

Wärmepumpentechnologien in der Bestandssanierung (PhaseOut)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 60/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung (interimistisch): DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Assoz. Prof. Dr. Ing. Fabian Ochs, Dr. techn. William Monteleone (Universität Innsbruck,
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen)

Dipl.-Ing. Dagmar Jähnig (AEE – Institut für Nachhaltige Technologien)

Dipl.-Ing. Thomas Roßkopf-Nachbaur (Energieinstitut Vorarlberg, Fachbereich
Energieeffizientes Bauen)

Dipl.-Ing. Markus Male (iDM Energiesysteme GmbH)

Wien, Innsbruck 2026. Stand: Mai 2026

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract.....	10
3	Ausgangslage.....	12
4	Projekthalt.....	15
5	Ergebnisse	18
5.1.	Gebäude.....	18
5.2.	WP-Systemkonzepte	20
5.2.1.	Zentrale WP für Heizung und WW	20
5.2.2.	gemischt zentral/dezentrales System	20
5.2.3.	Semizentrales System mit Booster-WP	20
5.3.	Simulationsstudie - Sanierungsvarianten	21
5.3.1.	Heiz- und Trinkwarmwasserbedarf und Lastberechnungen	22
5.3.2.	Dimensionierung der Heizkörper und Bewertung der Vorlauftemperatur.....	23
5.3.3.	Bewertung der Leistung der WP.....	24
5.3.4.	Ergebnisse: HWB und HL für die verschiedenen Sanierungsvarianten	25
5.3.5.	Ergebnisse: Vorlauftemperatur	27
5.3.6.	Ergebnisse: Effizienz der WP	28
5.4.	Bewertung der Effizienz von hydronischen Systemen.....	29
5.4.1.	Mustergebäude	30
5.4.2.	Randbedingungen.....	31
5.4.3.	Wärmepumpenkennlinien.....	32
5.4.4.	Systemvergleich.....	33
5.5.	Innovative Sanierungstechnologien.....	37
5.5.1.	Netto-Null-Sanierung.....	37
5.5.2.	Booster-WP.....	38
5.5.3.	Kompakte TWW-WP	39
5.5.4.	Fassadenintegrierte Lüftung.....	41
5.5.5.	Modulare Fassade	43
5.6.	Umsetzung und Monitoring	44
5.6.1.	Konzept.....	44
5.6.2.	Gebäude 1.....	46
5.6.3.	Gebäude 2.....	47
5.6.4.	Gebäude 3.....	48
5.6.5.	Gebäude 4.....	49
5.6.6.	Gebäude 5.....	50
5.6.7.	Gebäude 6.....	51

5.6.8. Gebäude 7.....	52
5.6.9. Dokumentation Umsetzung.....	53
5.6.10. Monitoringkonzept.....	53
5.7. Sanierungsprozess und Nutzerinneneinbindung.....	55
5.7.1. Zielsetzung.....	55
5.7.2. Grundhaltung und Leitlinien.....	56
5.7.3. Kernbotschaften, die verständlich vermittelt werden sollten	56
5.7.4. Planungsleitfaden	56
5.8. Betriebs- und Volkswirtschaftliche Analyse.....	58
5.8.1. Betriebswirtschaftliche Analyse	58
5.8.2. Volkswirtschaftliche Analyse	66
6 Schlussfolgerungen	81
7 Ausblick und Empfehlungen	87
8 Verzeichnisse.....	89

1 Kurzfassung

Für die Erreichung der Klimaschutzziele hat sich Österreich für den Umstieg von gas- und ölbasierten Heizungssystemen zu erneuerbaren Systemen und für hochwertige energetische Sanierung entschieden. Obwohl seit vielen Jahren technische Lösungen für die Sanierung von mehrgeschoßigen Wohngebäuden (Fenstertausch, Dämmung) und für den Kesseltausch (bei zentraler Wärmeversorgung) existieren, stagniert die Sanierungsrate bei deutlich unter 1%. Hält dieser Trend an, werden die Klimaschutzziele nicht annähernd erreicht. Die Gründe für die geringe Aktivität sind vielfältig. Konventionelle Ansätze sind teuer, aufwändig auf der Baustelle, erfordern den Einsatz von Gerüsten und teils die Umsiedelung. Zudem gibt es keine zufriedenstellende Lösung für dezentrale Wärmepumpen (WP) und erneuerbare Wärmeversorgung für Wohnungen. Angesichts der begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und Fernwärme und steigender Nachfrage, ist die thermische Sanierung von Gebäuden unverzichtbar, um die Klimaziele insgesamt zu erreichen. Der Umstieg von gas- oder ölbasierten Heizsystemen auf WP ist (häufig) nur in Kombination mit einer angemessenen thermischen Sanierung technisch machbar und i.d.R. auch nur in Kombination mit dieser zu empfehlen.

Die geringe Sanierungsaktivität ist auf eine Vielzahl von Hemmnissen zurückzuführen. Historisch niedrige Preise für fossile Energieträger und Strom führten dazu, dass energetische Sanierungen – bei herkömmlichen Standards – für Investoren häufig keine attraktiven Renditen boten. Zudem reichen die angesparten Rücklagen für umfassende Sanierungen meist nicht aus, wodurch diese oft nur mit erheblichen Mietsteigerungen realisierbar wären. Nachteilig wirkt sich außerdem aus, dass Kosten und Nutzen selten über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude bilanziert werden.

Zur Steigerung der Sanierungsrate sind neue minimalinvasive und skalierbare Sanierungsverfahren erforderlich, die innovative Sanierungssysteme für die thermische Hülle und erneuerbare Wärmeversorgung vereinen. Standardisierung und industrielle Vorfertigung ermöglichen eine Reduktion der Kosten bei gleichzeitig niedrigerem Aufwand in situ und einer höheren Qualität. Das innovative und multidisziplinäre Demonstrations-Projekt PhaseOut hatte das Ziel, innovative Lösungen weiterzuentwickeln und optimierte Sanierungsprozesse, unter besonderer Berücksichtigung serieller/industrialisierter Ansätze, aufzuzeigen, um das große aber herausfordernd Marktpotential im Bestand erschließen zu können.

Drei Schlüsselaspekte wurden mit dem Ziel einer minimalinvasiven Sanierung vereint: Innovative Wärmepumpentechnologie, modulare und vorgefertigte Fassadenelemente und Fassadenintegration von Gebäudetechnik. Dabei wurden alle Schritte des Sanierungsprozesses in einem ganzheitlichen Ansatz von der Konzeption, Planung, Optimierung, betriebs- und volkswirtschaftlichen Bewertung bis hin zur NutzerInnenbeziehung durch kompetente Projektpartner berücksichtigt. Vier verschiedene Sanierungsvarianten wurden in sieben identischen Gebäuden verglichen und bewertet: a) eine zentrale WP pro Gebäude mit dezentralen wohnungsweisen FriWa b) eine zentrale NT-WP mit wohnungsweisen Booster-WP (semi-zentrales System), c) eine zentrale Heizungswärmepumpe und einzelne dezentrale Warmwasserwärmepumpen (WW-WP) in jeder Wohnung und d) eine zentrale Heizungswärmepumpe und einzelne dezentrale EB in jeder Wohnung. Neben der Entwicklung zweier innovativer, kompakter Wärmepumpentypen speziell für die Sanierung – eine Booster-WP und eine Mini-Split-Brauchwasser-WP – wurde eine modulare und vorgefertigte Fassade entwickelt und in den Demo-Gebäuden eingesetzt. Alle Wohnungen wurde zudem mit einer dezentralen

fassadenintegrierten Wohnraumlüftung ausgestattet, welche im Rahmen des Projekts entwickelt wurde.

Wärmepumpenbasierte Sanierungslösungen im Mehrfamilienhaus sind technisch machbar, energetisch hoch effizient und ein zentraler Hebel zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands, sofern sie integral und simulationsgestützt geplant werden („digitaler Zwilling“). Simulationsergebnisse und Erkenntnisse aus der Umsetzung des Demonstrationsprojekts belegen, dass insbesondere kompakte, wohnungsweise bzw. semi-zentrale Wärmepumpenkonzepte (z.B. Booster-WP für Trinkwarmwasser (TWW)) in Kombination mit einer angemessenen thermischen Sanierung und damit niedrigen Vorlauftemperaturen deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen sowie Energiekosten ermöglichen. Fassadenintegrierte WP und vorgefertigte Fassadensysteme erlauben minimalinvasive, serielle Sanierungen mit kurzen Bauzeiten und beherrschbaren bauphysikalischen Randbedingungen, wie hydrothermische Analysen bestätigen. Hochwertige thermische Sanierung erlaubt zudem Wärmepumpenlösungen mit kompakten Monoblock R290 WP mit reduzierten Schallemissionen und damit hoher Akzeptanz. Um hohe Akzeptanz für die Sanierung und damit hohe Umsetzungs- bzw. Anschlussraten zu erreichen, ist größtmögliche Transparenz und Einbezug der BewohnerInnen in allen Prozessschritten ein wichtiger Bestandteil.

Durch die intensive und systematische MieterInneneinbindung wurde eine sehr hohe Umsetzungsrate von 36 von insgesamt 42 Wohnungen erzielt, dies übersteigt die ursprüngliche ambitionierte Planung und bei weitem die Erfahrungswerte.

Die Erfassung des Ist-Zustands jeder Wohnung ist eine aufwändige jedoch unbedingt notwendige Maßnahme. Es zeigte sich trotz 42 baugleicher Wohnungen ein sehr inhomogenes Bild bezogen auf den Zustand und die Situation des Bestandsheizungs (Position Gastherme, Position und Größe Wärmeabgabesysteme, etc.) mit letztendlich 42 unterschiedlichen Situationen. Um für die individuelle Situation jeweils eine geeignete kostengünstige Lösung zu finden, sind verschiedene möglichst modulare und skalierbare Wärmepumpenlösungen notwendig.

Insgesamt wird deutlich, dass nur durch modulare, flexibel kombinierbare Wärmepumpenkonzepte, gekoppelt mit erneuerbarer Stromerzeugung und hoher Planungsqualität, wirtschaftlich tragfähige und breit skalierbare Sanierungslösungen für den Geschoßwohnbau realisiert werden können. Aus den Erfahrungen der FFG Projekte PhaseOut und SüdSan und unter Einbeziehung der neuen Entwicklungen wurde ein Sanierungsleitfaden entwickelt, der als Initiator und Beschleuniger für weitere Projekte in Österreich und auf internationaler Ebene dienen soll, um so die Klimaziele und einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Die Ergebnisse des Monitorings über den Zeitraum 2026-2028 werden im Anschluss publiziert.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien (die Booster-WP und die dezentrale fassadenintegrierte Lüftung) werden durch die Industriepartner vermarktet und stehen entsprechend am Markt für zukünftige Sanierungsprojekte zur Verfügung.

2 Abstract

To achieve its climate protection targets, Austria has committed to transitioning from gas- and oil-based heating systems to renewable systems, as well as to high-quality energy-efficient building renovations. Although technical solutions for refurbishing multi-storey residential buildings (such as window replacement and insulation) and for replacing boilers (in centrally supplied heating systems) have existed for many years, the renovation rate has stagnated at well below 1%. If this trend continues, the climate targets will not even come close to being met. The reasons for the low level of activity are diverse. Conventional approaches are expensive, labor-intensive on-site, require scaffolding, and sometimes necessitate temporary relocation of residents. In addition, there is no satisfactory solution for decentralized heat pumps and renewable heat supply for apartments. Given the limited availability of renewable electricity and district heating, and rising demand, thermal renovation of buildings is indispensable for achieving overall climate goals. The transition from gas- or oil-based heating systems to heat pumps is often only technically feasible in combination with adequate thermal renovation and is generally recommended only in conjunction with it.

The low rate of renovation is due to a variety of barriers. Historically low prices for fossil fuels and electricity meant that energy-efficient renovations—at conventional standards—often did not offer attractive returns for investors. Moreover, the accumulated reserves are usually insufficient to cover comprehensive renovations, meaning these can often only be implemented with significant rent increases. Another disadvantage is that costs and benefits are rarely assessed over the entire lifecycle of buildings.

To increase the renovation rate, new minimally invasive and scalable renovation methods are required, combining innovative systems for the thermal envelope and renewable heat supply. Standardization and industrial prefabrication enable cost reductions, lower on-site effort, and higher quality. The innovative and multidisciplinary demonstration project “PhaseOut” aimed to further develop such solutions and to demonstrate optimized renovation processes—particularly with regard to serial/industrialized approaches—in order to unlock the large but challenging market potential in the existing building stock.

Three key aspects were combined with the goal of minimally invasive renovation: innovative heat pump technology, modular and prefabricated façade elements, and façade-integrated building services. All stages of the renovation process were considered in a holistic approach—from concept, planning, and optimization to operational and economic evaluation and user involvement—by competent project partners. Four different renovation variants were compared and evaluated in seven identical buildings:

- a) a central heat pump per building with decentralized fresh water stations in each apartment
- b) a central low-temperature heat pump with apartment-level booster heat pumps (semi-central system)
- c) a central heating heat pump and individual decentralized domestic hot water heat pumps in each apartment
- d) a central heating heat pump and individual decentralized electric boilers in each apartment

In addition to developing two innovative, compact heat pump types specifically for renovation—a booster heat pump and a mini-split domestic hot water heat pump—a modular and prefabricated façade was developed and implemented in the demonstration buildings. All apartments were also equipped with a decentralized, façade-integrated ventilation system, developed as part of the project. Heat pump-based renovation solutions in multi-family buildings are technically feasible, highly energy-efficient, and a key lever for decarbonizing the building stock—provided they are planned integrally and supported by simulation (“digital twin”). Simulation results and findings from the demonstration project show that compact, apartment-based or semi-central heat pump concepts (e.g., booster heat pumps for domestic hot water), in combination with adequate thermal renovation and thus low supply temperatures, enable significant reductions in CO₂ emissions and energy costs.

Façade-integrated heat pumps and prefabricated façade systems allow for minimally invasive, serial renovations with short construction times and manageable building physics conditions, as confirmed by hygrothermal analyses. High-quality thermal renovation also enables the use of compact monoblock R290 heat pumps with reduced noise emissions, resulting in high user acceptance. To achieve high acceptance of renovation measures—and thus high implementation and connection rates—maximum transparency and the involvement of residents in all process steps are essential. Through intensive and systematic tenant involvement, a very high implementation rate of 35 out of 42 apartments was achieved. This exceeded both the original ambitious plan and typical experience by a wide margin.

Recording the existing condition of each apartment is a complex but essential task. Despite 42 structurally identical apartments, the conditions and configurations of the existing heating systems (e.g., location of gas boilers, position and size of heat emitters) varied greatly, resulting in 42 different situations. To provide suitable and cost-effective solutions for each individual case, a range of modular and scalable heat pump solutions is necessary. Overall, it is clear that only modular, flexibly combinable heat pump concepts—coupled with renewable electricity generation and high planning quality—can deliver economically viable and widely scalable renovation solutions for multi-storey residential buildings.

Based on the experiences from the FFG projects PhaseOut and SüdSan, and incorporating new developments, a renovation guideline was developed to serve as an initiator and accelerator for further projects in Austria and internationally, thereby contributing to achieving climate targets and a climate-neutral building stock. The results of monitoring over the period 2026–2028 will be published subsequently. The technologies developed within the project (the booster heat pump and the decentralized façade-integrated ventilation system) are being commercialized by industry partners and are therefore available on the market for future renovation projects.

3 Ausgangslage

Im Hinblick auf die nationalen und europäischen Klimaschutzziele besteht in Österreich ein dringender Handlungsbedarf zur energetischen Sanierung des Wohngebäudebestands. Besonders großes Potenzial liegt dabei im Bereich der Mehrfamilienhäuser (Geschoßwohnbauten), vor allem jener Baujahre 1960 bis 1980, zunehmend aber auch bei Gebäuden der 1980er Jahre sowie teilsanierten Bestandsobjekten. Der politisch beschlossene Ausstieg aus Öl- und Gasheizungen (Phase-out bis 2035 bzw. 2040) wird den Sanierungsdruck auf diesen Gebäudesektor weiter massiv erhöhen.

Potenzial und Sanierungsbedarf im Geschoßwohnbau

Im Rahmen des FFG Projekts **HVACviaFacade** wurde auf Basis von Daten aus dem Jahr 2014 abgeschätzt, dass rund 42.000 Geschoßwohnbauten mit etwa 620.000 Wohnungen thermisch noch weitgehend unsaniert sind. Gebäude aus den Baujahren 1960 bis 1980 weisen dabei das größte Sanierungspotenzial auf: Sie kombinieren einen sehr hohen Heizenergiebedarf mit einer großen absoluten Anzahl an Gebäuden und Wohnungen. Im Unterschied zu älteren Gebäuden besteht hier meist kein Denkmalschutz, was umfassende Sanierungen grundsätzlich erleichtert. Rund 40 % dieser Gebäude entfallen auf Mietwohnungen. Aufgrund der seit Jahren unter 1 % liegenden Sanierungsrate haben sich diese Zahlen bis heute kaum verändert.

Eine aktuelle, für das BMDW erstellte Studie (Steininger et al., 2021) zeigt, dass zur Erreichung der EU-Klimaziele („Fit for 55“) und des Ausstiegs aus Öl und Gas eine massive Steigerung der Sanierungsrate erforderlich ist. Ohne eine grundlegende Transformation der Sanierungsprozesse und -lösungen sind die energie- und klimapolitischen Zielsetzungen nicht erreichbar.

Hemmnisse: Organisation, Recht und Wirtschaft

Die geringe Sanierungsaktivität ist auf eine Vielzahl von Hemmnissen zurückzuführen.

Historisch niedrige Preise für fossile Energieträger und Strom führten dazu, dass energetische Sanierungen – bei herkömmlichen Standards – für Investoren häufig keine attraktiven Renditen boten. Zudem reichen die angesparten Rücklagen für umfassende Sanierungen meist nicht aus, wodurch diese oft nur mit erheblichen Mietsteigerungen realisierbar wären. Nachteilig wirkt sich außerdem aus, dass Kosten und Nutzen selten über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude bilanziert werden.

Auf Seiten der Bauwirtschaft weisen Sanierungsprojekte eine deutlich geringere Wertschöpfung pro Mitarbeiter auf und bergen ein wesentlich höheres Risiko als Neubauten, da sie sich nur schwer standardisieren lassen. In der Politik und Verwaltung sind die wohnungspolitischen Kompetenzen oft zersplittert. Es ist klar erkennbar, dass eine massive Erhöhung der Sanierungsrate nur mit nach Bestandssegmenten differenzierten Maßnahmenbündeln erreichbar ist.

Bei den Gebäudeeigentümern ist in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit von Sanierungen nicht darstellbar. Umfassende Sanierungen sind zudem komplexe Bauaufgaben, für die der typische Eigentümer mit der Koordination der Gewerke überfordert ist.

Ein weiteres zentrales Hindernis stellen komplexe Eigentümerstrukturen in Wohnungseigentumsanlagen dar, in denen Mehrheiten für umfassende Sanierungsmaßnahmen nur

schwer zu erzielen sind. Hinzu kommen lange Bauzeiten, hohe organisatorische Aufwände, zahlreiche beteiligte Gewerke sowie erhebliche Belastungen für die Bewohner (Gerüste, monatelange Bauarbeiten, teilweise temporäre Aussiedelungen). Vor diesem Hintergrund beschränken sich viele Hausverwaltungen auf reine Instandhaltungsmaßnahmen oder auf einzelne, isolierte Sanierungsschritte.

Stand der Technik und bestehende Defizite

Der Stand der Technik bei thermischen Sanierungen wird nach wie vor von Einzelmaßnahmen dominiert, insbesondere Fenstertausch und Außendämmung mittels Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Diese Systeme sind ökologisch kritisch zu bewerten, da häufig erdölbasierte Materialien (z.B. EPS) eingesetzt werden und eine sortenreine Trennung am Lebensende kaum möglich ist. Eine integrierte Sanierung von Bau- und Gebäudetechnik ist bislang nicht Standard. In vielen Fällen bleibt die Gebäudetechnik – abgesehen von einem Austausch des zentralen Wärmeerzeugers – unverändert, wodurch erhebliche Synergiepotenziale ungenutzt bleiben.

Gleichzeitig besitzt der Gebäudebestand ein hohes Potenzial für den Einsatz erneuerbarer Energieträger und für die Erreichung von Plusenergiestandards auf Gebäude- und Quartiersebene. Dieses Potenzial wird derzeit – abgesehen von wenigen Demonstrationsprojekten – kaum ausgeschöpft.

Wärmeversorgung im Bestand und Problem der Dezentralität

Die Wärmeversorgung unsanierter Geschoßwohnbauten ist heterogen. Neben zentralen Heizsystemen (Gas, Öl, Fernwärme) finden sich zahlreiche Mischformen sowie eine große Anzahl dezentral beheizter Wohnungen mit Einzelöfen oder wohnungsweisen Heizgeräten inklusive dezentraler Warmwasserbereitung. Gerade in diesen Gebäuden ist eine Umstellung auf zentrale, erneuerbare Systeme aufgrund fehlender Infrastruktur meist sehr schwierig oder unmöglich.

In der Praxis werden daher zunehmend direkte elektrische Heizsysteme und Trinkwarmwasserboiler eingesetzt, da sie einfach zu installieren sind und geringe Eingriffe erfordern. Diese Entwicklung wird durch regulatorische Rahmenbedingungen (z. B. OIB-Richtlinie 6) begünstigt. Aus thermodynamischer und energiepolitischer Sicht – insbesondere im Winterhalbjahr – sind solche Lösungen jedoch klar nachteilig.

Ansätze für intelligente, dezentrale Sanierungslösungen

Zur Überwindung dieser Problematik wurden in den letzten Jahren verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchgeführt. Im FFG Projekt **SaLüH!** wurden dezentrale Fortluft-WP entwickelt, die in vorgefertigte, hochgedämmte Vorhangfassaden integriert werden können. Aufbauend auf dem EU-Projekt **INSPIRe** wurden fassadenintegrierte Technologien für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung erprobt. Internationale Vergleiche erfolgten im Rahmen des **IEA SHC Task 56**.

Im FFG Projekt **HVACviaFacade** wurden darüber hinaus unterschiedliche Konzepte zur Fassadenintegration von Gebäudetechnik und PV entwickelt und Funktionsmuster realisiert. Das FFG Projekt **FiTNeS** fokussiert auf modulare Kleinstwärmepumpen für die wohnungsweise Sanierung, während das FFG Projekt **RENEWnow** technische und nicht-technische Markthemmnisse analysiert. Trotz vielversprechender Ergebnisse fehlt bislang die Standardisierung und Modularisierung, die für eine breite Markteinführung notwendig wäre.

Vorgefertigte Vorhangfassaden als Schlüsseltechnologie

Vorgefertigte, modulare Vorhangfassadensysteme stellen eine zentrale Zukunftstechnologie für die serielle, hocheffiziente Sanierung von Geschoßwohnbauten dar. Sie ermöglichen kurze Bauzeiten, hohe Ausführungsqualität, geringere Belastungen für Bewohner und – bei entsprechender Standardisierung – deutliche Kostensenkungen durch industrielle Fertigung. Durch die Integration von Haustechnikkomponenten in die Fassade kann zudem wertvoller Wohnraum gewonnen werden.

Demonstrationsprojekte in Österreich und international haben die technische Machbarkeit bereits gezeigt, etwa im Rahmen von EU-Projekten wie **OutPHit** (H2020). Bisher handelt es sich dabei jedoch überwiegend um nicht standardisierte Einzellösungen mit hohen Kosten. Die Entwicklung serienreifer, modularer und wirtschaftlicher Gesamtsysteme bildet daher eine zentrale Ausgangslage und Motivation für weiterführende Forschungs- und Innovationsaktivitäten.

Wärmepumpensysteme für die Sanierung im Mehrgeschosswohnbau

Verschiedene WP-Systemtypologien (d.h. zentral, semi-zentral, dezentral bzw. gemischt zentral/dezentral) und Sanierungspakete wurden innerhalb verschiedener Studien verglichen. In [1] wurden eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) und Mikrowärmepumpe, eine Abluftlüftung mit Abluft-Wasser-WP und eine Abluftlüftung mit Luft-Wasser-WP mit einem Referenzsystem (d.h. Abluftlüftung mit Luft-Wasser-WP und Plattenheizkörpern) verglichen. In [2] wird ein neuartiges kanalfreies Zuluft-Verteilsystem vorgestellt.

In [3] wurden verschiedene Sanierungspakete auch hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Machbarkeit und Umweltauswirkungen analysiert. In [4] wurden mehr als 250000 Kombinationen von Gebäudetypen, Bau-Alter, Klimazonen, Effizienzniveaus der Gebäudehülle und Konfigurationen von HLK-Systemen analysiert, wobei auch die wirtschaftliche Durchführbarkeit berücksichtigt wurde. In [5] wurde eine umfassende Simulationsstudie für eine Neubausiedlung durchgeführt, um eine Entscheidungshilfe in Bezug auf die Wahl des Heizungssystems, des Zentralisierungsgrades des Heizungssystems, des Wärmeverteilungssystems und des entsprechenden Rohrisolierungsgrades zu entwickeln. In [6] werden Richtlinien für die Tiefensanierung von Gebäuden basierend auf den Erfahrungen mit Demogebäuden bereitgestellt.

Die in [7] vorgestellte Studie analysiert eine semizentrale HLK-Lösung, während viele andere Studien sich auf dezentrale Lösungen konzentrieren und neuartige fassadenintegrierte Lösungen analysieren: Fortluft-Zuluft-WP in [8]; Fassadenintegration einer Fortluft-Zuluft-WP in [9], mit Umsetzung in einer Demo in [10] und [11]; Fortluft-Zuluft-WP mit Sekundärluft-Rezirkulation in [12] und [13]; dezentrale Split-TWW-WP in [14]. Einen Überblick über Varianten von Luft-Luft WP ist in [15] zu finden und in [16] ist der Stand zu aktiven bzw. Plus-Fassaden zusammengefasst.

Die Effizienz verschiedener Wärmepumpentechnologien wurden analysiert jedoch ohne Bezug auf die Sanierung von Mehrgeschosswohnbauten, wie z.B. in [17] sog. VRF-Systeme, bzw. die in USA verbreiteten sog. Ducted Systems in [18] und Luft-Luft-WP in [19]. Die Autoren in [20] analysieren die Effizienz einer Grundwasser-WP in Passivhaus-Mehrgeschosswohnbauten. Die Interaktion von Gebäudesanierung mit Fernwärme wurde in [21] analysiert und die Integration von Wärmepumpentechnologie mit erneuerbaren Energien in [22]. Gebäudesimulations-Tools [23] bzw. Excel-basierte Berechnungstools [24] ermöglichen die Bewertung vieler Szenarien und die Optimierung des Sanierungsprozesses.

4 Projektinhalt

Der Gebäudesektor spielt eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der österreichischen und europäischen Klimaschutzziele. Entsprechend fordert die europäische Gebäuderichtlinie EPBD für Neubau und Sanierung sogenannte Niedrigstenergiegebäude (nZEB), deren sehr geringer Restenergiebedarf überwiegend aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden soll. Gleichzeitig werden kostenoptimale, lebenszyklusorientierte und möglichst minimalinvasive Lösungen verlangt. Gerade im Geschoßwohnungsbau fehlen jedoch bislang marktfähige, leistbare und breit umsetzbare Gesamtlösungen, die hochwertige thermische Sanierung, Heizungstausch (Raumheizung (RH) und Trinkwarmwasser (TWW)), kontrollierte Lüftung und Integration erneuerbarer Energien kombinieren.

Ausgangsproblem und Zielsetzung des Projekts

In Mehrgeschoßwohnbauten sind zentrale Heiz- und Warmwassersysteme häufig aus nicht-technischen Gründen nur schwer umsetzbar. Dazu zählen heterogene Bestandslösungen (Einzelöfen, Gasthermen, Elektroboiler), teil- bzw. wohnungsweise Sanierungen, brandschutzrechtliche Vorgaben, fehlende Technikräume sowie unzureichender Platz oder Statik für Schächte. Auch dezentrale Systeme stoßen an Grenzen: kleine Wohnungsgrundrisse, beengte Sanitärbereiche, ungünstige Leitungsführung und die Tatsache, dass Sanierungen meist im bewohnten Zustand erfolgen müssen.

Als Folge werden häufig elektrische Direktheizungen und Trinkwarmwasserboiler eingesetzt. Diese sind zwar einfach zu installieren, stellen jedoch weder aus thermodynamischer noch aus ökologischer Sicht eine nachhaltige Lösung dar und können zu langfristigen Lock-in-Effekten führen. Um die Klimaziele tatsächlich zu erreichen, braucht es daher kostengünstige, serielle und minimalinvasive Sanierungslösungen, die einen konsequenten Umstieg von fossilen Heizsystemen auf effiziente WP ermöglichen.

Das übergeordnete Ziel des FFG Projekts **PhaseOut** war die Entwicklung, Demonstration und vergleichende Bewertung solcher Lösungen. **PhaseOut** adressiert sowohl den Ersatz von Gasetagenheizungen als auch die Vermeidung ineffizienter Stromdirektheizungen und kombiniert Wärmepumpentechnologien mit thermischer Sanierung, vorgefertigten Fassaden und PV. Die Ergebnisse sollen zukünftig als Entscheidungsgrundlage für Wohnbauträger dienen und werden in Form von Planungs-Guidelines veröffentlicht. Dies erfolgte in enger Kooperation mit dem parallel laufenden FFG Projekt **SüdSan**.

Demonstrationsobjekte und Rahmenbedingungen

Als Demonstrationsstandort stellte die Sozialbau AG sieben baugleiche Mehrgeschoßwohnbauten in Wien (Linzerstraße) zur Verfügung. Die Gebäude wurden 1963 errichtet, verfügen jeweils über sechs Wohnungen mit rund 57 m² Nutzfläche (NF) und werden derzeit über Gasetagenheizungen und gasbasierte Warmwasserbereitung versorgt. Der spezifische Heizwärmebedarf (HWB) der Bestandsgebäude liegt bei etwa 120 kWh/(m²a). Die Gebäudegeometrie und die Beschaffenheit der Fassade stellten eine wichtige Herausforderung im Forschungsprojekt dar, insbesondere für den Einsatz vorgefertigter Fassadenelemente und für einen systematischen Vergleich unterschiedlicher Sanierungs- und Wärmepumpenkonzepte unter nahezu identischen Randbedingungen. Vor allem die Kleinheit der einzelnen Gebäude, die Dachschräge, die Loggien, die versetzten Geschosse und die

unterschiedlichsten Fensteröffnungen stellten eine Herausforderung für die Fertigteilplanung und -ausführung dar. Dies schlägt sich selbstverständlich in den Errichtungskosten nieder.

Ohne Forschungsprojekt wäre lediglich eine partielle Fassadensanierung vorgesehen gewesen. PhaseOut erweiterte diesen Ansatz zu einer integrierten Betrachtung von Gebäudehülle, Gebäudetechnik, erneuerbaren Energien und NutzerInnenakzeptanz.

Technischer Ansatz und Innovationsgehalt

Kern des Projekts ist die Entwicklung eines flexiblen, modularen Lösungsportfolios für die Sanierung von Geschosswohnbauten mit unterschiedlichen technischen und nicht-technischen Randbedingungen. Dabei werden drei wärmepumpenbasierte Versorgungskonzepte entwickelt, umgesetzt und vergleichend untersucht:

1. Zentrale Lösung

Eine zentrale Außenluft-Wärmepumpe (AL-WP) versorgt das gesamte Gebäude mit Heizwärme und TWW. Zur minimalinvasiven Umsetzung werden neue Verteilstränge entlang der Fassade innerhalb der thermischen Hülle geführt und in den Wohnungen kompakte Wärmeübergabestationen (WüSt) installiert.

2. Semi-zentrale Lösung

Eine kleinere zentrale WP stellt ein niedriges Temperaturniveau für eine sehr kompakte Booster-WP bereit, die für die Raumheizung (RH) und Trinkwarmwasserbereitung zuständig ist. Die Verteilstränge sind in der Fassade integriert, wodurch die Installation mit möglichst geringem Eingriff im Gebäude möglich ist.

3. Dezentrale bzw. gemischt zentrale Lösung

Die RH erfolgt über eine klein dimensionierte zentrale WP, während die Trinkwarmwasserbereitung über dezentrale WP mit fassadenintegrierter Außeneinheit realisiert wird. Dadurch wird der Platzbedarf in den Wohnungen stark reduziert.

Alle drei Konzepte werden hinsichtlich Effizienz, Kosten, Schallemissionen, Wartungsaufwand, NutzerInnenkomfort und Flexibilität optimiert. Nicht am Markt verfügbare Komponenten – insbesondere kompakte Booster-WP, dezentrale TWW-WP sowie multifunktionale, vorgefertigte Holzfassaden mit integrierter Gebäudetechnik – wurden im Projekt entwickelt bzw. weiterentwickelt. Ein besonderer Fokus lag auf geringer Baugröße, alternativen Kältemitteln (R290) und minimalen Geräuschemissionen.

Serielle, minimalinvasive Sanierung und Fassadenintegration

Ein zentrales Innovationsmerkmal von PhaseOut ist die Kombination von Wärmepumpensystemen mit nachhaltigen, modularen und vorgefertigten Fassaden. Durch den hohen Vorfertigungsgrad werden Bauzeiten verkürzt, die Belastung der Bewohner reduziert und eine hohe Ausführungsqualität erreicht. Gleichzeitig ermöglicht die Fassadenintegration von Leitungen, Wärmepumpenkomponenten, Lüftung und optionaler Energieerzeugung eine serielle „One-Stop-Shop“-Sanierung, die wirtschaftlich skalierbar ist.

NutzerInnenakzeptanz, Flexibilität und Monitoring

Ein wesentliches Hemmnis bei Sanierungen im Mietwohnungsbau ist die Zustimmung der NutzerInnen. PhaseOut setzt daher von Beginn an auf eine systematische MieterInneneinbindung. Die Sanierungskonzepte sind zwar so ausgelegt, dass Wohnungen schrittweise angebunden werden können, eine hohe Anschlussrate ist jedoch natürlich wünschenswert. Ziel wäre, eine Anschlussquote von mindestens 50 % zu erreichen, die damit deutlich über dem üblichen Niveau zu liegen.

Alle umgesetzten Konzepte werden über mindestens zwei Jahre intensiv überwacht. Das Monitoring umfasst energetische Kennwerte (COP/JAZ, Verteilverluste), Schallemissionen, NutzerInnenkomfort, Betriebserfahrungen sowie die Integration von PV und Flexibilitätsoptionen. Die Messdaten werden mit simulationsgestützten Modellen („digitaler Zwilling“) abgeglichen, um die Systeme weiter zu optimieren und die Ergebnisse auf andere Gebäude zu übertragen.

Wirkung, Vergleich und erwartete Ergebnisse

Durch die thermische Sanierung und den Einsatz von WP soll der Energiebedarf und damit die Energiekosten deutlich reduziert werden. Die spezifischen CO₂-Emissionen sollten von über 40 kg/(m²a) auf unter 6 kg/(m²a) gesenkt werden, dabei sollten die Energiekosten für Heizung und Warmwasser von rund 16 €/m²a auf unter 5 €/m²a fallen (Stand 2020/2021). Ergänzend wird das Potenzial von (gebäude-)integrierter PV und die energiewirtschaftliche Flexibilisierung untersucht.

PhaseOut führt erstmals einen vollumfänglichen Vergleich zentraler, semi-zentraler und dezentraler Wärmepumpenlösungen in baugleichen Mehrgeschoßwohngebäuden durch. Der Vergleich umfasst Planung, simulationsgestützte Optimierung, Umsetzung, Monitoring, wirtschaftliche und volkswirtschaftliche Bewertung sowie Prozess- und Akzeptanzanalysen. Auf dieser Basis entsteht ein praxisnahes Lösungsportfolio, aus dem für künftige Sanierungen die jeweils optimale Strategie abgeleitet werden kann.

Damit leistet PhaseOut einen wesentlichen Beitrag zur industriellen, seriellen Sanierung des Geschoßwohnungsbaus und schafft die Voraussetzungen für einen beschleunigten Ausstieg aus fossilen Heizsystemen bei gleichzeitig hoher NutzerInnenakzeptanz und Wirtschaftlichkeit.

Aufgrund der deutlichen Verzögerung bei der Baueinreichung verzögerte sich die Umsetzung und das Monitoring wird nach der Projektlaufzeit im Zeitraum 2026-2028 durchgeführt und die Ergebnisse anschließend veröffentlicht.

5 Ergebnisse

Das FFG Projekt PhaseOut umfasst die Optimierung, Umsetzung, Demonstration und Bewertung von innovativen, minimalinvasiven Sanierungslösungen (thermische Sanierung und Heizungstausch) mit WP und PV im Geschoßwohnbau an sieben baugleichen Gebäuden. Verschiedener technischer Lösungsvarianten auf Basis modularer und skalierbarer Gebäudetechniksysteme sowie multifunktionaler Gebäudekomponenten für den Austausch von dezentralen Gasetagenheizungen wurden entwickelt und untersucht. Zentrale, semi-zentrale und dezentrale WP-Lösungen wurde simulationstechnische bewertet und werden in sieben baugleichen Gebäuden demonstriert.

5.1. Gebäude

Die sieben im Projekt PhaseOut sanierten Gebäude der Sozialbau befinden sich in der Linzerstraße in Wien. Sie sind alle baugleich und wurden 1963 errichtet. Jedes Gebäude beherbergt sechs Wohnungen: zwei im Erdgeschoss, zwei im ersten Obergeschoss und zwei im zweiten Obergeschoss. Abbildung 1 zeigt eine Ansicht von Süden und eine von Nordosten eines der sieben Gebäude.



Abbildung 1: Ansicht Süd (links) und Nordost (rechts) eines der 7 Gebäude. Quelle: Sozialbau AG

Alle Wohnungen bestehen aus sieben Räumen: Eingangsbereich, Wohnzimmer, Schlafzimmer, Abstellraum, Küche, Bad und WC. Die Wohnungen sind über ein zentrales Treppenhaus miteinander verbunden. Der Grundriss des Erdgeschosses ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Grundrisse des ersten und zweiten Obergeschosses sind identisch. Abbildung 3 zeigt den Gebäudeschnitt. Das Gebäude verfügt über ein durchgehendes Untergeschoss, das sowohl der AL als auch dem Erdreich ausgesetzt ist. Die sanierte Wohnfläche beträgt 56,8 m² pro Wohnung und insgesamt 364,5 m² für das gesamte Gebäude.

