

# SüdSan

Sozialverträgliche und klimazielfunktionale Sanierung  
zweier Mehrfamilienhäuser als Modell für die Sanierung  
der Südtiroler-Siedlung Bludenz

---

Themendokumentation

**Einsatz von Wärmepumpen in der  
Sanierung von Mehrwohnhäusern**

---

## **Einsatz von Wärmepumpen in der Sanierung von Mehrwohnungshäusern**

Innsbruck, November 2025

Assoz. Prof. Dr.-Ing. Fabian Ochs

Elisa Venturi

Mara Magni

Universität Innsbruck, Energieeffizientes Bauen

Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck

Herausgeber:

Energieinstitut Vorarlberg, Fachbereich Energieeffizientes Bauen

CAMPUS V, Stadtstraße 33

6850 Dornbirn, Österreich

Tel. +43 (0)5572 / 31 202-0

[info@energieinstitut.at](mailto:info@energieinstitut.at)

# Inhalt

1	Einführung .....	4
1.1	Wärmeversorgung in Bestands-Geschoßwohnbauten.....	4
1.2	Integraler Planungsansatz .....	7
1.3	Heizlast, Wärmeabgabe und Vorlauftemperatur .....	12
2	Wärmepumpensysteme .....	17
3	Anwendungsbeispiel des integralen Planungsansatzes .....	29
3.1	Gebäudebeschreibung.....	29
3.2	Methode .....	30
3.3	Ergebnisse .....	36
4	Fazit .....	44
	Literatur .....	47
	Abbildungen.....	50
	Tabellen.....	52

# 1 Einführung

## 1.1 Wärmeversorgung in Bestands-Geschoßwohnbauten

Wärmepumpen werden eine zentrale Rolle in der zukünftigen Wärmeversorgung mehrgeschossiger Wohngebäude einnehmen – insbesondere, weil ein erheblicher Teil dieser Gebäude in Gebieten liegt, die nicht mit Fernwärme erschlossen werden können. In diesen Gebieten stellen Wärmepumpen oft die einzige realistische Option für eine lokal emissionsfreie und strombasierte Wärmeerzeugung dar. Sie ermöglichen die Nutzung von Umwelt- oder Abwärmequellen und bieten damit eine effiziente sowie langfristig wirtschaftliche Lösung zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands.

Darüber hinaus gewinnen Wärmepumpen auch innerhalb von Fernwärmeversorgungsgebieten an Bedeutung: Einerseits tragen zentrale Großwärmepumpen zunehmend zur Dekarbonisierung der Fernwärmenetze bei und andererseits ermöglichen dezentrale Wärmepumpen auch Kühlung bzw. Klimatisierung. Dies unterstreicht die technologische Flexibilität und Skalierbarkeit der Wärmepumpe: Sie kann sowohl dezentral auf Gebäudeebene als auch zentral als Bestandteil von leitungsgebundenen Versorgungssystemen eingesetzt werden [1].

Im Gegensatz dazu wird der Einsatz von Biomasseheizsystemen in Mehrfamilienhäusern nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltig gewonnener Biomasse und ihre strategische Bedeutung für schwer zu elektrifizierende Sektoren wie industrielle Hochtemperaturprozesse widersprechen einer breitflächigen Nutzung im verdichteten Wohnbau. Dies wird z.B. auch im Fachbericht von C. Drexel [2] deutlich, der auf die Notwendigkeit einer gezielten Allokation dieser Ressource hinweist, um Versorgungsengpässe und Zielkonflikte in der Energiewende zu vermeiden.

Die Wärmeversorgung von unsanierten Geschoßwohnbauten in Österreich ist sehr unterschiedlich und hängt stark von regional üblichen Versorgungsstrategien zur Zeit der Gebäudeerrichtung bzw. der gebäudetechnischen Nachrüstung ab. Es gibt Gebäude, die über zentrale Systeme zur Raumheizung und Warmwasserbereitung verfügen. Diese basieren meist auf einem Gaskessel, Ölkessel oder Fernwärme. Weiters ist auch die Kombination aus zentraler Raumheizung und dezentraler Warmwasserbereitung (z.B. über E-Boiler/Nachtstromspeicher oder Gasdurchlauferhitzer) in Bestandsgebäuden anzutreffen.

