungen. Abluft kann für bestimmte Anwendungsarten genutzt werden.

4.2.3 Leistungsregelung

Während der Leistungsbedarf zur Raumheizung (und die erforderliche Heizkreistemperatur) mit steigender Außentemperatur sinkt, steigt die verfügbare Leistung der Wärmepumpe durch den fallenden Temperaturhub. Besonders ausgeprägt ist dies bei Außenluft-Wärmepumpen, da hier die Wärmequellentemperatur höheren jahreszeitlichen Änderungen unterworfen ist als bei erdgekoppelten Wärmepumpen. Eine Leistungsanpassung des Wärmepumpensystems ist daher von zentraler Bedeutung, um die Deckung der Wärmelast zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung bei Gewährleistung eines effizienten Anlagenbetriebes und zulässiger Taktzyklen zu erzielen. Dies kann mit dem Einsatz einer modulierenden Wärmepumpe, einer mehrstufigen Wärmepumpe als auch mit der Kaskadierung mehrere Geräte umgesetzt werden (Primas et al. 2014).

Der Einsatz eines zwei(drei)-stufigen Wärmepumpengerätes mit einem Kältekreislauf bringt gegenüber getrennten Geräten bietet den Vorteil einer höheren Effizienz im Teillastbetrieb (ein Verdichter in Betrieb), da die identische Wärmeübertragerfläche wie in Volllast (beide Verdichter in Betrieb) genutzt wird. Zudem sind der Platzbedarf und der Installationsaufwand geringer, wenn ein zwei- bzw. dreistufiges Wärmepumpengerät anstelle mehrerer Geräte eingebaut wird. Die Nutzung von mehreren Geräten hingegen bietet mehr Flexibilität und erhöht die Ausfallsicherheit. Die Flexibilität zeigt sich zum einen darin, dass Geräte unterschiedlicher Leistung zusammengestellt werden können und damit auch Phasen mit geringer Teillast bei geringen Taktzyklen gewährleistet werden können. Ein weiterer Freiheitsgrad bei einer Kaskadenschaltung ist die Möglichkeit, (gleichzeitig) unterschiedliche Temperaturniveaus effizient zu bedienen (vgl. Demonstrationsvorhaben SanBest, Kapitel 7.3). Wird in der Kaskade eine kontinuierlich geregeltes Wärmepumpengerät mit eingebunden, so kann die Leistung des Wärmepumpensystems im Betrieb noch besser auf den aktuellen Wärmebedarf angepasst und eine kontinuierliche Regelbarkeit über einen großen Leistungsbereich erreicht werden.

¹ <https://www.energiesprong.de>

Eine Variante der Leistungsregelung bietet der bivalenten Wärmepumpensystem, in denen Gaskessel und Wärmepumpen kombiniert zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Die Einsatzgebiete sowie Auslesungs- und Regelungskonzepte werden in Kapitel 4.7 vorgestellt.

4.2.4 Trinkwassererwärmung (TWE)

Die Trinkwassererwärmung in Mehrfamiliengebäuden stellt den Einsatz von Wärmepumpen vor besondere Herausforderungen, da neben der Energieeffizienz das Thema der Trinkwasserhygiene in Hinblick auf Legionellenschutz berücksichtigt werden muss.

Nach DVGW Arbeitsblatt W 551 (2004) werden Trinkwassererwärmungsanlagen unter hygienischen Aspekten in Klein- und Großanlagen unterteilt. Kleinanlagen sind Trinkwassererwärmungsanlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Anlagen mit Speichergrößen kleiner 400 l und einem Rohrinhalt kleiner 3 l zwischen Trinkwassererwärmer und Entnahmestelle. Im MFH-Bereich liegen daher meist Großanlagen vor, bei denen eine permanente Wasseraustrittstemperatur am Trinkwassererwärmer von mindestens 60 °C gefordert ist. Außerdem sind Zirkulationssysteme einzubauen und so zu betreiben, dass die Rücklauftemperatur 55 °C nicht unterschreitet. Der gesamte Trinkwasserinhalt von Vorwärmstufen (z.B. Trinkwasserspeicher) muss mindestens einmal täglich auf 60 °C aufgeheizt werden.

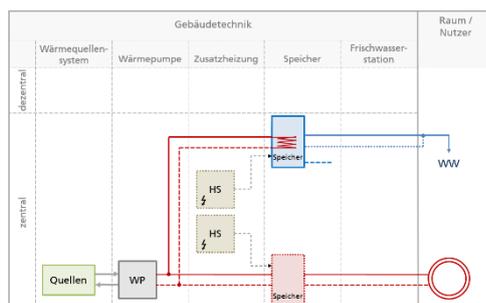
Dieses hohe Temperaturniveau bei zentraler TWE im MFH-Bereich¹ stellt ein Hemmnis für den Einsatz von Wärmepumpen dar. Je höher die bereitgestellte Temperatur, desto niedriger die Effizienz der Wärmepumpe. Zusätzlich kann die maximale Vorlauftemperatur den Deckungsanteil der WP begrenzen und ein zweiter Wärmeerzeuger zur TWE ist notwendig. Deshalb gewinnen Maßnahmen zur Temperaturabsenkung bei der TWE oder der Einsatz von WP mit höheren Maximal-Temperaturen zunehmend an Bedeutung.

Zwar hat die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus im Vergleich zu anderen energetischen Optimierungsmaßnahmen, wie zum Beispiel der Sanierung der Gebäudehülle, einen eher geringen Einfluss auf den Nutzenergiebedarf. Der Effekt verstärkt sich jedoch mit der Verbesserung des Gebäudeenergiestandards, da die TWW-Bereitstellung hier einen größeren Anteil am Gesamtwärmebedarf darstellt. Dies führt dazu, dass diese Optimierungsmaßnahmen ein bedeutender Faktor für eine zukunftsorientierte, auf regenerativen Energien basierende Wärmeversorgung sind.

Im Folgenden werden verschiedene TWE-Varianten mit Wärmepumpe im MFH-Bereich vorgestellt. Hier liegt der Fokus auf der TWE-Variante; zur Vollständigkeit wird die Raumheizung mit zentralem Pufferspeicher und die Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe und elektrischen Zusatzheizern dargestellt. Ein energetischer Vergleich der Varianten für ein Wärmepumpensystem im mittleren MFH ist in Kapitel 4.4 dargestellt.

Bei allen Systemen müssen für einen energieeffizienten und hygienischen Betrieb die allgemein anerkannten Regeln der Technik bei Planung, Bau und Betrieb eingehalten werden. So ist auf einen regelmäßigen und hinreichenden Wasseraustausch sowie auf Einhaltung der Temperaturen, sowohl auf Warm- als auch auf Kaltwasserseite, zu achten.

Trinkwarmwasserspeicher

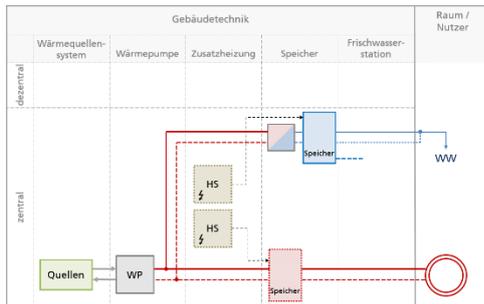


Aufgrund der limitierten Vorlauftemperaturen bei Wärmepumpen muss für einen effizienten Betrieb die interne Wärmeübertragerfläche im TWW-Speicher so groß bemessen sein, dass die Heizleistung der Wärmepumpe auch noch am Ende der Beladung übertragen werden kann (geringe Temperaturdifferenzen im Wärmeübertrager). Als Faustregel gilt: 0,25 m² Wärmeübertragungsfläche je kW Heizleistung. Im MFH-Bereich stößt man hier konstruktiv

¹ Vgl. Bericht AP 1.3: Technische Anforderungen an Energieversorgung und Gebäudehülle von Mehrfamilienhäusern

und fertigungstechnisch an die Grenzen der Machbarkeit. Außerdem ist ein großes Bereitschaftsvolumen zur Vorhaltung von Warmwasser für eine hohe Zapfleistung notwendig.

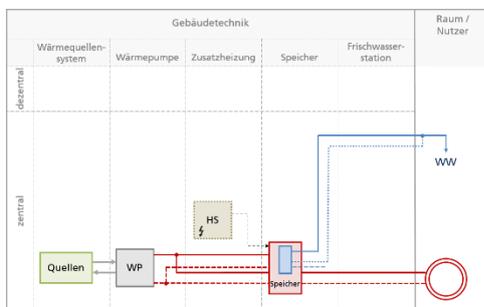
Speicherladesystem



Bei größeren Leistungsbereichen ist der Einsatz eines entsprechend dimensionierten Ladesystems (externer Wärmeübertrager) zwischen Wärmepumpe und Speicher sinnvoll. Dadurch kann die Wärmeübertragerfläche unabhängig vom Speicher gewählt werden und somit große Leistungen mit kleinen Grädigkeiten übertragen werden. Um die Temperaturschichtung im Speicher zu erhalten empfiehlt sich der Einsatz von Einschichtsystemen und Ladelanzen.

Häufig werden für Speicherladesysteme Plattenwärmeübertrager eingesetzt. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass die Temperaturspreizung auf der Primärseite durch die Wärmepumpe vorgegeben ist und nur in sehr engen Grenzen variiert werden kann.

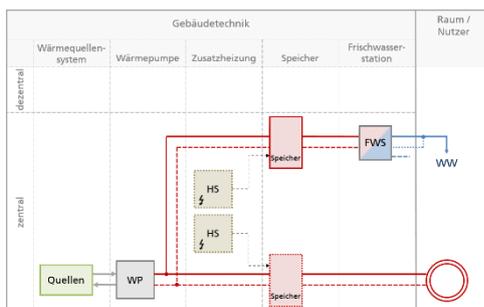
Kombispeicher



Bei geringem Platzbedarf und bei der Integration weiterer Wärmeerzeuger sowohl für Heizung als auch für die TWE können Kombispeicher (Heizungspufferspeicher mit integriertem Trinkwasserbereiter) zum Einsatz kommen. Hier werden zwei wesentliche Arten unterschieden: Tank-in-Tank-Systeme und Speicher mit integriertem Durchlaufprinzip. Aufgrund der geringen Oberfläche (vor allem bei Tank-in-Tank-Systemen) ist die Warmwasserleistung in Abhängigkeit von der

Puffertemperatur begrenzt. Zwar wird bei Kombispeichern (vor allem mit integriertem Durchlaufprinzip) hauptsächlich Heizungswasser bevorratet, die hygienischen Anforderungen müssen jedoch trotzdem eingehalten werden.

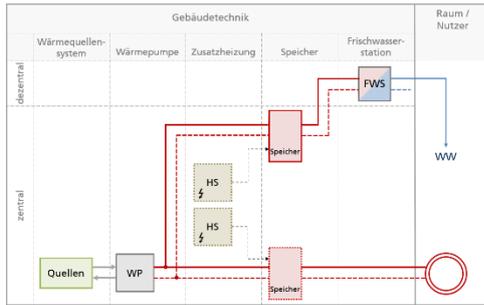
Zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmung (Frischwasserstation)



Bei der zentralen Durchfluss-TWE wird Heizungswasser in einem Heizungspufferspeicher bevorratet und über ein Plattenwärmeübertragersystem (Frischwasserstation) an die Trinkwasserverteilung abgegeben. In der Regel sind Frischwasserstationen vorgefertigte Baugruppen, die Pumpen, Ventile, Plattenwärmeübertrager und Regelung enthalten. Die Regelung der TWW-Temperatur erfolgt über Volumenstromregelung der Primärpumpe. Für große Warmwasserleistungsanforderungen können mehrere

Module verschaltet werden. Der Vorteil der Frischwasserstation liegt in der möglichen Deckung eines großen Leistungsbedarfs ohne Bevorratung von Trinkwasser. Zu beachten ist, dass die Pufferspeichertemperatur wie bei Kombispeichern um die Grädigkeit des Wärmeübertragers über der gewünschten TWW-Temperatur liegen muss.

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmung (Wohnungsstation)



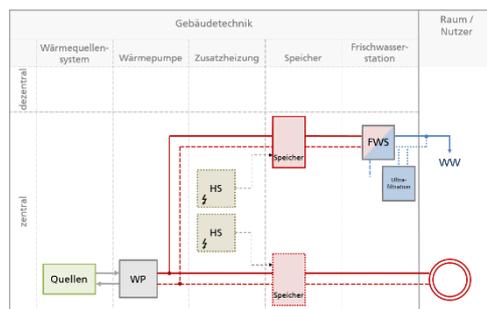
Bei diesen Systemen erfolgt die Trinkwassererwärmung dezentral, meist in den einzelnen Wohnungen. Diese sog. Wohnungsstationen können als Stationen zur reinen TWE oder als Stationen für Raumheizung und TWE ausgeführt werden. Aufgrund der kleinen Systemvolumen gelten diese Anlagen nach DVGW-Richtlinie als Kleinanlagen und haben daher keine Temperaturanforderungen, da sie potentiell weniger anfällig für Legionellen-Kontaminationen sind. Die hygienische Unbedenklichkeit kann jedoch nicht für alle

dezentralen Systeme belegt werden.

Eine Sonderform sind elektrisch beheizte dezentrale Durchfluss-TWE. Diese werden vorzugsweise bei geringem TWW-Bedarf und wenn kein zentrales TWW-Netz vorgesehen ist eingesetzt. Aufgrund der direkt elektrischen Heizung ist eine hohe elektrische Anschlussleistung notwendig. Außerdem sind die Betriebskosten hoch.

Die Umstellung auf ein dezentrales TWE-System ist aufgrund des erhöhten Aufwandes (Bauarbeiten in allen Wohneinheiten) und höheren Investitionskosten herausfordernd. Müssen allerdings im Sanierungsfall die Verteilleitungen sowieso erneuert werden, ergibt sich durch diese Umstellung eine energieeffiziente Variante zur TWE.

Ultrafiltration zur Temperaturabsenkung



Der Einsatz zusätzlicher Technologien zur Legionellenbekämpfung, wie der Ultrafiltration, können die Problematik der hohen TWW-Temperaturen bei Wärmepumpensystemen entschärfen. Hier dargestellt ist ein dezentrales Durchfluss-TWE-System, bei dem zusätzlich eine Ultrafiltrationseinheit zur mechanischen Bekämpfung von Legionellen im Zirkulationsrücklauf (Bypass-Betrieb) verbaut ist. Dadurch kann laut Hersteller die Systemtemperatur im TWW-Kreis bis fast auf die Temperatur des gezapften Wassers (45 °C) gesenkt

werden. Aufgrund dieser Temperaturabsenkung sinken die Speicher- und Verteilverluste in der Trinkwasserinstallation. Außerdem kann die Wärmepumpe in einem effizienteren Betriebspunkt arbeiten und den gesamten Wärmebedarf für die TWE decken. Da der Einsatz der Ultrafiltration bisher noch nicht ausreichend erprobt ist, sind Vorgaben zum Schutz der Verbraucher notwendig. So muss z.B. der hygienisch einwandfreie Betrieb durch regelmäßige Legionellenbeprobung nachgewiesen und das zuständige Gesundheitsamt einbezogen werden. Nach einer erfolgreichen Erstuntersuchung kann mit der stufenweisen Temperaturabsenkung begonnen werden.

4.3 Raumwärme-Übergabe und selektiver Heizkörper-Tausch

Die Effizienz von Wärmepumpen zur Raumwärmebereitstellung hängt stark von den Temperaturen im Raumwärmeübergabe-System ab. Abbildung 21 zeigt die ausgewerteten Ergebnisse aus dem Monitoringprojekt „WPsmart im Bestand“ für 34 Luft- und 15 Erdreich-Wärmepumpen. Demnach steigt mit jedem Grad Celsius geringerer Wärmepumpentemperatur die Jahresarbeitszahl um 0.13 Punkte für die Luft-Wärmepumpe und um 0.10 Punkte für die Erdreich-Wärmepumpe. Eine Absenkung der Temperaturen im Heizkreis ist demnach ein wichtiger Hebel für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb in Bestandsgebäuden.

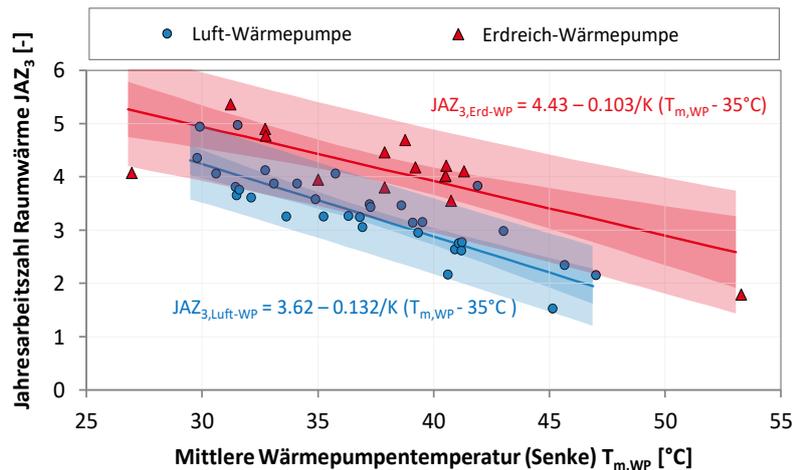


Abbildung 21: Jahresarbeitszahl für Raumwärme in Abhängigkeit der mittleren Wärmepumpentemperatur. Resultate aus dem Monitoringprojekt „WPsmart im Bestand“ für 34 Luft- und 15 Erdreich-Wärmepumpen (Lämmle et al. 2022a).

Der Austausch einzelner, unterdimensionierter Heizkörper stellt, in Kombination mit einem hydraulischen Abgleich, eine wirksame Möglichkeit dar, die Systemtemperaturen des Wärmeübergabesystems abzusenken und damit das Heizsystem für den Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden zu ertüchtigen. Bei dieser minimalinvestiven Maßnahme werden lediglich die „kritischen“, am kleinsten dimensionierten Heizkörper ausgetauscht, während das Wärmeverteilsystem und die überwiegende Zahl der Heizkörper nicht verändert werden.

Die Methode und Ergebnisse des selektiven Heizkörperaustauschs werden im Folgende beispielhaft am Beispiel des Demo-Vorhabens „Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach“ diskutiert. Eine Sanierung der Gebäudehülle erfolgte bereits in den 90er Jahren, sodass die Nennheizlast auf $\dot{Q}_{Nenn} = 66 \text{ kW}$, bzw. ca. 50 % der ursprünglichen Heizlast abgesenkt wurde. Die Heizkörper wurden dabei nicht gewechselt, sodass diese für den sanierten Zustand teilweise überdimensioniert sind, und eine Absenkung der Heiznenntemperaturen bzw. der Heizkurve ermöglichen.

Zur Identifikation der kritischen, unterdimensionierten Heizkörper ist allerdings eine raumweise Betrachtung von Heizlast und Heizkörperleistung notwendig. Dazu sind im Einzelnen folgende Schritte notwendig.

- Berechnung der raumweisen Heizlast, z.B. nach DIN EN 12831-1:2017
- Bestimmung der installierten Heizkörperleistung bei Norm-Bedingungen (75°C/65°C/20°C)
- Berechnung der Heizkörperleistung bei abgesenkten Heiztemperaturen
- Vergleich der raumweisen Heizlast mit der berechneten Heizkörperleistung und Identifikation unterkritisch-dimensionierten Heizkörper je Nenntemperatur.

Abbildung 22 zeigt den Vergleich der raumweisen Heizlast mit den installierten Heizkörpern für unterschiedliche Systemtemperaturen. Die installierten Heizkörper erlauben demnach einen Betrieb mit Nenn-Vor- bzw. Rücklauf-Temperaturen von 75°C / 60°C. Um die Nenntemperaturen auf 60°C / 50°C bzw. 55°C / 45°C absenken zu können, reicht in diesem Gebäude ein Austausch von 2 Prozent, bzw. 7 Prozent aller Heizkörper aus. Statt eines Austauschs der Heizkörper, ist auch die Nachrüstung der bestehenden Heizkörper mit Ventilatoren möglich.

Für eine hohe Nutzerakzeptanz von Sanierungsmaßnahmen ist eine gute und frühzeitige Kommunikation über geplante Sanierungsmaßnahmen wichtig. Nach gezieltem Austausch einzelner Heizkörper und Absenkung der Heizkreistemperaturen könnten einzelne Nutzer*innen mit erhöhtem Komfortbedürfnis unzufrieden sein mit dem thermischen Komfort in einzelnen Räumen, in denen der Heizkörper nicht ausgetauscht wurde. In solchen Fällen kann durch Nachrüstung der (wenigen) betreffenden Heizkörper mit Ventilatoren der Nutzerkomfort erhöht werden. Entsprechende Nachrüst-Sets sind als „Heizkörperverstärker“ erhältlich. Ein sehr leiser Betrieb kann erreicht werden mit relativ

langsam laufenden Axialventilatoren, die typischerweise mit Magnethalterungen unter dem Heizkörper befestigt werden und sich mittels eines Temperaturfühlers automatisch einschalten, wenn der Heizkörper aktiv ist. Der erhöhte Luftdurchsatz durch den Heizkörper führt zu einem besseren Wärmeübergang und dadurch zu einer um bis zu 50% höheren Heizkörperleistung (je nach Anzahl und Drehzahl der Ventilatoren).

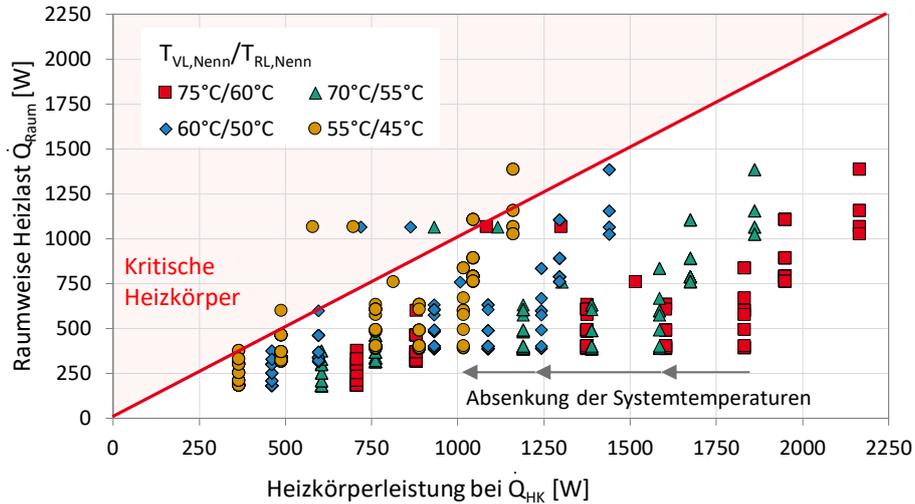


Abbildung 22: Raumweiser Vergleich von berechneter Heizlast und Leistung der Heizkörper Heizkörpernennleistung bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für Gebäudetyp 1 (Lämmle et al. 2022).

Die folgende Tabelle zeigt dabei den Zusammenhang zwischen Nenntemperaturen, Anzahl der kritischen Heizkörper für zwei Gebäudetypen im Quartier. Durch einen Austausch der unterdimensionierten Heizkörper kann die Heizkurve abgesenkt werden, sodass das mittlere Temperaturniveau der Wärmepumpe reduziert wird, und entsprechend die Jahresarbeitszahl steigt. Die Auswirkung auf die Jahresarbeitszahl wurde dafür mit einer dynamischen Systemsimulation in Dymola/Modelica analysiert.

Tabelle 10: Anzahl von kritischen Heizkörpern je Nenntemperatur und korrespondierende Jahresarbeitszahl.

Nenn-Heiztemperatur $n T_{VL,Nenn}/T_{RL,Nenn}$	Gebäudetyp 1		Gebäudetyp 2		Jahresarbeitszahl JAZ ₃	
	Kritische Heizkörper (150 gesamt)		Kritische Heizkörper (180 gesamt)		Luft-WP	Erd-WP
75°C/60°C	0	0 %	0	0 %	2.0	2.6
70°C/55°C	1	0.7 %	10	6%	2.3	3.0
65°C/50°C	2	1.3 %	18	10%	2.5	3.4
60°C/50°C	3	2 %	64	36%	2.7	3.5
55°C/45°C	11	7 %	94	52%	2.8	3.7
50°C/40°C	44	29 %	138	77%	3.0	4.0

Die Untersuchungen zeigen, dass der selektive Austausch von Heizkörpern in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen zu einer erheblichen Steigerung von Energieeffizienz und CO_{2,Äq}-Einsparungen führen kann. Im konkreten Beispiel wird eine Absenkung der Nenn-Heiztemperaturen von 75°C / 60°C auf 55°C / 45°C durch einen Austausch von 7 % aller Heizkörper erzielt. Dadurch steigt die Jahresarbeitszahl um 40 %. Bei geringem Investitions- und Umsetzungsaufwand werden die verbrauchsbedingten Betriebskosten entsprechend um 40 Prozent reduziert, sodass die die CO_{2,Äq}-Emissionen um gleichfalls um 40 % sinken. Die Maßnahme weist damit eine hohe Wirtschaftlichkeit auf und ist sowohl unter ökonomischen, energetischen als auch ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll.

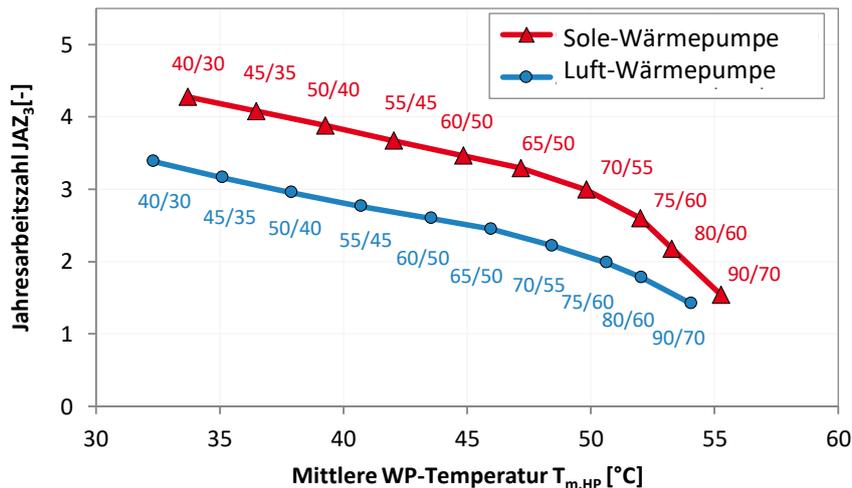


Abbildung 23: Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl von den Nenn-Heiztemperaturen (VL/RL).

Die Wirksamkeit der Maßnahme hängt dabei insbesondere von dem Sanierungsstand des Gebäudes und der ursprünglichen Auslegung der Heizkörper ab. Eine Anwendung der Methode auf einen zweiten Gebäudetyp im Quartier zeigt, dass die Ergebnisse trotz der Ähnlichkeit der Gebäude in derselben Baualterklasse stark divergieren. Daher muss die Methode bei jedem Gebäude individuell evaluiert werden. Für die raumweise Heizlastberechnung werden Daten zu den Wärmeverlusten der Gebäudehülle (U-Werte) benötigt, die typischerweise an anderer Stelle (z.B. zur Erstellung von Energieausweisen) bereits erhoben wurden. Um den Aufwand der Heizlastberechnung zu minimieren, sollten diese Daten gesammelt zur Verfügung stehen.

Eine detaillierte Beschreibung der Methode des selektiven Heizkörperaustauschs und die Auswirkung auf Nenntemperaturen und die Effizienz von Wärmepumpensysteme sind in Lämmle et al. (2020), Lämmle et al. (2022) und Viveros Vergara (2020) dargestellt.

4.4 Trinkwassererwärmung

Zur Reduzierung des Energieverbrauchs für Raumwärme durch bauliche Maßnahmen stehen seit der Einführung der Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV) und der Weiterführung durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie durch das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) wichtige und effektive Instrumente der deutschen Energie- und Klimaschutzpolitik zur Verfügung. Abbildung 24 stellt diese Senkung des Gesamtbedarfs an Nutzenergie (inkl. Speicher- und Verteilverluste) als Resultat einer Sanierung nach GEG (S) und mit U-Werte an Passivhaus angelehnt (P) dar.

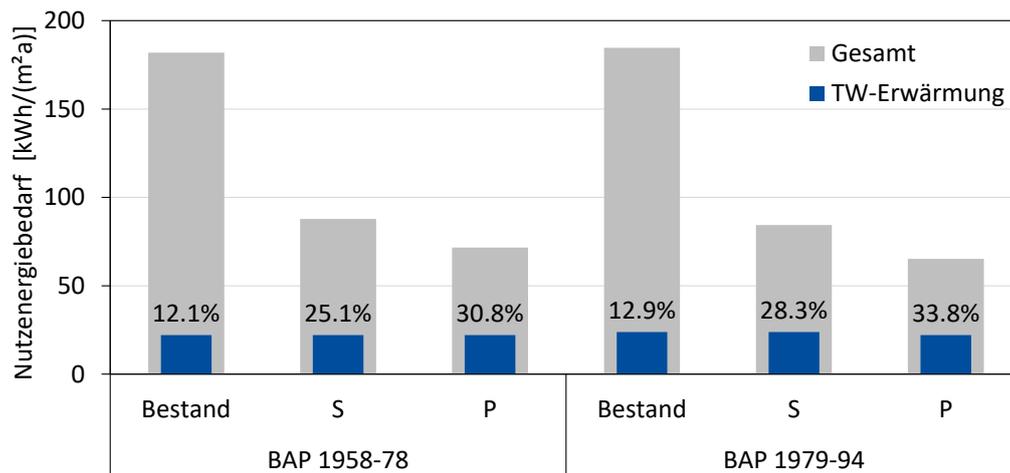


Abbildung 24: Einfluss des Sanierungsstandes auf den Nutzenergiebedarf und den Anteil der TW-Erwärmung am Gesamtenergieverbrauch verschiedener Baualtersphasen (BAP) eines MFH (S: saniert nach GEG; P: saniert mit Bauteilen an Passivhaus angelehnt).

Im Vergleich wird deutlich, dass durch eine thermische Sanierung der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden der Nutzenergiebedarf zur Raumheizung um bis zu 75 Prozent reduziert werden kann. Der Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW) ist durch die Nutzer vorgegeben und bleibt daher über alle Gebäudestandards konstant. Mit steigenden bautechnischen Anforderungen und dem damit verbundenen verminderten Raumwärmebedarf nimmt daher der relative Anteil der Trinkwassererwärmung (TWE) am Gesamt-Endenergieverbrauch zu und damit die Bedeutung der TWE.

Das hohe Temperaturniveau bei zentraler TWE (60 °C Austrittstemperatur am TWE), das den gesetzlichen Hygieneanforderungen in Mehrfamilienhäusern (MFH) geschuldet ist, ist für eine energieeffiziente Wärmeerzeugung ein Hemmnis. Je höher die bereitgestellte Temperatur, desto niedriger die Effizienz der Wärmepumpe. Zusätzlich kann auch die technisch maximal mögliche Vorlauftemperatur den Deckungsanteil der WP begrenzen und damit die (primär-)energetischen und emissionsseitigen Einsparmöglichkeiten limitieren. Deshalb gewinnen Maßnahmen zur Temperaturabsenkung bei der TWE zunehmend an Bedeutung und rücken verstärkt in den Fokus energieeffizienter Anlagentechnik. In Abbildung 25 wird das Verhalten des Nutzenergiebedarfs durch Absenkung des Temperaturniveaus in der Trinkwasserinstallation für das MMFH (BAP 1958-78) für verschiedene Sanierungsstufen dargestellt.

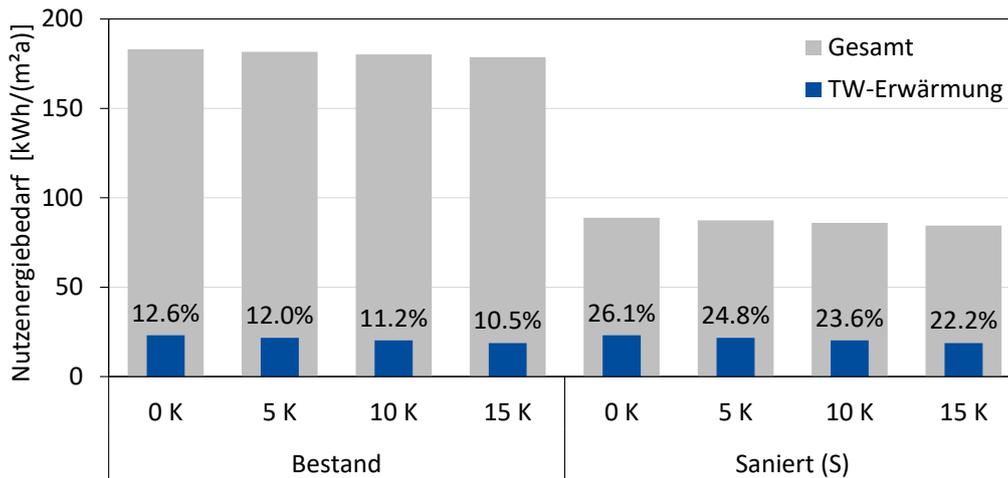


Abbildung 25: Einfluss der Temperaturabsenkung in der Trinkwasserinstallation auf den Nutzenergiebedarf eines Bestands-MFH und eines MFH nach GEG saniert (S).

Es wird ersichtlich, dass die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus im Vergleich zu anderen energetischen Optimierungsmaßnahmen, wie zum Beispiel der Sanierung der Gebäudehülle, einen eher geringen Einfluss auf den Nutzenergiebedarf hat. Der Effekt verstärkt sich jedoch mit der Verbesserung des Gebäudeenergiestandards. So verringert die Absenkung des Temperaturniveaus um 5 K beim Bestandsgebäude den Nutzenergiebedarf insgesamt um nur 1 % und beim Absenken um 15 K um 2,5 %. Im sanierten MFH wird der Nutzenergiebedarf bei derselben Absenkung hingegen um 2 % bzw. 5 % reduziert. Darüber hinaus sinkt der prozentuale Anteil des TWW am Gesamtenergiebedarf bei einer Verringerung des Temperaturniveaus. Es lässt sich somit abschließend festhalten, dass sich Optimierungsmaßnahmen in der Trinkwasserinstallation grundsätzlich stärker auf den Nutzenergiebedarf und damit auch auf Primärenergiebedarf von neuen und sanierten Gebäuden auswirken, da die TWW-Bereitstellung hier einen größeren Anteil am Gesamtbedarf darstellt. Dies führt dazu, dass Optimierungsmaßnahmen, insbesondere die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus, ein bedeutender Faktor für eine zukunftsorientierte, auf regenerativen Energien basierende Wärmeversorgung sind.

Im Folgenden werden verschiedene TW-Erwärmungsvarianten untersucht. In der Referenzvariante 1 erfolgt die TWE mit Hilfe eines TWW-Speichers mit internem Wärmeübertrager. Variante 2 und 3 nutzen eine Frischwasserstation mit Speicher (Durchflusssystem). In Variante 3 ist zusätzlich eine Ultrafiltrationseinheit zur mechanischen Bekämpfung von Legionellen im Zirkulationsrücklauf (Bypass-Betrieb) verbaut. Dadurch kann laut Hersteller die Systemtemperatur im TWW-Kreis bis fast auf die Temperatur des gezapften Wassers (45 °C) gesenkt werden. In Variante 4 erfolgt die TWE durch den Einsatz von dezentralen Frischwasserstationen (Wohnungsstationen) mit zentralem Speicher. Aufgrund der geringen Volumina der mit TWW befüllten Leitungen kann hier ebenfalls die Temperatur abgesenkt werden.

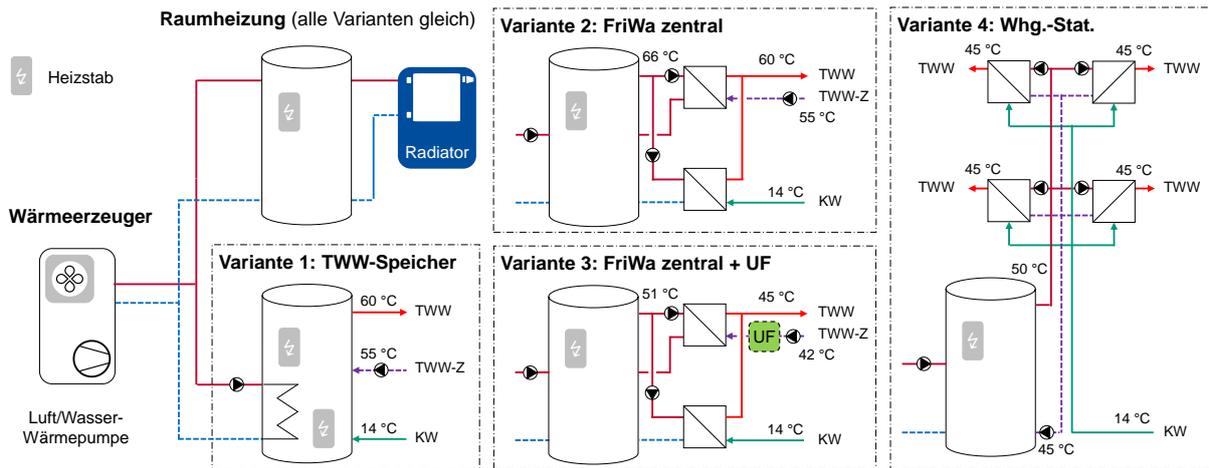


Abbildung 26: Vereinfachtes Hydraulikschema des WP-Systems: Raumheizung mit Plattenradiatoren und die untersuchten Systemvarianten: Variante 1: zentraler Speicherwassererwärmer mit internem Wärmeübertrager (TWW-Speicher). Variante 2: zentraler Durchfluss-Trinkwasser-Erwärmer (Frischwasserstation FriWa) mit Speicher. Variante 3: mit zusätzlicher Ultrafiltration (UF) im Bypass des Zirkulationsrücklaufs. Variante 4: dezentrale Durchfluss-Trinkwasser-Erwärmer (Wohnungs-Stationen Whg.-Stat.) mit zentralem Speicher.

Die Bewertung der Varianten erfolgt mit Jahressimulationen in Dymola/Modelica, um eine detaillierte thermohydraulische Simulation mit realistischen Regelungsmethoden zu ermöglichen. Es wird ein Luft-Wärmepumpensystem einschließlich Backup-Wärmeerzeuger, Pufferspeicher, Hydraulik, Steuerung und TW-Erwärmung modelliert. Für die Rechnungen wurde eine marktübliche Luft-Wärmepumpe verwendet, die eine maximale Vorlauftemperatur von 62 °C aufweist. Detaillierte Informationen zu den Simulationen sind in Kropp et al. (2020) dokumentiert.

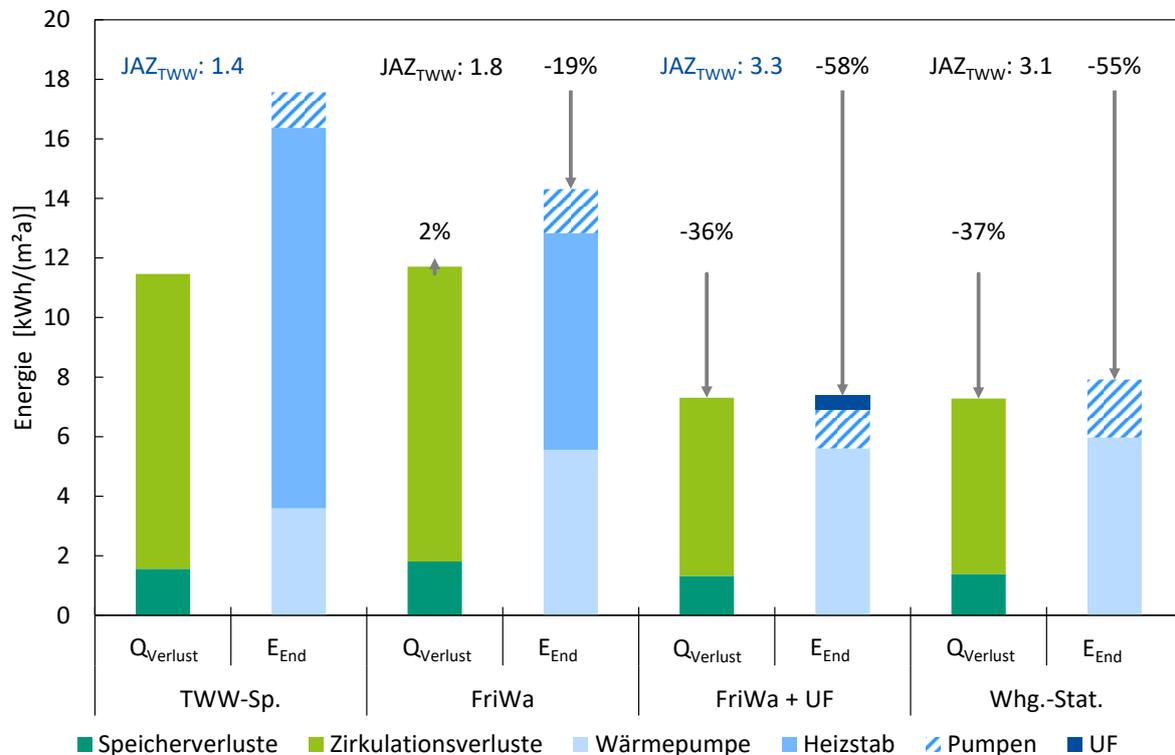


Abbildung 27: Verluste und Endenergieverbrauch der Trinkwasser-Erwärmungs-Varianten.

Die benötigte Wärmemenge für TW-Zapfung ist in allen Varianten gleich und liegt bei 11,5 kWh/(m²a). Durch unterschiedliche Systemtemperaturen variieren jedoch Speicher- und Zirkulationsverluste und damit die gesamte bereitgestellte Wärmemenge. Mit den beiden Niedertemperatur-Varianten können

die Wärmeverluste in Speicher und Zirkulation um ca. 35 Prozent reduziert werden. Dies entspricht in etwa einer Reduktion um 20 Prozent der gesamt bereitgestellten Wärmemenge zur TW-Erwärmung.

Durch die beiden unabhängigen Rückläufe der Frischwasserstation für unterschiedliche Temperaturen kann die Temperaturschichtung im Speicher besser ausgebildet werden. Somit muss der Backup-Wärmeerzeuger nur die obersten Schichten des Speichers erwärmen, sodass der Anteil der WP an der TW-Erwärmung zunimmt und die JAZ und damit die Performance des WP-Systems im Vergleich zum TWW-Speicher von 1,4 auf 1,8 steigt. Durch das Absenken der Temperatur in der Trinkwasserinstallation (Einsatz Ultrafiltration, Whg.-Stat.) kann die WP den gesamten Wärmebedarf zur TW-Erwärmung decken und die Effizienz des WP-Systems steigt auf bis zu 3,3.

Als zusätzliches Energieeffizienzkriterium wird der jeweilige Endenergiebedarf der Systemvarianten bestimmt. Zur Berechnung wird der Strombezug der Wärmepumpe, des Backup-Wärmeerzeugers, der Pumpen (Speicherladepumpe, Zirkulationspumpe und je nach Variante Pumpe(n) in zentraler Frischwasser- oder in den dezentralen Whg.-Stat.) und der Ultrafiltrations-Technologie berücksichtigt. Aufgrund des hohen Anteils des Heizstabes liegt der Endenergieverbrauch der Variante mit TWW-Speicher mit etwa 16 MWh/a am höchsten. Aufgrund der besseren Schichtung in der Variante Frischwasser liegt der Endenergieverbrauch etwa 19 % niedriger. Durch den Einsatz der Ultrafiltration bzw. Whg.-Stat. können bis zu 60 % des Endenergieverbrauchs zur TW-Erwärmung eingespart werden. Im Gesamtsystem (Raumheizung plus TW-Erwärmung) können durch die Temperaturabsenkung in der TW-Installation etwa 30 % des Endenergieverbrauchs eingespart werden.

Die hier gezeigten Jahressimulationen wurden für ein mittleres MFH durchgeführt, welches aufgrund der Dimensionierung und der energetischen Eigenschaften repräsentativ für einen signifikanten Anteil des Mehrfamilienhausbestandes in Deutschland ist. Dennoch sind die Ergebnisse stark von der implementierten Regelung des Gesamtsystems, der Auslegung der Komponenten sowie dem Anteil der TWE am Gesamtenergiebedarf abhängig.

Da der Einsatz der Ultrafiltration bisher noch nicht ausreichend erprobt ist, sind Vorgaben zum Schutz der Verbraucher notwendig. So muss z.B. der hygienisch einwandfreie Betrieb regelmäßig nachgewiesen und das zuständige Gesundheitsamt einbezogen werden. Nach einer erfolgreichen Erstuntersuchung kann mit der stufenweisen Temperaturabsenkung begonnen werden. Bei dem hier betrachteten Gebäude sind mindestens 6 Probenahmestellen vorzusehen. Zur Betriebsüberwachung sind über 60 Beprobungen in den ersten 12 Monaten notwendig (DVGW 2018).

Die Umstellung auf ein dezentrales TWE-System ist aufgrund des erhöhten Aufwandes (Bauarbeiten in allen Wohneinheiten) und höheren Investitionskosten herausfordernd. Müssen allerdings im Sanierungsfall die Verteilleitungen sowieso erneuert werden, ergibt sich durch diese Umstellung eine energieeffiziente Variante zur TWE. Aufgrund der kleineren Systemvolumen sind diese sog. Kleinanlagen potenziell weniger anfällig für Legionellen-Kontaminationen. Die hygienische Unbedenklichkeit kann jedoch nicht für alle dezentralen Systeme belegt werden, da der Nachweis fehlt.

Bei allen Systemen müssen für einen energieeffizienten und hygienischen Betrieb die allgemein anerkannten Regeln der Technik bei Planung, Bau und Betrieb eingehalten werden. So ist auf einen regelmäßigen und hinreichenden Wasseraustausch sowie auf Einhaltung der Temperaturen, sowohl auf Warm- als auch auf Kaltwasserseite, zu achten.

4.5 Wärmequellen und Verfügbarkeit

Um Wärmepumpen im dichtbesiedelten Kontext von Mehrfamiliengebäuden einsetzen zu können, ist die Verfügbarkeit von Wärmequellen entscheidend. Abbildung 28 zeigt einen Überblick über die Verfügbarkeit und Effizienz unterschiedlicher Wärmequell-Arten (Luft, Erdsonden, Erdkollektor, Grundwasser, Solarthermie, kalte Nahwärmenetze, Abwärme). Allgemein kann festgehalten werden, dass mit zunehmender lokaler Verfügbarkeit die Effizienz des Wärmepumpensystems abnimmt. Luft als Umweltwärmequelle ist allgemein verfügbar und am einfachsten zu erschließen, hat aber auch im Jahresmittel die niedrigsten Temperaturen, das Wärmepumpensystem damit den höchsten Temperaturhub und eine geringere Effizienz.

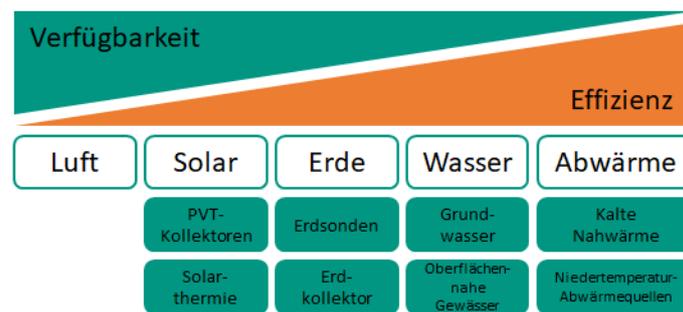


Abbildung 28: Vergleich von lokaler Verfügbarkeit und Effizienz unterschiedlicher Quellenarten.

Hess et al. (2019) diskutieren in diesem Kontext die Quellen-Verfügbarkeit im deutschen MFH-Bestand im urbanen Raum, abhängig vom energetischen Stadtraumtyp, vom Gebäudetyp, von der Art des Untergrunds und der Art des WP-Systems (mono-energetisch oder bivalent). Dabei werden technische und regulatorische Aspekte beleuchtet.

Die qualitative Quellen-Verfügbarkeit im deutschen MFH-Bestand stellt sich wie folgt dar:

- Typische Reihenhaussiedlungen bieten i.d.R. ausreichend Platz, um mono-energetische oder bivalente Luft- und Erdsonden-WP-Systeme zu installieren. Nur bei diesem Stadtraum-Typ sind zumindest für bivalente Systeme oft sogar flache Erdkollektoren möglich.
- In Blockrand-Bebauungen sind Luft-WP in der Regel möglich, Erdsonden oft, aber stark abhängig von Grundstücksgröße, Bivalenz-Auslegungspunkt (als Maß der WP-Dimensionierung) und Bodenart.
- Grundstücke im Innenstadtbereich sind ohne zusätzliche Maßnahmen meist zu klein für die Quellen Luft und Erdwärme. Durch Maßnahmen wie z.B. Schallschutzhauben oder Einbau in den Dachstuhl können jedoch auch hier i.d.R. zumindest Luft-WP eingesetzt werden.
- Für WP-Systeme im Innenstadtbereich sollten als Quelle photovoltaisch-thermische Kombi-Kollektoren (PVT-Kollektoren), Mehrquellen-Systeme oder kalte Fernwärmenetze in Betracht gezogen werden.

Hinsichtlich der Art des WP-Systems zeigt sich, dass in Reihenhaussiedlungen die Bivalenzpunkte von hybriden Wärmepumpensystemen (-5 °C oder +2 °C) und der Sanierungsstandard (EnEV 2016 oder anspruchsvollere Sanierung) für die Beurteilung der Auskömmlichkeit der Freifläche als Quelle einer WP weitgehend irrelevant sind. Diese Faktoren sind jedoch bei geringer Flächenverfügbarkeit bei Blockrand-Bebauung oder bei Hochhäusern in City-Bebauung durchaus relevant.

Als Ausgangsbasis zur Abschätzung des Potentials von WP für MFH wurde im ersten Schritt der häufigste MFH-Typ in Deutschland (MFH Typ E nach Loga et al. (2015a, S. 110) und Ebert (2019, S. 58) mit einem Heizwärmebedarf von 74 kWh/(m²a) und Trinkwarmwasserbedarf von 16,5 kWh/(m²a)) einem für diese Gebäudeklasse typischen Grundstück (Energetischer Stadtraumtyp (EST) 3 nach Hegger et al. (S. 461) mit entsprechender Quellenleistung gegenübergestellt. Ein exemplarischer Ausschnitt des EST 3 ist in Abbildung 29 zu sehen. Für die Berechnung wurden im nächsten Schritt Kenndaten von am Markt erhältlichen WP herangezogen und verschiedene Auslegungsrichtlinien bzgl. der Quellendimensionierung für Außenluft (A), Erdreich (B) und Grundwasser (W) verglichen. Die notwendigen Wärme-Entzugsflächen wurden unter anderem nach VDI (VDI 4640 Blatt 2:2001), GEO-Handlight (Koenigsdorff 2011) und einem Leitfaden des Landes Baden-Württemberg (Umweltministerium Baden-Württemberg 2009) mit Hilfe realistischer Annahmen, z.B. zur Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches berechnet.

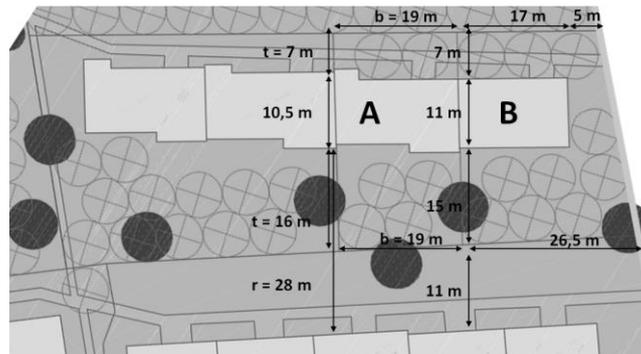


Abbildung 29: Grundstück mit typischem MFH des EST 3. Graue Kreise: Verfügbare Fläche für Erdsonden; Schwarze Kreise: Bäume (Hegger et al., S. 425).

Aus dem Vergleich zwischen benötigten Quellenleistungen und tatsächlich vorhandenen Grundstücksabmessungen lassen sich exemplarisch die in Tabelle 11 gezeigten Ergebnisse festhalten. Nur die Außenluft-WP und die nach VDI 4640 ausgelegte Erdsonden-WP liefern uneingeschränkt die notwendige Leistung für eine monovalente Wärmeversorgung.

Bei der A/W-WP muss dabei der Schallschutz nach der TA-Lärm (TA Lärm) erfüllt werden, was stark von der WP-Gebäudeorientierung abhängig ist. Bei den weiteren Verfahren (Erdsonden nach GEO-Hand, Erdkollektor nach VDI 4640 und Grundwasser nach UMBaWÜ) ist die verfügbare Freifläche nur bei der Auslegung nach GEO-Hand für den Fall B ausreichend. Die vorgeschriebenen Grundstücksabstandsgrenzen von 5-10 m verhindern dabei die volle Flächenausnutzung. Für horizontale Erdwärmekollektoren ist das Freiflächenangebot ungenügend. Im Fall der Grundwasser-WP spielen benachbarte schon vorhandene oder geplante Grundwasser-WP, Fließrichtung des Wassers und seine Eigenschaften eine große Rolle, was allgemeingültige Aussagen nicht möglich macht.