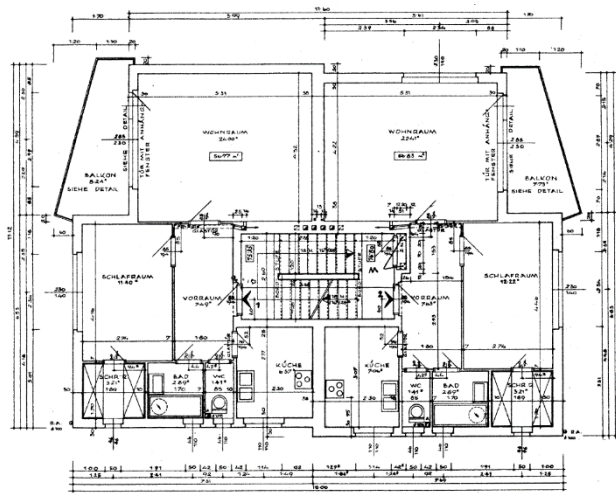


Abbildung 2: Grundriss. Quelle: Sozialbau AG.

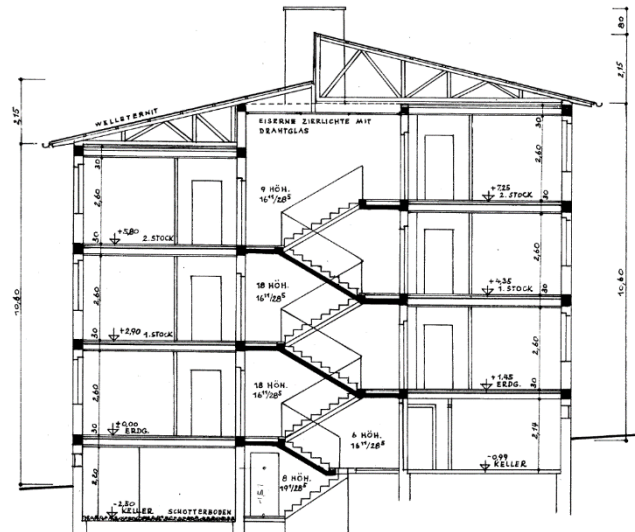


Abbildung 3: Schnitt. Quelle: Sozialbau AG.

Der HWB eines Gebäudes im Ist-Zustand wurde mit dem PHPP berechnet und beträgt $114 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und liegt damit in der Größenordnung der vorliegenden Gasrechnungen einiger Wohnungen. Die wichtigsten Daten zum Ist-Zustand des Gebäudes sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kenndaten der Gebäude im Bestand.

	1963	1990
BGF – Energieausweis / $[\text{m}^2]$	455	455
A_{EBF} – PHPP / $[\text{m}^2]$	365	365
HWB laut Energieausweis / $[\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$	247	134
TWW-Bedarf / $[\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$	13.7	13.7
Heizlast (HL) / $[\text{W}/\text{m}^2]$	87	51

5.2. WP-Systemkonzepte

5.2.1. Zentrale WP für Heizung und WW

Beim zentralen Systemkonzept arbeitet eine Luft-Wasser-WP auf zwei zentrale Pufferspeicher (siehe Abbildung 4 links oben). Einer davon ist für die RH vorgesehen, der andere für die Trinkwarmwasserbereitung. Die WP belädt vorrangig den Pufferspeicher für das Trinkwarmwasser (TWW), um möglichst schnell ausreichend Trinkwarmwasser zur Verfügung zu stellen. Die WP arbeitet im TWW-Modus auf der maximal vorgesehenen Drehzahl. Im Heizungsbetrieb moduliert die WP und versucht möglichst kontinuierlich die jeweilige Heizungsanforderung abzudecken.

Als Verteilnetz wurde ein sog. 2+2-Leitersystem mit Frischwasserstation (FriWa) abgebildet. Ein Rohrleitungspaar versorgt die Trinkwasserstationen in jeder Wohnung mit Wärme. Hier wird aus Komfortgründen 24/7 ein geringer Durchfluss gewährleistet, damit jederzeit Wärme an der Übergabestation zur Verfügung steht. Der Durchfluss im Standby-Betrieb ist so gewählt, dass die Rücklauftemperatur in den Pufferspeicher etwa im Bereich 30 °C liegt. Ein weiteres Rohrleitungspaar versorgt aus dem Heizungspufferspeicher die Heizkreise in den einzelnen Wohnungen.

5.2.2. gemischt zentral/dezentrales System

Variante mit Trinkwasser-WP: Das gemischt zentral/dezentrale System besteht aus einer zentralen AL-WP für die Heizung und separaten dezentralen AL-WP für die Trinkwassererwärmung (siehe Abbildung 4 rechts oben). Das System für die RH enthält keinen Pufferspeicher, sondern lediglich eine hydraulische Weiche, um die Durchflüsse durch den Kondensator und im Heizkreis zu entkoppeln. Es gibt ein 2-Leiter-Verteilssystem von der WP in die einzelnen Wohnungen.

Variante mit E-Boiler (EB): Als Abwandlung des gemischt zentral/dezentralen Systems wurde außerdem eine Variante untersucht, bei der die dezentralen Luft-Wasser-WP für das TWW durch EB ersetzt werden (siehe Abbildung 4 links unten).

5.2.3. Semizentrales System mit Booster-WP

Beim semizentralen Systemkonzept beheizt eine zentrale WP einen zentralen Pufferspeicher auf ein niedriges Temperaturniveau (siehe Abbildung 4 rechts unten). So kann diese WP auch im Winter eine hohe Arbeitszahl erreichen. Über ein Niedertemperaturverteilstück mit geringen Wärmeverlusten werden dann die Verdampfer von dezentralen Booster-WP in den einzelnen Wohnungen versorgt.

Die Booster-WP sind somit als Wasser-Wasser-WP ausgelegt und versorgen den Heizkreis in der jeweiligen Wohnung ohne Pufferspeicher mit Wärme. Jede Wohnung verfügt außerdem über einen Trinkwarmwasserspeicher, der ebenfalls mit der Booster-WP beheizt wird.

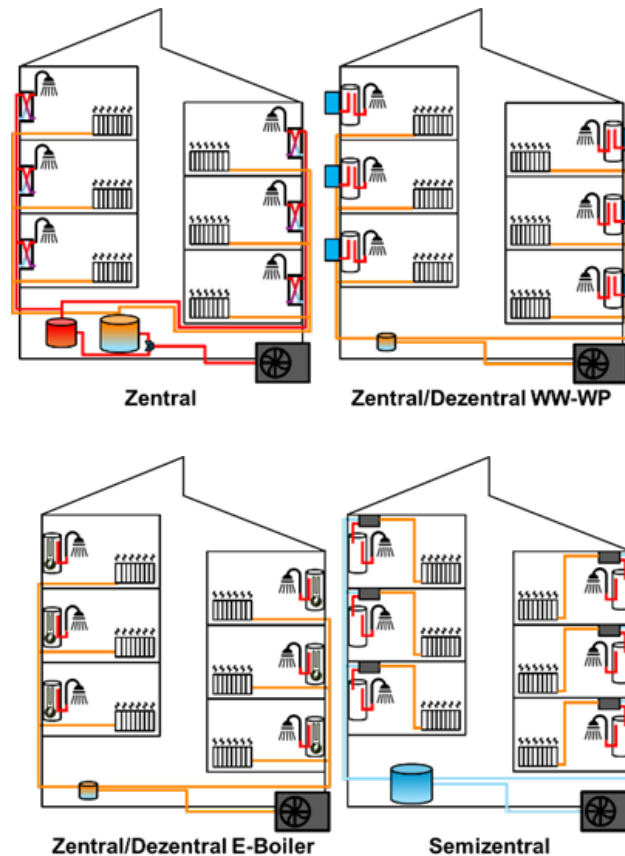


Abbildung 4: Prinzip-Schemata der vier Systemkonzepte [25].

5.3. Simulationsstudie - Sanierungsvarianten

Verschiedene Sanierungsvarianten werden für die Gebäudehülle eines der Demonstrationsgebäude betrachtet. Einen Überblick gibt Tabelle 2, in der die U-Werte der Gebäudehülle sowie der mittlere U-Wert (bzw. H_t') unter Berücksichtigung einer Hüllfläche von 779,2 m² und der äquivalenten Lüftungsrate angegeben sind. Variante 1 bildet den ursprünglichen Zustand der Gebäude ab. Variante 2 bildet den aktuellen Zustand ab (Vorsanierung). Varianten 3 (partielle Sanierung) bis 13 (hochwertige Sanierung, Komponenten in Passivhausqualität) stellen die Bandbreite möglicher Sanierungstiefen dar. Die äquivalente Lüftungsrate wird bei den Fällen reduziert, bei denen ein mechanisches Lüftungssystem mit WRG eingesetzt wird.

Tabelle 2: Überblick über die Sanierungsvarianten für die Hülle des Referenzgebäudes [26].

Sanierungsvarianten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U-Dach	1.46	0.37	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
U-Wand N	1.25	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.24	0.24	0.24	0.15
U-Wand O	1.25	0.49	0.49	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
U-Wand S	1.25	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.24	0.24	0.24	0.24	0.15
U-Wand W	1.25	0.77	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.13	0.22	0.13
U-Boden	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

U-Fenster S		3.00	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.55	1.55	1.55	0.80	0.80
U-Fenster O		3.00	1.92	1.92	1.92	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
U-Fenster N		3.00	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.55	1.55	0.80	0.80
U-Fenster W		3.00	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	0.80	0.80
Wärmebrücke	$\Delta U_{WB} / [W/(m K)]$	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Mittl. U-Wert	$H_t' / [W/(m^2_{Geb.h\ddot{u}lle} K)]$ ¹	1.59	0.97	0.76	0.70	0.69	0.69	0.51	0.51	0.47	0.39	0.37	0.32	0.29
Lüftungsrate	$n_{equiv} / [1/h]$	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.17	0.27	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Effektivität WRG	$\eta / [-]$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

Die markierten Zellen in Tabelle 2 heben die Änderungen hervor, die in einer Sanierungsvariante im Vergleich zum vorherigen Fall vorgenommen wurden, um die Lesbarkeit zu erleichtern. Der erste Sanierungsfall entspricht einem völlig ungedämmten Gebäude, im zweiten Fall werden einige Zentimeter Dämmmaterial in allen Strukturen und Doppelglasfenster eingesetzt. In allen folgenden Szenarien werden weitere Verbesserungen an einem Teil der Gebäudehülle und/oder des Lüftungssystems vorgenommen, was zu einem immer effizienteren Gebäude führt. Die einzige Ausnahme bildet die Sanierungsvariante 7, bei der die Gebäudehülle verbessert wurde, das Lüftungssystem jedoch keine WRG aufweist (im Vergleich zu Variante 6). Die Sollwerttemperatur wird hier mit 20°C² [27] angenommen.

5.3.1. Heiz- und Trinkwarmwasserbedarf und Lastberechnungen

Für jede Sanierungsvariante werden der HWB und die HL für das gesamte Gebäude und die einzelnen Wohnungen mit dem PHPP [28] berechnet. Darüber hinaus wird das gesamte Gebäude mittels dynamischer Simulation unter Verwendung der in Matlab/Simulink entwickelten Toolbox carnotUIBK [29] bewertet, um den HWB und die HL des Gebäudes (auf 10-Minuten-Basis) über das ganze Jahr zu bewerten.

PHPP ist ein quasistationäres Tool, das auf der Norm ISO 13790:2008 [30] basiert, und es hat sich gezeigt, dass es den Wärmebedarf eines Gebäudes genau vorhersagen kann [31]. Darüber hinaus kann mit dem PHPP die HL des Gebäudes berechnet werden, wobei es im Gegensatz zur Norm EN 12831-1 [32] auch Wärmegewinne berücksichtigt. Für die Auslegung der zentralen Heizung ist das PHPP-Verfahren für das Gebäude geeignet, für die Dimensionierung der Heizkörper wird jedoch die raumweise HL gemäß Norm EN 12831-1 [32] für jede Sanierungsvariante berechnet.

Für das Warmwasserprofil wird der in der EN 16147:2017 [33] beschriebene Zapfzyklus M verwendet. Ein Reduktionsfaktor von 0,625 (was zu einem Energiebedarf von 3,7 kWh/(Wohnungstag) führt) wird unter Berücksichtigung eines Durchschnitts von 2,5 Personen pro Wohnung angewendet, was zu dem in Tabelle 3 dargestellten Profil führt. Für die dezentrale Warmwasserbereitung mit FriWa wird eine

¹ $H_t^{\delta} = \frac{\sum_i A_i \cdot U_i}{\sum_i A_i}$ wobei i alle Komponenten der thermischen Hülle darstellt (d.h. Wände, Fenster, Dach, Boden) inkl. Wärmebrücken.

² Um den tatsächlichen Energiebedarf zu abzuschätzen, sollte der sog. Prebound-Effekt für wenig gedämmte Gebäude berücksichtigt werden.

primärseitige Vorlauftemperatur von 55°C angenommen - Hygieneanforderung (Legionellen) entfällt hier. Wie in [34] gezeigt wurde, ist das 2+2 Leitersystem mit FriWa für WP das zu empfehlende System.

Tabelle 3: Stündlicher Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung für das gesamte Gebäude.

Stunde des Tages	1-6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22-24
kWh	0	6.04	1.58	0.79	0.39	0.79	1.18	0.00	0.39	0.39	0.39	0.00	1.18	0.39	2.76	5.64	0.00

5.3.2. Dimensionierung der Heizkörper und Bewertung der Vorlauftemperatur

Für die Dimensionierung der Heizkörper werden drei verschiedene Szenarien betrachtet: Heizkörper ausgelegt für den ursprünglichen Zustand (Fall_1) mit einer Vorlauftemperatur von 90°C, Heizkörper ausgelegt für den Bestand, d.h. Vorsanierung (Fall_2) mit einer Vorlauftemperatur von 90°C³ und Heizkörper ausgelegt für die Sanierungsvariante 8 mit einer Vorlauftemperatur von 45°C (Fall_8). Alle drei Fälle werden unter Berücksichtigung der raumweisen HL (nach EN 12831-1 [32]) einmal ohne und einmal mit Wiederaufheizleistung (WH, 12 W/m²) berechnet.

Der Heizkörperexponent kann je nach Heizkörpermodell zwischen 1,2 und 1,4 liegen und die Auslegungs-Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf kann zwischen 10 K und 40 K variieren (mit Ausnahme der Niedertemperaturheizkörper mit ΔT zwischen 5 K und 10 K). Entsprechend wird die Dimensionierung der Heizkörper für die verschiedenen Fälle unter Berücksichtigung von 10 verschiedenen Exponenten von 1,2 bis 1,4 (mit 0,02-Schritten) in Kombination mit einem ΔT zwischen 10 K und 40 K (mit 10 K-Schritten) für die Hochtemperatur-Heizkörper und zwischen 5 K und 10 K (mit 5 K-Schritten) für die Niedertemperatur-Heizkörper variiert.

- 1) Dimensionierung von Heizkörpern: Im ersten Schritt werden die Heizkörper für jeden Raum mit Hilfe der Gleichung (1) dimensioniert (P_{nom}), in Kenntnis der Raumlufttemperatur (T_i), der raumbezogenen Referenz-HL ($HL_{Ref_{raum_i}}$) (siehe vorherigen Abschnitt) des Heizkörperexponenten n , die (auf 50 K festgelegte) Referenztemperaturdifferenz zwischen der durchschnittlichen Heizkörpertemperatur und der Lufttemperatur (ΔT_{ref}) und die Kenntnis der Vorlauf (VL)- und Rücklauftemperatur (RL) zum Heizkörper mit Hilfe von Gleichung (2) ist es möglich, die logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_{log} zu berechnen.

$$P_{nom} = HL_{Ref_{raum_i}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\Delta T_{log}}{\Delta T_{ref}}\right)^n} \quad (1)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{VL} - T_i) - (T_{RL} - T_i)}{\ln\left(\frac{T_{VL} - T_i}{T_{RL} - T_i}\right)} \quad (2)$$

- 2) Wasserleitungsdimensionierung: Die Dimensionierung des Heizkörpers mit unterschiedlichen ΔT impliziert unterschiedliche Dimensionierungen (d.h. Rohrdurchmesser) des Verteilungssystems,

³ Bei einer Teilsanierung könnten die Heizkörper mit einer Vorlauftemperatur von 75°C dimensioniert worden sein. In dieser Arbeit wurden sicherheitshalber 90°C gewählt.

da für eine gegebene Nennleistung unterschiedliche ΔT nur durch Änderung des Massenstroms realisiert werden können. Daher wird für jedes ΔT , das während des Auslegungsprozesses verwendet wird, der Durchmesser des Rohrs, das eine Wohnung versorgt, mit Hilfe von Gleichung (3) unter Berücksichtigung einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s bestimmt. Unter der Annahme, dass dieses System (Verteilung und Abgabe) während der folgenden Sanierungsschritte konstant gehalten wird, wird davon ausgegangen, dass die Wassergeschwindigkeit ohne störende Strömungsgeräusche auf bis zu 1,5 m/s erhöht werden kann.

$$\dot{m}_{Wohnung} = \frac{HL_{RefWohnung}}{c p_{Wasser} \Delta T} = v_{Wasser} \cdot \rho_{Wasser} \cdot \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (3)$$

- 3) Berechnung der Vorlauftemperatur für die verschiedenen Sanierungsvarianten: Für jede nachfolgende Sanierung (in Bezug auf den Auslegungsfall) kann bei Kenntnis der HL jedes Raumes und die Nennleistung der Heizkörper (P_{nom}), ΔT_{log} durch Umkehrung von Gleichung (1) berechnet werden. Bei Kenntnis des minimalen und maximalen Heizwassermassenstroms und der HL der renovierten Wohnung kann ΔT durch Umkehrung von Gleichung (3) bestimmt werden, und bei Kenntnis von ΔT_{log} und ΔT können die Vor- und Rücklauftemperaturen mit Hilfe von Gleichung (2) berechnet werden.

An dieser Stelle wird für jeden Sanierungsfall ein Spektrum (d.h. 44 Fälle für die hohe Heizkörpertemperatur und 22 Fälle für die niedrige Heizkörpertemperatur) möglicher Vor- und Rücklauftemperaturen ermittelt (unter Berücksichtigung der verschiedenen Auslegungsmöglichkeiten, die ΔT und n sowie den Massenstrom variieren).

5.3.3. Bewertung der Leistung der WP

Um den Einfluss der Sanierungsvarianten und der Heizkörperdimensionierung auf die Effizienz einer zentralen Luft/Wasser-WP abzuschätzen, wird ein Carnot-basierter Ansatz verwendet, der einen konservativen Carnot-Gütegrad von 0,35 berücksichtigt [35]. Damit wird Rechnung getragen, dass Verteil- und Speicherverluste nicht explizit berücksichtigt werden. Der gebäudebezogene Wärmebedarf für jeden Zeitschritt (d.h. 10 Minuten) wird mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation definiert und für die Quelle wird die AL aus den Klimadaten (TRY) verwendet. Für jede Auslegungsvariante der Heizkörper (Fall_1, Fall_2 und Fall_8, d.h. Heizkörper, die für die Sanierungsvariante 1, 2 oder 8 ausgelegt sind, wobei als Variante die WH aufgrund des intermittierenden Betriebs berücksichtigt wird) wird eine maximale und minimale Vorlauftemperatur (VL) für jede Sanierungsvariante ermittelt. Diese ermittelte Vorlauftemperatur wird in den Gleichungen (4) und (5) für das ganze Jahr konstant angenommen. Damit liegt im Vergleich zur Verwendung einer Heizkurve die Leistungszahl (COP) und der Strombedarf der WP auf der sicheren Seite.

$$COP(t) = \eta_{carnot} \cdot \frac{T_{VL}}{T_{VL} - T_{AL}(t)} \quad (4)$$

$$P_{el,HP}(t) = \frac{HL_{sim}(t)}{COP(t)} \quad (5)$$

Für die Warmwasserbereitung werden die Gleichungen (4) und (5) unter der Annahme verwendet, dass T_{VL} gleich 55°C ist und anstelle von $HL_{sim}(t)$ der in Tabelle 3 angegebene Warmwasserbedarf verwendet wird.

5.3.4. Ergebnisse: HWB und HL für die verschiedenen Sanierungsvarianten

Abbildung 5 zeigt die mit dem PHPP wohnungsweise (d.h. für jede der sechs Wohnungen), mit dem PHPP gebäudeweise und mit der dynamischen Simulation für das gesamte Gebäude berechneten HWB. Der durch das gebäudebezogene PHPP vorhergesagte jährliche HWB stimmt gut mit den jährlichen Ergebnissen der dynamischen Simulation überein (mit einer relativen Abweichung von maximal 8% für die Sanierungsvariante 1.)

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der HWB der Wohnungen von der Ausrichtung (d.h. in diesem Fall Nord-Süd) aufgrund der solaren Gewinne und von der Position der Wohnung im Gebäude abhängt. Die Wohnungen in der Mitte weisen immer den niedrigsten HWB auf, während die oberen und unteren Wohnungen den höchsten HWB haben. Die Dämmung des Daches bei Sanierung 1 und 2 führt zu einem niedrigeren HWB der oberen Wohnungen im Vergleich zu den unteren Wohnungen. Wenn auch der Boden gedämmt wird (in Sanierung 7), haben die oberen und unteren Wohnungen einen ähnlichen HWB. Die beste Sanierungsvariante (d.h. 13) führt zu einem Gebäude-HWB von etwa 30 kWh/(m²_{NF} a).

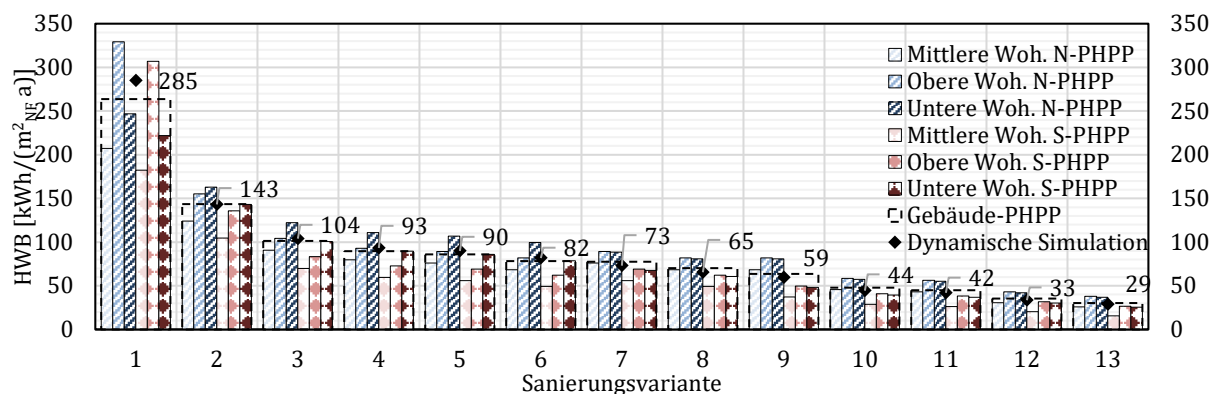


Abbildung 5: Heizwärmebedarf (HWB) für alle Sanierungsvarianten; Gebäudeweise und wohnungsweise Berechnung mit PHPP, sowie gebäudeweise dynamische Simulation [26].

Abbildung 6 zeigt die mittels wohnungsweisem PHPP berechnete HL für alle Sanierungsvarianten. Beim Vergleich von HWB und HL ist zu erkennen, dass diese demselben Trend folgen.

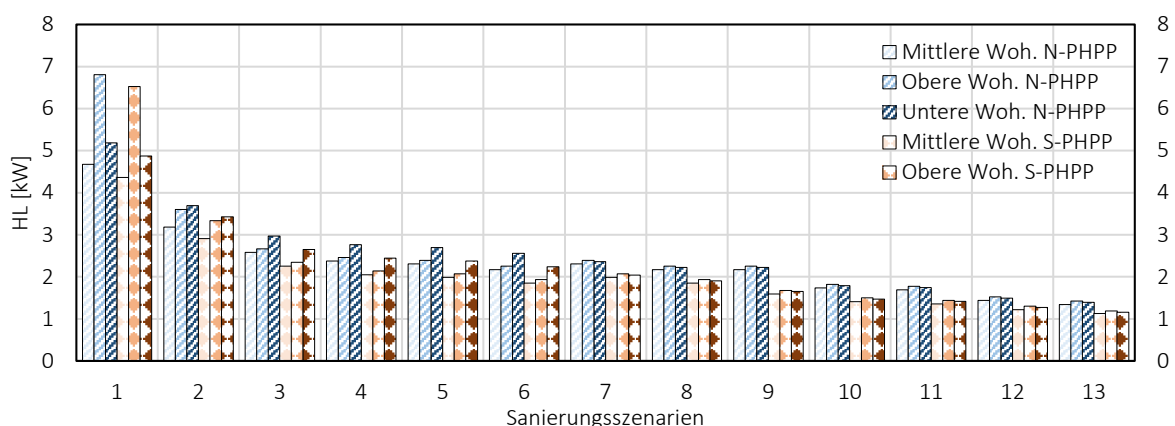


Abbildung 6: Heizlast (HL) berechnet mittels wohnungsweisem PHPP für alle Sanierungsvarianten [26].

Abbildung 7(a) zeigt die mit dem PHPP berechnete HL aller Sanierungsvarianten - gebäudeweise, die nach der Norm EN 12831-1 berechnete raumweise HL des Gebäudes mit und ohne Berücksichtigung zusätzlicher WH und die mittels dynamischer Simulation abgeleitete maximale HL des Gebäudes. Die sortierte Lastkurve als Ergebnis der dynamischen Simulation des gesamten Gebäudes ist in Abbildung

7(b) dargestellt. Die in Abbildung 7(a) dargestellte HL aus der dynamischen Simulation entspricht dem Maximum der sortierten HL in Abbildung 7(b). Es ist zu erkennen, dass die maximale HL nur für wenige Stunden im Jahr benötigt wird und, dass eine bivalente Auslegung einer WP von ca. 60 % bis 70 % bezogen auf die Maximalleistung nur zu einem geringen Anteil (bezogen auf die Energie) an Nachheizbedarf führen würde. Aus Abbildung 7(a) ist zudem ersichtlich, dass die vom Gebäude-PHPP vorhergesagte HL gut mit der maximalen HL aus der dynamischen Simulation übereinstimmt, mit Ausnahme der Sanierungsvariante 1 (ursprünglicher Gebäudezustand). Es ist auch erwähnenswert, dass die vom Gebäude-PHPP vorhergesagte HL im Durchschnitt 40% weniger im Vergleich zu der nach EN 12831-1 berechneten HL beträgt und 50% weniger, wenn auch die WH berücksichtigt wird. Dies ist dadurch begründet, dass in der Norm konservativere Randbedingungen für die Berechnung gelten (d.h. keine internen Gewinne, nicht beheizte Nachbarwohnungen, hohe Lüftungsrate, niedrige Umgebungstemperatur). Diese Randbedingungen stellen das Worst-Case-Szenario in Bezug auf die HL dar und ist somit für die Auslegung des Wärmeerzeugers ungeeignet.

Um eine Überdimensionierung des WP-Systems zu vermeiden, ist es empfehlenswert, die HL mittels dynamischer Simulation oder unter Verwendung des PHPP zu berechnen (das nach [31] eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des dynamischen Simulationstools aufweist). Dies ist wichtig, um eine Verringerung der Effizienz und der Lebensdauer der WP durch häufige "Ein-Aus"-Zyklen zu vermeiden. Hingegen wird entsprechend [36] für die Dimensionierung der Heizkörper empfohlen, eine raumweise Berechnung der HL auf der Grundlage der EN 12831 durchzuführen. Die für die Warmwasserbereitung benötigte Leistung ist bei der Dimensionierung der WP ebenfalls zu berücksichtigen und hängt vom Warmwasserbedarf, aber auch von der Kapazität der Wärmespeicher und dem Betrieb bzw. der Regelung der WP ab.

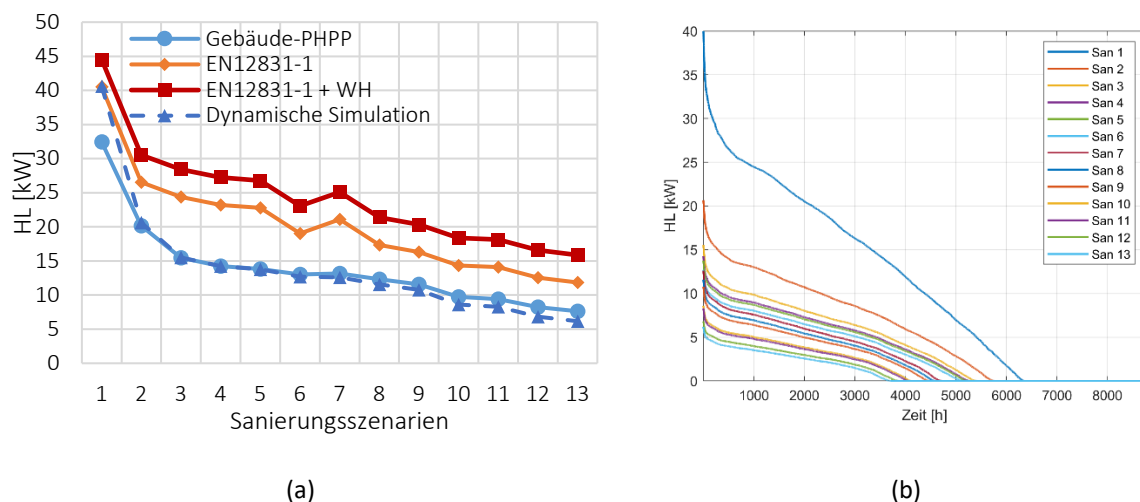


Abbildung 7: (a) Heizlast (HL), berechnet mit dem PHPP gebäudeweise, gemäß der Norm EN 12831-1 mit und ohne Berücksichtigung Wiederaufheizleistung (WH) und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten; (b) Sortierte Last-Kurve als Ergebnis der dynamischen Simulation des gesamten Gebäudes [26].

Abbildung 8 zeigt die HL als Funktion des HWB der einzelnen Wohnungen und des gesamten Gebäudes für die verschiedenen Sanierungsvarianten. Aus Abbildung 8 (a) ist ersichtlich, dass die HL mit steigendem HWB annähernd linear ansteigt. Im Ausschnitt in Abbildung 8 (b) ist jedoch zu erkennen, dass die Streuung der HL gerade bei niedrigen HWB erheblich ist und eine gute Planung auf Basis von detaillierten Berechnungen notwendig ist.

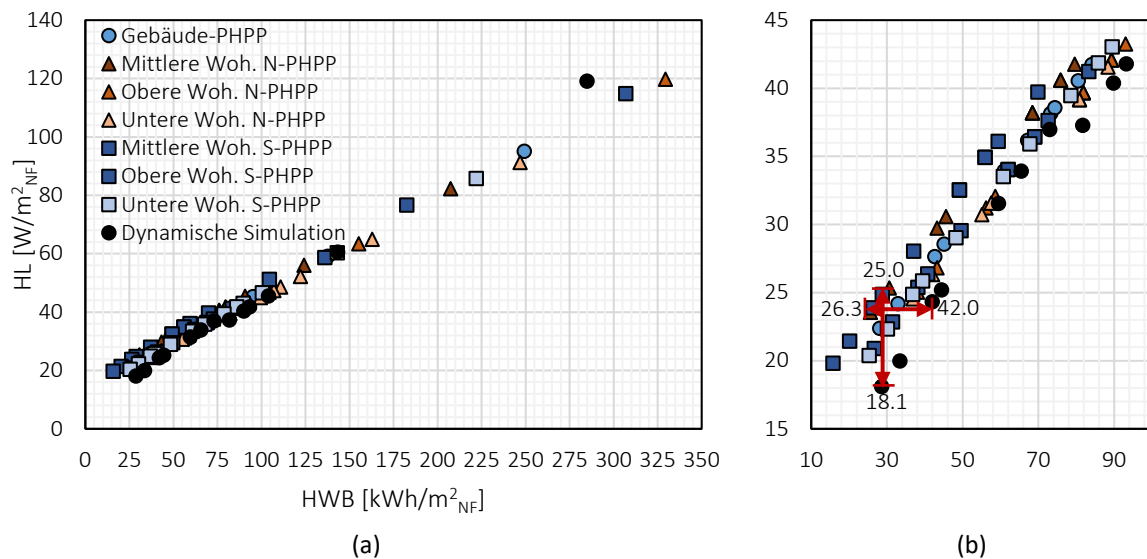


Abbildung 8: (a) Heizlast (HL) vs. Heizwärmebedarf (HWB) einzelner Wohnungen und des gesamten Gebäudes bei den verschiedenen Sanierungsvarianten, (b) Ausschnitt der Abbildung (a) zur Verdeutlichung der Streuung bei niedrigem Heizwärmebedarf.

5.3.5. Ergebnisse: Vorlauftemperatur

Zur Vereinfachung werden nur die minimale Vorlauftemperatur (die sich ergibt, wenn die Heizkörper mit dem höchsten ΔT , dem minimalen Exponenten und unter Verwendung des maximalen Massendurchsatzes dimensioniert werden) und die maximale Vorlauftemperatur (die sich ergibt, wenn die Heizkörper mit dem niedrigsten ΔT , dem maximalen Exponenten⁴ und unter Verwendung des minimalen Massendurchsatzes dimensioniert werden) dargestellt und für die Bewertung der Effizienz der WP verwendet.

Abbildung 9 zeigt die mögliche Vorlauftemperaturspanne für jede Sanierungsvariante unter der Annahme der unterschiedlichen Varianten der Dimensionierung der Heizkörper: Sanierungsvariante 1 mit und ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Wiederaufheizleistung aufgrund des intermittierenden Betriebs des Heizsystems (d.h. Fall_1+WH und Fall_1), Sanierungsvariante 2 (d.h. Fall_2+WH und Fall_2) und Sanierungsvariante 8 mit Niedertemperaturheizkörper (Fall_8+WH und Fall_8). Jeder Fall wird durch eine Temperaturspanne anstelle eines Punktes dargestellt, da ein möglicher Bereich von Heizkörpern (d.h. mit unterschiedlichem Exponenten n) mit verschiedenen ΔT -Größen berücksichtigt und mit einem Bereich des Massenstroms betrieben wurde, der erlaubt die Wassergeschwindigkeit zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s einzuhalten. Es ist offensichtlich, dass die Wahl der Sanierungsvarianten, für die die Heizkörper ausgelegt wurden hier willkürlich ist. In Realität könnten die Heizkörper in jeder Sanierungsvariante ausgetauscht/installiert worden sein und könnten unter Berücksichtigung verschiedener Vorlauftemperaturen dimensioniert worden sein, was zu einem noch größeren Bereich möglicher Vorlauftemperaturen führt, die bei jeder Sanierungsvariante erforderlich sind.

Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass bei den Sanierungsvarianten 8 bis 13 eine große Bandbreite möglicher Vorlauftemperaturen zu erwarten ist, je nachdem, welche Wahl bei den vorherigen

⁴ Ein höherer Heizkörperexponent führt zu einer stärkeren Reduzierung der Strahlungsleistung des Heizkörpers, wenn die mittlere Heizkörpertemperatur gesenkt wird. Die Dimensionierung des Heizkörpers mit einem höheren ΔT für eine feste Vorlauftemperatur führt zu größeren Heizkörpern, da sie die erforderliche Leistung mit einem niedrigeren ΔT_{log} abgeben müssen.

Sanierungen des Gebäudes getroffen wurde. Dieser Bereich reicht von niedrigen Temperaturen (d.h. etwa 35 °C bis 40 °C) bis zu 80 °C (d.h. Fall_2). Die WP der neuen Generation (z.B. Propan R290) können jedoch technisch Vorlauftemperaturen von 70 °C bis 75 °C erreichen. Aus diesem Grund wurde die Effizienz aller Fälle berechnet, die eine Vorlauftemperatur unter 75 °C garantieren (siehe Abbildung 9). Ein weiterer bemerkenswerter Aspekt ist, dass in einigen Ländern Zuschüsse für WP nur gewährt werden, wenn die Auslegungsvorlauftemperatur unter einem bestimmten Wert liegt (z.B. 40 °C für Österreich).

Es ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den in Abbildung 9 angegebenen Temperaturen um Auslegungstemperaturen handelt, die unter den ungünstigsten Außenbedingungen erforderlich sind, und dass während der Heizsaison eine Witterungsausgleichsregelung (Heizkurve) angewandt werden könnte, die die Vorlauftemperatur auf der Grundlage der Umgebungstemperatur senkt und so eine höhere Effizienz des WP-Systems und/oder eine längere Betriebszeit ermöglicht.

Ein weiterer Aspekt, der durch die Vorlauftemperaturanalyse in Abbildung 9 hervorgehoben wird, ist, dass die Sanierung nur eines Teils des Gebäudes (z.B. des Daches oder Westwand von Raum 2 bis Raum 3, siehe Tabelle 2) zu einer Verringerung des HWB und der HL des Gebäudes führt (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6), aber möglicherweise nicht die HL einiger kritischer Räume senkt, die dann zum Engpass bezüglich der maximalen Vorlauftemperatur werden können (siehe z. B. Sanierung 2 bis Sanierung 3 in Abbildung 9).

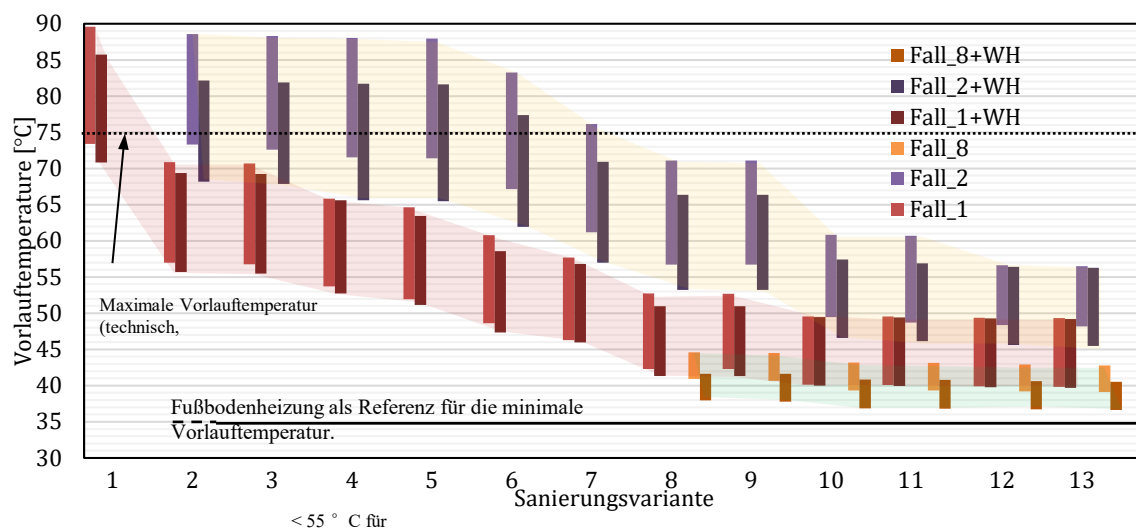


Abbildung 9: Vorlauftemperaturbereiche, die in den verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Auslegungsbedingungen (d.h. Fall 1,2,8 mit oder ohne Wiederaufheizleistung (WH)) erforderlich sind. Die verschiedenen Heizkörperarten (d.h. verschiedene Exponenten n), die mit verschiedenen ΔT und unter Berücksichtigung verschiedener Massenströme mit Geschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s dimensioniert sind, definieren die Bandbreite der einzelnen Balken [26].