Darüber hinaus gibt es immer noch eine relativ hohe Zahl von dezentral beheizten Wohnungen inkl. dezentraler Warmwasserbereitung basierend auf raumweisen Einzelöfen (Öl, Gas, Elektrospeicheröfen, feste Brennstoffe) sowie Wohnungsöfen (wohnungswise Öl- und Gasöfen). Aufgrund des fehlenden Wärmeverteils- und abgabesystems ist die Umstellung auf ein zentrales System im Zuge einer Gebäudesanierung in der Regel sehr schwierig bis unmöglich. Beispiele für solch eine dezentrale Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern sind die Südtiroler-Siedlung in Bludenz (Alpenländische, FFG Projekt SüdSan) und die Gebäude in der Linzerstraße in Wien (Sozialbau, FFG Projekt PhaseOut).

Gerade für die vorherrschenden Rahmenbedingungen der dezentralen Wärmeversorgung sind aktuell praktisch keine angepassten, dezentralen (wohnungswisen) Wärmeversorgungs-lösungen auf Basis erneuerbarer Energieträger verfügbar. Um dieses Marktsegment zu erschließen, müssen also weiterführende Entwicklungen getätigt werden.

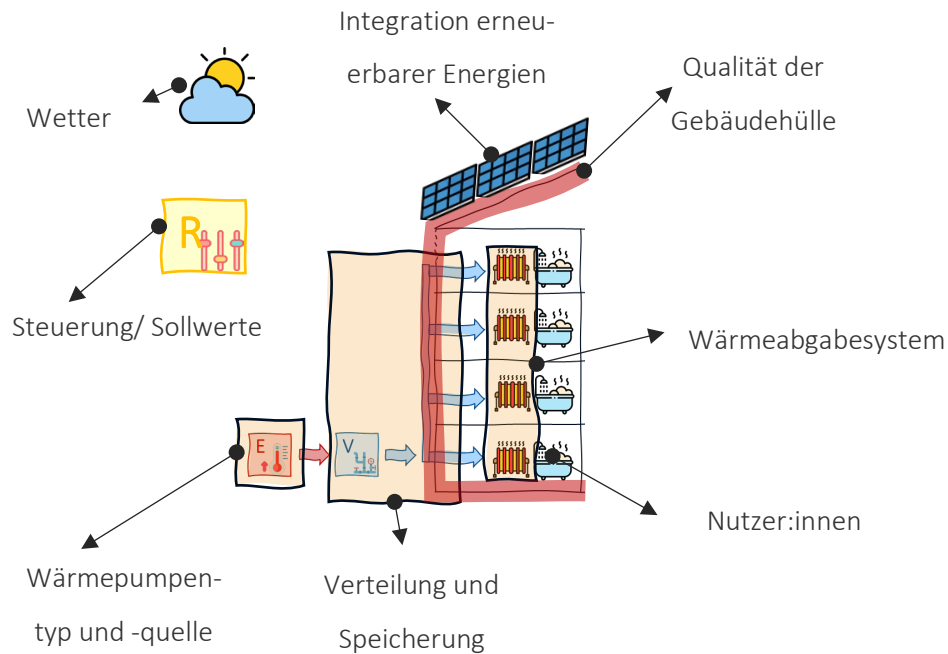
Die Umsetzung einer umfassenden Sanierung im Geschloßwohnbau mit zentraler Wärmeversorgung und die Integration von Elementen hin zu „Plus-Energie“ ist zwar komplex und anspruchsvoll, jedoch sind die notwendigen Komponenten wie z.B. Wärmespeicher, Verteilsysteme, Wärmeübergabestation bzw. Frischwasserstation am Markt verfügbar. Einige Aspekte – wie das limitierte Platzangebot für Installationen oder der Anspruch, die Belastung der BewohnerInnen während des Sanierungsprozesses zu minimieren – erschweren den Prozess bei der wohnungsweisen Sanierung und Wärmeversorgung erheblich. Aus diesem Grund werden in solchen, meist unsanierten Wohnungen zunehmend rein strombasierte Heizlösungen, beispielsweise in Form von Infrarotpaneelen, eingesetzt, da sie sich vergleichsweise einfach und ohne großen baulichen Aufwand realisieren lassen.