Dieses Beispiel zeigt, dass die vollständige Wärmeversorgung (Raumwärme und Trinkwarmwasser) eines auf EnEV 2014 sanierten MFH mit WP durch Erschließung einer einzigen Quellenart in einigen Fällen als technisch schwierig darstellt.

Tabelle 11: Verfügbarkeit verschiedener Quellen für WP-Systeme in MFH bzgl. EST 3 (Annahme: $\lambda = 2,1$ W/(mK)).

WP-Typ	A/W-WP Außenluft	B/W-WP Erdsonde	B/W-WP Erdsonde	B/W-WP Erdkollektor	W/W-WP Grundwasser
Verfahren	TA-Lärm	VDI 4640	GEO-Hand	VDI 4640	UMBaWü 2009
Fläche verfügbar	A $r = 28$ m	6 Sonden à 100 m	6 Sonden à 160 m	430 m ²	-
Fläche ausreichend?	A ✓	✓	✗	✗	✓/✗
Fläche verfügbar	B $r = 26$ m	10 Sonden à 100 m	9 Sonden à 160 m	590 m ²	-
Fläche ausreichend?	B ✓	✓	✓	✗	✓/✗

Weitere Ergebnisse zur Quellen-Verfügbarkeit in häufigen Stadtraum-Typen finden sich in Vollmer et al. 2018 und Hess et al. 2019.

4.6 PVT-Wärmepumpensysteme

Zur Solarisierung der Gebäudehülle, also der Nutzung von Solarenergie auf Dach und Fassade in WP-Anlagen, gibt es prinzipiell folgende technische Optionen:

- 1) PV-Wärmepumpensystem, bei der PV-Module teilweise den Strombedarf für die WP-Anlage decken.
- 2) Solarthermisches Wärmepumpensystem, bei der thermische Solarkollektoren Wärme direkt in den Speicher oder zur Quellenhebung liefern.
- 3) PVT-Wärmepumpensysteme, bei der photovoltaisch-thermische Kombikollektoren sowohl Strom als auch Wärme produzieren.

In LowEx-Bestand lag der Fokus auf der Betrachtung von PVT-Wärmepumpensystemen mit PVT-Kollektoren als alleinige Quelle für die Wärmepumpenanlage (Abbildung 30). Diese wurden mit herkömmlichen PV-Wärmepumpensystemen (Luft und Erdreich) hinsichtlich Jahresarbeitszahl und Autarkiegrad verglichen.

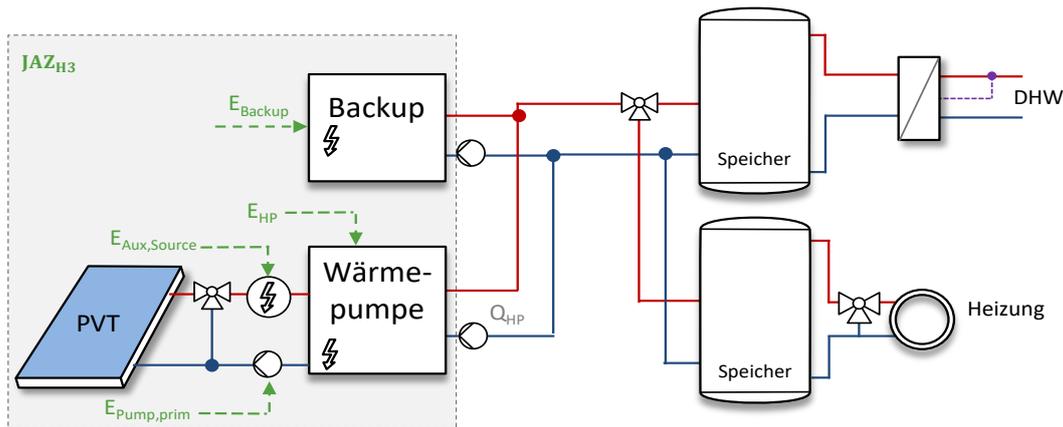


Abbildung 30: Hydraulisches Layout eines PVT-Wärmepumpensystems mit PVT-Kollektoren als alleiniger Wärmequelle.

Für die simulative Bewertung wurde das Wärmepumpensystemmodell in Dymola/Modelica um die Funktionalität einer PVT-Wärmequelle erweitert. Die thermische Leistung der PVT-Wärmequelle wird über die quasi-dynamische Kollektorgleichung nach ISO 9806 berechnet, in die neben den solaren Gewinnen auch konvektive Gewinne durch Betrieb bei Fluidtemperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur mit eingehen. Teile der Modellentwicklung für den PVT-Kollektor erfolgten im Verbundprojekt "PVTSolutions".¹

Als Case-Study diente das Demoprojekt Smartes-Quartier Karlsruhe Durlach. Hier wurde eine solche Anlage mit einer Fläche von 204 m² PVT-Kollektoren "SOLINK" der Fa. Consolar in Kombination mit einer Hochtemperatur-Wärmepumpe geplant, ausgelegt und umgesetzt. Dies ist das größte bekannte PVT-Wärmepumpensystem in einem Bestands-Mehrfamiliengebäude. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung liegen noch keine Monitoringergebnisse vor, sodass für Messergebnisse auf einen späteren Zeitpunkt verwiesen wird.

Aus dynamischen, zeitlich hochaufgelösten Simulationen wurde die Energiebilanz abgeleitet, die wiederum Grundlagen für die Berechnung der System-Jahresarbeitszahl bildet:

$$JAZ_{H3} = \frac{Q_{HP}}{E_{HP} + E_{Aux,Source} + E_{Pump,prim} + E_{Backup}}$$

Entsprechend beinhaltet die JAZ_{H3} neben dem Strombedarf für Wärmepumpe (Kompressor und Regelung E_{HP} , Pumpen $E_{Pump,prim}$) auch den Strombedarf für den elektrischen Heizstab als Sekundärwärmeerzeuger (E_{Backup}) und für den quellseitigen Heizstab, der gewährleistet, dass die Mindestverdampfeintrittstemperatur von -10°C nicht unterschritten wird ($E_{Aux,Source}$).

¹ Förderkennzeichen 03ETW011A

Abbildung 31 zeigt exemplarisch die Jahresenergiebilanz eines monoenergetischen PVT-Wärmepumpensystems mit einer Auslegung von $4 \text{ m}^2/\text{kW}_{\text{th}}$, d.h. einer Kollektorfläche von 4 m^2 je Kilowattstunde Nennleistung der Wärmepumpe. Diese Anlage erzielt eine $\text{JAZ}_{\text{H3}} = 3.25$.

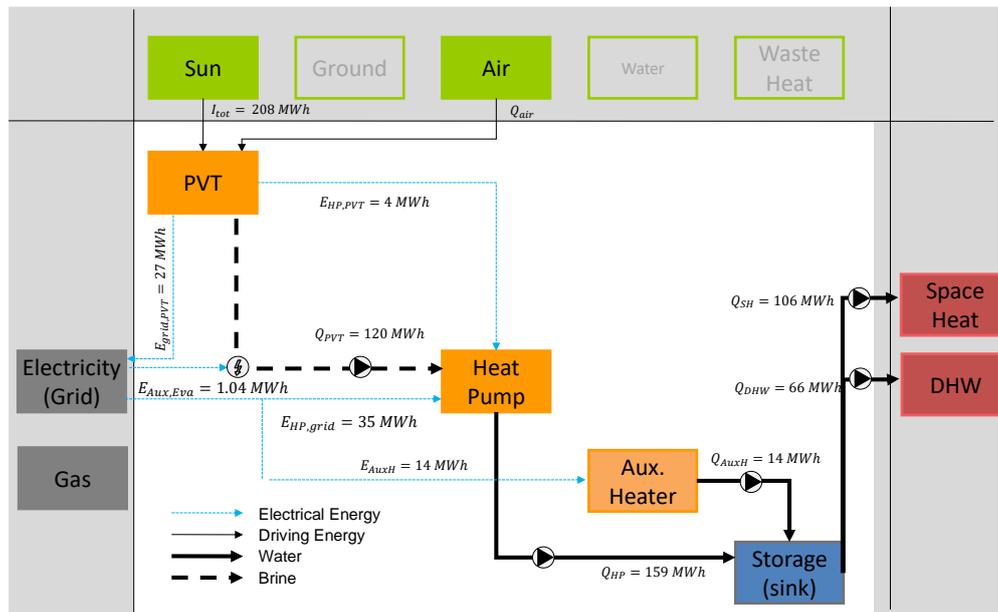


Abbildung 31: Energiebilanz eines PVT-Wärmepumpensystems als Square View-Darstellung.

Abbildung 32 untersucht die Abhängigkeit der System-Jahresarbeitszahl JAZ_{H3} von den beiden zentralen Einflussgrößen:

- Kollektorbauart: gedämmt, ungedämmt oder mit rückseitigen Wärmetauscherflächen
- Kollektorfläche: je größer die Kollektorfläche, desto größer die Quelleistung und desto besser die Systemperformance. Die Kollektorfläche wird relativ zur thermischen Nennleistung der Wärmepumpe in $\text{m}^2/\text{kW}_{\text{th,Nenn}}$ angegeben.

Als Referenz sind jeweils eine Luft-Wärmepumpe und eine Sole-Wärmepumpe dargestellt.

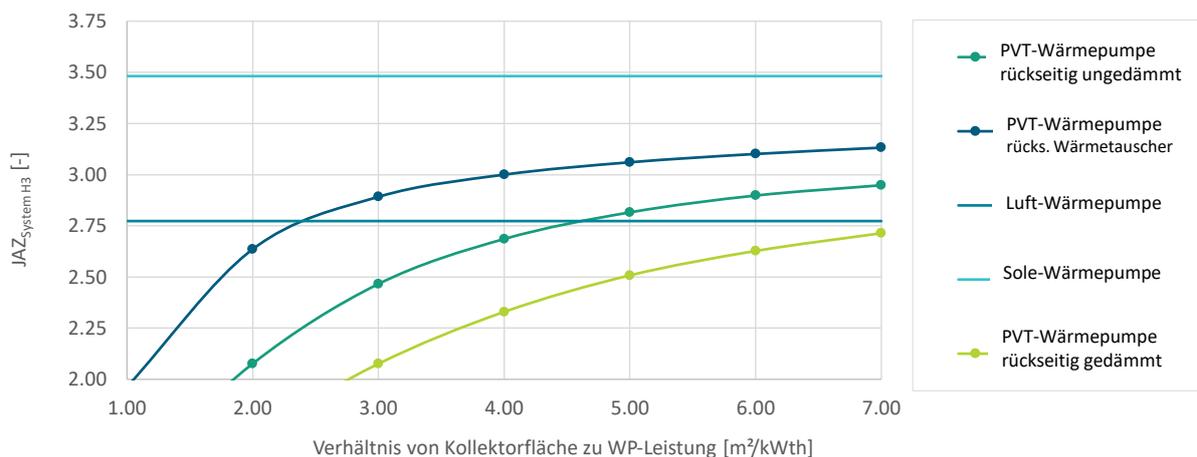


Abbildung 32: Jahresarbeitszahl $\text{JAZ}_{\text{System}}$ für PVT-Wärmepumpensysteme im Vergleich zu konventionellen Wärmepumpensystemen mit Luft- und Sole als Wärmequelle.

Aus dem Kurvenverlauf lassen sich folgende Kernaussagen festhalten:

- Im Gegensatz zu konventionellen Solarkollektoren arbeiten PVT-Kollektoren in WP-Anlagen regelmäßig bei Temperaturen unterhalb der Umgebung. Im Nachtbetrieb oder im Winter bei geringen Einstrahlungsmengen kommt den konvektiven Wärmegewinnen eine besondere Bedeutung zu. Die solaren Gewinne spielen in der Integration als alleinige Wärmequelle eine

sekundäre Rolle. Daher fallen die Wärmeerträge und die JAZ_{H_3} umso höher aus, je besser die thermische Anbindung des Fluids an die Umgebung ist, z.B. durch einen optimierten Wärmetauscher

- Bei adäquater Auslegung des PVT-Kollektorfelds wird eine Jahresarbeitszahl in der Größenordnung zwischen Luft- und Solewärmepumpen erzielt. Diese monoenergetischen Referenzsysteme erzielen im untersuchten Mehrfamiliengebäude eine $JAZ_{System} = 3.5$ (Solewärmepumpe) und $JAZ_{System} = 2.8$ (Luftwärmepumpe). Die relativ niedrigen Jahresarbeitszahlen sind auf hohe Heizkreistemperaturen von $55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ und auf den monoenergetischen Betrieb zurückzuführen.
- Ein guter Kompromiss zwischen hoher Leistung und geringen Investitionskosten kann bei einer spezifischen PVT-Kollektorfläche von ca. $3 - 5 \text{ m}^2/\text{kW}_{th}$ erzielt werden.

Ein weiterführender Untersuchungsgegenstand betrifft die Solarisierung der Gebäudehülle: bei Gebäuden mit einem ungünstigen Verhältnis von Heizleistung und Gebäudefläche reicht unter Umständen die verfügbare Dachfläche nicht aus, um ausreichend Quellwärme oder Solarstrom für die Wärmepumpe zu liefern. In diesen Fällen kann eine Aktivierung der Fassade zielführend sein.

Abbildung 33 untersucht den Einfluss der Ausrichtung und des Neigungswinkels auf den Energieertrag eines PV-Moduls und eines PVT-Kollektors. Zunächst kann festgestellt werden, dass in der betrachteten Auslegung der PVT-Kollektor – bei gleicher installierter Nennleistung – einen um ca. 3% höheren elektrischen Ertrag als das PV-Modul erzielt. Dies ist auf den Kühleffekt der PV-Zellen zurückzuführen. Des Weiteren ist auffällig, dass die thermischen Erträge nur minimal von Ausrichtung und dem Neigungswinkel abhängen. Die Unterschiede in der Solareinstrahlung haben entsprechend nur einen marginalen Effekt auf die nutzbaren Wärmeerträge. Diese modellbasierte, vereinfachte Betrachtung berücksichtigt nicht alle physikalischen Effekte, wie z.B. Unterschiede der Windgeschwindigkeiten oder die Abhängigkeit der Naturkonvektion vom Neigungswinkel. Dennoch zeigt die Auswertung deutlich, dass auf allen Flächen Wärmeerträge in der Größenordnung 570 kWh/m^2 erzielt werden.

Damit reichen bei allen betrachteten Mehrfamiliengebäude (Klein, Mittel, Groß) die Dachflächen bei weitem aus, um die benötigte Quellwärme zur Verfügung zu stellen. Im konkreten Fall für den Typ großes Mehrfamiliengebäude (Ersinger Str. 2) im Smarten-Quartier Karlsruhe-Durlach wurden 204 m^2 PVT-Kollektoren installiert, während die Bruttodachfläche von 660 m^2 in etwa die dreifache Fläche zugelassen hätte.

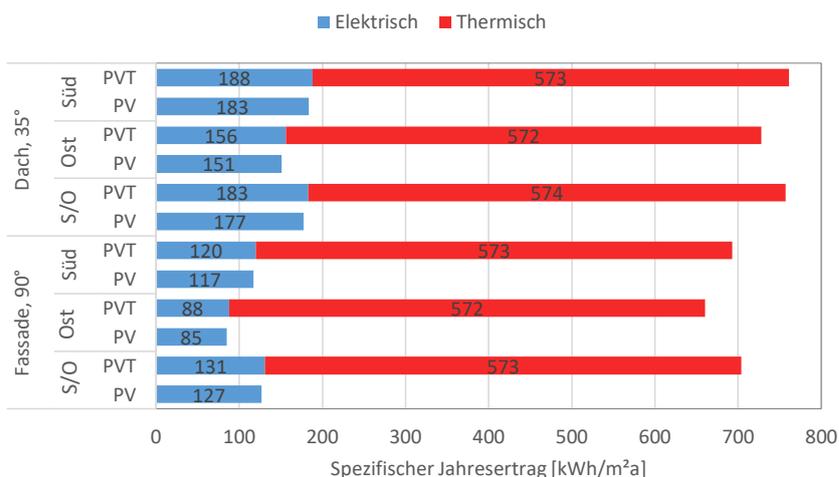


Abbildung 33: Variation des Azimuth-Winkels (Süd, Süd/Ost, Ost) und des Neigungswinkels (Dach und Fassade).

Abschließend wurde für das große Mehrfamilienhaus GMH die Eigenverbrauchsrate und der Autarkiegrad in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung ausgewertet. Auf Grund der geringen Unterschiede der elektrischen Erträge hängen diese nur geringfügig davon ab, ob PVT-Kollektoren oder PV-Module eingesetzt werden. Vielmehr wurden die KPIs für zwei Bilanzgrenzen der Stromverbraucher

ausgewertet: Wärmepumpe ("WP") und Wärmepumpe + Haushaltsstrom ("WP+HH"). Bei einer installierten Leistung der PV-Anlage, die der thermischen Leistung der Wärmepumpe entspricht (PPV = QWP) erzielt die Anlage einen Autarkiegrad von 25%, d.h. dass ein Viertel des Strombedarfs von der PV-Anlage gedeckt wird. Die Eigenverbrauchsrate von 7% bedeutet, dass 93% des erzeugten PV-Stroms ins Netz rückgespeist werden und nur ein Bruchteil selbst in der Wärmepumpe genutzt wird. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Haushaltsstroms steigt die Eigenverbrauchsrate auf 29%, während der Autarkiegrad auf 14% sinkt.

Der Einsatz eines elektrischen Batteriespeichers oder eine eigenverbrauchsoptimierte bzw. leistungsgeregelte Steuerung der Wärmepumpe kann die Eigenverbrauchsrate und den Autarkiegrad weiter verbessern. Diese wurden im Rahmen dieser Analyse nicht weiter analysiert.

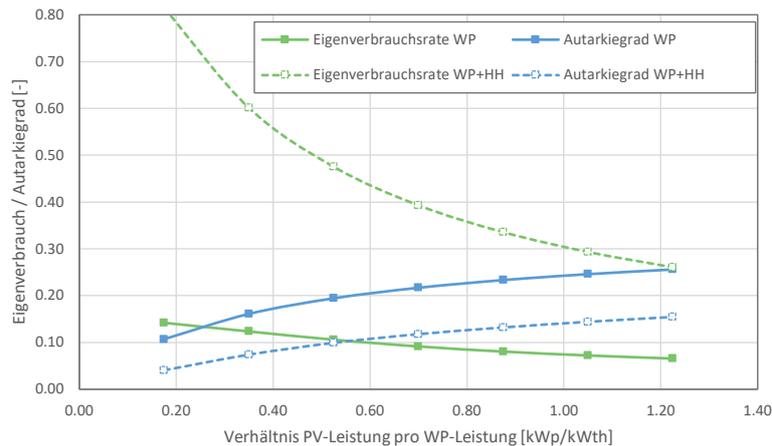


Abbildung 34: Eigenverbrauchsrate und Autarkiegrad einer PVT-Wärmepumpenanlage für die Bilanzgrenzen Wärmepumpe ("WP") und Wärmepumpe plus Haushaltsstrom ("WP+HH").

Weiterführende Ergebnisse können Alibaş (2019) und Lämmle (2022) entnommen werden.

4.7 Charakteristik des Betriebs bivalenter Wärmepumpensysteme

4.7.1 Untersuchungsgegenstand und Methodik

Traditionelle Heizsysteme, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, sind in Deutschland weit verbreitet. Einen Großteil der Heizungsanlagen im Land machen Gaskessel aus, welche zu den direkten Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors beitragen. Wärmepumpen gelten als zielführender Ansatz, um den Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung zu erhöhen, somit die Kohlendioxidemissionen zu verringern und langfristig die Energiekosten zu senken. In bivalenten oder hybriden Heizsystemen werden Gaskessel und Wärmepumpen kombiniert zur Wärmeerzeugung eingesetzt – entweder in paralleler (beide Wärmeerzeuger arbeiten gleichzeitig) oder alternativer Betriebsweise (nur ein Wärmeerzeuger ist aktiv). Im Folgenden wird für diese Art von Systemen der Begriff bivalentes System verwendet. Vorteile der Kombination von zwei Wärmeerzeugern sind eine höhere Flexibilität bei der Wärmepumpen-Dimensionierung, die Einsatzfähigkeit bei begrenzter Quellenverfügbarkeit sowie eine Spitzenlastabdeckung auch bei kleiner dimensionierter Wärmepumpe. Der Einsatz bivalenter Systeme ist insbesondere im Falle einer zeitlichen Entkopplung des Austausches des Heizsystems und der später erfolgenden Hüllsanierung interessant. Hier kann ggf. ein bestehendes Gasgerät weitergenutzt werden, wobei die Deckung der Grundlast bereits durch die Wärmepumpe übernommen wird. Dies ermöglicht eine sofortige Realisierung von Erdgas- und CO₂-Einsparungen. Nach der Hüllsanierung kann auf einen singulären Einsatz des Wärmepumpensystems umgestellt und der Energieträgerwechsel auf Strom vollständig vollzogen werden. Bei diesem Vorgehen ist es sinnvoll, die zukünftige Hüllsanierung bereits bei der Dimensionierung der Wärmepumpe im bivalenten System mitzudenken.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Analysen ist es, das CO₂-Einsparpotential sowie die Energiebezugskosten bivalenter Systeme in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden in Hinsicht auf den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen und Betriebsstrategien zu untersuchen. Zum Vergleich wird eine Anlage mit einem Gasbrennwertgerät (bis Ende 2021 noch ein relevantes Referenzsystem) sowie ein monoenergetisches Wärmepumpensystem (Wärmepumpe + Heizstab) herangezogen. Dabei werden die folgenden Rahmenbedingungen und Systemfreiheitsgrade untersucht.

Der Betrieb des bivalenten Wärmepumpensystems wird zum einen bei Einsatzoptimierung der Wärmeerzeuger Gasbrennwertgerät und Wärmepumpe untersucht. In der Betriebsstrategie wird hier zwischen einer Minimierung von Emissionen und einer Minimierung der Energiebezugskosten unterschieden. Dazu sind Prognosen für die Emissionsintensität und die Bezugspreise von Strom und Erdgas hinterlegt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Erarbeitung der Preis- und Kostenszenarien in der Projektlaufzeit erfolgte und damit den Preisanstieg im Jahr 2022 nicht berücksichtigt. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse verwendet das Verhältnis der Energiebezugskosten der Energieträger Strom und Erdgas (Aufwandsverhältnis, im Folgenden $r_{fuel, cost}$ – Fuel Ratio genannt) und lässt sich somit auf die sich ändernden Rahmenbedingungen übertragen. Ein anderer Analyseaspekt der Studie betrachtet die Dimensionierung der Wärmepumpe im bivalenten System. Der Zielkonflikt in der Dimensionierung liegt im Erreichen hoher Anteile an erneuerbaren Energien und den höheren Investitionen in Wärmepumpen größerer Leistungsklasse. Hier wird insbesondere untersucht, mit welcher Auslegung der Wärmepumpe große Deckungsanteile erreicht werden können.

Die Berechnungen für die Analysen wurden mit dem für das Projekt entwickelten Rechentool *HEBAP* (vgl. Abschnitt 3.2) durchgeführt.

4.7.2 Systemkonzepte und Betriebsweisen

Systeme

Abbildung 35 und Abbildung 36 stellen die monoenergetischen und bivalenten Heizsysteme gemäß der Modellierung in *HEBAP* schematisch dar. Die Heizungsanlage besteht aus einem oder mehreren Wärmeerzeugern, Pufferspeichern und einer Frischwasserstation (FWS).

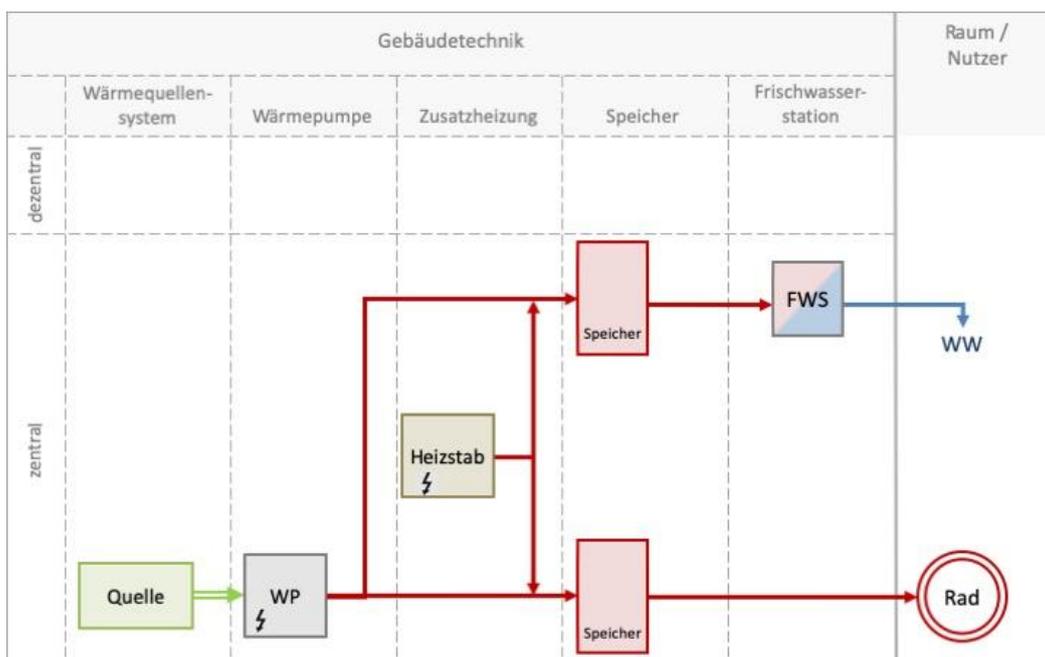


Abbildung 35: Monoenergetisches Wärmepumpensystem in schematischer Darstellung.

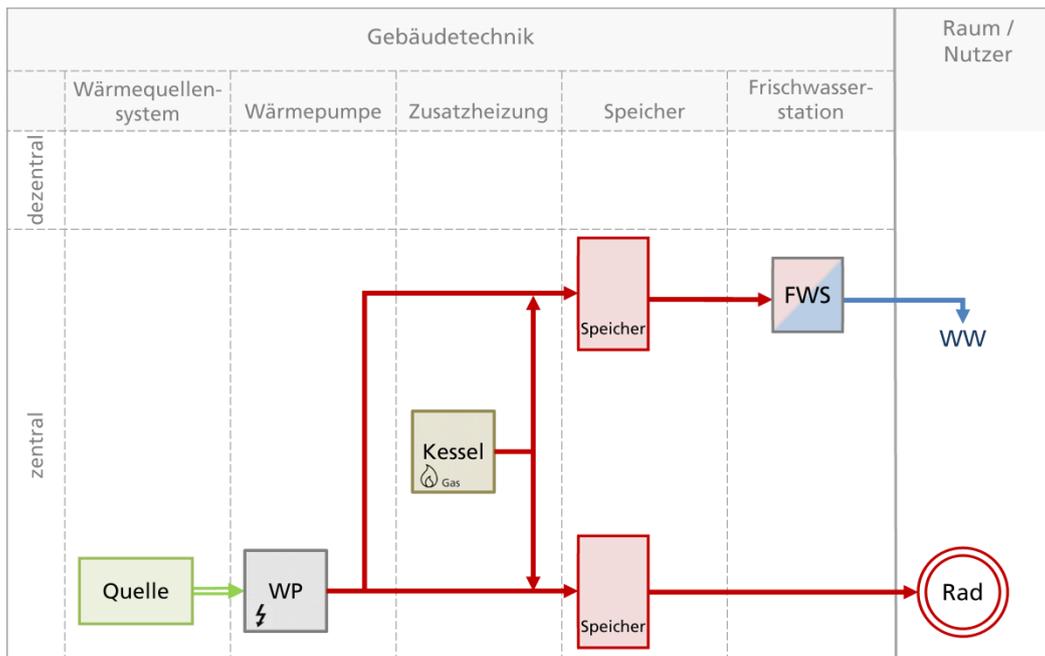


Abbildung 36: Bivalentes Wärmepumpensystem in schematischer Darstellung.

Das monoenergetische System besteht aus zwei in Reihe geschalteten Wärmeerzeugern, einer Wärmepumpe als Haupt-Wärmeerzeuger und einem elektrischen Heizstab als Zusatz erzeuger. Das bivalente System wird analog modelliert, wobei der Gasbrennwertkessel als Zusatz erzeuger eingesetzt wird (kein Heizstab). Je nach Wärmepumpentyp kann als Wärmequelle die Außenluft oder das Erdreich genutzt werden. Die wichtigsten implementierten Betriebsmodi sind:

- **Monoenergetischer Betrieb:**
Der Wärmebedarf wird von der Wärmepumpe und dem elektrischen Heizstab gedeckt.
- **Bivalenter Teil-Parallelbetrieb; hier verkürzt Parallelbetrieb genannt (BPS):**
Der Wärmebedarf wird von der Wärmepumpe und zusätzlich dem zweiten Wärmeerzeuger gedeckt. Der Zusatz erzeuger deckt unterhalb des Auslegungspunktes die nicht durch die Wärmepumpe bereitgestellten Anteile des Wärmebedarfs. Zudem kommt der Zusatzwärmerezeuger zum Einsatz, wenn die erforderliche Betriebstemperatur den Einsatzbereich der Wärmepumpe übersteigt.
- **Bivalenter Alternativbetrieb (BAS):**
Der Wärmebedarf wird nach einem Schaltkriterium von der Wärmepumpe oder dem Zusatz erzeuger abgedeckt. Im alternativen bivalenten Betrieb wird das System anhand der folgenden Optimierungskriterien gesteuert:
 - Emissionskriterium: Minimierung der CO₂-Emissionen des Systems
 - Kostenkriterium: Minimierung der Energiebezugskosten des Systems.

Auch hier übernimmt der Zusatzwärmerezeuger die Deckung des Wärmebedarfes bei Betriebstemperaturen, welche von der Wärmepumpe nicht bereitgestellt werden können.

Die Trinkwassererwärmung erfolgt über eine Frischwasserstation.

Betriebsweisen

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die untersuchten Betriebsweisen gegeben.

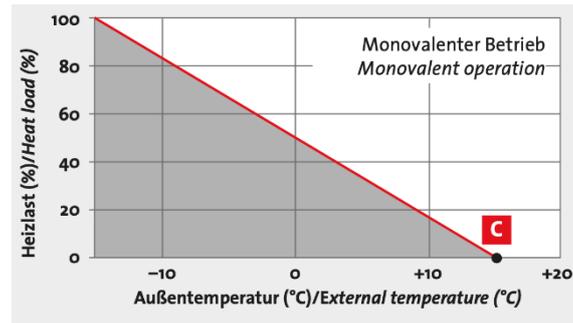


Abbildung 37: Beschreibung des monovalenten Betriebs bei der Wärmeerzeugung. Der Wärmebedarf des Gebäudes ist als rote Linie dargestellt, die von der Heizgrenztemperatur (Punkt C) bis zur höchsten Heizlast bei Nennaußentemperatur reicht. Der grau schattierte Bereich stellt den Wärmepumpenbetrieb dar (BDH 2019).

Bei monovalenten Heizsystemen werden Wärmepumpen als alleinige Wärmeerzeuger eingesetzt. Die Wärmepumpe muss so dimensioniert sein, dass die Heizlast des Gebäudes bei höchstem Bedarf gedeckt werden kann und eine maximale Betriebstemperatur haben, die höher ist als die erforderlichen Systemtemperaturen (VDI 4645, 2018). Abbildung 37 veranschaulicht den Wärmepumpenbetrieb in einer monovalenten Konfiguration. Die Wärmepumpe muss den gesamten Wärmebedarf bei allen Außentemperaturen decken.

Monoenergetische Heizungsanlagen verfügen neben der Wärmepumpe über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger, der mit der gleichen Endenergie, also mit Strom, betrieben wird. Sobald die Last (für Heizung und Trinkwarmwasser) die Leistung der Wärmepumpe übersteigt, schaltet sich der zweite Wärmeerzeuger zu und arbeitet parallel zur Wärmepumpe (VDI 4645, 2018).

Das Heizsystem in Gebäuden hängt von einigen charakteristischen Punkten ab, die den Betrieb der Anlage beeinflussen:

- Heizgrenztemperatur:
Die maximale Außenlufttemperatur, bei der die Anlage betrieben wird. Bei Überschreitung der Heizgrenztemperatur schaltet die Anlage den Heizbetrieb ab.
- Bivalenztemperatur:
Die Außentemperatur, bei der die von der Wärmepumpe gelieferte Wärmeleistung gleich der Heizlast des Gebäudes ist.
- Abschalttempunkt:
Die Außentemperatur, unterhalb derer die Wärmepumpe nicht arbeitet.

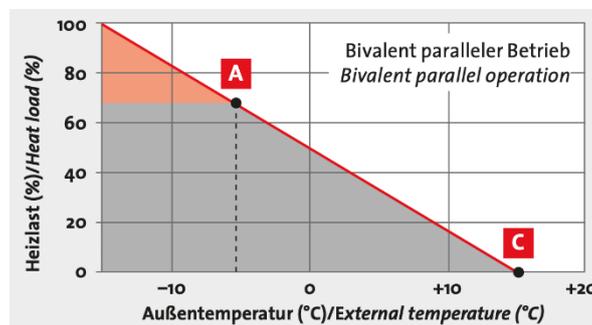


Abbildung 38: Beschreibung des bivalent parallelen Betriebs bei der Wärmeerzeugung. Die rote Linie stellt die Heizlast des Gebäudes dar. Die grau und orange schattierten Bereiche stellen den Betrieb der Wärmepumpe bzw. des zweiten Wärmeerzeugers dar. Die Punkte A und C kennzeichnen die Bivalenz- bzw. Heizgrenztemperaturen (BDH 2019).

Im bivalenten Betrieb arbeitet die Wärmepumpe mit einem zusätzlichen Wärmeerzeuger, der mit einer anderen Endenergie, z. B. Erdgas oder Heizöl, betrieben wird. Die Wärmepumpe deckt den Wärmebedarf bei Außentemperaturen, die unter dem Heizgrenzwert liegen. Wenn die Außentemperatur

unter den Bivalenzpunkt sinkt, schaltet sich der zweite Wärmeerzeuger ein. Das System arbeitet in einer der folgenden Konfigurationen (VDI 4645, 2018):

- **Bivalent alternativer Betrieb:**
Bei Außentemperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes schaltet die Wärmepumpe ab und der zweite Wärmeerzeuger stellt den gesamten Wärmebedarf bereit.
- **Bivalent paralleler Betrieb:**
Bei Außentemperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes arbeitet der zweite Wärmeerzeuger neben der Wärmepumpe. Der Anteil der Wärmepumpe an der Wärmeerzeugung ist höher als im alternativen Betrieb.
- **Bivalent teilparalleler Betrieb:**
Bei Außentemperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes, aber oberhalb einer Mindestbetriebstemperatur arbeiten die Wärmeerzeuger im Parallelbetrieb. Wird die Mindestbetriebstemperatur unterschritten, deckt der zweite Wärmeerzeuger die volle Heizlast und die Wärmepumpe schaltet ab.

Der Unterschied zwischen alternativem und teilparallelem Betrieb von bivalenten Systemen ist in Abbildung 39 verdeutlicht. Die Umschaltung zwischen den beiden Wärmeerzeugern wird im teilparallelen Betrieb durch den Bivalenzpunkt und die Abschalttemperatur festgelegt, während sie im alternativen Betrieb nur vom Bivalenzpunkt abhängt.

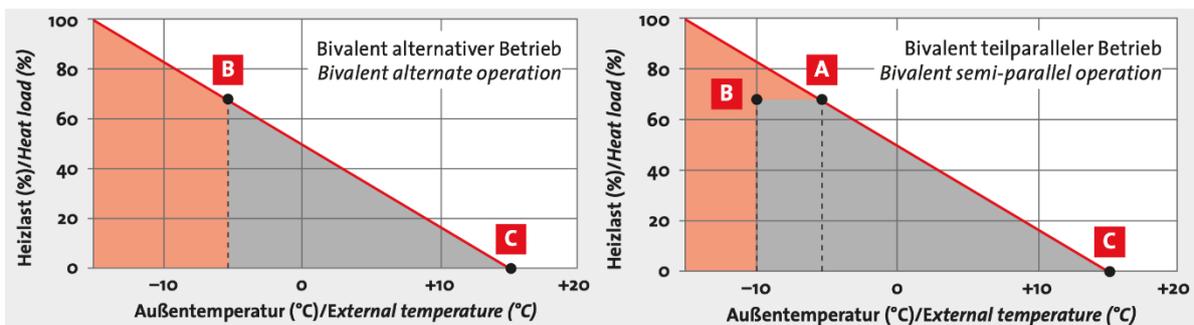


Abbildung 39: Der Unterschied zwischen dem alternativen (links) und dem teilparallelen (rechts) Betrieb der Heizsysteme. Im bivalent alternativen Betrieb übernimmt der zweite Wärmeerzeuger (orange) bei Temperaturen unterhalb der bivalenten Temperatur (Punkt B). Beim teilparallelen Betrieb hingegen arbeitet die Wärmepumpe (grau) unterhalb des Bivalenzpunktes (Punkt A) neben dem zweiten Wärmeerzeuger weiter, bis sie ihre Abschalttemperatur (Punkt B) erreicht (BDH 2019).

4.7.3 Auswahl der Wärmepumpe für die Systemsimulation

Um Wärmepumpen mit einer repräsentativen Effizienz abzubilden, wurden am Fraunhofer ISE vorliegende Daten zu geförderten Wärmepumpen ausgewertet und mit dem Mittelwert der förderfähigen Wärmepumpen laut BAFA-Liste (Stand 2020) verglichen (Zech et al. 2020).

Abbildung 40 stellt diese Auswertung der Leistungszahl (COP) von BAFA-geförderten leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen für den Norm-Betriebspunkt A2/W35 im Förderjahr 2020 dar. Hier zeigt sich, dass bei Luft/Wasser-Wärmepumpen der Median des COP-Wertes der geförderten Anlagen im Neubau höher ist als bei den Anlagen, die im Gebäudebestand gefördert wurden. Hintergrund sind die Unterschiede in den Förderkriterien. Im für die analysierten Anlagen maßgeblichen Förderprogramm „Heizen mit Erneuerbaren Energien“ wurde im Neubau eine Mindest-Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,5 (berechnet nach VDI 4650-1) als Förderkriterium vorgegeben, während in Bestandsgebäuden eine JAZ von 3,5 für die Förderung gefordert wurde.

Im Vergleich zu den laut „BAFA-Liste“ förderfähigen leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen, liegt der Median der tatsächlich geförderten Wärmepumpen um 7 % (Bestandsgebäude) bzw. 13 % (Neubau) höher. Hierbei kommt zum Tragen, dass in der „BAFA-Liste“ Geräte aufgeführt sind, die nicht mehr am Markt verfügbar sind. Da dies hauptsächlich die Wärmepumpen mit eher geringem COP

betrifft, liegt der Mittelwert der am Markt tatsächlich verfügbaren Geräte in unbekanntem Maß höher als hier dargestellt (Zech et al. 2020).

Für die Analyse in LowEx im Bestand wurden in *HEBAP* Kennlinien einer Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistungszahl (COP bei A2/W35) von 4,2 ausgewählt und nach Datenblatt in der Modellierung abgebildet (Obid 2022). Hierdurch ist eine Geräteeffizienz repräsentiert, die leicht oberhalb des Medians der in 2020 geförderten Wärmepumpen im Bestand liegt. Damit bilden die vorliegenden Rechnungen ein Feld von aktuell guten, aber nicht sehr guten Geräten ab. Für die Sole-Wärmepumpe wurde ein Gerät mit einer Leistungszahl (COP bei B0/W35) von 4,82 abgebildet. Die Leistung und der COP der Wärmepumpen wird über die folgenden Kennlinien berechnet. Tabelle 12 fasst die Zahlenwerte der Parametrierung zusammen.

$$\dot{Q} = z_0 + a * T_{sink,in} + b * T_{source,in} + c * T_{sink,in}^2 + d * T_{source,in}^2 + e * T_{sink,in} * T_{source,in}$$

$$COP = z_0 + a * T_{sink,avg} + b * T_{source,in} + c * T_{sink,avg}^2 + d * T_{source,in}^2 + e * T_{sink,avg} * T_{source,in}$$

mit	\dot{Q}	W	Heizleistung
	COP	-	Leistungszahl
	$T_{sink,avg}$	K	Temperatur der Wärmesenken am Wärmepumpen-Eintritt
	$T_{sink,in}$	K	Temperatur der Wärmesenken, Mittelwert aus Wärmepumpen-Eintritt und -Austritt
	$T_{source,in}$	K	Temperatur der Wärmequelle (Sole bzw. Außenluft) am Wärmepumpen-Eintritt

Tabelle 12: Parametrierung der Wärmepumpen

	Luft-WP		Sole-WP	
	COP	\dot{Q}	COP	\dot{Q}
z0	-246.56	-612904	-96.82	-3.54
a	0.578422	2390	0.18797	-196.50
b	1.168825	1613	0.54558	-153.75
c	0.000190	-2.662	0.00058	3.46
d	-0.000350	-0.876	0.00055	5.94
e	-0.002839	-2.817	-0.00239	-7.61

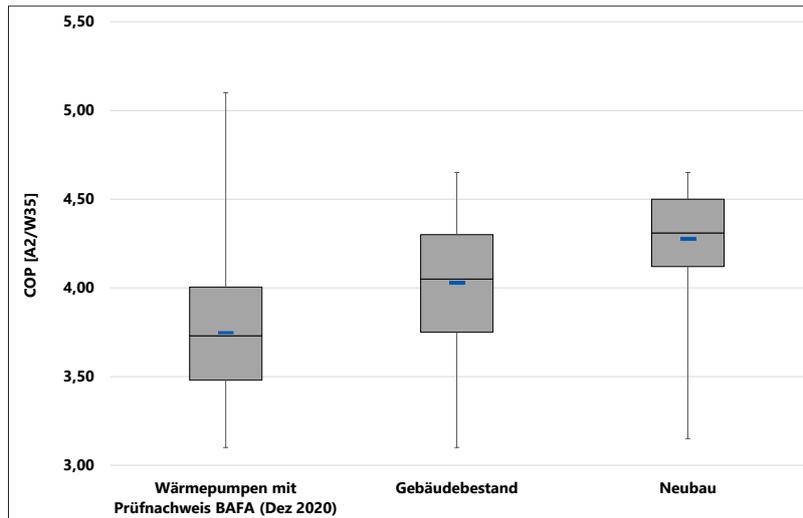


Abbildung 40: COP-Werte von Luft/Wasser-Wärmepumpen (A2/W35) als Boxplot: (links) Förderfähige leistungsgeregelte Wärmepumpen aus der BAFA-Liste (BAFA 2020), sowie alle tatsächlich geförderten leistungsgeregelten Wärmepumpen des Förderjahres 2020 getrennt für Gebäudebestand (Mitte, 7.483 Geräte) und Neubau (rechts, 6.302 Geräte), Quelle: Zech et al. 2020.

4.7.4 Rahmendaten: Energiepreis- und Emissionsszenarien

Für die Durchführung der techno-ökonomischen Analyse wurden Prognosen von Strom- und Erdgaspreisen bis 2050 untersucht und unterschiedliche Szenarien der Entwicklung formuliert. Die für die Analyse gewählten Werte sowie die Hintergründe der Auswahl sind in Abschnitt 5.2 beschrieben. Die Annahmen zu den Energiebezugskosten finden sich in Tabelle 17 und die Annahmen zu den spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren der Energieträger in Tabelle 18 im dortigen Abschnitt. Es wurden drei Szenarien definiert:

- BAU (Business as Usual): keine CO₂-Bepreisung
- COP1 (CO₂-Preis-Szenario): moderater Anstieg der CO₂-Bepreisung
- COP2: starker Anstieg der CO₂-Bepreisung.

Die im Folgenden beschriebenen Analysen beziehen sich auf die Kennwerte für das Bezugsjahr 2020 sowie in Einzelfällen auf die Werte des Bezugsjahrs 2040 als Projektion in die Zukunft.

Die durchgeführten Simulationsvarianten werden mit folgendem Kürzel bezeichnet: ein Buchstabe kennzeichnet die Optimierungsgröße (e: Emissionen, c: Kosten) und eine Zahl das den einzelnen Jahren zugeordnete Emissions- und Kostenszenario (vgl. Tabelle 13)

Eine Kenngröße in den Simulationen ist das Aufwandsverhältnis (Fuel Ratio) (vgl. Abschnitt 4.7.5). Es beschreibt das Verhältnis der Energiebezugskosten ($r_{\text{fuel, cost}}$) oder der spezifischen Emissionen ($r_{\text{fuel, CO}_2}$) der Energieträger. Dabei wird der Wert für Strom ins Verhältnis zum Wert für Erdgas gesetzt, d.h. bei $r_{\text{fuel, cost}} = 3,74$ sind die Energiebezugskosten für eine kWh Strom um das 3,74-fache höher als die Energiebezugskosten für eine kWh Erdgas (Bezug Brennwert).

Tabelle 13: Kennzeichnung der gerechneten Variationen sowie Aufwandsverhältnisse der Bezugsjahre im Szenario COP1.

Optimierungsgröße	Bezugs-jahr	Kenn-zeichnung	Aufwands-verhältnis (r_{fuel})
CO ₂ -Emissionen	2020	e20	2,01
	2030	e30	1,05
	2040	e40	0,61

Energiebezugskosten	2020	c20	3,74
	2030	c30	1,65
	2040	c40	1,43

4.7.5 Optimierter Betrieb im bivalenten System

Im Folgenden werden Ergebnisse des in *HEBAP* simulierten Betriebs des bivalenten Systems für die folgenden Systembeispiele und Betriebsarten dargestellt:

- Referenzgebäude: Mittleres Mehrfamilienhaus (MMH) im Sanierungszustand S für den Standort Potsdam mit einer Normaußentemperatur von $-12,6^{\circ}\text{C}$; vgl. Kapitel 2.4
- Auslegung der Luft/Wasser-Wärmepumpe auf einen Bivalenzpunkt von -5°C (Kennzeichnung: „Auslegung 100%“)
- Systemtemperaturen: Die Bestandsheizkörper werden weiter genutzt. Entsprechend der Sanierung der Gebäudehülle und der einhergehenden Reduktion der Heizlast, sowie die Umsetzung geringinvestiver Maßnahmen, kann die Auslegungstemperatur gesenkt werden. Es wird eine Absenkung der Systemtemperaturen auf $53/45^{\circ}\text{C}$ (Vorlauf/Rücklauf) bei Normaußentemperatur ermittelt. Die Temperatur im Betrieb wird entsprechend einer außenlufttemperaturabhängige Heizkurve berechnet.
- Betriebsarten:
 - Bivalent paralleler Betrieb
 - Bivalent alternativer Betrieb mit Minimierung der Energiebezugskosten
 - Bivalent alternativer Betrieb mit Minimierung der CO_2 -Emissionen

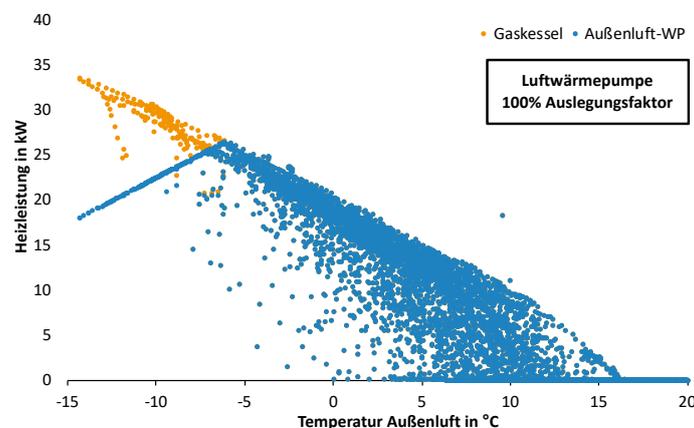


Abbildung 41: Bivalent-paralleles System mit Außenluft-Wärmepumpe und Gaskessel (Jahr 2020).

Abbildung 41 stellt die Simulationsergebnisse für das *bivalent parallel* betriebene System im Bezugsjahr 2020 dar. In der Abbildung sind die Heizleistungen der Wärmeerzeuger im Raumheizungsbetrieb über der Außentemperatur als Stundenmittelwerte aufgetragen. Die blauen Datenpunkte stellen die Heizleistungen der Luft-Wärmepumpe (LWP) bei einem Auslegungsfaktor von 100 % dar (Bivalenzpunkt der Auslegungsrechnung: -5°C). Der Auslegungsfaktor wird zur Skalierung der Wärmepumpenleistung und der Speichergröße verwendet, um den Einfluss kleiner dimensionierter Wärmepumpen im Heizungssystem zu untersuchen. Die orangenen Datenpunkte stellen die Heizleistung des Gaskessels dar. Die Heizleistung der Wärmepumpe erreicht ihren Maximalwert in der Nähe des Bivalenzpunktes und nimmt bei Außenlufttemperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes ab. Dies ist eine Folge der Temperaturabhängigkeit der Heizleistung der Wärmepumpe. Somit deckt die Wärmepumpe bei Außentemperaturen oberhalb des Bivalenzpunktes den erforderlichen Raumwärmebedarf allein, unterhalb sind bei einer bivalent-parallelen Betriebsweise beide Erzeuger aktiv. Die Wärmepumpe arbeitet somit auch bei niedrigen Außentemperaturen weiter.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Heizleistung für die Bereitstellung von Raumwärme in *bivalent-alternativer Betriebsweise* mit Optimierung auf die Energiebezugskosten für die Bezugsjahre 2020 und 2040 (Rechnungen c20 und c40). Das Aufwandsverhältnis $r_{\text{fuel,cost}}$ lag im Jahr 2020 bei 3,74 und sinkt in dem Szenario COP1 auf 1,43 für das Jahr 2040.

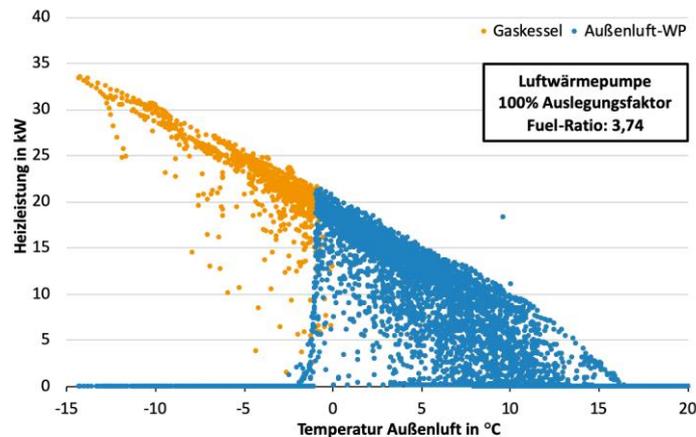


Abbildung 42: Bivalent-alternatives System mit Gaskessel c20: Bezugskosten-optimierter Betrieb (Jahr 2020).

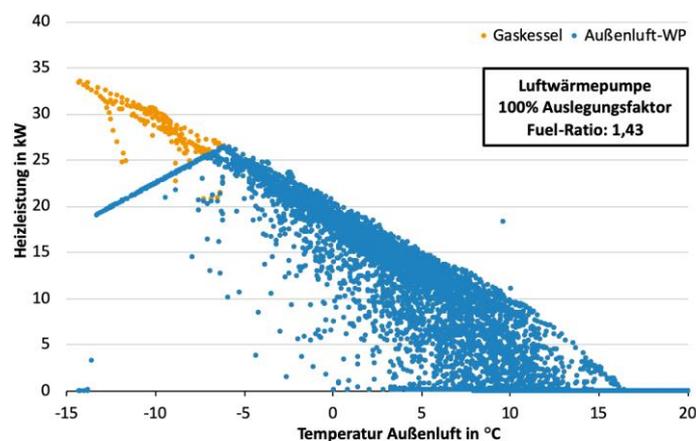


Abbildung 43: Bivalent-alternatives System mit Gaskessel c40: Im bezugskosten-optimierten Betrieb (Jahr 2040) erfolgt mit niedrigerem Aufwandsverhältnis $r_{\text{fuel,cost}}$ eine Angleichung an den bivalent-parallelen Betrieb.