5.3.6. Ergebnisse: Effizienz der WP

Abbildung 10 zeigt den jährlichen Strombedarf und Abbildung 11 die JAZ der WP für die RH unter Berücksichtigung der verschiedenen Sanierungsvarianten (siehe Abbildung 5 und Abbildung 7 (b) für die jährliche und sortierte HL der verschiedenen Sanierungsvarianten) und der verschiedenen Fälle für die Auslegungsvorlauftemperatur (siehe Abbildung 9). Die Berechnung des Strombedarfs und der JAZ der WP erfolgt unter Berücksichtigung eines Carnot-Gütegrads von 0,35 und berücksichtigt damit implizit Speicher- und Leitungsverluste. Nur die Fälle, die eine Vorlauftemperatur von unter 75 °C

ermöglichen, werden als kompatibel mit dem WP-Betrieb angesehen, und sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 aufgeführt. Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die Verringerung des HWB mit zunehmender Qualität der Gebäudehülle und der Verwendung einer mechanischen Lüftung mit WRG zu einer Verringerung des Strombedarfs führt (wobei die nicht zu vernachlässigende Hilfsenergie für die Lüftungsanlage hier nicht aufgeführt ist). Für einige spezifische Sanierungsvarianten (d.h. für die betrachteten Fälle 8 bis 13) konnte der Strombedarf jedoch durch eine Senkung der Vorlauftemperatur und damit eine Erhöhung der JAZ um weitere 38 % gesenkt werden (siehe Abbildung 11). Es ist wichtig zu erwähnen, dass der absolute Unterschied in Bezug auf den Strombedarf zwischen den verschiedenen Fällen einer spezifischen Sanierungsvariante verringert wird, wenn der HWB reduziert wird, was das Gebäudesystem robuster gegen nicht-optimalen Betrieb (Wetter, Nutzung) macht. Für alle Sanierungsvarianten wird das Brauchwarmwasser (Wärmebedarf von $23,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NF}} \text{ a})$) durch die Luft-Wasser-WP mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 55°C erzeugt, was zu einer JAZ von 2,5 und einem Strombedarf von $9,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NF}} \text{ a})$ führt.

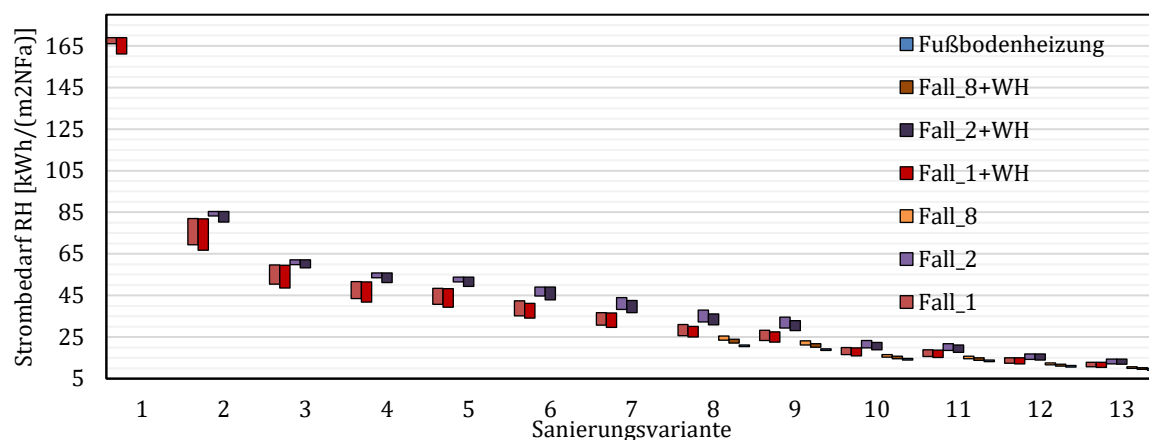


Abbildung 10: Jährlicher Strombedarf der Wärmepumpe für die Raumheizung (RH) unter Berücksichtigung der verschiedenen Sanierungsvarianten und der Vorlauftemperatur [26].

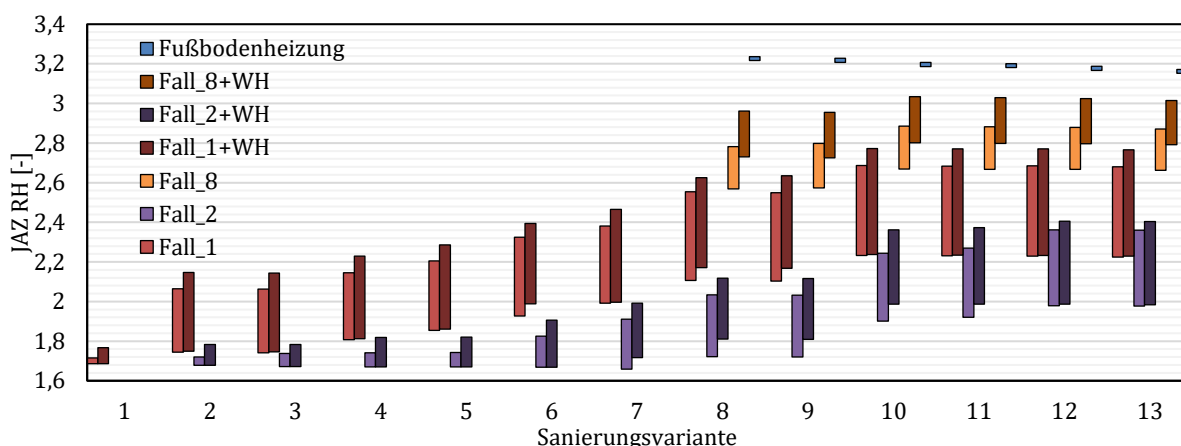


Abbildung 11: Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe für die Raumheizung unter Berücksichtigung der verschiedenen Sanierungsvarianten und der Vorlauftemperatur [26].

5.4. Bewertung der Effizienz von hydronischen Systemen

Die Studie wurde mit dem Simulationsprogramm IDA ICE (EQUA Simulation AB 2024) durchgeführt. Hier kann sowohl das Gebäude also auch die Haustechnik detailliert abgebildet werden. Mit IDA ICE

wurden zunächst Parameterstudien durchgeführt, um verschiedene Komponenten wie WP und Speicher für den jeweiligen Fall zu dimensionieren. Danach wurden die einzelnen Systemkonzepte für drei Sanierungstiefen miteinander verglichen. Hauptkriterium hierbei ist der Gesamtstromverbrauch des Systems inklusive Hilfsstromverbräuchen. Aber auch Wärmepumpen- und Systemarbeitszahlen wurden bestimmt.

5.4.1. Mustergebäude

Das Simulationsmodell des Gebäudes für diese Simulationsstudie wurde basierend auf den Geometrien des Demonstrationsgebäudes von PhaseOut in Wien aufgebaut. Auch die Wandaufbauten entsprechen etwa den Bestandsaufbauten jedoch mit einer zusätzlichen Dämmung bzw. neuen Fenstern und Türen. So wurden drei unterschiedliche Dämmstandards erzeugt. Bei der an der besten gedämmten Variante wurde zusätzlich eine Lüftungsanlage mit WRG mit einem Wirkungsgrad von 0,78 angenommen.

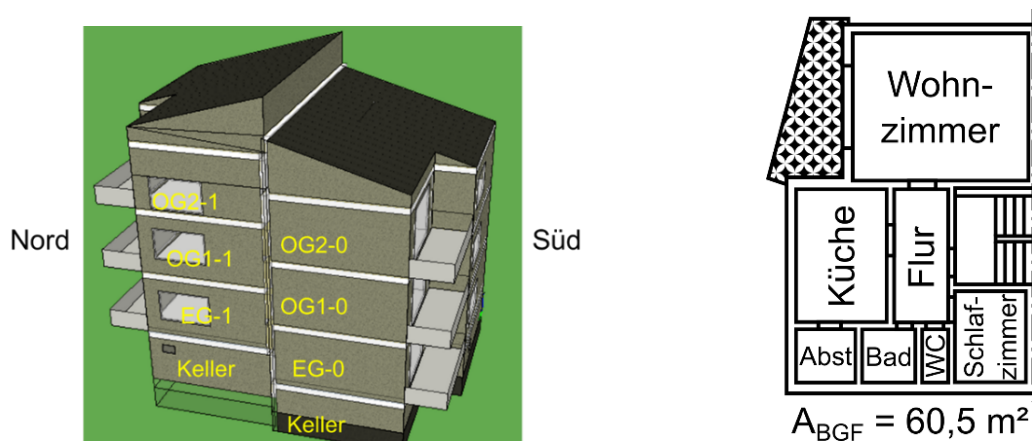


Abbildung 12: 3D Darstellung des IDA ICE Modells des Mustergebäudes (links) Grundriss von einer Wohneinheit (rechts). Quelle: Sozialbau AG.

In Abbildung 12 ist das Mustergebäude links in 3D Darstellung zu sehen, rechts ein Beispielgrundriss für 2 Wohnungen. Die sechs Wohneinheiten sind nahezu identisch. Jede Wohnung besteht im Modell aus fünf Zonen (Räumen). Der Vorraum ist unbeheizt. In allen anderen Räumen wurde eine Solltemperatur von 22°C vorgegeben. Dachgeschoß, Stiegenhaus und Keller wurden ebenfalls modelliert und als nicht beheizt angenommen.

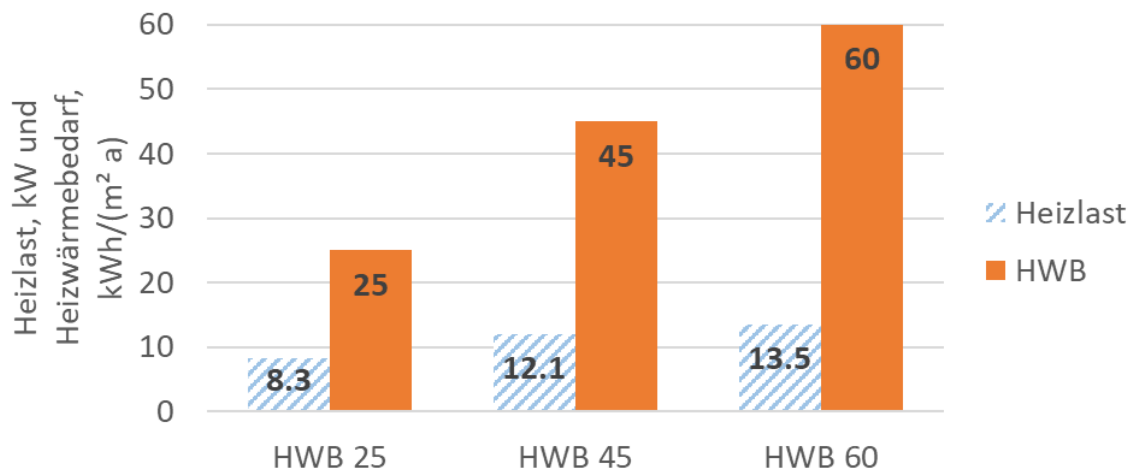


Abbildung 13: Heizwärmebedarf bei idealer Heizung (rechts) und simulierte Heizlast ohne Solareinstrahlung und interne Gewinne (links) der drei Mustergebäude.

In Abbildung 13 ist der HWB der drei Mustergebäude (ca. 25, 45 und 60 kWh/(m² a)) bei idealer Heizung dargestellt. Außerdem ist die HL der Gebäude zu sehen. Diese HL wurde vom Programm IDA ICE berechnet, in dem am kältesten Tag und ohne Sonneneinstrahlung und interne Lasten der Maximalwert bestimmt wurde. Sie liegt für die drei Gebäude bei rund 8, 12 und 13,5 kW.

Für die Simulationen wurde das Trinkwasserzapfprofil M nach EN 16147 verwendet. Da die Warmwassermenge in diesem Zapfprofil mit 5,845 kWh/d erfahrungsgemäß aber einem 4-Personen Haushalt entspricht, wurde das Zapfprofil um einen Faktor von 2,5/4 reduziert. Damit ergeben sich 3,6 kWh/Tag für jede Wohnung. Das Zapfprofil enthält zwei große Zapfungen morgens und abends und mehrere kleinere Zapfungen in der Zeit dazwischen. Für die Systeme mit zentraler Trinkwarmwasserbereitung wurde eine Gleichzeitigkeit von 2 verwendet. Das bedeutet, bei jeweils zwei Wohnungen wird gleichzeitig gezapft. Die anderen Wohnungspaare zapfen jeweils eine Stunde früher bzw. später.

5.4.2. Randbedingungen

Tabelle 4 und Tabelle 5 fassen die wichtigsten Randbedingungen für die Simulationen zusammen.

Tabelle 4: Randbedingungen abhängig vom Dämmstandard

HWB in kWh/(m² a)	25	45	60
Heizkreisvorlauftemperatur bei -10°C	45°C	50°C	55°C
Außentemperatur			
Rohrleitungsinwenddurchmesser	25 mm	32 mm	39 mm
Heizungsverteilung und zum Speicher			
Lüftung	Mit WRG 0,3 h ⁻¹	Nur Abluft 0,3 h ⁻¹	Nur Abluft 0,3 h ⁻¹
Stromverbrauch Lüftung in Wh/(m³ Whg)	0,35	0,1	0,1
Wirkungsgrad WRG	0,78	--	--

Tabelle 5: Randbedingungen unabhängig vom Dämmstandard

Wetterdaten	Meteonorm – Wien Hohe Warte
Wärmeabgabe über bestehende Heizkörper	3150 W pro Wohnung unabhängig vom Dämmstandard
Umgebungstemperatur im Keller	13°C
Umgebungstemperatur innerhalb der thermischen Hülle (Stiegenhaus)	19°C
Rohrleitungen	6 m zwischen zentraler WP und Speicher Verteilleitungen 10 m innerhalb und 10 m außerhalb der thermischen Hülle (jeweils für Vor- und Rücklauf)
Rohrleitungsverluste ⁵	5 W/(m ² K) für Heizungsverteilung und zur WP 7,5 W/(m ² K) für Warmwasserverteilung
Rohrleitungsinnendurchmesser Warmwasserverteilung	50 mm
Speicherverluste ⁶	0,55 W/(m ² K)
Stromverbrauch Umwälzpumpen (Energiesparpumpen)	Abhängig vom Durchfluss: ca. 36 W bei 1000 L/h Durchfluss, ca. 14 W bei 400 L/h Durchfluss

5.4.3. Wärmepumpenkennlinien

Für die Simulationen wurden auf Basis von Messdaten Wärmepumpenkennlinien generiert. Diese Kennlinienfelder geben die thermische Leistungsabgabe und den COP in Abhängigkeit von der Quelleneintrittstemperatur, der Wärmeabgabetemperatur und der Verdichterdrehzahl an.

Für die zentralen WP wurde ein Kennlinienfeld auf Basis von Labormessdaten der Luft/Wasser-WP ALM 4-12 vom Projektpartner iDM erstellt. Für die innerhalb des Projekts von iDM entwickelte Booster-WP wurden von iDM aufgenommene Labormesswerte zur Kennlinienerstellung herangezogen. Beide WP sind drehzahl geregelt.

Für die ebenso im Projekt vom Projektpartner Drexel und Weiss neu entwickelte TWW-WP wurden die Kennlinienfelder basierend auf Labormesswerten aus einem Vorgängerprojekt (FitNes [37]) generiert. Die TWW-WP arbeitet bei einer konstanten Drehzahl.

Diese Kennfelder wurden dann noch skaliert, um verschiedene Wärmepumpengrößen simulieren zu können. Beispielhaft sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 einige Kennlinien aus diesen Kennfeldern dargestellt.

Für die Festlegung der Nennleistung der skalierten WP wurde ein repräsentativer Arbeitspunkt (Verdampfungs-, Kondensationstemperatur und maximale Drehzahl im Betrieb) herangezogen.

⁵ Bezogen auf Rohraußenfläche innerhalb der Dämmung

⁶ Bezogen auf Speicheraußenfläche innerhalb der Dämmung

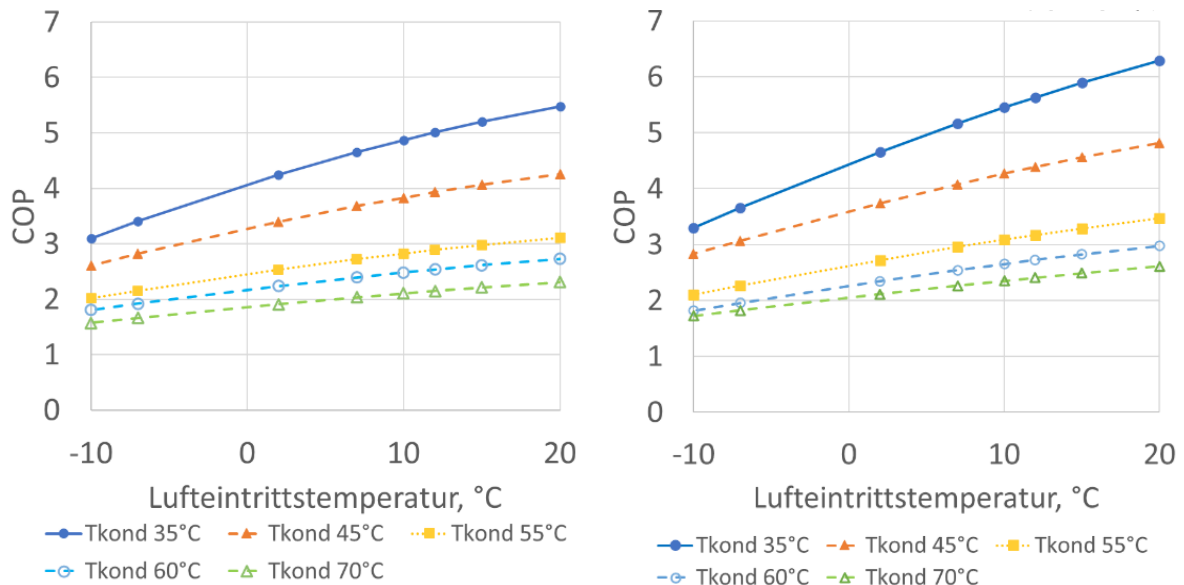


Abbildung 14: Wärmepumpenkennlinie (COP) der zentralen Luft-Wasser Wärmepumpe bei einer Kompressordrehzahl von 90 rps (links) und 30 rps (rechts).

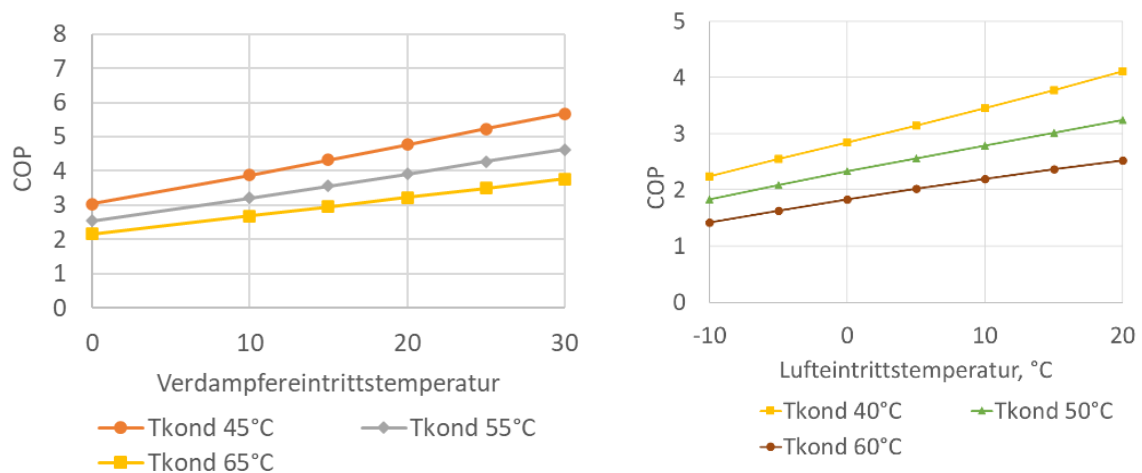


Abbildung 15: Wärmepumpenkennlinie (COP) der Boosterwärmepumpe bei einer Kompressordrehzahl von 96 rps (links) und der Trinkwasserwärmepumpe (rechts).

5.4.4. Systemvergleich

Während der Simulation wurden sämtliche Wärmemengen in den unterschiedlichen Kreisen aufgezeichnet und eine Energiebilanz erstellt.

Der wichtigste Kennwert ist der Gesamtstromverbrauch des Systems. Dieser setzt sich zusammen aus dem:

- Stromverbrauch der WP inklusive Enteisung und ggf. Ventilator
- Stromverbrauch der Nachheizung
- Hilfsstromverbrauch für Pumpen, Regelung und Lüftung

Ein wichtiger Aspekt sind die Wärmeverluste des jeweiligen Systems. Je nach System bestehen diese aus Speicherverlusten und Rohrleitungsverlusten. Der Anteil der Rohrleitungsverluste innerhalb der thermischen Hülle wurde als interne Gewinne berücksichtigt und tragen damit zur RH bei. Die Speicherverluste wurden komplett als Verluste betrachtet.

Dimensionierung der Komponenten

Bei allen Systemkonzepten wurden Parameterstudien durchgeführt, um die jeweils geeignete Kombination von Wärmepumpengrößen, Speichergrößen und ggf. weiteren Parametern zu identifizieren. Die so ermittelten Wärmepumpengrößen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ermittelte Wärmepumpenheizleistungen für alle Systemkonzepte und Dämmstands

	Referenzpunkt für WP- Heizleistung	HWB 25	HWB 45	HWB 60
Zentrales Konzept				
Zentrale WP	(A0/W45)	8 kW	10,6 kW	13,3 kW
Zentral/dezentrales Konzept				
Zentrale Heizung	(A0/W45)	5,3 kW	8 kW	10,6 kW
6 x dezentrale WW-WP	(A0/W60)	560 W	560 W	560 W
Konzept mit Booster-WP				
NT-WP	(A0/W20)	6,4 kW	9,5 kW	10,6 kW
6 x Booster WP	(W20/W45)	2,4 kW	2,4 kW	2,4 kW

Bei allen Warmwasserspeichern wurde eine Speichergröße von 500 L für zentrale Speicher und von 100 L für dezentrale Speicher festgelegt. Kleinere Speicher führen zwar zu etwas geringeren Stromverbräuchen. Um aber einen Mindestkomfort gewährleisten zu können (z.B. Zapfungen außerhalb des Zeitrahmens des Zapfprofils oder etwas größere Zapfungen) wurden diese Werte gewählt. Der Einfluss der Pufferspeicher auf niedrigem Temperaturniveau (Heizungspuffer oder Niedertemperaturpuffer für das Booster-Konzept) war relativ gering. Hier wurden für die Simulationen jeweils 1000 L angenommen.

Beim semizentralen Systemkonzept stellt sich die Frage, welches Niedertemperaturniveau zum niedrigsten Gesamtstromverbrauch des Systems führt. Das Niedertemperaturniveau beeinflusst stark die Arbeitszahlen der beiden WP. Dies ist in Abbildung 16 dargestellt. Bei höherem Niedertemperaturniveau arbeitet die Booster-WP effizienter, die Niedertemperatur-WP dagegen weniger effizient. Der Einfluss auf die Booster-WP ist hierbei größer. Im Sommer liefert die Simulation hier für die niedrigen Niedertemperaturniveaus sehr hohe Werte (fast bis 10). Ob dies in der Praxis auch erreicht werden kann, soll das Monitoring der Demonstrationsgebäude in diesem Projekt zeigen.

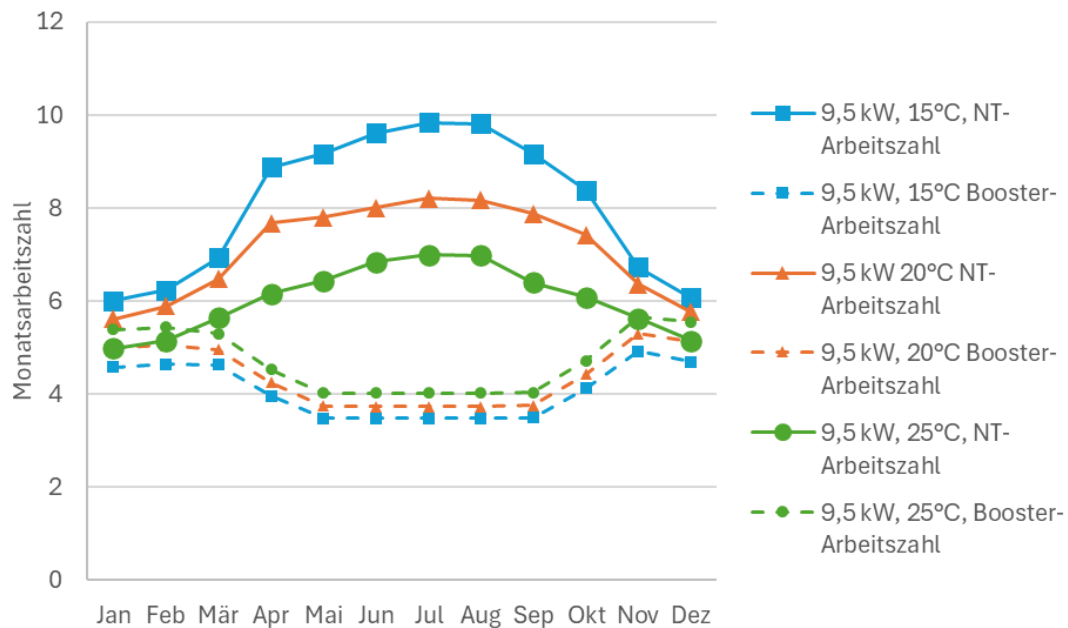


Abbildung 16: WP-Arbeitszahlen des Booster-Konzepts für das Gebäude HWB 45 kWh/(m² a) für verschiedene Niedertemperaturniveaus (Boosterwärmepumpe: 2,4 kW (W20/W45), NT-Wärmepumpe: 9,5 kW (A0/W45)).

Für die weiteren Analysen wurde ein Niedertemperaturniveau von 20°C ausgewählt. Auch hier muss noch gezeigt werden, ob dies im Sommer bei hohen Außentemperaturen realistisch ist. Gegebenenfalls sollte das Niedertemperaturniveau je nach Jahreszeit angepasst werden.

Vergleich Systemvarianten für HWB 45

In Abbildung 17 sind die Gesamtstromverbräuche aller Systemkonzepte im Vergleich mit der benötigten Nutzwärme für Heizung und TWW für das Gebäude mit HWB 45 dargestellt.

Den niedrigsten Gesamtstromverbrauch hat das semizentrale Systemkonzept. Nur geringfügig höher liegt das zentrale/dezentrale Systemkonzept mit dezentralen TWW-WP (beide Konzepte liegen bei knapp unter 30 kWh/(m² a) Gesamtstromverbrauch). Der Stromverbrauch des zentralen Konzeptes liegt mit knapp 38 kWh/(m² a) deutlich darüber. Das Systemkonzept mit dezentralen EB weist mit knapp 48 kWh/(m² a) den mit Abstand höchsten Gesamtstromverbrauch auf. Insgesamt liegen aber alle Systemkonzepte, auch das Konzept mit dezentralen EB deutlich unter dem, was mit einem konventionellen Heizungssystem zu erwarten wäre.

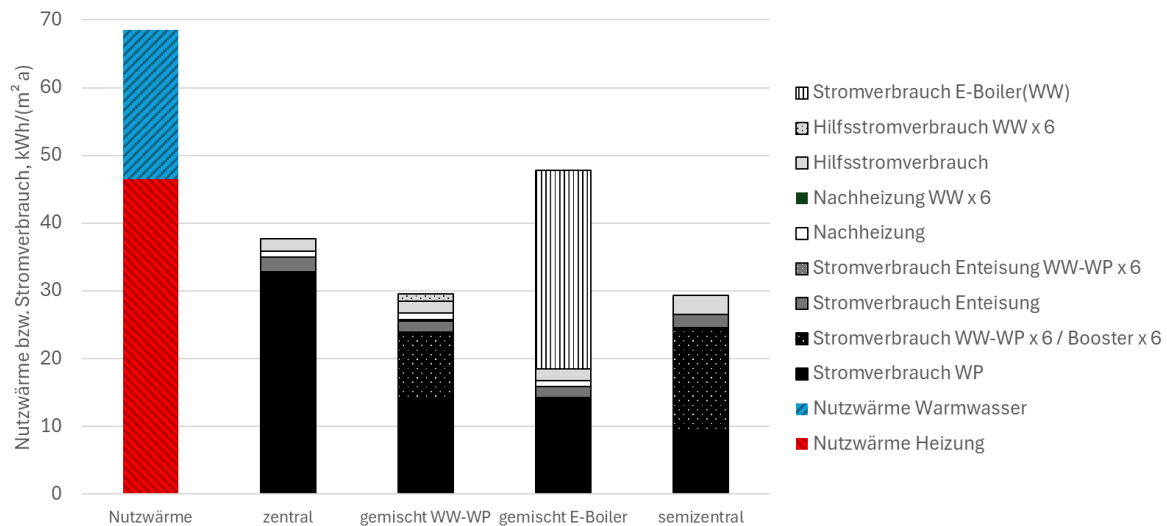


Abbildung 17: Nutzwärme und Stromverbräuche für alle vier Systemvarianten für das Gebäude mit HWB 45.

Abbildung 18 zeigt die Wärmeverluste der Systemkonzepte. Sie setzen sich aus Speicherverlusten und Rohrleitungsverlusten in den verschiedenen Kreisen zusammen. Innerhalb der Wohnungen wurden wegen der kurzen Rohrlängen keine Rohrleitungsverluste berücksichtigt.

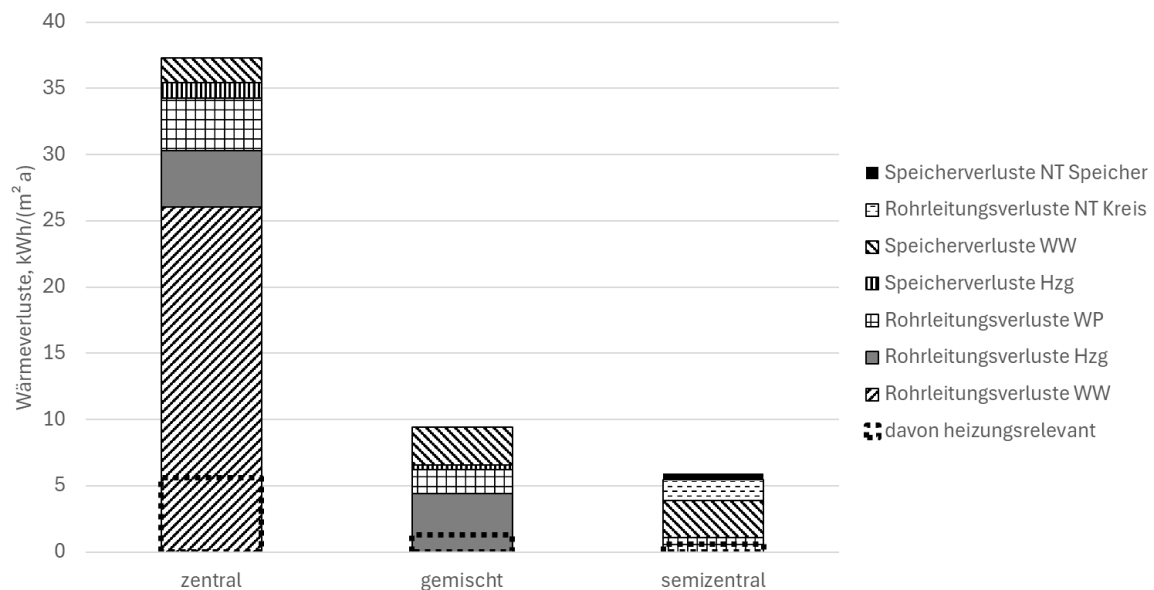


Abbildung 18: Vergleich der Wärmeverluste aller Systemkonzepte mit HWB 45.

Das zentrale System weist mit Abstand die höchsten Verluste auf. Der Großteil davon ist den Rohrleitungen für die Warmwasserverteilung geschuldet. Hier liegen die Temperaturen deutlich höher als in der Heizungsverteilung, die den Großteil des Jahres auf niedrigem Temperaturniveau betrieben wird. Nur bei sehr kalten Außentemperaturen liegen hier die Werte bei maximal 50°C. Besonders geringe Rohrleitungsverluste ergeben sich beim Systemkonzept mit Booster WP. Der Niedertemperaturverteilkreis hat eine Temperatur von 20°C und daher vernachlässigbare Verluste.

Ein Teil der Verluste findet allerdings innerhalb der thermischen Hülle statt und unterstützt die RH. Diese Verluste sind in Abb. 8 mit einem schwarz strichlierten Kasten versehen. Diese „Gutschrift“ ist beim zentralen System zwar deutlich höher als bei den anderen Systemen, trotzdem sind die Verluste insgesamt noch wesentlich höher.

Die Rohrleitungslängen wurden für diese Studie so gewählt, wie sie für das Mustergebäude realistisch wären und auch die Wärmeverluste der Rohrleitungen orientieren sich an Werten, die aus zahlreichen Monitoringprojekten bekannt sind. Es bleibt aber darauf hinzuweisen, dass die tatsächlichen Wärmeverluste je nach benötigten Längen und der Ausführung der Dämmung stark von den hier angenommenen Werten abweichen können.

Vergleich aller Dämmstandards

In Abbildung 19 sind nun die Gesamtstromverbräuche aller Konzepte und aller Dämmstandards dargestellt. Die Grafik zeigt, welche Kombination aus Systemkonzept und Sanierungstiefe insgesamt am besten abschneidet. Unter den hier gewählten Randbedingungen ist dies die Sanierung auf HWB 25 mit dem zentral/dezentralen Systemkonzept mit dezentralen TWW-WP. Trotz des höheren Hilfsstromverbrauchs vor allem wegen der benötigten Lüftungsanlage mit WRG liegt der Gesamtstromverbrauch 16% unter dem des Dämmstandards HWB 45.

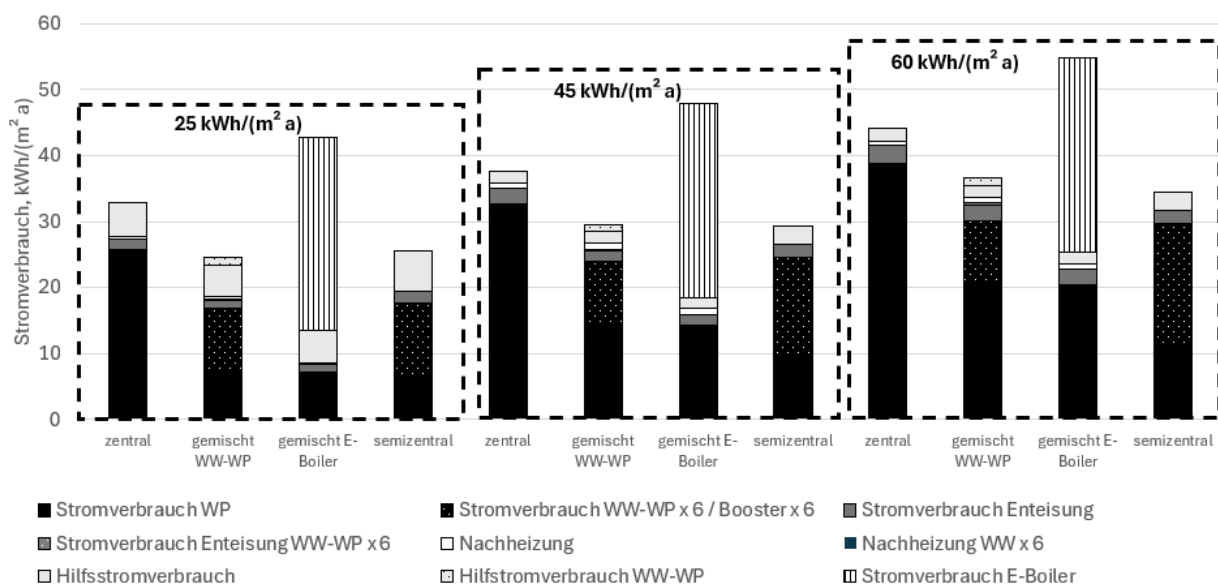


Abbildung 19: Gesamtstromverbräuche der Systemkonzepte für alle Dämmstandards

5.5. Innovative Sanierungstechnologien

5.5.1. Netto-Null-Sanierung

Das Projekt PhaseOut beinhaltet die Entwicklung und Umsetzung von innovativen Wärmepumpen- und Fassaden-Technologien für die minimalinvasive serielle Sanierung und den Heizungstausch sowie die Umsetzung eines Sanierungsprojekts inklusive Umstieg von fossiler auf wärmepumpenbasierte Heizung und Integration von PV. Damit ist es ein sehr großes und ambitioniertes Projekt mit hoher Relevanz für die Umsetzung der Klimaschutzziele Österreichs. Ein wichtiger Schwerpunkt für die Umsetzung ist die Mieter*innen-Begleitung vor, während und nach der Umsetzung.

Das ausgewählte Demonstrationsprojekt „Linzerstrasse“ in Wien der Sozialbau AG bietet einige Vorteile, insbesondere die Möglichkeit an sieben baugleichen Gebäuden (siehe Abbildung 20) verschiedene Lösungen parallel zu testen. Allerdings stellen einige Randbedingungen eine große Herausforderung dar, wie z.B. die sehr inhomogene Situation bezüglich Bestandsheizung und Wärmeabgabesystem.



Abbildung 20. Demoprojekt in der Linzerstrasse, Wien; Lage der sieben Gebäude. Quelle: Google Maps.