Diese für die Energiewende negative Entwicklung wird dadurch verstärkt, dass seit 2016 in Österreich eine überwiegend elektrische Heizung gemäß OIB-Richtlinie 6 möglich ist. Das ist nicht zuletzt ein wesentlicher Aspekt für eine Zunahme an Anbietern für Infrarot-Heizungen in den letzten Jahren. Elektrische Heizungen und Trinkwarmwasser-Boiler sind jedoch sowohl aus thermodynamischer Sicht als auch aus ökologischen Gründen nachteilig – insbesondere im Winterhalbjahr, wo eine direkte Versorgung aus erneuerbaren Energieträgern nicht absehbar ist. Besonders problematisch ist der Einsatz von elektrischen Direktheizungen, da sie deutlich höhere Lasten im Winter verursachen und da die spezifischen Emissionen des Energieträgers Strom aktuell und in Zukunft im Winter höher sind als im Sommer [3]. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken und insbesondere auch die kombinierte Sanierung von thermischer Hülle und Gebäudetechnik voranzutreiben, wurde bereits in der Vergangenheit an angepassten Technologieentwicklungen gearbeitet.

Einen Ansatz bilden sogenannte Wärmepumpen-Kompaktgeräte, die eine Wärmerückgewinnung aus der Abluft und eine kleine Fortluftwärmepumpe für die Heizung und die Brauchwassererwärmung enthalten. Die kleineren Kompaktgeräte auf dem Markt, allesamt für Einfamilienhäuser entwickelt, haben eine Heizleistung zwischen 1,4 und 2 kW. Aufgrund der großen Luftmengen von 150 bis 350 m<sup>3</sup>/h sind diese Produkte für Standardwohnungen im Geschosswohnbau deutlich überdimensioniert. Auch die Geräteleistungen und -abmessungen machen diese Produkte für kleine Wohnungen ungeeignet. Für die Warmwasserbereitung sind weiters sogenannte Boiler-Wärmepumpen verfügbar. Neben sehr geringer Effizienz benötigen sie wertvollen Platz in der Wohnung. Angepasste Kleinst-Wärmepumpen, wie sie für die wohnungsweise Sanierung gebraucht werden, wurden bis jetzt hauptsächlich in Pilotanwendungen eingesetzt.

Die optimale Lösung für eine Sanierung und einen Heizungstausch hängt vom jeweiligen Projektziel ab und kann je nach Vorgaben und Randbedingungen variieren. Typischerweise erfolgt die Optimierung entweder auf maximale Effizienz bzw. minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen bei vorgegebenen maximalen Kosten oder umgekehrt auf minimale Kosten bei vorgegebenem Ziel für Effizienz oder CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bezogen auf den gesamten Lösungsraum ergeben sich entsprechend suboptimale Lösungen, die nicht weiter betrachtet werden sollen, als auch sogenannte Pareto-optimale Lösungen. Die Auswahl einer geeigneten Lösung aus der Pareto-Front erfordert dann eine individuelle Gewichtung.

Abbildung 1 zeigt schematisch die Vielzahl an Komponenten und Elementen, die bei einer energetischen Sanierung berücksichtigt werden müssen und verdeutlicht, dass die Suche nach der optimalen Sanierungslösung relativ schwierig ist.



**Abbildung 1: Schema der Komponenten und Elemente, die bei der integralen Planung einer Sanierung mit Umstellung auf eine wärmepumpenbasierte Heizung berücksichtigt werden müssen**

Die Randbedingungen können individuell sehr unterschiedlich sein. So war es z.B. im Rahmen des FFG Projekts PhaseOut [4] möglich, jede der 42 Wohnungen in den sieben identischen Gebäuden zu besichtigen (d.h. sechs Wohnungen pro Gebäude). Bei dieser detaillierten Untersuchung wurde deutlich, dass selbst in identischen Wohnungen erhebliche Unterschiede bestehen können. Ein Großteil (82 %) der Wohnungen war mit dezentralen (wohnungsweisen) Gasheizungen für Heizung und Warmwasserbereitung ausgestattet. Darüber hinaus verfügten sechs der Wohnungen über Elektroheizkörper, zwei über Gaskonvektoren und Elektroboiler (E-Boiler) und eine über eine Nachtspeicherheizung in Kombination mit einem E-Boiler. Die Anordnung der Gaskessel war in den Wohnungen sehr unterschiedlich. Während sich 50 % der Heizkessel im Badezimmer befanden, waren andere im Flur, im Abstellraum, in der Küche oder sogar im Wohnzimmer zu finden. Auch die Heizkörper in den Wohnungen, die mit Gaskesseln beheizt werden, unterschieden sich erheblich in Größe, Art und Anordnung innerhalb der Wohnung. Ein ähnliches Bild zeigte sich im FFG Projekt SüdSan in der Südtiroler-Siedlung Bludenz.