Im *bivalent-alternativen Betrieb* arbeitet die Wärmepumpe nicht in jedem Fall bis zum Bivalenzpunkt, sondern wird ggf. bereits bei einer höheren Temperatur, dem Schalterpunkt, durch den Gaskessel ersetzt. Der Unterschied von Bivalenz- und Schalterpunkt ist im kostenoptimierten c20-Pfad besonders groß. Mit sinkender Quellentemperatur, d. h. sinkender Außentemperatur, nimmt die Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe ab, was in einem höheren Strombedarf und somit steigenden Strombezugskosten resultiert. Für das Jahr 2020 betragen die spezifischen Kosten für Strom das 3,74-fache von den spezifischen Kosten für Erdgas. Somit wird in dem betrachteten Szenario für einen kostenoptimalen Betrieb der Gaskessel unterhalb einer Außenlufttemperatur von -1°C anstelle der Wärmepumpe eingesetzt. Der Schalterpunkt liegt damit somit über dem Bivalenzpunkt.

Abbildung 43 stellt die Ergebnisse des kostenoptimierten Betriebes für das Bezugsjahr 2040 (Aufwandsverhältnis von $r_{\text{fuel,cost}} = 1,43$) dar. Die Umschaltung zwischen Wärmepumpe und Gasbrennwertgerät erfolgt nun erst bei einer Außentemperatur unter -15°C . Mit abnehmendem Aufwandsverhältnis wird der bivalent parallele Betrieb angenähert.

Abbildung 44 zeigt die stündliche Heizleistung abhängig von der Außenlufttemperatur für die Bereitstellung von Raumwärme im *emissions-optimierten Betrieb* für das Bezugsjahr 2020 (Rechnung e20).

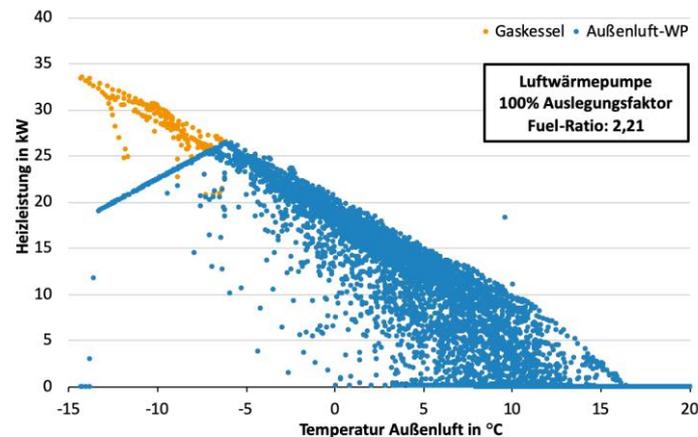


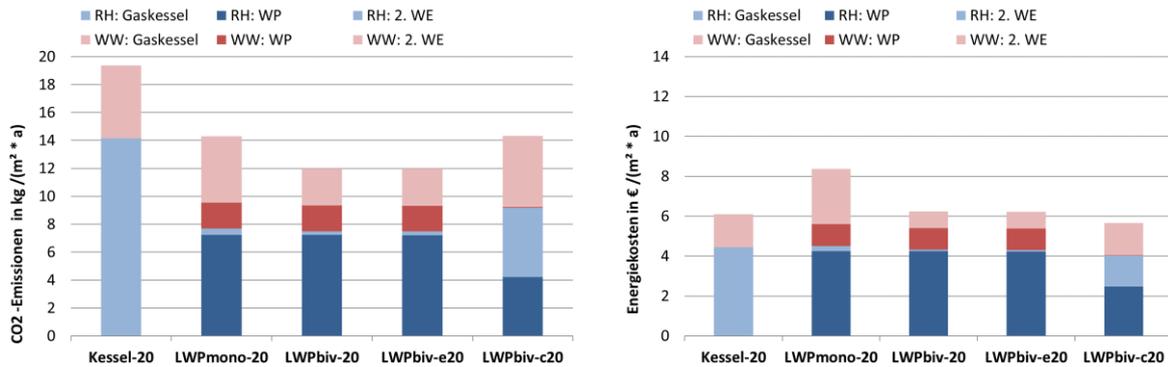
Abbildung 44: Bivalent-alternative System mit Gaskessel e20: der emissions-optimierte Betrieb (Jahr 2020) entspricht näherungsweise dem bivalent-parallelen Betrieb.

Das Verhalten der Wärmepumpe im emissionsoptimierten e20-Pfad ist aufgrund des geringen Aufwandsverhältnisses $r_{\text{fuel,CO}_2}$ nahezu identisch mit der nicht optimierten bivalent parallelen Betriebsvariante (vgl. Abbildung 41). Dies bedeutet, dass der durchgängige Betrieb der Wärmepumpe bereits bei einem Verhältnis der Emissionskennwerte des Jahres 2020 vorteilhaft zum Betrieb des Gaskessels ist. Aufgrund der in Zukunft weiter abnehmenden Emissions-Intensität des Strommixes ist dies auch für die zukünftigen Bezugsjahre (2030, 2040, 2050) gültig.

Abbildung 45 und Abbildung 46 stellen die spezifischen Emissionen und Energiekosten je m^2 Energiebezugsfläche für die Beheizung des Referenzgebäudes (MMH-S) in unterschiedlichen Systemkonfigurationen und Betriebsweisen im Szenario COP1 für die Bezugsjahre 2020 und 2040 dar. Dargestellt sind die Systeme Gaskessel standalone (Kessel), mono-energetisches Wärmepumpensystem mit Heizstab als Backup (LWP mono), sowie die bivalenten Systeme in bivalent-paralleler (LWP-biv), emissions-optimierter (LWP-biv-e) und kosten-optimierter (LWP-biv-c) Betriebsweise. Die Wärmepumpe ist im monoenergetisch sowie bivalenten Konzept wie zuvor auf den Bivalenzpunkt von -5°C ausgelegt. Es erfolgt eine Aufspaltung nach Bereitstellung von Raumwärme (blau) und Trinkwarmwasser (rot) für den Primär- und Sekundärerzeuger. Im mono-energetischen System ist der Heizstab der Sekundärerzeuger, im bivalenten System der Gaskessel.

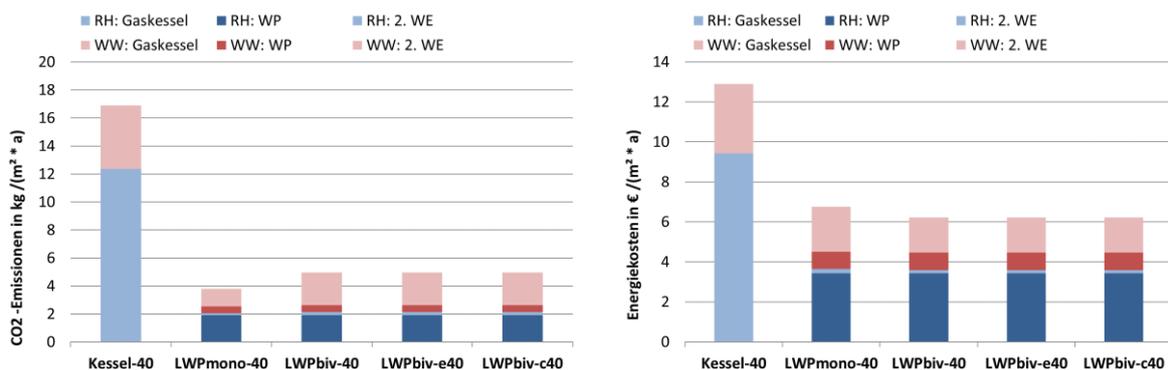
Werden die Ergebnisse für das Bezugsjahr 2020 betrachtet, so zeigt sich für die CO_2 -Emissionen, dass in allen Wärmepumpensystemen eine Einsparung im Verhältnis zum Gaskessel erreicht wird. Das bivalent-parallele sowie das bivalent-emissionsoptimierte System unterscheiden sich in ihren Ergebnissen kaum, wie bereits oben erläutert. Diese weisen die geringsten CO_2 -Emissionen auf. Von den Wärmepumpensystemen haben das monoenergetische Wärmepumpensystem und das kostenoptimierte bivalente System vergleichbare CO_2 -Emissionen. Unter den hier gerechneten Annahmen zur Dimensionierung (alle WP hier gleich groß dimensioniert) und der Begrenzung der maximalen durch die Wärmepumpe gelieferten Vorlauftemperatur auf 62°C entfällt ein signifikanter Anteil der Erwärmung des Trinkwarmwassers auf den zweiten Wärmeerzeuger (hellrot gekennzeichnet). Die CO_2 -Emissionen sowie die Kosten zur Erzeugung von Trinkwarmwasser sind im monoenergetischen System besonders hoch, da der nicht über die Wärmepumpe gedeckte Trinkwarmwasser-Anteil direkt elektrisch über den Heizstab bereitgestellt wird. Aufgrund des im Bezugsjahr 2020 vorliegenden Aufwandsverhältnisses $r_{\text{fuel,CO}_2}$ von 2,01 ist die direktelektrische Trinkwassererwärmung hier deutlich CO_2 -intensiver als die Nutzung von Erdgas. Hingegen sind im bivalent kostenoptimierten Betrieb ein Großteil der Emissionen auf den weiter hohen Anteil an Bedarfsabdeckung durch den Gaskessel zurückzuführen. Hier deckt die Wärmepumpe nur etwa die Hälfte des Wärmebedarfs der Raumheizung. Der restliche Raumwärmebedarf sowie nahezu der komplette Trinkwarmwasserbedarf werden durch den Gaskessel abgedeckt. Die CO_2 -Emissionen

liegen höher als im emissionsoptimierten Betrieb, jedoch weist das bivalent kostenoptimierte System von allen Systemen die niedrigsten spezifischen Energiebezugskosten auf.



Legende: RH: Raumheizung, WW: Warmwasser, WP: Wärmepumpe, WE: Wärmeerzeuger, mono: monoenergetisches System, biv-20: bivalent-paralleler Betrieb, biv-e: emissionsoptimierter Betrieb, biv-c: kostenoptimierter Betrieb

Abbildung 45: CO₂-Emissionen (links) und Energiebezugskosten (rechts) der Heizungsanlage im Referenzgebäude MMH im Sanierungsszenario S bei 100% Auslegungsfaktor (Bivalenzpunkt -5°C) unter Berücksichtigung von Energiepreisen und Emissionsintensität im **Jahr 2020**.



Legende: RH: Raumheizung, WW: Warmwasser, WP: Wärmepumpe, WE: Wärmeerzeuger, mono: monoenergetisches System, biv-20: bivalent-paralleler Betrieb, biv-e: emissionsoptimierter Betrieb, biv-c: kostenoptimierter Betrieb

Abbildung 46: CO₂-Emissionen (links) und Energiebezugskosten (rechts) der Heizungsanlage im Referenzgebäude MMH im Sanierungsszenario S bei 100% Auslegungsfaktor (Bivalenzpunkt -5°C) unter Berücksichtigung von Energiepreisen und Emissionsintensität im **Jahr 2040**.

Für das Bezugsjahr 2040 ändern sich die Randbedingungen dahin, dass hier prognostizierte Aufwandsverhältnisse von $r_{\text{fuel, cost}}=1,43$ und $r_{\text{fuel, CO}_2}=0,61$ vorliegen. Die drei bivalenten Systemoptionen weisen dieselben CO₂-Emissionen und spezifischen Energiebezugskosten auf, da sich die Betriebscharakteristik angleicht. Die Raumheizung wird fast ausschließlich von der Wärmepumpe bereitgestellt; nur unterhalb des Bivalenzpunktes unterstützt der Kessel zur Deckung der Lastspitzen. Bei der Trinkwassererwärmung hat der Kessel mit rund der Hälfte weiterhin einen hohen Deckungsbeitrag, wenn die Wärmepumpe wie zuvor beschrieben mit einer maximalen Betriebstemperatur von 62°C angenommen wird. Das monoenergetische System hat nun auch trotz des signifikanten Anteils an direktelektrischer Warmwassererzeugung die geringsten CO₂-Emissionen, da $r_{\text{fuel, CO}_2}$ kleiner als 1 ist und somit der Betrieb des Heizstabes weniger Emissionen verursacht als der Gaskessel. Die Energiebezugskosten liegen nur geringfügig höher als die bivalenten Systemalternativen. Insgesamt betrachtet liegen die Kosten aller Wärmepumpensysteme in gleicher

Größenordnung, während der reine Gaskesselbetrieb zu etwa doppelt so hohen Energiebezugskosten und etwa der vierfachen Menge an CO₂-Emissionen führt.

Um in Richtung einer allgemeingültigeren Analyse zu kommen, wird im Folgenden die Sensitivität des Betriebs des kostenoptimierten bivalenten Systems in Hinsicht auf eine Variation des Aufwandsverhältnisses $r_{\text{fuel, cost}}$ analysiert. Abbildung 47 zeigt die Änderung des Deckungsgrads der Luftwärmepumpe in einem bivalent-alternativen Betrieb bei einer Änderung des Aufwandsverhältnisses $r_{\text{fuel, cost}}$. Im Bereich des Aufwandsverhältnisses zwischen 2,0 und 2,5 ändert sich das Systemverhalten deutlich und der Deckungsgrad der Wärmepumpe für Raumheizung und Trinkwarmwasser sinkt. Der Wert und die Lage dieses Bereichs auf dem Diagramm korrelieren mit dem Kennfeld des Wirkungsgradverhältnisses zwischen den Wärmeerzeugern und dementsprechend mit dem Typ und Modell der Wärmepumpe.

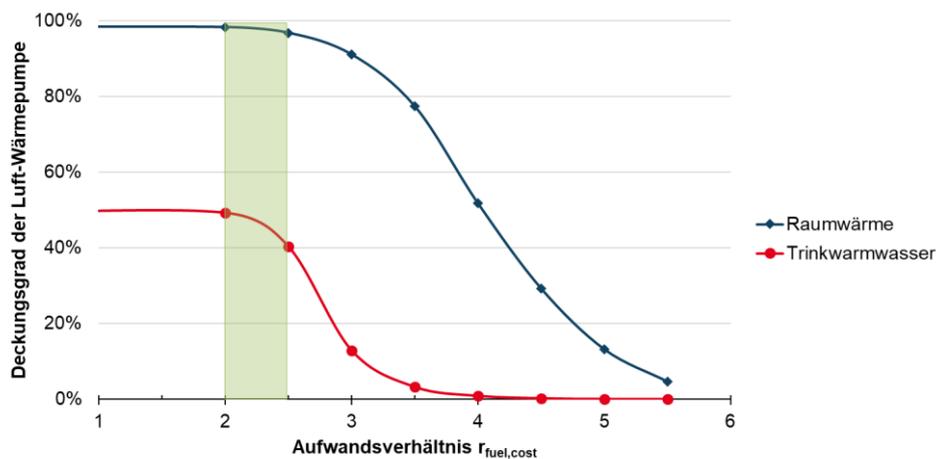


Abbildung 47: Deckungsgrad der Luftwärmepumpe im bivalent-alternativen Betrieb für verschiedene Aufwandsverhältnisse $r_{\text{fuel, cost}}$ im Sanierungszustand S mit WP-Auslegungsfaktor 100%.

4.7.6 Einfluss der Dimensionierung der Wärmepumpe

In den zuvor beschriebenen Berechnungen wurde die Wärmepumpe auf einen Bivalenzpunkt von -5°C ausgelegt. Diese Auslegung wird hier als Referenzauslegung bezeichnet (100%-Auslegung) und ist in Tabelle 14 für die Sanierungsszenarien S und B1 (vgl. Kapitel 2.5) zusammengefasst. Ein Vorteil des bivalenten Systems ist, dass die Wärmepumpe zwecks Einsparung von Investitionskosten auch kleiner dimensioniert werden kann. Im Folgenden wird der Einfluss einer kleineren Dimensionierung der Luftwärmepumpe auf den Deckungsgrad für Raumheizung und Trinkwarmwasser durch die Wärmepumpe untersucht.

Table 14: Referenz-Auslegung (100%, Bivalenzpunkt -5°C) des bivalenten Heizsystems mit Luft- (LWP) bzw. Solewärmepumpe (SWP) für das Referenzgebäude MMH im Sanierungszustand S und B1.

Parameter	Einheit	Sanierungsszenario S	Sanierungsszenario B1
Gebäudeheizlast (nominal)	kW	35,8	63,8
LWP Heizleistung (A2/W35)	kW	35,2	67,6
LWP Heizleistung (-5°C)	kW	27,9	49,4
Gaskessel Heizleistung (parallel mit LWP)	kW	18,9	35,1
Gaskessel Heizleistung (alternativ mit LWP)	kW	39,0	67,0
SWP Heizleistung (B0/W35)	kW	26,5	48,8
SWP Heizleistung (-5°C)	kW	27,9	49,4
Gaskessel Heizleistung (parallel mit SWP)	kW	11,9	18,5
Gaskessel Heizleistung (alternativ mit SWP)	kW	39,0	67,0

Dazu wurde die Wärmepumpe in 20%-Schritten (bezogen auf die Referenzauslegung) kleiner dimensioniert und der kosten- sowie emissionsoptimierte Betrieb im Bezugsjahr 2020 simuliert.

Abbildung 48 zeigt den Deckungsgrad der Wärmepumpe in der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Die durch die Dimensionierung vorgegebene Limitierung in der Bereitstellung von Raumwärme ist in den Rechnungen mit Emissionsoptimierung (e20) abzulesen. Hier nimmt der Deckungsgrad der Luftwärmepumpe mit einer Verringerung des Auslegungsfaktors deutlich ab, da die Leistungslimitierung der Wärmepumpe zu Tragen kommt. Für Raumheizung beträgt der Deckungsgrad der Wärmepumpe 98 % bei Auslegungsfaktoren von über 80% und fällt mit Reduzierung der Wärmepumpenleistung zunächst gering and dann stärker ab. Eine Wärmepumpenauslegung von 20% erreicht einen Deckungsgrad von 46%. Im kostenoptimierten Betrieb des Bezugsjahres 2020 (c20) liegt der Abschaltwinkel – wie in Abbildung 42 gezeigt – bei rund -1°C. Eine Auslegung der WP auf 60% deckt den Einsatzbereich der WP ab und erreicht einen Raumwärme-Deckungsgrad von 66%. Aufgrund des Abschaltwinkels lässt sich mit einer größer dimensionierten Wärmepumpe der Deckungsgrad der WP nicht weiter erhöhen.

Bei der Warmwasserbereitung deckt die Wärmepumpe im emissionsoptimierten Betrieb 49% des Wärmebedarfs bei Auslegungsfaktoren über 80 % ab. Der Wert sinkt bei kleiner Auslegung der Wärmepumpe kontinuierlich und liegt bei 20%-Auslegung bei 29%. Im kostenoptimierten Betrieb wird das Trinkwarmwasser fast vollständig durch das Gasbrennwertgerät erwärmt.

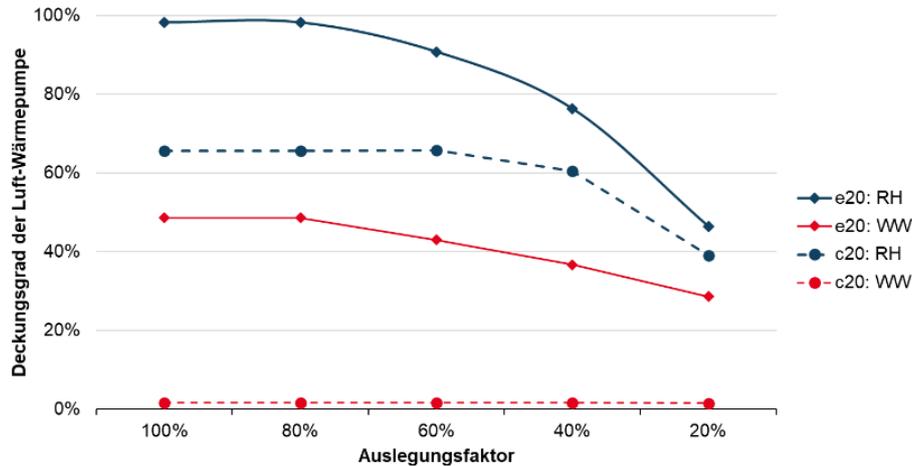


Abbildung 48: Deckungsgrad der Luftwärmepumpe für Raumheizung (RH) und Warmwasserbetrieb (WW) für unterschiedliche Systemdimensionierungen bei Emissionsoptimierung (e20) und Kostenoptimierung (c20) im Jahr 2020. Das Referenzgebäude (MMH) befindet sich im Sanierungszustand S.

4.7.7 Einfluss des Sanierungszustandes

Im Folgenden wird der Betrieb des bivalenten Wärmepumpensystems im weitgehend unsanierten Gebäude (B1) und im sanierten Gebäude (S) untersucht. Heizungsanlagen in weniger energieeffizienten Gebäuden sind emissions- und energiekostenintensiver, da ein höherer Wärmebedarf zu decken ist. Zudem sind die Systemtemperaturen in Gebäuden mit niedrigeren Sanierungszuständen höher, so dass der Optimierungseffekt stärker zum Tragen kommt. Generell erhöht eine Sanierung die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Raumheizbetrieb, da das Gebäude mit niedrigeren Systemtemperaturen (abgesenkte Heizkurve) beheizt werden kann.

Abbildung 49 zeigt die bereitgestellte Wärmemenge in den beiden Sanierungsszenarien B1 und S für die Emissions- und Kostenoptimierung im Bezugsjahr 2020. Bei Emissionsoptimierung im unsanierten Gebäude der Sanierungsstufe B1 ist die Wärmepumpe der dominante Wärmeerzeuger und weist einen fast identischen Deckungsgrad wie im sanierten Gebäude (S) auf. Bei Kostenoptimierung ist der Deckungsgrad der LWP nach der Sanierung (S) mit 50% deutlich höher als im unsanierten Zustand des Gebäudes (B1) mit 34 %. Hintergrund ist, dass der Schaltpunkt, unter dem der Kessel den Betrieb übernimmt, im unsanierten Gebäude - aufgrund der höheren Heizkurve - bei höheren Außenlufttemperaturen liegt als im sanierten Gebäude. Für den individuellen Betrieb ist die Warmwasserbereitstellung nicht von der Qualität der Gebäudehülle, sondern von den Gewohnheiten der Bewohner abhängig. Daher ist die beobachtete Veränderung des Deckungsanteils durch die LWP eine Folge des Raumheizungsbetriebs. Wie in Abbildung 49 zusätzlich dargestellt, ist die Jahresarbeitszahl nach der Sanierung in beiden Betriebsvarianten höher. Dies resultiert aus den mit der Sanierung verbundenen niedrigeren Heizkreistemperaturen.

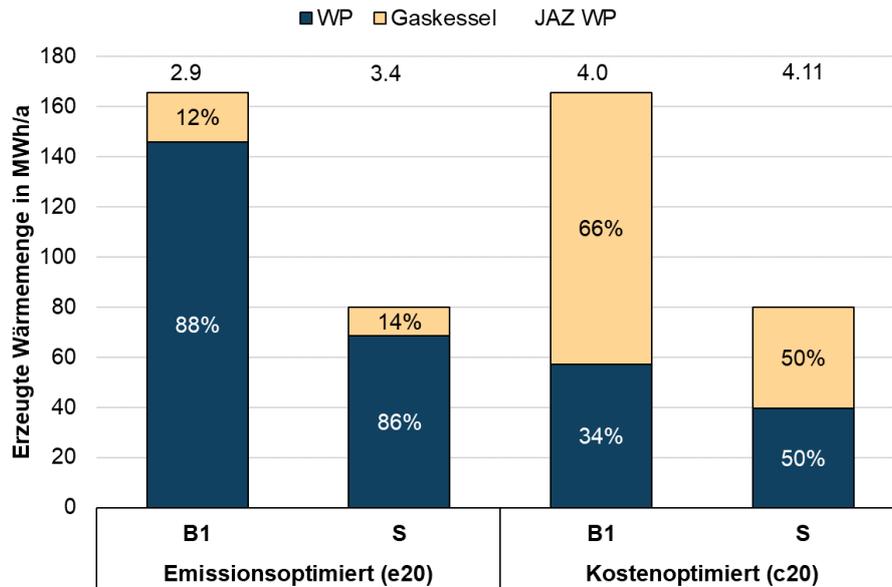


Abbildung 49: Bereitgestellte Wärmemenge der Wärmeerzeuger zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in den beiden Sanierungszuständen B1 und S mit Optimierung auf Emissionen (links) und Kosten (rechts) im Jahr 2020. Der Wärmepumpentyp ist LWP mit einem Auslegungsfaktor von 100%.

Abbildung 50 stellt weiter die spezifischen CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten für das sanierte (S) und das unsanierte (B1) Gebäude dar. Auch hier wird deutlich, dass beides im unsanierten Fall deutlich höher ausfällt. Im kostenoptimierten Betrieb (e20) sind die CO₂-Emissionen noch einmal deutlich höher bei geringeren Energiebezugskosten. Der Unterschied der beiden Betriebsarten ist im sanierten Gebäude geringer.

Die Analyse wurde auch für eine kleinere Dimensionierung (60%-Dimensionierung) durchgeführt (hier nicht dargestellt) und führt in der Größenordnung zu einem vergleichbaren Ergebnis, jedoch mit etwas geringeren Emissionseinsparungen.

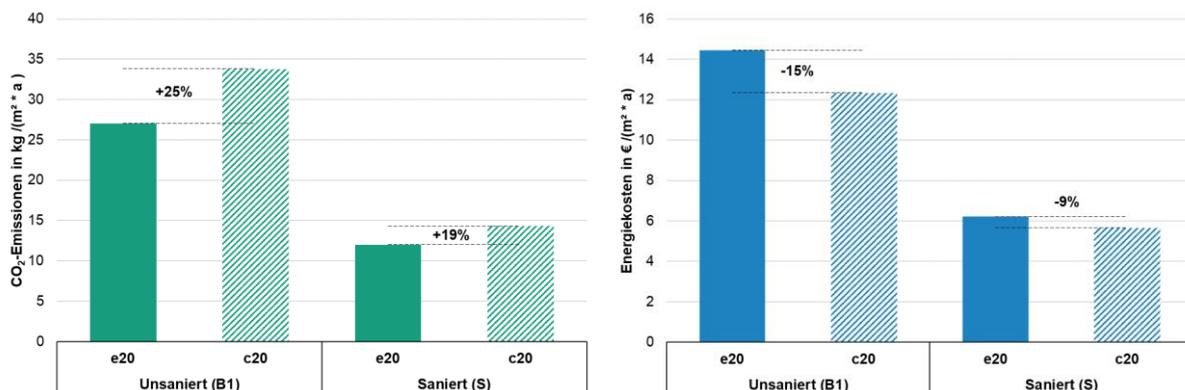


Abbildung 50: CO₂-Emissionen (links) und Energiebezugskosten (rechts) des bivalenten Systems mit Luftwärmepumpe im unsanierten (B1) und sanierten (S) Referenzgebäude bei 100% Auslegungsfaktor unter Berücksichtigung von Energiepreisen und Emissionsintensität im Jahr 2020 (e20: emissionsoptimierter Betrieb, c20: kostenoptimierter Betrieb).

4.7.8 Einfluss des Wärmepumpentyps

Sole-Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequelle nutzen, sind effizienter als Luft-Wärmepumpen, da die Quelltemperatur im Jahresmittel höher liegt. Zudem ist die Wärmeübertragung zwischen Sole und Kältemittel besser als zwischen Luft und Kältemittel. Demnach können Erdwärmepumpensysteme im Vergleich zu Luftwärmepumpensystemen bei einem Optimierungspfad mit hohem

Aufwandsverhältnis mehr Stunden im Jahr arbeiten. Dies führt zu einer Erhöhung des Deckungsgrades der Wärmepumpe im Heizsystem.

Abbildung 51 zeigt die erzeugte Wärmemenge für Raumwärme und Trinkwarmwasser für bivalente LWP- und SWP-Heizsysteme in verschiedenen Konfigurationen im sanierten Referenzgebäude für das Bezugsjahr 2020. Der Deckungsanteil der einzelnen Wärmeerzeuger ist in der Grafik prozentual angegeben und unterscheidet sich im emissionsoptimierten Betrieb nicht signifikant zwischen den zwei Systemvarianten mit Sole- oder Luftwärmepumpe. Im kostenoptimierten Betrieb deckt die Sole-Wärmepumpe einen deutlich höheren Anteil des Wärmebedarfs als die Luft-Wärmepumpe. Während der Betrieb der Luft-Wärmepumpe bei Kostenoptimierung (c20) eingeschränkt ist und die Wärmepumpe nur 50 % des Wärmebedarfs zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung deckt, ist der Betrieb der Sole-Wärmepumpe im Vergleich zum Kessel über das Jahr hinweg kostengünstiger und die Wärmepumpe kann 76 % des Wärmebedarfes decken. Dabei ist die Jahresarbeitszahl der Sole-Wärmepumpe aufgrund der höheren Quellentemperatur und des besseren externen Gütegrades höher als bei der Luftwärmepumpe.

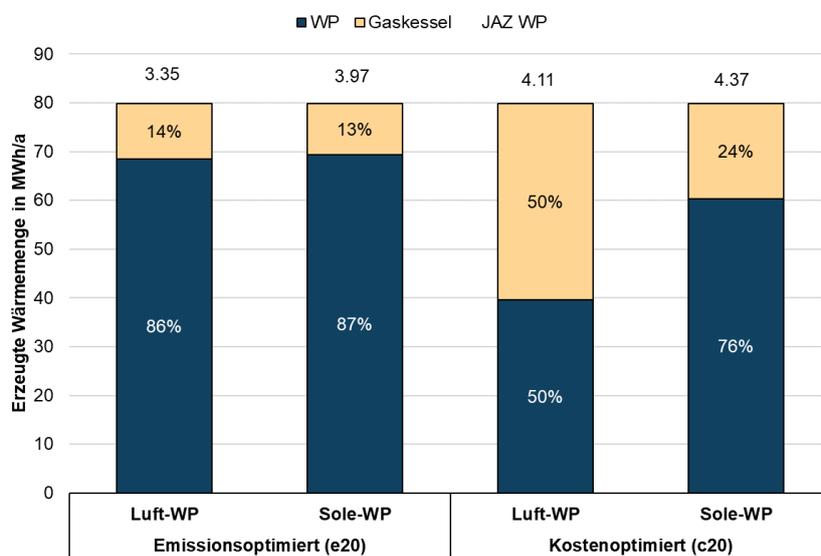


Abbildung 51: Erzeugte Heizenergie von Wärmeerzeugern in Heizungsanlagen mit LWP und SWP (bei 100% Auslegungsfaktor). Optimiert für Emissionen (e20) und Kosten (c20) im Jahr 2020. Das Referenzgebäude befindet sich im Sanierungszustand S.

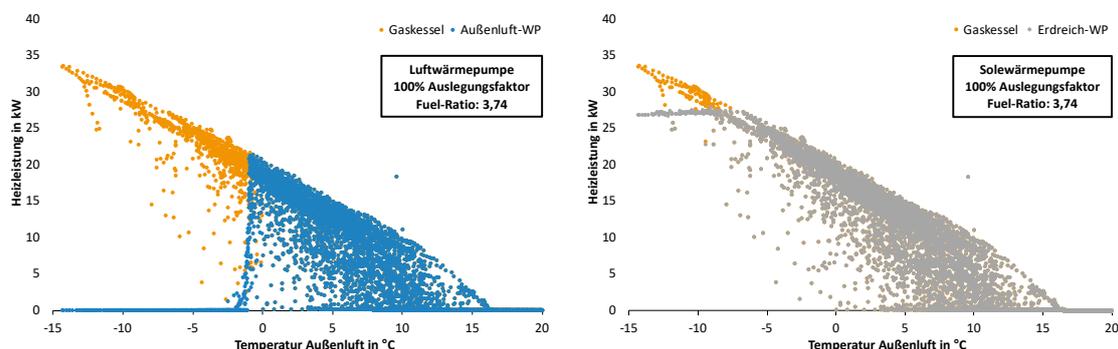


Abbildung 52: Stündliche Heizleistung der Wärmeerzeuger für den Raumheizungsbetrieb. Luft-Wärmepumpe (links) und Sole-Wärmepumpe (rechts) bei Kostenoptimierung im Bezugsjahr 2020 (c20). Das Referenzgebäude befindet sich im Sanierungszustand S und der Auslegungsfaktor beträgt 100%.

Aufgrund der höheren Arbeitszahl der Sole-Wärmepumpe im Vergleich zur Luft-Wärmepumpe liegt der Abschaltzeitpunkt zwischen Wärmepumpe und Kessel bei Kostenoptimierung bei einer niedrigeren Außentemperatur. Der Abschaltzeitpunkt liegt bei -14 °C für die Sole-Wärmepumpe und bei -1 °C für die

Luft-Wärmepumpe, wie in Abbildung 52 dargestellt. Aus diesem Grund ist die Sole-Wärmepumpe für den Raumwärmebetrieb immer die bevorzugte Option, was im Luft-Wärmepumpensystem nicht immer der Fall ist. Für den Warmwasserbetrieb ergeben sich keine wesentlichen Änderungen zu den in Abschnitt 4.7.6 erläuterten Zusammenhängen.

Abbildung 53 stellt die spezifischen CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten für das bivalente System mit Luft- oder Sole-Wärmepumpe dar (Auslegung 100%, Bezugsjahr 2020). Auch hier wird deutlich, dass im System mit Sole-Wärmepumpe geringere Emissionen und geringere Energiebezugskosten erzeugt werden als im Luft-Wärmepumpen-System.

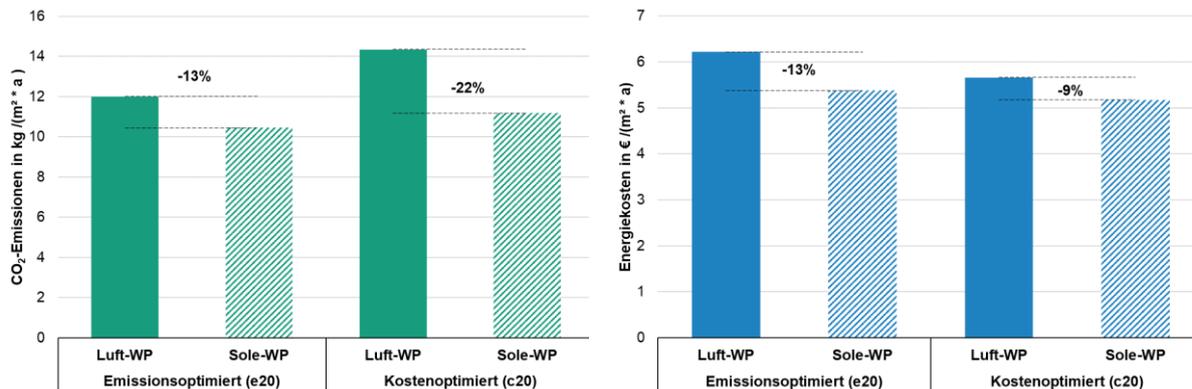


Abbildung 53: CO₂-Emissionen (links) und Energiebezugskosten (rechts) des bivalenten Systems mit Luftwärmepumpe und Solewärmepumpe im sanierten Referenzgebäude (S) bei 100% Auslegungsfaktor unter Berücksichtigung von Energiepreisen und Emissionsintensität im Jahr 2020 (e20: emissionsoptimierter Betrieb, c20: kostenoptimierter Betrieb).

4.8 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen der theoretischen Analysen zu systemischen Fragestellungen für Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand können wie folgt zusammengefasst werden.

Systemkonzepte

- Wärmepumpensystemlösungen für Bestands-Mehrfamiliengebäude sind bisher wenig standardisiert.
- Eine Klassifizierung in 5 Lösungsfamilien mit 13 Systemlösungen wurde erarbeitet. Die Lösungsfamilien reichen von zentralen Wärmepumpensystemen für das Gesamtgebäude bis hin zu Einzelraum-Wärmepumpen. Die detaillierte Beschreibung der Lösungsfamilien findet sich auf der Website des Annex 50: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50>
- Aufstellungsvarianten, Möglichkeiten der Leistungsregelung und Systeme zur Trinkwassererwärmung sowie ihre Eignung zur Kombination mit Wärmepumpen sind vorgestellt.

Raumwärmeübergabe und Selektiver Heizkörperaustausch

- Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ist abhängig vom Temperaturhub zwischen Quelle und Senke. Aus Monitoring-Ergebnissen des Fraunhofer ISE (34 Luft- und 15 Erdreich-Wärmepumpen) wurde abgeleitet, dass die Jahresarbeitszahl für Raumwärme mit jedem Kelvin Absenkung der mittleren Vorlauftemperatur um 0.13 Punkte (Luft-WP) oder 0.10 Punkte (Sole-WP) steigt.
- Die Absenkung von Systemtemperaturen ist mit dem Ziel der Hebung der Effizienzpotentiale der Wärmepumpensysteme anzustreben.
- Ein Austausch einzelner unterdimensionierter Heizkörper kann, insbesondere nach ggf. erfolgter Teil- oder Vollsanieung, ein kosteneffizienter Weg sein, diese Effizienzpotentiale mit geringem Eingriff ins Übergabesystem zu heben.

- Am Beispiel von zwei Gebäuden des Demonstrations-Vorhabens in Karlsruhe-Durlach war zur Absenkung auf Nenn-Systemtemperaturen von 75°C / 60°C (Vorlauf / Rücklauf) auf 55°C / 45°C ein Austausch von 7% der Heizkörper ausreichend. Hierdurch steigt die prognostizierte Jahresarbeitszahl für Raumwärme um 40% (entspricht 40% Einsparung von Energiebezugskosten für Raumwärme).
- Die Absenkung von Systemtemperaturen sowie der selektive Austausch von Heizkörpern als Effizienzmaßnahme ist für jedes Gebäude individuell zu evaluieren. Dies ist mit einem nachfolgenden hydraulischen Abgleich zu kombinieren.

Trinkwassererwärmung

- Eine Simulationsstudie vergleicht den Einfluss verschiedener Trinkwarmwassersysteme auf den Energieverbrauch und die Effizienz eines monoenergetischen Wärmepumpensystems.
- Evaluierte Systeme sind ein monoenergetisches Wärmepumpensystem mit TWW-Speicher, Systeme mit zentraler Frischwasserstation mit und ohne Ultrafiltration sowie wohnungsweise dezentrale Frischwasserstationen.
- Für die Rechnungen wurde eine marktübliche Luft-Wärmepumpe verwendet, die eine maximale Vorlauftemperatur von 62 °C aufweist. Speicher- und Zirkulationsverluste wurden mit abgebildet.
- Das System mit Trinkwarmwasser-Speicher (Referenzsystem) weist den höchsten Endenergieverbrauch auf. Aufgrund der Begrenzung der WP-Vorlauftemperatur auf 62°C ergibt sich in der Berechnung ein hoher Anteil an Heizstabbetrieb.
- In den Systemen mit Frischwasserstation und Ultrafiltration sowie mit dezentralen Wohnungsstationen kann der Endenergieverbrauch für die TWW-Erwärmung um 58 bis 55% verringert werden. Die Erwärmung erfolgt durch Temperaturabsenkung vollständig über die Wärmepumpe.
- Ultrafiltration ist derzeit noch in der Erprobung und bedingt in der Umsetzung noch eine engmaschige Beprobung, was sich oft noch als Umsetzungshürde darstellt.
- Mit neueren Wärmepumpen-Generationen, die höhere Vorlauftemperaturen für die TWW-Erwärmung ermöglichen, ist auch im System mit Trinkwarmwasserspeicher mit einem höheren Deckungsanteil durch die Wärmepumpe zu rechnen.

Quellenschließung und PVT-Wärmepumpensysteme

- Die Quellenverfügbarkeit für mono-energetische und bivalente Wärmepumpensysteme wurde für unterschiedliche energetische Stadtraumtypen untersucht.
- In typischen Reihenhaussiedlungen und Blockrand-Bebauungen sind Luft-WP in der Regel möglich. Bei Blockrand-Bebauung können Limitierungen bei Erdsonden auftreten.
- Grundstücke im Innenstadtbereich sind ohne zusätzliche Maßnahmen meist zu klein für die Quellen Luft und Erdwärme. Für WP-Systeme im Innenstadtbereich sollten als Quelle photovoltaisch-thermische Kombi-Kollektoren (PVT-Kollektoren), Mehrquellen-Systeme oder kalte Fernwärmenetze in Betracht gezogen werden.
- Eine Simulationsstudie untersucht die prinzipielle Eignung von PVT-Kollektoren mit quellseitiger Einbindung in das WP-System. PVT-Kollektoren mit rückseitigem Wärmetauscher sind vorteilhaft für diesen Einsatz.
- Bei adäquater Auslegung des PVT-Kollektorfelds wird eine Jahresarbeitszahl in der Größenordnung zwischen Luft- und Solewärmepumpen erzielt.
- Ein guter Kompromiss zwischen hoher Leistung und geringen Investitionskosten kann bei einer spezifischen PVT-Kollektorfläche von ca. 3 – 5 m²/kW_{th} erzielt werden. Bei allen betrachteten Mehrfamiliengebäude (Klein, Mittel, Groß) reichen die Dachflächen bei weitem aus, um die benötigte Quellwärme zur Verfügung zu stellen.

Betrieboptimierung bivalenter Wärmepumpensysteme

- Bivalente Wärmepumpensysteme kombinieren Wärmepumpen mit einem konventionellen Wärmeerzeuger, z.B. einem bestehenden oder neuen Gaskessel. Der Einsatz von bivalenten Systemen wird zum einen bei begrenzter Flächenverfügbarkeit für die Wärmequelle, insbesondere aber bei schrittweiser Sanierung gesehen. Hier kann bereits vor Hüllsanierung eine Wärmepumpe eingesetzt und gemeinsam mit dem konventionellen Wärmeerzeuger betrieben werden. Nach Sanierung übernimmt die Wärmepumpe die Wärmeerzeugung möglichst vollständig.
- Betriebsstrategien bivalenter Systeme (bezugskostenoptimierter Betrieb vs. CO₂-optimierter Betrieb) wurden untersucht. Die Kostenszenarien berücksichtigen den vor Ukraine-Krieg angenommenen Pfad.
- Mit historischen Energiebezugskosten (Aufwandsverhältnis von Strom zu Erdgas $r_{\text{fuel,cost}}$ des Jahres 2020: 3,74) ergibt sich noch ein klarer Abschaltzeitpunkt der Luft-Wärmepumpe im bivalent-alternativen Betrieb. Bei Minimierung der CO₂-Emissionen ist die Wärmepumpe bereits mit Emissionsfaktoren des Jahres 2020 der über das ganze Jahr bevorzugte Wärmeerzeuger.
- Ab einem Aufwandsverhältnis $r_{\text{fuel,cost}}$ von etwa 2,5 liegt der Deckungsgrad der Luft-Wärmepumpe für die Raumwärme bei ausreichender Dimensionierung der Wärmepumpe über 95%, geht also in Richtung einer vollständigen Deckung. Die Wärmepumpe ist der über das ganze Jahr bevorzugte Wärmeerzeuger. Diese Situation liegt mit aktuellen Energiebezugskosten vor (Stand 20. Oktober 2022: Aufwandsverhältnis bei Berücksichtigung von Preisen für Neukunden von etwa 2,3). Damit gleichen sich jetzt schon der bezugskostenoptimierte und der emissionsoptimierte Betrieb an.

5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Sanierungspaketen

In Arbeitspaket 5 wurde eine techno-ökonomische und ökologische Bewertung der Sanierungspakete, d.h. Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und Austausch des Wärmeversorgungssystems, für Mehrfamilienhäuser im Bestand durchgeführt. Beim Wärmeversorgungssystem lag der Fokus auf Low-Ex-Systemvarianten mit Wärmepumpen (WP), welche hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen mit einem modernen Gasbrennwertkessel verglichen wurden.

Für diese Analyse spielt die Nutzungsphase eine erhebliche Rolle, sowohl wirtschaftlich in Form von Energie-, Betriebs- und Instandhaltungskosten als auch ökologisch durch die CO₂-Emissionen der Wärmebereitstellung. Die Bewertung wurde daher über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren (ab dem Jahr 2020 bis einschließlich des Jahres 2045) durchgeführt. Folglich müssen neben der Anfangsinvestition (siehe Kapitel 5.1) auch Energiepreis- und CO₂-Szenarien (siehe Kapitel 5.2) herausgearbeitet werden.

5.1 Investitionskosten für Systemkomponenten und Hüllsanierung

Für die Festlegung der in diesem Projekt verwendeten Investitionskosten wurde eine umfangreiche Datenrecherche durchgeführt. Die Investitionskosten wurden in Abhängigkeit der Leistung, bzw. Kapazität der Technologie erhoben, um Skaleneffekte zu berücksichtigen. Dazu wurden nur Primärquellen mit eigenen Kostensammlungen berücksichtigt. Die Kostenkurven beziehen auf das erste Quartal des Jahres 2020 und die Preise sind als Bruttowerte angegeben, d. h. inklusive 19 % Mehrwertsteuer. Details zu Datenquellen, Methodik und Abbildung der Kostenkurven finden sich in Abschlussbericht zu AP 5 (Braeuer et. al. 2022).

Die Kostenkurven der einzelnen Komponenten des Wärmeversorgungssystems sind in Tabelle 15 aufgeführt, während Tabelle 16 die Kostenkurven für die Sanierung verschiedener Elemente der Gebäudehülle darstellt.

Tabelle 15: Verwendete Kostenkurven für die Systemkomponenten für die techno-ökonomische Bewertung.

Kostenkurven	Systemkomponente
$K_{spez} = 1045.6 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.42}$	Gas-Brennwertkessel mit der Leistung x in kW
$K_{spez} = 141.99 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.755}$	Elektrischer Heizstab mit der Leistung x in kW
$K_{spez} = 619.79 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot x^{-0.804}$	Wärmespeicher mit dem Volumen x in l
$K_{spez} = 5670.1 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.537}$	Luftwärmepumpe mit der th. Leistung x in kW
$K_{spez} = 2637.1 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.10}$	Solewärmepumpe (inklusive Sonde) mit der th. Leistung x in kW
$K_{spez} = 3693.3 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.58}$	Solewärmepumpe (ohne Sonde) mit der th. Leistung x in kW
$K_{spez,Sonde} = 79.14 \frac{\text{€}}{\text{m}}$	Erdsonden (ohne Solewärmepumpe), spez. Kosten bezogen auf Sondenlänge in m
$K_{spez,Sonde} = 1695.9 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$	Erdsonden (ohne Solewärmepumpe), spez. Kosten bezogen thermische Leistung

Tabelle 16: Verwendete Kostenkurven für die Hüllsanierung für die techno-ökonomische Bewertung.

Kostenkurven Vollkosten	Element der Gebäudehülle
$K_{\text{spez,VK}} = 2.811 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{\text{iso}} + 102.687 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	Fassade mit der Dämmstoffdicke d_{iso} in cm
$K_{\text{spez,VK}} = 1.832 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{\text{iso}} + 45.504 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	Boden bzw. Kellerdecke mit der Dämmstoffdicke d_{iso}
$K_{\text{spez,VK}} = 2.79 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{\text{iso}} + 158.90 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	Dach mit der Dämmstoffdicke d_{iso}
$K_{\text{spez,VK}} = 467.23 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_{\text{Fenster}}}{\text{m}^2}^{-0.232}$	Fenster - zweifach verglast mit Fensterfläche A_{Fenster} in m^2
$K_{\text{spez,VK}} = 541.27 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_{\text{Fenster}}}{\text{m}^2}^{-0.231}$	Fenster - dreifach verglast mit Fensterfläche A_{Fenster} in m^2
$K_{\text{spez,VK}} = 742.75 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_{\text{Fenster}}}{\text{m}^2}^{-0.208}$	Fenster - Passivstandard mit Fensterfläche A_{Fenster} in m^2
$K_{\text{spez,VK}} = 2.14 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{\text{iso}} + 28.67 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	Oberste Geschossdecke mit der Dämmstoffdicke d_{iso}
$K_{\text{spez,VK}} = 9.26 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} + \frac{397.16\text{€}}{A_{\text{Fassade}}}$	Gerüst mit Fassadenfläche A_{Fassade}

5.2 Preis- und CO₂-Szenarien

Um die Wirtschaftlichkeit sowie das CO₂-Einsparpotenzial von WP in MFH bewerten zu können, ist ein Szenario der zukünftigen Energiepreise sowie der CO₂-Emissionsfaktoren notwendig. Um deren Entwicklung abzuschätzen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, welche im Abschlussbericht zu AP 5 (Braeuer et. al. 2022) dokumentiert ist. Die turbulenten globalen Preisentwicklungen von Strom zum Jahreswechsel 2021/2022 (Erhöhung u.a. aufgrund höherer Nachfrage auf dem Weltmarkt und höherer CO₂-Abgaben) sowie aktuell von Strom und Erdgas als Folge des Ukraine-Kriegs konnten zum Zeitpunkt der Studie nicht abgesehen werden und finden somit in den Betrachtungen keine Berücksichtigung.

Im Folgenden werden die aus der Literaturrecherche resultierenden LowEx-Szenarien erläutert.

5.2.1 Energiepreisszenarien 2020-2050

Für den Wärmepumpenstrompreis und Gaspreis werden in diesem Projekt drei Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Bepreisung betrachtet, welche in Tabelle 17 sowie in Abbildung 54 dargestellt sind.

Die Energie-Bezugskosten im Jahr 2020 stammen von der Bundesnetzagentur (2021). Die Bezugskosten für die Jahre 2030 und 2050 basieren auf der Kurzstudie des EWI und des E.ON ERC (Wagner et al. 2019). Für die Hauptanalyse wird Szenario COP1 herangezogen. Dieses entspricht einem moderaten Anstieg der CO₂-Bepreisung auf 180 EUR/tCO₂ im Jahr 2050. Zwei Anpassungen wurden gemacht:

- Die Kurzstudie betrachtet nur den allgemeinen Haushaltsstrompreis. Um einen WP-Stromtarif zu errechnen, wird angenommen, dass für den Zeitraum von 2020 bis 2040 der

Wärmepumpenstromtarif konstant 73,6 % des regulären Haushaltsstrompreises beträgt. Dieser Wert ist das Verhältnis des Jahres 2020 nach dem Monitoringbericht der Bundesnetzagentur (2021).

- Um die Real-Preise aus der Kurzstudie (2017) aus der Perspektive des Jahres 2020 verwenden zu können, werden die Werte für 2030 und 2050 um den realen Verbraucherpreisindex, d.h. die reale Inflation der Jahre 2017 bis 2019 angehoben. Hierfür wird eine Diskontierungsrate von 1,047 verwendet (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020).

Tabelle 17: Wärmepumpenstrompreis und Gaspreis für die drei Preisszenarien. Für die Hauptanalyse dieser Studie wird das Szenario COP1 herangezogen. Für Zwischenwerte soll linear interpoliert werden.

Jahr	Einheit	Wärmepumpenstrompreis ^{1), real (2020)²⁾}			Erdgaspreis, real (2020) ²⁾		
		BAU	COP1	COP2	BAU	COP1	COP2
2020 ³⁾	ct/kWh	23,58			6,31		
2030 ⁴⁾	ct/kWh	22,20	18,73	18,73	9,12	11,32	11,73
2040 ⁵⁾	ct/kWh	21,01	19,04	19,08	9,48	13,36	14,56
2050 ⁴⁾	ct/kWh	19,81	19,35	19,43	9,85	15,40	17,39

1) Annahme Wärmepumpenstromtarif 2030 u. 2050: 73,6 % des regulären Haushaltsstrompreises (Bundesnetzagentur 2021, S. 297; 274)

2) Umrechnung Realpreise 2030 u. 2050 aus Sicht 2017 auf Sicht 2020 mit Verbraucherpreisindex (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020)

3) Werte für 2020 von (Bundesnetzagentur 2021, S. 274; 440)

4) Werte aus der EWI-Kurzstudie (Wagner et al. 2019, S. 4) Umrechnungsfaktor 2017 auf 2020: 1,048

5) Lineare Interpolation

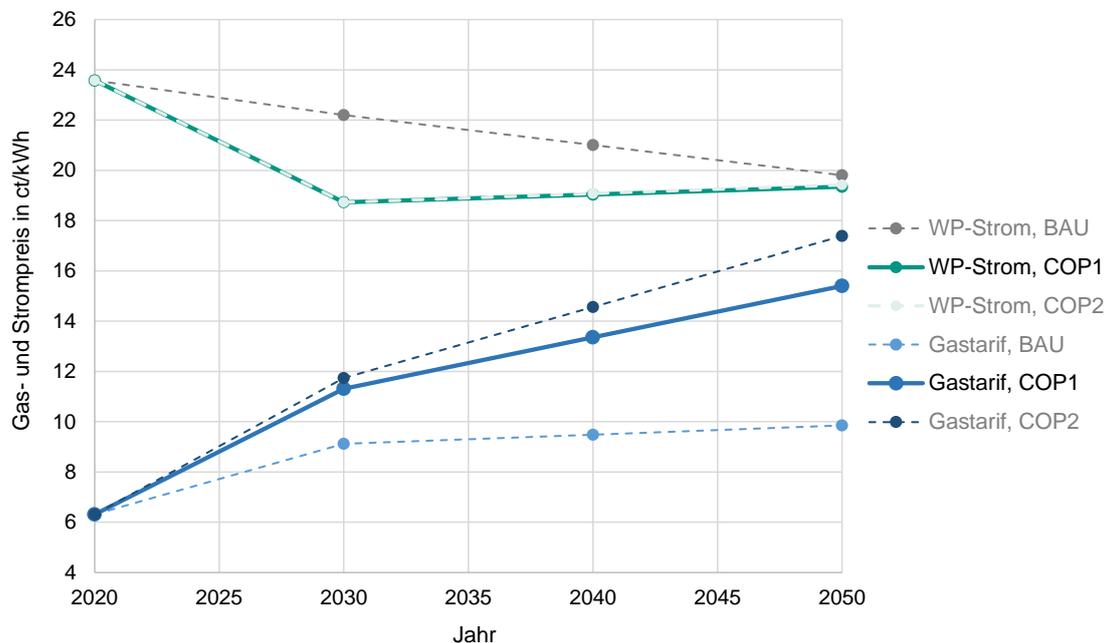


Abbildung 54: Verlauf der Wärmepumpenstrom- und Gaspreise, Realpreis (2020), Datenbasis: (Wagner et al. 2019; Bundesnetzagentur 2021).