Zunächst wurden nach der Bestandsaufnahme verschiedenste Varianten von Sanierungsmaßnahmen mit dem PHPP geplant und gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass eine Teilsanierung der Gebäudehülle alleine nicht ausreicht um den HWB und damit die HL soweit abzusenken, dass mit den bestehenden Heizkörpern ausreichend geringe Vorlauftemperaturen möglich sind. Hohe Vorlauftemperaturen von ca. 70 °C sind zwar mittlerweile mit einigen WP (z.B. R290 Monoblock) möglich, aber nur mit rel. geringer Effizienz ($COP < 2$) und mit entsprechend hoher Leistung und damit großer Baugröße und relativ hohen Schallemissionen.

Andererseits zeigt sich, dass die hochwertige thermische Sanierung der Gebäude und der Umstieg auf eine wärmepumpenbasierte Heizung so geringe Verbräuche ermöglichen, dass durch die Integration von PV eine (jahresbilanzielle) Netto-Null Sanierung erreicht werden kann. Dafür ist ein sehr guter thermischer Standard (HWB ca. 30 kWh/(m² a)) sowie eine große PV-Anlage (Südfassade und Süddach) notwendig. Um diesen Standard zu erreichen, ist geplant die Ost-, sowie die Süd- und Nordfassade mit Fertigteilfassadenelemente in Holzkonstruktion mit neuen Fenstern zu sanieren sowie die Loggien mit Fassadenelementen zu versehen (Ostfassade: vollständig, Süd- und Nordfassade: teilweise), während die Westfassade mit einem Standard-Wärmedämmverbundsystem saniert wird. Die Stiegen 3 und 4 erhalten ausschließlich ein Wärmedämmverbundsystem. Eine fassadenintegrierte wohnungsweise Lüftung mit WRG sorgt für eine weitere Reduktion des HWB und der HL sowie für garantierte Raumluftqualität und Feuchteschutz auch mit den neuen dichten Fenstern.

5.5.2. Booster-WP

In den ersten Monaten des Projekts wurden die Wohnungen des Use-Case-Gebäudes Linzer Straße analysiert und anhand des Anwendungsfalls Anforderungen an eine derartige WP definiert: Der Warmwasserbedarf eines 2-3 Personen-Haushalts sollte gedeckt sein, eine HL von 2-3 kW geleistet werden können. Die WP sollte mit natürlichem Kältemittel R290 gefüllt sein, davon nicht mehr als 150 g, um komplizierte und teure Sicherheitskonzepte zu vermeiden. Der Schallpegel sollte im Bereich eines Kühlschranks liegen, also im Normheizlast-Fall die 42 dB(A) nicht überschreiten. Das Gerät sollte alles beinhalten, was für die Beheizung eines Raumes unbedingt nötig ist. Eine wesentliche Herausforderung bei der Konzeption des Gerätes stellte die Platzierung im heterogenen Bestand dar (sh. , I.). In enger Diskussion mit den Projektpartnern fiel die Wahl auf ein abgesetztes Konzept von WP und separatem Speicher. Die Platzierung der WP wurde an der Decke vorgesehen (sh. , r.).



Abbildung 21: Platzangebot für Wärmepumpen in den Wohnungen (linke drei), beispielhafte Platzierung anhand eines Prototyps (rechts). Quelle: UIBK / iDM.

Im Zuge der Entwicklung wurden im Zeitraum von Februar 2022 bis Juli 2025 mehrere Prototypenstadien durchlaufen. Der erste Prototyp (TRL3-4) mit Fokus auf Funktion des Kältekreis und Reduktion der Kältemittel-Füllmenge wurde im ersten Halbjahr 2024 am Prüfstand bei iDM getestet. Nach mehreren Iterationsschleifen (u.a. Test verschiedener Verdichter) wurde eine Leistung von bis zu 6 kW erreicht, bei Vorlauftemperaturen bis 70 °C und einer Füllmenge deutlich unter 150 g. Beim zweiten Prototyp (TRL5) wurde der Fokus auf die Integrierbarkeit der Komponenten auf den durch örtliche Gegebenheiten begrenzten Bauraum gelegt. Durch intensive Konstruktionsarbeit wurden Abmessungen von 835x460x460 mm (BxHxT) erreicht, die eine Montage sogar über Türen ermöglichen. Bei einem dritten Prototyp (TRL 7) wurden Verbesserungen in den Schallemissionen durch zweistufige Entkoppelung von Kälteteil, Hydraulik und Gehäuse erreicht und Details wie Montierbarkeit und thermische Entkoppelung zur Vermeidung von Kondensat verbessert.

Entwicklungsergebnis ist eine kompakte Wohnungs-WP für Decken- oder Wandmontage. Mit einem zusätzlichen Speicher für WW, der an der Stelle der ursprünglichen Gasetagenheizung verbaut wird, kann diese WP WW- und Heizwärmeversorgung für Wohnungen mit 2-4 Bewohnern und einer Größe von 60-120 m² bereitstellen. Der SCOP für Wasser-Wasser-Anwendungen (Niedertemperatur und mittleres Klima) beträgt 6,58. Das alles auf einem Bauraum von knapp 0,15 m³, mit einer Füllmenge von weniger als 150 g des natürlichen Kältemittels R290, niedrigen Schallemissionswerten und mit allen notwendigen Komponenten bereits verbaut. Die WP ist für verschiedene Quellenanwendungen von -5 °C bis 25 °C geeignet.

5.5.3. Kompakte TWW-WP

Die von Drexel-und-Weiß entwickelte TWW-WP besteht aus einer fassadenintegrierten Verdampfereinheit und einer innenliegenden Verdichtereinheit inkl. aller Hydraulikelemente und Wandspeicher mit elektrischer Zusatzheizung für Notbetrieb, siehe Abbildung 22 und Abbildung 23. Die WP bringt eine Heizleistung von ca. 1.5 kW (A7/W50), der Speicher bietet einen Inhalt von 110 Liter WW. Sämtliche Hydraulikkomponenten (Umwälzpumpe, Befüll- und Spüleinrichtung, Sicherheitsventil, Ausdehnungsgefäß) sind bereits integriert. Der Kunststofffront für die Außereinheit ist in allen RAL-Farben lackierbar. Es wurde im Wesentlichen auf Handhabe bei der Montage großen Wert gelegt, da die Komponenten der Split-Wärmepumpe (fassadenintegrierte Verdampfereinheit und Verdichtereinheit mit Hydraulik) vor Ort miteinander kältetechnisch verbunden und mit dem Kältemittel Propan befüllt werden müssen. Da Hartlöten, das übliche Verfahren bei der Verbindung von Kältemittelleitungen, auf Grund der Anordnung der Verdampfereinheit in der Fassade nur bedingt möglich ist, musste ein Verfahren gesucht werden, welches einerseits für das Kältemittel R290 zugelassen, andererseits auch in einer erschwerten Montageposition (Zugänglichkeit über die Fassade)

anwendbar ist. Dies wurde in einer lötfreien rein mechanischen Rohrverbindung gefunden, welche eine dauerhafte hermetische Dichtheit garantiert. Diese Rohrverbindung kann mit einem Hand-Presswerkzeug oder Akku-Presswerkzeug bei Temperaturen zwischen 0° und +30°C hergestellt werden. Ein weiterer Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der Wärmepumpe war die Schallisolierung der innenliegenden Verdichtereinheit, die gute Wartbarkeit vor allem der außenliegenden Komponenten, sowie die Regelung der Komplettanlage. Die technischen Daten der WP sind in der Tabelle 7 ersichtlich.

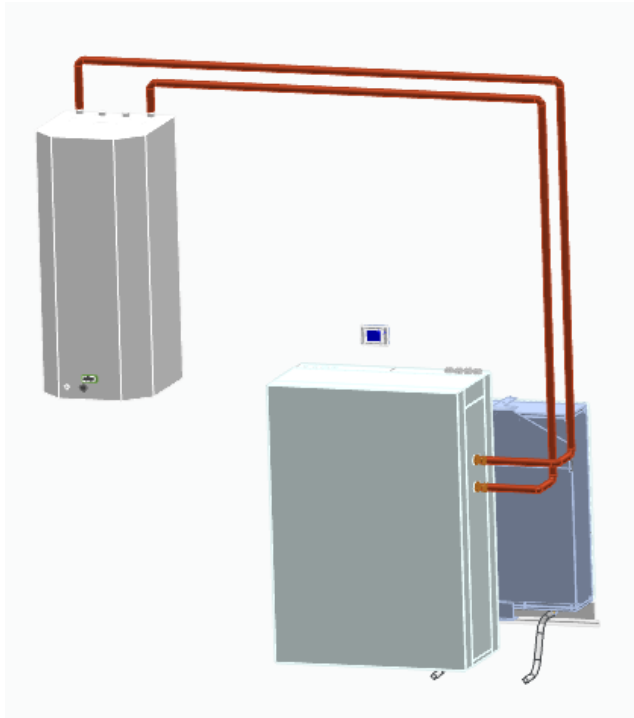


Abbildung 22. Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit Speicher. Quelle: Drexel und Weiß.



Abbildung 23. Fassadenintegrierte Verdampfereinheit. Quelle: Drexel und Weiß.

Tabelle 7. Technische Daten der entwickelten kompakten Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.
Quelle: Drexel und Weiß.

Technische Daten	TWW-WP
Netzversorgung	230 VAC / 50 Hz
Empfohlene Vorsicherung	16 A
Leistungsaufnahme der Wärmepumpe	475 W
Thermische Leistung der Wärmepumpe	ca. 1500 W
Maximale Leistungsaufnahme Elektroheizstab	1000 W
Luftmenge	150 - 400 m ³ /h
Kältemittel	R290
Kältemittelmenge	<150 g

Inhalt Warmwasserspeicher	110 l
Nennbetriebsbedingungen bei Außenluft (A7/W50):	
Nennluftmenge	350 m ³ /h
COP	ca. 2,7
Betriebsstrom der Wärmepumpe	2,5 A
Akustische Daten:	
Schallleistungspegel fassadenintegrierte Verdampfereinheit	max. 45 dB(A)
Allgemeine Daten:	
Gewicht fassadenintegrierte Verdampfereinheit	30 kg
Abmessungen Außeneinheit B/T/H mm	630/230/800
Gewicht Verdichtereinheit mit Hydraulik (leer)	90 kg
Abmessungen Inneneinheit B/T/H mm	800/1130/407
Gewicht Speicher (leer)	71 kg
Abmessungen Speicher B/T/H mm	461/1112/461

5.5.4. Fassadenintegrierte Lüftung

Die Lüftung der sanierten Wohnungen erfolgt über ein Komfortlüftungsgerät (genannt „Aerosilent Alpha“, siehe Abbildung 24), das von Drexel und Weiß entwickelt wurde. Das Gerät ist mit einer integrierten elektrischen Frostschutzheizung sowie einem Grobstaubfilter in der Abluft und einem Feinstaubfilter in der AL ausgestattet.

Das „Alpha“ ist ein kompaktes Komfortlüftungsgerät mit sehr effizientem Gegenstrom-Enthalpie-Wärmetauscher für die WRG für bis zu 125 m³/h. Das Gerät ist für die Fassadenintegration konzipiert. Dank der integrierten Abtropfwanne ist keine Kondensatleitung erforderlich. Die Kunststofffront ist in allen RAL-Farben lackierbar. Die Lüftungsgeräte bieten grundsätzlich die Möglichkeit einer automatischen Luftmengenregelung über CO₂-Sensor, welche in Abhängigkeit der Luftqualität in den Räumen die Lüfterstufe hoch oder nieder fährt. Um den Eingriff in die bestehenden Wohnungen aber minimal zu halten kommt an Stelle einer CO₂-Regelung ein Zeitprogramm für die Lüfterstufen zum Einsatz, welche zu eingestellten Zeitpunkten auf die hinterlegte Lüfterstufe regelt. Unabhängig davon kann aber vom Nutzer auf eine abweichend gewünschte Lüfterstufe geschaltet werden. Die technischen Daten des Lüftungsgeräts sind in Tabelle 8 aufgeführt.



Abbildung 24. Komfortlüftungsgerät aerosilent alpha. Quelle: Drexel und Weiß.

Tabelle 8. Technische Daten des Lüftungsgeräts Aerosilent Alpha. Quelle: Drexel und Weiß.

Technische Daten	alpha
Netzversorgung	230 VAC / 50 Hz
Empfohlene Vorsicherung	13 A
Nennluftmenge	80 m ³ /h
Maximale Luftmenge bei 169 Pa extern	125 m ³ /h
Maximale Luftmenge bei 100 Pa extern	140 m ³ /h
Zuluftseitiger Wärmebereitstellungsgrad (EN 13141)	84 %
Feuchterückgewinnungsgrad (EN 13141)	48 %
Stromeffizienz nach PHI	0,29 Wh/m ³
Maximale Leistungsaufnahme der Ventilatoren (total)	75 W
Maximale Leistungsaufnahme der elektrischen Vorwärmung	1000 W
Frostfreihaltung	elektrisch
Akustische Daten bei Nennluftmenge und 100 Pa extern:	

Gehäuse (Schalldruckpegel nach PHI)	44 dB(A)
Zuluftanschluss (Mündungsreflexion berücksichtigt)	50 dB(A)
Abluftanschluss (Mündungsreflexion berücksichtigt)	57 dB(A)
Allgemeine Daten:	
Gewicht	40 kg
Abmessungen B/T/H mm	630/230/800
Energieeffizienzklasse, örtlich bedarfsgeregt	A+
Energieeffizienzklasse, andere Regelungsoptionen	A

5.5.5. Modulare Fassade

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Phase Out“ wurde eine innovative, hinterlüftete Fertigteilfassade mit integrierter Lüftung sowie Luft-Wasser WP entwickelt.

Sanierungsumfang:

- 5 Ostfassaden, 1 Südfassade
- Umsetzung mittels vorgefertigter Holzfertigteilwände als vorgesetzte, hinterlüftete Fassade
- Weitere Fassadenflächen mit Vollwärmeschutzsystem
- Integration von Lüftungsgeräten auch in den gedämmten Ostfassaden

Fassadensystem

System: Hinterlüftete Holzfertigteilfassade

Vorfertigung: Werkseitig produziert

Bekleidung: Faserzementplatten

Gesamtfläche Holzfertigteilfassade: ca. 900 m²

Zusätzliche PV-Fassade: ca. 14 m²

Die Elemente werden vollständig im Werk vorgefertigt und ermöglichen eine effiziente, qualitätsgesicherte Montage vor Ort.

Integrierte Gebäudetechnik

Die entwickelte Systemfassade kombiniert:

- Dezentrale Lüftungsgeräte
- Luft-WP
- Außen zugängliche Wartungs- und Montagebereiche
- Eine besondere planerische Herausforderung war die Sicherstellung der:
- Wartungszugänglichkeit von außen
- Einhaltung bauphysikalischer Anforderungen
- Umsetzung brandschutztechnischer Vorgaben

Projektbeteiligung **Kulmer Holz-Leimbau GesmbH**

- Technische Werkplanung Fertigteilfassaden
- Fachliche Abstimmung
- Fertigung der Holzfertigteilfassaden



Abbildung 25. Prototyp Holzfertigteilfassade mit integrierter Lüftung und Luft-Wasser Wärmepumpe.

Quelle: Kulmer Holz-Leimbau GesmbH.



Abbildung 26. Serienproduktion der werksseitig produzierten Fertigteilfassaden.

Quelle: Kulmer Holz-Leimbau GesmbH.

5.6. Umsetzung und Monitoring

5.6.1. Konzept

Im Projekt PhaseOut werden mehrere verschiedene technische Lösungen für die thermische Sanierung im Geschoßwohnbau und den Austausch von Gasetagenheizungen (und anderen fossilen bzw. nicht-erneuerbaren Heizungssystemen) durch Wärmepumpensysteme entwickelt, optimiert, demonstriert und evaluiert. Sowohl durch die NutzerInneneinbindung als auch durch eine wissenschaftliche Begleitung von der Konzeption über die Planung bis hin zum Betrieb (Monitoring) der unterschiedlichen Varianten kann herausgearbeitet werden, welche Variante am effizientesten in Bezug auf die Energieeinsparung, Investitionskosten, Betriebskosten, Erreichung der Klimaschutzziele und unter Berücksichtigung der technischen und nicht-technischen Randbedingungen ist. Ziel ist es, eine technische System-Lösung (in Vorbereitung für einen one-stop-shop) zu identifizieren, mit der die Sanierungsrate vor allem im Geschoßwohnbau in Österreich erheblich gesteigert werden kann, um damit das Ziel des Phaseouts von Öl- und Gasheizungen zu unterstützen. Deswegen werden in einem multidisziplinären Projektteam in diesem Projekt Wärmepumpensysteme, Vorfertigung und Fassadeintegration mit innovativen Technologien kombiniert. Das Projekt ermöglicht das Schließen von Wissenslücken und Verbreitung des wachsenden Know-hows für zukunftsfähige Sanierung. Umsetzungsbeispiele mit hoher Effizienz können hier als Vorbild dienen. Daher adressiert das Projekt die allgemeinen Themen „nachhaltiges Energiesystem“, „Reduktion der Klimawirkung“ und generell die Leitthemen Energie und Dekarbonisierung.

Durch das Projekt können auch innovative, noch nicht in dieser Form auf dem Markt erhältliche Lösungen eingesetzt und ganzheitlich (messtechnisch, ökonomisch, ökologisch) evaluiert werden. Die erarbeiteten und erfolgreich getesteten Lösungen haben durch das Projekt eine Leuchtturmfunktion, die die breite Umsetzung solcher Lösungen beschleunigen kann.

Die umfangreiche Beteiligung der wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Partner bezüglich der thermischen Sanierung, der Energieplanung, der kostengünstigen Umsetzung und der Kommunikation und Dissemination ermöglicht weitreichendere Kooperationen auch für zukünftige Projekte und leistet auch einen wesentlichen Beitrag zum Innovationslabor RENOWAVE.at.

5.6.2. Gebäude 1

In Gebäude 1 wird ein semizentrales Wärmepumpensystem mit zwei zentralen R290-Luft/Wasser-WP für die Versorgung eines Niedrigtemperatur-Verteilkreises und dezentralen wohnungsweisen Booster-WP für die WW- und Heizwärmeversorgung installiert. Dadurch können die Verteilverluste für Heizung und WW minimiert werden. Die WP werden von iDM bereitgestellt, bei den dezentralen Wohnungswärmepumpen handelt es sich um im Projekt entwickelte Prototypen. Jede zentrale WP hat eine maximale Heizleistung von 8 kW, eine Nennheizleistung von 3,5 kW bei A2W35 und einen COP von 4,6 bei den gleichen Bedingungen. Der nominale Schallleistungspegel des Außengeräts entspricht laut Datenblatt des Herstellers 46 dB(A). Die dezentrale Booster WP hat eine modulierende Heizleistung von 1-6 kW. Der SCOP nach EN 14511 für Wasser-Wasser-Anwendungen (Niedertemperatur und mittleres Klima) beträgt 6,58. Die Versorgung der Wohnungen erfolgt über einen Niedrigtemperatur-Verteilkreis und dezentrale Erhöhung der Temperaturen, wie in der Abbildung 27 dargestellt. Im Technikraum ist ein Pufferspeicher mit 800 Litern installiert. Die Ost- und Südfassaden werden mit vorgefertigten Holzmodulen versehen, während die übrigen Fassaden ein WDVS erhalten. Darüber hinaus ist an der Südfassade PV vorgesehen.

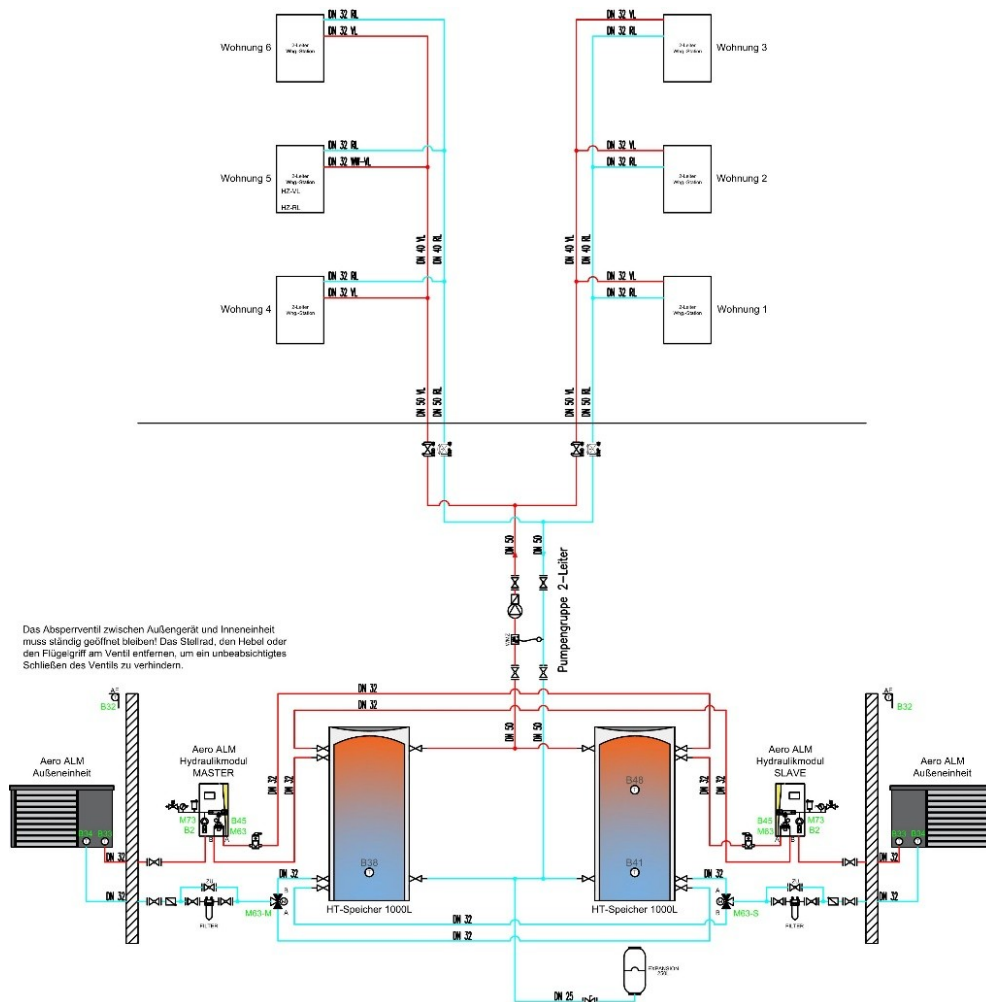


Abbildung 27: Hydraulisches Schema der semizentralen Wärmepumpenanlage mit zentralen Niedertemperatur Luft-Wasser Wärmepumpen und wohnungsweise Booster-Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.3. Gebäude 2

In Gebäude 2 wird ein dezentrales Wärmepumpensystem mit zwei zentralen R290-Luft/Wasser-WP für die RH umgesetzt. Für die Warmwasserbereitung sind zwei dezentrale fassadenintegrierte Luft/Wasser-WP für die Erdgeschosswohnungen und dezentrale EB für die übrigen Wohnungen vorgesehen. Die zentralen WP werden von iDM installiert, während die dezentralen fassadenintegrierten WP von Drexel und Weiß bereitgestellt werden. Jede zentrale WP hat eine maximale Heizleistung von 8 kW, eine Nennheizleistung von 3,5 kW bei A2W35 und einen COP von 4,6 bei den gleichen Bedingungen. Der nominale Schallleistungspegel des Außengeräts entspricht laut Datenblatt des Herstellers 46 dB(A). Die dezentrale fassadenintegrierte WP hat eine nominale Heizleistung von 1.5 kW bei A7W50 und erreicht einen COP von 2,61 bei denselben Bedingungen. Der Schallleistungspegel des fassadenintegrierten Außengeräts beträgt, bei einem Luftvolumenstrom von 350 m³/h, 39 dB(A). Die Versorgung der Wohnungen mit Heizung erfolgt über ein 2-Leiter-System mit dezentraler WüSt, wie in der Abbildung 28 dargestellt. Im Technikraum ist ein Pufferspeicher mit einer Größe von 500 Litern installiert. Die Ostfassade wird mit einer vorgefertigten Holzfassade versehen, während die übrigen Fassaden ein WDVS erhalten. Darüber hinaus ist an der Südfassade PV vorgesehen.

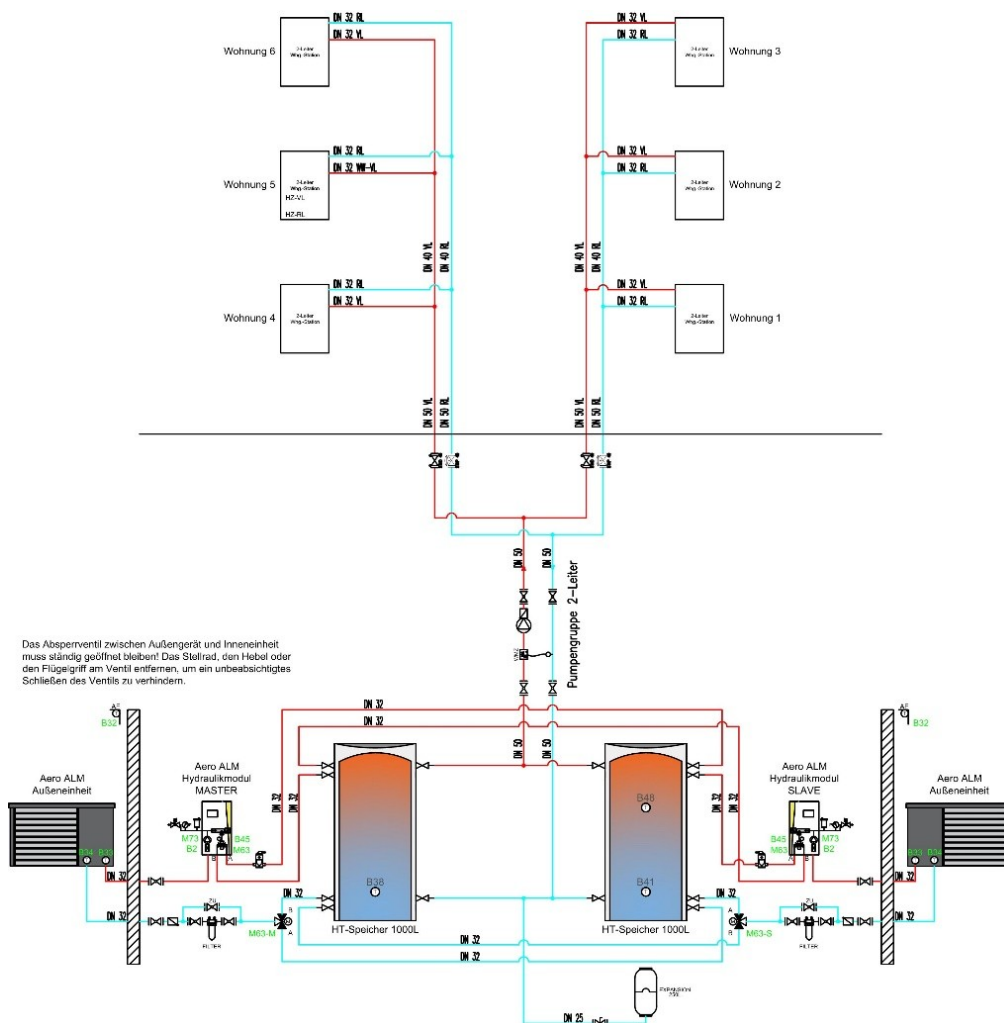


Abbildung 28: Hydraulisches Schema der gemischten Wärmepumpenanlage mit zentraler Raumheizung und wohnungsweise Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.4. Gebäude 3

In Gebäude 3 wird ein zentrales Wärmepumpensystem mit zwei R290-Luft/Wasser-WP (jeweils 8 kW Spitzenheizleistung) von iDM installiert, die den Raumheizungs- und Warmwasserbedarf der Wohnungen decken. Jede zentrale WP hat eine maximale Heizleistung von 8 kW, eine Nennheizleistung von 3,5 kW bei A2W35 und einen COP von 4,6 bei den gleichen Bedingungen. Der nominale Schallleistungspegel des Außengeräts entspricht laut Datenblatt des Herstellers 46 dB(A). Die Versorgung der Wohnungen mit Heizung und WW erfolgt über ein 4-Leiter-System mit dezentraler WüSt, wie in der Abbildung 29 dargestellt. Im Technikraum ist ein Pufferspeicher mit 500 Litern Inhalt für die Heizungsversorgung und ein Warmwasserspeicher mit einer Größe von 800 Litern installiert. Alle Fassaden erhalten ein WDVS.

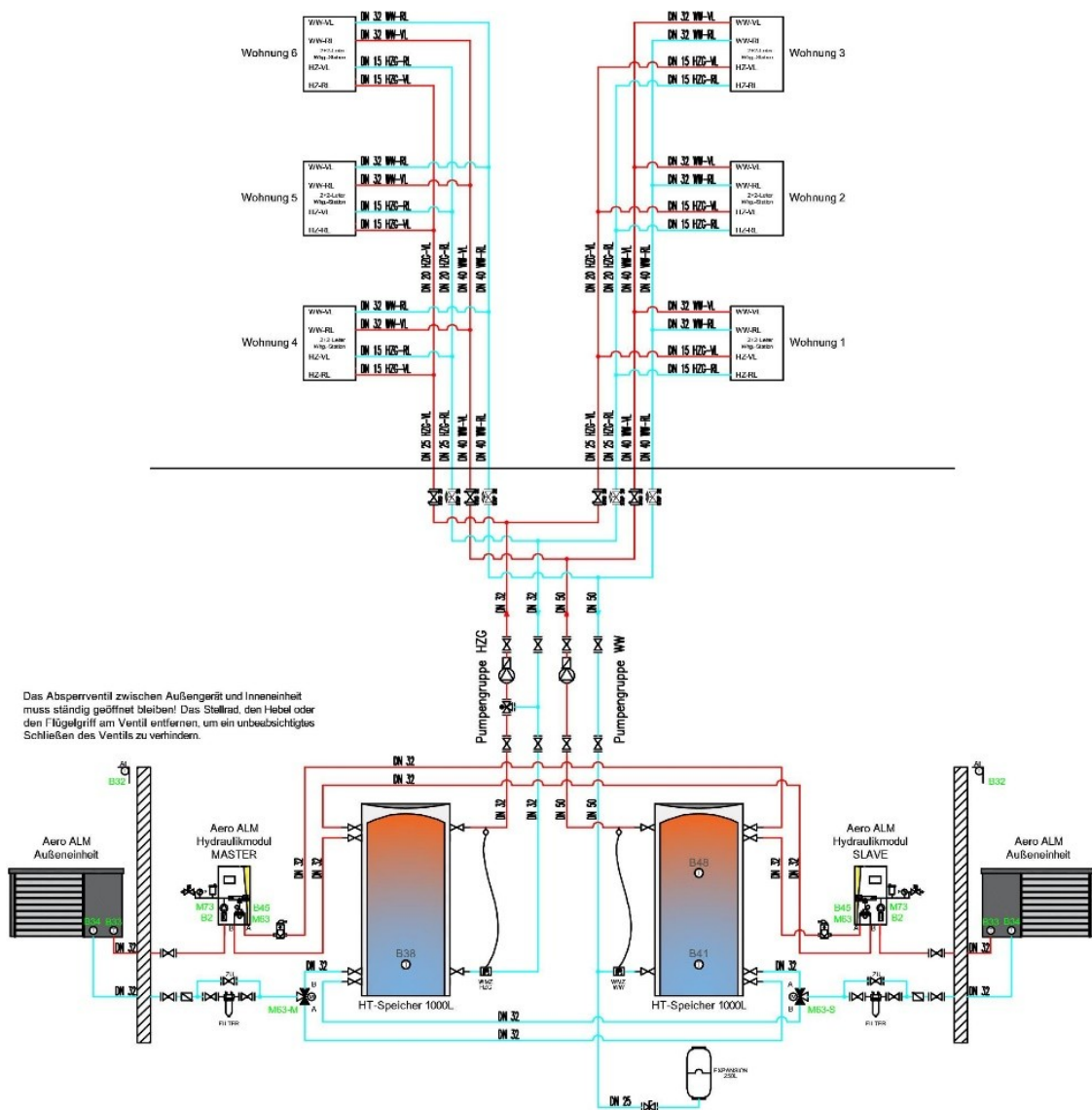


Abbildung 29: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.5. Gebäude 4

In Gebäude 4 wird ein semizentrales Wärmepumpensystem mit zentralen Luft-WP und dezentralen Booster-WP in den Wohnungen wie bei Gebäude 1 installiert. Alle Fassaden erhalten ein WDVS.

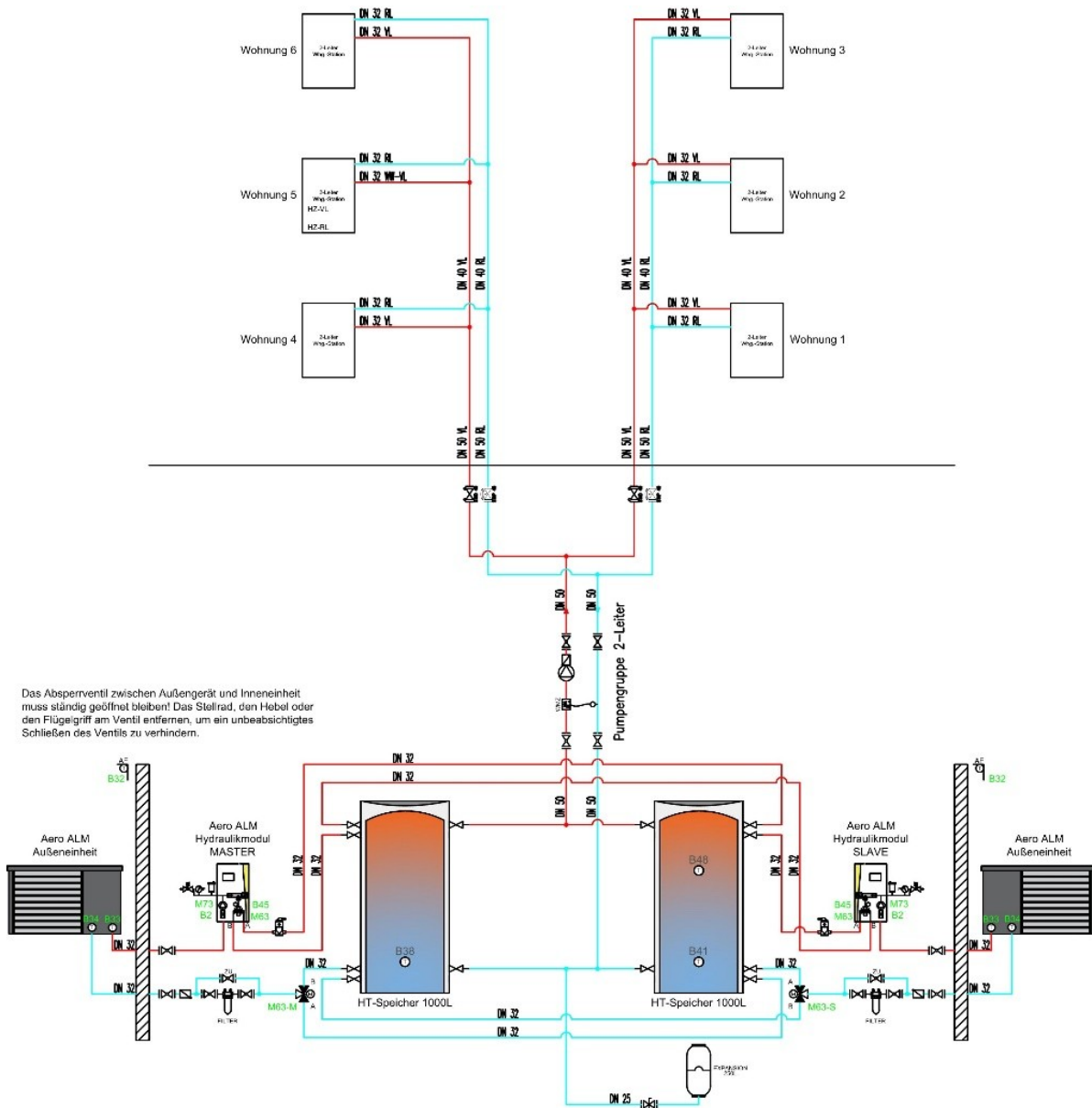


Abbildung 30: Hydraulisches Schema der semizentralen Wärmepumpenanlage mit zentralen Niedertemperatur Luft-Wasser Wärmepumpen und wohnungsweise Booster-Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.6. Gebäude 5

In Gebäude 5 wird ein zentrales Wärmepumpensystem mit zwei R290-Luft/Wasser-WP wie bei Gebäude 3 installiert. Die Ostfassade wird mit einer vorgefertigten Holzfassade versehen, während die übrigen Fassaden ein WDVS erhalten.