## 1.2 Integraler Planungsansatz

Trotz der offensichtlichen Notwendigkeit, flächendeckend auf wärmepumpenbasierte Heizungen umzustellen, kommt die Umsetzung in bestehenden Wohngebäuden nur langsam voran.

Zu den wichtigsten technischen Hindernissen, die häufig genannt werden, gehören hohe Vorlauftemperaturen bei Sanierungsprojekten (was zu geringer Effizienz führt), die notwendige hohe Wärmepumpenkapazität mit entsprechender Lärmbelästigung (insbesondere bei Luft-Wärmepumpen) und Platzmangel im oder in der Umgebung des Gebäudes. Im ungünstigsten Fall können diese Probleme dazu führen, dass eine Wärmepumpenheizung nicht umgesetzt wird und weiterhin auf fossile Brennstoffe zurückgegriffen wird.

Ein softwaregestützter, integrierter Planungsprozess kann eine zentrale Rolle bei der Überwindung dieser Barrieren spielen. Die Entwicklung eines ganzheitlichen Workflows könnte ein geeignetes Mittel sein, um optimale Sanierungslösungen zu finden. Ein solcher Ansatz würde es ermöglichen, ökologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen, spezifische Randbedingungen zu integrieren und alle wesentlichen Interessengruppen, wie Bauträger, Wohnungsbaugesellschaften und Hausverwaltungen, einzubeziehen.

Die Auswahl der am besten geeigneten Sanierungsvariante für ein konkretes Gebäude hängt von einer Vielzahl technischer, räumlicher und wirtschaftlicher Einflussfaktoren ab.

Zu den wichtigsten zählen:

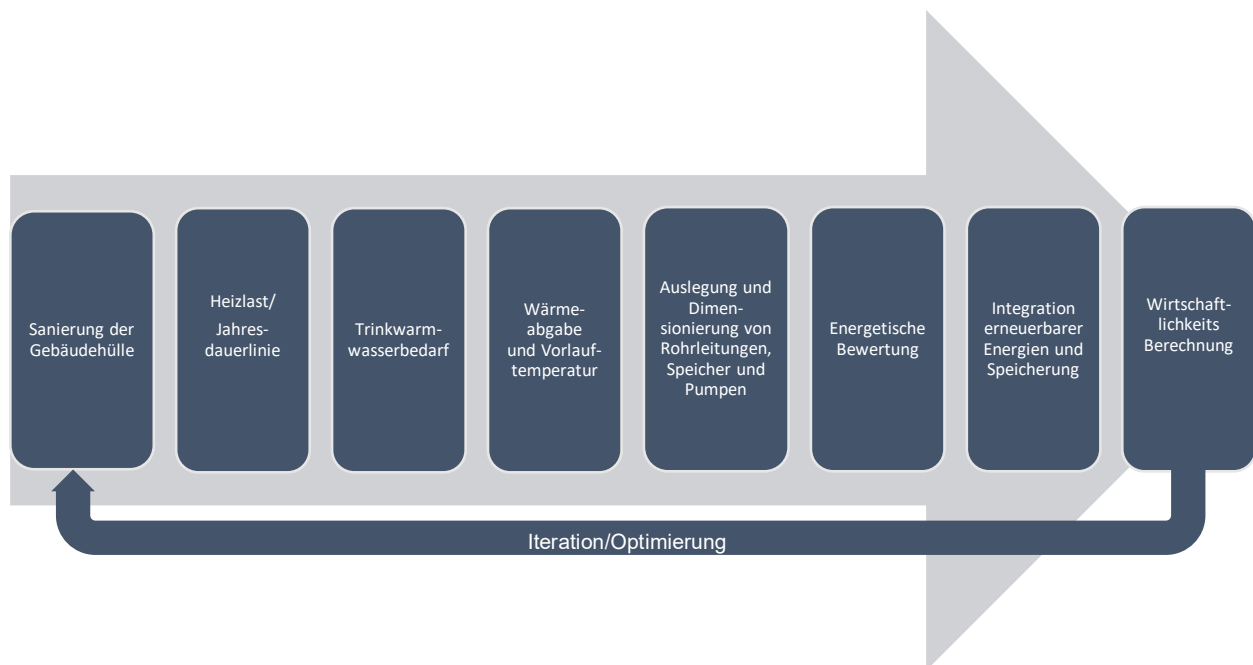
- das bestehende Wärmeversorgungssystem,
- der prognostizierte Energiebedarf und die Heizlast nach erfolgter Sanierung,
- die Platzverhältnisse im Keller und in den Wohnungen (z.B. für Technikzentralen, Schächte und Verteilleitungen),
- die schalltechnischen Anforderungen,
- die Investitionskosten sowie
- die Betriebs- und Lebenszykluskosten.