5.2.2 CO₂-Emissionsfaktoren 2020-2050

Die in diesem Projekt verwendeten CO₂-Emissionsfaktoren von Gas und Strom sind in Tabelle 18 dargestellt und entstammen der IINAS-Studie (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019). Die CO₂-Emissionen werden ausschließlich auf den Energieverbrauch der Systeme und nicht auf den gesamten

Lebenszyklus der Systemkomponenten (Produktion, Entsorgung etc.) bezogen. Die Angaben zu CO₂ sind synonym als CO₂-Äquivalent zu verstehen. Um die einzelnen Jahreswerte zu bestimmen, wurde linear interpoliert.

Tabelle 18: CO_{2,äq}-Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix (lokal) und für Gas (lokal, auf Brennwert bezogen) nach IINAS (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019).

Jahr	Einheit	Strommix	Gas
2020	g/kWh	402,9	200,8
2030	g/kWh	193,0	183,9
2040*	g/kWh	107,1	175,2
2050	g/kWh	21,1	166,4
* linear interpolierte Werte			

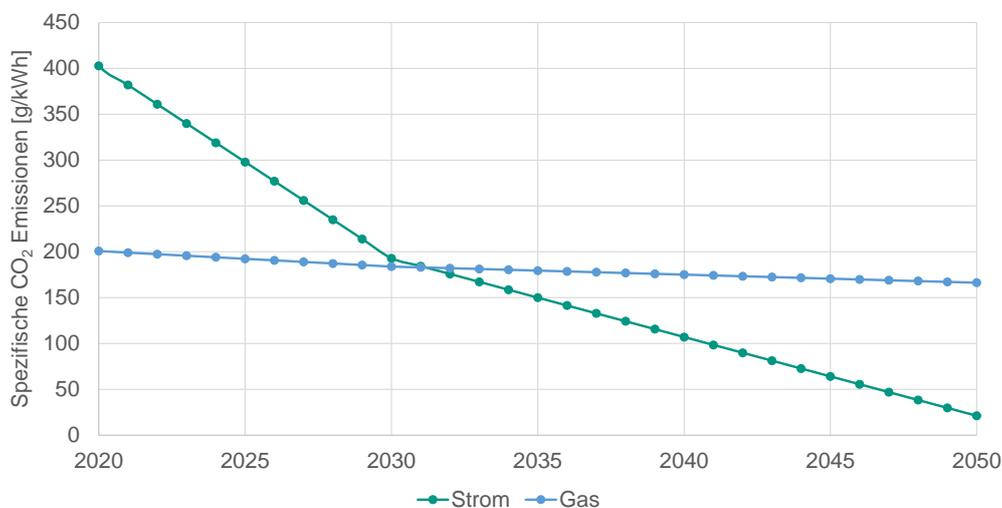


Abbildung 55: Verlauf der CO_{2,äq}-Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix (lokal) und für Gas (lokal, auf Brennwert bezogen) nach IINAS (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019).

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der CO₂-Entwicklungspfad der IINAS-Studie (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019) nicht mit dem Preispfad der EWI-Studie (Wagner et al. 2019) übereinstimmt. Somit entsteht eine Diskrepanz zwischen den Preispfaden und den Emissionspfaden, welche nicht zu vernachlässigen ist. Allerdings wird aus der EWI-Studie nicht ersichtlich, wie es sich mit den CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes verhält. Auch wird mit dem verwendeten KS95-Szenario der IINAS-Studie das Klimaziel 2050 erreicht und mit dem COP2-Szenario der EWI-Studie das Ziel knapp verfehlt. Nichtsdestotrotz repräsentieren die Ergebnisse der IINAS-Studie einen ambitionierten Klimapfad, wie er auch mit dem COP2-Szenario der EWI-Studie angestrebt wird. Daher wird für diese Studie auch aufgrund mangelnder Datenlage zu übereinstimmenden Preis- und Emissionsszenarien auf die vorgestellten Werte zurückgegriffen.

5.3 Ergebnisse der techno-ökonomischen Bewertung von Sanierungspaketen

Im folgenden Abschnitt werden die Hauptergebnisse der techno-ökonomischen und ökologischen Bewertung vorgestellt. Die detaillierteren Betrachtungen mit Sensitivitätsanalyse sowie die Beschreibung der Methodik und Datenbasis sind im Abschlussbericht zu AP 5 (Braeuer et. al. 2022) auf der LowEx-Bestand Website zu finden.

Basierend auf den festgelegten Kostenkurven für Systemkomponenten und Hüllsanierung (siehe Kapitel 5.1) sowie Preis- und CO₂-Szenarien (siehe Kapitel 5.2) wurden für definierte Referenzgebäude (siehe Kapitel 2.4) verschiedene Sanierungs-Szenarien (siehe Kapitel 2.5) mit unterschiedlichen Wärmebereitstellungssystemen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres CO₂-Einsparpotenzials

untersucht. Ausgangszustand der Analysen ist jeweils ein LowEx-Referenzgebäude mit einem älteren Gas-Heizkessel, der ausgetauscht werden muss. Um die jeweiligen Strom- und Gasverbräuche zu bestimmen, wurden Systemsimulation durchgeführt (siehe Kapitel 4.7). Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde die Barwertmethode benutzt, welche den Wert von zukünftigen Zahlungen (Laufzeit bis 2045) einer Investition auf die Gegenwart (Bezugsjahr 2020) bezieht. Darin fließen sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten (Energiekosten) und Wartungskosten ein. Die Ergebnisse werden jeweils als negative, spezifische Barwerte in €/m² dargestellt – je geringer der Betrag des negativen Barwerts desto geringer sind die Ausgaben über die Lebensdauer und desto besser ist die Wirtschaftlichkeit.

Abbildung 56 a) zeigt den Barwert für unterschiedliche Wärmepumpensysteme¹ und einen Gasbrennwertkessel (Ref) bei einer Sanierung eines mittleren MFH (MMH) aus BAP 1958-78 nach GEG- (Standard S) und nach Passivhausstandard (P).

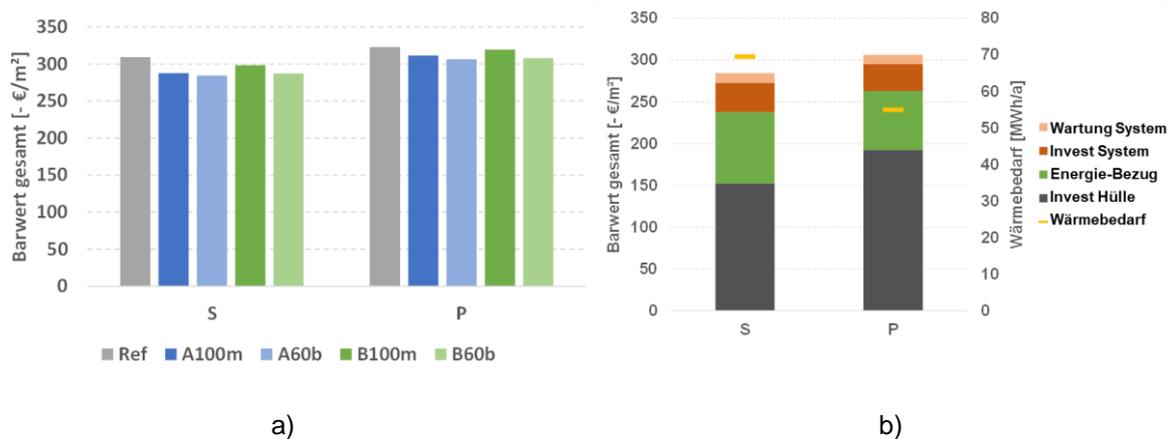


Abbildung 56: Vergleich konventionelle Sanierung nach GEG (Standard S) vs. ambitionierte Sanierung auf Passivhausniveau (Standard P) eines MMH aus BAP 1958-78 a) Barwerte der LowEx-Systeme¹, b) Aufspaltung der Barwerte von Gebäudehülle + System A60b¹.

Eine Sanierung nach Passivhausstandard (P) führt zu negativeren Barwerten, d.h. eine P-Sanierung hat höhere Gesamtkosten über die Betrachtungsdauer als es bei einer Sanierung nach GEG (S-Sanierung) der Fall wäre. Der Grund hierfür liegt in den höheren Investitionskosten bei einer anspruchsvollen Sanierung eines Gebäudes nach Passivhaus-Standard (siehe Abbildung 56 b), dargestellt für das bivalente Luftwärmepumpensystem A60b). Die aufwendige Sanierung führt zwar zu geringeren Kosten für den Energiebezug aufgrund eines erniedrigten Wärmebedarfs im Vergleich zur Sanierung nach GEG, jedoch kann dies die erhöhte Investition in die Gebäudehülle nicht ausgleichen.

Bei Betrachtung der verschiedenen Wärmepumpen-Systeme ist festzustellen, dass alle Barwerte auf einem ähnlichen Niveau liegen und geringere negative Barwerte aufzeigen als das Referenz-System (Gas-Brennwert-Kessel). Die Zusammensetzung des Barwerts der WP-Systeme (ohne Hüllsanierungskosten) in Abbildung 57 a) zeigt, dass WP-Systeme im Vergleich zum Referenz-System trotz deutlich höherer Investitions- und Wartungskosten geringere Gesamtkosten über die Laufzeit aufweisen, da die Energiebezugskosten den größten Anteil am Barwert haben und somit die Energieeffizienz der WP-Systeme auch aus wirtschaftlicher Wirkung zeigen. Dies gilt unabhängig von der Sanierungsstufe des Gebäudes. Ob Luft- oder Erdwärmepumpen eingesetzt werden, hat hierbei nur einen geringfügigen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, da die höheren Investitions- und Wartungskosten einer Erdwärmepumpe durch die höhere Effizienz (COP) und damit niedrigeren Stromkosten über den Betrachtungszeitraum weitgehend kompensiert werden.

¹ Bezeichnung der LowEx-Systeme:

A100m: Monoenergetisches Außenluft-WP-System mit elektrischem Heizstab, WP ausgelegt auf einen Bivalenzpunkt von -5°C.

A60b: Bivalentes Außenluft-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Heizleistung bei -5°C.

B100m: Monoenergetisches Erdsonden-WP-System mit elektrischem Heizstab, Bivalenzpunkt bei -5°C.

B60b: Bivalentes Erdsonden-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Heizleistung bei -5°C.

Die beiden bivalenten Heizsysteme A60b und B60b führen zu den am wenigsten negativen Barwerten bei GEG-sanierten Gebäuden. Diese Systeme bestehen aus einer Luft- oder Erd-Wärmepumpe sowie einem unterstützenden Gasheizkessel für die maximale Heizlast. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmepumpe zum einen kleiner ausgelegt werden kann, was zu geringeren Investitionskosten führt, und gleichzeitig schlechte Betriebsbedingungen vermieden werden, sodass die Energie-Bezugskosten sinken. Voruntersuchungen zur Auslegung der Wärmepumpe (siehe Abbildung 57 b)) zeigen, dass der Barwert des Heizsystems bei 60 Prozent der maximalen Heizlast den kleinsten negativen Betrag und somit die geringsten Gesamtkosten aufweist. In Folge wurde für die weiteren Analysen von bivalenten Heizsystemen eine Auslegung auf 60 Prozent der maximalen Heizlast für den Bivalenzpunkt angenommen.

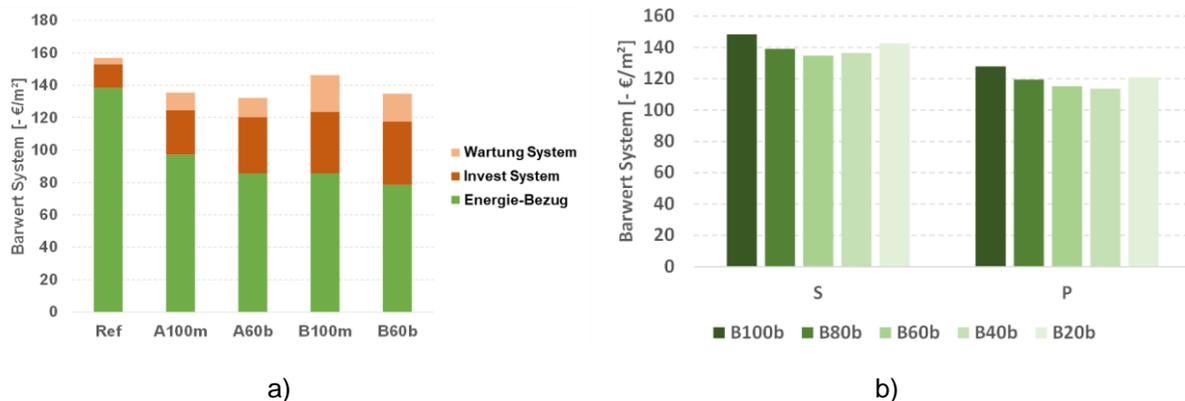


Abbildung 57: Wärmepumpen-Systeme vs. Gas-Brennwert, Zusammensetzung Barwert für MMH aus BAP 1958-78 saniert nach GEG (S-Sanierung) für a) wirtschaftlich optimierte Systeme, b) für verschiedene Dimensionierung der Wärmepumpe eines bivalenten Erdwärmepumpensystems (B100b – B20b).

Die bisher gezeigten Ergebnisse basieren auf Analysen eines MFH mit mittlerer Gebäudegröße (mittleres Mehrfamilienhaus = MMH). Um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können, inwieweit die Gebäudegröße Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpensystemen in MFH hat, wurden die Barwerte zusätzlich für ein kleines Mehrfamilienhaus (KMH) sowie ein großes Mehrfamilienhaus (GMH) berechnet. Diese Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 58 a) dargestellt.

Je kleiner das Gebäude ist, desto negativer ist der spezifische Barwert und es fallen somit höhere Kosten pro Quadratmeter Wohnfläche an. In diesem Fall ist das Verhältnis Hüllfläche zu Wohnfläche am kleinsten und Sanierungskosten verteilen sich auf eine geringe Wohnfläche. Mit Zunahme der Gebäudegröße ergeben sich Skalierungseffekte, die zu einer Verringerung der spezifischen Kosten pro Quadratmeter führen (siehe großes Mehrfamilienhaus GMH). Dieser Skalierungseffekt lässt sich ebenso in den kumulierten CO₂-Emissionen pro Quadratmeter Wohnfläche (siehe Abbildung 58 b)) erkennen. Je größer das Gebäude, desto kleiner wird das Verhältnis von Hüll- zu Wohnfläche und die spezifischen Kosten sinken.

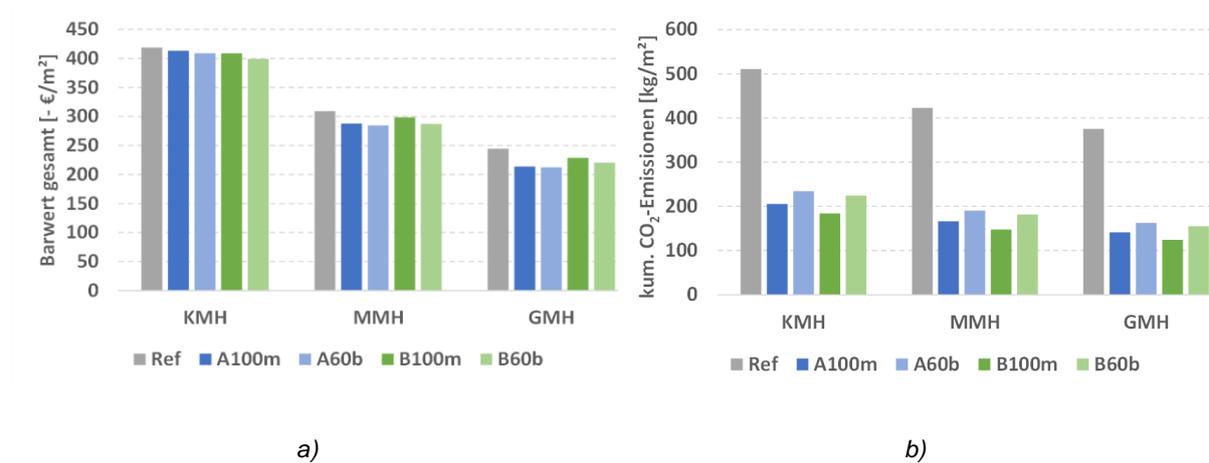


Abbildung 58: Einfluss der Gebäudegröße auf a) den Barwert sowie b) die kumulierten CO₂-Emissionen für MFH aus BAP 1958-78 saniert nach GEG (S).

Neben der Betrachtung der kumulierten Kosten ist es ebenfalls entscheidend, welche zukünftigen Verläufe für Kosten und CO₂-Emissionen zu erwarten sind. Abbildung 59 stellt hierbei die zeitliche Entwicklung der Kosten für Wärme (d.h. die jährlichen Kosten pro Quadratmeter Wohnfläche) sowie den Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen pro Jahr (unter Einbeziehung der jährlichen Emissionsfaktoren) für verschiedene Wärmebereitstellungssysteme nach Sanierung eines MMH auf GEG-Standard (S-Sanierung) dar. Zusätzlich wurde in diesem Fall eine BEG-Förderung in die wirtschaftliche Analyse mit einbezogen. Abbildung 60 zeigt den Kostenverlauf ohne BEG-Förderung.

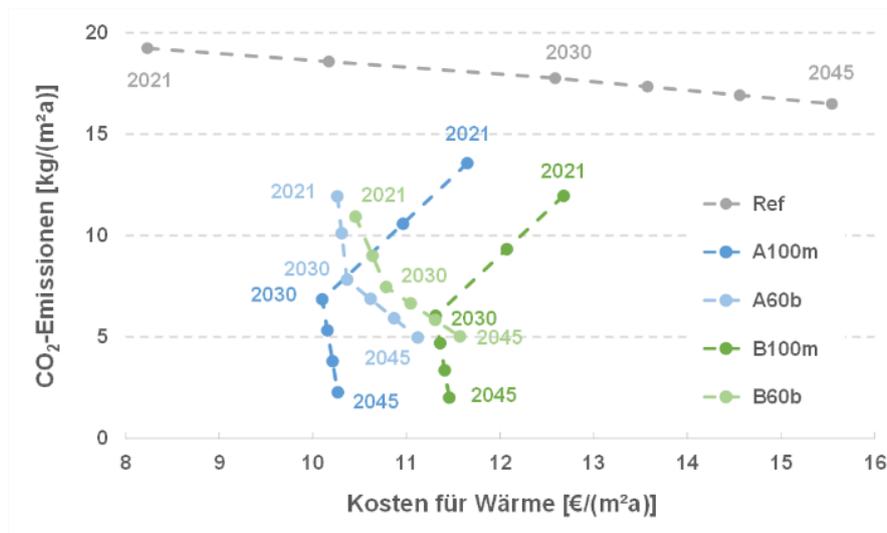


Abbildung 59: Zeitliche Entwicklung der Kosten für Wärme sowie der CO₂-Emissionen Systemvergleich für MMH aus BAP 1958-78, S-Sanierung (nach GEG) mit BEG-Förderung.

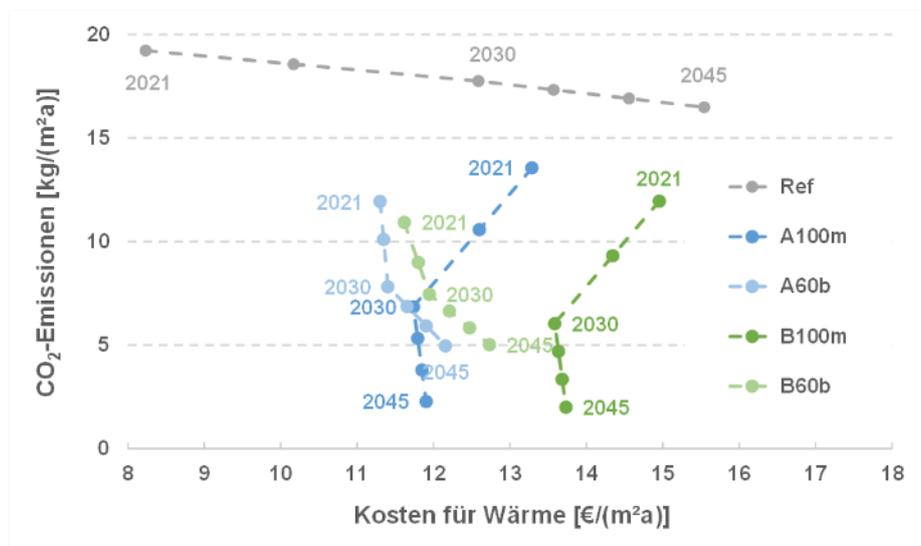


Abbildung 60: Zeitliche Entwicklung der Kosten für Wärme sowie der CO₂-Emissionen Systemvergleich für MMH aus BAP 1958-78, S-Sanierung (nach GEG) ohne BEG-Förderung.¹

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass der Einbau eines neuen Gaskessels (Ref) zwar zunächst die geringsten spezifischen Kosten für Wärme beinhaltet, jedoch werden durch Zunahme der Gaspreise langfristig die Kosten für Wärme signifikant ansteigen und deutlich über denen von WP-Systemen liegen. Durch die erwartete leichte Senkung der Strompreise in den kommenden Jahren, sinken auch die jährlichen Kosten für Wärme im Falle der monoenergetischen WP-Systeme A100m und B100m. Bei den bivalenten WP-Systemen A60b und B60b, die mit Strom und Erdgas betrieben werden, steigen die Wärmekosten leicht an.

Ohne Förderung nach BEG (siehe Abbildung 60) sind die Wärmekosten von WP-Systemen im Vergleich zur Referenz erhöht. Langfristig zeigt sich hier jedoch auch der Effekt, dass die Wärmekosten geringer sein werden als bei Nutzung eines Gaskessels. Ohne Förderung fallen die Wärmekosten von WP-Systemen 1,0 bis 2,3 €/m²a höher aus als mit Förderung.

Beim Gaskessel liegen die jährlichen CO₂-Emissionen durchgehend höher als bei WP-Systemen. Die CO₂-Emissionen der LowEx-Systeme sinken durch den erwarteten ansteigenden Anteil an Erneuerbaren Energien im Strommix, während beim Energieträger Erdgas wenig Reduktionspotenzial gesehen wird. Somit wächst der ökologische Vorteil der Wärmepumpensysteme mit jedem Jahr weiter an.

5.4 Serielle Sanierung und Sanierungspfade mit Wärmepumpen-Systemen

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde eine Methodik zur Entwicklung von kostenoptimierten Sanierungspfaden für seriell-sanierete Mehrfamiliengebäude entwickelt (Vollmer 2022). Die Methodik widmet sich der zentralen Frage „Wann sollte welche Gebäude- und System-Komponente wie saniert werden, um eine möglichst optimale Wärmeversorgung bzgl. Kosten und CO₂ von Bestands-MFH mit Wärmepumpen zu erreichen?“.

Dazu wurde in der Simulationsumgebung MATLAB ein Partikel-Schwarm-Optimierer mit einem Gebäude- und einem Wärmepumpenmodell gekoppelt und hinsichtlich Kosten und CO₂-Emissionen optimiert. Neben fünf Komponenten der Gebäudehülle (Fenster, Wand, Decke, Boden, Dach) werden drei Wärmeerzeuger (Gaskessel, Luft-Wärmepumpe, Erdsonden-Wärmepumpe) individuell betrachtet.

¹ Bezeichnung der LowEx-Systeme:

A100m: Monoenergetisches Außenluft-WP-System mit elektrischem Heizstab, WP ausgelegt auf einen Bivalenzpunkt von -5°C.

A60b: Bivalentes Außenluft-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Heizleistung bei -5°C.

B100m: Monoenergetisches Erdsonden-WP-System mit elektrischem Heizstab, Bivalenzpunkt bei -5°C.

B60b: Bivalentes Erdsonden-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Heizleistung bei -5°C.

Das Optimierungsmodell betrachtet einen Zeitraum bis zum Jahr 2045 und wählt neben dem Ausführungszeitpunkte auch die umgesetzte Maßnahme an Gebäudehülle und Wärmeversorgungssystem. Darüber hinaus werden Kopplungseffekte zwischen Sanierungsmaßnahmen und Wärmeversorgungstechnologien berücksichtigt, wie z.B. die Abhängigkeit des COP von der Vorlauftemperatur, die wiederum eine Funktion des Dämmstandards ist. Mit Hilfe von Kostenfunktionen und ökonomischen Parametern zielt der Sanierungsfahrplan darauf ab, möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen.

Die Funktionalität und der Mehrwert des neu entwickelten optimierten Sanierungsfahrplans wird durch die Erhöhung der Freiheitsgrade des Optimierers erfolgreich demonstriert. Die Roadmap ist dabei unabhängig von subjektivem Expertenwissen, einer zeitlichen Kopplung bei der Sanierung oder dem Austausch von Komponenten und berücksichtigt die zeitliche Entwicklung von Kosten, spezifischen CO₂-Emissionen, etc. Je nach Anzahl der variablen Parameter ermöglicht die Optimierung Kosteneinsparungen zwischen 5-19 % und CO₂-Einsparungen zwischen 5-66 % über den betrachteten Zeitraum.

Abbildung 61 zeigt beispielhaft den optimierten und individuellen Sanierungsfahrplan für ein mittleres Mehrfamiliengebäude aus der Baualtersklasse der 70er Jahr. Die Grafik besteht aus sechs Auswertungen und fasst die zentralen Informationen des Sanierungsfahrplanes zusammen:

- Darstellung der Sanierungstiefe und Umsetzungszeitpunkte für die Sanierung der Gebäudehülle: Das Sanierungsniveau wird als Wärmedurchgangskoeffizient und der Umsetzungszeitpunkt als Symbol (Kreuz = Fenster, Kreis = Wand, Stern = Decke, Dreieck = Boden, Raute = Dach) angegeben.
- Darstellung der Heizleistung und Einbauzeitpunkte der Wärmeerzeuger: Parallel zur Gebäudehülle werden die Umsetzungszeitpunkte als Symbol (Quadrat) angegeben. Zusätzlich zur Heizleistung der einzelnen Erzeuger wird auch die Summe aller verbauten Wärmeerzeuger angegeben.
- Aufteilung des spez. Energiebedarfes pro Quadratmeter konditionierter Gebäudefläche nach Art der Bereitstellung (Wärmeerzeuger) und Art der Verwendung (RW, TWW): Der TWW-Anteil eines einzelnen Erzeugers ist hell eingefärbt und der gesamte TWW-Anteil über alle Erzeuger ist als Fläche oberhalb der rot gestrichelten Linie angedeutet.
- Visualisierung des zeitlichen Verlaufes der auf die konditionierte Gebäudefläche bezogen spez. CO₂-Emissionen über den Betrachtungszeitraum.
- Allgemeine Informationen bzgl. des Nettobarwertes und der kumulierten CO₂-Emissionen zur Einordnung der Ergebnisse. Für einen Vergleich mit unterschiedlichen Gebäudegrößen und Baualtersklassen sind beide Werte auch als LCOH (Levelized Cost of Heat) bzw. spez. CO₂-Emissionen pro Quadratmeter konditionierter Gebäudefläche angegeben. Der LCOH-Wert berechnet sich aus dem Verhältnis des NBW mit der erzeugten Wärmemenge über den Betrachtungszeitraum.

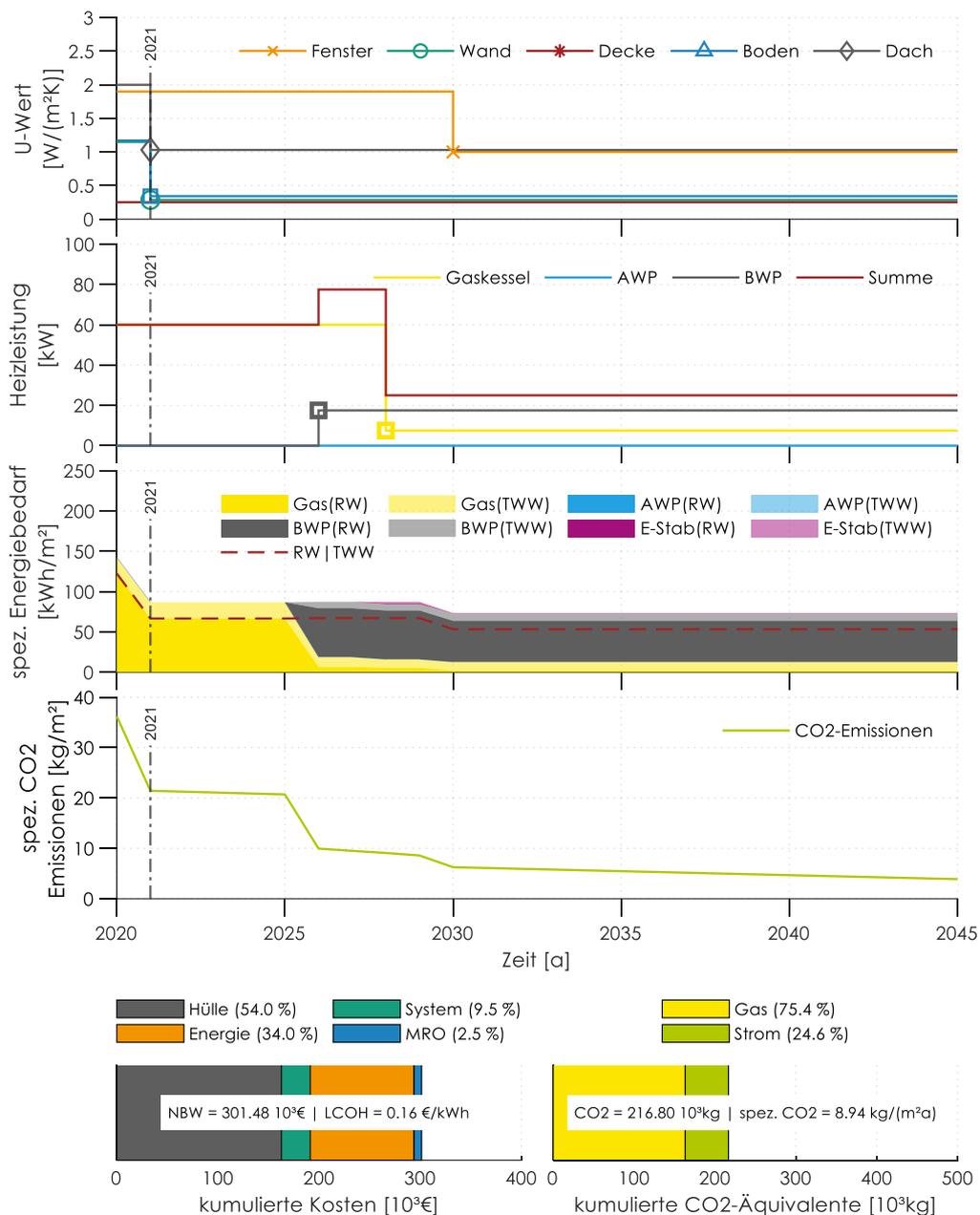


Abbildung 61: Optimierter Sanierungsfahrplan für ein mittleres Mehrfamiliengebäude aus der Baualtersklasse der 70er Jahre mit Angaben zum Barwert, CO₂-Emissionen, Sanierungsniveau und Umsetzungszeitpunkte sowie der zeitliche Verlauf von Wärmegestehungskosten und CO₂-Emissionen.

Weiterführende Informationen zur Methodik und Ergebnissen sind in Vollmer 2022 und Vollmer et al. 2022 zu finden.

5.5 Schlussfolgerungen

Die detaillierte techno-ökonomische und ökologische Untersuchung des Einsatzes von Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand zeigt:

- CO₂-Emissionen:
 - Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme weisen über den Betrachtungszeitraum kumuliert mehr als 50 % Emissions-Reduktion gegenüber einem Gas-Brennwert-Kessel auf.

- Die CO₂-Emissionen sind stark abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien bei der genutzten Elektrizität.
- Mit den getroffenen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung von CO₂-Emissionen werden bis 2045 spezifische CO₂-Emissionen von ca. 2.5 kg/m²a bei monoenergetischen Systemen und ca. 5 kg/m²a bei bivalenten Systemen erwartet. Im Vergleich dazu liegen die spezifischen Emissionen eines Gaskessels bei 17 kg/m².
- Wärmegestehungskosten:
 - Die untersuchten WP-Systeme weisen deutlich höhere Investitionskosten als der Einbau eines Gas-Brennwertkessels auf. Zur Überwindung dieser Hürde ist ein Investitionszuschuss als Förderung sinnvoll.
 - Mit Förderung zeigen die untersuchten WP-Systeme über den Betrachtungszeitraum deutlich geringere Wärmegestehungskosten als Gas-Brennwertkessel.
 - Luft- und Erdreich-WP schneiden wirtschaftlich ähnlich ab; bei Luft-WP sind die Energie-Bezugskosten höher, bei Erdreich-WP die Investitionskosten.
 - Die System-Varianten monoenergetisch und bivalent unterscheiden sich bei optimaler Auslegung wirtschaftlich kaum.
- Robustheit der Ergebnisse:
 - Die MFH-Gebäudegröße hat einen geringen Einfluss auf das Ergebnis des Systemvergleichs.
 - Die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von WP-Systemen gegenüber Gas-Brennwertkesseln stellt sich robust gegenüber einer Variation der Studien-Annahmen dar.
 - Der Emissionsvorteil von monoenergetischen WP gegenüber bivalenten WP-Systemen ist weniger robust, weil er stark vom Anteil Power-to-Gas bzw. von grünem Wasserstoff im Gasnetz abhängt.

Für Details und weitere Ergebnisse verweisen wir auf den Abschlussbericht zu AP 5 (Braeuer et. al. 2022).

6 Komfort-Untersuchungen und Regelungsentwicklung dezentraler Lüftungstechnik

6.1 Komfortuntersuchungen an Deckenstrahlungsheizungen

Deckenstrahlungsheizungen sind eine interessante Option für LowEx-Systeme, da sie – wie andere Flächenheizungen auch – mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben werden können, im Vergleich zu Fußbodenheizungen aber Vorteile bzgl. der Eingriffstiefe bei Sanierungen aufweisen. Als kritisch angesehen wurde bislang häufig – insbesondere im Wohnungsbau mit geringeren Raumhöhen – die Nähe der warmen Oberfläche zum Kopf. So soll gemäß prEN 1264-3:2020 bei Deckenheizungen die mittlere Oberflächentemperatur für Räume mit einer Höhe von weniger als 2,7 m 32 °C nicht überschreiten, da höhere Temperaturen im Überkopfbereich eher als unangenehm empfunden werden. Weiterhin muss eine mögliche Strahlungstemperatursymmetrie aufgrund von Temperaturunterschieden an den Oberflächen der Raumumschließungsflächen, vornehmlich der Außenfassade(n), beachtet werden.

Aus diesem Grund wurden die Komfortbedingungen in einem Raum mit Deckenstrahlungsheizung sowohl experimentell mit Probanden in dem Raumklima-Teststand LOBSTER des KIT als auch mit numerischen Simulationen durch die Kopplung eines CFD-Modells mit einem thermophysiologicalen Modell untersucht. Variiert wurden dabei Deckenoberflächentemperaturen, die wärmetechnische Qualität der Außenfassade (und damit die Fensteroberflächentemperatur), Raumtypen (eine oder zwei Außenfassaden) sowie die Position der Probanden/des thermischen Manikins zur Außenfassade mit Fenster.

Laut den experimentellen Ergebnissen und den numerischen Simulationen führt die Deckenstrahlungsheizung nicht zu einer nennenswerten Temperaturschichtung im Raum. Im Gegensatz zu einem konventionellen Heizkörper mit hohen Vor-/Rücklauftemperaturen, der die Raumluft überwiegend durch Konvektion direkt erwärmt, heizt die großflächige warme Decke die anderen Raumbooberflächen durch direkte Strahlung auf. Dadurch erwärmen diese das Raumluftvolumen mehr oder weniger gleichmäßig aus allen Richtungen, was zu einer nahezu einheitlichen Lufttemperatur führt. Im Falle eines nicht-adiabaten Fußbodens können in der Realität aber auch niedrigere Fußbodentemperaturen aufgrund der Wärmeverluste auftreten (Li et al. 2015). Für die simulierten Szenarien beträgt die minimal, d.h. bei einer wärmetechnisch schlechteren Außenfassade ($U_{\text{Wand}} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{Fenster}} = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), erforderliche Deckentemperatur für ein angenehmes globales Wärmeempfinden 25 °C, ebenso für den globalen (auf den ganzen Körper bezogenen) Komfort. Abbildung 62 zeigt dazu beispielhaft das simulierte Wärmeempfinden (global und an verschiedenen Körperteilen) einer Person für zwei verschiedene Positionen im Raum und Fenster mit unterschiedlicher Qualität.

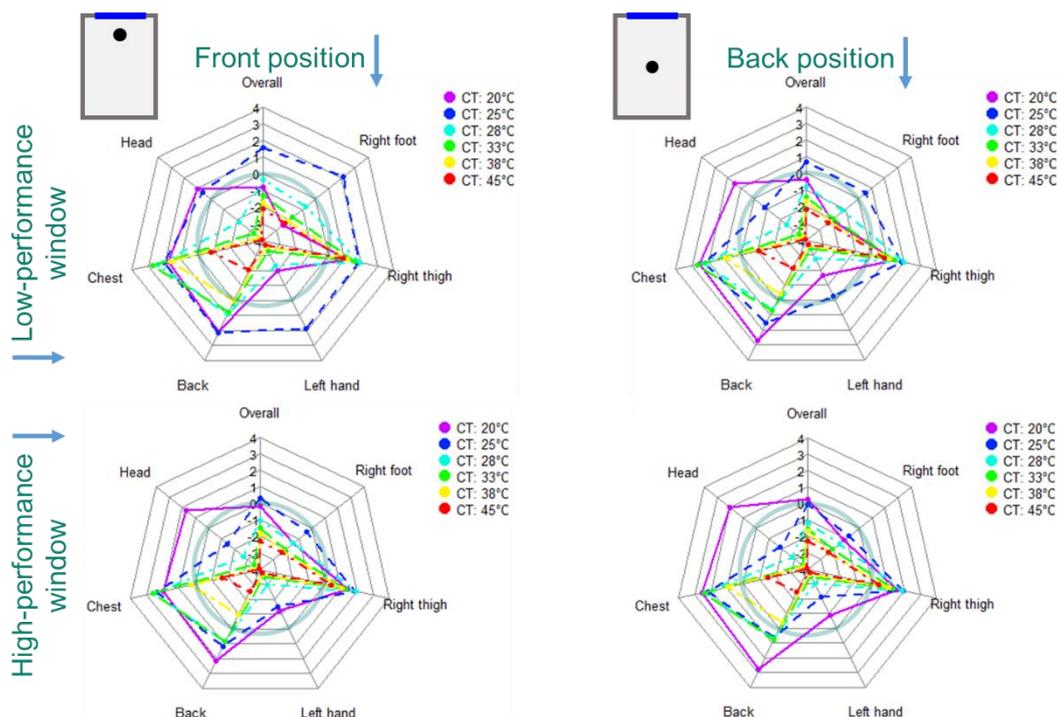


Abbildung 62: Allgemeines und lokales Wärmeempfinden an ausgewählten Körperteilen bei unterschiedlichen Deckentemperaturen, wärmetechnischen Qualitäten der Fassade (Fenster: high-/low-performance window) und Positionen des Manikins für den mittleren Raum; CT ist die Deckentemperatur. 9-Punkte-Skala der Wärmeempfindung: von „sehr kalt, -4“, „kalt, -3“, „kühl, -2“, etwas kühl, -1“ über „neutral, 0“ zu „etwas warm, +1“, „warm, +2“, „heiß, +3“, „sehr heiß, +4“.

Das asymmetrische Wärmeempfinden in Räumen mit Deckenstrahlungsheizung ist bei ausreichend hoher wärmetechnischer Qualität der Gebäudehülle vernachlässigbar wegen des Wärmeaustausches zwischen Deckenstrahlungsheizung und den übrigen Raumoberflächen. Dies ist insbesondere wichtig bei Räumen mit zwei Außenfassaden.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass der Einsatz einer Deckenstrahlungsheizung schon bei relativ niedrigen Deckentemperaturen zu einem thermisch komfortablen Raumklima führt, wenn die thermische Qualität der Gebäudehülle auf dem in dieser Studie angenommenen Niveau liegt. Insgesamt kann also die Deckenstrahlungsheizung aus bauphysikalischer Sicht als eine vielversprechende Option bei der energetischen (Gesamt-)Sanierung eines Gebäudes betrachtet werden.

Weiterhin wurde ein Niedertemperatur-Konvektorheizkörper untersucht, der eine interessante Alternative zu herkömmlichen Heizkörpern darstellt. Im Vergleich zu anderen Niedertemperatursystemen wie Deckenstrahlheizung und Fußbodenheizung erfordern sie nur einen sehr geringen Aufwand für den Austausch. Aufgrund der Wärmeaustauschflächen des zusätzlichen Konvektors und der erzwungenen Konvektion wird eine höhere Wärmeleistung im Vergleich zu einem herkömmlichen Heizkörper erreicht; darüber hinaus kann der Konvektorheizkörper auch zur Luftankühlung eingesetzt werden.

In einer experimentellen Probandenstudie wurde dazu ein Prototyp der Fa. KERMI untersucht (siehe Abbildung 63). Ziel war es, die Wirkung des Konvektorheizkörpers auf den Nutzerkomfort, insbesondere auf das allgemeine und lokale Wärmeempfinden und die thermische Akzeptanz im Winter und im Sommer zu untersuchen.

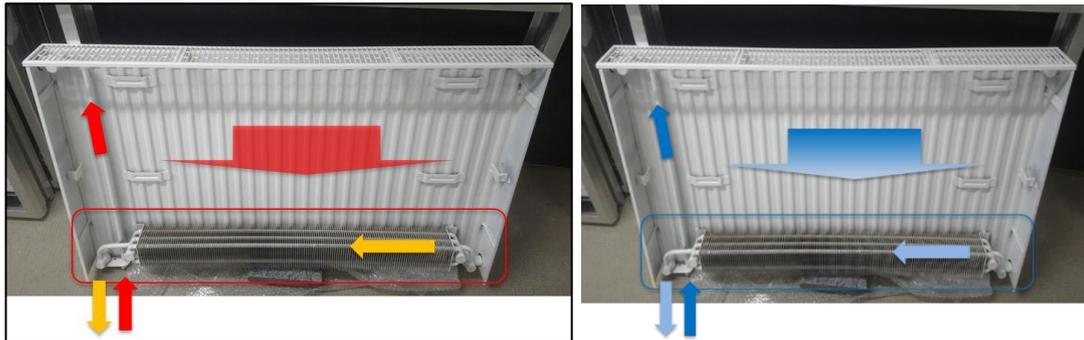


Abbildung 63: Prototyp für einen Niedertemperatur-Konvektorheizkörper der Fa. KERMI – schematische Darstellung der Durchströmung für den Heiz- und Kühlfall.

Für den Heizfall wurden 4 Szenarien untersucht, in denen der Zuluftvolumenstrom zwischen 30 m³/h und 60 m³/h und der Abstand der Probanden zum Heizkörper zwischen 1 m und 3 m variierten. Dabei schneidet der Konvektorheizkörper hinsichtlich der Zufriedenheit im Vergleich zu einem konventionellen Heizkörper besser ab. Jedoch bewerten die Teilnehmer das allgemeine Wärmeempfinden für alle Szenarien und beide Systeme gleichermaßen mit etwas kühl. Dies ist auf die gewählten (normkonformen) Randbedingungen zurückzuführen – die großen Raumoberflächen auf relativ geringem Temperaturniveau dominieren das Wärmeempfinden und der Einfluss der unterschiedlichen Heizkörper wird dadurch nur bedingt sichtbar. So hat auch die Luftherwärmung durch den Konvektorheizkörper auf das Wärmeempfinden keinen merklichen Einfluss.

Für den Kühlfall wurden 2 Szenarien untersucht, in denen der Zuluftvolumenstrom ebenfalls zwischen 30 m³/h und 60 m³/h variierte; der Abstand der Probanden zum Heizkörper betrug hier jedoch immer 1 m. Dem Konvektorheizkörper wurde vorgekühlte Frischluft aus dem fassadenintegrierten Wärmerückgewinnungssystem zugeführt, die am Konvektor (Vorlauftemperatur 20 °C) weiter gekühlt wurde. Hier lassen die überwiegend neutralen Bewertungen hinsichtlich des Wärmeempfindens auf komfortable Raumklimabedingungen schließen. Zwischen den beiden Szenarien war nur ein geringer Unterschied festzustellen, d.h. das Wärmeempfinden wurde durch die anströmende Luft offensichtlich nicht wesentlich beeinflusst. In beiden Szenarien nahm die Mehrzahl der Teilnehmer die Luftströmung gar nicht oder nur sehr schwach wahr; die Luftgeschwindigkeiten lagen deutlich unter 0,2 m/s.

Der zusätzlich gemessene Schallpegel wurde unabhängig von der Höhe des Luftvolumenstroms von nahezu allen Teilnehmern wahrgenommen. Das zweite Szenario (Luftvolumenstrom von 60 m³/h) wurde von den Teilnehmern entsprechend dem gemessenen Schallpegel – als deutlich lauter empfunden als das erste Szenario.

Für weitere Untersuchungen – sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall – müssen experimentelle Randbedingungen mit deutlicheren Unterschieden gewählt werden, um den Effekt einzelner Größen deutlicher zu erfassen. Grundsätzlich gibt es jedoch für beide Einsatzfälle – Heizen und Kühlen – Evidenz dafür, dass mit dem Niedertemperatur-Konvektorheizkörper ein komfortables Raumklima geschaffen wird. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, z.B. durch ein eigenes Gebläse, kann den zusätzlichen Heiz- und Kühleffekt mit Sicherheit steigern.

Die zentralen Ergebnisse wurden ebenfalls in Safizadeh et al. 2019 und im Abschlussbericht zu AP 2.2 "Bewertung von Wärmeübergabesystemen im Hinblick auf Raumkomfort" veröffentlicht.

6.2 Dezentrale Lüftungssysteme für Bestandsgebäude

Aufgrund der Zielsetzung den Gebäudebestand in Europa und Deutschland energetisch zu modernisieren, wurden bisher vor allem die Transmissionswärmeverluste betrachtet (BMU 2021). Für eine weitere Reduktion der Wärmeverluste kommt es jedoch zunehmend auch auf die Reduktion der Lüftungswärmeverluste an (FGK 2011). Außerdem kommt eine Studie von Hartmann (2022) zum Schluss, dass eine äquivalente Leistungszahl der Wärmerückgewinnung über Lüftungsanlagen etwa viermal höher liegt als die Leistungszahlen, welche mit typischen Wärmepumpen erzielt werden können.

Vor diesem Hintergrund erfahren die Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung nach einer Periode seichten Wachstums seit wenigen Jahren wieder steigendem Interesse. Dieser Zuwachs wird nach van Holsteijn et al. (2020) besonders deutlich bei den dezentralen Zu- und Abluftsystemen (ZuAbLS).

Im Rahmen des Projekts wurde eine Untergruppe dieser dezentralen ZuAbLS eingehender untersucht. Konkret handelte es sich um ein System aus fassaden-integrierten Einzelgeräten, welche im Regelbetrieb paarweise alternierend entgegengesetzt werden. In der DIN EN 13141-8 Entwurf (2021) vereinfachend als „Umschalt-Lüftungseinheiten“ und umgangssprachlich als „Pendellüfter“ bezeichnet. Ein typischer Aufbau eines solchen Gerätepaars ist in Abbildung 64 dargestellt.

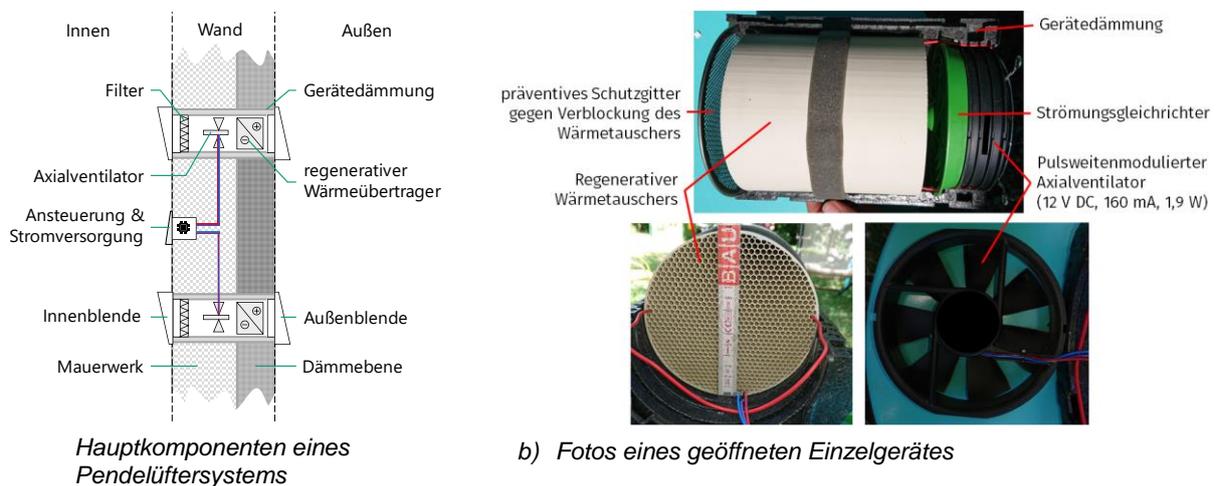


Abbildung 64: Ein Pendellüftersystem als schematische Darstellung der Hauptkomponenten sowie Fotos eines geöffneten Einzelgerätes (Auerswald 2022).

Der paarweise Einsatz der Geräte ist notwendig, um die Massenbilanz aus Zu- und Abluft erreichen zu können. Für den Regelbetrieb mit aktivierter Wärmerückgewinnung werden die Geräte wie in Abbildung 65 dargestellt entgegengesetzt synchronisiert betrieben. Dadurch wird mithilfe der Abluft ein regeneratives Speicherelement in den Geräten mit Wärme beladen. Im sich anschließenden

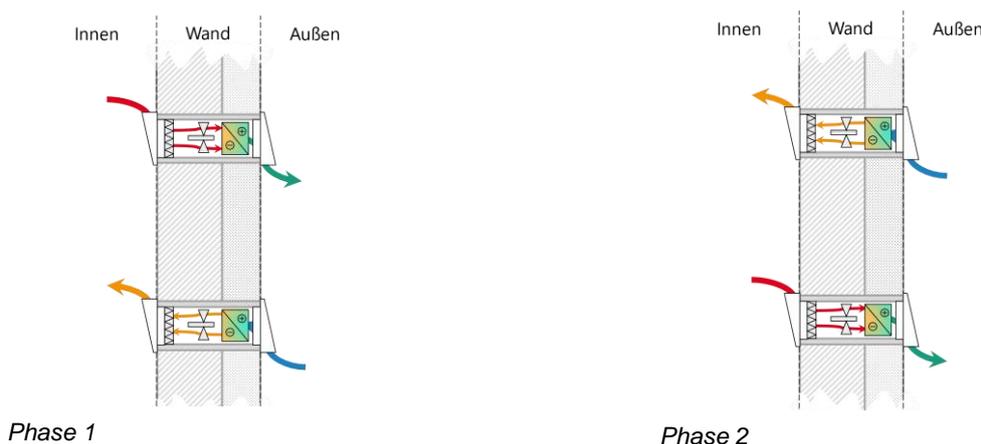


Abbildung 65: Regelbetriebs eines Pendellüftersystems mit aktivierter Wärmerückgewinnung (Auerswald 2022).

Zuluftbetrieb wird die eingespeicherte Wärme auf die Zuluft entladen.