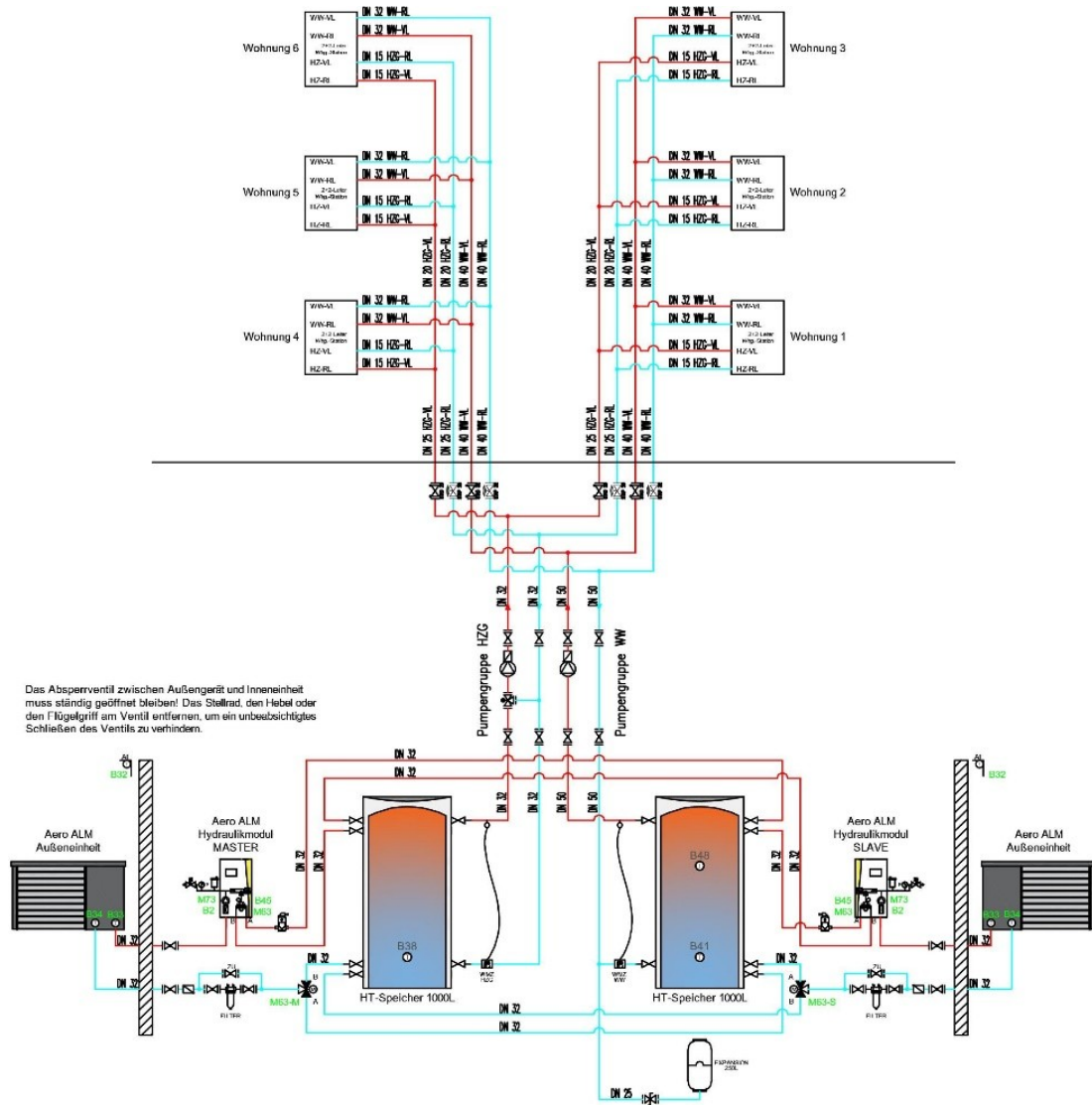


Abbildung 31: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.7. Gebäude 6

In Gebäude 6 wird ein zentrales Wärmepumpensystem wie in Gebäude 3 und 5 installiert (Abbildung 32). Die Ostfassade wird mit einer vorgefertigten Holzfassade versehen, während die übrigen Fassaden ein WDVS erhalten. Aufgrund der Verschattung durch die benachbarte Vegetation ist an diesem Gebäude keine Fassaden-PV vorgesehen.

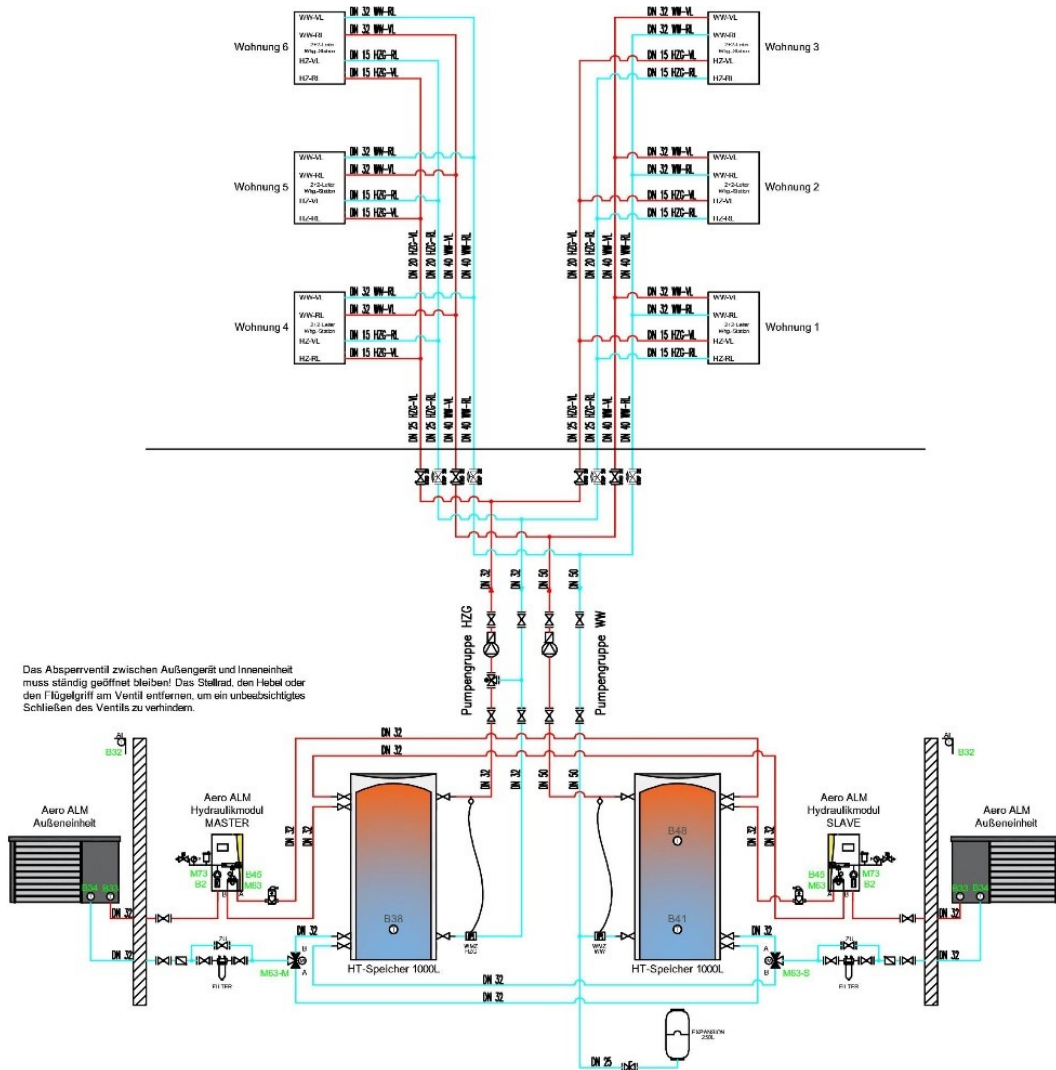


Abbildung 32: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.8. Gebäude 7

In Gebäude 7 wird ein dezentrales Wärmepumpensystem mit zwei zentralen R290-Luft/Wasser-WP für die Raumheizung und dezentralen EB für die Warmwasserbereitung installiert. Die zentralen WP werden von iDM installiert. Jede zentrale Wärmepumpe hat eine maximale Heizleistung von 8 kW, eine Nennheizleistung von 3,5 kW bei A2W35 und einen COP von 4,6 bei den gleichen Bedingungen. Der nominale Schallleistungspegel des Außengeräts entspricht laut Datenblatt des Herstellers 46 dB(A). Die Versorgung der Wohnungen mit Heizung erfolgt über ein 2-Leiter-System mit dezentraler WüSt, wie in der Abbildung 33 dargestellt. Im Technikraum ist ein Pufferspeicher mit einer Größe von 500 Litern installiert. Die Ostfassade wird mit einer vorgefertigten Holzfassade versehen, während die übrigen Fassaden ein WDVS erhalten. Darüber hinaus ist an der Südfassade PV vorgesehen.

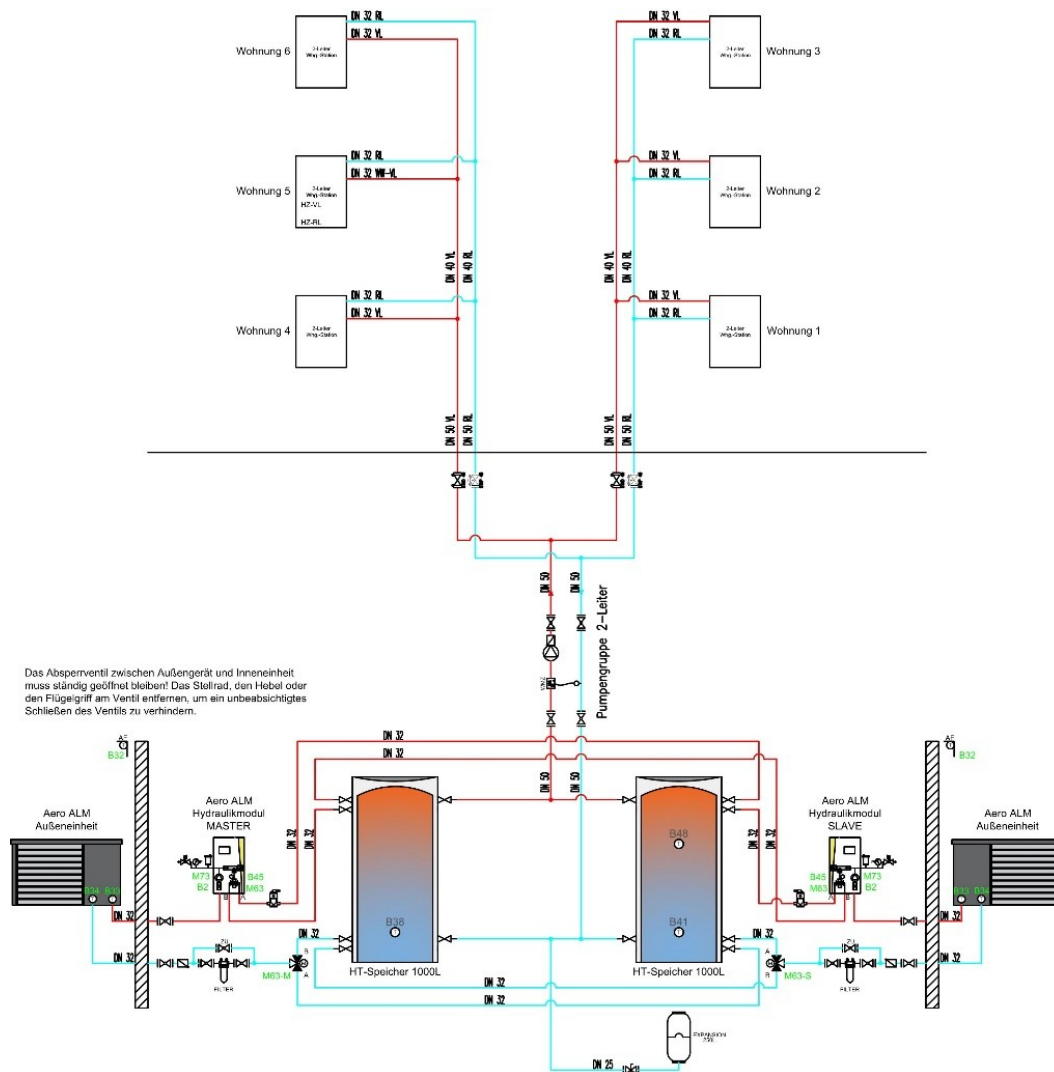


Abbildung 33: Hydraulisches Schema der gemischten Wärmepumpenanlage mit zentraler Raumheizung und wohnungsweise Warmwasserbereitung. Quelle: Klimatherm / iDM.

5.6.9. Dokumentation Umsetzung

Der Baustart erfolgte im Oktober 2025. Zu Beginn wurden die Fassaden an der Ostseite der Gebäude 1, 2, 5, 6 und 7 eingerüstet und die bestehende Wärmedämmung entfernt (siehe Abbildung 34(a) und (b)). Anschließend fanden die für die Fertigteilfassade erforderlichen Vermessungsarbeiten statt. Vor deren Montage wurden die notwendigen Leitungen für das neue Heizsystem (Elektro- und Wasserinstallationen) verlegt. Entsprechende Kernbohrungen ermöglichen nun die Durchführung der außen geführten Leitungen in die jeweiligen Wohnungen.

Im März 2026 wurden die Fertigteile der neuen Holzfassade bei den Häusern 5 und 6 montiert. Zudem wurden in zwei Leerwohnungen (Haus 2 und 3) testweise Lüftungsanlagen sowie Fenster eingebaut. Parallel dazu erfolgten auf der Gebäuderückseite die Versetzung der Wärmepumpen sowie die Führung der zugehörigen Installationsleitungen in die jeweiligen Kellergeschosse. Dort werden Betonsockel für die Wärmepumpenspeicher hergestellt und die Leitungen an die Ostfassaden angeschlossen. Auch die elektrotechnischen Installationen wurden in diesem Zuge umgesetzt.

In den kommenden Wochen ist die Montage der vorgehängten Holzfassaden an den Stiegen 1, 2 und 7 sowie der Lüftungsanlagen und des Wärmedämmverbundsystems (WDVS) an den Stiegen 3 und 4 vorgesehen. Darüber hinaus werden die Termine für den Einbau der neuen Wohnungsfenster und Pendellüfter koordiniert. Die Mieterinnen und Mieter werden über sämtliche Maßnahmen sowie erforderliche Vorbereitungsarbeiten laufend schriftlich informiert.



(a)



(b)

Abbildung 34. Ansicht der Stiege 5 während der Renovierungsarbeiten (a) und Detailansicht der Ostfassade der Stiege 5 mit vorgefertigten Holzrahmenmodulen (b). Quelle: Sozialbau AG.

5.6.10. Monitoringkonzept

Das im Projekt entwickelte Monitoringkonzept bildet die Grundlage für eine systematische und datenbasierte Bewertung der energetischen Performance sowie des Nutzer:innenkomforts in den Demonstrationsgebäuden. Ziel ist es, die im Projekt umgesetzten Energieversorgungskonzepte unter realen Betriebsbedingungen vergleichend zu analysieren und deren Effizienz, Betriebsverhalten sowie Auswirkungen auf die Innenraumqualität fundiert zu bewerten.

Im Rahmen des Projekts werden drei von insgesamt sieben Demonstrationsgebäuden detailliert messtechnisch erfasst. Dabei handelt es sich um die Gebäude Stiege 1, Stiege 2 und Stiege 3, in denen jeweils unterschiedliche Energieversorgungskonzepte umgesetzt werden:

- ein semizentrales System mit Booster-Wärmepumpen (Stiege 1),
- ein System mit zentraler Heizung und dezentraler Warmwasserbereitung (Stiege 2),
- sowie ein vollständig zentrales System für Heizung und Warmwasser (Stiege 3).

Die Auswahl dieser Gebäude erfolgte gezielt, da hier die unterschiedlichen Systemvarianten vollständig umgesetzt wurden und eine hohe Anzahl an Wohneinheiten tatsächlich an die jeweiligen Systeme angeschlossen ist. Dadurch wird eine belastbare Vergleichbarkeit der Konzepte gewährleistet. Das Monitoring basiert auf einer umfassenden und hochaufgelösten Datenerfassung, die sowohl energetische als auch komfortrelevante Parameter umfasst. Die Messdaten werden über eine Vielzahl von Sensoren und Zählern erfasst, in Datenloggern zusammengeführt, auf Plausibilität geprüft und anschließend in einer zentralen Datenbank gespeichert. Die Datenerfassung erfolgt typischerweise in Intervallen von 5 bis 15 Minuten, wodurch sowohl kurzfristige Betriebszustände als auch langfristige Entwicklungen analysiert werden können.

Ein wesentliches Merkmal des Monitoringkonzepts ist die durchgängige Erfassung der Energieflüsse entlang der gesamten Versorgungskette – von der Energieerzeugung über die Verteilung bis hin zur Nutzung in den einzelnen Wohneinheiten. Ergänzend dazu werden raumklimatische Parameter erfasst, um den Einfluss der technischen Systeme auf den Nutzerkomfort zu bewerten. Besonders hervorzuheben ist, dass die Innenraumsensorik bereits vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen installiert wurde, wodurch ein Vorher-Nachher-Vergleich ermöglicht wird.

Die erhobenen Daten dienen nicht nur der Bewertung der Systemperformance, sondern auch der Identifikation von Optimierungspotenzialen im Anlagenbetrieb. Durch die kontinuierliche Analyse können Abweichungen vom Sollzustand erkannt und gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und des Komforts abgeleitet werden. Darüber hinaus bilden die Ergebnisse die Grundlage für die Ableitung von Empfehlungen für zukünftige Sanierungsprojekte.

Erfasste Messgrößen

Im Rahmen des Monitoringkonzepts werden folgende zentrale Parameter und Systemgrößen erfasst:

1. Klimadaten (Außenbedingungen):

- Außenlufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft
- Globale Sonneneinstrahlung (horizontal)
- Windgeschwindigkeit

2. Elektrischer Energiebedarf:

- Stromverbrauch der Wärmepumpen
- Stromverbrauch für Haustechnik (Pumpen, Lüftung etc.)
- Stromverbrauch dezentraler Systeme (z. B. Boiler, Booster-Wärmepumpen)

3. Wärmepumpensysteme:

- Elektrischer Energieinput

- Thermischer Output (Wärmemengen)
- Leistungsdaten und Betriebszustände
- Temperaturwerte (Vorlauf, Rücklauf, Speicher, Luft)
- Betriebsmodi und Statusinformationen
- Bestimmung des zeitlich aufgelösten COP

4. Wärmeverteilungssysteme:

- Wärmemengen und Leistungen im Verteilnetz
- Vor- und Rücklauftemperaturen
- Volumenströme
- Netzverluste
- Vergleich von Verteilverlusten und Systemeffizienz

5. Warmwasserbereitung:

- Energiebedarf und Leistung der Warmwasserbereitung
- Vergleich unterschiedlicher Warmwasserkonzepte (zentral/dezentral)
- Warmwasserverbräuche und Durchflussmengen

6. Photovoltaik:

- Stromproduktion der PV-Anlagen

7. Wohnungsbezogene Energieverbräuche:

- Heizenergie pro Wohneinheit
- Warmwasserenergie pro Wohneinheit
- Wasserverbrauch

8. Komfortparameter in Innenräumen:

- Raumlufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- CO₂-Konzentration

5.7. Sanierungsprozess und Nutzerinneneinbindung

5.7.1. Zielsetzung

Sanierungen im bewohnten Mehrwohnungsbau sind nicht nur Bauprojekte, sondern Veränderungsprozesse für Menschen, die in ihrem Zuhause bleiben. Neben der technischen Qualität entscheidet deshalb die Akzeptanz der Bewohnerinnen und Bewohner maßgeblich über einen reibungslosen Ablauf und den langfristigen Erfolg. Eine professionelle Nutzer*inneneinbindung schafft Orientierung, baut Vertrauen auf und reduziert Unsicherheiten. Gleichzeitig erleichtert sie die

Koordination während der Bauphase und stellt sicher, dass neue Haustechnik nach Fertigstellung richtig genutzt wird – eine Voraussetzung dafür, dass Komfort- und Einsparziele tatsächlich erreicht werden.

5.7.2. Grundhaltung und Leitlinien

Erfolgreiche Kommunikation ist wertschätzend, verständlich und verlässlich. Entscheidend ist, dass Information frühzeitig erfolgt und nicht erst dann, wenn Termine schon fixiert sind oder Einschränkungen unmittelbar bevorstehen. Transparenz bedeutet dabei nicht, alles bis ins letzte Detail zu erklären, sondern ehrlich darzustellen, was gemacht wird, warum es gemacht wird und was das im Alltag bedeutet – inklusive Belastungen. Viele Konflikte entstehen weniger durch Baumaßnahmen als durch widersprüchliche Aussagen, Gerüchte oder gefühlten Kontrollverlust. Daher braucht es eine abgestimmte Kommunikationslinie im Projektteam so-wie eine niedrigschwellige Erreichbarkeit, idealerweise über eine klar benannte Ansprechperson.

5.7.3. Kernbotschaften, die verständlich vermittelt werden sollten

Inhaltlich bewähren sich Botschaften, die unmittelbar an den Alltag anschließen.

- Dazu gehört erstens die wirtschaftliche Perspektive, wie Investitionen und Betriebskosten zusammenhängen und warum Effizienz langfristig stabilisieren kann.
- Zweitens spielt Versorgungssicherheit eine große Rolle, insbesondere wenn fossile Energieträger reduziert oder ersetzt werden und Preisschwankungen weniger durchschlagen.
- Drittens zählt Wohnqualität: besserer Komfort, weniger Zugluft, modernere Systeme und ein insgesamt „ruhigeres“ Wohnen sind für viele Menschen greifbarer als technische Kennzahlen.
- Und schließlich muss auch die Belastung ehrlich eingeordnet werden – inklusive der Maßnahmen, die getroffen werden, um Bauzeit, Staub und Lärm zu begrenzen und den Verbleib in der Wohnung zu ermöglichen.

5.7.4. Planungsleitfaden

Vor der Sanierung

Bevor Bewohner*innen informiert werden, muss intern Klarheit hergestellt werden. In der Praxis heißt das: Zuständigkeiten und Entscheidungswege müssen definiert, Kernbotschaften abgestimmt und Kommunikationswege festgelegt werden. Besonders hilfreich ist ein gemeinsamer Fragen-Antworten-Katalog, der typische kritische Themen vorwegnimmt und sicher-stellt, dass Hausverwaltung, Bauleitung und ausführende Firmen konsistent kommunizieren.

Die erste Information an Bewohner*innen sollte Orientierung geben:

- Was sind Anlass und Ziele?
- Welche Verbesserungen sind zu erwarten?
- Welche Schritte kommen ungefähr wann?
- Was bedeutet das voraussichtlich im Alltag?

Wichtig ist, von Anfang an einen Ton zu setzen, der nicht „verkündet“, sondern erklärt und zuhört. Informationsveranstaltungen oder Hausgespräche sind dafür geeignet, weil sie Raum für Fragen schaffen und zeigen, dass Sorgen als normaler Teil des Prozesses verstanden werden.

Eine strukturierte Erhebung der Bewohner*innenperspektive ist mehr als „nice to have“: Sie liefert Hinweise, die Planungs- und Ablaufqualität verbessern können, und stärkt das Gefühl, ernst genommen zu werden. Das kann über Fragebögen, Gespräche oder Begehungen passieren. Besonders bei Umrüstungen von Heizungs- oder Warmwassersystemen lohnt sich außerdem eine sorgfältige Bestandsaufnahme in den Wohnungen, weil Bestandsrealität (Gerätestandorte, Einbauten, Platzverhältnisse) häufig stärker über Aufwand und Terminrisiken entscheidet als die Technik auf dem Papier.

Startklar vor Baubeginn:

- Zuständigkeiten, Entscheidungswege und Eskalationspfad festlegen
- Kernbotschaften formulieren (Nutzen, Belastungen, Zeitrahmen, Kostenlogik)
- FAQ mit abgestimmten Antworten erstellen (alle Beteiligten nutzen dieselbe Linie)
- Kommunikationskanäle und Taktung definieren (Aushang, Brief, Mail, Sprechstunde etc.)
- Bewohner*innen-Feedback strukturieren (Fragebogen/Begehung) und in Planung rückkoppeln

Während der Sanierung

In der Bauphase wird Kommunikation zu operativer Projektarbeit. Bewohner*innen sind nicht bloß „Betroffene“, sondern Teil der Prozesskette, weil Zugänge organisiert, Termine eingehalten und Vorbereitungen in Wohnungen ermöglicht werden müssen. Das gelingt besser, wenn Termine rechtzeitig angekündigt, Zeitfenster realistisch gesetzt und Abläufe verständlich erklärt werden. Je konkreter die Information, desto eher entsteht Kooperation.

Eine feste, erreichbare Ansprechperson wirkt in der Praxis oft stärker als jede Broschüre. Sie reduziert Reibung, weil Fragen, Beschwerden und Unsicherheiten nicht „ins Leere“ laufen. Entscheidend ist Kontinuität: Wer zuständig ist, muss klar sein – und diese Person muss auch in Stressphasen sichtbar bleiben.

Regelmäßige kurze Updates helfen, die Situation für Bewohner*innen kalkulierbar zu machen. Gerade wenn es Änderungen oder Verzögerungen gibt, ist offene Kommunikation de-eskalierend. Auch Visualisierungen (einfache Skizzen, Vorher-Nachher, Ablaufgrafiken) sind sehr hilfreich, weil sie komplexe technische Maßnahmen in alltagstaugliche Bilder übersetzen. Wenn unterschiedliche Maßnahmen in verschiedenen Gebäuden oder Stiegen umgesetzt werden, sollte aktiv erklärt werden, dass diese Lösungen gleichwertig sind, damit kein Ungerechtigkeitsgefühl entsteht.

Bauphase stabil führen:

- Terminankündigungen frühzeitig, konkret und verständlich (Was/Wann/Wo/Wie lange)
- Eine feste Ansprechperson benennen (mit Erreichbarkeit und Vertretung)
- Regelmäßige Updates etablieren, auch bei Planänderungen
- Belastungen aktiv managen (Lärm/Staub/Wegeführung) und Maßnahmen erklären
- Visualisierungen/kurze Erklärformate nutzen, um Missverständnisse zu reduzieren

Nach der Sanierung

Nach Fertigstellung beginnt die Phase, die oft unterschätzt wird: die Nutzung. Was jahrzehnte-lang gewohnt war, funktioniert nach einer Sanierung häufig anders – besonders bei neuen Heizungs- oder Lüftungssystemen. Wenn Bewohner*innen nicht wissen, wie die Technik sinnvoll bedient wird, entstehen Komfortprobleme und Einsparziele werden verfehlt. Darum sollte die Einführung in die neue Haustechnik fest eingeplant werden, etwa über kurze Informationsveranstaltungen, verständliche Anleitungen oder Erklärvideos. Bei Bedarf kann eine gezielte Einzelunterstützung einzelne Haushalte entlasten.

Ebenso sinnvoll ist eine Rückmeldung nach einigen Monaten. Eine kompakte Zufriedenheitsbefragung liefert Hinweise zu Komfort, Betriebskostenwahrnehmung und Prozessqualität und zeigt zugleich, dass Erfahrungen ernst genommen werden. Ein positiver Abschluss – etwa durch eine kleine Anerkennung oder ein gemeinsames „Abschlussmoment“ – hilft außerdem, die Bauphase emotional abzuschließen und das Verhältnis zwischen Bewohner*innen und Verwaltung langfristig zu stärken.

Erfolgreicher Übergang in den Betrieb

- Einweisung in neue Haustechnik (verständlich, kurz, wiederauffindbar)
- Support in den ersten Wochen sicherstellen (Ansprechperson, Sprechstunde, Hotline)
- Nachbefragung/Feedbackschleife nach 3–6 Monaten
- Typische Anfangsprobleme systematisch sammeln und Lösungen kommunizieren
- Abschlusskommunikation: „Was wurde erreicht, wie geht’s weiter?“

5.8. Betriebs- und Volkswirtschaftliche Analyse

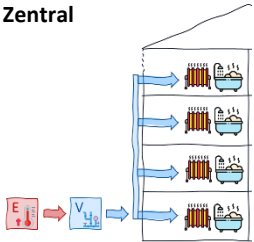
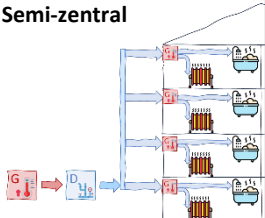
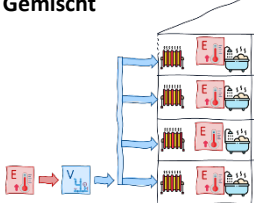
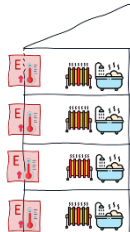
5.8.1. Betriebswirtschaftliche Analyse

Je nach Ausgangssituation der Wärmeversorgung und weiteren Einflussfaktoren sowie individuellen Vorgaben kommen unterschiedliche Systemvarianten für die Wärmebereitstellung in Frage. Im Folgenden wird ein strukturierter Überblick über zehn verschiedene Erzeugungs- und Verteilungssysteme gegeben, die zentrale, semi-zentrale, dezentrale sowie gemischte WP-Systeme bzw. elektrische Wärmeversorgungssysteme abdecken (vgl. Tabelle 9). In dieser Auswahl repräsentieren insbesondere die zentralen Varianten bzw. die Variante EB die in der Praxis aktuell am häufigsten umgesetzten Systemvarianten für mehrgeschossige Wohngebäude. Die jeweiligen Vor- und Nachteile dieser Systeme werden aufgezeigt, um ihre Eignung im Kontext der thermischen Sanierung und unter unterschiedlichen Randbedingungen besser einordnen zu können.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Gesamteffizienz dieser Systeme ist das Temperaturniveau im Wärmeverteilsystem: Höhere Temperaturen führen zu größeren Wärmeverlusten in der Verteilung und mindern insbesondere bei WP-Systemen die Effizienz der Wärmeerzeugung deutlich. Demgegenüber ist zu berücksichtigen, dass bei geringen Temperaturdifferenzen ein größerer Volumenstrom nötig ist, was einen höheren Hilfsstrombedarf zur Folge hat. Jedenfalls sind niedrige Vorlauftemperaturen bzw. möglichst geringe Temperaturhübe Voraussetzung für einen effizienteren Betrieb von WP und sind daher ein zentrales Ziel bei der Konzeption moderner Wärmeversorgungslösungen.

Das Ziel des integralen Planungsprozesses ist es, unter Berücksichtigung der Randbedingungen (d. h. Klima) und Einschränkungen (d. h. Platzverfügbarkeit, Beschränkungen der Wärmepumpengröße aufgrund von Lärmemissionen und Kältemittelmenge, wirtschaftliche Einschränkungen) des Projekts, das globale energetische und wirtschaftliche Optimum in Bezug auf die thermische Sanierung und das Wärmepumpensystem zu finden. Die optimale Lösung für die Sanierung und den Austausch des Heizsystems hängt vom spezifischen Projektziel ab und kann je nach Spezifikationen und Einschränkungen variieren. Typischerweise basiert die Optimierung entweder auf maximaler Effizienz oder minimalen CO₂-Emissionen bei gegebenen maximalen Kosten oder auf minimalen Kosten bei gegebenem Effizienz- oder CO₂-Emissionsziel. In Bezug auf den gesamten Lösungsraum gibt es suboptimale Lösungen, die nicht weiter berücksichtigt werden, und sogenannte Pareto-optimale Lösungen. Die Auswahl einer Lösung aus der Pareto-Front erfordert dann eine individuelle Gewichtung.

Tabelle 9: Auswahl zentraler, semi-zentraler, dezentraler und gemischter WP-basierter bzw. elektrischer Wärmeversorgung im Mehrgeschosswohnbau

Kategorie	Bezeichnung	Wärmepumpensystem
Zentral 	4LZ	Vierleiter-System mit Zirkulation
	2+2L FriWa	Zwei + Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungswesisen) Frischwasserstationen
	2L WüSt	Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungswesisen) Wärmeübergabestationen
	2L BF	Zweileiter-System mit dezentralen Warmwasserspeichern mit Beladefenstersteuerung
Semi-zentral 	2L BWP	Zweileiter-System mit Booster-Wärmepumpe
	2L RLWP	Zweileiter-System mit Rücklauf-Wärmepumpe
Gemischt 	2L E-Boiler	Zweileiter-System mit dezentralen Elektro-Boilern (od. elektronischen Durchlauferhitzern)
	2L WW-WP	Zweileiter-System mit dezentralen Warmwasser-WP
Dezentral 	S-WP EB	Dezentrale Split-WP für Raumheizung und Elektro-Boiler (mit DWRG)
	S-WP WW-WP	Dezentrale Split-WP für Raumheizung und dezentrale Warmwasser-WP

In diesem Abschnitt werden verschiedene „Renovierungspakete“ verglichen:

- Drei thermische Sanierungen (keine, Standardsanierung: BAU, Tiefensanierung: BEST),
- Zwei Varianten von Wärmeabgabesystemen (Bestand, Neu),

- Vier WP-Systemvarianten (4LZ, 2+2L FriWa, 2L WüSt und 2L EB) und
- Zwei Wärmepumpenquellen: Luft/Wasser-WP (EN: A/W-HP), Sole/Wasser-WP (EN: B/W-HP)

Von 48 möglichen Kombinationen werden nur die relevanten verglichen, d. h. der Fall des bestehenden Gebäudes mit vorhandenen Heizkörpern und Luft-Wasser WP wird als nicht realisierbar angesehen. Darüber hinaus werden neue Heizkörper nur dann berücksichtigt, wenn diese zu einer reduzierten Vorlauftemperatur führen. Weitere Details zum integralen Planungsablauf finden Sie unter [38] und [39].

Die thermische Gebäudehülle wird mithilfe einer Tabellenkalkulation (monatliche Energiebilanz, PHPP [40]) vorab entworfen. Auf der Grundlage dieser Sanierungsstufen werden der HWB und die HL mit einem dynamischen 1-Zonen-Wärmemodell ermittelt. Die Heizlastkurve wird mit einem stündlichen Zeitschritt nachberechnet. Auf der Grundlage des Grundrisses und des Sanierungsgrades wird der kritische Raum identifiziert und anhand der verfügbaren Informationen über die bestehenden Heizkörper oder der Annahme neuer Heizkörper (Typ, Größe) die erforderliche Vorlauftemperatur ermittelt. Die Heizkörpergleichung wird verwendet, um die erforderliche Vorlauftemperatur mit einem Heizkörperexponenten von $n = 1.4$ zu bestimmen.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{nom} \cdot \left(\frac{\Delta T_{log}}{\Delta T_{log,nom}} \right)^n \quad (6)$$

Unter Verwendung der Heizleistung (max. täglich) werden die Wärmepumpenkapazität und das Speichervolumen bestimmt.

Für eine Luft-Wasser WP oder eine Sole-Wasser WP wird eine generische Kennlinie für die Leistungszahl (COP) gemäß Tabelle 10 berücksichtigt.

Tabelle 10. Generische Kennlinie der Leistungszahl (COP) einer A/W-HP und einer B/W-HP.

HP	A/W	B/W
A-2W35 oder B-2W35	2.9	4.1
A-2W55 oder B-2W55	1.9	2.4
A7/W35 oder B7W35	3.7	5.1
A7/W55 oder B7W55	2.3	3.0

Die Heizleistung der A/W-HP steigt um ca. 2.5 % pro K und die der B/W-HP um 2 % pro K in Abhängigkeit von der Quellentemperatur. Der Einfluss der Senkentemperatur auf die Heizleistung ist nahezu vernachlässigbar: Bei der A/W-HP wird eine Verringerung der Heizleistung um ca. 7 W/K berücksichtigt; die Leistung der B/W-HP wird als unabhängig von der Senkentemperatur angenommen. Die WP wird mit einem durchschnittlichen Carnot-Leistungsfaktor von $\eta_c = 0.34$ für A/W-HP und $\eta_c = 0.47$ für B/W-HP und dem Carnot-COP basierend auf den System- (T_{max}) und Quellentemperaturen (T_{min}) modelliert.

$$COP = \eta_c \cdot \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

Für die B/W-HP wird eine konstante Quellentemperatur von 10 °C angenommen, was eine optimistische Annahme ist und davon ausgeht, dass der Erdwärmetauscher (BHX) gut dimensioniert ist und im Sommer regeneriert wird.

Die Rohrlängen und -durchmesser werden auf der Grundlage des Wärmepumpensystems und der Anzahl der Steigleitungen (hier 1) berechnet. Für die Rohrisolierung (DN100), die Speicherqualität (ErP

B), die Sollwerte (20 °C) usw. werden Standardwerte angenommen, die in einer parametrischen Analyse variiert werden können.

In [39] finden sich weitere Details zum verwendeten Modell. Die Ergebnisse des in dieser Arbeit verwendeten vereinfachten Modells wurden mit den detaillierten Simulationsergebnissen verglichen, die in [41] zu finden sind.

Es wird davon ausgegangen, dass im bestehenden Gebäude sowohl die RH als auch die Warmwasserbereitung durch einen wohnungsweisen Gas-Durchlauferhitzer mit einem Systemwirkungsgrad von 85 % erfolgt. Der Referenzfall ergibt einen Gesamtwärmebedarf von 209 kWh/(m²_{EBF} a) und CO₂-Emissionen von 43.5 kgCO₂/(m²_{EBF} a) unter Verwendung des Umrechnungsfaktors von 201 gCO₂/kWh gemäß OIB6:2023.

Es werden sowohl für Komponenten der thermischen Sanierung als auch für Komponenten der Haustechnik Kostenfunktionen verwendet. Die jährlichen Kosten werden unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Komponenten und eines Zinssatzes von $r = 3\%$ auf Basis der Annuität (AIC) (siehe Gl. (8)) mit den Anschaffungskosten (IC) und der Lebensdauer (N) der Komponenten berechnet. Details zu den Kostenfunktionen finden sich in [39]. Bei einem Gaspreis von 0.1 EUR/kWh belaufen sich die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten im Referenzfall auf 23.7 EUR/(m²_{EBF} a). Es werden durchschnittliche Stromkosten von 0.31 EUR/kWh angenommen. Die jährlichen Gesamtkosten (TAC) umfassen die jährlichen Wartungskosten (MC) und die Betriebskosten (OC) (d. h. Gas und/oder Strom):

$$AIC = \frac{IC \cdot r}{1 - (1 + r)^{-N}} \quad (8)$$

$$TAC = AIC + OC + MC \quad (9)$$

Tabelle 11 fasst die Kostenfunktionen für die Haustechnikkomponenten zusammen. Es ist wichtig anzumerken, dass insbesondere die Annahmen für die Wartung der dezentralen FriWa für das 2+2-Leiter-System und für die dezentrale Wärmeübertragungsstation (WüSt) für das 2L-System sowie für den dezentralen EB eher optimistisch sind. Darüber hinaus sind auch die Anschaffungskosten für den Erdwärmetauscher (BHX) eher niedrig angesetzt. Insgesamt hängen alle Annahmen zu den Kosten stark von der Region ab, können sich ändern und müssen individuell überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Tabelle 11. Kostenfunktionen für die Haustechnikkomponenten [39].