Eine fundierte Entscheidungsfindung sollte im Rahmen eines ganzheitlichen und durchgängigen Planungsprozesses erfolgen. Dabei kann ein digital unterstützter Workflow die strukturierte Bewertung unterschiedlicher Systemvarianten unter Berücksichtigung der maßgeblichen Einflussgrößen erheblich erleichtern. Er unterstützt Fachplaner\*innen und Entscheidungsträger\*innen dabei, technisch realisierbare und wirtschaftlich sinnvolle Lösungen zu identifizieren.

Der vorgeschlagene Workflow befindet sich in kontinuierlicher Weiterentwicklung und wird aktuell in mehreren Forschungs- und Praxisprojekten angewendet und erprobt. Durch die Optimierung des Entscheidungsprozesses kann die Umstellung auf Wärmepumpen im Zuge der Sanierung von Mehrfamilienhäusern deutlich erleichtert und effizienter sowie kostengünstiger gestaltet werden.

Ziel des integralen Planungsprozesses ist es, das globale energetische und wirtschaftliche Optimum in Bezug auf die thermische Sanierung und das HLK-System unter Berücksichtigung der Randbedingungen (d.h. des Klimas) und der Einschränkungen (d.h. Platzverfügbarkeit, Beschränkung der Wärmepumpengröße aufgrund von Lärmemissionen und Kältemittelmenge, wirtschaftliche Restriktionen) des Projekts zu ermitteln.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die Schlüsselemente, die in einem solchen Arbeitsablauf einbezogen und berücksichtigt werden müssen. Der Workflow soll die Berechnung des Heizwärmebedarfs und der Heizlast des Gebäudes für verschiedene Sanierungsvarianten der Gebäudehülle ermöglichen. Außerdem müssen der Trinkwarmwasserbedarf und die für die Trinkwarmwasserbereitung erforderliche Spitzenleistung auf der Basis der Einwohnerzahl und des Gleichzeitigkeitsfaktors berechnet werden.



**Abbildung 2: Elemente des integralen Planungsprozesses**

Für die Bewertung des Wärmeabgabesystems ist eine raumweise Betrachtung erforderlich. Der kritische Raum, d.h. der Raum mit dem kritischsten Verhältnis der Heizlast bezogen auf die Leistung der vorhandenen Wärmeabgabeanlage, kann sich in Abhängigkeit von verschiedenen Sanierungsmaßnahmen oder bei einem Wechsel der Wärmeabgabeanlage ändern. Die Vorlauftemperatur kann dann entsprechend dem kritischsten Raum berechnet werden. Um dies zu erleichtern, sollte der Workflow mit einer Datenbank von Heizkörpern verknüpft werden (siehe auch nächster Abschnitt).

Der Workflow sollte auch die Möglichkeit bieten, verschiedene Erzeugungs- und Verteilungssysteme zu bewerten. Dazu muss er in der Lage sein, die Auslegung und Dimensionierung

verschiedener Verteilersysteme (siehe Abschnitt 2 für einen Überblick über mögliche Verteilungssysteme) schnell zu erstellen und die Leistung verschiedener Wärmepumpen-Typologien zu bewerten. Außerdem muss die Berücksichtigung von erneuerbaren Energiesystemen (z.B. Photovoltaik) und Energiespeichern (z.B. Batterien oder thermische Speicher) im Workflow bewertet werden können. Nachdem verschiedene Systeme energetisch berechnet wurden, müssen sie in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und den CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet werden, um die endgültige Entscheidung für die optimale Sanierung zu unterstützen.