6.3 Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungssysteme

Da die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden zu einer erhöhten Luftdichtheit der Gebäudehülle führt, hat die Bedeutung der Nachrüstung von Lüftungstechnik auch im Gebäudebestand deutlich zugenommen. Aufgrund ihrer einfachen Integrierbarkeit werden zunehmend dezentrale

Lüftungsgeräte in alternierender Betriebsweise (Pendellüfter) eingesetzt. Für diese wurden im Rahmen des Projekts verschiedene nutzerorientierte Regelungsstrategien zur Lüftung von Wohngebäuden erarbeitet und miteinander verglichen. Im Fokus standen dabei eine neuartige selbstlernende Regelungsstrategie, die auch in einer bewohnten Testwohnung umgesetzt und demonstriert wurde.

Grundlage für die Entwicklung der Regelungsstrategien waren die Anforderungen an die Wohnungslüftung, insbesondere Energieeffizienz, hygrothermischer Komfort und Raumluftqualität. Die Energieeffizienz wird durch die Wärmerückgewinnungseffizienz des Lüftungssystems und den Stromverbrauch des Ventilators bestimmt. Ein energieeffizientes System ist nicht nur für den Nutzer aufgrund der möglichen Einsparungen interessant, sondern auch für den Hersteller als zusätzliches Verkaufsargument. Für die Performance-Bewertung von Wohnungslüftungssystemen hinsichtlich Komfort und Raumluftqualität werden Leistungsindikatoren auf der Grundlage von Akzeptanzgrenzen für die relative Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration definiert. Die relative Luftfeuchtigkeit ist nicht nur im Zusammenhang mit dem Gebäudeschutz (Schimmelpilzrisiko) bedeutsam, sondern sie beeinflusst auch signifikant die Vermehrung von Viren und Bakterien. Die CO₂-Konzentration ist aufgrund ihrer hohen Korrelation mit menschlichen Bioeffluenten eine gängige Regelgröße für die bedarfsgesteuerte Lüftung. Im Sommer wird noch die Raumtemperatur zu einer relevanten Variablen, da sie den thermischen Komfort bestimmt und damit den Erfolg einer (Nacht-) Lüftungsstrategie zur Abfuhr von Kühllasten. Hinzu kommen noch Aspekte wie Geräuschentwicklung, Nutzerfreundlichkeit und äußere Einflüsse (Wetter und Gebäudeeigenschaften), die ebenfalls untersucht wurden. Insbesondere die Geräuschentwicklung, die proportional zum Logarithmus des Volumenstroms ist, spielt eine Schlüsselrolle für die Akzeptanz von Wohnungslüftungssystemen.

Nach der Definition der Zielsetzungen für Lüftungssysteme wurden drei innovative Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungssysteme erarbeitet, bei denen die Nutzerorientierung im Mittelpunkt steht. Davor wurden eine Marktrecherche und eine wissenschaftliche Publikationsrecherche zur Sondierung des aktuellen Standes der Technik durchgeführt. Neben dem manuellen Betrieb basieren die fortschrittlichsten Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung auf bedarfsgeregelten Strategien. Die relative Feuchte und die CO₂-Konzentration sind die primär kontrollierten Größen. Außerdem wurden zwei Hauptschwächen identifiziert: Es wird jeweils nur eine Variable geregelt und es gibt einen bestätigten Mangel an bewohnerzentrierten Strategien, bei denen deren vielfältige Entscheidungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die verfügbaren bedarfsgeregelten Lösungen wurden zwei innovative vollautomatische Regler entwickelt, mit dem Ziel, nach multivariablen Reglern zu suchen, bei denen sowohl die relative Luftfeuchtigkeit als auch CO₂ zusammen ohne Nutzerrückmeldung berücksichtigt werden. Der erste war ein Regler mit einer Kostenfunktion, bei dem die Lüfterdrehzahl durch die Variable bestimmt wird, die die höchste Unzufriedenheit aufweist, basierend auf Kurven aus der Literatur. Der zweite war ein fuzzybasierter Regler. Seine Zugehörigkeitsfunktionen werden ebenfalls mit Unzufriedenheitswerten aus der Literatur definiert. Die resultierenden Zugehörigkeitsfunktionen und die Interpretationsregeln werden mit Expertenwissen bestimmt. Es wurde ein Regelfeld für die Ventilator-drehzahl vorgeschlagen, das auf momentanen Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der CO₂-Konzentration basiert (siehe Abb. 1). Fuzzybasierte Regler sind bereits eine bewährte Technologie und wurden in mehreren Regelungssystemen in verschiedenen Bereichen erfolgreich eingesetzt.

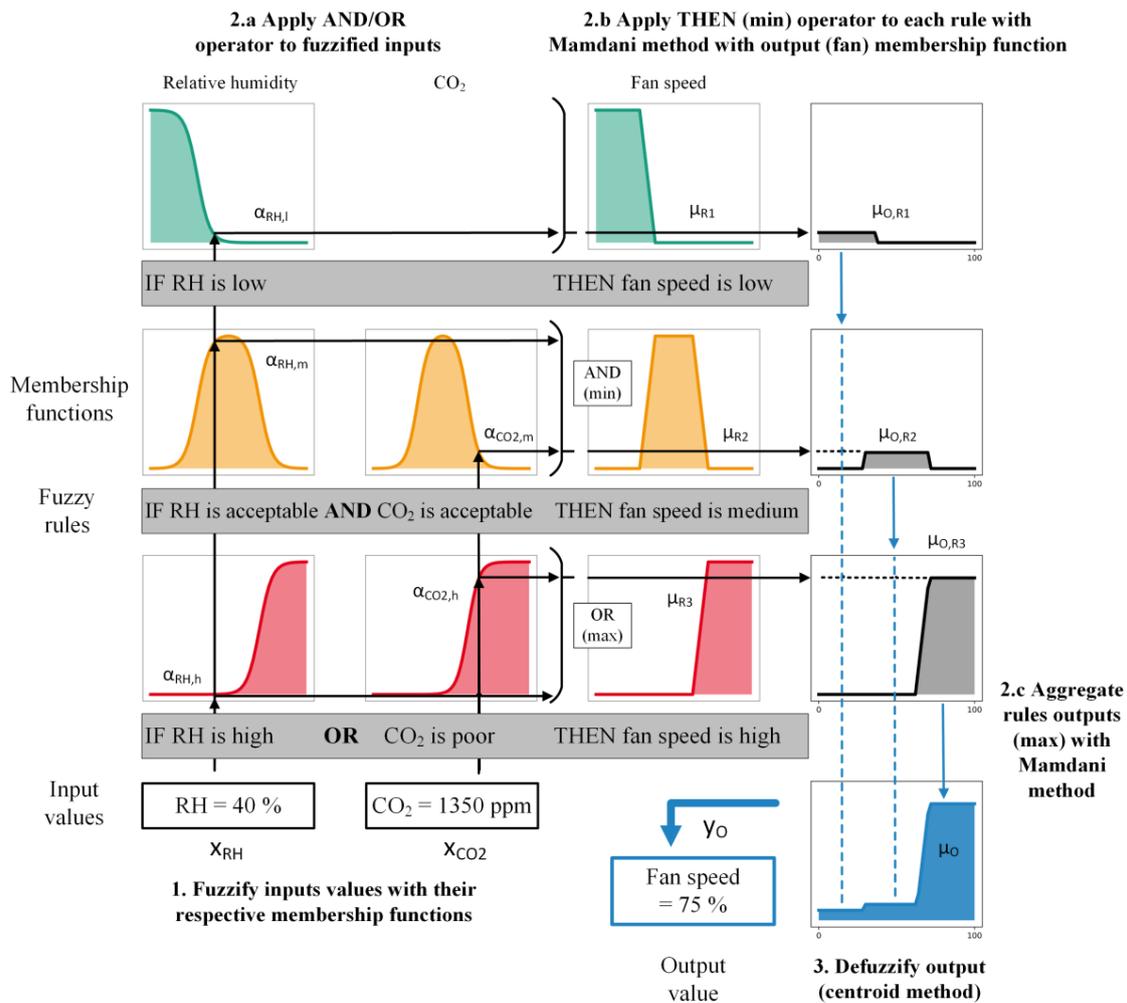


Abbildung 66: Beispiel des Ablaufs einer Fuzzylogik.

Um den Mangel an nutzerorientierten Lösungen zu beheben, wurde eine selbstlernende bedarfsgeregelte Lüftungsstrategie vorgeschlagen, bei der das Komfortprofil des Nutzers bezüglich relativer Luftfeuchtigkeit und CO₂ durch einen überwachten Lernalgorithmus erlernt wird. Standard-Komfortprofile wurden mit Hilfe von Ansätzen in der Literatur definiert. Um die Nutzervielfalt für die mechanische Lüftung in der Gebäudesimulation zu testen, wurden vier verschiedene Nutzerkomfortmodelle (mit der relativen Luftfeuchtigkeit und CO₂ als Eingangsvariablen) und drei Nutzerinteraktionsmodelle (aktiv, mittel und passiv) entwickelt. Die Profile wurden in ein probabilistisches Modell integriert, das die manuelle Wahl der Lüftungsstufe als ein zeitabhängiges Nutzerverhaltensmodell simuliert. Dieses Nutzermodell wurde auf ein Lernverfahren angewendet, um deren Leistungsfähigkeit und Lernfähigkeit zu charakterisieren (siehe Abb. 2). Das Lernen stabilisiert sich für alle Nutzertypen nach 60 Abstimmungen. Die selbstlernende Regelung bietet eine Lösung für dezentrale Wohnungslüftungssysteme, die sich an unterschiedliche Nutzerprofile anpassen können. Zur Bewertung der Auswirkungen dieses Reglers auf die Raumluftqualität und den Energieverbrauch ist eine Umsetzung dieser Lösung in der Praxis notwendig.

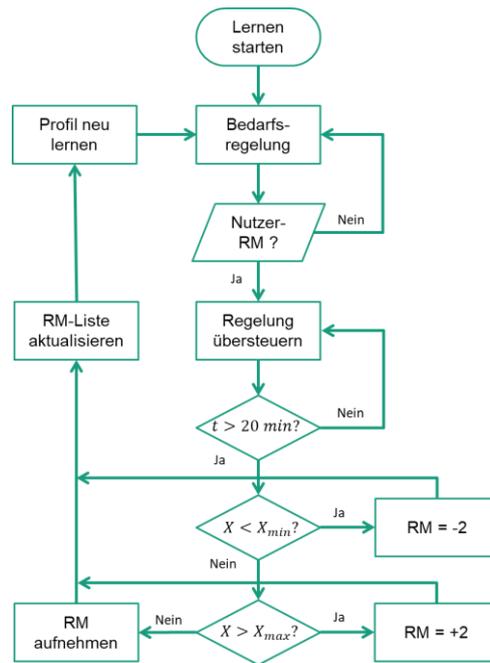


Abbildung 67: Ablauf der selbstlernenden Regelung (Nutz-RM = Nutzerrückmeldung).

Die selbstlernende Regelungsstrategie wurde anschließend in einem Living Lab prototypisch implementiert und getestet. Dazu wurde eine Feldstudie im Energy Smart Home Lab auf dem Hauptcampus des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt, in dem zwei Bewohner drei Monate lang lebten und somit eine möglichst reale Wohnsituation abgebildet werden konnte. Für diesen Versuch wurde ein IoT-Schema mit einer Nutzerschnittstelle entwickelt, über die die Bewohner die Lüftungsanlagen wie gewünscht bedienen konnten. Die Regelung lernte durch das Nutzerfeedback, sich an die Bedürfnisse der Bewohner anzupassen.

Das installierte dezentrale Lüftungssystem überzeugte durch einen ausreichenden Luftaustausch, um die Leistungsindikatoren für die relative Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration im gewünschten Bereich zu halten. Der Energieverbrauch konnte in dem Versuch nicht erfasst werden. Die vorgeschlagene selbstlernende Strategie konnte die Regelfelder in jedem Raum individuell und zufriedenstellend anpassen (siehe Abbildung 68). In der Küche und im Wohnzimmer wurde in der Regel die Lüftungsstufe erhöht, während in den Schlafzimmern die Luftmenge meist verringert wurde. Auch wenn längere Lernzeiten berücksichtigt werden sollten, konnte ein raumindividuelles Lernschema die Singularitäten des Nutzerverhaltens in jedem Raum korrekt erfassen.

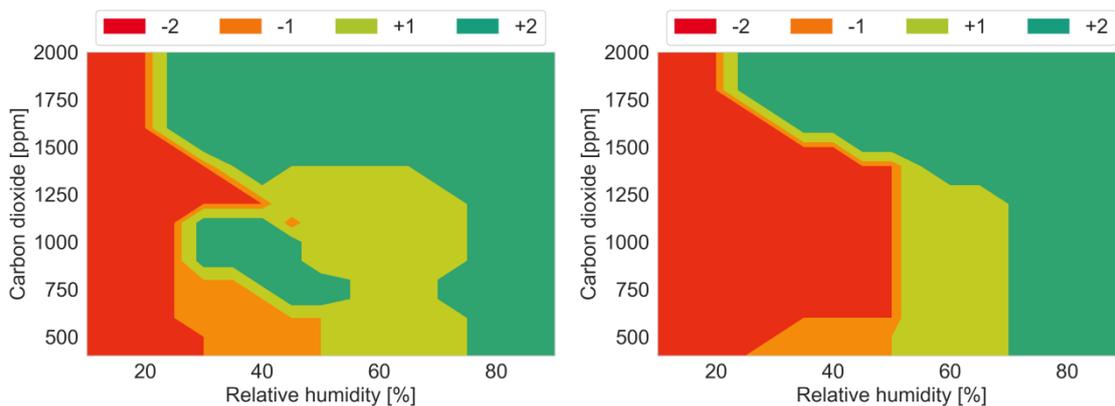


Abbildung 68: Resultierende gelernte Regelungsfelder in dem Feldversuch für die Küche (links) und das Schlafzimmer 1 (rechts) am Ende der Messperiode. Die farbigen Bereiche stellen die Vorhersage der Nutzerrückmeldung dar; die Zahlen repräsentieren die Nutzerrückmeldungen der Nutzer (von "-2 – deutlich geringerer Luftaustausch" bis "+2 – deutlich höherer Luftaustausch").

Die Bewohner waren mit der Leistung der installierten Geräte zufrieden und hoben die Entwicklung der Nutzerschnittstelle hervor. Andererseits wurden die lauten Geräusche in den Schlafzimmern und die mangelnde Programmierbarkeit kritisiert. Smarte Wohnungslüftungssysteme wurden zwar als nützlich empfunden, sind aber nicht der einzige Aspekt, den die Nutzer für ihre Akzeptanz berücksichtigen. Die Befragung ergab, dass die Motivationen und Präferenzen der Bewohner in Bezug auf die mechanische Lüftung unterschiedlich sein können, selbst wenn sie sich eine Wohnung teilen. Dies betont die Bedeutung der Individualisierung der Nutzerpräferenzen bei der Entwicklung innovativer, nutzerzentrierter Lüftungsregelungsstrategien.

Die detaillierten Ergebnisse sind im Abschlussbericht zu AP 2.2 "Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort & Luftqualität" dargestellt. Außerdem wurden die Ergebnisse in zwei Journal-Artikel veröffentlicht (Carbonare et al. (2020) und Carbonare et al. (2021)).

6.4 Schlussfolgerungen

Deckenstrahlungsheizungen

- Eine Deckenstrahlungsheizung führt gemäß Experimenten und Simulationen nicht zu einer Temperaturschichtung im Raum.
- Der Einfluss der Oberflächentemperatur einer Fassade auf das lokale Wärmeempfinden von Menschen in der Nähe der Fassade nimmt mit zunehmender Deckentemperatur ab.
- Das asymmetrische Wärmeempfinden in Räumen mit Deckenstrahlungsheizung ist bei ausreichend hoher wärmetechnischer Qualität der Gebäudehülle vernachlässigbar.
- Der Einsatz einer Deckenstrahlungsheizung führt schon bei relativ niedrigen Deckentemperaturen ($\geq 25^{\circ}\text{C}$) zu einem thermisch noch komfortablen Raumklima, selbst bei mäßiger thermischer Qualität der Gebäudehülle. Somit kann eine Deckenstrahlungsheizung aus bauphysikalischer Sicht als eine vielversprechende Option bei der energetischen (Gesamt-) Sanierung eines Gebäudes betrachtet werden.

Niedertemperatur-Konvektorheizkörper

- Grundsätzlich gibt es für beide Einsatzfälle – Heizen und Kühlen – Evidenz dafür, dass mit dem Niedertemperatur-Konvektorheizkörper ein komfortables Raumklima geschaffen wird. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, z.B. durch ein eigenes Gebläse, kann einen zusätzlichen Heiz- und Kühleffekt erzeugen. Für aussagekräftigere Experimente müssen angepasste Randbedingungen gewählt werden, um den Effekt einzelner Größen deutlicher zu erfassen.

Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungssysteme

- In Anlehnung an verfügbare bedarfsgeregelte Lösungen für Lüfter wurden zwei vollautomatische Regler entwickelt, bei denen die relative Luftfeuchtigkeit und CO_2 zusammen

ohne Nutzerrückmeldung berücksichtigt werden. Dies waren ein Regler mit einer Kostenfunktion, bei dem die Lüfterdrehzahl durch die Variable bestimmt wird, die die höchste Unzufriedenheit aufweist, sowie ein fuzzybasierter Regler. Für letzteren wurde ein Regelfeld für die Ventilator-drehzahl vorgeschlagen, das auf momentanen Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der CO₂-Konzentration basiert.

- Als nutzerorientierte Lösung wurde eine selbstlernende bedarfsgeregelte Lüftungsstrategie vorgeschlagen, bei der das Komfortprofil des Nutzers bezüglich relativer Luftfeuchtigkeit und CO₂ durch einen überwachten Lernalgorithmus erlernt wird. Dazu wurden vier verschiedene Nutzerkomfortmodelle und drei Nutzerinteraktionsmodelle entwickelt, deren Profile in ein probabilistisches Modell integriert wurden, das die manuelle Wahl der Lüftungsstufe als ein zeitabhängiges Nutzerverhaltensmodell simuliert.
- Die selbstlernende Regelungsstrategie wurde in einem Living Lab prototypisch implementiert und getestet. Das installierte dezentrale Lüftungssystem überzeugte durch einen ausreichenden Luftaustausch, um die Leistungsindikatoren für die relative Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration im gewünschten Bereich zu halten.
- Die vorgeschlagene selbstlernende Strategie konnte die Regelfelder in jedem Raum individuell und zufriedenstellend anpassen, d.h. die Singularitäten des Nutzerverhaltens in jedem Raum konnten durch ein raumindividuelles Lernschema korrekt erfasst werden.

7 Demonstration und Monitoring

Für das Projekt wurden Technologien in 6 Demonstrationsgebäuden implementiert und umgesetzt. Dies sind jeweils eigenständige Projekte, einige ebenfalls gefördert – siehe untenstehende Auflistung. Die Projekte werden im Einzelnen beschrieben und die Monitoringergebnisse der Wärmepumpenanlagen präsentiert.

Tabelle 19: Übersicht zu den Demonstrationsgebäuden.

Unternehmen	Wohnanlage	Technologie	Status, Zeitplan
Wohnen Adorf FKZ: 03SBE0001D	5 Wohneinheiten 	Hybrid-WP Bosch, Fassadenelemente und dezentrale Raumlüftung Beck+Heun	Umgesetzt und saniert (09/2018 – 08/2022) Monitoring seit Q4 2020
SQ-Durlach Volkswohnung Karlsruhe, KES - Karlsruher Energieservice GmbH FKZ: 03ET1590B	3-5 Wohnblöcke á 30 WE 	WP Viessmann mit Mehrquellen-System, WP mit PVT Kollektoren (Consolar) als Quelle	In Bearbeitung (09/2018 – 11/2023) Monitoring seit Q3/2021
Frank Bramfeld GBR in Hamburg FKZ: 03SBE0001E	Mehrere Blöcke, insgesamt ca. 18 Wohneinheiten 	HTWP Stiebel Eltron, Lüftung Westaflex Heizflächen Kermi	NN (06/2020 – 06/2022) Monitoring seit Q3/2021
SanBest - Energiedienst FKZ: 03EGB0007A		Sole-WP in Bestands- MFH Anlage, Quelle Grundwasser Erneuerung und Umbau des Heizsystems	Umgesetzt und saniert (08/2018 – 12/2021) Monitoring seit Q2/2020.
Hamburg		Monitoring einer Bestandsanlage Konzept: Abluft als Quelle für die WP, Einbindung zur TWW- Vorwärmung	Kein Förderantrag. Messtechnik installiert; Anlage in Revision
KIT Smart Energy Lab	Musterwohnung des KIT	Dezentrale Lüftungsgeräte von Viessmann,	Kein Förderantrag.

Musterwohnung für Testzwecke		verschiedene Steuerungssysteme	Monitoring in Q2/2020 durchgeführt und ausgewertet.
------------------------------	---	--------------------------------	---

7.1 Methodik: Monitoring, Datenerhebung und Evaluation

Messkonzept

Das Monitoring dient der energetischen Bewertung des Systems im Kontext der auftretenden Betriebsbedingungen. Darüber hinaus hilft es den Anlagenbetreibern und Wärmepumpenherstellern das Betriebsverhalten im Detail zu untersuchen. Alle Messwerte werden minütlich (bzw. alle 30 Sekunden im Projekt Adorf) aufgezeichnet.

Es werden alle hydraulischen Kreise in der Heizzentrale vermessen. Wärmemengenzähler sind auf der Wärmequellenseite (bei Sole/Wasser- bzw. Wasser/Wasser-Wärmepumpe) und Wärmesenkenseite der Wärmepumpen eingesetzt sowie bei weiteren Wärmeerzeugern (z.B. Gaskessel im Projekt Adorf). Zudem sind Wärmemengenzähler „vor“ und „nach“ den Speichern installiert (Beladung Heizungsspeicher und Heizkreis; Beladung Trinkwasserspeicher, Trinkwasserzapfung und Zirkulation). Der elektrische Energiebezug der Wärmepumpe (Kompressor, Regelung und Wärmequellenantrieb) und der Pumpen wird jeweils separat erfasst. Im Falle der bivalenten Anlage wurde auch der Gasbezug gemessen. Zusätzlich wird die Außenlufttemperatur erfasst. Abbildung 69 zeigt die Positionierung am Beispiel der Anlage SanBest.

Generell werden Stromzähler (EN 62053-21 Klasse B) eingesetzt, die über ein mechanisches Zählwerk sowie einen Impulsausgang verfügen. Je nach Verbraucher wurden Wechsel- oder Drehstromzähler eingebaut. Die Nennleistung der zu vermessenden Komponenten gab die notwendige Auflösung hinsichtlich der Impulse pro Kilowattstunde vor. Das Ziel dieser Abstimmung war die Ermittlung von Minutenwerten der elektrischen Größen, um das Systemverhalten präzise abbilden zu können. Auf Seiten der thermischen Messgrößen wurden Wärmemengenzähler (EN 1434 Klasse 2) bestehend aus einem Durchflusssensor, einem Temperaturfühlerpaar sowie einem Rechenwerk eingesetzt. Das Rechenwerk ermittelt über den Volumenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie gespeicherten, temperaturabhängigen Stoffwerten, die Energie- und Leistungsgrößen. Zur Temperaturmessung kamen nach DIN EN 1434-1 paarweise kalibrierte PT100 Temperatur-Sensoren zum Einsatz. Das Rechenwerk ist mit einer M-Bus Schnittstelle ausgestattet. Als Volumenstromsensoren kamen Flügelrad-, Schwingstrahl-, Ultraschall- sowie magnetisch-induktive Durchflusssensoren zum Einsatz.

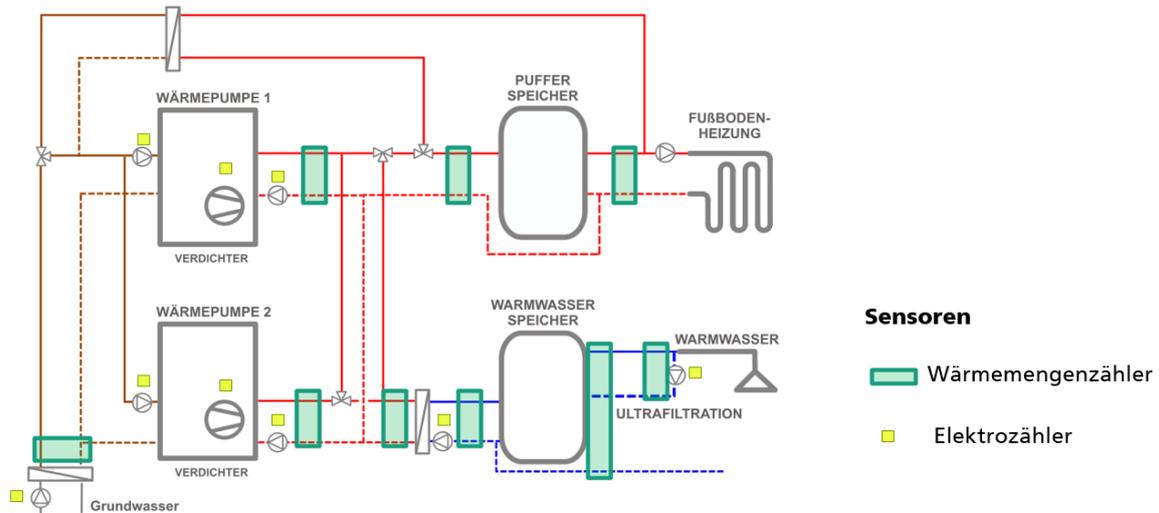


Abbildung 69: Vereinfachtes Schema des Wärmepumpensystems (Projekt SanBest) mit Positionierung der Wärmemengenzähler und Elektrozähler.

Datenübertragung

Die Datenerfassung speichert die Daten am Mess-Standort zwischen. Dies erlaubt eine lückenlose Erfassung auch bei schlechter Verbindungsqualität. Das System verfügt über einen integrierten Firewallschutz, bei dem ein Zugriff ausschließlich über eine verschlüsselte Verbindung, abgesichert mit einem elektronischen Schlüssel erfolgt. Die Daten werden täglich vom Fraunhofer ISE aus an der Messwerterfassung (MWE) abgeholt. Die Identifikation des Dateneingangsserver an der MWE erfolgt über einen benannten elektronischen Schlüssel. Um vorzubeugen, dass sich ein Fremdgerät als Messstation ausgibt (Hacker), erfolgt der Datenabruf nur, wenn sich die Messstation im Vorfeld am Datenserver mittels eines anderen Schlüssels registriert. Dieses Prinzip wird beidseitige Verifikation genannt. Für jedes Messobjekt wird eine eigene (virtuelle) Benutzerumgebung auf dem Dateneingangsserver angelegt, es wird ein eigener Schlüssel zugewiesen und der Datenabruf ist ebenfalls getrennt. Abbildung 70 zeigt die Datenübertragung vom Messobjekt zum Dateneingangsserver am Fraunhofer ISE sowie die ebenfalls gesicherte Datenübertragung innerhalb des Fraunhofer ISE vom Eingangsserver zum Auswertungsserver.

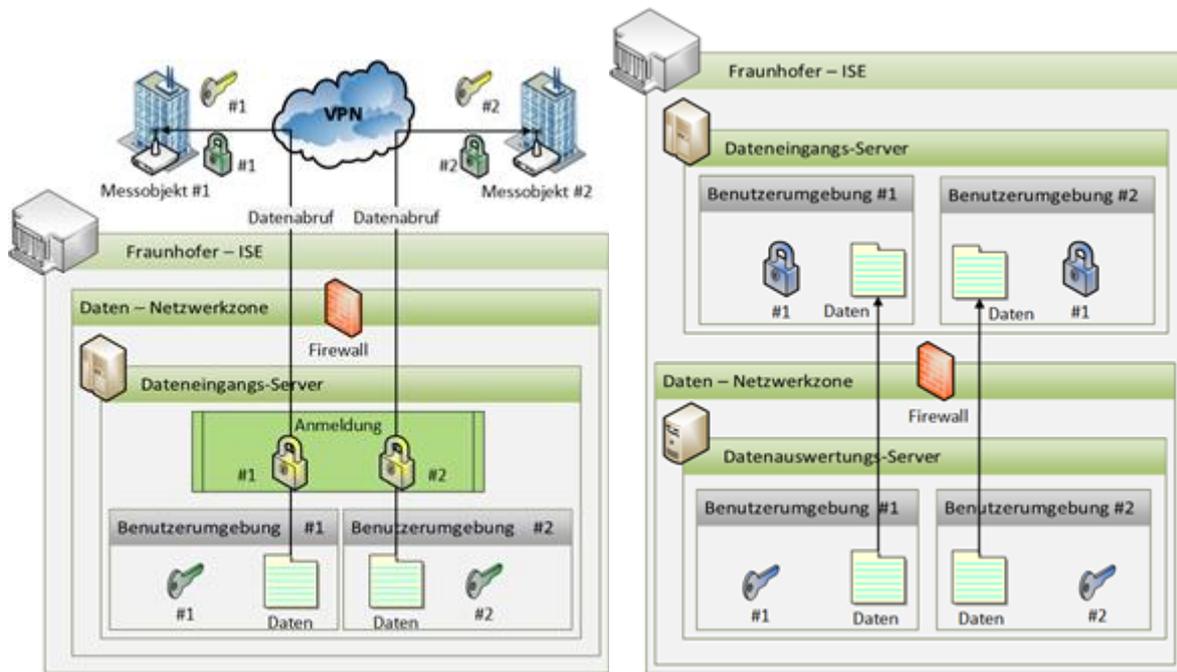


Abbildung 70: Vereinfachtes Schema der Struktur der Datenübertragung von der Messwerterfassung zum Eingangsserver am Fraunhofer ISE (links) und der Struktur der Datenübertragung vom Eingangsserver zum Datenauswertungsserver (rechts).

Datenhaltung und Datenauswertung

Zur Datenhaltung, Datenauswertung und Visualisierung wird die Software Mondas¹ eingesetzt. Die Datenverarbeitung erfolgt in Datenbanken nach definierten Verarbeitungs- und Auswertungsregeln („Filterungsregeln“). Diese „Filterungsregeln“ stellen selbst eine gesonderte Datenbank dar. In dieser wird jeder vorkommende Berechnungsabschnitt hinterlegt. Finden gleiche Berechnungsschritte bei unterschiedlichen Messobjekten Anwendung, werden diese Verarbeitungsschritte somit aus derselben Datenbank gelesen und auf diese Weise eine konsistente Berechnungsmethodik zwischen den Messobjekten sichergestellt. Neben den einheitlichen werden auch individuelle (objektspezifische) „Filterregeln“ angewendet.

Die Rohdaten werden eingelesen, aber nie verändert. Aus den Rohdaten berechnete Größen werden der Datenbank als zusätzliche Größen hinzugefügt. Messspezifische Werte (Fehlercodes der Messtechnik und -Erfassung, Umrechnung nach SI-Einheit, Kalibrierfunktionen, etc.) werden über Meta-Informationen den Rohwerten beigelegt. Es erfolgen Plausibilitätskontrollen, Umrechnungen in gewünschte Einheiten, Berechnung abgeleiteter Größen (z.B. Effizienz), Filterung nach Betriebszuständen, Verdichtung der Daten (z.B. Stunden- und Tageswerte). Das verwendete Datenbankformat ist ein HDF5-Format. HDF5 speichert jede Größe in einem beliebig skalierbaren Datenarray, dem zusätzliche Meta-Informationen mitgegeben werden können.

7.2 Wohnen-Adorf, Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten

Es wurde ein Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten durch die Wohnungsbaugesellschaft Wohnen-Adorf zur Verfügung gestellt, bei welchem eine umfängliche Gebäudesanierung vorgenommen wurde. Das Gebäude wurde in einem separaten Projekt gefördert: FKZ 03SBE0001D

¹¹ <https://mondas-iot.de>

Wohnen-Adorf, Mehrfamilienhaus in Adorf, Sachsen

Von der Wohnungsgesellschaft Adorf wurde ein Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten zur Verfügung gestellt, bei welchem eine umfangreiche Gebäudesanierung vorgenommen wurde. Es wurden folgende Komponenten demonstriert: Wärmepumpen/Kessel-Hybridanlage, neue Fenster im Dämmrahmen in der Dämmebene und dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und Luftleitungen integriert in vorgefertigte WDVS Dämmelemente.

Das Gebäude wurde 1963 erstellt mit Fertigteilen aus der WBS Serie. Vor Sanierung wurde das Gebäude mit einer zentralen Gas-Heizanlage (ohne Brennwerttechnik, Einbau 1993) versorgt. Es waren keine Lüftungssysteme vorhanden.

Es wurde in 2 Schritten saniert: 1) Umbau zur Wärmepumpenanlage; 2) Gebäudehüllsanierung mit Dachdämmung, WDVS mit integrierter Lüftung und neuen 3-fach Isolierglasfenstern.



Gebäude		Trinkwarmwasser	
Ort	Adorf, Sachsen	Systemtyp	zentral
Baujahr	1962	Temperatur	65 °C
Wärmeübergabe	Heizkörper	Zirkulation	ja
Beheizte Wohnfläche	280 m ²		
Gebäudehülle	WDVS 20cm nach Sanierung		
Wärmepumpe und Quelle		Heizung	
Anzahl WP	1	Wärmebedarf	50 kWh/(m ² a)
Installierte Leistung	3 - 11 kW _{th} (A2/W35)	Heiztemperatur	65/55 °C
Betriebsart	hybrid, monovalent		
Wärmequelle	Außenluft		
Zusätzliche WE	Gasbrennwertkessel		
Weitere Infos		Lessons learned	
Investitionskosten	NN	Monitoring des Betriebs	
Lüftungssystem	Ja, in Fassade integriert	Bivalente Systeme gut geeignet für nachgelagerte Gebäudesanierung	

Abbildung 71: Steckbrief der Wärmepumpenanlage.

Es werden Komponenten- und Betriebsstrategien-Entwicklungen aus den Technologieprojekten HTWP (FKZ 03ET1377 A/B/C) und FIHLS (FKZ 03ET1401A/B/C/D) demonstriert:

- Gaskessel-/Wärmepumpen-Hybridanlage (HTWP, Bosch)
- Fenster im Dämmrahmen in der Dämmebene (FIHLS, Beck+Heun)
- Dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (FIHLS, Beck+Heun)
- Luftleitungen integriert in vorgefertigte WDVS Dämmelemente (FIHLS, Westaflex, Beck+Heun)

Die Wohnungsgesellschaft Adorf ist kontinuierlich mit Umbauprozessen ihres Gebäudebestandes befasst. Für das zur Verfügung gestellte Gebäude mussten umfangreiche Vorarbeiten geleistet werden, um es in den Sanierungs- und Finanzierungsfahrplan der Wohnungsgesellschaft einzustellen. Gleichzeitig mussten die jeweiligen Technologiepartner so koordiniert werden, dass die neu einzubauenden Komponenten auch im Zeitplan zur Verfügung gestellt werden konnten. Die Baupreise entwickelten sich seit Vorbereitung 2017 mit Antragstellung 2018 bis zur Umsetzung der letzten Maßnahmen in 2022 sehr dynamisch und von Seiten Wohnen Adorf mussten zusätzliche Mittel bereitgestellt werden, um das Projekt zu finanzieren. Teilweise waren auch einzelne Bauteile und

Materialien nicht lieferbar. Insgesamt galt es dabei über 20 Firmen und beteiligte Fachplaner zu koordinieren.

7.2.1 Gebäude und bisherige Gebäudetechnik

Gebäude

Das kleine Mehrfamilienhaus umfasst 5 Wohnungen und eine beheizte Wohnfläche von 280 m². Eine Wohnung wird nur als Büro genutzt und eine andere Wohnung war während der Monitoringphase über mehrere Monate nicht vermietet. Das Gebäude steht in Adorf (Vogtland) und liegt mit einer Normaußenlufttemperatur von -14,7°C in einer der kälteren Gegenden Deutschlands (DIN EN 12831-1).

Das 1969 errichtete Gebäude war zu Beginn des Monitorings unsaniert. Ab Q2 2021 wurde die Gebäudehülle umfänglich saniert und eine Lüftungsanlage eingebaut. Die Sanierung erfolgte in verschiedenen Etappen:

- Zunächst wurde das gesamte Dach ertüchtigt mit Abnahme der alten Deckung, dem Einbau notwendiger Rettungswege und Brandschutzertüchtigungen, Verbreiterungen von Ortgang und Traufe zur Überdeckung der Fassadendämmung sowie einer zusätzlichen Dachdämmung mit einer neuen Dacheindeckung.
- Im zweiten Schritt wurden die Fensterdämmelemente inklusive der Fensterrahmen der neuen Fenster montiert und die erste Lage der Dämmung mit den eingelegten Lüftungsrohren und den Einbaukörpern der raumweisen Lüftungsgeräte und der notwendigen elektrischen Verkabelung.
- Im dritten Schritt wurde eine weitere Lage Dämmung mit den finalen Putzschichten und Anstrich verlegt. Gleichzeitig wurden wohnungsweise, jeweils an einem Tag, die alten Fenster ausgebaut und die neuen Fensterflügel eingehängt sowie die Leibungen angearbeitet.
- Anschließend wurde im Sockelbereich die Kellerwand freigelegt, um auch hier die Dämmung möglichst tief ins Erdreich einzubinden.
- Schließlich erfolgte der Einbau der Lüftungsgeräte in die zuvor verbauten Einbaukörper und die Inbetriebnahme über eine Zentrale Steuereinheit im Technikraum im Keller und Anbindung an das Monitoringsystem.

Das Gebäude wurde während der Umbauzeit durchgehend bewohnt mit einem Mieterwechsel in einer Wohnung. Erste Rückmeldungen der Mieter signalisieren einen signifikant höheren thermischen Komfort im Winter wie auch im Sommer. Ebenso gibt es keine Schimmelprobleme mehr.



Abbildung 72: Ansicht Demonstrationsobjekt Adorf von Süd-West vor der Hüllsanierung mit der neu errichteten Wärmepumpe.

Vorheriges Lüftungs- und Wärmeversorgungskonzept

Das Gebäude war bereits mit einer zentralen Wärmeversorgung ausgestattet. Raumheizung und Trinkwassererwärmung wurde mit einem Gaskessel (40 kW) bereitgestellt. Die Beheizung der Wohnungen erfolgt über Radiatorheizkörper. Der Einbau dieser Anlagen zusammen mit Isolierglasfenstern fand in einer ersten Sanierungsphase 1993 statt.

7.2.2 Neues Energieversorgungskonzept

7.2.2.1 Wärmeversorgung

In Q4 2020 wurde die Heizungszentrale zu einem bivalenten Wärmepumpensystem umgebaut und in Betrieb genommen. Die Anlage umfasst:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe
 - Raumheizung
 - $Q_{H,N}$ (A2/W35): 3 bis 11 kW
 - COP (A2/W35; Teillast 5 kW): 4,2
 - T_{max} : 62°C
 - Kältemittel: R410A
- Gas-Brennwertkessel
 - Trinkwassererwärmung und Raumheizung
 - $Q_{H,N}$: 4 bis 28 kW
- Speicher
 - Trinkwasserspeicher (277L) mit innenliegendem Wärmeübertrager
 - Keine Heizungsspeicher

Abbildung 73 skizziert die hydraulische Verschaltung der Wärmeerzeuger. Die Wärmepumpe ist über eine hydraulische Weiche im Rücklauf des Kessels eingebunden. Die Wärmepumpe ist außen aufgestellt und mit einer Schallschutzhaube ausgestattet (vgl. Abbildung 73). Die Länge der Anschlussleitung zwischen Wärmepumpe und hydraulischer Einbindung beträgt 9 m.

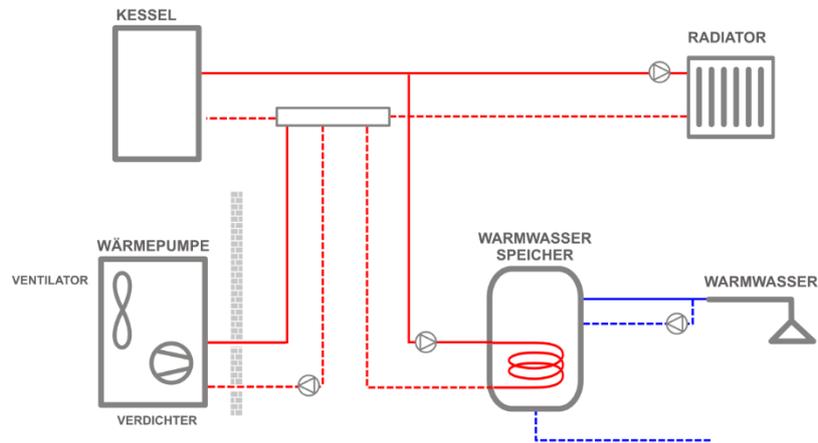


Abbildung 73: Vereinfachtes Anlagenschema des Demonstrationsvorhabens Adorf.

Der Einbau der neuen Wärmeversorgung erfolgte im Oktober 2020. Die Gebäudehülle war noch nicht saniert und die Heizkurve wurde auf eine Heizkreisvorlauftemperatur von 76 °C für eine Außenlufttemperatur von -15 °C eingestellt. Während der Heizperiode 2021/2022 wurde die Heizkurve stufenweise herabgesetzt, nachdem die Sanierung der Gebäudehülle in weiten Teilen abgeschlossen war. Der Sollwert des Warmwasserspeichers ist auf 65 °C mit einer unteren Hysterese von 5 K eingestellt. Die Zirkulationspumpe ist dauerhaft in Betrieb.

Die Wärmepumpe wurde auf die Leistungsanforderung nach Sanierung der Gebäudehülle ausgelegt. Somit war vor der Gebäudesanierung der Betrieb des Kessels bei niedrigen Außenlufttemperaturen zur Deckung der Heizlast eingeplant. Zudem wird der Betrieb des Kessels notwendig, um Heizkreisvorlauftemperaturen über der maximalen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe bereitzustellen. Die Trinkwassererwärmung wird ausschließlich vom Kessel übernommen.

Die im Rahmen des Technologieprojektes HTWP entwickelte Regelungsstrategie der bivalenten Anlage wurde Mitte der Heizperiode 2020/2021 aufgespielt und seitdem die Anlage entsprechend geregelt. Die Regelung kann nach mehreren Zielparametern einen optimierten Betrieb ermöglichen. Ein Ansatz ist das Erreichen vorgegebener spezifischer CO₂-Emissionen. Weitere Informationen sind in Neubert et al. 2022 zu finden.

7.2.2.2 Lüftung

In einem Arbeitspaket hat die Entwicklung eines Fenstermoduls mit integriertem Lufteinlass stattgefunden. Zunächst wurde ein Fassadenmodul ohne Lufteinlass von Beck und Heun entwickelt.

Um die auf der Fassade verlegten Versorgungsmedien in den Wohnraum zu führen, wurde ein Dämmrahmen entwickelt, welcher zum einen das für die Sanierung vorgesehene Fenster (3-fach verglast) aufnimmt und zum anderen Durchführungen für die Medien besitzt. Da dieser Dämmrahmen bereits zu Beginn der Sanierung an der Fassade angebracht werden sollte, ohne dabei in den Wohnraum einzugreifen, musste dieser zweigeteilt konstruiert werden. Er besteht aus einem Fassadenelement und einem Innenraumelementrahmen. Durch Zusammenführung beider Elemente entsteht zum Abschluss der Sanierung ein durchgängiger Rahmen, der die thermische Hülle von der Außenhaut bis in den Wohnraum gewährleistet. Bei der Konstruktion mussten die baulichen Abweichungen/ Toleranzen mitberücksichtigt werden, um eine störungsfreie Montage beider Rahmenmodule zu gewährleisten. Hierzu ist ein exaktes Aufmaß des Ist-Zustandes des zu sanierenden Gebäudes weit im Vorfeld der Sanierung notwendig. Um Verwechslungen der 23 Rahmenmodule zu vermeiden, wurde das kleinste gemeinsame Vielfache als Standardgröße gewählt. Somit konnte die Anzahl der 23 Rahmenmodule auf 3 Standardgrößen verringert werden. Wodurch auch die Verwechslungsgefahr im Bauprozess deutlich minimiert werden konnte. Nachteil dieses Konzeptes ist, dass sich die lichte Öffnung nach der Sanierung an der kleinsten Öffnungsweite orientiert.

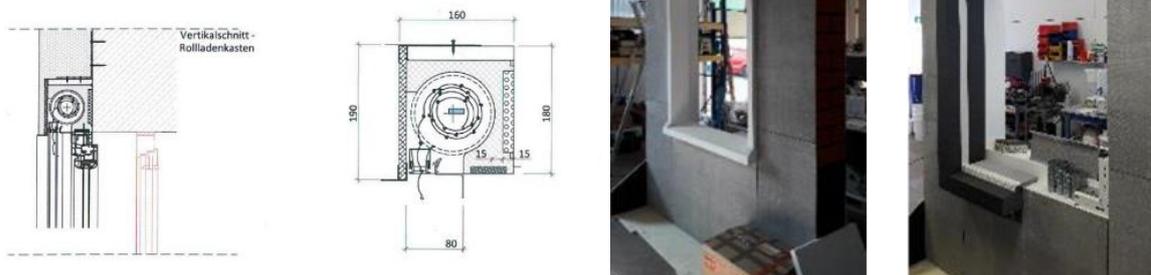


Abbildung 74: Funktionsmuster: 2D Zeichnung; Fenster mit Rollladenkasten an Musterwand (1:1).

Diese Variante zeigte folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Überdämmung des Rahmenmoduls durch das WDVS (mind. 2 cm) ermöglicht fugenfreie Fassadenoptik
- Integration des Rollladenkastens 16/18 cm als direkter Bestandteil des Rahmenmoduls
- auch Nachbildung von Gewände mit Rahmenmodul möglich (Vorsprung im WDVS)
- eventuell ist auch die Herstellung einer Fiasche möglich (Rücksprung im WDVS)
- durch die Position des Rollladenkastens in der Dämmebene (vor der Bestandswand) geht keine Fensterhöhe verloren
- minimalinvasive Sanierungsmethode, bis hin zur Demontage des Bestandsfensters

Nachteile:

- Stärke des WDVS ist abhängig von der erforderlichen Überdämmung des Rohrsystems (mind. 6 cm über dem Rohr + Leitungsquerschnitt + 3 bis 5 cm unter dem Rohr)
- geringere Fensterbreite, da die Rohrdurchführung in der Laibung erfolgt (beidseitig)
- exakte Fensterposition in der Wand wird durch den Rollladenkasten vorgegeben
- Vertiefung der Fensterlaibung, durch neue Position des Fensters innerhalb der Außenwand
- Einbauteile zur Lastabtragung notwendig bei Phenolharz, da keine Lastabtragung im Material möglich ist
- eventuelle Rissbildung im Außenputz bei Einwirkung zu starker Fensterlasten

Lufteinlässe und Luftkanäle in der Fassade

Parallel dazu wurde der Lufteinlass in der Kooperation zwischen Fraunhofer ISE, Beck und Heun und Westaflex entwickelt. Bei der Entwicklung des Lufteinlasses gab es folgende Anforderungen:

- Luftgeschwindigkeit und Druckverluste sowie Lüftungseffizienz: Für die Minimierung der Druckverluste müssen die Querschnittsänderungen und Richtungsänderungen von der Luftführung durch das Fenstermodul bis zum Raum so gering und graduell wie möglich sein. Die Querschnitte müssen so groß wie möglich sein, so dass die Geschwindigkeiten und somit die Druckverluste gering bleiben, da die Druckverluste mit dem Quadrat der Geschwindigkeit steigen. Höhere Geschwindigkeiten beim Einlass und Auslass favorisieren auch eine tiefere Eindringung der Luft im Raum, und somit eine bessere Lüftungseffizienz. Dafür ist auch die Richtung der Luft beim Ausströmen in den Raum wichtig: eine Einströmrichtung parallel zum Fenster ist für die Lüftungseffizienz ungünstiger als eine 90° Richtung zum Fenster (Richtung Raumtiefe). Für den thermischen Komfort sowie für den Geräuschpegel sind kleinere Geschwindigkeiten sowie eine Ausströmrichtung parallel zum Fenster von Vorteil.

- Ästhetik: die Ästhetik der Luftein- und auslässe an den Fenstermodulen spielt raumseitig eine wichtige Rolle für die Nutzerakzeptanz.

Statik des Fenstermoduls: die Luft muss von den Fassadenleitungen über den Rahmen des Fenstermoduls bis in den Raum geführt werden, ohne die Statik des Rahmenmoduls zu beeinträchtigen, wie in Abbildung 75 rechts zu sehen ist.

Erste Versionen des Lufteinlasses am Fenster für die Fassadenleitung wurden unter Berücksichtigung dieser Anforderungen entworfen:

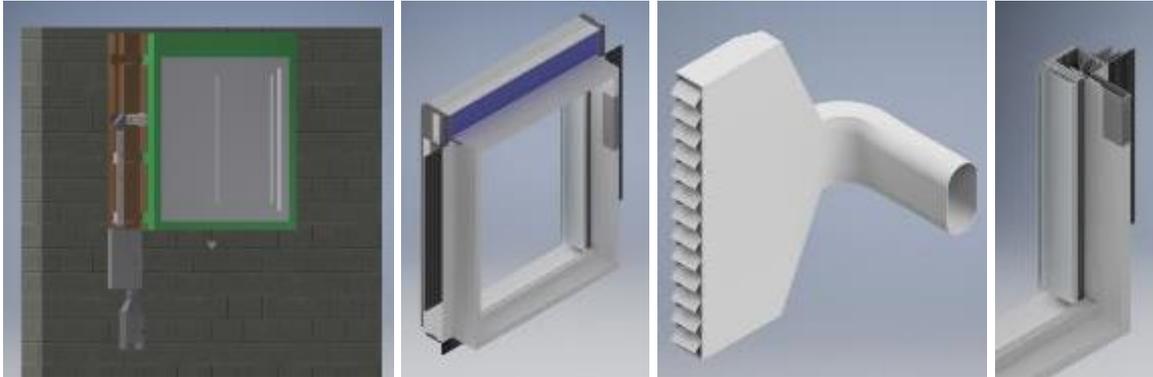


Abbildung 75: Erste Entwürfe vom Lufteinlass am Fenster.

Nach Diskussion mit Beteiligten und Fachplanern der WBG Adorf wurde auf die geltenden Regelwerke verwiesen, die eine Obergrenze der Luftgeschwindigkeit von 0,3 m/s vorgeben. Und es wurde daraufhin von Beck+Heun und Westaflex ein spezieller Lufteinlass entwickelt, der zum einen nicht nur die Geschwindigkeit der Luft auf das gewünschte Maß reduziert, sondern auch gleichzeitig den Luftstrom in die Leibungsebene umlenkt und somit ein direktes Anströmen der Bewohner verhindert.

Gleichzeitig wurde die Verbindung zwischen Fassadenleitungen und Fenster und die Integration bzw. Entwicklung des Lufteinlasses am Fensterrahmen weiterentwickelt:



Abbildung 76: Funktionsmuster: Fassadenleitung und Fensterrahmen und finale Version in Adorf (rechts).

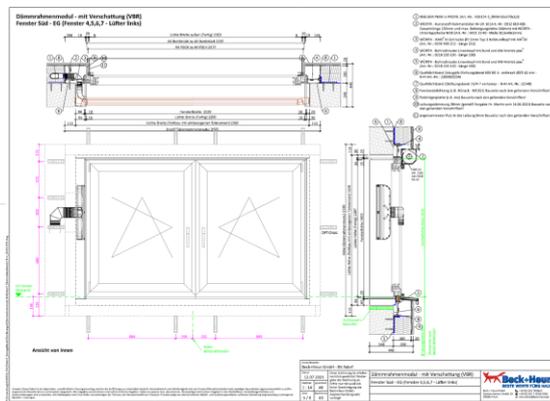


Abbildung 77: Links: Zeichnung Dämmrahmenmodul mit Verschattung und Lufteinlass, rechts: Giebfenster.

Bei der Umsetzung von der Planung in die Produktion der Rahmenelemente mussten Anpassungen in der Produktion vorgenommen werden. Hierbei zeigte sich, dass die Entscheidung, die Rahmenmodule nicht individuell, sondern in Standardgrößen zu bauen, die Übersichtlichkeit der jetzt schon auf 16 EPS-Teile angewachsen „3D-Puzzle“ wesentlich erleichterte. Trotz alledem mussten an die Genauigkeit der Einzelteile erhöhte Anforderungen gestellt werden. Aus diesem Grund wurden die Einzelteile einer Abnahmeprüfung unterzogen und bei Beanstandungen bestimmte Parameter angepasst.

Trotz aller Vorarbeiten blieb die Anfertigung der als Kleinserie aufgelegten Dämmrahmenmodule mit integrierten Luftdurchlass viel Handarbeit. Um auch hier Fehlern vorzubeugen und Nacharbeiten zu vermeiden, wurde das hierfür abgestellte Produktionspersonal separat geschult. Die finale Optik der Module nach Installation in Adorf kann in Abbildung 78 gesehen werden:



Abbildung 78: Lufteinlass mit Gitter in dem Demonstrationsgebäude in Adorf.