Komponente	Investition	Wartung	Nutzungsdauer / [a]
Heizkörper	80 €/m ² _{AT}	0	30
Pufferspeicher	20.5 €/l	0.5€/l/a	30
A/W WP	4310*P[kW _{th}] ^{0.6177} €	14 €/kW	15
B/W WP	1948.2*P[kW _{th}] ^{1.0138} €	14 €/kW	15
BHX	1000+1667 €/kW _{th}	0	40
Rohre	1.22 €/m/mm	0	30
Rohrdämmung	1.06 €/m/mm	0	30
Pumpen	0.41 €/l/S	0.006€/l/S/a	15
FriWa (Dezentral)	3250 €/System	0	30
WüSt (Dezentral)	3500 €/System	0	30
Zentrale FriWa	10000 €/System	0	30
E-Boiler	1100 €/System	0	30

Die Sanierungspakete werden in einer technisch-wirtschaftlichen Studie hinsichtlich der Reduzierung der CO₂-Emissionen (ΔCO_2) und der Differenz der Investitionskosten (EUR) und Lebenszykluskosten (Gesamtjahreskosten TAC, EUR/a) im Vergleich zum Referenzfall verglichen. Darüber hinaus werden die erforderliche Vorlauftemperatur (TF) und die erforderliche Wärmepumpenleistung sowie der SPF-Wert (Seasonal Performance Factor), der den Strombedarf der WP und alle Hilfsenergien (AUX) umfasst, bewertet.

$$SPF_{sys} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{W_{HP} + W_{AUX}} \quad (10)$$

Der Heizwärmebedarf (HD) und die HL sind in Abbildung 35 für 12 verschiedene Fälle (vom Bestandsgebäude bis zur EnerPHit-Renovierung (BEST)) sowohl für die Simulation als auch für das PHPP dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut, wobei das PHPP die HL bei schlechter Gebäudehülle unterschätzt und bei Fällen mit geringem Heizwärmebedarf leicht überschätzt. Der HD kann von ca. 135 kWh/(m² a) auf ca. 25 kWh/(m² a) reduziert werden. Die HL reduziert sich von ca. 55 W/m² auf ca. 18 W/m². Eine Vorlauftemperatur von 50 °C (als Beispiel) erfordert eine HL von ca. 32 W/m² oder weniger, d. h. eine thermische Sanierung auf ca. 68 kWh/(m² a) (gemäß PHPP, siehe auch Abbildung 36).

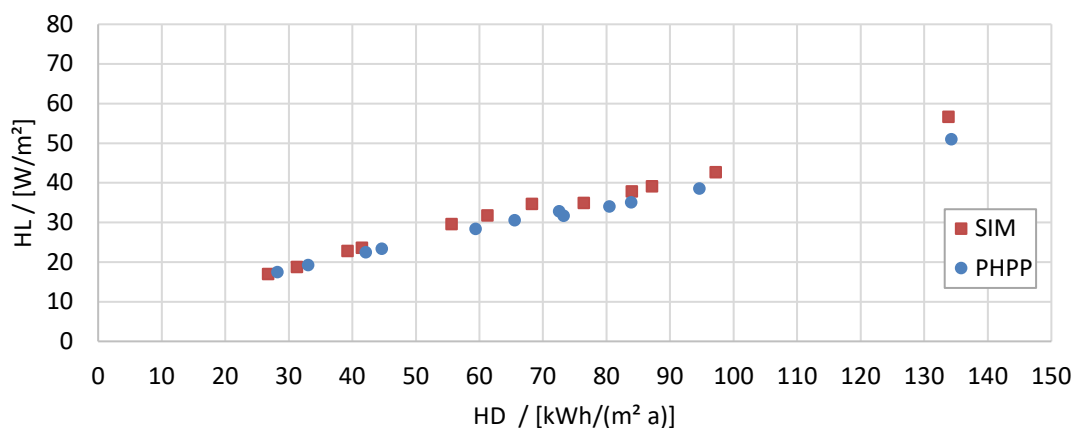


Abbildung 35. Heizlast (HL) (max. täglich) im Vergleich zum Heizbedarf (HD) für das bestehende Gebäude (vor der Renovierung) und 12 verschiedene Renovierungsschritte (20 °C SP).

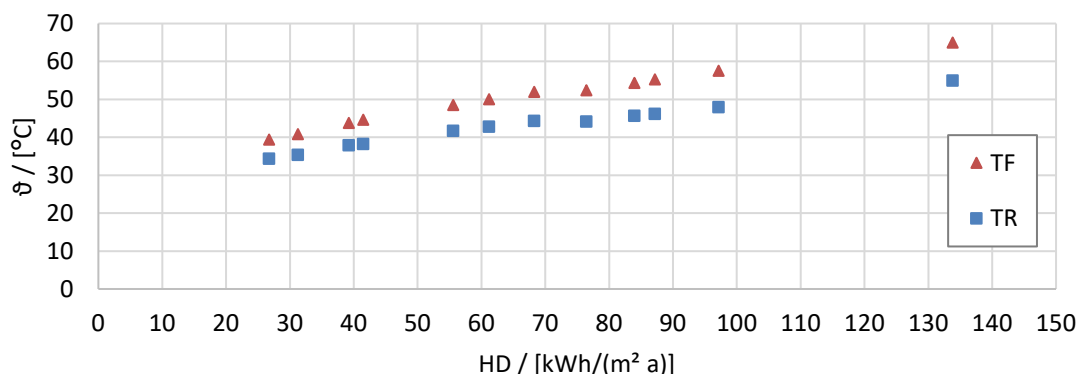


Abbildung 36. Erforderliche Vor- und Rücklauftemperatur (TF/TR) in Abhängigkeit vom HD unter der Annahme der vorhandenen Plattenheizkörper vom Typ 21 (20 °C SP).

Es ist bemerkenswert, dass die Heizlastberechnung gemäß EN 12831-1 (auch ohne Berücksichtigung der Nachheizung) deutlich höhere HL-Werte liefert: ca. 30 % für das bestehende Gebäude, 50 % für das renovierte und sogar 90 % für das tiefgreifend renovierte Gebäude, siehe auch [11]. Um eine

Überdimensionierung zu vermeiden, wird empfohlen, die maximale tägliche HL aus dynamischen Simulationen zu verwenden, wobei jedoch zu beachten ist, dass hinsichtlich der Einhaltung der Normen derzeit Diskussionen geführt werden. Für den Fall mit WW werden drei Ladefenster von jeweils 2 Stunden angenommen, was zu einer Erhöhung der erforderlichen Wärmepumpenleistung um $24/(24-6) = 1.33$ führt.

Beispielhaft wurden WP der Serie ALM (iDM, Österreich) für drei verschiedene Fälle auf Basis der simulierten HL ausgewählt und in Tabelle 12 zusammengefasst. Diese vier WP sind Monoblock-A/W-WP mit natürlichem Kältemittel (R290) und verfügen alle über eine variable Drehzahlregelung, wobei der ALM MAX 10-50 zwei separate Kältemittelkreisläufe hat. Diese WP decken eine Heizleistung unter Nennbedingungen von 8 kW (ALM 2-8), 12 kW (ALM 4-12), 15 kW (ALM 6-15), 24 kW (ALM 10-24) und 50 kW (ALM MAX 10-50) ab. Die Dimensionierung basiert auf der Leistung für einen Bivalenzpunkt bei -2 °C.

Die Leistung der WP und damit ihre Größe nimmt mit besserer thermischer Hülle deutlich ab. Die Suche nach Platz für die Installation einer WP mit großer Leistung kann an vielen Standorten eine Herausforderung sein, auch angesichts des höheren Schalldruckpegels, der einen größeren Abstand zu den Nachbarn erfordert, siehe auch Abbildung 41 unten.

Tabelle 12. Heizlast (HL), Wärmepumpenleistung, Wärmepumpentyp und -größe sowie Geräuschemissionen (Schallleistungspegel) für drei ausgewählte Gebäudequalitäten; Bivalenz bei -2 °C; *) Schallleistungspegel gemäß <https://www.produktdatenbank-get.at> und Datenblatt (iDM); **) anstelle eines ALM 10-24 sind auch zwei ALM 6-15 möglich; ***) anstelle eines ALM 4-12 sind auch zwei ALM 2-8 möglich.

	Keine Ren.	BAU	BEST
HD / [kWh/(m² a)]	133.8	68.3	26.7
HL (WP Leistung ohne WW) / [kW]	18.6	12.7	6.2
WP Leistung mit WW / [kW]	24.8	16.8	8.2
WP Typ ohne WW (mit WW)	ALM 10-24 (ALM MAX 10-50)	ALM 6-15 (ALM 10-24)**)	ALM 2-8 (ALM 4-12)***)
WP Größe ohne WW (mit WW) / [mm]	1461x1928x997 (1514x3748x1005)	1432x1575x795 (1461x1928x997)	960x1600x800 (960x1600x800)
Schallleistungspegel (nom/max) ^{*)} (mit WW) / [dB(A)]	50/55 (57/NA)	50/55 (50/55)	45/55 (51/57)

Abbildung 37 zeigt den Strombedarf für die verschiedenen Sanierungsstufen und WP-Systemkonzepte. Die Differenz der IC- und CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzfall ist in Abbildung 38 dargestellt, während Abbildung 39 die Differenz der prognostizierten jährlichen Investitionskosten (AIC) und Abbildung 40 die Differenz der jährlichen Gesamtkosten zeigt.

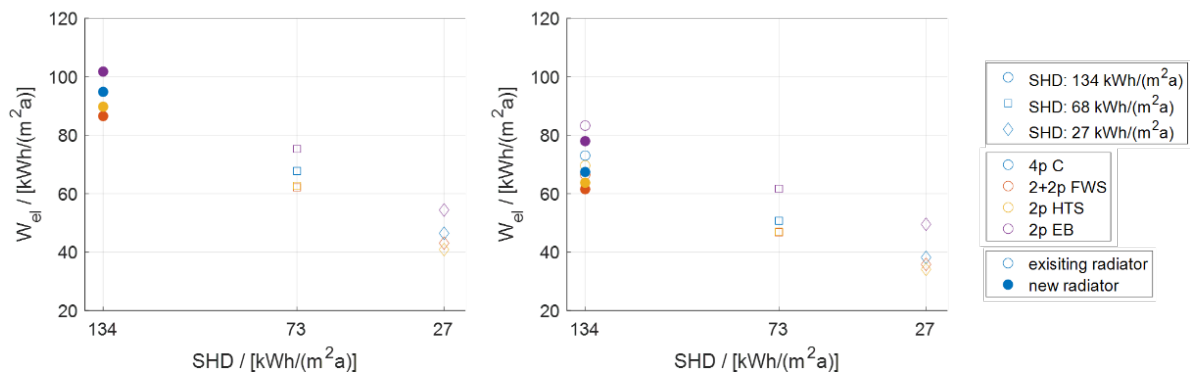


Abbildung 37. Strombedarf für die verschiedenen Renovierungsstufen und WP-Systemkonzepte (links) A/W-HP (rechts) B/W-HP. (none: 134 kWh/(m² a); BAU: 73 kWh/(m² a); BEST: 27 kWh/(m² a)).

Wichtig für die Machbarkeit einer Variante ist der erforderliche Platzbedarf für die HP (siehe Abbildung 41) und die Geräuschemissionen (insbesondere bei A/W-WP). Im nicht renovierten Fall führt die erforderliche Wärmepumpenkapazität zu einer Wärmepumpengröße und Schallabstrahlung, die in dichten bebauten Stadtvierteln nicht realisierbar wäre. Daher sind trotz der höheren Kosten thermische Sanierungen erforderlich, um den Umstieg von fossilen auf WP-basierte Heizsysteme zu ermöglichen. Wenn eine thermische Sanierung erforderlich ist, wird die tiefgreifende thermische Sanierung (BEST) empfohlen.

Tabelle 13 fasst den saisonalen Leistungsfaktor (SPF) der verschiedenen WP-Konzepte in Abhängigkeit von der Qualität des Gebäudes (Renovierungsgrad) zusammen. Der SPF des Systems ist für die Sole-WP höher als für die Luft-WP. Der SPF des Systems ist bei nicht renovierten Gebäuden (keine Ren.) höher und bei umfassenden Renovierungen (BEST) am niedrigsten, allerdings ist der Strombedarf bei BEST deutlich geringer. In Bezug auf das Wärmepumpensystem ist je nach Renovierungsfall entweder das 2+2L-System mit FriWa oder das 2L-System mit WüSt besser geeignet.

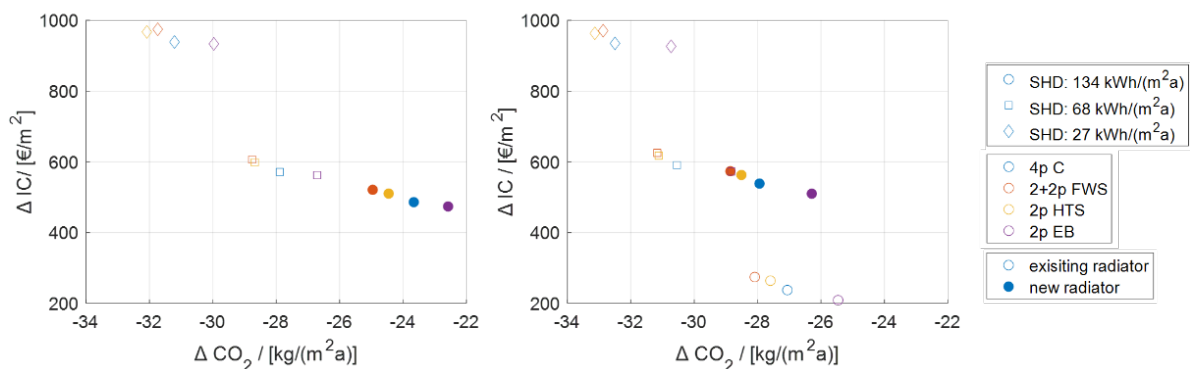


Abbildung 38. Unterschied zwischen Investitionskosten (IK) und CO₂-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 37.

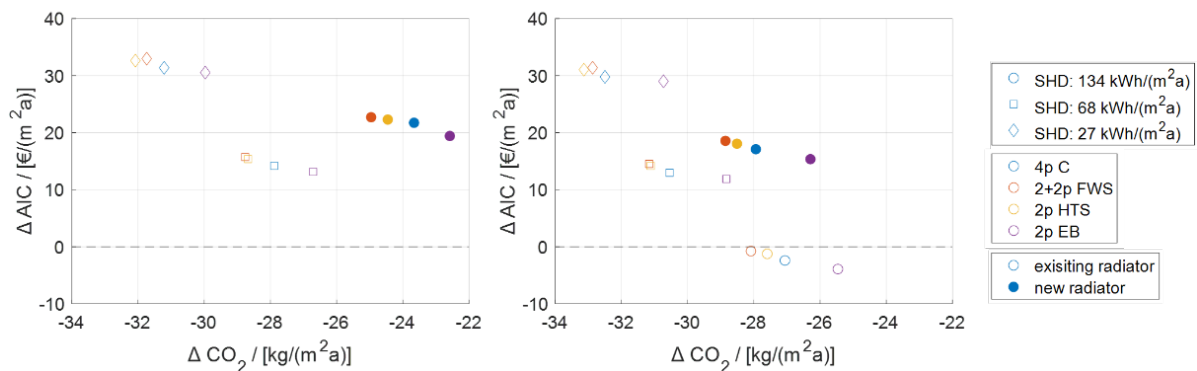


Abbildung 39. Unterschied zwischen den prognostizierten jährlichen Investitionskosten (AIC) und den CO_2 -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 37.

Der Strombedarf reicht von ca. $w_{el} = 105 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für das nicht renovierte Gebäude mit A/W-HP und EB bis unter $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für das tiefsanierte Gebäude (BEST). Im besten Fall, BEST-Gebäude mit B/W-HP mit 2p HTS (2L-WüSt) oder 2+2p FWS (2+2L-FriWa), ist der Unterschied zwischen den WP-Systemen gering und liegt innerhalb der Unsicherheit, und die Rangfolge ändert sich zwischen den Fällen „Renovierung“ und „Heizkörper“. Insgesamt ist der Einfluss des Renovierungsgrades signifikanter als die Wahl des Wärmepumpensystems, aber innerhalb eines Renovierungsgrades ist der Unterschied zwischen dem besten und dem schlechtesten Wärmepumpensystem mit einer Differenz zwischen etwa $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ und etwas mehr als $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ immer noch relevant. Erwähnenswert ist zudem, dass mit dem 2p-HTS-System keine Kühlung möglich wäre.

Die Investitionskosten für die thermische Sanierung (einschließlich Lüftung mit WRG) sind deutlich höher als die Kosten für das WP-System (für SH und DHW), selbst wenn Heizkörper ausgetauscht werden. Die Gesamtinvestitionskosten liegen zwischen etwa $240 \text{ EUR}/\text{m}^2$ und $940 \text{ EUR}/\text{m}^2$ für die 4LZ-Variante. Der Unterschied in den Gesamtinvestitionskosten zwischen BAU ($OIB f_{gee}$) und nicht renoviert ist relativ gering: Höhere Investitionen in die Gebäudehülle werden teilweise durch niedrigere WP-Systemkosten ausgeglichen. Die IC von BEST sind vor allem aufgrund der Lüftung mit Wärmerückgewinnung (MVHR) deutlich höher. Bei Betrachtung der jährlichen Gesamtinvestitionskosten (Annuität) ändert sich das Bild jedoch. Diese sind für $OIB f_{gee}$ am niedrigsten, und der Unterschied zu BEST (EnerPHit) verringert sich aufgrund der langen Lebensdauer der thermischen Hülle (Fenster und Wärmedämmung).

Die insgesamt niedrigsten TAC-Werte weist das nicht renovierte Gebäude mit den vorhandenen Heizkörpern und der B/W-HP auf. Die TAC-Werte sind im nicht renovierten Fall sogar negativ (unter optimistischen Annahmen für die B/W-HP). Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass eine B/W-HP nicht immer (d. h. überall) möglich ist und die Kosten je nach Bodenbeschaffenheit erheblich von den angenommenen Kosten abweichen können. Die jährlichen Gesamtkosten des nicht renovierten Gebäudes (nur mit Heizkörperaustausch) sind nur im Fall der B/W-HP niedriger als bei BEST, mit einer Differenz von ca. $10 \text{ EUR}/(\text{m}^2 \text{ a})$.

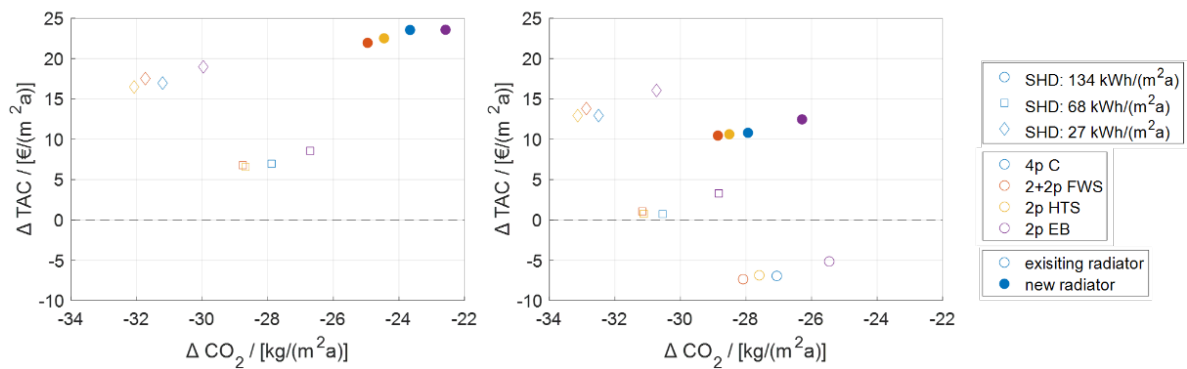


Abbildung 40. Unterschied zwischen den jährlichen Gesamtkosten (TAC) und den CO₂-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 35.

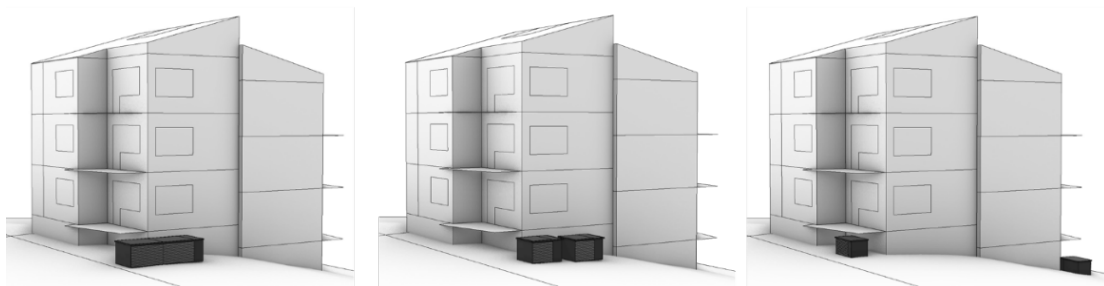


Abbildung 41. Erforderliche Größe eines A/W-HP für den Fall „nicht renoviert“ (links mit einem ALM 10-50), „BAU“ (Mitte mit zwei ALM 6-15) und „BEST“ (rechts mit zwei ALM 2-8), gemäß Tabelle 12.

Tabelle 13. System-SPF der A/W- und B/W-HP für die verschiedenen Renovierungsfälle. Der SPF für den Fall „Keine Ren.“ wird mit neuen Heizkörpern berechnet, während er für „BAU“ und „BEST“ unter Verwendung der vorhandenen Heizkörper berechnet wird.

		Keine Ren.	BAU	BEST
SPF A/W HP	4LZ	2.0	1.9	1.6
	2+2L FriWa	2.3	2.1	1.9
	2L WüSt	2.2	2.1	2.1
	2L EB	1.8	1.6	1.2
SPF B/W HP	4LZ	3.2	3.0	2.4
	2+2L FriWa	3.7	3.4	2.8
	2L WüSt	3.5	3.4	3.2
	2L EB	2.6	2.2	1.5

5.8.2. Volkswirtschaftliche Analyse

Auf europäischer Ebene (EPBD) wurden ehrgeizige Ziele für die Umsetzung von nZEB und die Integration erneuerbarer Energien vor Ort (oder in der Nähe) festgelegt. [42]. Die massive Integration erneuerbarer Energien (RE) soll zu Netto-Nullenergiegebäuden (NZEB) oder sogar zu Plusenergiegebäuden (PEB) führen. Durch die Ausweitung der Systemgrenze auf Blöcke und Stadtteile lassen sich Effizienzpotenziale der elektrischen und thermischen Energie von Nachbarschaften

erschließen, was zum Ziel von Plusenergie-Stadtteilen (Positive Energy Districts, PED) führt (IEA EBC Annex 83, IEA HPT Annex 61), siehe z. B. [43].

Im Gegensatz dazu ist angesichts der in letzter Zeit zunehmenden Notwendigkeit, fossile Heizsysteme zeitnah außer Betrieb zu nehmen, folgender Trend zu beobachten: WP und direkte Elektroheizungen (DE) in bestehenden Gebäuden (d. h. ohne thermische Sanierung) werden als offenbar kostengünstigere und schnellere Lösung eingesetzt (IEA HPT Annex 50).

Aufgrund der insgesamt begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und (Fern-)Wärme sowie der konkurrierenden Nachfrage durch Industrie und Verkehr sind jedoch eine umfassende thermische Sanierung (TR) von Gebäuden und ein rascher Ausstieg aus fossilen Heizsystemen entscheidend für die Erreichung der Gesamtklimaziele. Der Wechsel von gas- oder ölbasierten Heizsystemen zu WP ist (oft) nur in Kombination mit einer tiefgreifenden TR technisch machbar und wird im Allgemeinen nur in Kombination damit empfohlen. Es gibt jedoch sowohl technische als auch nicht-technische Hindernisse und Herausforderungen [44].

Ein rascher Ausstieg aus fossilen Heizsystemen erfordert eine deutliche Erhöhung der Austauschraten. Der Wärmebedarf von Gebäuden wird zunehmend durch WP und Fernwärme (DH) und zu einem geringeren Teil durch DE gedeckt werden. Biomasse, teilweise in Kombination mit Solarthermie, kann nur im Rahmen ihrer begrenzten Verfügbarkeit und unter Berücksichtigung des Bedarfs der Industrie und des Verkehrssektors eingesetzt werden [45]. Ein dekarbonisiertes Fernwärmesystem wird aus Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Heizwerken, großtechnischen WP und in gewissem Umfang auch aus Geothermie und Solarthermie bestehen. Daher sollte eine deutliche Ausweitung des Fernwärmenetzes und ein massiver Ausbau der WP in Betracht gezogen werden [46].

Zu den Einschränkungen zählen neben der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse für den Bausektor (angesichts der Konkurrenz durch andere energieverbrauchende Sektoren und den Anbau von Nahrungsmitteln) auch die Grenzen des wirtschaftlichen Ausbaus von Fernwärmenetzen sowie die großtechnische Produktion und Installation von WP und RE. Darüber hinaus müssen in einem solchen Übergangsprozess eine Reihe von Hindernissen/Lücken angegangen werden, wie in [44] erläutert, z.B.:

- Technische Lücke: Der Austausch von (dezentralen) Öl-, Gas- und E-Heizkesseln in Mehrfamilienhäusern erfordert Lösungen, für die derzeit keine speziellen WP-(System) Lösungen auf dem Markt verfügbar sind.
- Eigentümer-Nutzer-Lücke: Oftmals ist nicht der Gebäudeeigentümer der Nutznießer der Investition, sondern der Mieter.
- Soziale Lücke: Gemischte Wohnformen (Mieter, Eigentümerstruktur) könnten ein unüberwindbares Hindernis darstellen, wenn beispielsweise einige Parteien kürzlich Gasboiler ersetzt haben, während andere stattdessen Fenster ausgetauscht haben.
- Finanzielle Lücke: Eine Renovierung mag unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten wirtschaftlich machbar sein, erfordert jedoch sofort hohe Investitionen, die die Liquiditätsbeschränkungen übersteigen können.

Ohne Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden steigt der Strombedarf bei der Umstellung von fossilen Energien auf WP-basierte Heizsysteme. Dies würde zu einer Vergrößerung der sogenannten Winterlücke [47] in einem zukünftigen Energiesystem führen, das auf volatilen erneuerbaren Ressourcen (Wind, PV) basiert.

Im Hinblick auf die Energiewende stellt die infrastrukturelle und technologische Bindung im Bausektor angesichts der langen Lebensdauer von Gebäuden und Bauteilen einen einschränkenden Faktor dar [48]. Da Bauteile in der Regel eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben, werden

unzureichende Maßnahmen, die jetzt ergriffen werden, langfristige Auswirkungen haben [49]. Dieses sogenannte „Carbon Lock-in“ unterstreicht die Notwendigkeit eher tiefgreifender TR-Maßnahmen anstelle schneller, unvollständiger Maßnahmen. So wird beispielsweise ein neu installierter Gaskessel mit einer Lebensdauer von 20 Jahren zu einem „gestrandeten Vermögenswert“ und verhindert die Abschaffung von Gas, doch aus wirtschaftlicher Sicht ist es entscheidend, ihn vor Ablauf seiner Lebensdauer zu ersetzen. In dieser Hinsicht ist die Rolle von Gebäuden, die eine tiefgreifende TR und den Wechsel von fossilen zu wärmepumpenbasierten Heizsystemen ermöglichen, für die Erreichung der Ziele der Energiewende von vorrangiger Bedeutung und muss als eine der wichtigen Säulen der energiepolitischen Strategie angesehen werden.

In einem solchen Szenario der Energiewende werden die tiefgreifende energetische Sanierung von Gebäuden und die weitere Integration von Photovoltaikanlagen (PV) vor Ort (in Verbindung mit einer WP) im Laufe der Zeit keinen wesentlichen Einfluss auf die CO₂-Emissionen der Gebäude haben, was zu einer sinkenden Motivation führen würde, hochgesteckte Ziele auf Gebäudeebene zu erreichen. Es sind jedoch hohe Ambitionen erforderlich, um das Gesamtziel der Abkehr von fossilen Energien im Stromsystem und in Fernwärmenetzen zu erreichen.

Anhand eines einfachen Gebäudebestandsmodells werden verschiedene Szenarien für eine umfassende thermische Sanierung und die Integration von WP und erneuerbaren Energien im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen (d. h. CO₂-Emissionen) diskutiert, wobei mögliche Strategien zur Überwindung dieses Dilemmas der Energiewende aufgezeigt werden.

Das Modell stellt einen generischen Bezirk dar und analysiert den Primärenergiebedarf (P-E) und die CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung von Transport und Umwandlung für einen bestimmten Nutzenergiebedarf (U-E). Es besteht aus (von rechts nach links im Sankey-Diagramm in Abbildung 42): den Bedarf, d. h. die Nutzenergie (U-E): Raumheizung (SH), Warmwasserbereitung (DHW) sowie Geräte und Hilfsgeräte (AUX), die Heizsysteme: Brennstoffe (Öl, Gas, Biomasse), direkte Elektroheizung (DE), Wärmepumpe (HP) und Fernwärme (DH) sowie das Energiesystem, bestehend aus KWK und Fernwärmeanlagen (DHP).

Die Angebotsseite (links), die benötigte Sekundärenergie (S-E), wird durch fossile Energiequellen (Öl, Gas), Biomasse (Bio) und zu einem gewissen Grad durch erneuerbaren Strom (RE E: Wasser, Wind, PV) sowie erneuerbare Wärme und Abwärme (RE H: industrielle Abwärme, Müllverbrennung, Geothermie, Solarthermie) bereitgestellt. Stromimporte und -exporte werden nicht berücksichtigt (d. h. sie existieren entweder nicht oder sind ausgeglichen).

Anhand von Umrechnungsfaktoren (siehe Abschnitt unten) werden aus der S-E die Primärenergie (P-E) und die CO₂-Emissionen berechnet.

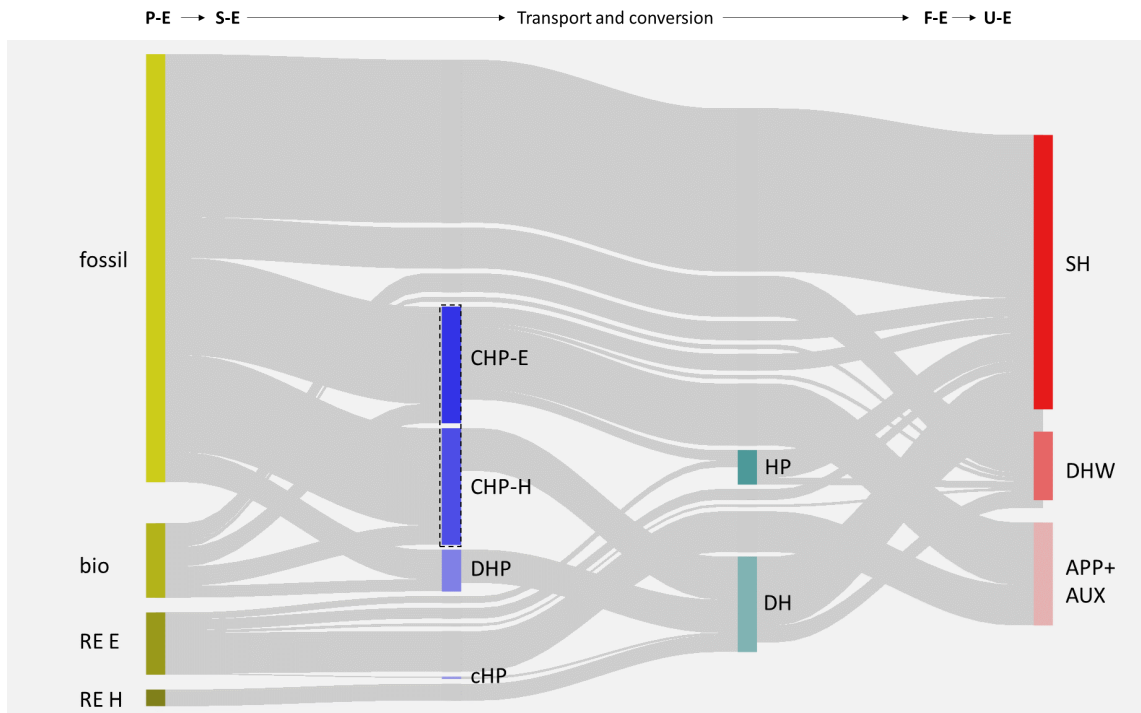


Abbildung 42. Sankey-Diagramm des Basissystems mit hohem Anteil fossiler Brennstoffe (Öl, Gas) für den direkten Einsatz in Gebäuden (Heizkessel) und für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) sowie Fernwärmanlagen (DHP) und bestehenden (ineffizienten) Gebäudebeständen mit hohem Raumheizungsbedarf (SH), Zentrale Wärmepumpen (cHP) in Fernwärmenetzen (DH) spielen ebenso wie dezentrale Wärmepumpen (HP) in Gebäuden für Raumheizung (SH) und Warmwasserbereitung (DHW) eine untergeordnete Rolle.

Das Jahr 2025 gilt als Basisjahr (Einzelheiten siehe Abschnitt unten) und das Szenario wird bis zum Jahr 2050 entwickelt. Für den Gebäudebestand (BS) und für das Energiesystem (Strom E und Fernwärme DH) werden jeweils drei Ambitionsniveaus berücksichtigt.

- Konst (= BAU)
- IMPROVE
- AMBITION

Für den Gebäudebestand bedeutet BAU keine (relevante) Reduzierung des Heizwärmebedarfs (HD), IMPROVE bedeutet eine Reduzierung von 80 kWh/(m² a) auf 55 kWh/(m² a) und AMBITION bedeutet eine Reduzierung auf 30 kWh/(m² a) bis 2050.

Für das Energiesystem bedeutet BAU einen langsamen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen (Öl, Gas) und keinen relevanten Anstieg erneuerbarer Energien im Stromsystem und in Fernwärmesystemen, IMPROVE bedeutet eine relevante Reduzierung fossiler Energien und AMBITION ein hohes Ambitionsniveau, sodass fossile Brennstoffe auf einen sehr geringen Anteil reduziert werden (direkter Umstieg von Brennstoffen auf Wärmepumpe (HP-Pfad) und Fernwärme (DH-Pfad) und indirekt in Strom (E) und Fernwärme (DH)). Dies führt zu einer massiven Ausweitung der erneuerbaren Energien (Biomasse-KWK sowie Wind- und PV) im Strommix und beinhaltet Biomasse-KWK und WP in Fernwärme.

Darüber hinaus werden zwei verschiedene Pfade definiert, einer mit Schwerpunkt auf individuellen (d. h. gebäudebezogenen) WP und einer, der von Fernwärme dominiert wird und daher einen höheren Anteil an zentralen WP umfasst. Dies führt zu insgesamt 18 Varianten, wie in Abbildung 43 dargestellt.

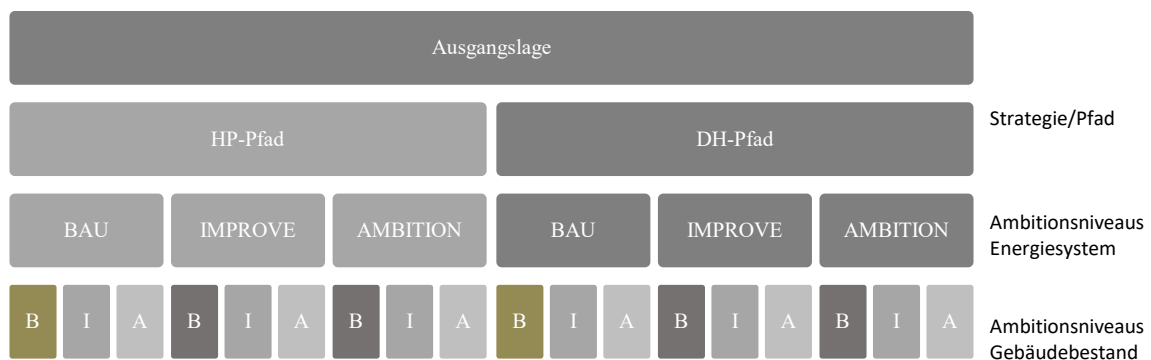


Abbildung 43. Übersicht über die Szenarien ausgehend von der Ausgangslage mit zwei verschiedenen Pfaden (individueller Stromverbrauch oder Fernwärme) und mit unterschiedlichen Ambitionsniveaus für Wärmepumpe (HP-Pfad) und Fernwärme (DH-Pfad) sowie für den Gebäudebestand; B: BAU, I: IMPROVE, A: AMBITION

Das einfache Gebäudebestandmodell (BS) besteht aus 100 Gebäuden (d. h. 100 %) mit einer durchschnittlichen beheizten Fläche $A_T = 150 \text{ m}^2$. Das BS mit einer konstanten Anzahl von Gebäuden mit den folgenden Eigenschaften (Tabelle 14) wird mit einer Mischung aus Brennstoff, direkter Elektroheizung (DE), dezentralen Wärmepumpen (HP) und Fernwärme (DH) beheizt, wie in Tabelle 15 dargestellt. In allen Szenarien wird der Anteil der Brennstoffe für Heizzwecke von 55% im Jahr 2025 auf einen geringen Anteil von 2,5 % im Jahr 2050 reduziert. Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der direkten Elektroheizung (DE) von 10 % im Jahr 2025 linear auf 15 % im Jahr 2050 steigen wird. In allen Szenarien wird eine Umstellung von fossilen Brennstoffen auf Biomasse angenommen, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die absolute Menge an Biomasse für den Gebäudesektor begrenzt ist. Für Gas-Brennwertkessel wird eine thermische Gesamtwirkungsgrad von 85 % angenommen, während Öl- und Biomassekessel mit einem Wirkungsgrad von 80 % berechnet werden. Der Anteil der Fernwärme steigt im DH-Pfad von 25 % auf 60 % und im HP-Pfad auf 35 %.

Tabelle 14. Eigenschaften des Gebäudebestands.

	BAU	IMPROVE	AMBITION
Raumheizungsbedarf SH / kWh/(m ² a)	80	55	30
Warmwasserbedarf DHW / kWh/(m ² a)	15 + 5		
Geräte und Hilfsenergie / kWh _{el} /(m ² a)	20 + 5		

Tabelle 15. Ausgangslage Heizsysteme im Gebäudebestand (BS), Anteil in %.

	%	Anmerkung
Brennstoff (Gebäude-/Wohnungweiseskessel)	55	Phase-out
- Heizöl	30	Schnelles Phase-out
- Gas	60	
- Biomasse	10	Begrenzter absoluter Beitrag

DE	10	Geringfügig bis leicht ansteigend
HP (zentral/dezentral)	10	Starker Anstieg
DH	25	Starker Anstieg in DH-Pfad

Zur Vereinfachung wird das Energiesystem anhand einer jährlichen Bilanzierung modelliert, die von der Ausgangslage bis zum Jahr 2050 in Schritten von 5 Jahren erfolgt und aus Brennstoffen (Öl, Gas und Biomasse), einem Stromnetz und Fernwärme besteht. Beide Systeme, Strom und Fernwärme, sind auf mehreren Ebenen gekoppelt: direkt über KWK und indirekt über zentrale WP im Fernwärmesystem und dezentrale WP in Gebäuden. Sie werden durch die Wahl des Ambitionsniveaus im Gebäudebestand (BS) beeinflusst, und zwar durch die Reduzierung des Wärmebedarfs in der Fernwärme und über DE und WP im Strombedarf, siehe auch Abbildung 42.

Je nach Wahl des Ambitionsniveaus im BS und des Pfades (DH oder HP) kann der Energiebedarf in der DH entweder sinken oder steigen. Der Strombedarf kann entweder konstant bleiben (im DH-Pfad und bei hohem Ambitionsniveau) oder in allen anderen Fällen steigen.