Unterschiedliche Lösungen führen zu unterschiedlichen Investitionskosten, haben eine unterschiedliche Nutzungsdauer und ergeben unterschiedliche Wartungs- und Betriebskosten. Um alle diese Aspekte zu berücksichtigen, wird die Annuitätenmethode angewendet. Die Annuität (A) kann dann unter Berücksichtigung der Gesamtinvestitions- und Installationskosten (IK) über eine Referenz-Nutzungsdauer (N) berechnet werden. Die Annuität ermöglicht den Vergleich der Kosteneffizienz verschiedener Investitionen, die eine ungleiche Nutzungsdauer haben unter Berücksichtigung vom realen Zinssatz (r). Gleichung (1) zeigt die Berechnung der Annuität:

$$A = \frac{IK \cdot r}{1 - (1 + r)^{-N}} \quad (1)$$

Die jährlichen Gesamtkosten (K) einer spezifischen Lösung berücksichtigen zusätzlich die jährlichen Wartungskosten (WK) und die Betriebskosten (BK) (z.B. Gas und/oder Strom)

$$K = A + WK + BK \quad (2)$$

Darüber hinaus sollte das Instrument die Möglichkeit bieten, Teil-Sanierungen des Gebäudes zu bewerten, die dazu beitragen würden, mit zu hohen Anfangsinvestitionskosten umzugehen.

Bei der Gesamtbewertung der verschiedenen untersuchten Lösungen sollten sowohl die technischen als auch die nicht-technischen Vor- und Nachteile jeder Lösung in die Entscheidung einfließen, damit der Entscheidungsträger alle erforderlichen Informationen erhält, um eine sachgerechte Entscheidung treffen zu können.

Das oben beschriebene Verfahren zur integralen Planung kann zur Bewertung verschiedener Varianten für die thermische Sanierung und den Heizungstausch angewendet werden. Als Ergebnis sollte sich ein Technologieranking bezüglich Effizienz (d.h. CO<sub>2</sub>-Einsparung und (Lebenszyklus-)Kosten) ergeben. Der Workflow und die Auswahl der zu bewertenden Varianten

ist jedoch abhängig von individuellen Randbedingungen und Vorgaben. In Abhängigkeit von den jeweiligen Ausgangssituationen und Vorgaben könnten unterschiedliche Vorgehensweisen erforderlich sein. So könnte eine Vorgabe beispielsweise den Heizungstausch möglichst ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle vorsehen, eine andere Vorgabe könnte thermische Sanierungen nach OIB vorsehen, und eine dritte Vorgabe könnte maximale Effizienz (EnerPHit-Sanierung) vorsehen. Entsprechend dieser Vorgaben würden sich die zu untersuchenden Varianten unterscheiden und der Workflow würde ggf. jeweils eine andere optimale Variante ergeben.

Es gibt viele Elemente, die im Rahmen dieser Analyse Einfluss haben bzw. variiert werden können (d.h. Klima und Nutzer\*innenverhalten sowie Qualität der Gebäudehülle, Art des Abgabesystems, Verteil- und Speichersystem, Art und Typ der Wärmepumpe, Integration erneuerbarer Energien und nicht zuletzt Sollwerte sowie Steuerung/Regelung), wie in Abbildung 1 dargestellt. Um die Anzahl der analysierten Kombinationen zu reduzieren und damit die Bearbeitungs- und Berechnungszeiten in einem akzeptablen Rahmen zu halten, kann man auf mehrere Arten vorgehen:

1. Untersuchung und Vergleich von vordefinierten Sanierungspaketen.
2. Eindimensionale Betrachtung (z.B. verschiedene Wärmepumpensysteme für eine Gebäudequalität oder verschiedene Varianten der thermischen Sanierung für ein Wärmepumpensystem)
3. Durchführung von mehrdimensionalen Parameterstudien (parametric sweep).

Sanierungspakete könnten dabei helfen, die optimale Lösung zu finden, indem unter den verschiedenen Paketen dasjenige ausgewählt wird, das am besten zu den Bedürfnissen des vorliegenden Falles passt (z. B. nur Austausch des Wärmeerzeugers, Teilsanierung der Gebäudehülle und Austausch des Wärmeerzeugers, vollständige Sanierung). Solche Sanierungspakete könnten auch die Planung einer Teilsanierung unterstützen, die in mehreren Schritten durchgeführt werden soll.

Für eine Auswahl von Varianten sollte schließlich eine Detailuntersuchung und Optimierung erfolgen. Dies könnte z.B. verschiedene Varianten der Rohrführung (Anzahl Steigstränge, Position Steigstränge) und Varianten der Wärmepumpeneinbindung (z.B. Kombispeicher, hydraulische Weiche, Fixtemperaturbeladung oder Schichtbeladung) beinhalten. Die Detailuntersuchung erfordert detaillierte Modelle und ist nicht Teil dieses Berichts.

### 1.3 Heizlast, Wärmeabgabe und Vorlauftemperatur

Die Implementierung und Förderung des Einsatzes von Wärmepumpen ist mit mehreren Herausforderungen verbunden. Neben den Schallemissionen betrifft dies insbesondere die geringe Effizienz von Wärmepumpen in Kombination mit Hochtemperaturheizkörpern.