Hier ist auch ersichtlich, dass die Tiefe des Rahmenmoduls lüftungstechnisch von Vorteil ist, da die Lufteinführung nicht von Innenliegenden Rollos oder Vorhängen beeinflusst wird.

Fassadenintegriertes Lüftungsgerät, Neuentwicklung Airfox 2 (Beck und Heun, ISE)

Aufgrund der Messergebnisse des Airfox 1 mit angeschlossenen Luftkanälen wurde eine Weiterentwicklung auf Basis des Airfox 1 begonnen für die Sanierung des Mehrfamilienhauses Remtengrüner Weg 31 in Adorf. Der Airfox 2 sollte eine größere Druckdifferenz leisten können, um auch mit fassadenintegrierten Luftkanälen einsetzbar zu sein. Das Gerät sollte in der Dämmebene eingebaut werden und die Luftverteilung zu den Räumen erfolgt durch fassadenintegrierte Luftleitungen. Dadurch gibt es folgende Vorteile:

- Die Wartung erfolgt Außen am Gebäude und kann vorgenommen werden, ohne die Vermieter zu stören.
- Die Geräuschquelle (Lüfter) ist weiter weg vom Raum.
- Die Stromversorgung kann gewährleistet werden, ohne in der Wohnung einzugreifen.
- Am Fenster wird für Lüftung nur ein Lufteinlass benötigt (mehr Platz zur Verfügung).

Der Nachteil der Kombination von Pendellüftern und Fassadenleitungen ist das vorhandene Luftvolumen, das beim Periodenwechsel (Zuluft/Abluft) zuerst ausgespült werden muss.

Der prozentuale Anteil ist relativ hoch bei kleinen Volumenströmen und vernachlässigbar bei den hohen Volumenströmen. Eine Lösung wäre, die Periodenzeit zu erhöhen. Um die gleiche Wärmerückgewinnungszahl zu erhalten, müsste dann aber die Austauschfläche vergrößert werden, was die Druckverluste erhöhen würde. Eine bessere Lösung ist es, einen etwas höheren Zuluftvolumenstrom zu erzielen (zum Beispiel $7.7 \text{ m}^3/\text{h}$ statt $5 \text{ m}^3/\text{h}$). Dann wird auch der gewünschte Außenluftvolumenstrom erreicht.

Ein anderes Ziel bei der Entwicklung des Airfox 2 war es, Radiallüfter zu integrieren. Radiallüfter können höhere Druckverluste bewältigen und haben eine steilere Lüfterkurve. Die Konsequenz ist, dass diese weniger sensibel sind bei Druckvariationen (Wind, Abluftgerät in der Wohnung, usw.), und dass sie besser geeignet sind für die Kombination mit Fassadenleitungen für das Demonstrationsobjekt in Adorf. Dank der stärkeren Radiallüfter könnten auch bessere Filter (z.B. F7 Filter) und Schalldämpfer integriert werden. Deshalb wurde der Axiallüfter des Airfox 1 durch zwei Radiallüfter ersetzt, die abwechselnd bei jedem Periodenwechsel an- und ausgehen.

In der Kooperation zwischen Beck und Heun und ISE wurden zunächst folgende Varianten vom ISE entworfen. Hierbei gab die derzeit aktuelle Mindestdämmstärke von 160mm die maximale Bautiefe vor.



Abbildung 79: Airfox 2 Varianten, und ausgewählte Variante.

Die flachste Variante (Variante 5 auf Abbildung 79) wurde gewählt. Die Druckverluste des Verteilsystems in der Fassade wurden auf zirka 30 Pa gerechnet. Um genügend „Druckreserve“ zu haben für Wärmeübertrager, Filter, Schalldämpfer, usw. wird also ein Lüfter gesucht, der bei 40 m³/h idealerweise 70 Pa Druckunterschied aufbauen kann. Der maximale Volumenstrom sollte mindestens 50 m³/h sein. Nach einer intensiven Marktrecherche wurde der RG140-22/14N/2TDPU von Ebmpapst gewählt. Verschiedenste Funktionsmuster wurde von B+H gebaut und am Fraunhofer ISE vermessen.

Nach vielen Iterationsstufen zur Eliminierung verschiedenster Herausforderungen wurde eine Variante mit frontaler Ansaugung gewählt. Für die Wartung wurde ein Schienensystemkonzept mit Staffelung der integrierten Module von B+H entwickelt. Die Module können in der realen Situation im Gehäuse eingeschoben werden.



Abbildung 80: Airfox 2 v7, Innenansicht.

Nach der Verkabelung wurden verschiedene Volumenstrommessungen durchgeführt.



Abbildung 81: Airfox 2 V7. Außenansicht und Messaufbau für Volumenstrommessung.

In Kooperation zwischen B+H und ISE wurde eine Steuerelektronik für die Mechanik und die Sensorik entwickelt, sowie das Layout für die Elektroplatine entworfen, auf welcher dann die benötigten Komponenten vereint werden können. Die Integration der Platine, Sensoren und Verkabelung wurde definiert. Zwei Sensirion SCD30-Sensoren (CO₂, Lufttemperatur und -Feuchte) wurden integriert:

- Ein Sensor ist an der Schnittstelle zwischen Lüftungsgerät und Luftkanal integriert. Dieser Sensor misst am Ende der Abluftphase die Raumbedingung und während der Zuluftphase die Zulufttemperatur.
- Ein Sensor ist an einer Schutzhaube an der Ansaugöffnung des Zuluftlüfters festgemacht. Dort misst er in der Zuluftphase die Zulufttemperaturen.

Die Steuersoftware - ebenfalls neu entwickelt - befindet sich zum einen auf der Steuerplatine im Gerät und zum anderen in der zentralen Steuerung und Energieversorgung im Haustechnikraum. Verschiedene Sensoren messen dabei kontinuierlich die Luftzustände und geben diese an die Regelung weiter. Es können auch verschiedene Steueralgorithmen aufgespielt und vermessen werden.

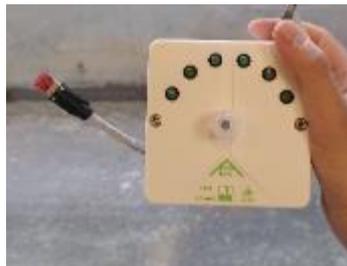


Abbildung 82: Positionen der Sensoren und der Steuerung und Nutzerschnittstelle.

Auch eine Nutzerschnittstelle (Drehschalter) wurde für das Demonstrationsgebäude in Adorf entwickelt. Dabei können die jeweiligen Steuerpositionen je nach aufgespielter Regelung neu bezeichnet werden. Die Rückmeldungen der Nutzer können so auch in die neue Regelung integriert werden.

Letztendlich wurde die entwickelte Regelung auf dem Gerät implementiert und getestet, und die Geräte, insgesamt 23, wurden in das Demonstrationsgebäude in Adorf eingebaut. Somit ist jeder Raum der 5 Wohnungen separat mit einem Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung ausgestattet worden.



Abbildung 83: Einbausituation der Lüftungsgeräte im Sockelbereich.

7.2.3 Ergebnisse Monitoring

7.2.3.1 Wärmeversorgung

Das Monitoring wurde im Dezember 2021 in Betrieb genommen. Die hier gezeigten Ergebnisse umfassen die Auswertungsperiode von Januar 2020 bis Juni 2022. Wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben, wurde die Gebäudehülle ab Q2/2021 saniert. Ende Oktober 2021 war die Sanierung der Gebäudehülle in weiten Teilen abgeschlossen; Restarbeiten (Dämmung Sockelbereich) sowie der Einbau der Lüftungsanlage erfolgte im März/April 2022. Die Heizkurve wurde Ende Dezember 2021 / Anfang Januar 2022 angepasst. In der Auswertung wird der Messzeitraum getrennt betrachtet in eine Phase vor Sanierung und eine Phase nach Sanierung. Je nach Fragestellung; bspw. Gebäude (bspw. Heizwärmeverbrauch) oder System (bspw. Heizkreistemperatur) wird der Betrachtungszeitraum entsprechend dem Zustand der Anlagen angepasst. Die gewählten Zeiträume sind jeweils notiert.

Abbildung 84 zeigt die monatliche Wärmenutzung zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Die Reduktion der Heizlast in Folge der Gebäudesanierung wird deutlich, auch wenn der Winter 2020/2021 kälter als der Winter 2021/2022 war. So lag der Heizwärmeverbrauch im Januar 2021 bei $29 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$ bei mittleren Außenlufttemperatur von $-1,7^\circ\text{C}$ und im Januar 2022 bei $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$ bei $0,3^\circ\text{C}$ ¹. Ein weiterer Unterschied neben der Sanierung ist, dass eine der fünf Wohnungen im Winter 2020/2021 nicht bewohnt war. Zudem ist zu erwähnen, dass die Anlage im Januar 2022 für 2 Wochen im Notbetrieb lief, so dass der Wärmebedarf – bis auf zwei Tage – gedeckt wurde, das Betriebsverhalten jedoch nicht repräsentativ ist.

Zur Beurteilung des Einflusses der Gebäudesanierung wurde der jährliche Heizwärmeverbrauch vor und nach Gebäudesanierung abgeschätzt. Die vorliegenden Messungen des Heizwärmeverbrauches wurden anhand der Gradtagszahl der nächstgelegenen Wetterstation² auf die Heizperioden 09/2020 bis 05/2021 sowie 09/2021 bis 05/2022 hochgerechnet. Zudem wurde eine Witterungsbereinigung auf das langjährige Mittel (2002 bis 2021) dieses Standortes durchgeführt. Hierbei ergibt sich ein Heizwärmeverbrauch von $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ vor Sanierung und von $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ nach Sanierung (weitestgehend ohne Betrieb der Lüftungsanlage, sowie ohne Dämmung des Sockelbereiches).

Der jährliche Wärmebedarf³ zur Trinkwassererwärmung lag bei $37 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ als alle Wohnungen genutzt wurden (eine davon als Büro) bzw. $31 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ als nur 4 der 5 Wohnungen genutzt wurden

¹ Aufgrund eines Messfehlers des Außenlufttemperatursensor Anfang Januar 2022 wird hier für beide Monate die Temperatur der nächstgelegenen Wetterstationen (Elster/Bad-Sohl, Sachsen) herangezogen (<https://www.iwu.de/fileadmin/tools/gradtagzahlen/Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx>)

² Elster/Bad-Sohl, Sachsen (<https://www.iwu.de/fileadmin/tools/gradtagzahlen/Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx>)

³ Der Messzeitraum mit der jeweiligen Nutzung wurde jeweils auf ein Jahr hochgerechnet.

(eine davon als Büro). Diese Energie deckt neben dem Wärmebedarf für den Warmwasserverbrauch, die Zirkulationsverluste und die Speicherverluste.

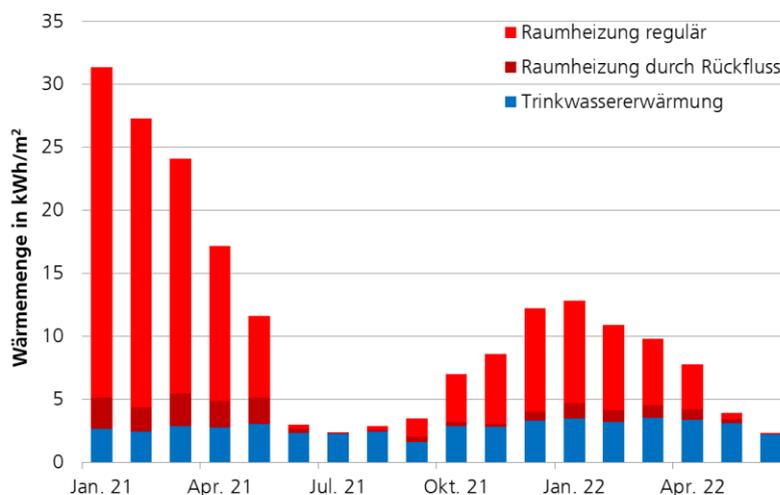


Abbildung 84: Wärmenutzung zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung im Zeitraum Januar 2021 bis Juni 2022.

Während der Trinkwassererwärmung (TWE) kommt es aufgrund einer undichten Rückschlagklappe zu einer – ungeplanten - Durchströmung des Heizkreises. Der Rückstrom vom Trinkwasserspeicher strömt nicht nur in den Kessel zurück; ein Teilstrom fließt in den Rücklauf des Heizkreises und entsprechend über den Vorlauf des Heizkreises wieder in den Vorlauf zum Trinkwasserspeicher. Im Juni 2021 wurde eine Änderung vorgenommen und der Rückfluss damit unterbunden. Da in der Folge die Heizkreispumpe im Raumheizbetrieb keine oder nicht ausreichend Volumenstrom fördern konnte, wurden im September 2021 erneut Änderungen an der Rückschlagklappe vorgenommen. In der Folge trat wieder eine Rückströmung auf. In der Darstellung der monatlichen Wärmemenge zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung (Abbildung 84) ist die durch Rückströmung verursachte Raumheizung ausgewiesen.

Abbildung 85 zeigt Tageswerte der Heizlast bezogen auf die mittlere Außenlufttemperatur vor und nach der Sanierung. Die Streuung der Heizlast ist eine Folge der Unterschiede der solaren Einstrahlung, des Nutzerverhaltens und ggf. der Anlagenparametrierung. Zudem gibt es eine Unschärfe bei der Messung der Außenlufttemperatur, da die Positionierung des Sensors bis zur Fertigstellung der Gebäudehülle zeitweise geändert wurde und teilweise u.U. durch den Wärmepumpenauslass beeinflusst wurde. Wie auch in der Darstellung der Monatswerte und der Abschätzung des Jahreswärmebedarfes wird der Einfluss der Gebäudesanierung deutlich.

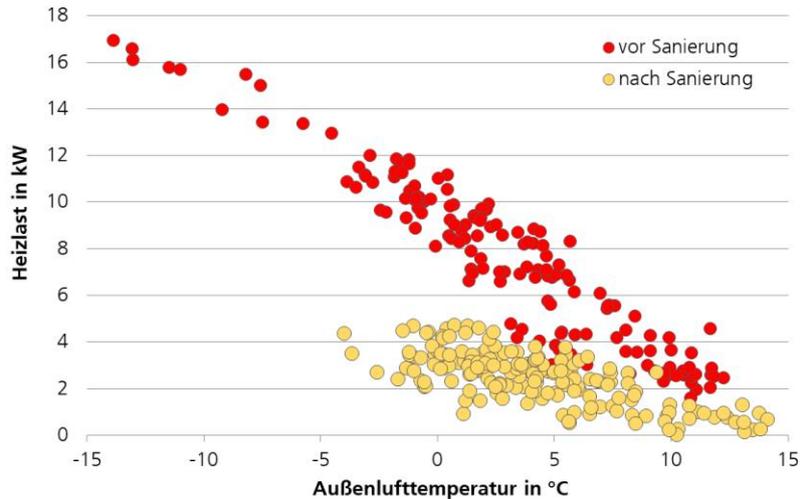


Abbildung 85: Wärmenutzung zur Raumheizung über der Außenlufttemperatur als Tageswerte im Zeitraum Januar 2021 bis Mai 2021 „vor Gebäudesanierung“ und November 2021 bis Mai 2022 (ohne 30. Dezember bis 13. Januar) „nach Gebäudesanierung“

Abbildung 86 zeigt die Aufteilung der Wärmebereitstellung auf Wärmepumpe und Gasbrennwertkessel. Die Wärmepumpe wird nur zur Raumheizung (RH) eingesetzt; der Kessel übernimmt die Trinkwassererwärmung (TWE) und unterstützt bzw. übernimmt die Raumheizung bei hoher Heizlast und hohen Heizkreistemperaturen (vgl. Kapitel 7.2.2.1). Der Betrieb des Heizkessels ist getrennt für die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der undichten Rückschlagklappe während des TWE-Modus der Kessel neben der Beladung des TW-Speichers auch Wärme für die Raumheizung bereitstellt – mit Ausnahme vom Sommer 2021. Vor der Gebäudesanierung lag der Deckungsbeitrag der Wärmepumpe zur Raumheizung bei 52 % im Januar (mittlere Außenlufttemperatur $-1,7^{\circ}\text{C}$), 43 % im Februar ($-1,4^{\circ}\text{C}$) und 69 % im März ($2,6^{\circ}\text{C}$). Bei der Angabe des Deckungsbeitrages wurde neben dem regulären RH-Modus auch die während des TWE-Modus vom Kessel zur Raumheizung bereitgestellte Wärme berücksichtigt. Nach der Gebäudesanierung ist im Januar 2022 noch ein deutlicher Anteil des Kesselbetriebes im RH-Modus zu verzeichnen. Dies ist überwiegend auf einen - durch einen defekten Sensor verursachten - Notfallbetrieb zurückzuführen. Ansonsten war der Kessel fast nie zur Raumheizung aktiv und deckte nur aufgrund der undichten Rückschlagklappe im TWE-Modus einen Teil der Heizlast.

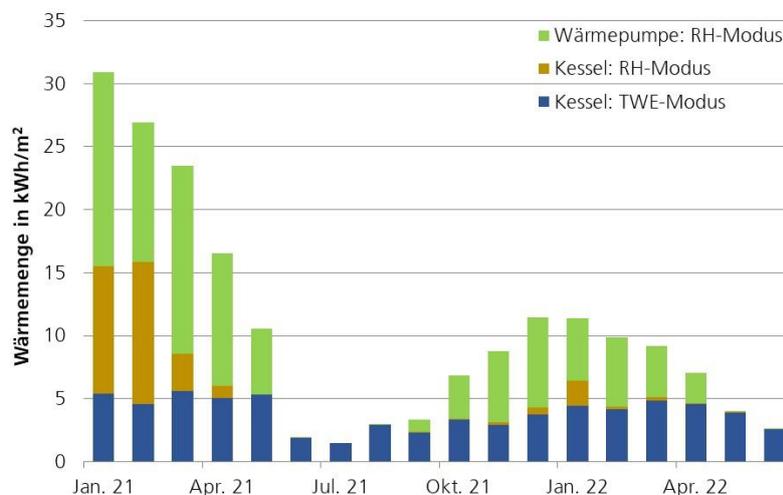


Abbildung 86: Wärmebereitstellung durch die beiden Wärmeerzeuger Januar 2021 bis Juni 2022

Abbildung 87 zeigt die Wärmebereitstellung der beiden Wärmeerzeuger als Tageswerte über der Außenlufttemperatur vor und nach der Gebäudesanierung und Absenkung der Heizkurve (die Periode

mit Notbetrieb ausgenommen). Vor der Gebäudesanierung wurde der Kessel ab Temperaturen unter 2°C bis 5°C zur Unterstützung der Raumheizung eingesetzt. Bei Außenlufttemperaturen von rund -3°C lag der tägliche Deckungsbeitrag von Wärmepumpe und Kessel im RH-Modus in der gleichen Größenordnung. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen sank der Deckungsbeitrag der Wärmepumpe deutlich. Nach der Gebäudesanierung und Absenkung der Heizkurve wurde der Kessel – außerhalb des Notbetriebes – nahezu nie mehr im RH-Modus betrieben.

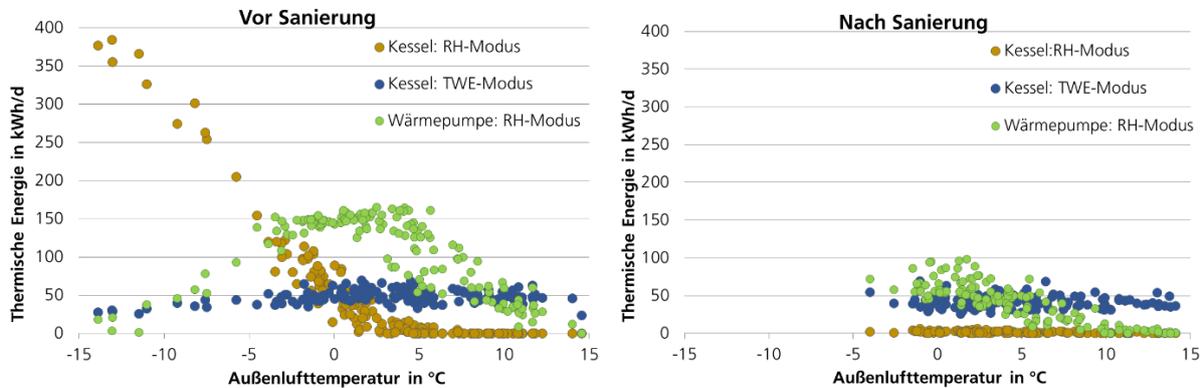


Abbildung 87: Wärmebereitstellung der beiden Wärmeerzeuger über der Außenlufttemperatur als Tageswerte im Zeitraum Januar 2021 bis Juni 2021 „vor Gebäudesanierung“ und 24. Dezember 2021 bis Juni 2022 (ohne 30. Dezember bis 13. Januar) „nach Gebäudesanierung“

Abbildung 88 zeigt die Heizkreistemperaturen als Tagesmittelwerte über der Außenlufttemperatur vor und nach der Gebäudesanierung und Absenkung der Heizkurve (die Periode mit Notbetrieb ausgenommen). Die Heizkreistemperatur wird über eine außenlufttemperaturabhängige Heizkurve bestimmt. Nach der Gebäudesanierung wurde die Heizkurvenparametrierung angepasst. Vor der Gebäudesanierung wurde der Heizkreis mit einer hohen Spreizung betrieben; bei einer Außenlufttemperatur von -15°C mit rund 75°C/45°C und bei 0°C mit rund 50°C/35°C. Nach Absenkung der Heizkurve liegt die Heizkreistemperatur bei einer Außenlufttemperatur von 0°C bei rund 43°C/35°C. (Ein Vergleich bei einer Tagesmitteltemperatur von -10°C oder -15°C kann nicht vorgenommen werden, da im Messzeitraum nach Sanierung nicht so geringe Außentemperaturen auftraten.)

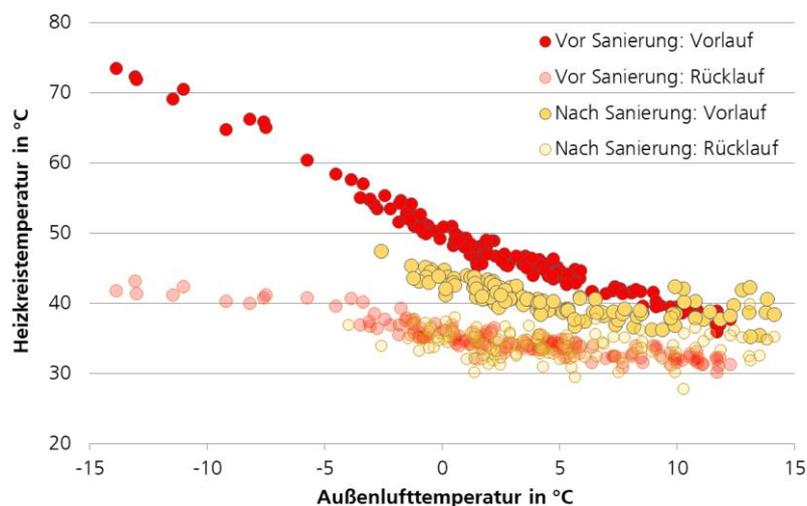


Abbildung 88: Heizkreistemperatur über der Außenlufttemperatur als Tageswerte im Zeitraum Januar 2021 bis Mai 2021 „vor Gebäudesanierung“ und 24. Dezember 2021 bis Mai 2022 (ohne 30. Dezember bis 13. Januar) „nach Gebäudesanierung und nach Anpassung der Heizkurve“

Abbildung 89 zeigt die Arbeitszahl über der Außenlufttemperatur als Tageswerte. Die Arbeitszahl berücksichtigt den elektrischen Energiebezug des Verdichters, des Ventilators und der Regelung. Die bereitgestellte Wärme wurde im „Heizraum“ (Entfernung Wärmemengenzähler zu WP > 9m) gemessen;

die während der Abtauung dem Heizkreis entzogene Wärme wurde abgezogen. Die Temperaturabhängigkeit der Effizienz der Wärmepumpen wird deutlich. Bei einer Außenlufttemperatur von -5°C und einer Wärmesenktemperatur von rund $50^{\circ}\text{C}/40^{\circ}\text{C}$ liegt die Tagesarbeitszahl bei rund 2,2. Im Vergleich wird bei einer Außenlufttemperatur von $+5^{\circ}\text{C}$ und Wärmesenktemperatur von rund $43^{\circ}\text{C}/36^{\circ}\text{C}$ eine Arbeitszahl von rund 3,0 erreicht (vor Sanierung). Nach der Gebäudesanierung kann zum einen die Heizkreistemperatur abgesenkt werden. Zum anderen wirkt sich positiv auf die Arbeitszahl aus, dass die Wärmepumpe häufiger im Teillastbetrieb arbeitet. Nach Sanierung liegt die Arbeitszahl bei einer Außenlufttemperatur von $+5^{\circ}\text{C}$ im Mittel bei 3,5. Die Bandbreite der Arbeitszahlen wird insbesondere durch die Unterschiede im Betrieb (Dauer der Betriebsphasen, Teillastfaktor) bestimmt¹.

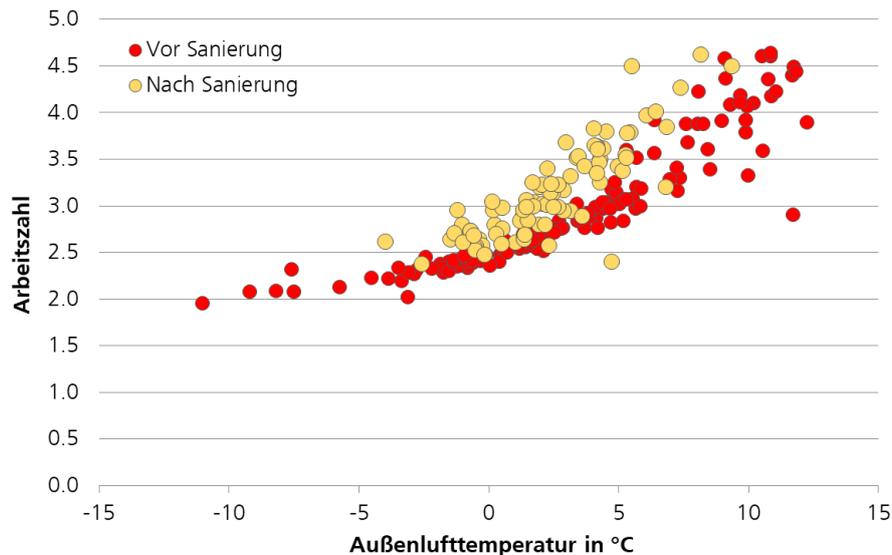


Abbildung 89: Arbeitszahl über der Außenlufttemperatur als Tageswerte im Zeitraum Januar 2021 bis Mai 2021 „vor Gebäudesanierung“ und 24.Dezember 2021 bis Mai 2022 (ohne 30.Dezember bis 13.Januar) „nach Gebäudesanierung und nach Anpassung der Heizkurve“ an Tagen mit einer bereitgestellten Wärmemenge über 25 kWh/d

7.2.3.2 Lüftung

Die Messdaten aus den Lüftungsanlagen werden kontinuierlich aufgenommen. Durch das Monitoring konnte auch festgestellt werden, welche Lüftungsgeräte bzw. welche Komponenten Ausfälle zu verzeichnen hatten, die beseitigt wurden. Ebenso konnten im Regelungscode enthaltene Fehler korrigiert werden.

7.2.3.3 Ausblick

Mit dem Gebäudebesitzer und den Industriepartnern werden Gespräche geführt, um die Datenaufnahme und Auswertung über die Projektlaufzeit hinaus sicherstellen zu können.

¹ Es liegt eine Unschärfe bei der Messung der Außenlufttemperatur vor, da die Positionierung des Sensors bis zur Fertigstellung der Gebäudehülle zeitweise geändert wurde und teilweise u.U. durch den Wärmepumpenauslass beeinflusst wurde. Dieser Effekt wird als untergeordnet bei der Erklärung der Streuung der Arbeitszahl bei gleicher Außenlufttemperatur eingeordnet.

7.3 SanBest – Wohnhausanlage in Freiburg

Wohnhausanlage Freiburg

Es ist eine Wohnanlage mit 43 Wohnungen, darin wurden 2 neue Grundwasser-WP für Heizung und TWW eingebaut mit Spitzenlastversorgung im Parallelbetrieb. Neue Speicher, Legionellenfilter und Absenkung des TWW Temperaturniveau (Zulassung beantragt) sollen die Effizienz steigern. Der Umbau fand in bewohntem Zustand in der Heizperiode (Heizcontainer während Umbaumaßnahme) statt.

Es wurden in einer aufwendigen Vorplanung verschiedene Konzepte diskutiert. Das umgesetzte Konzept dient als Proof-of-concept für weitere Bestandssanierungen im Contractingmodell. Die Komponentenauslegung und Abwicklung sollen weiter standardisiert werden. Das Contracting ist mit Effizienzgarantie (min. JAZ) festgelegt.

Es wurde in 2 Schritten saniert: 1) Ausbau alter Komponenten mit gleichzeitigem Heizbetrieb (Wärmecontainer ausserhalb); 2) Umbau der Wärmepumpenanlage



Gebäude		Trinkwarmwasser	
Ort	Freiburg, Baden-Württemberg	Systemtyp	zentral
Baujahr	2002	WW-Temperatur	65 °C
Wärmeübergabe	<u>Fussbodenheizung</u>	Zirkulation	ja
Beheizte Wohnfläche	3430 m ²		
Gebäudehülle	WDVS 20cm		
Wärmepumpe und Quelle		Heizung	
Anzahl WP	2	Wärmebedarf	ca. 60 kWh/(m ² a)
Installierte Leistung	146 kW _{th} +77 kW _{th} (W10/W35)	Heiztemperatur	43/37 °C
Betriebsart	monovalent		
Wärmequelle	Grundwasser		
Weitere Infos		Lessons learned	
Investitionskosten	NN	Monitoring des Betriebs	
Lüftungssystem	nein	Standardisierung Komponentenauslegung und Abläufe	

Abbildung 90: Steckbrief der Wärmepumpenanlage.

Vom Projektpartner Energiedienst wurde ein Gebäudeensemble mit 43 Wohnungen zur Verfügung gestellt. Die Details werden im Projektbericht zum angegliederten Projekt SanBest berichtet: Sanierung und integrierte Energieversorgung von Bestandsgebäuden in der Wohnungswirtschaft, Energiedienstleistungen für die Wärme-, Kälte- und Stromversorgung von Bestandsgebäuden 03EGB0007A/B/C/D. Partner: Energiedienst AG, Waterkotte, Energiewerkstatt, ISE

7.3.1 Gebäude und bisherige Gebäudetechnik

Gebäude

Das Ensemble besteht aus 2 Mehrfamilienhäusern (11 & 15 Wohneinheiten), 2 Reihenhaus-Zeilen mit je 5 Häusern und 2 Doppelhäusern. Der Standort Freiburg im Breisgau liegt mit einer Normaußenlufttemperatur von -9,7°C in einer der wärmsten Regionen Deutschlands (DIN EN 12831-1).

Das Gebäude wurde im Jahr 2002 errichtet und umfasst eine beheizte Fläche von 3.430 m². Die Wärmeversorgung wird zentral bereitgestellt.



Abbildung 91: Gebäude.

Vorheriges Wärmeversorgungskonzept

Die Gebäude des Ensembles sind mit Fußbodenheizungen ausgestattet und wurden seit dessen Errichtung über ein zentrales Wärmepumpensystem (Grundwasser/Wasser-Wärmepumpe) beheizt. Die Trinkwassererwärmung erfolgte ebenfalls zentral über das Wärmepumpensystem.

Die Wärmeversorgung wird in einem Contractingmodell betrieben. Der Energieversorger Energiedienst hat das Gebäude im Jahr 2020 übernommen und für eine nächste Contractingphase umgerüstet. In der vorausgegangenen Phase lief die WP mit einer JAZ von ca. 1,9 (WW überwiegend über Heizstab). Eine neue Contractingphase war notwendig geworden, weil das System aufgrund des ineffizienten Betriebes umgerüstet werden musste, für die bestehende Wärmepumpenanlage jedoch keine Ersatzteile mehr lieferbar waren. Die bestehende Altanlage wurde ausgebaut und durch eine neue Anlage ersetzt. Dies erfolgte im Winter 2020 im vollen Heizbetrieb, der mit einer außenstehenden Heizeinheit während der Umbauphase bewerkstelligt wurde.

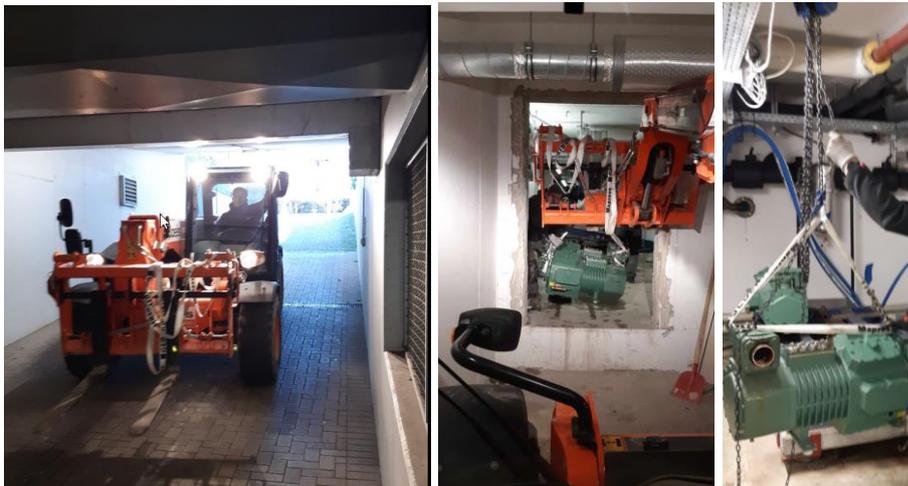


Abbildung 92: Abbau der alten Anlage mit Gabelstapler über Tiefgarage.

7.3.2 Neues Energieversorgungskonzept

Die Heizzentrale wurde komplett neu konzipiert und im Zuge des Umbaus wurde der Quellbrunnen nachgebohrt. Das neue System besteht aus zwei zwei-stufigen Grundwasser/Wasser-Wärmepumpen. Die Wärmepumpen wurden für einen monovalenten Betrieb ausgelegt. Es ist keine elektrische Zusatzheizung in dem System eingebaut. Die Wärmepumpen wurden für unterschiedliche Einsatzbereiche gewählt. Die eine Wärmepumpe ist vorrangig für die Raumheizung und die andere Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung vorgesehen. Das hydraulische Konzept ermöglicht es, dass diese auch jeweils für die andere Funktion unterstützend eingesetzt werden (vgl. Abbildung 93).

- Wärmepumpe 1 (hier NT-Wärmepumpe genannt)
 - Raumheizung
 - $Q_{H,N}$ (W10/W35, 100%): 146 kWh
 - COP (W10/W35): 5,6
 - T_{max} : 64°C
 - Kältemittel: R410A
- Wärmepumpe 2 (hier HT- Wärmepumpe genannt)
 - Trinkwassererwärmung
 - $Q_{H,N}$ (W10/W35, 100%): 77 kWh
 - COP (W10/W35): 5,3
 - T_{max} : 75°C
 - Kältemittel: R134A

Die Trinkwasserspeicher (2 x 900 L) werden über einen außenliegenden Wärmeübertrager erwärmt. Im System ist eine Ultrafiltration eingebaut, deren Betrieb eine Reduktion der Trinkwassertemperatur und damit Steigerung der Effizienz ermöglicht. Während der Projektlaufzeit wurde die Ultrafiltration nicht in Betrieb genommen und die Trinkwassererwärmung bei herkömmlichen Temperaturen betrieben. Im Heizkreis ist ein 900 L Pufferspeicher eingebunden. In dem System ist eine passive Kühlung vorgesehen, die jedoch während der Projektlaufzeit nicht betrieben wurde.

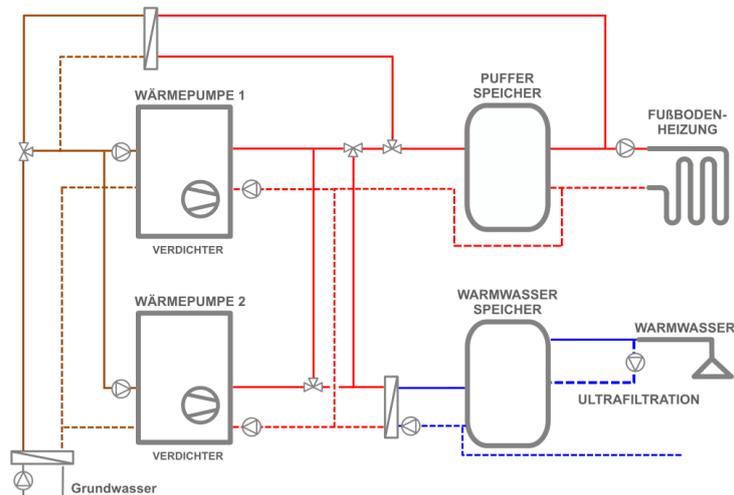


Abbildung 93: Schematisches Anlagenschema des Demonstrationsobjektes SanBest.

Im Ergebnis entstand eine Wärmepumpenanlage mit einer verbesserten Jahresarbeitszahl, was für ein Contractingmodell mit garantierter minimaler JAZ unerlässlich ist. Es bleibt festzustellen, dass die Komponentenauslegung und Abwicklung für weitere Contractingmodelle weiter standardisiert werden muss.



Abbildung 94: Wärmepumpen (links) und Speicher (rechts).

7.3.3 Ergebnisse Monitoring

Das Monitoring wurde im April 2020 in Betrieb genommen. Die hier gezeigten Ergebnisse umfassen eine zweijährige Auswertungsperiode von Juli 2020 bis Juni 2022.

Abbildung 95 zeigt die monatliche Wärmenutzung zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung über den zweijährigen Auswertungszeitraum. Die Heizwärmenutzung lag bei $59 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ im ersten Auswertungsjahr (2020/2021) und $51 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ im zweiten Auswertungsjahr (2021/2022). Dies spiegelt die unterschiedlichen Wetterbedingungen in den beiden Wintern wider. Zur Trinkwassererwärmung wurde eine jährliche Wärmemenge von $36 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. $42 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ benötigt. Die höhere Wärmenutzung in der Periode 2021/2022 ist auf einen Fehlbetrieb im Zeitraum Dezember 2021 bis Februar 2022 zurückzuführen; in dieser Zeit wurde durch einen Fehler in der Anlagenhydraulik auf der Wasserentnahmeseite kontinuierlich Warmwasser entnommen. Der Anteil der Wärmenutzung zur Trinkwassererwärmung an der gesamten bereitgestellten Wärme beläuft sich auf 38% in 2020/2021 („kälterer Winter“) und 42% in 2021/2022 („wärmerer Winter“, Fehlbetrieb).

Die Wärmenutzung zur Trinkwassererwärmung wird durch die Bewohner (Anzahl und Nutzungsverhalten), die Ausführung und den Betrieb der Warmwasserzirkulation sowie - zu dem geringsten Anteil - den Speicherverlusten bestimmt. Die Wärmemenge, die am Speicherausgang im Zuge von Trinkwasserzapfungen (bei regulärem Betrieb) gemessen wird, beträgt rund $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die Wärmemenge der Zirkulation, die 24 h/d in Betrieb ist, liegt mit $19 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ um ein Viertel höher. Diese Angaben beziehen sich auf den Zeitraum 2020/2021, um den irregulären Betrieb im Winter 2022 nicht zu berücksichtigen.

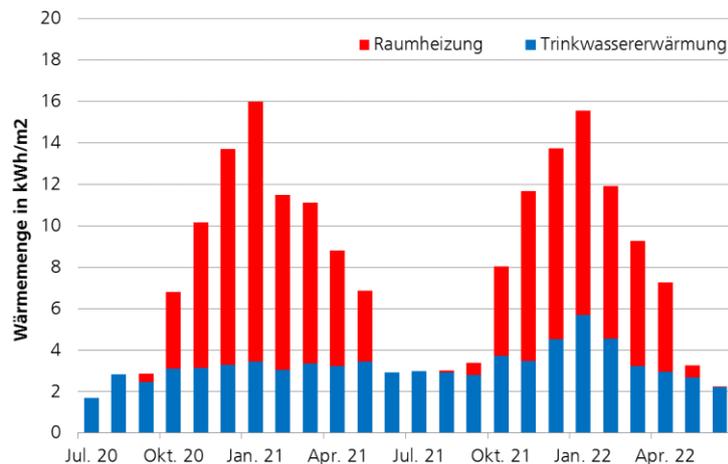


Abbildung 95: Wärmemenge zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2022.

Die Raumheizung wurde zunächst bei 32°C / 27°C (Vorlauf / Rücklauf der NT-Wärmepumpe) betrieben und in der ersten Heizperiode in zwei Stufen (im November und Dezember 2020) auf 41°C / 36°C erhöht. Seitdem wird die Anlage außenlufttemperaturunabhängig bei nahezu gleichen Temperaturen betrieben. Die Jahresarbeitszahl JAZ_1 der NT-Wärmepumpe lag bei 5,6 im Jahr 2020/2021 und bei 5,1 im Jahr 2021/2022. Die Bilanzgrenze 1 berücksichtigt die Wärmebereitstellung direkt nach den Wärmepumpen und umfasst den elektrischen Energiebezug des Kompressors und der Regelung.

Abbildung 96 zeigt die Arbeitszahl AZ_1 der Wärmepumpengeräte abhängig von der Wärmesenktemperatur (Mittelwert aus Vorlauf- und Rücklauftemperatur) als Tageswerte. Bei den niedrigsten Heizkreistemperaturen von 30°C erreichte die NT-Wärmepumpe eine Arbeitszahl von rund 6,5. Die überwiegende Zeit wurde die NT-Wärmepumpe bei einer mittleren Heizkreistemperatur um 39°C bei Arbeitszahlen im Bereich von 5,0 bis 5,5 betrieben. Die Unterschiede der Arbeitszahl sind neben den geringen Änderungen in der Wärmesenktemperatur auch auf Änderungen im Wärmequellenkreis zurückzuführen. Der Betrieb der Wärmequellenpumpe wurde geändert. Eine Erhöhung des Volumenstromes bewirkte eine Reduktion der Spreizung auf der Wärmequellenseite. Da die Soleeintrittstemperatur in die Wärmepumpen gleichgeblieben ist, erhöhte sich die mittlere Betriebstemperatur auf der Wärmequellenseite.

Für die Trinkwassererwärmung lag die mittlere Betriebstemperatur bei 62°C / 58°C (Vorlauf / Rücklauf der HT-Wärmepumpe) bis April 2021 (mit Ausnahme von August 2020). Aufgrund von Änderungen in den Sollwerten der Trinkwasserbeladung wird die Anlage seither mit rund 66°C / 61°C betrieben. Die Jahresarbeitszahl JAZ_1 der HT-Wärmepumpe lag 2,8 im Jahr 2020/2021 und 2,7 im Jahr 2021/2022. Abbildung 97 zeigt auch hier die Temperaturabhängigkeit der Arbeitszahl.

Zusammen betrachtet werden die beiden Wärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl JAZ_1 von 4,0 (2020/2021) bzw. 3,5 (2021/2022) betrieben. Die JAZ_1 fällt im zweiten Jahr geringer aus, da zum einen Betriebstemperaturen im Mittel höher lagen und zum anderen der Anteil der Trinkwassererwärmung größer ausgefallen ist. Zur Bewertung der Anlageneffizienz ist der Wärmequellenantrieb zu berücksichtigen. Dies wird mit der Bilanzgrenze 2 wiedergegeben. Der Wärmequellenantrieb besteht hier aus einer Grundwasserpumpe und je einer Wärmequellenpumpe je Wärmepumpe. Dieser beläuft sich auf gut ein Fünftel des Energiebezuges der Verdichter und Steuerung. Damit ergibt sich eine Jahresarbeitszahl JAZ_2 von 3,1 bzw. 2,8. Der hohe Energiebezug ist hauptsächlich auf die Brunnenpumpe zurückzuführen. Diese wird mit der gleichen Drehzahl betrieben, unabhängig davon, ob eine oder beide Wärmepumpen in Teillast oder Vollast aktiv sind. Die Leistungsaufnahme beträgt 5 kW. Hier liegt somit eine gute Optimierungsmöglichkeit. Die Sole-Pumpen der beiden Wärmepumpen werden drehzahl geregelt und haben im Mittel einen elektrischen Leistungsbezug von 0,5 kW (NT-Wärmepumpe) und 0,2 kW (HT-Wärmepumpe).

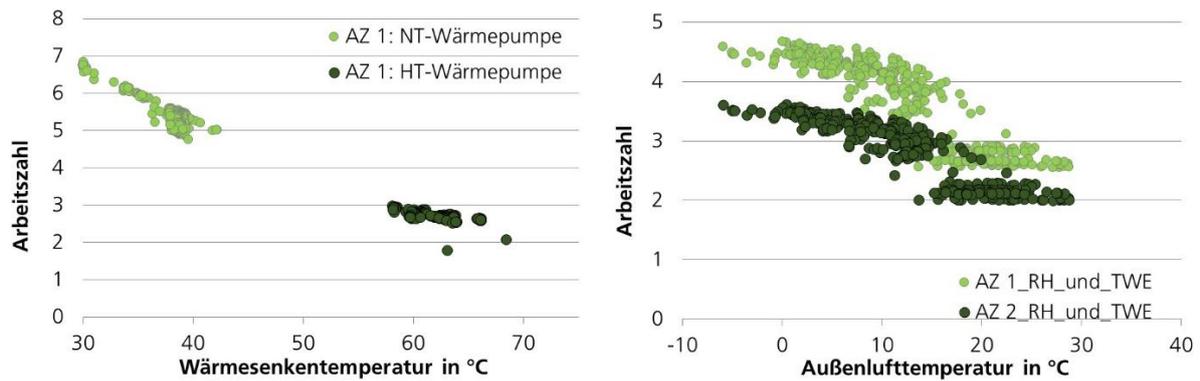


Abbildung 96: Tageswerte der Arbeitszahl 1 (Verdichter und Steuerung) der beiden Wärmepumpen über der Heizkreisvorlauftemperatur (links) und Arbeitszahl 1 sowie Arbeitszahl 2 (Verdichter, Steuerung, Wärmequellenantrieb) der beiden Wärmepumpen zusammen betrachtet über der Außenlufttemperatur (Juli 2020 bis Mai 2022).

Die HT-Wärmepumpe ist bei „regulärem“ Betrieb im Mittel 7 h/d in Betrieb; rund 11-mal am Tag für je 30 bis 50 Minuten. Hierbei startet die HT-Wärmepumpe zunächst in der ersten Laststufe (1 Verdichter) und schaltet nach wenigen Minuten den zweiten Verdichter hinzu (Volllast). Abbildung 97 zeigt die tägliche Betriebszeit der beiden Wärmepumpen und deren mittlere Heizleistung abhängig von der Außenlufttemperatur.

Die Heizungswärmepumpe wird fast ausschließlich in Teillast (mit einem Verdichter) betrieben. Auch in der kältesten Winterwoche (9.2. bis 15.2.2021) mit Tagesmitteltemperaturen unter 0°C wurde der Raumwärmebedarf bei einer Betriebszeit von 22 h bis 24 h bei Teillastbetrieb gedeckt. Nur für wenige Minuten schaltete die Wärmepumpe auf Volllast um. Auch wenn die Normaußenlufttemperatur¹ (-9,7°C) noch niedriger liegt, zeigt sich eine deutliche Überdimensionierung der Anlage und zu geringe Kaskadierung der Leistungsstufen. Zusätzlich zu der praktisch nicht vorhandenen Leistungsregelbarkeit der Heizungswärmepumpe wirkt sich die gewählte Speichereinbindung ungünstig auf das Betriebsverhalten der Wärmepumpe aus. Sowohl in der Übergangszeit als auch in der Kernheizperiode mit einer täglichen Laufzeit über 20h taktet die NT-Wärmepumpe vom Bereich von 20- bis 50-mal am Tag. Der Heizungsspeicher hat ein Volumen von 900 l, die Wärmepumpe im Mittel eine Heizleistung von 70 kW und die Volumenströme liegen bei rund 10 m³/h (Wärmepumpe) und i.d.R. 7 bis 13 m³/h (Raumheizung). Beispielbetrachtung: Wenn der Heizkreis nach Ausschalten der Wärmepumpe mit einem Volumenstrom von 10 m³/h betrieben wird, ist der Heizungsspeicher innerhalb von 5 min einmal mit dem Rücklauf „durchflossen“.

Das System weist eine gute Jahresarbeitszahl auf, die durch Änderungen des Betriebes des Wärmequellenkreises noch erhöht werden kann. Für Auslegungen in zukünftigen Wärmepumpeninstallation lässt sich aus dieser Anlage ableiten, dass eine angepasste Dimensionierung, insbesondere eine sinnvolle Kaskadierung und Wärmepumpenmodulation wichtige Voraussetzungen sind, um einen Betrieb mit geringer Taktung zu ermöglichen.

¹ DIN/TS 12831-1 vom April 2020 (<https://www.waermepumpe.de/normen-technik/klimakarte>)

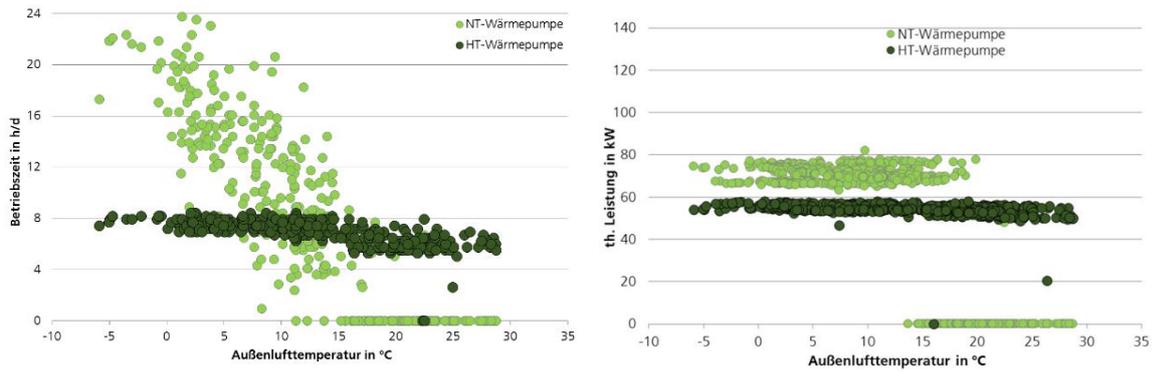


Abbildung 97: Tägliche Betriebszeit (links) und mittlere Heizleistung (rechts) der beiden Wärmepumpen abhängig von der Außenlufttemperatur.

7.4 Hamburg Bramfeld

Wohngebäude Hamburg Bramfeld

Es werden vom Projektpartner mehrere Reihenhauszeilen und Gebäude zur Verfügung gestellt, bei welchen eine Sanierung vorgenommen wird. Für eine Reihenhauszeile wird eine Wärmepumpenanlage mit 2 Wärmepumpen und 2 Speichern (Heizungs-Pufferspeicher, Warmwasserspeicher) eingebaut. Eine Temperaturabsenkung im TWW-Kreislauf mit Legionellenfilter wird überprüft.

Es werden folgende Komponenten und Systeme demonstriert: Wärmepumpe zur Heiz- und TWW-Versorgung; Umstellung der TWW Versorgung auf ein niedriges Temperaturniveau mit Wasserzapfmengenmessungen und TWW Qualitätsmessungen. Einbau von dezentralen Lüftungsanlagen mit minimal-invasiver Leitungsverlegung in der Dämmebene und Anströmung von neu entwickelten Heizflächen. Die Dachflächen wurden 2010 erneuert und gedämmt, teilweise mit PV belegt. Die Fassaden werden mit einer neuen Vorsatzschale 18 cm Dämmung und Klinkerriemchen belegt.



Gebäude		Trinkwarmwasser	
Ort	Bramfeld, Hamburg	Systemtyp	zentral
Baujahr	1950	Max. Temperatur	65 °C
Wärmeübergabe	Heizkörper	Zirkulation	ja
Beheizte Wohnfläche	480 m ²		
Gebäudehülle	WDVS 18 cm nach Sanierung		
Wärmepumpe und Quelle		Heizung	
Anzahl WP	2	Wärmebedarf	ca. 200 kWh/(m ² a)
Installierte Leistung	2 x 13 kW _{th}	vor Sanierung	
Betriebsart	monovalent	Heiztemperatur	55/45 °C
Wärmequelle	Luft		
Weitere Infos			
Investitionskosten	NN		
Lüftungssystem	Ja, in Fassade integriert		

Abbildung 98: Steckbrief der Wärmepumpenanlage.

Es werden vom Projektpartner mehrere Reihenhauszeilen und Gebäude zur Verfügung gestellt, bei welchen eine Gebäudesanierung vorgenommen wird. Das Projekt wird separat gefördert:

Demonstration eines fassadenintegrierten Lüftungssystems & Wärmepumpenversorgung einer Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Hamburg Bramfeld; Förderkennzeichen: 03SBE0001E.