Das übergeordnete Ziel besteht darin, verschiedene Pfade für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu vergleichen. Wie in Abbildung 42 dargestellt, kann dies auf Gebäudeebene durch verschiedene Kombinationen von (tiefgreifender) TR, Umstellung von fossiler auf biomassebasierte Heizung, Fernwärme oder WP sowie durch Dekarbonisierung von Strom und Fernwärme erreicht werden. Sowohl im Strommix als auch im Fernwärmesystem ist Biomasse vorhanden. Aufgrund des begrenzten Potenzials von Biomasse für die energetische Nutzung ist Biomasse als direkter Brennstoff oder als Brennstoff in KWK- oder Fernwärmeanlagen (DHP) in allen Szenarien auf eine maximale Steigerung von 100 % gegenüber dem Referenzszenario begrenzt.

Das Stromsystem besteht aus fossiler KWK (Gas) und Biomasse-KWK, Wasserkraft (mit einem konstanten absoluten Beitrag), Windkraft und PV. Kohle und Kernenergie sind in diesem Szenario ausgeschlossen (Basisjahr 2025).

In einem Szenario mit steigendem Stromverbrauch kann die Biomasse-KWK bis zu einem gewissen Grad ausgebaut werden, der Rest muss durch den Ausbau von Wind- und PV-Anlagen gedeckt werden. Es wird nicht zwischen Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen unterschieden. Darüber hinaus wird nicht zwischen vor Ort (gebäudegebunden) und bodenmontierten PV-Anlagen unterschieden. Der absolute Beitrag der Wasserkraft wird als konstant angenommen (begrenzt Ausbaupotenzial).

Tabelle 16. Ausgangslage Strommix, Anteil in %.

	%	Anmerkung
Fossile KWK	50	Phase-out
Biomasse KWK	10	Absolute Grenze
Wasserkraft	25	Absolute Grenze
Wind	5	
PV	10	

Fernwärme (DH) bezieht sich auf (ausreichend) große Fernwärmesysteme mit KWK (Blockheizung wird hier zu Einzelgebäudewärmesystemen gezählt). Der Beitrag der Basislinie zur Fernwärme ist in Tabelle 17 zusammengefasst. Für DHP wird ein Wirkungsgrad von 80 % angenommen. Der thermische Wirkungsgrad von KWK-Anlagen beträgt 40 %, und die thermische Energie ist durch die elektrische

Leistung begrenzt (strombetriebene KWK). Die Fernwärmeverluste werden mit 10 % der Nutzenergie angenommen. Der absolute Beitrag von Abwärme, Geothermie und Solarthermie wird als konstant angenommen.

Tabelle 17. Fernwärmesystem (DH) des Referenzsszenario, Anteil in %.

	%	Anmerkung
Abwärme und Abfallverbrennung	15	Absolute Grenze
Geothermie und Solarthermie	2.5	Konstanter Absoluter Beitrag
Zentrale Wärmepumpe (Wärme)	2.5	
Biomasse KWK	10	begrenzt durch die Stromerzeugung, absolute Grenze
Biomasse DHP	10	Absolute Grenze
Fossile KWK	35	begrenzt durch die Stromerzeugung,
Fossile DHP	25	Phase-out (in IMPROVE und AMBITION)

WP spielen in beiden Szenarien (HP-Pfad und DH-Pfad) die Hauptrolle. Die zentralen und dezentralen HPs werden mit einem einfachen Carnot-basierten Ansatz mit einem Carnot-Leistungsfaktor modelliert η_c :

$$COP_{HP} = \eta_c \cdot COP_c \quad (11)$$

$$COP_c = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \quad (12)$$

$$COP_{sys} = (1 - a) \cdot COP_{HP} + a \cdot COP_{DE} \quad (13)$$

Für die dezentralen (gebäude- oder wohnungsweisen) WP wurden folgende Annahmen getroffen: ein Carnot-Leistungsfaktor von 0.36, eine Vorlauftemperatur von 65 °C bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 10 °C und ein Anteil der direkten elektrischen (DE) Heizung von 15 % mit $COP_{DE} = 1$ (bivalentes System) und System COP = 2.

Für die zentralen WP (DH-Ebene) wird eine Vorlauftemperatur von 95 °C, eine durchschnittliche Quellentemperatur von 15 °C und Carnot-Leistungsfaktor $\eta_c = 0.44$. Dies führt zu einer durchschnittlichen WP und System COP von 2.

Es ist anzumerken, dass ein COP von 2 im Vergleich zu anderen Studien relativ niedrig ist. Wenn jedoch von einer schnellen und umfassenden Umsetzung von WP im Gebäudebestand ausgegangen wird, kann kein hochwertiges Niedertemperatur-Heizsystem angenommen werden. Daher wäre die Annahme eines höheren COP sehr optimistisch. Im Falle des Szenarios mit hohem Ambitionsniveau im Gebäudebestand wäre eine geringere HL und eine niedrigere erforderliche Vorlauftemperatur zu erwarten, was zu einem etwas besseren COP führen würde. Der Einfluss auf den resultierenden Strombedarf wäre dennoch relativ gering, da auch der Bedarf ohnehin deutlich niedriger ist. Bei einem COP von 2.5 statt 2 würde beispielsweise der zusätzliche Bedarf an erneuerbarem Strom für WP in Fernwärmenetzen um 25 % und für gebäudeweise WP mit hohem Ambitionsniveau und einem COP von 3 um 50 % geringer ausfallen, wie in Tabelle 18 gezeigt.

Tabelle 18. Einfluss des COP der Wärmepumpe auf den Strombedarf des Gebäudebestands (BS).

Szenario (SH + DHW Bedarf in kWh/(m ² a))	BAU (80 +20)	IMPROVE (55+20)	AMBITION (30 + 20)	BAU (80 +20)	IMPROVE (55+20)	AMBITION (30 + 20)
		Zentral			Dezentral	
Rel. Verlust von DH		10 %			-	
COP (konservativ)		2			2	
W _{el} / kWh/(m ² a)	55	41.25	27.5	50	37.5	25
COP (verbessert)		2.5			2.5	
W _{el} / kWh/(m ² a)	44	33	22	40	30	20
ΔW _{el} / kWh/(m ² a)	11	8.25	5.5	10	7.5	5
COP				2	2.5	3
W _{el} / kWh/(m ² a)				50	30	16.7
ΔW _{el} / kWh/(m ² a)				0	7.5	8.33

Für gas- und biomassebefeuerte KWK-Anlagen gilt ein KWK-Koeffizient (Verhältnis von Strom zu Wärme) $\sigma = 1.0$ ($\eta_{el} = 0.4$, $\eta_{th} = 0.4$). Es ist definiert als das Verhältnis zwischen Stromerzeugung (W_{el}) und thermischer Erzeugung (Q_{th}):

$$\sigma = \frac{W_{el}}{Q_{th}} \quad (14)$$

Die der elektrischen Energie und der thermischen Energie zugewiesenen CO₂-Emissionen werden nach der Carnot-Methode bewertet. Der Carnot-Wirkungsgrad η_C wird auf der Grundlage des Maximums, d. h. der Vorlauftemperatur des Fernwärmesystems (angenommen 160 °C), und der Mindesttemperatur, d. h. der Umgebungstemperatur (10 °C), berechnet:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (15)$$

Der sogenannte Brennstoffanteil der elektrischen und thermischen Energie kann auf der Grundlage des thermischen und elektrischen Wirkungsgrads sowie des Carnot-Wirkungsgrads berechnet werden.

Kraftstoffanteil der elektrischen Energie $A_{F,el}$:

$$A_{F,el} = \frac{(1 \cdot \eta_{el})}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}} \quad (16)$$

Brennstoffanteil thermische Energie $A_{F,th}$:

$$A_{F,th} = \frac{(\eta_C \cdot \eta_{th})}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}} \quad (17)$$

Der CO₂-Umrechnungsfaktor wird auf der Grundlage des Brennstoffanteils und des thermischen und elektrischen Wirkungsgrads bestimmt.

$$f_{CO_2,el} = A_{F,el} \cdot f_{CO_2,gas}/\eta_{el} \quad (18)$$

$$f_{CO_2,th} = A_{F,th} \cdot f_{CO_2,gas}/\eta_{th} \quad (19)$$

Es wird davon ausgegangen, dass die KWK ausschließlich mit Strom betrieben wird.

Die gesamten CO₂-Emissionen werden auf der Grundlage der Sekundärenergie (S-E) und den CO₂-Umrechnungsfaktoren und Parametern in Tabelle 19 bestimmt, mit hy: Wasserkraft, wi: Wind, PV: PV, bCHP-E/bCHP-H: Biomasse-KWK Strom und Wärme, fCHP-E/ fCHP-H: fossile KWK Strom und Wärme, waste/RE: Abwärme, Abfallverbrennung, Geothermie und Solarthermie, W_{el}: Stromverbrauch, Q_{DH}: Wärme and E: Brennstoffe

$$f_{CO_2,el} = f_{hy} \cdot CO_{2,hy} + f_{wi} \cdot CO_{2,wi} + f_{PV} \cdot CO_{2,PV} + f_{bCHP} \cdot CO_{2,bCHP-E} + f_{fCHP} \cdot CO_{2,fCHP-E} \quad (20)$$

$$f_{CO_2,DH} = f_{waste/RE} \cdot CO_{2,waste/RE} + f_{bCHP} \cdot CO_{2,bCHP-H} + f_{fCHP} \cdot CO_{2,fCHP-H} + f_{HP} \cdot CO_{2,el} \quad (21)$$

$$CO_2 = W_{el} \cdot f_{CO_2,el} + Q_{DH} \cdot f_{CO_2,DH} + E_{Bio} \cdot f_{CO_2,Bio} + E_{Gas} \cdot f_{CO_2,Gas} + E_{Oil} \cdot f_{CO_2,Oil} \quad (22)$$

Tabelle 19. CO₂ Emissionen von Brennstoffen, Stromerzeugung und Fernwärmequellen basierend auf [50].

f _{CO2} /[g/kWh]			Anmerkung	f _{CO2} /[g/kWh]			Anmerkung
Brennstoff				Wärme			
-	Heizöl	310	σ = 1	-	Abwärme	9	Inkl. Abfallverbrennung
-	Gas	247		-	Geothermie, Solarthermie	9	
-	Biomasse	17		-	Zentrale Wärmepumpe	var.	El. mix
Strom				-	Fossile KWK	129	
-	Fossile KWK	371		-	Bio KWK	11	
-	Bio KWK	32		-	Fossile DHP	247	
-	Wasserkraft	1		-	Bio DHP	17	
-	Wind	5					
-	PV	10					

Der Ausstieg aus fossilen Brennstoffen und der Übergang zu erneuerbarer Elektrizität und erneuerbarer Fernwärme sind in Abbildung 44 dargestellt. Trotz der hohen Ambitionen im Gebäudesektor (d. h. umfassende thermische Sanierung) und eines hohen Anteils an Fernwärme steigt der Strombedarf. Ein Großteil der Fernwärme wird durch große zentrale WP gedeckt, die einen wesentlichen Anteil am Anstieg des Strombedarfs haben. Der zusätzliche Strombedarf wird zu einem großen Teil durch PV und Windkraft gedeckt.

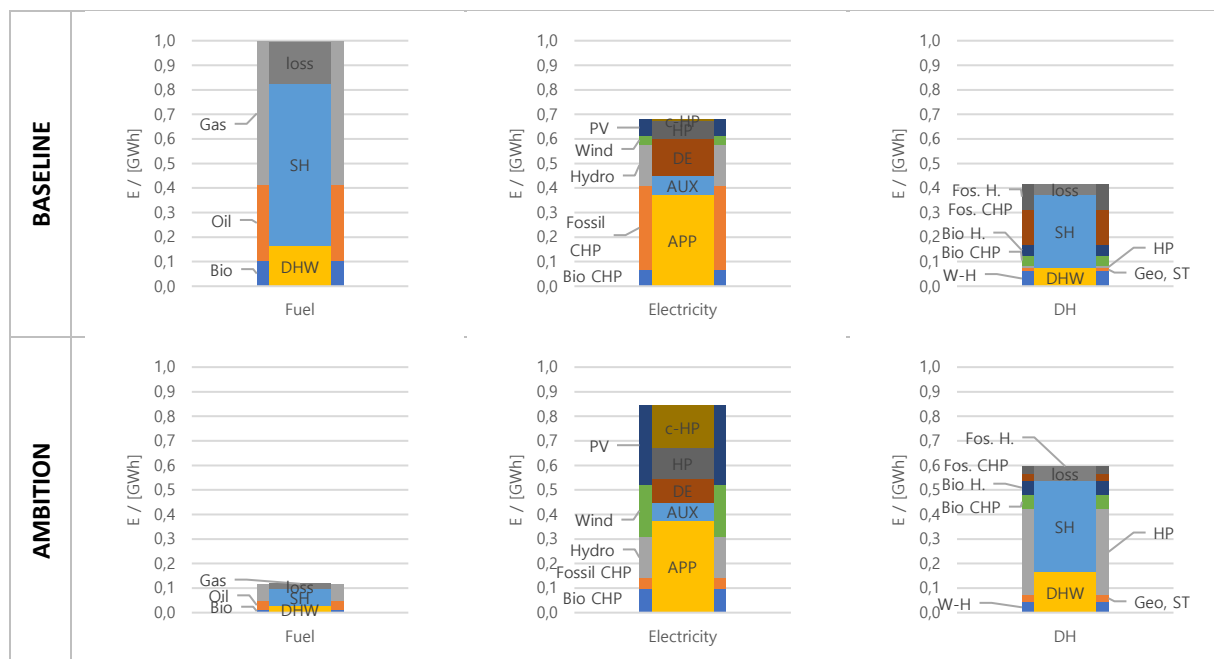
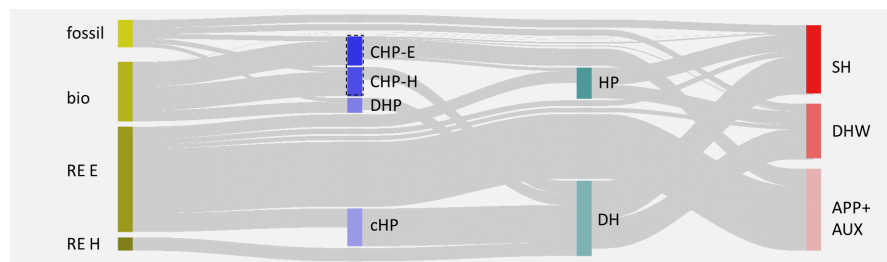
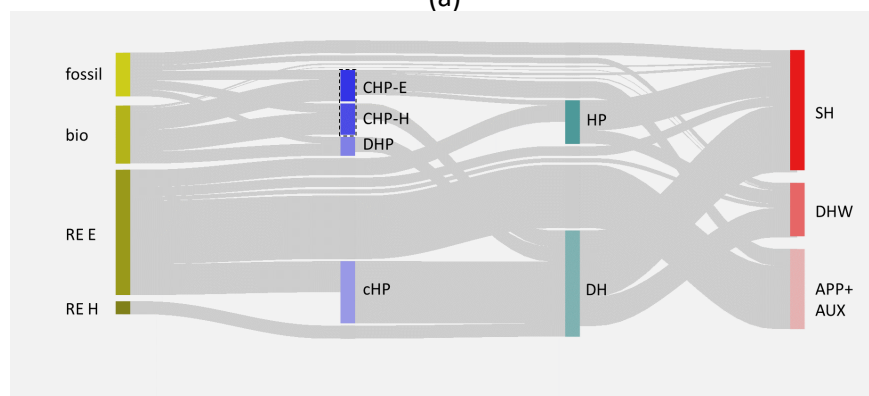


Abbildung 44. Übergang von fossiler Heizung zu Wärmepumpen und Fernwärme sowie Dekarbonisierung von Strom und Fernwärme vom Basisszenario zum AMBITION-Szenario.

Abbildung 45 a, b und c zeigen beispielhaft das Sankey-Diagramm für das höchste Ambitionsniveau in Bezug auf Strom und Fernwärme sowie drei verschiedene Ambitionsniveaus für den Gebäudebestand (a: AMBITION, b: IMPROVE, c: BAU). Das höhere Ambitionsniveau im Gebäudebestand führt zu den niedrigsten CO₂-Emissionen und einem deutlich reduzierten Strombedarf für WP (zentral und dezentral) und damit zu einem deutlich geringeren Bedarf an erneuerbarem Strom.



(a)



(b)

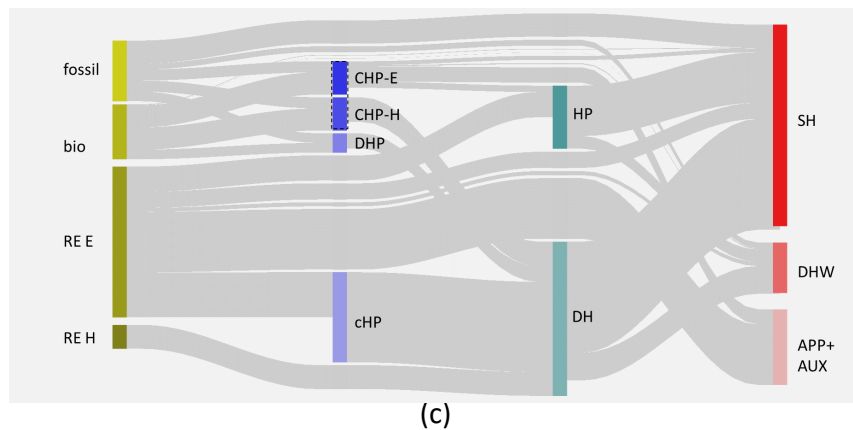
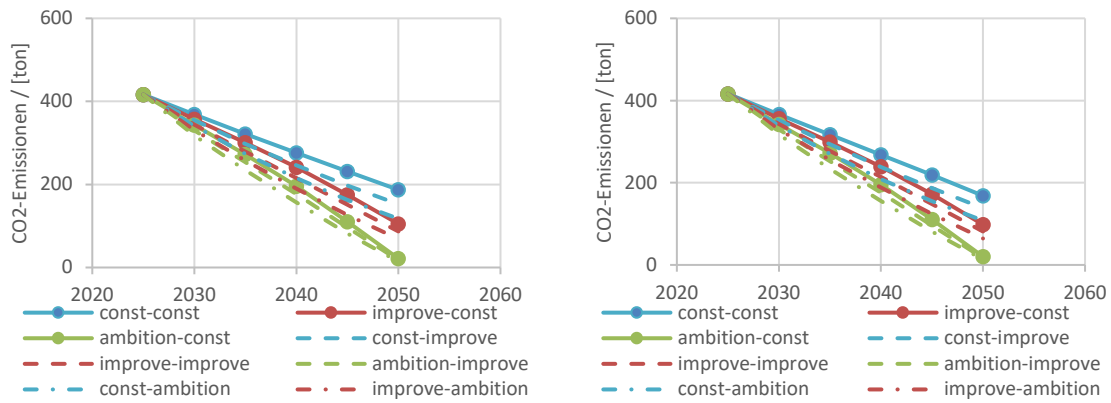


Abbildung 45. Sankey-Diagramm des Energiesystems mit (a) umfassender thermischer Sanierung (AMBITION), 41.9 Tonnen CO₂ (b) thermischer Sanierung (IMPROVE), 61.6 Tonnen CO₂ und (c) ohne thermische Sanierung (BAU), 107.8 Tonnen CO₂.

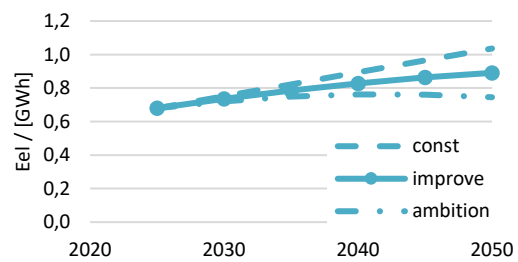
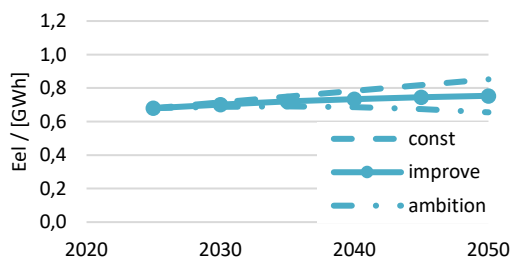
Die daraus resultierende Entwicklung der CO₂-Emissionen (Abbildung 46a), des Strombedarfs (Abbildung 46b) und des Fernwärmebedarfs (Abbildung 46c) sowie des erforderlichen Ausbaus von PV und Wind (Abbildung 46d) in den verschiedenen Dekarbonisierungspfaden sind in den folgenden Diagrammen zusammengefasst (DH-Pfad links, HP-Pfad rechts). Aus Abbildung 46 lässt sich ableiten, dass der HP-Pfad zu den insgesamt niedrigsten CO₂-Emissionen führt. Die Umsetzung von WP in bestehenden Gebäuden ist jedoch technisch sehr anspruchsvoll. Bei allen Varianten ist zu erkennen, dass ohne eine tiefgreifende thermische Sanierung die Umstellung von fossiler auf WP-basierter Heizung den Energieverbrauch des Gebäudebestands deutlich erhöht. Der bloße Ausstieg aus Öl und Gas reicht nicht aus, um die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Die IMPROVE-Energieszenarien erreichen ohne ehrgeizige Renovierungsmaßnahmen keine ausreichende Reduzierung der CO₂-Emissionen. Im AMBITION-Energieszenario ist hingegen ein abnehmender Einfluss des Ambitionsniveaus im BS zu beobachten, d. h. eine umfassende thermische Sanierung scheint das Bild nicht zu verändern. Dies geht jedoch zu Lasten einer erheblichen Ausweitung der Stromerzeugung. Ohne ein hohes Ambitionsniveau im Gebäudesektor kann das AMBITION-Szenario im Energiesektor nur durch einen massiven Ausbau von PV und/oder Windkraft erreicht werden. Dies würde zu einer zunehmenden Diskrepanz zwischen Winter und Sommer führen (Winterlücke, siehe Abschnitt unten). Der Fernwärmepfad erfordert einen massiven Ausbau der Fernwärmenetze mit einer großen Anzahl zentraler WP. Wie in allen AMBITION-Szenarien (und in geringerem Maße auch im IMPROVE-Szenario) wird der CO₂-Umrechnungsfaktor deutlich sinken, sodass die CO₂-Steuer auf Strom und Fernwärme mit fortschreitender Zeit an Relevanz verlieren wird, wie auch im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

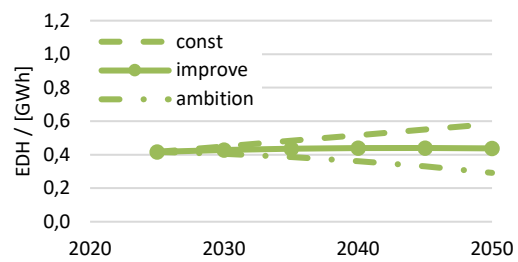
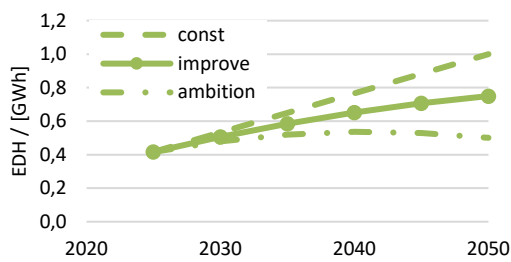
Basierend auf den Ergebnissen des Szenarios können die CO₂-Emissionen auf Gebäudeebene mithilfe von Umrechnungsfaktoren für Strom und Fernwärme bewertet werden. Die resultierenden Umrechnungsfaktoren sind in Abbildung 47 zusammengefasst.



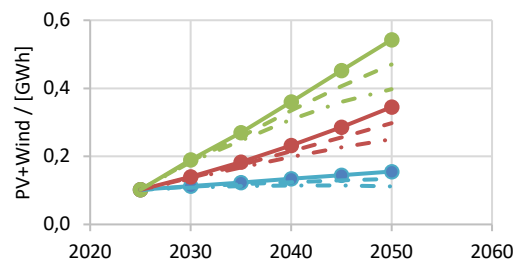
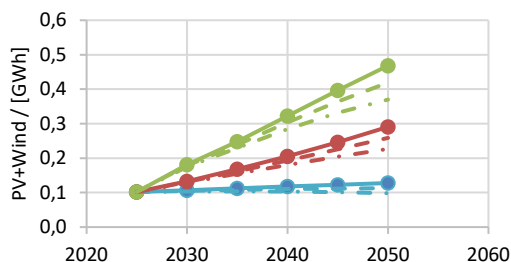
(a)



(b)



(c)



(d)

DH-Pfad

HP-Pfad

Abbildung 46. Entwicklung der jährlichen CO₂-Emissionen (a), des Gesamtstrombedarfs (b), des Fernwärmebedarfs (c) und der Ausweitung von PV- und Windenergie (d) entsprechend den verschiedenen Pfaden (links: DH-Pfad und rechts: HP-Pfad) und entsprechend den verschiedenen Ambitionsniveaus des Gebäudebestands (Legende: Ambitionsniveau Energiesystem – Ambitionsniveau Gebäudebestand).

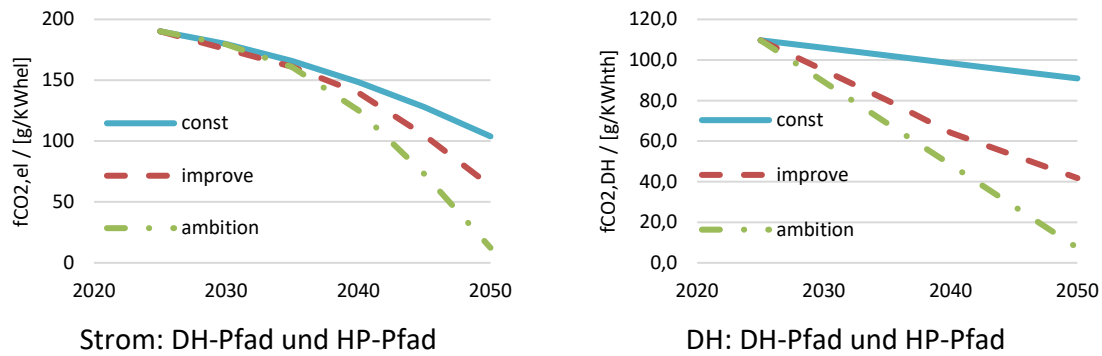


Abbildung 47. Entwicklung des CO₂-Umrechnungsfaktors für Strom (links) und Fernwärme (rechts).

In allen Szenarien sinkt der Umrechnungsfaktor für Strom. Bei einem hohen Ambitionsniveau erreicht er 2050 fast Null (12,4 g/kWh). Der Umrechnungsfaktor für Fernwärme hängt mit dem für Strom zusammen (aufgrund der zentralen WP) und sinkt bei einem hohen Ambitionsniveau 2050 ebenfalls auf fast Null (7,4 g/kWh).

Für Gebäude könnten, wenn außer dem Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Vorschriften vorgesehen sind, beliebige Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen gewählt werden: DE, HP oder gegebenenfalls Fernwärme.

Zusätzliche Maßnahmen sind optional:

- Thermische Sanierung (Standard, tiefgreifend)
- Erneuerbare Energien vor Ort (PV)

Angenommen, das Gebäude ist mit einem Gasboiler ausgestattet und weist die in Tabelle 14 beschriebenen durchschnittlichen Eigenschaften auf, können die CO₂-Emissionen für verschiedene Maßnahmenkombinationen und Zeitpunkte berechnet werden (d. h. Umstellung von fossiler Heizung auf DE, HP oder DH in den Jahren 2025, 2030, 2035, 2040). Hier werden beispielhaft die Ergebnisse für einen Wechsel in den Jahren 2025 und 2035 dargestellt (siehe Abbildung 48). Unabhängig vom Zeitpunkt der Umsetzung der Maßnahme sind die Emissionen im Jahr 2050 im Vergleich zur Basislinie sehr niedrig. Die zusätzliche thermische Sanierung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die CO₂-Emissionen und sogar einen geringeren Einfluss, wenn die Maßnahme später umgesetzt wird. Daher hätte eine CO₂-Steuer bei einer Umstellung von fossiler Heizung auf Strom nur einen geringen Einfluss und würde keine zusätzliche thermische Sanierung auslösen.

Der zusätzliche Strombedarf, der durch unzureichende Effizienzmaßnahmen (z. B. DE statt HP, unzureichend oder gar nicht renovierte Gebäude) „erzeugt“ wird, muss durch erneuerbare Energien, d. h. durch Windkraftanlagen oder PV, gedeckt werden. Während der Hauptstrombedarf im Winter auftritt (insbesondere bei ineffizienten Gebäuden), wird der Beitrag der PV (und auch der Wasserkraft) hauptsächlich im Sommer verfügbar sein. Windenergie weist weniger ausgeprägte saisonale Schwankungen auf, ist aber ebenfalls volatil. Wenn – wie zu erwarten – der Anteil der PV aufgrund der höheren Akzeptanz in der Bevölkerung dominieren wird, wird es zu einer starken saisonalen Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage kommen. Diese saisonale Lücke (auch Winterlücke genannt) erfordert (saisonale) Speicherkapazitäten. Bis zu einem gewissen Grad könnten Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung stehen, aber der Hauptbeitrag muss durch erneuerbaren Wasserstoff (und/oder Methan) gedeckt werden. Der Wirkungsgrad des Kreislaufs aus Elektrolyse-Wasserstoff-(Mechanisierung)-Speicherung und Re-Elektrifizierung (mit Brennstoffzelle oder Gasturbine) liegt unter optimistischen Annahmen im Bereich von 30 % [51]. Folglich müssen für jede

kWh Strom, die gespeichert werden muss, 3.33 kWh im Sommer zu entsprechend sehr hohen Kosten erzeugt werden.

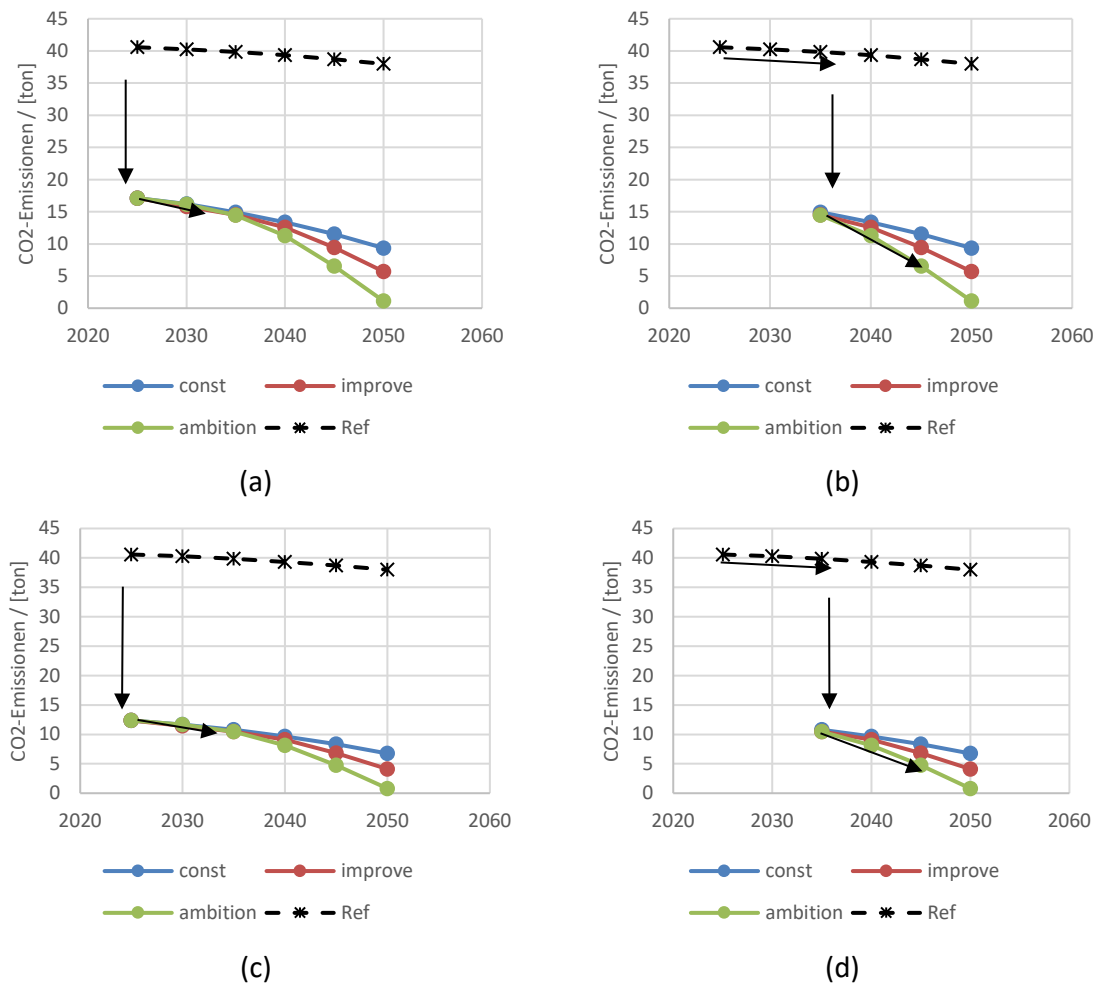


Abbildung 48. Entwicklung der CO₂-Emissionen für ein einzelnes Gebäude, das auf einer Wärmepumpe umgestellt wird ((a) im Jahr 2025 und (b) im Jahr 2035) und optional in Kombination mit einer umfassenden thermischen Sanierung ((c) im Jahr 2025 und (d) im Jahr 2035).

Aus den Ergebnissen der Szenarien lassen sich folgende Strategien für den Gebäudebestand und die Energiepolitik ableiten:

- Entwicklung einer klaren und transparenten Energiepolitik, die den Gebäudebestand als wichtige Säule einbezieht;
- Bewertung von Maßnahmen im Gebäudebestand aus makroökonomischer statt aus mikroökonomischer Perspektive;
- Identifizierung von Lock-in-Effekten und Vermeidung/Verhinderung aller Maßnahmen, die zu Lock-ins führen;
- Fokus zunächst auf Energieeffizienz im Gebäudebestand, dann auf erneuerbare Energien;
- Einschränkung der direkten Elektroheizung (weder für SH noch für DHW);
- Festlegung einer absoluten Obergrenze für den Endenergieverbrauch für Strom (oder Wärme im Falle von DH) für Gebäude;
- Direkte Finanzierungen/Subventionen im Einklang mit den allgemeinen Klima- und energiepolitischen Zielen. Alle kontraproduktiven Finanzierungen/Subventionen streichen;

- Investitionen im Gebäudesektor mit einem geringeren Investitionsbedarf im Energiesystem (PV, Wind, Energiespeicherung) in Einklang bringen;
- Eine klare langfristige Strategie für den Ausbau der Fernwärme entwickeln und spezielle Stadtteile festlegen;
- Ein CO₂-Budget (pro Person) anstelle eines langfristigen CO₂-Ziels festlegen.

6 Schlussfolgerungen

Das Projekt PhaseOut hat aus fachlicher Sicht gezeigt, dass die serielle Sanierung im Geschosswohnbau in Kombination mit dem Ersatz von Gasetagenheizungen durch wärmepumpenbasierte Systeme technisch, wirtschaftlich und organisatorisch umsetzbar ist, sofern Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Nutzerinnenprozesse integrativ betrachtet werden. Eine dezentralen Booster-WP mit natürlichen Kältemitteln wurde erfolgreich im Rahmen des Projekts entwickelt und auf den Markt gebracht. Die simulationstechnische Bewertung hat bestätigt, dass diese Systeme eine realistische und zukunftsfähige Alternative zu fossilen Einzelheizungen darstellen, insbesondere bei eingeschränkten Platzverhältnissen und im bewohnten Bestand. Zusätzlich wurde eine Kleinst-R290 TWW-WP weiterentwickelt. Die Kombination aus fassadenintegrierter Lüftung, integrierten WP-Außeneinheiten und vorgefertigten Holzfassadenelementen erweist sich als zentraler Hebel zur Reduktion von Bauzeit, Schnittstellenkomplexität und Eingriffstiefe in die Nutzung. Die Markteinführung ist jedoch herausfordernd, insbesondere aufgrund der Schnittstellen zwischen den Gewerken. Hier sind noch weitere Schritte und Innovationen in Nachfolgeprojekten vor einer flächendeckenden Markteinführung notwendig.

Die simulationsgestützten Systemvergleiche verdeutlichen zudem, dass die Eignung von Wärmepumpensystemen stark vom Gebäudetyp und Nutzungsprofil abhängt und pauschale Auslegungsansätze häufig zu Überdimensionierung, erhöhten Investitionskosten und Effizienzeinbußen führen. Als besonders erfolgskritisch hat sich die strukturierte Nutzer:inneneinbindung erwiesen, die maßgeblich zur hohen Akzeptanz und sehr hohen Anschlussrate beigetragen hat.

Die Projektpartner arbeiten mit den erzielten Ergebnissen auf unterschiedlichen Ebenen weiter: Die Ergebnisse werden in Folgeprojekte sowie in zukünftige Demonstrationsvorhaben insbesondere konkrete Sanierungsprojekte der Sozialbau eingebracht werden. Weiterer Wohnbaugesellschaften können von den Ergebnissen und den entwickelten Produkten ebenso profitieren. Die entwickelten Technologien und Systemkonzepte dienen als Grundlage für die weitere Optimierung, Standardisierung und Skalierung serieller Sanierungslösungen, die auch durch das Innovationslabor Renowave.at verbreitet werden. Darüber hinaus werden die gewonnenen Erkenntnisse in Beratungsleistungen, Weiterbildungsformate sowie in die Weiterentwicklung von Simulations- und Bewertungsmethoden integriert, um eine praxisnahe und wirtschaftlich optimierte Auslegung von Wärmepumpensystemen im Bestand zu ermöglichen.

Die Projektergebnisse sind für mehrere Zielgruppen von hoher Relevanz. Wohnbaugesellschaften erhalten belastbare Entscheidungsgrundlagen für die strategische Dekarbonisierung ihres Bestands und für Investitionsentscheidungen im Rahmen serieller Sanierungen. Planungsbüros aus den Bereichen Bauphysik und Gebäudetechnik können die entwickelten Systemkonzepte, Vergleichsstudien und Auslegungs-Guidelines, die u.a. über das Energieinstitut Vorarlberg (EIV) einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden und damit direkt in der Praxis Anwendung finden. Architekturbüros profitieren von integrierten Fassadenlösungen mit hoher gestalterischer Qualität und reduzierten Nutzungskonflikten. Energieberatungen, Förderstellen sowie private und kommunale Entscheidungsträger können die Ergebnisse für Beratung, Programmentwicklung und langfristige

Klimastrategien nutzen, insbesondere unter Berücksichtigung der betriebs- sowie volkswirtschaftlichen Bewertung.