Neue Wärmepumpen mit angepassten Kältemitteln ermöglichen den Einsatz auch bei höheren Vorlauftemperaturen [5]. Dennoch sinkt die Leistungszahl deutlich mit zunehmender Vorlauftemperatur (siehe z.B. [6], Abbildung 58 für einen Vergleich der Leistungen von Wärmepumpen mit verschiedenen Kältemitteln bei niedrigen und mittleren Temperaturen). Darüber hinaus ist es wichtig zu betonen, dass die Effizienz von Wärmepumpen unter realen Betriebsbedingungen in der Regel etwas niedriger sind als die vom Hersteller angegebenen Leistungen unter stationären Bedingungen [7]. Außerdem trägt die korrekte Dimensionierung der Wärmepumpe auch zur Steigerung der Systemleistung bei, da eine überdimensionierte Wärmepumpe zu häufigen Ein- und Ausschaltzyklen führen kann, was Effizienzeinbußen zur Folge hat. Im Gegensatz dazu kann bei einer unterdimensionierten Wärmepumpe ein häufiger Einsatz von elektrischen Heizelementen (Backup) zu Reduktion der Systemeffizienz führen.

Für die Bestimmung des Heizwärmebedarfs des Gebäudes und der Heizlast der einzelnen Räume des Gebäudes können verschiedene Berechnungsmethoden verwendet werden. In einer frühen Planungsphase eignet sich z.B. das PHPP (Passivhaus-Projektierungspaket), ein Excel basiertes Tool, das auf der Norm ISO 13790:2008 [8] basiert (Monatsbilanzverfahren). Über viele Jahre hat sich gezeigt, dass es den Heizwärmebedarf eines Gebäudes ausreichend genau vorhersagen kann [9]. Darüber hinaus kann PHPP die Heizlast des Gebäudes berechnen, aber im Gegensatz zur Norm EN 12831-1 [10] nur für das Gesamtgebäude und Wärmegewinne werden berücksichtigt.

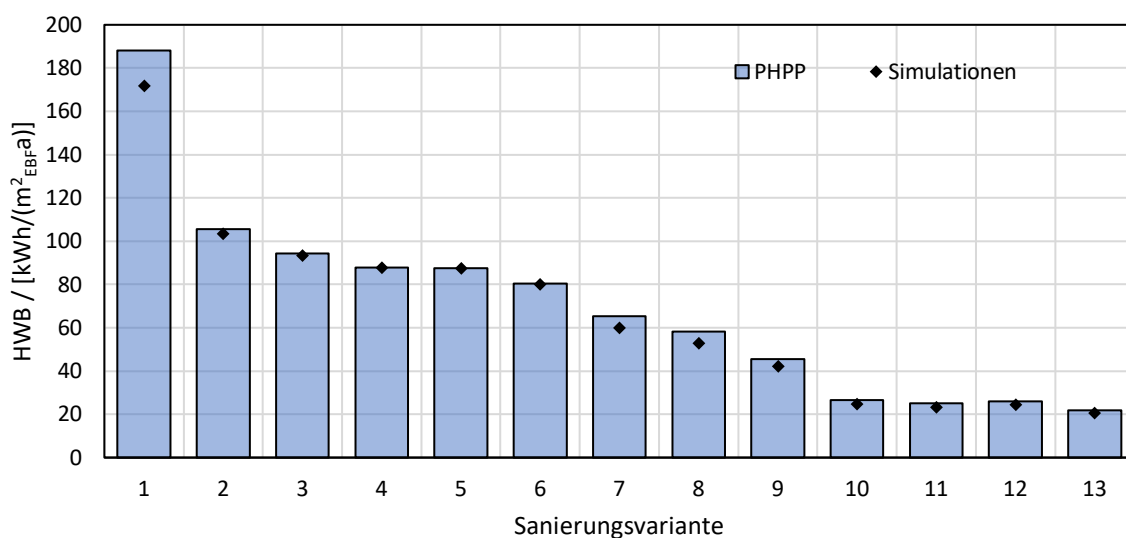
Es ist daher empfehlenswert, die Heizkörper gemäß der Norm EN 12831-1 [10] zu dimensionieren, während die Dimensionierung der Wärmepumpe anhand der Ergebnisse dynamischer Simulationen oder genauerer Berechnungen, z.B. mit dem PHPP, durchzuführen ist. Dies wird im Folgenden am Beispiel eines Mehrfamilienhauses (10 Wohnungen mit 732 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche, Klima: Innsbruck) gezeigt. Die Vorgehensweise ist in [11] beschrieben.