Es sollen folgende Komponenten und Systeme demonstriert werden:

Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung (Stiebel-Eltron)

- Umstellung der Trinkwassererwärmung auf ein niedriges Temperaturniveau mit Wasserzapfmengenmessungen und Hygiene-Messungen
- Einbau von dezentralen Lüftungsanlagen mit minimal-invasiver Leitungsverlegung in der Dämmebene und Anströmung von neu entwickelten Heizflächen (Westaflex, Kermi)

Die Entwicklung einer neuen Wärmepumpentechnologie bei Stiebel Eltron war mit vielen Herausforderungen verbunden und wird in FKZ 03ET1488A/B berichtet. Ersatzweise kommen jetzt zwei marktgängige Stiebel-Eltron Wärmepumpen zum Einsatz, die ebenfalls gemonitort werden, um einen Vorher-Nachher Vergleich ziehen zu können.

Da es im Zuge der Technologieentwicklung bei den Heizflächen und dann durch die Corona-Pandemie und die Verfügbarkeit von Material und Handwerkern und auch bei der Sicherung weiterer Finanzierungen durch den Gebäudebesitzer ebenfalls zu umfänglichen Verzögerungen kam, wird es erst nach Projektende zu der notwendigen Gebäudehüllsanierung und dem Einbau der Lüftungsanlagen kommen. Mit dem Gebäudebesitzer und den Industriepartnern werden Gespräche geführt, um die Datenaufnahme und Auswertung nach der Umbauphase und über die Projektlaufzeit hinaus sicherstellen zu können.

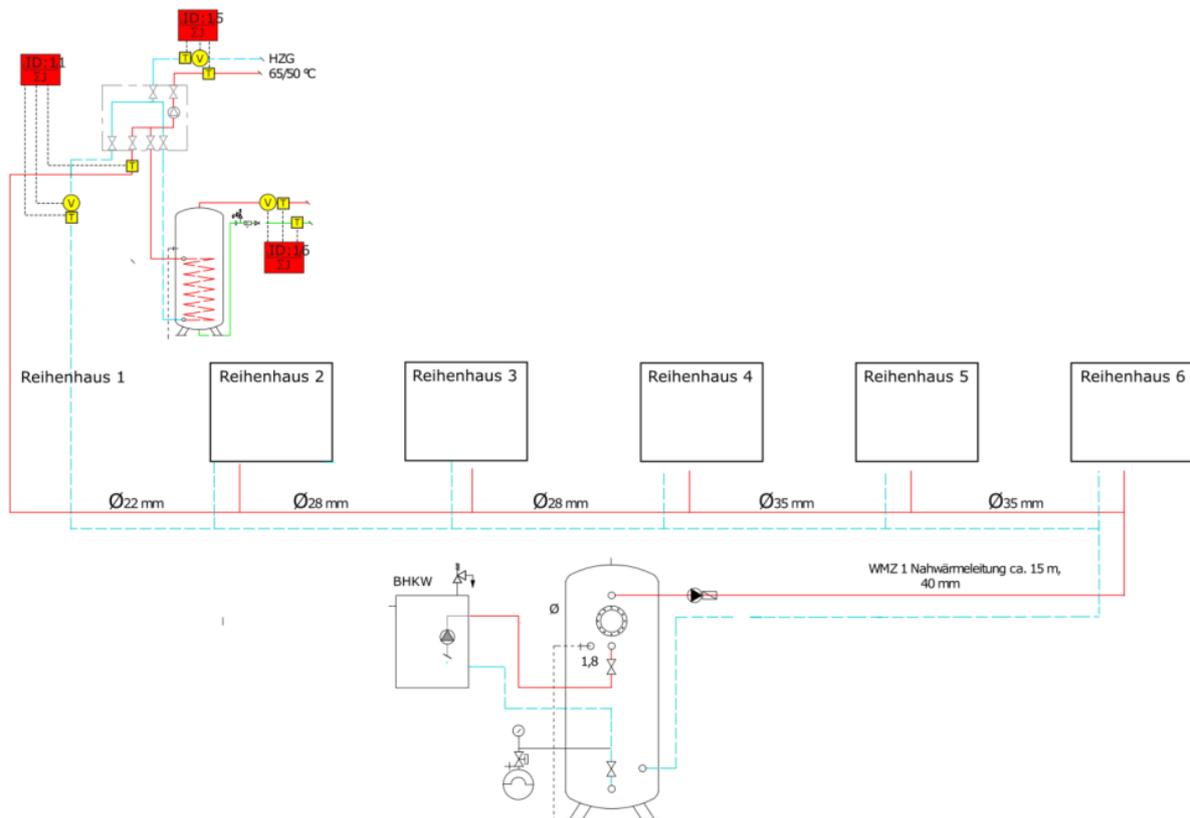


Abbildung 99: Anlagenschema mit Messpunkten vor Umbau; alle Gebäude sind wie Reihenhaus 1 mit WMZ ausgestattet¹.

Im Folgenden werden die Gebäudezeilen auf Basis der Messungen im Jahr 2021 kurz charakterisiert. In fünf der sechs Gebäude wurde der Gesamtwärmebezug des Gebäudes ausgewertet (zwei

¹ In Gebäude 5 ist der WMZ_gesamt defekt und in zwei Gebäuden traten Messfehler bei dem WMZ_Zapfung ca. auf. Es ist geplant, diese im Zuge des Systemumbaus zu erneuern.

Reihenendhäuser (Nr. 1 und 6) sowie drei Reihenmittelhäuser (Nr. 2, 3, 4, vgl. Abbildung 100). Der spezifische Wärmebezug für Raumheizung und Trinkwassererwärmung lag in den beiden Reihenendhäusern bei 107 kWh/(m²*a) bzw. 163 kWh/(m²*a). In den Reihenmittelhäusern lag der Gesamtwärmebezug zwischen 83 kWh/(m²*a) und 129 kWh/(m²*a). Die Wärmemenge der Trinkwasserzapfung wurde in vier der sechs Gebäude gemessen und lag zwischen 6 kWh/(m²*a) und 24 kWh/(m²*a). Als Bezug der Angabe dient die beheizte Wohnfläche.

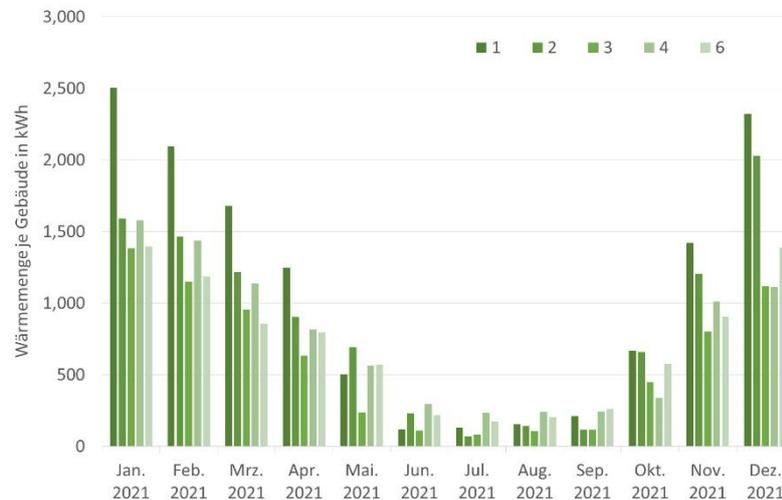


Abbildung 100: Wärmebezug (zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung) von fünf der sechs Reihenhäuser im Jahr 2021.

7.5 Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach

Die Demonstrations-Gebäude in Karlsruhe-Durlach sind Teil des Verbundvorhabens „SQ-Durlach: Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach“. Ziel ist die Konzeption, Umsetzung und Evaluierung eines innovativen Energieversorgungsystems zur energieeffizienten Energieversorgung eines Clusters aus fünf Bestands-Mehrfamilienhäusern (MFH) im Karlsruher Stadtteil Durlach. Das Energiekonzept besteht aus PV-Anlagen auf den Dächern aller Gebäude, zwei Wärmepumpen (WP) und einem Erdgas-BHKW mit Nahwärmeleitung (s. Abbildung 101). Für ein wirtschaftliches Betreiberkonzept soll dabei möglichst viel Strom der PV-Anlagen und der BHKWs lokal durch die Wärmepumpen und Mieter verbraucht werden. Dadurch wird angestrebt, den Primärenergieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu halbieren.

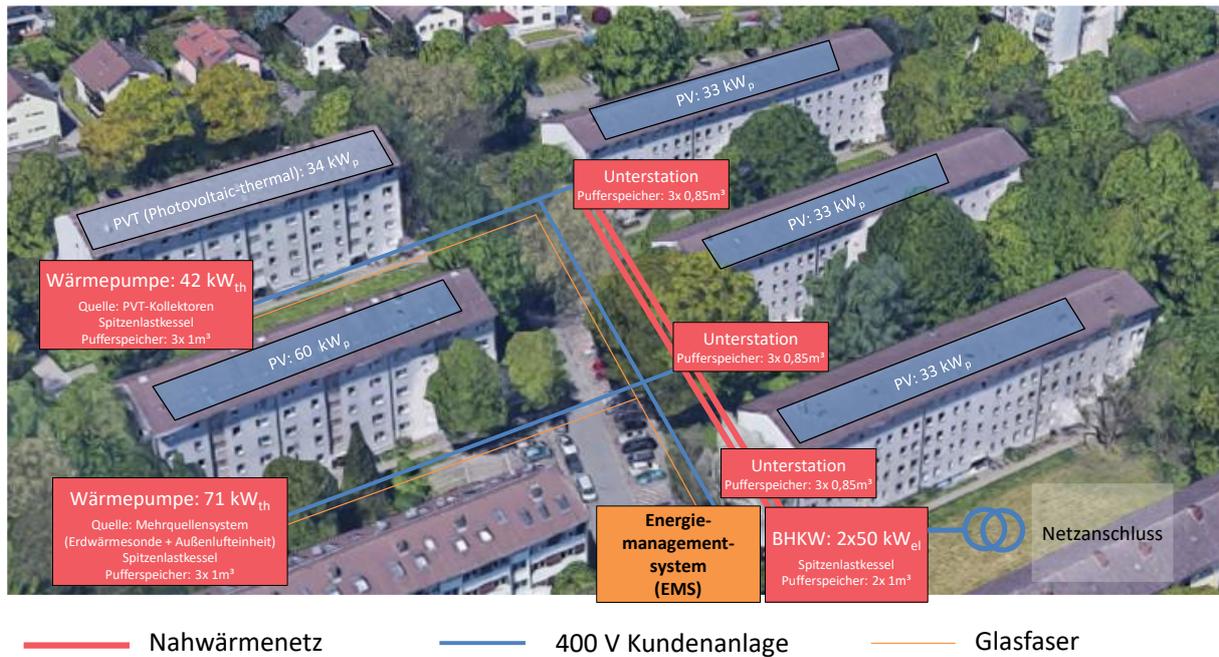


Abbildung 101: Finales Energiekonzept im Smarten Quartier Karlsruhe-Durlach.

7.5.1 Gebäude und bisherige Gebäudetechnik

Alle fünf Mehrfamilienhäuser grenzen an die Ersinger Straße. Auf der nördlichen Seite der Ersinger Str. befinden sich drei (ES1, ES3 und ES5) und südlich zwei Gebäude (ES2 und ES4). Die Mehrfamilienhäuser wurden im Jahr 1963 von dem Wohnungsbauunternehmen *Volkswohnung Karlsruhe* errichtet und enthalten zusammen insgesamt 175 Wohnungen. Die beheizte Wohnfläche beläuft sich zusammen auf ca. 11.600 m². In ES1 und ES3 befinden sich jeweils 40 Wohnungen auf fünf Etagen (30 Zwei-Zimmer-Wohnungen + 10 Vier-Zimmer-Wohnungen). In ES5 befinden sich 35 Wohnungen. Es ist abgesehen von der Wohnungsverteilung (15 Zwei-Zimmer-Wohnungen + 20 Vier-Zimmer-Wohnungen) nahezu baugleich zu ES1 und ES3. Die südlichen Gebäude ES2 und ES4 haben ebenfalls fünf Vollgeschosse, sind aber mit jeweils 30 Wohnungen (ausschließlich Drei-Zimmer-Wohnungen) etwas kleiner als die nördlichen Gebäude. Die TWW-Versorgung erfolgt in den nördlichen Gebäuden zentral. In den südlichen Gebäuden ES2 und ES4 erfolgt die TWW-Versorgung in den Bädern ebenfalls zentral. Zu beachten ist jedoch, dass die Küchen nicht an die zentrale TWW-Versorgung angeschlossen sind und mit Untertisch-Elektro-Boilern versorgt werden. Die wichtigsten Gebäudedaten sind in nachfolgender Tabelle 20 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 20: Kenndaten der Gebäude.

	Einheit	ES1	ES3	ES5	ES2	ES4
Anzahl Wohnungen		40	40	35	30	30
beheizte Wohnfläche	m ²	2.472	2.472	2.440	2.112	2.107
Nutzfläche	m ²	2.618	2.618	2.585	2.253	2.244

Die Mehrfamilienhäuser wurden im Jahr 1995 energetisch teilsaniert. Im Zuge der Modernisierung wurden neue Fenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung und Kunststoffrahmen eingebaut ($U_{\text{Fenster}} = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Zudem wurden die Außenwände (6 cm), die obersten Geschossdecken (12 cm, begehrbar) und die Kellerdecken (10 cm) wärme gedämmt. Dadurch wurde der Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Hülle von $U_{\text{Hülle}} = 1,71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $0,323 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesenkt. Der Wärmedurchgangskoeffizient der sanierten Gebäude liegt bei $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Des Weiteren wurden in allen Gebäuden Niedertemperatur-Gaskessel und in den Wohnungen Flachheizkörper mit

automatischen Thermostatventilen, die über im Fußboden verlegte Leitungen und vertikale Stränge mit der Heizzentrale verbunden sind, installiert.

Durch die Hüllsanierung und die neuen Fenster konnte der Heizenergieverbrauch der Mehrfamilienhäuser bezogen auf die beheizte Wohnfläche von 130 kWh_{th}/(m²a) auf 54 kWh_{th}/(m²a) verringert werden. Der TWW-Verbrauch belief sich auf rund 30 kWh_{th}/(m²a). Somit betrug der spezifische Energieverbrauch für Heizung und TWW 84 kWh_{th}/(m²a). Der Heizenergiebedarf und TWW-Verbrauch sind inklusive der Verteilverluste in Tabelle 21 für die fünf Mehrfamilienhäuser dargestellt.

Tabelle 21: Temperaturbereinigter mittlerer spezifischer Wärmeverbrauch über den Zeitraum 2015 bis 2017 für die 5 Mehrfamilienhäuser.

		ES1	ES3	ES5	ES2	ES4
Heizenergieverbrauch, Q_{Hz}	kWh _{th} /m ² a	48,9	52,7	55,7	58,9	54,2
TWW-Verbrauch, Q_{TWW}	kWh _{th} /m ² a	27,0	28,5	33,6	31,4	29,2
Wärmeverbrauch, Q_{th} = Q_{Hz} + Q_{TWW}	kWh _{th} /m ² a	75,9	81,2	89,3	90,3	83,9

Somit ergeben sich für die Wärmebereitstellung ein Primärenergieverbrauch von 117 kWh_{PE}/m² und CO₂-Äq.-Emissionen von 26 kg CO₂/m² und für den Stromverbrauch 52,4 kWh_{PE}/m² bzw. 15,3 kg CO₂/m². Dementsprechend betrug der spezifische Primärenergieverbrauch des Quartiers für Wärme und Strom 169,4 kWh_{PE}/m². Die spezifischen CO₂-Emissionen betragen zusammen 41,3 kg/m².

7.5.2 Neues Energiekonzept

Ziel des neuen Energiekonzepts ist es, möglichst viel lokale Energie (Solarenergie, Umweltenergie) im Quartier zu nutzen und möglichst wenig Überschuss-Strom ins öffentliche Netz zu speisen. Dadurch sollen die CO₂-Emissionen um 50 % gesenkt werden. Dies sollte abgesehen von einem Austausch einzelner Heizkörper in ES2 und ES4 nur mit der Sanierung der Heizungskeller erreicht werden. Das laufende Monitoring überprüft messtechnisch, ob dieses Ziel erreicht wird. Die durchgeführten Simulationsberechnungen bescheinigen dem neuen Energiesystem eine CO₂-Reduktion von 52 %. Ein weiteres Ziel neben der CO₂-Reduktion ist die Demonstration der neuen WP-Systeme und damit einhergehend die Entwicklung eines wirtschaftlichen und energieeffizienten Betreiberkonzepts. Insgesamt soll so eine breitere und schnellere Umsetzung der Wärmewende angestoßen werden.

Die Vorarbeiten begannen im Jahr 2020 und umfassten die Konzeption, Planung, Ausschreibung, und Vergabe. Ab Frühjahr 2021 wurde mit der Errichtung der ersten Ausbaustufe des neuen Energiesystems begonnen (PV und PVT-Anlage, Infrastruktur-Maßnahmen, Anschluss von mobilen Kesselanlagen nach Ausbau der vorhandenen Technik in den Heizzentralen und Errichtung des neuen Heizzentralen-Gebäudes) und bis Ende 2021 mit der Inbetriebnahme der Viessmann-Wärmepumpe in der ES4 abgeschlossen. Das gesamte Energiekonzept ist in Abbildung 101 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Lösungen (Heizzentrale mit Nahwärmenetz, PVT-Wärmepumpensystem und Mehrquellen-Wärmepumpen-System) vorgestellt.

7.5.2.1 Heizzentrale mit BHKW und Nahwärmenetz

Die drei nördlichen Mehrfamilienhäuser (ES1, ES3 und ES5), werden über eine Nahwärmenetz (2-Leiter) von zwei BHKW-Modulen und einem Spitzenlastkessel versorgt. Die BHKW-Module haben jeweils eine elektrische Leistung von 50 kW und eine thermische Leistung von 92 kW, der Gasbrennwertkessel eine thermische Leistung von 324 kW. Die Wärmeerzeugung (inkl. 2x3m³ Pufferspeicher) sind in der neu errichteten Heizzentrale¹ untergebracht. In den Unterstationen in den drei nördlichen Gebäuden stehen zusätzlich jeweils drei 0,85 m³ Speicher zur Verfügung. Dies ermöglicht eine größere Flexibilität beim BHKW-Betrieb und kann so die Anzahl der Taktzyklen vor allem in der Übergangszeit und im Sommer reduzieren. Ein vereinfachtes Hydraulikschema der

¹ Aufgrund eingeschränkter Platzverfügbarkeit in den bestehenden Heizungskellern musste eine neue Heizzentrale an der Stirnseite des Gebäudes ES5 errichtet werden.

Heizzentrale ist in Abbildung 102 und einer Unterstation in Abbildung 103 dargestellt, Fotos der Heizzentrale und einer Unterstation in Abbildung 104. Die TWW-Bereitung erfolgt in allen Gebäuden zentral und bedarfsgerecht mit zwei Frischwasserstationen je Gebäude. Die Leistung der Frischwasserstation beträgt 90 kW.

Auf den nördlichen Gebäuden werden PV-Anlagen mit 33 kW_p je Gebäude zum Einsatz kommen. Die nördlichen Anlagen sind noch nicht installiert, da dies aufgrund der aktuellen Förderungsstruktur wirtschaftliche Nachteile mit sich gebracht hätte. Auch das zweite BHKW-Modul konnte deswegen noch nicht installiert werden. Die Installation und Inbetriebnahme erfolgen mit einem Verzug von einem Jahr (366 Tage).

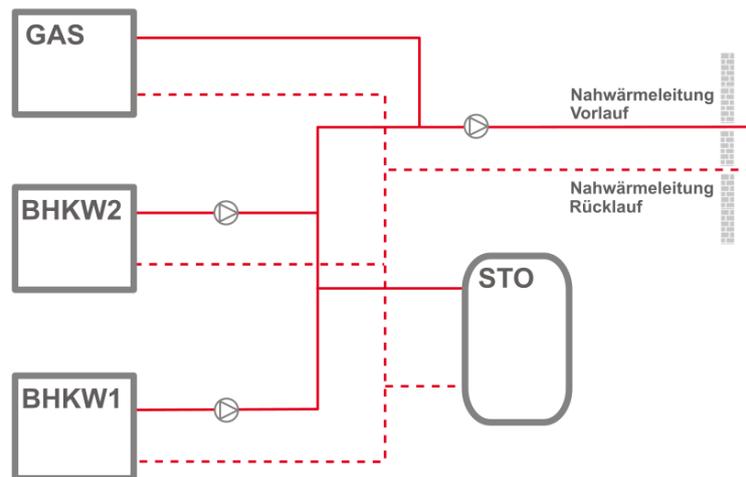


Abbildung 102: Vereinfachtes Hydraulikschema der neu errichteten Heizzentrale.

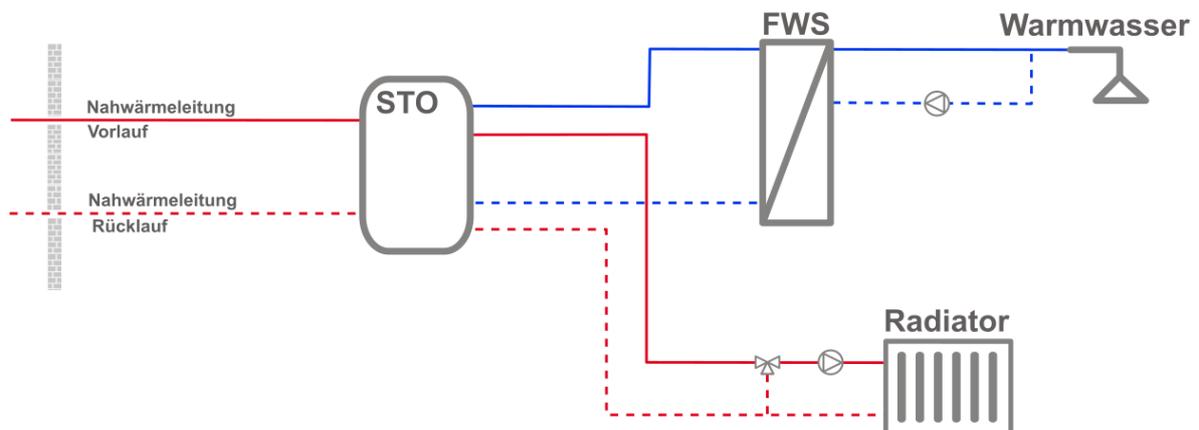


Abbildung 103: Vereinfachtes Hydraulikschema der Unterstationen in der ES1, ES3 und ES5.



Abbildung 104: Links: Heizzentrale mit BHKW (links im Bild) und Gaskessel (Bildmitte). Rechts: Unterstation mit Frischwasserstation (links im Bild) und Pufferspeicher (rechts im Bild).

7.5.2.2 PVT-Wärmepumpensystem in der Ersinger Straße 2

Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach, Ersinger Straße 2

Das Gebäude ist Teil eines Clusters von fünf großen sanierten Mehrfamilienhäusern aus den 1960er Jahren im Karlsruher Stadtteil Durlach, in dem im Rahmen des Forschungsprojekts "Smartes Quartier Durlach" ein integriertes Energiesystem demonstriert wird.

Das Gebäude wurde 1995 modernisiert (2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung, $U_{\text{Fenster}} = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) und die Gebäudehülle wärmedämmend: Fassade (6 cm), Kellerdecke (10 cm) und die oberste Geschossdecke (12 cm, begehbare). Das Gebäude hat eine beheizte Wohnfläche von 2112 m² verteilt auf 5 Etagen mit insgesamt 30 Wohneinheiten.

Die demonstrierte Wärmepumpentechnologie nutzt PVT-Kollektoren als alleinige Quelle. Außerdem wurden 13 von 150 Heizkörpern ausgetauscht, um eine Absenkung der Heiztemperatur auf 55/45 °C zu ermöglichen.



Gebäude		Trinkwarmwasser	
Ort	Karlsruhe, Baden-Württemberg	Systemtyp	zentral
Baujahr	1963	Max. Temperatur	65/55 °C
Wärmeübergabe	Heizkörper	Zirkulation	ja
Beheizte Wohnfläche	2112 m ²		
Gebäudehülle	6 cm Wärmedämmung (1995 renoviert)		
Wärmepumpe und Quelle		Heizung	
Anzahl WP	1	Wärmebedarf	ca. 60 kWh/m ² a
Installierte Leistung	55,4 kW _{th}	Heiztemperatur	55/45 °C
Betriebsart	bivalent		
Wärmequelle	PVT-Kollektoren		
Weitere Infos		Lessons learned	
Investitionskosten	NN	Monitoring des Betriebs	
Lüftungssystem	nein	Vereinheitlichung Komponentenauslegung und Abläufe	
PV-Anlage	ja (PVT)		

Abbildung 105: Steckbrief der Wärmepumpenanlage.

Die südlichen Gebäude ES2 und ES4 sind nicht an das Nahwärmnetz angeschlossen. In der ES2 ist eine 42 kW_{th} (B0/W35) starke Sole-Wasser-Wärmepumpe mit photovoltaisch-thermischen Kollektoren (PVT) als alleinige Wärmequelle installiert. Die unverglasteten PVT-Kollektoren haben zusammen eine

Kollektorfläche von 202 m² und nutzen Solarstrahlung über Photovoltaik-Zellen mit einer Leistung von 34 kW_p und Umweltwärme über rückseitige Lamellen-Wärmeübertrager. Die hybriden Kollektoren erzielen durch die Kühlung der PV-Zellen der Rückseite einen höheren PV-Ertrag als reine PV-Module. Gegenüber einer Luft-Wasser-WP erzielen sie außerdem höhere mittlere Quellentemperaturen. Zudem arbeiten sie lautlos und haben im Gegensatz zu Erdwärme-WP-Systemen weniger Einschränkungen durch Platzbedarf. Des Weiteren entfallen geologische Voraussetzungen für Bohrungen.

Das WP-System arbeitet bivalent alternativ und wird von einem 91,8 kW_{th} Gasbrennwertkessel zur Deckung der Spitzenlast unterstützt. In Abbildung 106 ist ein vereinfachtes Hydraulikschema und in Abbildung 107 die PVT-Kollektoren sowie die Wärmepumpe dargestellt. Wie bereits erwähnt erfolgt die Erneuerung der Wärmeversorgung des Quartiers hauptsächlich in den Heizungskellern. Um die Vorlauftemperatur in der ES2 auf 55/45 °C zu reduzieren wurden 13 der 150 Heizkörper durch Heizkörper mit höherer Leistung ersetzt. Im Zuge der Installation der PVT-Kollektoren auf dem Dach wurde die Fassade neu gestrichen, da sowieso ein Gerüst benötigt wurde. Die TWW-Bereitung wurde auf eine zentrale zweistufige Frischwasserstation mit einer Leistung von 100 kW umgestellt.

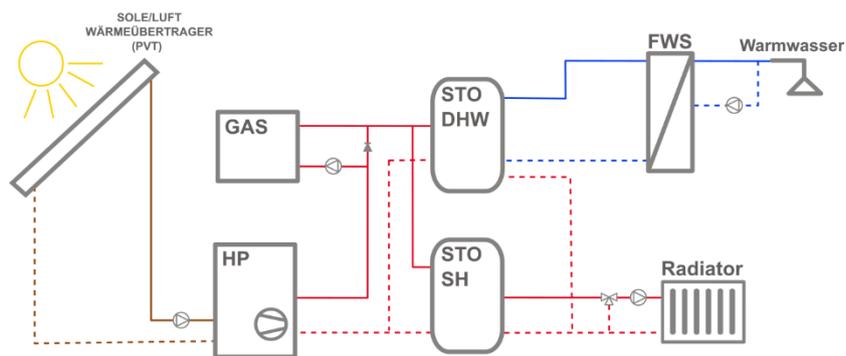


Abbildung 106: Vereinfachtes Hydraulikschema des PVT-Wärmepumpen-Systems in der ES2.



Abbildung 107: PVT-Kollektoren auf dem Dach der ES2

Die Anlage musste im September 2021 wieder abgeschaltet werden, weil es Mieterbeschwerden wegen zu hoher Geräuschpegel gab, die durch anschließende Akustik-Messungen bestätigt wurden. Die Haupt-Ursache dieses Problems betraf die Lärmemission der Lüfter eines Frequenzumformers. Dieser dient v.a. der Begrenzung des Verdichter-Anlaufstroms. Nach Ausbau des Frequenzumformers und Ersatz durch einen ‚Sanft-Anlauf‘ im Oktober 2021 war der Lärmpegel erheblich reduziert.

Erneute Messungen zeigten allerdings, dass neben der Lüftergeräusche der von Schwingungen der Wärmepumpenanlage verursachte Körperschall zu hoch war. Auf der Grundlage eines Akustik-Gutachtens sollen diese Geräuschquellen beseitigt werden (Ersatz der Gummigranulat-Platten im Sockel der Wärmepumpe durch ‚Sylomer‘, elastische Zwischenlagen im Gestell aus Stahlprofilen zur

Befestigung der Anschlussleitungen, Gummikompensatoren in Vor- und Rücklaufleitung). Dies zeigt die Wichtigkeit, die Schallthematik bei Wärmepumpen in Bestandsgebäuden in Planung und Umsetzung zu berücksichtigen.

7.5.2.3 Mehrquellen-Wärmepumpensystem in der Ersinger Straße 4 "HEAVEN"

Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach, Ersinger Straße 4 «HEAVEN»

Das Gebäude ist Teil eines Clusters von fünf großen sanierten Mehrfamilienhäusern aus den 1960er Jahren im Karlsruher Stadtteil Durlach, in dem im Rahmen des Forschungsprojekts "Smartes Quartier Durlach" ein integriertes Energiesystem demonstriert wird.

Das Gebäude wurde 1995 modernisiert (2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung, $U_{\text{Fenster}} = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) und die Gebäudehülle wärmegeämmt: Fassade (6 cm), Kellerdecke (10 cm) und die oberste Geschossdecke (12 cm, begehbare). Das Gebäude hat eine beheizte Wohnfläche von 2112 m² verteilt auf 5 Etagen mit insgesamt 30 Wohneinheiten.

Das Wärmepumpensystem wurde im Rahmen des Projekts „HEAVEN“ von der Fa. Viessmann und dem Fraunhofer ISE entwickelt: Die innovative Wärmequellenhydraulik nutzt die Synergien von Luft (Verfügbarkeit, Kosten) und Erdwärme (Leistung) als Wärmequelle und ermöglicht Regeneration und Abtauung durch intelligente Steuerung.




<p>Gebäude</p> <p>Ort Karlsruhe, Baden-Württemberg</p> <p>Baujahr 1963</p> <p>Wärmeübergabe Heizkörper</p> <p>Beheizte Wohnfläche 2112 m²</p> <p>Gebäudehülle 6 cm Wärmedämmung (1995 renoviert)</p>	<p>Trinkwarmwasser</p> <p>Systemtyp zentral</p> <p>Max. Temperatur 65/55 °C</p> <p>Zirkulation ja</p>
<p>Wärmepumpe und Quelle</p> <p>Anzahl WP 2</p> <p>Installierte Leistung 27 + 43 kW_{th}</p> <p>Betriebsart bivalent</p> <p>Wärmequelle Luft (Außeneinheit) + Erdwärmesonden</p>	<p>Heizung</p> <p>Wärmebedarf ca. 60 kWh/m²a</p> <p>Heiztemperatur 55/45 °C</p>
<p>Weitere Infos</p> <p>Investitionskosten NN</p> <p>Lüftungssystem nein</p> <p>PV-Anlage ja (PVT)</p>	<p>Lessons learned</p> <p>Monitoring des Betriebs</p> <p>Vereinheitlichung Komponentenauslegung und Abläufe</p>

Abbildung 108: Steckbrief der Wärmepumpenanlage.

In der ES4 befindet sich das HEAVEN WP-System¹. Dort sind zwei Wärmepumpen in Kaskade mit einer Heizleistung von 42,3 kW_{th} (B0/W35) und 28,7 kW_{th} (B0/W35) installiert. Sie werden mit Umweltwärme aus der Außenluft und dem Erdboden versorgt. Die Erdwärme wird über ein Erdwärmesondenfeld mit 30 kW Nominaleistung gewonnen. Zur Gewinnung der Umweltwärme aus der Außenluft wird ein Tischkühler, der von 4 Ventilatoren durchströmt wird, eingesetzt (40 kW nominal). Die so gewonnene Umweltenergie aus dem Erdreich und der Außenluft wird über eine neu entwickelte Mehrquellen-Hydraulik den Wärmepumpen zugeführt. Die Kombination der Wärmequellen Außenluft und Erdreich, vereint die Vorteile beider Quellen und adressiert das Problem der begrenzten Flächenverfügbarkeit in städtischen Wohngebieten. Im Vergleich zu einem System mit nur einer Wärmequelle kann so der Flächenbedarf des Erdwärmeübertragers um 50 % reduziert werden. Das Mehrquellen-WP-System wird von einem 91 kW_{th} Gasbrennwertkessel unterstützt und ist als bivalent paralleles System ausgelegt. Der Gasbrennwertkessel ist dabei für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser oberhalb von 62 °C und

¹ FKZ 03ET1540

für die Unterstützung der Bereitstellung von Heizwasser bei Außentemperaturen von unter -5 °C ausgelegt. Pufferspeicher ermöglichen wie in den nördlichen Gebäuden einen flexiblen Einsatz der Wärmeerzeuger. In Abbildung 109 ist ein vereinfachtes Hydraulikschema und in Abbildung 110 die Wärmepumpen-Kaskade sowie die Außenlufteinheit dargestellt. Wie auch in der ES2 wurden, um die Vorlauftemperatur auf $55/45\text{ °C}$ zu reduzieren, 13 der 150 Heizkörper durch Heizkörper mit höherer Leistung ersetzt. Im Zuge der Installation der PV-Kollektoren auf dem Dach (60 kW_p) wurde die Fassade neu gestrichen, da sowieso ein Gerüst benötigt wurde. Die TWW-Bereitung wurde auf eine zentrale zweistufige Frischwasserstation mit einer Leistung von 90 kW umgestellt.

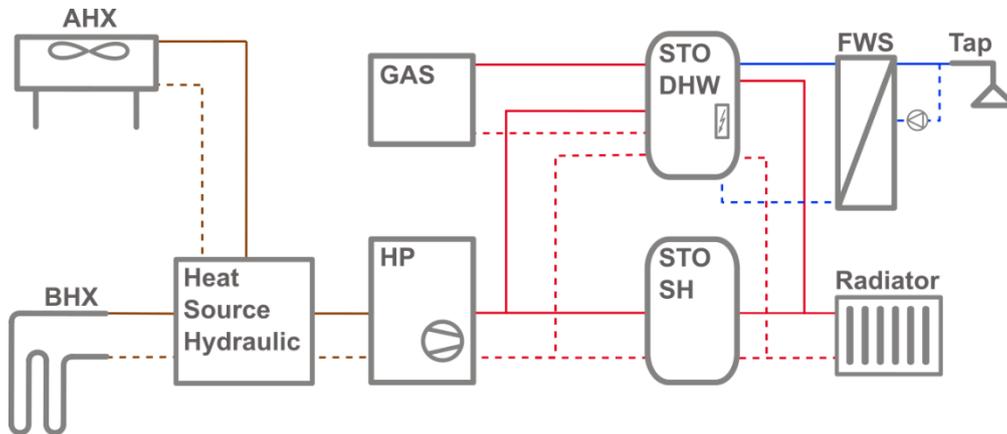


Abbildung 109: Vereinfachtes Hydraulikschema des Mehrquellen-Wärmepumpensystems (HEAVEN) in der ES4.



Abbildung 110: Links: Wärmepumpen-Kaskade. Rechts: Außenlufteinheit auf neu errichtetem Müllhäuschen.

7.5.2.4 Energiemanagement-System EMS

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Konzepts ist der Austausch von lokal erzeugtem Strom. Über ein Arealnetz (400V-Kundenanlage) kann der Strom von den BHKWs und den PV-Anlagen je nach Bedarf zu den WP-Systemen oder den Haushalten geleitet oder ins öffentliche Netz eingespeist werden. Ein Energiemanagementsystem (EMS) übernimmt dabei die Steuerung der Wärmepumpen und der BHKWs und soll am Ende den Betrieb der gesamten Anlagentechnik optimieren.

7.5.3 Ergebnisse Monitoring

Parallel zur Inbetriebnahme der Heiztechnik wurde das Monitoring-System installiert, das seit Frühjahr 2022 im Wesentlichen funktionsfähig ist. Da noch keine gesamte Heizperiode verstrichen ist erfolgt eine Auswertung der ersten Betriebsmonate im Winter und Sommer.

7.5.3.1 Gesamtquartier

Abbildung 111 zeigt eine Auswertung des Gesamtquartiers für jeweils einen Monat im Winter (Januar 2022) und im Sommer (Juni 2022). Die Energiebilanzierung erfolgt physikalisch, d.h. im Quartier erzeugter Strom wird vorrangig lokal verbraucht. Im Winterbetrieb konnte ein Autarkiegrad von 88 % und ein Eigenverbrauchsanteil von 81 % erzielt werden. Im Sommer liegt der Autarkiegrad bei 65 % und der Eigenverbrauchsanteil bei 70 %. Aufgrund des Mieterstrommodells und des Eigenverbrauchs von BHKW-Strom durch Wärmepumpen muss der Betreiber eigentlich den Stromverbrauch so abrechnen, als würde der erzeugte PV-Strom nur in den Haushalten (Mieterstrommodell) und der erzeugte BHKW-Strom nur in den Heizzentralen verbraucht werden. Dadurch verringert sich der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad deutlich.

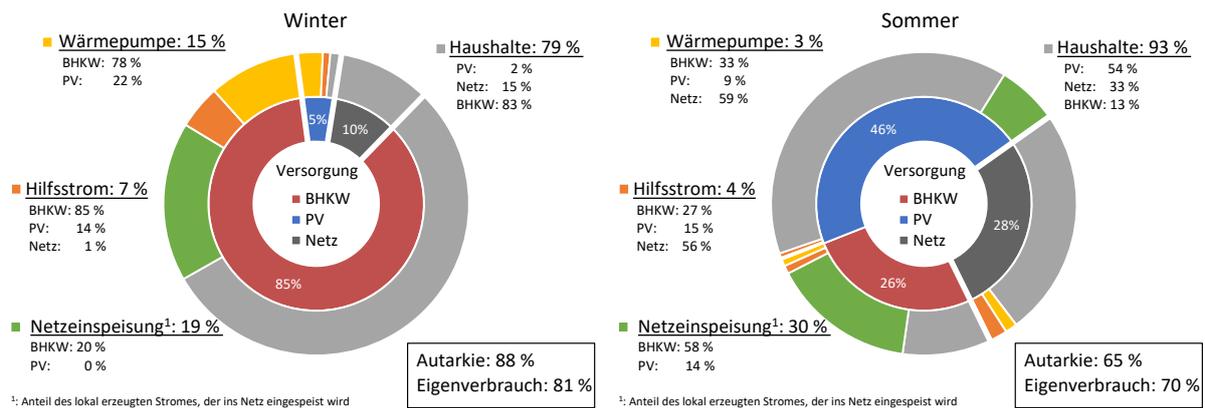


Abbildung 111: Energiebilanz des Gesamtquartiers im Winter (links) und im Sommer (rechts).

Im Winter können aufgrund der hohen Laufzeit etwa 80 % des BHKW-Stroms und aufgrund der geringen solaren Einstrahlung 100 % des PV-Stroms lokal verbraucht werden. Dadurch wird der Stromverbrauch zur Wärmeerzeugung (Wärmepumpe + Hilfsstrom) nahezu komplett lokal gedeckt werden und nur ca. 15 % des Haushaltsstroms müssen über das Stromnetz bezogen werden.

Dagegen wirkt sich die geringere Laufzeit des BHKWs sowie die damit verbundene zeitliche Verschiebung zwischen Verbrauch und Erzeugung negativ auf Autarkiegrad und Eigenverbrauch aus. Zwar können noch etwa 86 % des PV-Stroms lokal verbraucht werden, der Eigenverbrauch des BHKW-Stroms liegt aber nur bei 42 %. Der Stromverbrauch zur Wärmebereitstellung kann nur zu etwa 43 % und der Haushaltsstrom zu 67 % lokal gedeckt werden. Dies zeigt das große Optimierungspotenzial von einer optimierten Regelung mittels Energiemanagementsystem, welches Stromerzeugung und Stromverbrauch im Quartier synchronisieren soll.

Eine Abschätzung der CO₂-Äq.-Emissionen durch das neue Energiesystem im Quartier ergibt eine Reduzierung um 43 % im Sommer (Juni) und um 23 % im Winter (Januar). Aufgrund der zusätzlichen Stromerzeugung durch das BHKW und zusätzlichen Verlusten im Nahwärmenetz liegt der Gasverbrauch über dem des alten Systems. Durch den lokal erzeugten Strom (BHKW und PV) verringert sich aber der Strombezug und damit die CO₂-Äq.-Emissionen. Die Gutschrift durch Netzeinspeisung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Bilanz des Gesamtquartiers aus.

Das Ziel des Projektes, die CO₂-Äq.-Emissionen (bezogen auf den Nutzwärme- und Stromverbrauch im Quartier) um mindestens 50 % zu reduzieren, wurde mit der 1. Ausbaustufe noch nicht ganz erreicht. Nach Umsetzung der 2. Ausbaustufe der PV-Anlagen und des BHKWs sowie der Inbetriebnahme des zweiten Wärmepumpen-Systems (Ersinger Str. 2) wird der Gasanteil weiter gesenkt werden. Die höhere Stromerzeugung der BHKWs und die Erweiterung der PV-Anlage auf 194 kWp wird zudem die lokal erzeugte Strommenge weiter erhöhen. Die bisherigen Monitoringergebnisse lassen daher erwarten, dass mit der zweiten Ausbaustufe die ambitionierten Projektergebnisse erreicht werden.

7.5.3.2 Mehrquellen-Wärmepumpensystem "HEAVEN"

Die Auswertung der Mehrquellen-Wärmepumpenanlage "HEAVEN" erfolgt zunächst separat für zwei Betriebsperioden.

In Phase A (26.1-11.2.2022) wurde folgendes Optimierungspotenzial identifiziert: Das Viessmann-WP-System wurde mit einer konservativ parametrisierten Heizkurve mit Vorlauf-Temperaturen von 60 °C unter Außenlufttemperaturen von 0 °C betrieben. Obwohl die WP-Leistung und die Vorlauftemperaturen ausreichend für eine vollständige Deckung der Heizlast waren, hatte der Gaskessel dennoch einen Anteil von 23 % an der Wärmeerzeugung (Abbildung 112). Dies ist vor allem auf ein schlecht parametrisiertes Spitzenlast-Dreiwegmischventil zur Unterstützung des Raumheizungs-Kreises durch Warmwasser zurückzuführen.

Beide Optimierungspotenziale wurden in einer zweiten Betriebsperiode (Phase B: 19.2.-7.3.2022) unter vergleichbaren Umgebungs- und Quellentemperaturen sowie ähnlichem Heizbedarf adressiert. Die Heizkurve wurde abgesenkt und der Anteil der Spitzenlast-Zumischung reduziert. Außerdem wurde ein etwas höherer Anteil für die Nutzung der Erdwärmequelle beobachtet. Tabelle 22 zeigt die energetisch-gewichteten Mitteltemperaturen der Quelle und der Senke und die resultierende Arbeitszahl, welche die quellenseitige Hilfsenergie mitberücksichtigt (AZ_2), für beide Betriebsperioden.

Tabelle 22: Energetisch-gewichtete Mitteltemperaturen, gemittelter Tagesverbrauch TWW und Raumheizung sowie zugehörige AZ_2 .

Parameter	Einheit	Phase A	Phase B
$T_{\text{Außenluft}}$	°C	4.9	4.9
$T_{\text{Erdwärmesonden, VL}}$	°C	7.9	7.2
$T_{\text{Außenlufteinheit, VL}}$	°C	2.5	2.4
$T_{\text{WP, sek, VL}}$	°C	59.3	54.8
$T_{\text{Raumheizung, VL}}$	°C	54.0	49.4
$T_{\text{TWW, VL}}$	°C	71.6	72.0
$Q_{\text{Raumheizung}}$	kWh/d	775	679
Q_{TWW}	kWh/d	168	168
AZ_2	-	2.90	3.13

Die realisierten Verbesserungen führen zu den gewünschten Zielen: Der Anteil des Gaskessels zur Raumheizung wurde von 23 auf 16 % bzw. von 34 auf 28 % reduziert (Abbildung 112, rechts). Die Arbeitszahl AZ_2 stieg von 2,9 auf 3,13 durch die effektive Absenkung der mittleren Vorlauftemperatur $T_{\text{WP, sek, VL}}$ von 59 °C auf 55 °C (Tabelle 22). Außerdem wurden die Hysterese der Wärmepumpe im TWW-Betrieb, die Einschichtung des Rücklaufs der Frischwasserstationen sowie die Einschichtung des WP-Systems in die TWW-Pufferspeicher angepasst. Dadurch wurde ein stabilerer Betrieb des WP-Systems mit längeren Laufzeiten erzielt und der Anteil der WP an der TWW-Erwärmung konnte weiter gesteigert werden.

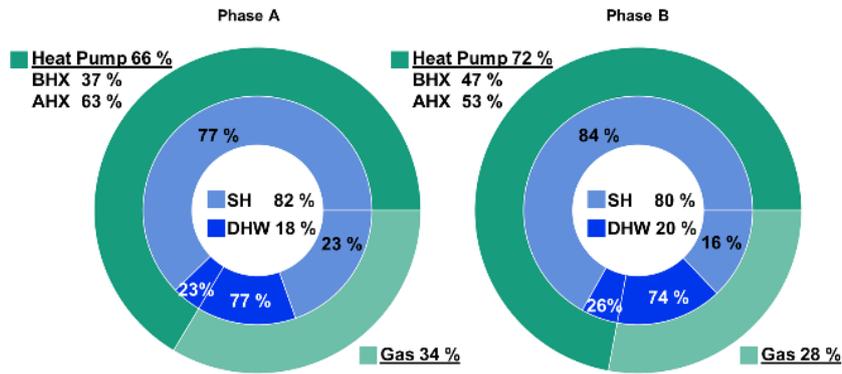


Abbildung 112: Anteil der Wärmeversorgung und Verbrauch in Phase A (links) und Phase B (rechts).

Abbildung 113 zeigt die Auswertung für das erste Betriebshalbjahr Februar – August 2022. In der linken Darstellung sind die Anteile je Subsystem (Quelle, Wärmeerzeuger, Verbraucher) und die energiegewichteten Temperaturen dargestellt. Der Anteil des Gaskessels im ersten Halbjahr beträgt 31 %. Dies ist zum einen auf die hohen Temperaturen für die Warmwasserbereitung und zum anderen auf eine suboptimale Regelung in Phase A. Die Mehrquellenhydraulik erzielt ganzjährig relativ hohe Quelltemperaturen, was zu der hohen Jahresarbeitszahl des ersten Betriebshalbjahrs von 3,2 beiträgt.

Optimierungspotential wird weiterhin auf der Wärmesenkenseite gesehen, z.B. der Optimierung der Energieeffizienz der Frischwasserstation. Außerdem kann durch angepasste Regelungsstrategien das Zusammenspiel von Wärmepumpe und Gaskessel in Hinblick auf Speicherschichtung optimiert werden. Durch den Einsatz von elektrischen Heizstäben kann außerdem die flexible Nutzung von PV-Überschussstrom für hohen Temperaturen realisiert werden. Für eine Skalierung und Übertragung der Ergebnisse auf Anlagen ohne wissenschaftliche Begleitung scheint vor allem eine Standardisierung von Komponenten, Hydrauliksystemen und Regelung erfolgsversprechend.

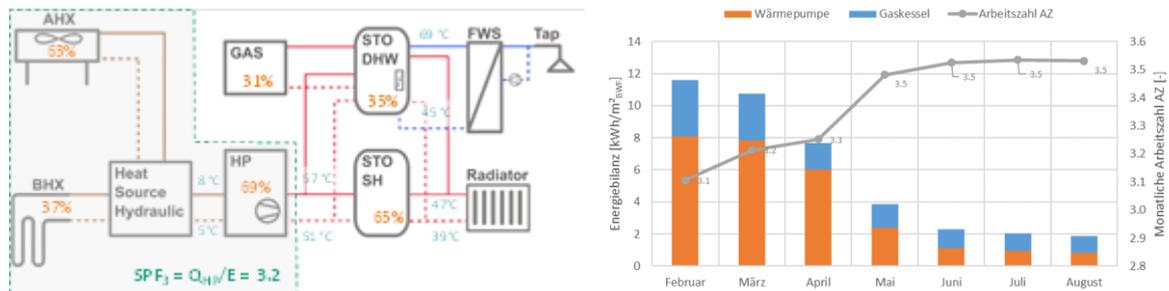


Abbildung 113: Auswertung der Monitoringergebnisse der HEAVEN-Anlage für das erste Betriebshalbjahr.

Detailliertere Informationen und weitere Ergebnisse sind in den entsprechenden Berichten der Projekte SQ-Durlach und HEAVEN enthalten. Ein Videobeitrag zum Quartierskonzept ist unter <https://www.lowex-bestand.de/index.php/karlsruher-energieservice-kes/?lang=de> zu finden. Das Quartierskonzept ist außerdem in Lämmle et al. (2020a) beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Methode des selektiven Heizkörperaustauschs und die Auswirkung auf Nenntemperaturen und die Effizienz von Wärmepumpensystemen sind in Lämmle et al. (2020) und Lämmle et al. (2022) dargestellt. Erste Monitoring-Ergebnisse werden in Lämmle et al. (2022b) veröffentlicht.

7.6 Demo Lüftung in Karlsruhe, KIT: Energy Smart Home Lab

Im Rahmen des Projektes wurde in AP 2.2. und AP 4 eine Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort und Luftqualität vorgenommen und es wird dort detailliert berichtet.

Die neu entwickelten **Lüftungs-Regelungsstrategien** und die Umsetzung der selbstlernenden Regelung wurden in einem Demonstrationsgebäude, dem Energy Smart Home Lab, am KIT demonstriert.

Nachfolgend wird diese prototypische Implementierung des selbstlernenden Reglers für dezentrale Lüftungsanlagen in einer Wohnung beschrieben. Selbstlernende Regelungsstrategien für Nichtwohngebäude und andere gebäudetechnische Systeme wurden bereits realisiert und erfolgreich implementiert. So haben z. B. (Cheng et al. 2016) eine lernende Regelung für Jalousien in einem Bürogebäude in einem 5-monatigen Test implementiert. Die Ergebnisse zeigten, dass der Algorithmus sich erfolgreich an die unterschiedlichen Komfortprofile der Nutzer anpassen kann. (Gunay et al. 2018) testeten ein neuartiges Schema zum Erlernen der Nutzerinteraktion mit Thermostaten in Bürogebäuden. Die 1-Jahres-Implementierung führte zu einer Reduktion der Temperatursollwerte im Winter um 2-3°C und zu einer Erhöhung im Sommer. (Park et al. 2019) implementierten eine adaptive Regelung für die Beleuchtung in fünf Büros für acht Wochen. Dieser Regler schaffte es, ein Gleichgewicht zwischen Nutzerkomfort und Energieverbrauch herzustellen und zeigte das Potenzial von Lernalgorithmen als nutzerzentrierten Ansatz auf. Studien über die Implementierung selbstlernender Regler für Lüftungsanlagen wurden bislang nicht publiziert. In dieser Studie wurde der simulierte selbstlernende DCV-Regler implementiert und drei Monate lang in einer Testwohnung untersucht. Es handelt sich dabei um das Energy Smart Home Lab (ESHL), das im Rahmen des MeRegio-Mobil Projekts errichtet wurde.

Das Wohnlabor ist ein ausgebauter Container, der sich auf dem Hauptcampus des Karlsruher Instituts für Technologie befindet. Die Wohnung hat zwei Schlafzimmer, einen Hauptraum (Kombination aus Wohnzimmer und Küche) und ein Bad/WC mit einer Gesamtfläche von ca. 60 m². Ein zusätzlicher Raum enthält die Gebäudetechnik, zu dem die Bewohner jedoch keinen Zugang haben. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Demonstrationsgebäude.



Abbildung 114: Die Küche (links) und die Westfassade (rechts) des ESHL.

Zwei Studierende (25-30 Jahre alt, ein Mann und eine Frau) bewohnten die Testwohnung vom 02.03.2020 bis zum 31.05.2020. In der Wohnung wurde ein System mit mehreren dezentralen fassadenintegrierten Lüftungsgeräten installiert, zusammen mit einer speziellen Nutzerbedienoberfläche. Ziel der Studie war es, die in Kapitel 6.3 vorgestellte **selbstlernende Regelungsstrategie** im Zusammenhang mit dem manuellen Betrieb der mechanischen Lüftung (über die Nutzerbedienoberfläche) zu untersuchen. Das vorgeschlagene Lüftungskonzept entspricht der Definition des AIVC bezüglich intelligenter Lüftungssysteme („Smart Ventilation“).