Im Zuge des Projekts wurden auch relevante rechtliche und normative Hürden identifiziert. Dazu zählen insbesondere lange und teils uneinheitliche Genehmigungsverfahren, etwa bei fassadenintegrierten Außeneinheiten und Veränderungen des Erscheinungsbilds von Bestandsgebäuden. Normative Vorgaben zur Heizlastberechnung führen häufig zu konservativen Auslegungen und damit zu einer Überdimensionierung von Komponenten, was sich negativ auf Investitionskosten, Effizienz und Schallemissionen auswirkt. Zusätzlich bestehen Unsicherheiten in der baurechtlichen Bewertung serieller, vorgefertigter Fassadensysteme sowie uneinheitliche Regelungen für dezentrale Wärmepumpenlösungen im mehrgeschossigen Wohnbau.

Die bisherigen Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten umfassen die Aufbereitung der Projektergebnisse in Sanierungs-Guidelines, die in Kooperation mit dem FFG Projekt SüdSan öffentlich zugänglich gemacht wurden, sowie deren Bereitstellung über die Homepage des EIV und die Verbreitung über Fachveranstaltungen und Projektpartnerschaften. Aufgrund der hohen Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte auf große Teile des österreichischen und internationalen Geschosswohnbestands besteht ein erhebliches Markt- und Verbreitungspotenzial. Dieses wird zusätzlich durch den steigenden regulatorischen Druck zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors und das wachsende Interesse an industriell vorgefertigten, skalierbaren Sanierungslösungen verstärkt.

Konkrete **Verwertungsaktivitäten** umfassen, dass DuW ein fassadenintegriertes Lüftungsgerät auf den Markt bringt; IDM die im Projekt entwickelte Booster-WP bereits auf den Markt gebracht hat (<https://www.idm-energie.at/nano/>) und Kulmer die serielle Sanierung weiterentwickeln und vermarkten wird. UIBK versucht die Entwicklung der R290 Split-WP weiterzubringen und Partner für eine Markteinführung zu finden. Die Sozialbau wird die Erkenntnisse in zukünftigen Sanierungsprojekten einbringen. Rothbacher, Nussmüller, Klimatherm kann die Erkenntnisse in die Konzeption, Energieberatung bzw. Planung neuer Projekte einbringen.

Energieinstitut Vorarlberg wird die Erkenntnisse in folgenden Tätigkeiten nutzen.

- Begleitung von zukünftigen Sanierungsforschungsprojekten
- Beratung der Politik (Novellierung Bautechnikverordnung und Förderrichtlinien, Einführung neuer Beratungsangebote etc.)
- Beratungsprogramme zur energetisch-wirtschaftlichen Sanierung von Mehrwohnungsgebäuden
- Beratung zur strategischen Entwicklung größerer Gebäudebestände
- Aus- und Weiterbildungsangebote (Energieberater A- und F-Kurs, Sanierungsberaterkurs etc.)

AEE INTEC wird die gewonnenen Erkenntnisse sowie die entwickelten Simulationsmodelle in weiteren Forschungsaktivitäten sowie Demonstrationsvorhaben verwenden.

Die Ergebnisse werden zudem bereits in das EU Life Projekt KnowHowHP eingebracht (EIV und UIBK) sowie in das EU Life Projekt BuildUpSpeed (AEE INTEC) und über das Innovationslabor Renowave.at einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht.

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Abschlussarbeiten betreut und abgeschlossen, u.a.

- Dissertation, William Monteleone, UIBK 2025, Development and optimization of decentral small-scale heat pumps for new and renovated residential buildings through simulations and experiments
- Masterarbeit, Aleksandry Ksiezzyk, UIBK 2024, Simulation-based investigation of heat emitters for efficient operation of heat pumps in renovated multi-family-buildings
- Masterarbeit, Matthias Lettenbichler, UIBK 2022, Prediction of the space heating load by means of multizone dynamic thermal building simulation

Verbreitungsaktivitäten

Die Ergebnisse des Projekts wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert, auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt und publiziert und es gab einen Austausch im Rahmen von Workshops mit parallellaufenden FFG SdZ Projekten sowie mit Stakeholdern und in Kooperation mit dem Innovationslabor Renowave.at. Es wird mindestens eine weitere Publikation geben, welche die Analyse des Realbetriebs auf Basis der Monitoring-Daten und den Vergleich mit den Simulationen zum Inhalt hat (z.B. auf der ISEC 2028 oder IEA HPC 2029). Die Ergebnisse des Monitorings werden zudem in zukünftige IEA-Aktivitäten im Rahmen des Nachfolgeprojekts IEA HPT Annex 62 eingebracht.

Wissenschaftliche Paper – Journal:

Monteleone, William; Pinotti, Riccardo; Ochs, Fabian; Dermentzis, Georgios (2025): Hygrothermal analysis of prefabricated façades with active components for minimal invasive renovations. In: Journal of Building Engineering 107, No. 112735. ([Weblink](#))

Monteleone, William; Ochs, Fabian; Dermentzis, Georgios; Breuss, Samuel (2024): Simulation-assisted design of a silent façade-integrated R290 mini-split heat pump. In: Applied Thermal Engineering 243, No. 122520. ([Weblink](#)) ([DOI](#))

Ochs, Fabian; Magni, Mara; Dermentzis, Georgios (2022): Integration of Heat Pumps in Buildings and District Heating Systems - evaluation on building and on energy system level. In: Energies 15/11, No. 3889. ([Weblink](#)) ([DOI](#))

Wissenschaftliche Paper – Konferenz (peer-review):

Ochs, Fabian; Ksiezzyk, Aleksandra; Venturi, Elisa; Magni, Mara: Improving Heat Pump System Performance with Fan-Convectors in Multi-Apartment Buildings. In: Zilio, Claudio; Busato, Filippo; Mazzarella, Livio; Noro, Marco (Eds.): Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress - CLIMA 2025. Conference proceedings, Volume 3, Milan, Italy, June 4-6, 2025. Cham: Springer (= Lecture Notes in Civil Engineering, 788)., ISBN 978-3-032-10545-5. ([Weblink](#))

Jähnig, Dagmar; Male, Markus; Ochs, Fabian (2025): Sanierung mit Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern – eine Simulationsstudie. In: e-nova, International Conference. Intelligente Energie- und Klimastrategien: Energie – Gebäude – Umwelt. 25. und 26. Juni 2025. Band 28. Eisenstadt: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Burgenland (= Science.Research.Pannonia, 33)., ISBN 978-3-9505410-4-5, S. 349 - 359. ([Weblink](#))

Monteleone, William; Ochs, Fabian (2025): Comparative study on small-scale HPs for decentral DHW preparation in multi-family buildings. In: Alexandros Charalambides: EuroSun 2024 Proceedings. ISES and IEA SHC International Conference on Sustainable and Solar Energy for Buildings and Industry. 26-

30 August 2024, Limassol, Cyprus. Freiburg i. Br.: International Solar Energy Society (ISES), ISBN 978-3-9826306-0-1, S. 273 - 284. ([Weblink](#))

Monteleone, William; Ochs, Fabian (2024): Modelling Ice Formation and De-icing for Enhanced Performance of Compact Facade-integrated Air-to-Water Heat Pumps. In: Bednar, Thomas: Proceedings of BauSim Conference 2024. 10te Konferenz von IBPSA-DACH, TU Wien, Österreich. Proceedings. 23-26 September 2024, Vienna, Austria. International Building Performance Simulation Association (IBPSA), ISBN 978-3-200-10068-8, S. 400 - 407.

Magni, Mara; Ochs, Fabian; Dermentzis, Georgios; Venturi, Elisa (2023): Impact of the European Building Energy Requirements on the Heat Pump Market. In: 14 th IEA Heat Pump Conference, 2023, Chicago. Proceedings. 15-18 May 2023, Chicago, Illinois. IEA - Heat Pumping Technologies, S. 1 - 13. ([Weblink](#))

Ochs, Fabian; Tosatto, Alice; Magni, Mara; Venturi, Elisa; Monteleone, William; Dermentzis, Georgios (2023): Strategies to overcome the dilemma in renovating and integrating HPs and RE into the building stock. In: 14 th IEA Heat Pump Conference, 2023, Chicago. Proceedings. 15-18 May 2023, Chicago, Illinois. IEA - Heat Pumping Technologies, S. 1 - 12. ([Weblink](#))

Monteleone, William; Ochs, Fabian (2023): Simulation-assisted development of a mini-split air-to-water façade-integrated heat pump for minimal invasive renovations. In: 14 th IEA Heat Pump Conference, 2023, Chicago. Proceedings. 15-18 May 2023, Chicago, Illinois. IEA - Heat Pumping Technologies, Paper 652. ([Weblink](#))

Dermentzis, Georgios; Magni, Mara; Ochs, Fabian; Monteleone, William; Schaffer, Benjamin (2022): Heat Pump Solutions in Renovations of Multi-Storey Buildings. In: Clima 2022. The 14th REHVA HVAC World Congress. 22nd - 25th May, Rotterdam, The Netherlands. Delft: Delft University of Technology / Eindhoven: Eindhoven University of Technology, S. 1 - 7. ([Weblink](#))

Sonstige Veröffentlichungen:

Kröll, Marian; Ochs, Fabian (2025): Energiezukunft. In: eco.nova. ([Weblink](#))

Ochs, Fabian; Magni, Mara; Dermentzis, Georgios; Venturi, Elisa; Monteleone, William (2024): Integrated planning tool for thermal refurbishment and the use of heat pumps in apartment blocks. In: IBO: BAUZ! 2024. Wien: IBO-Verlag.

Ochs, Fabian; Dermentzis, Georgios; Magni, Mara; Venturi, Elisa; Monteleone, William (2024): Optimal planning of deep thermal renovation and heat pump application in buildings. In: Passivhausinstitut: Proceedings of the 27th Passivhaus Conference. Darmstadt: Passivhaus Institut Darmstadt, S. 117 - 121.

Ochs, Fabian; Magni, Mara; Dermentzis, Georgios; Monteleone, William; Venturi, Elisa (2024): Solide Planung als Grundlage effizienter Wärmepumpensysteme. In: 7. Internationalen Fachtagung Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT 2024). Holzbau | Trockenbau | Innenausbau. Proceedings. Biel: forum-holzbau (fhn), online. ([Weblink](#))

Monteleone, William; Fink, Jürgen; Ochs, Fabian (2024): Evaluation of the sound emissions of multiple split heat pumps in a renovation project. In: Passivhausinstitut: Proceedings of the 27th Passivhaus Conference. Darmstadt: Passivhaus Institut Darmstadt, S. 353 - 358. ([Weblink](#))

Ochs, Fabian; Magni, Mara (2024): Wärmepumpenkonzepte für die Sanierung von Mehrfamilienhäusern. In: Energieinstitut Vorarlberg: Economicum: Leistbares und energieeffizientes Wohnen. Themenband Session 13: Herausforderung Altbau. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg, S. 26 - 47. ([Weblink](#))

Ochs, Fabian (2024): Klimagerecht Heizen. In: zukunft forschung - Magazin für Wissenschaft und Forschung der Universität Innsbruck.

Ochs, Fabian (2023): Fassadenintegrierte Haustechnik für die Sanierung. In: Forum Holzbau: 1. Süddeutscher Holzbau Kongress (SHK 2023). Schwabenlandhalle Fellbach, Deutschland. 25./26. Juli 2023. Biel: forum-holzbau (fhb), S. 1 - 12.

Monteleone, William; Ochs, Fabian (2023): All-round development and demonstration of a mini-scale heat pump for renovated buildings. In: 26th International Passive House Conference 2023. Proceedings. 10-11 March Wiesbaden, Germany. Darmstadt: Passivhaus Institut Darmstadt, S. 359 - 364.

Ochs, Fabian; Magni, Mara; Nussmüller, Werner; Jähnig, Dagmar (2023): Netto-Null Sanierung im Geschosswohnbau mit vorgefertigten Fassaden und Kleinst-Wärmepumpen. In: Nachhaltige Technologien. Erneuerbare Energien und Ressourceneffizienz

Ochs, Fabian (2022): PhaseOut – so gelingt der Gasausstieg. In: TGA Fachmagazin, <https://tga.at/errichten/phaseout-so-gelingt-der-gasausstieg/>

Workshops:

25.10.2022 – Workshop mit Prozessbeteiligten – UIBK – Innsbruck (M6.3)

05.05.2023 – Workshop/Austausch mit Demonstrationsprojekt SüdSan und Forschungsprojekt OutPHit – Dornbirn (M6.4)

06.09.2023 – Mieter:innenfest – Wien

08.09.2023 – Workshop und fachlicher Austausch mit dem Demonstrationsprojekt SmartCity Baumgarten – Wien

23.10.2024 RENOWAVE Impact Days – Hallein (M8.3) Workshop Wärmepumpentechnologien in der Bestandsanierung (<https://impact-days.at>)

12.11.2025 RENOWAVE Impact Days – St. Pölten <https://impact-days.at>

22.01.2026 Workshop (online) Wärmepumpen in der Bestandssanierung mit RENOWAVE.at (M8.2)

Kooperation mit anderen FFG (SdZ) Projekten

FFG Projekt SüdSan (<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/sued-san-sozialvertraegliche-klimazieltkompatible-sanierung-von-zwei-mehrfamilienhaeusern.php>)

FFG Projekt SmartCity Baumgarten (<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/smart-city-baumgarten.php>)

Einbringung in IEA-Aktivitäten (<https://heatpumpingtechnologies.org/>)

- IEA HPT Projekt 61 Wärmepumpensysteme in Plusenergiequartieren
- IEA HPT Projekt 63 Auswirkungen der Platzierung von Wärmepumpen auf die Schallemissionen
- Zukünftig in Nachfolgeprojekt zum IEA HPT Projekt 62 „Heat Pumps in Residential Multifamily Buildings in Cities“

Austausch mit dem H2020 Projekt OutPHit (<https://outphit.eu/en/>)

7 Ausblick und Empfehlungen

Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts PhaseOut zeigt sich ein Bedarf an weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf mehreren Ebenen, um die entwickelten Konzepte in Richtung breiter Marktreife und Skalierung weiterzuentwickeln. Zentrale Forschungsschwerpunkte liegen in der weiteren Optimierung dezentraler Lösungen auf Basis von Kleinst-Wärmepumpen, insbesondere im Hinblick auf Effizienz, Kostenreduktion, Schallemissionen und einfache Integration in Bestandsgebäude. Neben technischen Innovationen sind v.a. die Prozesse und Schnittstellen zwischen den Gewerken zu optimieren. Konzepte für die schrittweise Sanierung und nachträglicher Anschluss von einzelnen Wohnungen sind noch zu verfeinern. Ergänzend dazu besteht erheblicher Entwicklungsbedarf bei luft-/Luftbasierten WP-Systemen, die einerseits sowohl für die Heizung als auch für die Kühlung eingesetzt werden können und ein hohes Potenzial für serielle Sanierungen mit geringen Eingriffen aufweisen, jedoch hinsichtlich Komfort, Regelungsstrategien und Kombination mit Warmwasserbereitung weiter untersucht werden müssen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten zudem verstärkt das Thema aktive und passive Kühlung adressieren, da steigende sommerliche Überhitzungsrisiken v.a. im urbanen Raum zunehmend an Relevanz gewinnen werden.

Ein weiterer Fokus sollte auf der Entwicklung schalloptimierter, hochkompakter Gesamtsysteme liegen, da Schall nach wie vor eines der zentralen Akzeptanz- und Genehmigungsthemen im mehrgeschossigen Wohnbau darstellt. Parallel dazu bieten erdreichgekoppelte Wärmepumpensysteme sowie Konzepte der kalten Nahwärme großes Potenzial, insbesondere in dichten urbanen Strukturen und bei Quartierslösungen, erfordern jedoch weiterführende Untersuchungen zu Investitionskosten, Genehmigungsfähigkeit und Betriebssicherheit. Auch Plusenergie-Ansätze im sanierten Geschosswohnbau, etwa durch die Kombination von Wärmepumpen, PV und Speicherlösungen, stellen ein relevantes Entwicklungsfeld dar, das in zukünftigen Projekten stärker berücksichtigt werden sollte.

Ein hohes Potenzial besteht in der Umsetzung der entwickelten Konzepte in Demonstrationsvorhaben, die als Brücke zwischen Forschung und breiter Anwendung dienen. Es werden deutlich mehr gut dokumentierte Positivbeispiele benötigt. Gleichzeitig sind Herausforderungen und Risiken zu berücksichtigen, etwa im Hinblick auf Investitionsentscheidungen, Nutzer*innenakzeptanz, Schall- und Komfortanforderungen sowie die Komplexität von Genehmigungsverfahren. Zukünftige Demonstrationsprojekte sollten daher gezielt auf den Projektergebnissen aufbauen und die Dynamik von Entscheidungsfindungs- und Genehmigungsprozessen explizit mituntersuchen, um praxisnahe Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

Von zentraler Bedeutung ist dabei eine integrale Planung, bei der Architektur, Bauphysik, Gebäudetechnik, Energiewirtschaft und Nutzerinnenbelange frühzeitig zusammengeführt werden. In diesem Zusammenhang wird der Einsatz eines digitalen Zwillings bereits in frühen Planungsphasen ausdrücklich empfohlen, um Systemvarianten vergleichend zu bewerten, Auswirkungen auf Komfort, Energiebedarf und Kosten transparent darzustellen sowie Risiken frühzeitig zu identifizieren. Entscheidend wird eine Erfolgskontrolle auf Basis gemessener Performanceindikatoren sein, die, falls diese von der Planung abweichen, Nachbesserungen auslösen. Ergänzend sollten zukünftige Arbeiten verstärkt den Einfluss dezentraler Wärmepumpenlösungen auf das Stromnetz untersuchen, um

netzdienliche Betriebsstrategien und eine effiziente Integration erneuerbarer Energien sicherzustellen.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht Süd (links) und Nordost (rechts) eines der 7 Gebäude. Quelle: Sozialbau AG....	18
Abbildung 2: Grundriss. Quelle: Sozialbau AG.	19
Abbildung 3: Schnitt. Quelle: Sozialbau AG.....	19
Abbildung 4: Prinzip-Schemata der vier Systemkonzepte [25].	21
Abbildung 5: Heizwärmebedarf (HWB) für alle Sanierungsvarianten; Gebäudeweise und wohnungsweise Berechnung mit PHPP, sowie gebäudeweise dynamische Simulation [26].	25
Abbildung 6: Heizlast (HL) berechnet mittels wohnungswissem PHPP für alle Sanierungsvarianten [26].	25
Abbildung 7: (a) Heizlast (HL), berechnet mit dem PHPP gebäudeweise, gemäß der Norm EN 12831-1 mit und ohne Berücksichtigung Wiederaufheizleistung (WH) und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten; (b) Sortierte Last-Kurve als Ergebnis der dynamischen Simulation des gesamten Gebäudes [26].	26
Abbildung 8: (a) Heizlast (HL) vs. Heizwärmebedarf (HWB) einzelner Wohnungen und des gesamten Gebäudes bei den verschiedenen Sanierungsvarianten, (b) Ausschnitt der Abbildung (a) zur Verdeutlichung der Streuung bei niedrigem Heizwärmebedarf.	27
Abbildung 9: Vorlauftemperaturbereiche, die in den verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Auslegungsbedingungen (d.h. Fall 1,2,8 mit oder ohne Wiederaufheizleistung (WH)) erforderlich sind. Die verschiedenen Heizkörpertypen (d.h. verschiedene Exponenten n), die mit verschiedenen ΔT und unter Berücksichtigung verschiedener Massenströme mit Geschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s dimensioniert sind, definieren die Bandbreite der einzelnen Balken [26].	28
Abbildung 10: Jährlicher Strombedarf der Wärmepumpe für die Raumheizung (RH) unter Berücksichtigung der verschiedenen Sanierungsvarianten und der Vorlauftemperatur [26].	29
Abbildung 11: Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe für die Raumheizung unter Berücksichtigung der verschiedenen Sanierungsvarianten und der Vorlauftemperatur [26].	29
Abbildung 12: 3D Darstellung des IDA ICE Modells des Mustergebäudes (links) Grundriss von einer Wohneinheit (rechts Quelle: Sozialbau).	30
Abbildung 13: Heizwärmebedarf bei idealer Heizung (rechts) und simulierte Heizlast ohne Solareinstrahlung und interne Gewinne (links) der drei Mustergebäude	31
Abbildung 14: Wärmepumpenkennlinie (COP) der zentralen Luft-Wasser Wärmepumpe bei einer Kompressordrehzahl von 90 rps (links) und 30 rps (rechts).	33
Abbildung 15: Wärmepumpenkennlinie (COP) der Boosterwärmepumpe bei einer Kompressordrehzahl von 96 rps (links) und der Trinkwasserwärmepumpe (rechts).	33
Abbildung 16: WP-Arbeitszahlen des Booster-Konzepts für das Gebäude HWB 45 kWh/(m ² a) für verschiedene Niedertemperaturniveaus (Boosterwärmepumpe: 2,4 kW (W20/W45), NT-Wärmepumpe: 9,5 kW (A0/W45)).	35

Abbildung 17: Nutzwärme und Stromverbräuche für alle vier Systemvarianten für das Gebäude mit HWB 45.....	36
Abbildung 18: Vergleich der Wärmeverluste aller Systemkonzepte (HWB 45).....	36
Abbildung 19: Gesamtstromverbräuche der Systemkonzepte für alle Dämmstandards	37
Abbildung 20. Demoprojekt in der Linzerstrasse, Wien; Lage der sieben Gebäude laut Google Maps.	38
Abbildung 21: Platzangebot für Wärmepumpen in den Wohnungen (linke drei), beispielhafte Platzierung anhand eines Prototyps (rechts). Bildquelle: UIBK / iDM	39
Abbildung 22. Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit Speicher.....	40
Abbildung 23. Fassadenintegrierte Verdampfereinheit.....	40
Abbildung 24. Komfortlüftungsgerät aerosilent alpha.....	42
Abbildung 25. Prototyp Holzfertigteilfassade mit integrierter Lüftung und Luft-Wasser Wärmepumpe.	44
Abbildung 26. Serienproduktion der werksseitig produzierten Fertigteilfassaden.	44
Abbildung 27: Hydraulisches Schema der semizentralen Wärmepumpenanlage mit zentralen Niedertemperatur Luft-Wasser Wärmepumpen und wohnungsweise Booster-Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasserbereitung.....	46
Abbildung 28: Hydraulisches Schema der gemischten Wärmepumpenanlage mit zentraler Raumheizung und wohnungsweise Warmwasserbereitung.....	47
Abbildung 29: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung.....	48
Abbildung 30: Hydraulisches Schema der semizentralen Wärmepumpenanlage mit zentralen Niedertemperatur Luft-Wasser Wärmepumpen und wohnungsweise Booster-Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasserbereitung.....	49
Abbildung 31: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung.....	50
Abbildung 32: Hydraulisches Schema der Wärmepumpenanlage mit zentraler Heizung und Warmwasserbereitung.....	51
Abbildung 33: Hydraulisches Schema der gemischten Wärmepumpenanlage mit zentraler Raumheizung und wohnungsweise Warmwasserbereitung.....	52
Abbildung 34. Ansicht der Stiege 5 während der Renovierungsarbeiten (a) und Detailansicht der Ostfassade der Stiege 5 mit vorgefertigten Holzrahmenmodulen (b).	53
Abbildung 35. Heizlast (HL) (max. täglich) im Vergleich zum Heizbedarf (HD) für das bestehende Gebäude (vor der Renovierung) und 12 verschiedene Renovierungsschritte (20 °C SP).	62
Abbildung 36. Erforderliche Vor- und Rücklauftemperatur (TF/TR) in Abhängigkeit vom HD unter der Annahme der vorhandenen Plattenheizkörper vom Typ 21 (20 °C SP).	62
Abbildung 37. Strombedarf für die verschiedenen Renovierungsstufen und WP-Systemkonzepte (links) A/W-HP (rechts) B/W-HP. (none: 134 kWh/(m ² a); BAU: 73 kWh/(m ² a); BEST: 27 kWh/(m ² a)).	64
Abbildung 38. Unterschied zwischen Investitionskosten (IK) und CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 37.....	64

Abbildung 39. Unterschied zwischen den prognostizierten jährlichen Investitionskosten (AIC) und den CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 37.	65
Abbildung 40. Unterschied zwischen den jährlichen Gesamtkosten (TAC) und den CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neuer Durchlauf-Gaskessel, nicht renovierter Fall), basierend auf Abbildung 35.	66
Abbildung 41. Erforderliche Größe eines A/W-HP für den Fall „nicht renoviert“ (links mit einem ALM 10-50), „BAU“ (Mitte mit zwei ALM 6-15) und „BEST“ (rechts mit zwei ALM 2-8), gemäß Tabelle 12.66	
Abbildung 42. Sankey-Diagramm des Basissystems mit hohem Anteil fossiler Brennstoffe (Öl, Gas) für den direkten Einsatz in Gebäuden (Heizkessel) und für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) sowie Fernwärmeanlagen (DHP) und bestehenden (ineffizienten) Gebäudebeständen mit hohem Raumheizungsbedarf (SH), Zentrale Wärmepumpen (cHP) in Fernwärmenetzen (DH) spielen ebenso wie dezentrale Wärmepumpen (HP) in Gebäuden für Raumheizung (SH) und Warmwasserbereitung (DHW) eine untergeordnete Rolle.	69
Abbildung 43. Übersicht über die Szenarien ausgehend von der Ausgangslage mit zwei verschiedenen Pfaden (individueller Stromverbrauch oder Fernwärme) und mit unterschiedlichen Ambitionsniveaus für Wärmepumpe (HP-Pfad) und Fernwärme (DH-Pfad) sowie für den Gebäudebestand; B: BAU, I: IMPROVE, A: AMBITION	70
Abbildung 44. Übergang von fossiler Heizung zu Wärmepumpen und Fernwärme sowie Dekarbonisierung von Strom und Fernwärme vom Basisszenario zum AMBITION-Szenario.....	75
Abbildung 45. Sankey-Diagramm des Energiesystems mit (a) umfassender thermischer Sanierung (AMBITION), 41.9 Tonnen CO ₂ (b) thermischer Sanierung (IMPROVE), 61.6 Tonnen CO ₂ und (c) ohne thermische Sanierung (BAU), 107.8 Tonnen CO ₂	76
Abbildung 46. Entwicklung der jährlichen CO ₂ -Emissionen (a), des Gesamtstrombedarfs (b), des Fernwärmebedarfs (c) und der Ausweitung von PV- und Windenergie (d) entsprechend den verschiedenen Pfaden (links: DH-Pfad und rechts: HP-Pfad) und entsprechend den verschiedenen Ambitionsniveaus des Gebäudebestands (Legende: Ambitionsniveau Energiesystem – Ambitionsniveau Gebäudebestand).....	77
Abbildung 47. Entwicklung des CO ₂ -Umrechnungsfaktors für Strom (links) und Fernwärme (rechts). 78	
Abbildung 48. Entwicklung der CO ₂ -Emissionen für ein einzelnes Gebäude, das auf einer Wärmepumpe umgestellt wird ((a) im Jahr 2025 und (b) im Jahr 2035) und optional in Kombination mit einer umfassenden thermischen Sanierung ((c) im Jahr 2025 und (d) im Jahr 2035).	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenndaten der Gebäude im Bestand.....	19
Tabelle 2: Überblick über die Sanierungsvarianten für die Hülle des Referenzgebäudes [26].....	21
Tabelle 3: Stündlicher Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung für das gesamte Gebäude. 23	
Tabelle 4: Randbedingungen abhängig vom Dämmstandard	31
Tabelle 5: Randbedingungen unabhängig vom Dämmstandard	32
Tabelle 6: Ermittelte Wärmepumpenheizleistungen für alle Systemkonzepte und Dämmstands.....	34

Tabelle 7. Technische Daten der entwickelten kompakten Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.....	40
Tabelle 8. Technische Daten des Lüftungsgeräts Aerosilent Alpha.	42
Tabelle 9: Auswahl zentraler, semi-zentraler, dezentraler und gemischter WP-basierter bzw. elektrischer Wärmeversorgung im Mehrgeschosswohnbau	59
Tabelle 10. Generische Kennlinie der Leistungszahl (COP) einer A/W-HP und einer B/W-HP.	60
Tabelle 11. Kostenfunktionen für die Haustechnikkomponenten [39].....	61
Tabelle 12. Heizlast (HL), Wärmepumpenleistung, Wärmepumpentyp und -größe sowie Geräuschemissionen (Schallleistungspegel) für drei ausgewählte Gebäudequalitäten; Bivalenz bei -2 °C; *) Schallleistungspegel gemäß https://www.produktdatenbank-get.at und Datenblatt (iDM); **) anstelle eines ALM 10-24 sind auch zwei ALM 6-15 möglich; ***) anstelle eines ALM 4-12 sind auch zwei ALM 2-8 möglich.	63
Tabelle 13. System-SPF der A/W- und B/W-HP für die verschiedenen Renovierungsfälle. Der SPF für den Fall „Keine Ren.“ wird mit neuen Heizkörpern berechnet, während er für „BAU“ und „BEST“ unter Verwendung der vorhandenen Heizkörper berechnet wird.	66
Tabelle 14. Eigenschaften des Gebäudebestands.....	70
Tabelle 15. Ausgangslage Heizsysteme im Gebäudebestand (BS), Anteil in %.	70
Tabelle 16. Ausgangslage Strommix, Anteil in %.....	71
Tabelle 17. Fernwärmesystem (DH) des Referenzsszenario, Anteil in %.	72
Tabelle 18. Einfluss des COP der Wärmepumpe auf den Strombedarf des Gebäudebestands (BS). ...	73
Tabelle 19. CO ₂ Emissionen von Brennstoffen, Stromerzeugung und Fernwärmequellen basierend auf [50].	74

Literaturverzeichnis

- [1] M. Gustafsson, G. Dermentzis, J.A. Myhren, C. Bales, F. Ochs, S. Holmberg, W. Feist, Energy performance comparison of three innovative HVAC systems for renovation through dynamic simulation, *Energy Build.* 82 (2014) 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.059>
- [2] E. Sibille, F. Ochs, R. Pfluger, Planning Guidelines and Product Development for Air Supply Distribution using Active Overflow Elements in Apartment Buildings, in: *Build. Simul.*, 2017. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.024>
- [3] M. Gustafsson, C. Dipasquale, S. Poppi, A. Bellini, R. Fedrizzi, C. Bales, F. Ochs, M. Sié, S. Holmberg, Economic and environmental analysis of energy renovation packages for European office buildings, *Energy Build.* 148 (2017) 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.079>
- [4] C. Dipasquale, R. Fedrizzi, A. Bellini, M. Gustafsson, F. Ochs, C. Bales, Database of energy, environmental and economic indicators of renovation packages for European residential buildings, *Energy Build.* 203 (2019) 109427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109427>
- [5] G. Dermentzis, F. Ochs, A. Thuer, W. Streicher, Supporting decision-making for heating and distribution systems in a new residential district - An Austrian case study, *Energy*. 224 (2021) 120141. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120141>
- [6] F. Ochs, R. Fedrizzi, C. Bales, G. Dermentzis, D6.7-Guidelines on Systemic Approach and Checklist Development of Systemic Packages for Deep Energy Renovation of Residential and Tertiary Buildings including Envelope and Systems iNSPiRe www.inspirefp7.eu Project Title:

Development of Systemic Packages f, 2016. www.inspirefp7.eu.

- [7] F. Ochs, P. Krimbacher, D. Siegele, W. Feist, Niedertemperaturheizung in Kombination mit einer dezentralen Boiler-Wärmepumpe, in: BauSIM, 2014.
- [8] D. Siegele, F. Ochs, W. Feist, Novel speed-controlled exhaust-air to supply-air heat pump combined with a ventilation system, *Appl. Therm. Eng.* 162 (2019) 114230. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114230>
- [9] Siegele, Dietmar, F. Ochs, A facade-integrated Multi-Source Heat Pump in Combination with a Ventilation System for Heating and Cooling, in: *Build. Simulat.*, 2019. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210637>
- [10] G. Dermentzis, F. Ochs, D. Siegele, W. Feist, Renovation with an innovative compact heating and ventilation system integrated into the façade – An in-situ monitoring case study, *Energy Build.* 165 (2018) 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.054>
- [11] G. Dermentzis, F. Ochs, W. Feist, A micro-heat pump combined with mechanical ventilation including heat recovery-simulation and in situ monitoring, in: *Heat Pump Conf.*, 2017.
- [12] T. Calabrese, F. Ochs, D. Siegele, G. Dermentzis, Compact ventilation and heat pump with recirculation air for renovation of small apartments, in: *CLIMA*, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019111010>
- [13] F. Ochs, D. Siegele, G. Dermentzis, W. Feist, Prefabricated timber frame façade with integrated active components for minimal invasive renovations, in: *Int. Build. Phys. Conf.*, Elsevier Ltd, 2015: pp. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.115>
- [14] W. Monteleone, F. Ochs, C. Drexel, M. Rothbacher, Modular split-type heat pump with compact and silent façade-integrated outdoor unit, in: *Cold Clim. HVAC Energy*, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124606008>
- [15] F. Ochs, D. Siegele, T. Calabrese, G. Dermentzis, Deep Renovation of Multi-Family-Houses with Compact Heat Pumps, in: *ISEC*, 2018.
- [16] E. Haselsteiner, plusFASSADEN Internationaler Know-how-und Wissenstransfer über “intelligente Fassadensysteme” für österreichische AkteurInnen und KompetenzträgerInnen, Eigentümer, *Berichte aus Energie- und Umweltforschung 50/2011*, Herausgeber und Medieninhaber: BMVIT, 2011. <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>.
- [17] T.N. Aynur, Variable refrigerant flow systems: A review, *Energy Build.* 42 (2010) 1106–1112. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.024>
- [18] H. Cheung, J.E. Braun, Performance comparisons for variable-speed ductless and single-speed ducted residential heat pumps, *Int. J. Refrig.* 47 (2014) 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.019>
- [19] H. Blervaque, P. Stabat, S. Filfli, M. Schumann, D. Marchio, Variable-speed air-to-air heat pump modelling approaches for building energy simulation and comparison with experimental data Variable-speed air-to-air heat pump modelling approaches for building energy simulation and comparison with experimental data, *J. Build. Perform. Simul.* 9 (2016) 210–225. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1030862>.
- [20] G. Dermentzis, F. Ochs, Detailed Monitoring Analysis of two Residential NZEBs with a Ground-Water Heat Pump with Desuperheater, in: *Int. High Perform. Build. Conf. Sch.*, 2018. <https://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/291>.

- [21] D. Prando, A. Prada, F. Ochs, A. Gasparella, M. Baratieri, Analysis of the energy and economic impact of cost-optimal buildings refurbishment on district heating systems, *Sci. Technol. Built Environ.* 21 (2015) 876–891. <https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1040343>
- [22] F. Ochs, G. Dermentzis, W. Feist, Minimization of the residual energy demand of multi-storey Passive Houses - Energetic and economic analysis of solar thermal and PV in combination with a heat pump, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014: pp. 1124–1133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.127>
- [23] M. Magni, F. Ochs, P. Bonato, M. D’Antoni, D. Geisler-moroder, S. De Vries, Comparison of Simulation Results for an Office Building Between Different BES Tools – The Challenge of Getting Rid of Modeller Influence and Identifying Reasons for Deviations, in: *Proc. 16th IBPSA Conf.*, Rome, 2019: pp. 1475–1482. <https://doi.org/https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210834>
- [24] G. Dermentzis, F. Ochs, M. Gustafsson, T. Calabrese, D. Siegele, W. Feist, C. Dipasquale, R. Fedrizzi, C. Bales, A comprehensive evaluation of a monthly-based energy auditing tool through dynamic simulations, and monitoring in a renovation case study, *Energy Build.* 183 (2019) 713–726. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.046>

Abkürzungsverzeichnis

AIC	Annual Investment Cost (DE: Jährliche Investitionskosten)
AL	Außenluft
BF	Beladefenster
BGF	Bruttogeschossfläche
BHX	Brine Heat Exchanger (DE: Erdwärmetauscher)
BS	Building Stock (DE: Gebäudebestand)
COP	Coefficient of Performance
DE	Direct Electric Heating (DE: Elektroheizung)
DH	District Heating (DE: Fernwärme)
DHP	District Heating Plants (DE: Fernwärmeanlagen)
DHW	Domestic Hot Water (DE: Trinkwarmwasser)
EB	E-Boiler
EBF	Energiebezugsfläche
EPBD	European Building Performance Directive
FriWa	Frischwasserstation
HD	Heating Demand (DE: Heizwärmebedarf)
HL	Heizlast
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatechnik
HP	Heat Pump (DE: Wärmepumpe)
HWB	Heizwärmebedarf
IC	Investment Cost (DE: Anschaffungskosten)
JAZ	Jahresarbeitszahl
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MC	Maintenance Cost (DE: Wartungskosten)
MVHR	Mechanical Ventilation with Heat Recovery (DE: Mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung)
NF	Nutzfläche

NT	Niedertemperatur
nZEB	Niedrigsternergiegebäude
NZEB	Nullenergiegebäude
OC	Operational Cost (DE: Betriebskosten)
PEB	Positive Energy Building (DE: Plusenergie-Gebäude)
PED	Positive Energy Districts (DE: Plusenergie-Stadtteile)
PHPP	Passive House Planning Package
PV	Photovoltaik
RE	Renewable Energies (DE: Erneuerbare Energien)
RH	Raumheizung
RL	Rücklauf
SH	Space Heating (DE: Raumheizung)
SP	Setpoint
SPF	Seasonal Performance Factor
TAC	Total Annual Costs (DE: Jährliche Gesamtkosten)
TR	Thermal Renovation (DE: Thermische Sanierung)
TWW	Trinkwarmwasser
VL	Vorlauf
VRF	Variable Refrigerant Flow System
WDVS	Wärmedämmverbundssystem
WH	Wiederaufheizleistung
Whg	Wohnung
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WüSt	Wärmeübergabestation
WW	Warmwasser

<i>C</i>	Carnot
<i>El</i>	Elektrisch
<i>Kond</i>	Kondensation
<i>Max</i>	Maximum
<i>Min</i>	Minimum
<i>Nom</i>	Nominal
<i>Ref</i>	Referenz
<i>Sim</i>	Simulation
<i>Sys</i>	System
<i>Th</i>	Thermisch