Abbildung 115: Der Wohnraum (links) und ein Schlafzimmer (rechts) des ESHL.

Die installierten Geräte sind dezentrale alternierend betriebene Pendellüfter vom Typ Vitovent 100D der Fa. Viessmann. Dieses ist ein wandintegriertes Gerät mit einem Axialventilator (maximaler

Volumenstrom 46 m³/h). Das Gerät wechselt die Luftförderrichtung in einer definierten Periodenzeit (üblicherweise 60 Sekunden). Es verfügt weiterhin über einen Filter und ein Wärmerückgewinnungssystem (WRG) aus einem Keramikwärmespeicher (nach DIBt 81% mittlere und maximal 91% Wärmerückgewinnung). Die Energieeffizienzklasse nach EU-Verordnung Nr. 1254/2014 ist A. Die Geräte wurden entsprechend installiert und die Wohnung mit Nutzung vermessen.

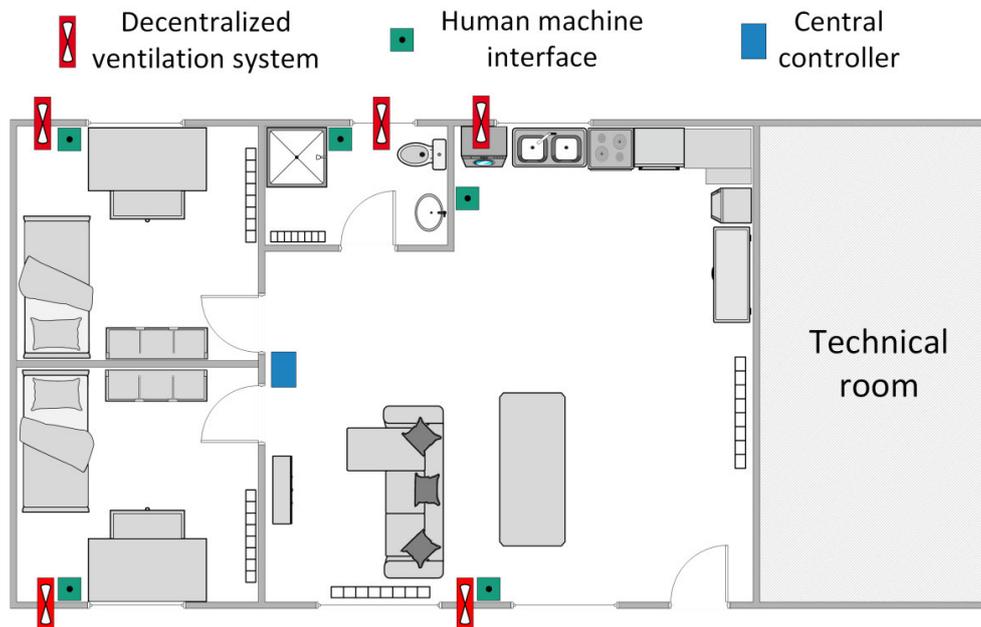


Abbildung 116: Grundriss des ESHL und Platzierung der Pendellüfter.

Die Implementierung des selbstlernenden Reglers in dezentralen Lüftungssystemen war erfolgreich. Es wurde ein IoT-Schema mit einer Nutzerschnittstelle entwickelt, über die die Bewohner die Lüftungsanlagen wie gewünscht bedienen konnten. Die Regelung lernte durch das Nutzerfeedback, sich an die Bedürfnisse der Bewohner anzupassen. Das installierte dezentrale Lüftungssystem überzeugte durch einen ausreichenden Luftaustausch, um die Leistungsindikatoren für die relative Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration im gewünschten Bereich zu halten. Der Energieverbrauch konnte nicht erfasst werden. Die vorgeschlagene selbstlernende Strategie konnte die Regelfelder in jedem Raum individuell und zufriedenstellend anpassen. In der Küche und im Wohnzimmer wurde in der Regel die Lüftungsstufe erhöht, während in den Schlafzimmern die Luftmenge meist verringert wurde. Auch wenn längere Lernzeiten berücksichtigt werden sollten, konnte ein raumindividuelles Lernschema die Singularitäten des Nutzerverhaltens in jedem Raum korrekt erfassen. Die Bewohner waren mit der Leistung der installierten Geräte zufrieden und hoben die Entwicklung der Nutzerschnittstelle hervor. Andererseits wurden die lauten Geräusche in den Schlafzimmern und die mangelnde Programmierbarkeit kritisiert. Smarte Wohnungslüftungssysteme wurden zwar als nützlich empfunden, sind aber nicht der einzige Aspekt, den die Nutzer für ihre Akzeptanz berücksichtigen. Die Umfrage ergab, dass die Motivationen und Präferenzen der Bewohner in Bezug auf die mechanische Lüftung unterschiedlich sein können, selbst wenn sie sich eine Wohnung teilen. Dies betont die Bedeutung der Individualisierung der Nutzerpräferenzen bei der Entwicklung innovativer, nutzerzentrierter Lüftungsregelungsstrategien.

Weitere Ergebnisse sind im AP 2.2 Bericht auf der LiB-Bestand Homepage zu finden:

http://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2022/01/2022-01-07_LiB_Bericht_AP2.2_AP4_L%C3%BCftung_sh_aktuell.pdf

7.7 Schlussfolgerungen und Umsetzungsempfehlungen

Bei der Planung von Wärmepumpensystemen für Bestandsgebäude gibt die vorhandene Anlage eine individuelle Ausgangslage vor. In einer sorgfältigen Bestandsaufnahme sind die Speicher-, Verteil- und Wärmeübergabesysteme zu erfassen. Es ist zu bewerten, ob über notwendige Instandsetzungsarbeiten hinaus Änderungen der vorhandenen Anlage notwendig sind, um einen zuverlässigen und effizienten Wärmepumpeneinsatz zu ermöglichen. Aus den im Rahmen des Projektes durchgeführten Studien und den Erfahrungen der Demonstrationsvorhaben lassen sich für die Planung der Neuanlage in Bestandsgebäuden folgende Punkte ableiten:

- Optimierung der Wärmeübergabesysteme mit dem Ziel einer Reduzierung der erforderlichen Heizkreistemperatur (z.B. Austausch der „ungünstigsten“ Heizkörper, vgl. Kapitel 4.3).
- Prüfung und Optimierung des Verteilsystems mit dem Ziel der Reduzierung der erforderlichen Heizkreistemperatur (z.B. hydraulischer Abgleich).
- Prüfung und Optimierung der Hydraulik in der Heizzentrale mit dem Ziel der Reduktion der Vorlauftemperatur zur Wärmenutzung bzw. die Erhöhung der Rücklauftemperatur zu der Wärmepumpe zu minimieren (z.B. Vermeidung von Überströmventilen).
- Wärmeübertrager zur hydraulischen Trennung nur einsetzen, wenn nötig.
- Prüfung, ob ein Heizungsspeicher notwendig ist. Falls ja: angepasste Dimensionierung und hydraulische Einbindung sowie geeignete Beladungsstrategie, um einerseits die Temperaturreduktion zwischen Beladung und Entnahme so gering wie möglich zu haben und zum anderen, um Takten der Wärmepumpe zu vermeiden.
- Aufteilung von Bereichen mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen, falls vorhanden (z.B. getrennte Speicher für Heizkreisanschluss an Fußbodenheizung und Heizkreis für Radiatoren)
- Aufteilung der Erzeugung nach unterschiedlichen Temperaturniveaus (z.B. Einsatz unterschiedlicher Wärmepumpe für Trinkwassererwärmung und Raumheizung bei Fußbodenheizungen)
- Leistungsaufteilung und / oder Leistungsregelung der Wärmepumpe, um die Deckung der Wärmelast zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung bei Gewährleistung eines effizienten Anlagenbetriebes und zulässiger Taktzyklen zu erzielen.

Bei der Konzeptionierung der Neuanlage ist die Komplexität und Robustheit der Anlage im Blick zu behalten. Dies betrifft sowohl das Anlagenkonzept und die Hydraulik als auch die Regelung. Werden alle (regelungs-)technischen Möglichkeiten ausgenutzt, welche Effizienzoptimierungen versprechen, führt dies ggf. zu sehr aufwendigen Anlagen. Mit steigender Komplexität erhöht sich - bei der aktuellen Baupraxis - die Gefahr für Fehler in der Installation und im Betrieb. Dies wiederum kann die anvisierten Energieeinsparungen aufheben oder ins Gegenteil umkehren. Zudem ist die Sensitivität der Anlagen auf Abweichungen der Randbedingungen im Betrieb gegenüber der Planung (z.B. durch Nutzerverhalten) und auf Fehler bei der Installation und Inbetriebnahme zu bedenken.

Um zu gewährleisten, dass die Anlage wie geplant umgesetzt wird, ist auf eine sorgfältige Installation und Inbetriebnahme zu achten. So ist bei der Inbetriebnahme eine Optimierung der hydraulischen und regelungstechnischen Parameter durchzuführen (z.B. hydraulischer Abgleich, Anpassung der Heizkurve). Während der Betriebsphase sind die wichtigsten Betriebsparameter (Systemtemperaturen, Effizienz der Wärmepumpe, Einsatz des Heizstabes und weiterer Wärmeerzeuger, Energiebezug einer etwaigen Brunnenpumpe) im Blick zu behalten, um einen effizienten Betrieb sicherzustellen.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse des IEA HPP Annex 50

Das übergeordnete Ziel der internationalen Forschungskooperation im Rahmen des IEA HPP Annex 50 war es, die Nutzung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern zu untersuchen und zu fördern. Das Hauptziel besteht daher darin, mögliche Energieeinsparungen und die Nutzung erneuerbarer Energien durch Wärmepumpen in Gebäuden aufzuzeigen, die mit Wärmepumpen nachgerüstet wurden, ohne dass die Gebäudehülle verbessert wurde.

Die im Rahmen des Annex 50 durchgeführten Analysen zeigen deutlich, dass ein Mangel an Wissen eines der Haupthindernisse für eine breitere Anwendung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern ist. Dies betrifft sowohl die Seite der Gebäude- bzw. Wohnungsbesitzer als auch die der Investoren. Die Vielfalt der Mehrfamilienhäuser ist deutlich höher als bei Einfamilienhäusern. Daraus ergeben sich komplexere Lösungen, die zur Deckung des Wärmebedarfs und des Warmwasserbedarfs umgesetzt werden können. Folglich ist die Wahl der optimalen Lösung eine schwierigere Aufgabe.

Um dieses Problem zu lösen, entwickelten die Partner der Annexes 50 die vereinfachte Kategorisierung möglicher Implementierungsvarianten von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern. Die daraus resultierende "Lösungsmatrix", die in diesem Bericht in Kapitel 4.2.1 beschrieben wird, ist eine der zentralen Ergebnisse des Annexes 50.

Das zweite erwähnenswerte Ergebnis ist die Datenbank mit Fallstudien mit Beispielen für den Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern in mehreren europäischen Ländern.

Die beschriebenen Ergebnisse sind nicht nur in Form des Berichts, sondern auch auf der Website des Annexes verfügbar. Sowohl die "Lösungsmatrix" als auch die "Fallstudien-datenbank" werden auf der interaktiven Website attraktiv präsentiert. Diese Website versteht sich als integraler Bestandteil des Abschlussberichts des Annexes 50. Die Partner des Annexes 50 sind davon überzeugt, dass diese Art der Ergebnis-Kommunikation mittels Task-Website dazu beitragen wird, die Ergebnisse des Annexes 50 auf attraktive und benutzerfreundliche Weise einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.



Abbildung 117: Hauptelemente der "Lösungsmatrix", das ganzheitliche Ergebnis des Annexes 50.

Der Ansatz des Annex 50 bestand darin, den Weg zu finden, eine ganzheitliche (integrierte) Methode zur Darstellung seiner Ergebnisse zu schaffen und an allen Aufgaben gleichzeitig zu arbeiten. Das Ergebnis dieses Ansatzes ist eine "Lösungsmatrix" (Abbildung 117). Jeder Teil der Matrix kann als eigenständige Komponente verwendet oder dargestellt werden und ist mit einem Arbeitspaket des Annex verbunden.

Das erste Ergebnis des Annexes besteht aus den Länderberichten aller teilnehmenden Länder. Der zweite Teil gibt einen Überblick über verschiedene Wärmepumpenlösungen in Mehrfamilienhäusern.

Das breite Spektrum der Möglichkeiten, kombiniert mit zahlreichen Arten von Mehrfamilienhäusern, zeigte die Notwendigkeit eines Kategorisierungssystems, das eine vereinfachte, aber systematische Strukturierung der gesammelten Informationen ermöglichen würde. Als Ergebnis wurden fünf "Lösungsfamilien" identifiziert, die von einem vollständig zentralisierten System bis zu einem vollständig dezentralen System (Einzelraumlösung) reichen. Die meisten "Familien" bestanden aus mehreren "Familienmitgliedern", die Unterlösungen der allgemeinen Kategorisierung sind. Insgesamt wurden 13 allgemeine Lösungen identifiziert.

Der nächste Schritt innerhalb des Tasks 3 war eine tiefere Analyse und Beschreibung jeder Lösung. Dies erfolgte mit einem erheblichen Zeitaufwand jedes Annex-Partners. Zu diesem Thema fanden mehrere Diskussionen statt, nicht nur zwischen den Annex-Partnern, sondern auch während nationaler Workshops, die speziell für diesen Zweck organisiert wurden.

Die Arbeit im Rahmen des Tasks 4 (Demonstration und Monitoring) führte zur Sammlung von Fallstudien zur Implementierung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern. Fallstudien, die in den am Annex 50 teilnehmenden Ländern gesammelt wurden, zeigen eine Vielzahl von Möglichkeiten mit Wärmepumpen auf. Die Fälle variierten hinsichtlich des energetischen Standards des Gebäudes, der Anzahl der Wohnungen, der Wärmequelle der Wärmepumpe und weiterer Eigenschaften. Um den ganzheitlichen Ansatz zu erfüllen und die Praxis zu veranschaulichen, ist jede Fallstudie mit dem entsprechenden theoretischen Beispiel verbunden, das in der Task 3 beschrieben ist.

Die Vielfalt der Mehrfamilienhäuser und ihre Eigenschaften ermöglichen es, verschiedene technische Lösungen auf Basis von Wärmepumpen anzuwenden. Dennoch führt die große Heterogenität der Mehrfamilienhäuser zu individuellen Lösungen, die im großen Maßstab nur schwer anwendbar sind. Eine stärkere Standardisierung der Produkte und der Lösungen ist daher notwendig und entscheidend. Die vorgeschlagene Kategorisierung und eine vereinfachte schematische Visualisierung von Wärmepumpenlösungen in Mehrfamilienhäusern können eine Art "Türöffner" für die Eigentümer und/oder Entscheidungsträger des Gebäudes sein. Umformuliert kann es der erste Schritt zur Implementierung von Wärmepumpen sein, indem es die Komplexität der möglichen Lösungen reduziert.

Parallel zu den positiven Ergebnissen muss festgestellt werden, dass es noch einige Hindernisse gibt, die überwunden werden müssen, um Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern, insbesondere in nicht sanierten, zu implementieren. Diese Hindernisse sind sowohl technischer als auch nichttechnischer Natur. Auf der technischen Seite können es eine ausreichende Heizleistung und Versorgungstemperatur, sowie Zugang zu den Wärmequellen sein. Investitionskosten und eine komplexe Eigentümerstruktur sind ein Beispiel für nicht-technische Hindernisse.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Fortsetzung der mit dem Annex 50 eingeleiteten Arbeiten für eine breitere Implementierung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern von großem Nutzen wäre.

Weiterführende Informationen zum IEA HPP Annex 50 sind auf der Annex 50-Website zu finden: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/>

9 Schlussfolgerungen

Der **Projekt-Verbund** »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von sanierten Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (**LowEx-Bestand**)« hat sich die Entwicklung und Einordnung von Lösungen für den Einsatz von **Wärmepumpen, Wärmeübergabe- und Lüftungssystemen** in energetisch **sanierten Mehrfamiliengebäuden** zum Ziel gesetzt. Über die Laufzeit des Vorhabens hat sich eine rasante Entwicklung des Marktumfelds und der Dringlichkeit des Themenfelds abgezeichnet. Zu Projektbeginn war das Umfeld noch durch eine Dominanz von Gastechnologien bei neu verbauten Anlagen und durch in Zukunft nicht mehr zu erwartende günstige Erdgaspreise gekennzeichnet, was sich auch in einem noch wenig ausgeprägten Interesse an einer Umstellung auf Wärmepumpen in Mehrfamiliengebäuden gespiegelt hat. Dementsprechend schwierig gestaltete sich auch die Suche nach Demonstrationspartnern im Projekt, die jetzt tatsächlich eine Vorreiterrolle eingenommen haben. Durch eine verbesserte Investitionsförderung von Wärmepumpen im Jahr 2020 sowie mit den deutlich ambitionierteren Zielen zur Dekarbonisierung im Wärmesektor nach der Wahl der Bundesregierung (September 2021) zeichnete sich deutlicher ab, dass Wärmepumpen auch in Bestandsgebäuden eine ernst zu nehmende Technologie seien. Eine wirklich hohe Dringlichkeit der Umstellung auf Wärmepumpen, möglichst einhergehend mit Effizienzmaßnahmen am Gebäude selbst, besteht nun mit drohender Gasmangellage und explodierenden Energiebezugspreisen insbesondere auch für Erdgas. Vor diesem Hintergrund sollen die Ergebnisse des Projekt-Verbunds eine Hilfestellung für die Umstellung auf Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand geben und erste fundierte Betriebserfahrungen aus den wissenschaftlich begleiteten Demonstratoren öffentlich zugänglich machen.

Der Bericht fasst dazu zunächst **Merkmale der Gebäude** und der Anlagentechnik im Mehrfamilienhausbestand zusammen. Dabei zeigt sich deutlich, dass Gebäude mit 3-12 Wohneinheiten dominieren. Ein großer Anteil entfällt auf das Baualter zwischen 1958 bis 1968. Dabei weist die Heizungstechnik mit durchschnittlich 20 Jahren ein im Schnitt höheres Alter auf als im gesamten Gebäudebestand. Die Wärmeübergabe erfolgt in etwa 87% der Fälle über Heizkörper. Zentrale Wärmeerzeugung und Systeme, die Raumwärme und Trinkwarmwasser kombiniert erzeugen, sind die vorherrschende Heizungstechnik. Auf Basis der Analyse des Gebäudebestands wurden verschiedene Referenzgebäude definiert, die für die weiteren Untersuchungen herangezogen wurden. Der Fokus lag dabei auf den Baualtersklassen 1958-78 und 1979-94. Das für die meisten Analysen im Projekt herangezogene Referenzgebäude ist das mittlere Mehrfamilienhaus (MMH) mit dem im Projekt definierten Sanierungszustand S (Komplettsanierung Hülle nach GEG). Es wurde jedoch auch für verschiedene Teilsanierungsstufen gerechnet.

Mittels für das Projekt entwickelten Simulationstools wurde Wärmepumpensystemtechnik für die Anwendung im Mehrfamiliengebäude analysiert. Die Fragestellungen orientierten sich hierbei an der Evaluation von Lösungen für die Themenblöcke „Quellenschließung“ sowie „Systemtemperaturen“. Zunächst wurde die Vielzahl an Wärmepumpensystemlösungen in **5 Lösungsfamilien** gruppiert. Die Lösungsfamilien reichen von zentralen Wärmepumpensystemen für das Gesamtgebäude bis hin zu Einzelraum-Wärmepumpen. Vor dem Hintergrund der deutlichen Dominanz zentraler Heizungssysteme im deutschen Mehrfamilienhausbestand fokussierte die in den Technologieprojekten entwickelte und im vorliegenden Querspannenprojekt analysierte Wärmepumpensystemtechnik die zentralen Systeme mit kombinierter Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser. Um Effizienzpotentiale der Wärmepumpen zu heben, ist möglichst eine Absenkung von Systemtemperaturen anzustreben. Im Bereich der Raumwärme kann dazu der **selektive Austausch einzelner Heizkörper** ein kosteneffizienter Weg sein. In der Analyse der Bereitstellung von Trinkwarmwasser weisen die **dezentralen Wohnungsstationen** sowie die **Frischwasserstation mit Ultrafiltration** den geringsten Endenergieverbrauch auf (Simulative Bewertung). Um Anteile der Bereitstellung von Trinkwarmwasser auch im „klassischen“ System mit Trinkwasserspeicher zu erhöhen, ist auf die Nutzung einer für höhere Temperaturen geeigneten Wärmepumpe zu achten. Dies entsprach zumindest zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht der Breite des Marktes.

Die Quellenerschließung ist insbesondere im dicht bebauten urbanen Raum eine kritische Fragestellung. Grundstücke im Innenstadtbereich sind ohne zusätzliche Maßnahmen meist zu klein für die Quellen Luft und Erdwärme. Für WP-Systeme im Innenstadtbereich sollten als Quelle photovoltaisch-thermische Kombi-Kollektoren (PVT-Kollektoren), Mehrquellen-Systeme oder kalte Fernwärmenetze in Betracht gezogen werden.

Die Nutzung von **PVT-Kollektoren** in Kombination **mit Wärmepumpen** ist eine vielversprechende Option, da die vorhandene Dachfläche zur Nutzbarmachung von Umweltwärme sowie zur Stromerzeugung verwendet wird. Für die betrachteten Referenzgebäude (Klein, Mittel, Groß) reichen die Dachflächen bei weitem aus, um die benötigte Quellwärme zur Verfügung zu stellen. Ein guter Kompromiss zwischen hoher Leistung und geringen Investitionskosten kann bei einer spezifischen PVT-Kollektorfläche von ca. 3 – 5 m²/kW_{th} erzielt werden. Dabei wird eine Jahresarbeitszahl in der Größenordnung zwischen Luft- und Solewärmepumpen erzielt.

Bivalente Systeme, die eine Wärmepumpe mit einem fossilen Wärmeerzeuger kombinieren, sind eine Option bei begrenzter Flächenverfügbarkeit für die Wärmequelle, insbesondere aber bei schrittweiser Sanierung. Betriebsstrategien für bivalente Systeme wurden in einer Simulationsstudie untersucht. Mit historischen Energiebezugskosten (Aufwandsverhältnis von Strom zu Erdgas $r_{\text{fuel,cost}}$ des Jahres 2020: 3,74) ergibt sich bei Bezugskostenoptimierung noch ein klarer Abschaltzeitpunkt der Luft-Wärmepumpe im bivalent-alternativen Betrieb. Ab einem Aufwandsverhältnis $r_{\text{fuel,cost}}$ von etwa 2,5 liegt der Deckungsgrad der Luft-Wärmepumpe für die Raumwärme bei ausreichender Dimensionierung der Wärmepumpe über 95%, geht also in Richtung einer vollständigen Deckung. Die Wärmepumpe ist der über das ganze Jahr bevorzugte Wärmeerzeuger. Diese Situation liegt mit aktuellen Energiebezugskosten vor (Stand Oktober 2022: Aufwandsverhältnis bei Berücksichtigung von Preisen für Neukunden von etwa 2,3). Damit gleichen sich jetzt schon der bezugskostenoptimierte und der emissionsoptimierte Betrieb an.

Die **techno-ökonomische Analyse** monoenergetischer und bivalenter Systeme im Vergleich zu einem Gasbrennwertgerät als Referenz berücksichtigte neben den Energiebezugskosten und deren (vor Ukraine-Krieg) erwarteter zukünftiger Entwicklung auch die Investitionskosten mit und ohne Förderung. Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme weisen über den Betrachtungszeitraum kumuliert mehr als 50 % Emissions-Reduktion gegenüber einem Gasbrennwertgerät auf. Die größte Hürde zum Einbau einer Wärmepumpe sind die deutlich höheren Investitionskosten, die zum Teil durch einen Investitionszuschuss gemildert werden. Mit Förderung zeigen die untersuchten WP-Systeme über den Betrachtungszeitraum bereits bei einer weniger dynamischen Entwicklung der Erdgaspreise als derzeit verzeichnet deutlich geringere Wärmegestehungskosten als Gas-Brennwertkessel. Die MFH-Gebäudegröße hat einen geringen Einfluss auf das Ergebnis des Systemvergleichs.

In der neuen, noch sehr dynamischen energiewirtschaftlichen Situation, die durch einen schrittweisen Ausstieg Deutschlands (und vieler EU-Länder) aus bisher billig aus Russland importierten fossilen Rohstoffen gekennzeichnet ist, lassen sich bereits einige robuste Aussagen für den Gebäudesektor treffen (im Sinne einer großen Wahrscheinlichkeit, dass diese Aussagen in den nächsten Jahren gültig bleiben):

- Die Heizkosten im Gebäudesektor werden deutlich oberhalb des Niveaus vor dem Ukraine-Krieg bleiben. Dies wird einen hohen politischen Druck für eine sozialverträgliche Wärmewende erzeugen.
- Das Verhältnis von Stromkosten zu Gaskosten wird deutlich niedriger bleiben als vor dem Ukraine-Krieg, dies begünstigt Wärmepumpen gegenüber Gaskesseln auch im Gebäudebestand. Bei sehr hohen fossilen Energieträgerkosten verringert sich die Amortisationszeit für Wärmepumpen deutlich.
- Eine große Herausforderung für ein schnelles Marktwachstum bei Wärmepumpenheizungen im Gebäudebestand ist die Verfügbarkeit qualifizierter Handwerker*innen und Planer*innen. Auf der Planungsseite kann ein Digitalisierungsschub den Aufwand pro Objekt noch deutlich reduzieren, auf Seiten des Handwerks sind auch Anwerbe- und Qualifizierungskampagnen gefragt.

Die **Demonstration** von technischen Weiterentwicklungen von Wärmepumpen und Lüftungstechnik in bestehenden Mehrfamiliengebäuden ist ein Herzstück des Projekt-Verbunds. Systemlösungen wurden in sechs Demonstrationsgebäuden implementiert. Im Demonstrator der Wohnen Adorf wurden ein Wärmepumpen-Hybridsystem und neu entwickelte fassadenintegrierte Lüftungssysteme umgesetzt und gemonitort. Dabei wurde insbesondere die Eignung von Hybridssystemen für die stufenweise Sanierung nachgewiesen. Im Demonstrator SanBest wurden zwei Grundwasser-Wärmepumpen für ein kleines Bestands-Quartier analysiert. Das System weist sehr gute Jahresarbeitszahlen auf, jedoch wurde eine Überdimensionierung der Wärmepumpen und dadurch häufiges Takten beobachtet. Für den Demonstrator in Karlsruhe-Durlach wurde ein Mehrquellensystem, das Erdsonden mit einer Außenlufteinheit kombiniert, entwickelt und umgesetzt. Der Austausch von nur 7 % aller Heizkörper im Gebäude ermöglichte eine Absenkung der Heizkurve von 70/55°C auf 55/45°C. Die ersten Monitoring-Ergebnisse zeigen eine mittlere Arbeitszahl von $AZ_3 = 3,2$ für die Monate Februar bis Juli 2022. Die Anlage ist Teil eines integrierten Energiekonzepts, bei dem 88 % des Strombedarfs der Wärmepumpe durch ein lokales BHKW und Aufdach-PV-Anlagen gedeckt werden. Dies ermöglicht einen wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpe. Neben der Wärmepumpensystemtechnik wurden auch dezentrale Lüftungssysteme und deren Regelung erprobt. Eine nutzerzentrierte selbstlernende Regelung konnte entwickelt und im Energy Smart Home Lab in Karlsruhe in Nutzerinteraktion durch die Bewohner trainiert und demonstriert werden.

Aus den **Praxiserfahrungen** kann geschlossen werden, dass LowEx-Systeme wie Wärmepumpen und dezentrale Lüftungstechnik sich für den Einsatz im Mehrfamiliengebäudebestand eignen. Es besteht aber weiter ein großer Aufholbedarf an Praxiserfahrung, Bedarf für weitere Systemstandardisierung und durch Datenanalyse begleitete Inbetriebnahme von Anlagen sowie die Notwendigkeit, eine breite Datenlage über Erfahrungen und Effizienzwerte zu schaffen und öffentlich zugänglich zu machen.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, Hannsjörg; Klemens, Bastian; Muchowski, Lucian (Hg.) (2010): Handbuch Projektsteuerung - Baumanagement. Ein praxisorientierter Leitfaden mit zahlreichen Hilfsmitteln und Arbeitsunterlagen auf CD-ROM. 4., aktualisierte Aufl. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- Alibaş, Şirin (2019): Simulation of PVT Collectors as Heat Source to Heat Pumps in Multi Family Houses. Master's Thesis. University of Freiburg, Freiburg, zuletzt geprüft am 03.05.2020.
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2019): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. 3. aktualisierte Ausgabe. Berlin.
- BDH (2019): Bivalente Wärmepumpen-Systeme. Informationsblatt Nr. 57. Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V. Köln.
- Braeuer et. al. (2022): Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Sanierungspaketen aus Gebäudehülle und LowEx-Systemen. Projekt LowEx-Bestand Analyse - Bericht zu AP 5. Unter Mitarbeit von Fritz Braeuer (KIT), Beatrice Rodenbücher (INATECH), Katrin Scharf (INATECH), Raphael Vollmer (INATECH), Dr. Rebekka Eberle (INATECH), Mohamed Obid (ISE), Jeannette Wapler (ISE), Dr. Constanze Bongs (ISE), Dr. Ferdinand Schmidt (KIT), Manuel Ruppert (KIT), Dr. Stefan Hess (INATECH). INATECH; KIT; Fraunhofer ISE.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.) (2021): Für mehr Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/mehrklimaschutz>, zuletzt aktualisiert am 24.06.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.
- Bundesnetzagentur (2021): Monitoringbericht 2020. Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB, Stand: 01. März 2021. Hg. v. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 02.04.2021.
- Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Hg.) (2019): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks. 2019. Sankt Augustin. Online verfügbar unter <https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx>, zuletzt geprüft am 20.01.2022.
- Bürger, V.; Hesse, T.; Quack, D.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P. (2016): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. CLIMATE CHANGE 06/2016. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (ISSN: 1862-4359). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2019.
- Carbonare, Nicolas; Pflug, Thibault; Bongs, Constanze; Wagner, Andreas (2020): Simulative study of a novel fuzzy demand controlled ventilation for façade-integrated decentralized systems in renovated residential buildings. In: *Science and Technology for the Built Environment* 26 (10), S. 1412–1426. DOI: 10.1080/23744731.2020.1797442.
- Carbonare, Nicolas; Pflug, Thibault; Bongs, Constanze; Wagner, Andreas (2021): Design and implementation of an occupant-centered self-learning controller for decentralized residential ventilation systems. In: *Building and Environment* 206, S. 108380. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108380.
- Cheng, Zhijin; Zhao, Qianchuan; Wang, Fulin; Jiang, Yi; Xia, Li; Ding, Jinlei (2016): Satisfaction based Q-learning for integrated lighting and blind control. In: *Energy and Buildings* 127, S. 43–55. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.067.
- Cischinsky, Holger; Diefenbach, Nikolaus (2018a): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. 1. Auflage. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.

- Cischinsky, Holger; Diefenbach, Nikolaus (2018b): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. 1. Aufl. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt (978-3-941140-71-4).
- Dengler, J.; Schick Tanz, M. (2012): Abfrageergebnisse aus der Datenbasis Gebäudebestand. Abfrage durch Benjamin Köhler. Freiburg, 2012.
- Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. 1. Aufl. Institut Wohnen und Umwelt (IWU); Bremer Energie Institut (BEI). Darmstadt. Online verfügbar unter http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf.
- Dott, Ralf; Afjei, Thomas (2014): Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger, zuletzt geprüft am 28.01.2021.
- DVGW (2018): DVGW-Position: Absenkung der Temperatur des Trinkwassers (warm) bei mikrobiologisch und technisch einwandfreien Trinkwasser-Installationen; Rahmenbedingungen für die hygienisch sichere Erprobung der Ultrafiltration bei wissenschaftlich begleiteten Feldversuchen innerhalb von Forschungsprojekten, die vom DVGW begleitet werden.
- Ebert, B. (2019): Zwischenbericht zu AP 1.1. Systematische Analyse des Gebäudebestandes. Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.
- DIN EN ISO 13790, 2008: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung.
- FGK (Hg.) (2011): FGK-Status-Report 30. Richtiges Lüften in Haus und Wohnung. Fachverband Gebäude-Klima e. V. (FGK). Bietigheim-Bissingen (185). Online verfügbar unter https://downloads.fgk.de/downloader.php?FILENAME=185_Richtiges_Lueften_in_Haus_und_Wohnung_V1_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Fritsche et. al. (2019): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Kurzstudie. Hg. v. IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. Darmstadt. Online verfügbar unter http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2019_KEV_THG_Strom-2018_2020-2050.pdf.
- Gunay, H. Burak; O'Brien, William; Beausoleil-Morrison, Ian; Bursill, Jayson (2018): Development and implementation of a thermostat learning algorithm. In: *Science and Technology for the Built Environment* 24 (1), S. 43–56. DOI: 10.1080/23744731.2017.1328956.
- Hartmann, Thomas Prof. Dr.-Ing (2022): Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung als nachhaltige Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele (COP-Äquivalenzstudie). Hg. v. Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden - Forschung und Anwendung GmbH (ITG Dresden). Dresden. Online verfügbar unter <https://wohnungslueftung-ev.de/files/2022-06-09-kurzstudie-wohnungslueftung-cop-aequivalenz-itg-et-al-vfw.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2022.
- Hegger, Manfred; Dettmar, Jörg; Martin, Alexander: UrbanReNet. Schlussbericht. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Hegger, Manfred; Dettmar, Jörg; Martin, Alexander (2012): UrbanReNet. Schlußbericht. Technische Universität Darmstadt.
- VDI 4645, 2018: Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern.
- Hess, Stefan; Vollmer, Raphael; Wapler, Jeannette; Kleinstück, Martin; Bongs, Constanze; Henning, Hans-Martin (2019): Ambient Heat Source Availability for Low-Ex Heating of Multi-Family

- Buildings. In: ISES Solar World Congress, Santiago, 2019, S. 1–12. Online verfügbar unter https://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2020/10/Paper_Quellen-Verf%C3%BCgbarkeit_f%C3%BCr_W%C3%A4rmpumpen_in_MFH_Solar_World_Congress_2019.pdf.
- Hofstadler, Christian (2014): Produktivität im Baubetrieb. Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- IBPSA (2018): Modelica IBPSA library v 3.0. Online verfügbar unter <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>, zuletzt aktualisiert am 12.07.2022, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- IINAS (2019): GEMIS (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme). Version 5.0. Hg. v. IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. Online verfügbar unter <http://iinas.org/gemis-de.html>.
- Jacob, Dirk (2012): Gebäudebetrieboptimierung. Verbesserung von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Fakultät für Architektur.
- Koenigsdorff, Roland (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.
- Koschenz, Markus; Lehmann, Beat (2000): Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. Zürich: EMPA Energiesysteme/Haustechnik.
- Kropp, Michael; Hörnle, Oliver; Lämmle, Manuel; Wapler, Jeannette; Hess, Stefan (2020): Einfluss der Trinkwarmwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern. 07. Aufl. Hg. v. DKV Tagung. Institut für Nachhaltige Technische Systeme; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Germany (DKV Tagung).
- Kuckartz, Udo (2014): Mixed Methods. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lämmle, M.; Hess, S.; Herkel, S.: Smart Urban Energy Concept: Integration of Heat Pumps, PV, Cogeneration, and District Heating in existing Multi-Family Buildings. In: EuroSun 2020, Athen, S. 1–12.
- Lämmle, M.; Wapler, J.; Kropp, M.; Hess, S.; Hahn, D.; David, G.; Herkel, S. (2020): Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen. In: *Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019 Ulm* 20.-22. November 2019.
- Lämmle, Manuel (2022): Performance of Heat Pump Systems with PVT Collectors with Optimized Finned Heat Exchangers integrated as single heat source. In: *Eurosun 2022*.
- Lämmle, Manuel; Bongs, Constanze; Wapler, Jeannette; Günther, Danny; Hess, Stefan; Kropp, Michael; Herkel, Sebastian (2022a): Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings. In: *Energy* 242, S. 122952. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122952.
- Lämmle, Manuel; Kropp, Michael; Metz, Jakob; Herkel, Sebastian (2022b): Simulation and measurement results of a smart district with connected heat pumps, PV and CHP as a model project for decarbonizing existing multifamily buildings. In: *Proceedings of BauSim 2022, Weimar*.
- Leutner, Bernd; Famira, Andrea M.; Reimann, Volker (2005): Bedarfsgerechte Modernisierung von Wohnsiedlungen der 1950er und 1960er Jahre. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Bau- und Wohnforschung, F 2478).
- Li, Rongling; Yoshidomi, Togo; Ooka, Ryozi; Olesen, Bjarne W. (2015): Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system. In: *Energy and Buildings* 86, S. 58–65. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.070.
- Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Knissel, Jens; Born, Rolf (2005): Kurzverfahren Energieprofi. Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von

- Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015a): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. neue Ausg. Darmstadt: Wohnen und Umwelt.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015b): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. 2. Aufl. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- DIN EN 13141-8 Entwurf, 02.2021: Lüftung von Gebäuden – Leistungsprüfungen von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen – Teil 8: Leistungsprüfung von mechanischen Zuluft- und Ablufteinheiten ohne Luftführung (einschließlich Wärmerückgewinnung); Deutsche und Englische Fassung prEN 13141-8:2021. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-13141-8/329020813>, zuletzt geprüft am 06.04.2021.
- Müller, Dirk; Lauster, Moritz; Constantin, Ana; Fuchs, Marcus; Remmen, Peter (2016): AixLib – An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. In: BauSIM 2016. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/moritz-lauster/publication/310465168_aixlib_-_an_open-source_modelica_library_within_the_iea-ebc_annex_60_framework.
- Park, June Young; Dougherty, Thomas; Fritz, Hagen; Nagy, Zoltan (2019): LightLearn: An adaptive and occupant centered controller for lighting based on reinforcement learning. In: *Building and Environment* 147, S. 397–414. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.028.
- Primas, A.; Stettler, Y.; Sonderegger, B. (2014): Wärmepumpen für die Instandsetzung. Systemevaluation für die Instandsetzung. Schlussbericht. Hg. v. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik. Zürich, Schweiz.
- Safizadeh, M. Reza; Watly, Lukasz; Wagner, Andreas (2019): Evaluation of Radiant Heating Ceiling Based on Energy and Thermal Comfort Criteria, Part II: A Numerical Study. In: *Energies* 12 (18), S. 3437. DOI: 10.3390/en12183437.
- Sommer, Hans (2016): Projektmanagement im Hochbau. Mit BIM und Lean Management. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2019): Wohnen in Deutschland. Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2020): Verbraucherpreisindex Deutschland. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=1&step=1&titel=Ergebnis&levelid=1605275486235&acceptscookies=false#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- Streck, Stefanie (2011): Wohngebäudeerneuerung. Nachhaltige Optimierung im Wohnungsbestand. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- TA Lärm (26.08.1998): Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. Online verfügbar unter <http://www.staedtebauliche-laermfibel.de/pdf/TA-Laerm.pdf>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.
- DIN 1988-300, 2012: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW.
- VDI 4640 Blatt 2:2001, 2001: Thermische Nutzung des Untergrundes.
- DVGW Arbeitsblatt W 551, April 2004: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen.

- Umweltministerium Baden-Württemberg (2009): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. 1. Aufl. Hg. v. Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart.
- van Holsteijn, Rob; Kemna, René; van Elburg, Martijn; van den Boorn, Roy; Wierda, Leo (2020): Ventilation Units - Ecodesign and Energy Labelling. Preparatory Review Study Phase 1.1 and phase 1.2. Final Report TASK 2 Markets. In: European Commission (EC) (Hg.): Review study on the Ecodesign and Energy Regulations on ventilation units. Final Task Reports. Van Holsteijn en Kemna BV (VHK). Delft. Online verfügbar unter <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%20%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- Velte, Andreas; Laurenz, Eric; Leisner, Simon; Weber, Josef; Wittstadt, Ursula; Földner, Gerrit (2022): Experimental Results of a Gas Fired Adsorption Heat Pump and Simulative Prediction of Annual Performance in a Multi-Family House. In: *Applied Thermal Engineering* 212, S. 118581. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118581.
- Viveros Vergara, Jose Angel (2020): Performance of heat pumps in multi-family houses with different heat transfer system types for space heating. Master Thesis.
- Vollmer, R.; Hess, S.; Henning, H.-M. (2018): Quellen-Verfügbarkeit für Wärmepumpen-Systeme im deutschen Mehrfamilienhaus-Bestand. In: *Tagungsband Solarthermie-Symposium, Kloster Banz, Bad Staffelstein*, S. 622–638.
- Vollmer, Raphael (2022): Sanierungspfade zur Einbindung von Wärmepumpen-Heizsysteme in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden. PhD Thesis (Dissertation) submitted to INATECH, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Vollmer, Raphael; Lämmle, Manuel; Hess, Stefan; Henning, Hans-Martin (2022): Optimization of Energetic Refurbishment Roadmaps for Multi-Family Buildings Utilizing Heat Pumps. Online verfügbar unter <https://ssrn.com/abstract=4199525>.
- Wagner et al. (2019): Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor. Kurzstudie im Auftrag der E.ON SE. RWTH Aachen University; EWI. Köln. Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/11/Auswirkungen-von-CO2-Preisen_Executive-Summary.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Walberg, Dietmar; Holz, Astrid; Gniechwitz, Timo; Schulze, Thorsten (2011): Wohnungsbau in Deutschland - 2011. Modernisierung oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“. Hg. v. Dietmar Walberg. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. Kiel (Band I Textband). Online verfügbar unter <https://www.dgfm.de/uploads/media/Endbericht-DGfM-Textband-Gesamt.pdf>.
- Wetter, Michael; Zuo, Wangda; Nouidui, Thierry S.; Pang, Xiufeng (2014): Modelica Buildings library. In: *Journal of Building Performance Simulation* 7 (4), S. 253–270. DOI: 10.1080/19401493.2013.765506.
- Zech, Daniel; Ullrich, Simone; Wülbeck, Hans-Friedrich; Stuible, Achim; Wapler, Jeannette; Amendt, Lukas et al. (2020): Evaluation und Perspektiven des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2019 bis 2020. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fichtner. Stuttgart.

Anhang

Projektberichte

Tabelle 23: Ausführliche Berichte und zugehörige Arbeitspakete, verfügbar auf www.lowex-bestand.de

Analyse MFH-Bestand und Sanierungsprozess	Zugehöriges Arbeitspaket
Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden	AP 1.1
Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung	AP 1.2 und 1.4
Technische Anforderungen an MFH	AP 1.3
Bewertung von Wärmeübergabesystemen im Hinblick auf Raumkomfort	AP 2.2
Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort & Luftqualität	AP 2.2
Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik & Sanierungsszenarien	AP 3.1
Typisierung von LowEx-Systemkonzepten	
Quellen-Verfügbarkeit für Wärmepumpen- Systeme in Mehrfamilienhäusern	AP 2.1
Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Sanierungspaketen	AP 5
Abschlussbericht und Website des IEA Annex 50	AP 6

Peer-reviewed Journal Paper

Ausgewählte Preprints und verfügbare Zeitschriftenbeiträge können unter: <https://www.lowex-bestand.de/index.php/ergebnisse/?lang=de> heruntergeladen werden

- D. Neubert, C. Glück, J. Schnitzius, M., Armin, J. Wapler, C. Bongs, C. Felsmann (2022): Analysis of the Operation Characteristics of a Hybrid Heat Pump in an Existing Multifamily House Based on Field Test Data and Simulation. In: *Energies* 15 (15), S. 5611. DOI: 10.3390/en15155611.
- N. Carbonare, T. Pflug, C. Bongs, A. Wagner: Design and implementation of an occupant-centered self-learning controller for decentralized residential ventilation systems. *Building and Environment* 206 (2021).
- R. Vollmer, M. Lämmle, Manuel, S. Hess, H.M. Henning, Optimization of Energetic Refurbishment Roadmaps for Multi-Family Buildings Utilizing Heat Pumps. Preprint available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4199525>. Submitted to *Energy and Buildings*
- M. Lämmle, C. Bongs, J. Wapler, D. Günther, S. Hess, M. Kropp, and S. Herkel, „Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings“, *Energy* **2021**, 122952.
- N. Carbonare, T. Pflug, C. Bongs, and A. Wagner, „Simulative study of a novel fuzzy demand controlled ventilation for facade-integrated decentralized systems in renovated residential buildings“, *Science and Technology for the Built Environment* **2020**, 26(10), 1412-1426. Die Veröffentlichung ist online verfügbar.
- M.R. Safizadeh, L. Watly and A. Wagner, „Evaluation of Radiant Heating Ceiling Based on Energy and Thermal Comfort Criteria“, Part II: A Numerical Study, *Energies* **2019**, 12(18), 3437. Die Veröffentlichung ist online verfügbar.

- N. Carbonare, T. Pflug, and A. Wagner, „Clustering the occupant behavior in residential buildings: a method comparison“, Bauphysik 40.6 (2018): 427-433.

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- Hess et al. »Techno-ökonomische und ökologische Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand« – DKV-Tagung 2021
- Kropp et al. Paper „Einfluss der Trinkwarmwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern“ – DKV-Tagung 2020
- Hess et al. „Ambient Heat Source Availability for Low-Ex Heating of Multi-Family Buildings“ Solar World Congress 2019
- N Carbonare et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 609 032018 „Comfort-oriented control strategies for decentralized ventilation“ – IAQVEC 2019
- Wagner et al. „Experimental Evaluation of Radiant Heating Ceiling Systems Based on Thermal Comfort Criteria“ – ISHVAC 2019
- Lämmle et al.: Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen – DKV-Tagung 2019
- Wapler et al.: „Wärmepumpen-Systeme im Mehrfamilienhaus-Bestand“ – DKV-Tagung 2018

Vorträge

Folien und Videos zu den Veranstaltungen können unter: <https://www.lowex-bestand.de/index.php/veranstaltungen/> abgerufen werden.

Abschlussstreffen Projektverbund LowEx-Bestand:

- Videos zu den Demovorhaben
Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach

Berliner Energietage 2022

- Workshop „3.11: Wärmepumpen für Bestandsgebäude“, Koordination und Moderation: Constanze Bongs
- Vortrag 1: Marek Miara: Herausforderungen und Lösungswege
- Vortrag 2: Lena Schnabel: Entwicklung und Rolle von Propanwärmepumpen
- Vortrag 3: Arnulf Dinkel: Wärmepumpen in Mehrfamiliengebäuden: Umsetzungsbeispiele
- Vortrag 4: Michael Reisenbichler: EU-Projekt HAPPENING: Flexible Wärmepumpen-Lösungen für bestehende Mehrfamilienhäuser

DKV-Tagung 2021:

- Hess et al. »Techno-ökonomische und ökologische Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand«
- Kropp et al.: Einfluss der Trinkwarmwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern. 07. Aufl. Hg. v. DKV Tagung. Institut für Nachhaltige Technische Systeme; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Germany (DKV Tagung)
- Wapler et al. »Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand: Feldergebnisse«

Vortragsreihe Umbaukultur – Über die Potentiale des baulichen Bestandes

- IEB – Institut Entwerfen und Bautechnik, KIT FAKULTÄT für Architektur, Karlsruhe
- Vortrag Stefan Heß: Effiziente Konzepte für Heizung,- Lüftung und Trinkwasser in sanierten Mehrfamilienhäusern. Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben LowEx-Bestand

Berliner Energietage 2021

- Workshop „2.08: Wärmepumpen-Effizienz in Mehrfamilienhäusern: Heizung, Warmwasser, Lüftung und Komfort“, Koordination und Moderation: Stefan Hess

- Vortrag 1: Michael Kropp: Wärmepumpen-Effizienz in Mehrfamilienhäusern – Trinkwasser-Systeme mit Wärmepumpe: Vergleich von Energiebedarf und Performance
- Vortrag 2: Manuel Lämmle und Constanze Bongs: Temperaturabsenkung in Wärmepumpen-Heizsystemen mit Radiatoren
- Vortrag 3: Sven Auerswald: Effizienz von Pendellüftern
- Vortrag 4: Andreas Wagner: Deckenstrahlheizungen

Messe BAU 2021

- Vortrag: »Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand«, Dr. Stefan Hess, Dr. Constanze Bongs, Michael Kropp, Jeannette Wapler, Dr. Manuel Lämmle

DKV-Tagung Ulm 2020

- Vortrag Michael Kropp: »Einfluss der Trinkwarmwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern«
- Vortrag Constanze Bongs: »Wärmepumpen für Mehrfamilienhäuser im Bestand«

Chillventa 2020 – eSpecial: Messe für Kältetechnik, Wärmepumpen und Lüftung

- Vortrag Constanze Bongs und Stefan Hess: »Wärmepumpen für den Mehrfamilienhausbestand«

Berliner Energietage 2020

- Workshop „5.05: Wärmepumpen-Systeme für Mehrfamilienhäuser im Bestand“
- Vortrag 1: Hans-Martin Henning: Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhausbestand
- Vortrag 2: Stefan Hess: Einsparung von CO₂-Emissionen und Betriebskosten durch Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern
- Vortrag 3: Manuel Lämmle: Projekt Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach: Wärmepumpen für ein energieeffizientes und wirtschaftliches Energiekonzept

DKV-Tagung Ulm 2019

- Bongs, Constanze et al.: Hybridwärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand: Projekt LowEx-Bestand Analyse
- Lämmle, Manuel et al.: Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen

Dissertationen (noch nicht abgeschlossen):

- Kropp, Michael: LowEx-Systeme für Trinkwarmwasser und Raumwärme in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018 bis voraussichtlich 2023
- Vollmer, Raphael: Sanierungspfade zur Einbindung von Wärmepumpen-Heizsystemen in Mehrfamilien-Bestandsgebäude, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017 bis voraussichtlich 2022.

Abschlussarbeiten (Master und Bachelor):

- Ali Javeherpour: Analysis of heating system variants for the multi-family homes in two urban districts
- Sirin Alibas: Simulation of PVT Collectors as Heat Source to Heat Pumps in Multi Family Houses
- Abdella Alzade: Balancing and Control Methods for Decentralized Ventilation Systems in Residential Buildings
- Bruno Bampi: Measurement and evaluation of the heat recovery efficiency of alternating façade-integrated ventilation devices applying the Mixing-Chamber-Method
- R. Devineni: Ventilation Efficiency of Alternating Facade-integrated Ventilation Devices with Regenerative Heat Recovery System

- Oliver Hörnle: Thermo-hydraulische Simulationen zum Vergleich von Trinkwarmwasser-Systemvarianten für Mehrfamilien-Bestandsgebäude
- Florian Weiß: Aufbau einer numerischen Simulation zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden
- Fatma Özceylan: Business model development for net-Zero Energy Buildings (nZEB)
- Omar Abu Khass: Thermal-Hydraulic and Acoustical Performance Evaluation of Evaporator-Fan Combinations for Heat Pump Applications
- Jose Angel Viveros: Performance of heat pumps in multi-family houses with different heat transfer system types for space heating
- Katrin Scharf: Techno-ökonomische Analyse der Hüll- und Systemsanierung bei Mehrfamilien-Bestandsgebäuden
- Cody Neary: Evaluation Concept for the Smart District Karlsruhe-Durlach
- Hannes Braun: Messtechnische Evaluation des Energiekonzepts im Smarten Quartier Karlsruhe Durlach
- Mohamed Ebrahim Abdulsalam Obid: Dimensioning of Heat Pumps in Bivalent Heating Systems for Multi-family Houses in Germany
- Edita Prijic: Untersuchung der Vermischungsvorgänge in einem Schichtspeicher mit aktiven Einschichteinrichtungen mittels eines 1D-Modells in der Modellierungssprache Modelica.
- Jan Mattmüller: Untersuchung des Quellenpotenzials von SolarWall und Gebäude-Abluft in Luft-Wärmepumpensystemen für den Mehrfamilienhaus-Bestand, verbunden mit der Bewertung außenstehender Heißwasserspeicher in Kombination mit PV-Anlage
- Marianne Lacombe: Analysen zur Kopplung einer Luftwärmepumpe mit transkritischem CO₂-Zyklus mit einem außenstehenden Wärmespeicher für die Sanierung von Mehrfamilienhäusern.
- Sophie Schneider: Analyse der Effizienz und Betriebsbedingungen von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern
- Jan Beranek: Analyse der Effizienz und der Betriebsbedingungen von Wärmepumpensystemen in Mehrfamilienhäusern
- Philipp Reher: Simulationsstudie zu Trinkwassererwärmungskonzepten mit Wärmepumpen in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden mit Dymola/Modelica
- Lin Yan: Modellierung von unterschiedlichen Trinkwarmwasser-Systemkonzepten im Mehrfamilienhaus unter Einbeziehung von Wärmepumpen