Tabelle 1 zeigt die Sanierungsvarianten, die für die exemplarische Berechnung des Heizwärmebedarfs, der Heizlast und der erforderlichen Vorlauftemperatur verwendet wurden. Die 13 Sanierungsvarianten reichen vom nicht renovierten Gebäude bis zum vollständig sanierten Gebäude und umfassen zahlreiche Zwischenstufen mit unterschiedlichen Teilsanierungen.

**Tabelle 1: Übersicht der Sanierungsvarianten**

Sanierungsvariante		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U-Dach		0.99	0.37	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
U-Wand N		1.05	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.21	0.21	0.21	0.14
U-Wand O		1.05	0.45	0.45	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
U-Wand S		1.05	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.21	0.21	0.21	0.21	0.14
U-Wand W	[W/(m <sup>2</sup> K)]	1.05	0.45	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.12	0.18	0.12
U-Boden		2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	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	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
U-Fenster E		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	0.80	0.80	0.80	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	[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
Ht'	[W/(m <sup>2</sup> envelope K)]	1.325	0.776	0.704	0.657	0.655	0.655	0.508	0.508	0.416	0.281	0.271	0.278	0.246
Lüftung	[1/h] <sub>equiv</sub>	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
Effizienz der Lüftungs-wärmerück-gewinnung	η [-]	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

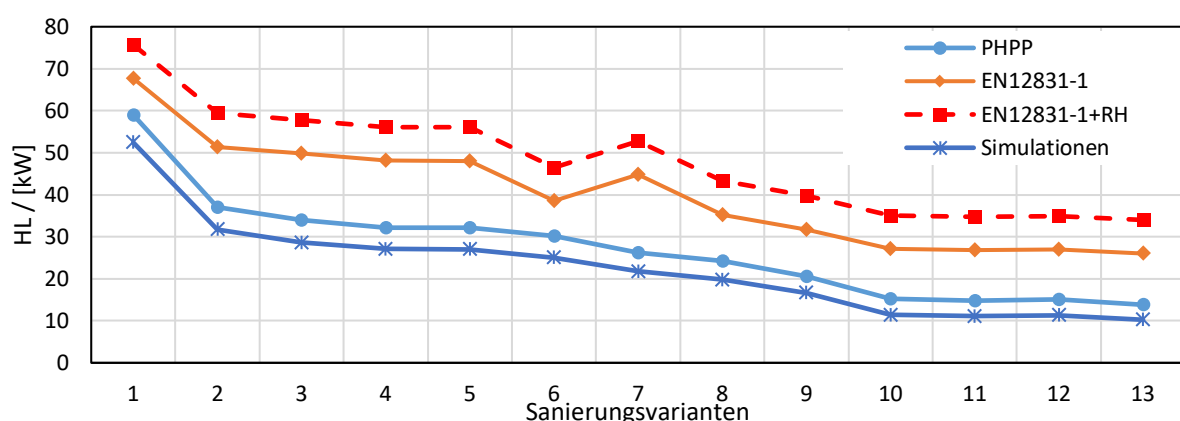
Abbildung 3 zeigt den mit dem PHPP berechneten Heizwärmebedarf (HWB) für das gesamte Gebäude der 13 betrachteten Sanierungsvarianten. Die Spannweite der Varianten umfasst den nicht sanierten Bestand bis zur EnerPHit-Sanierung [12]. Die Analyse der Daten legt nahe, dass der mit dem gebäudeweisen PHPP prognostizierte, jährliche HWB gut mit den jährlichen Ergebnissen der dynamischen Simulation übereinstimmt, wobei die relative Abweichung maximal 9% beträgt.



**Abbildung 3: Heizwärmebedarf, berechnet mit dem PHPP - gebäudeweise und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten.**

Abbildung 4 zeigt die Heizlast (HL) aller mit dem PHPP (gebäudeweise) berechneten Sanierungsvarianten, die nach der Norm EN 12831-1 (raumweise) berechnete HL des Gebäudes unter Berücksichtigung bzw. Nichtberücksichtigung der zusätzlichen Wiederaufheizleistung (RH) und die mittels dynamischer Simulation abgeleitete maximale stündliche HL. Die in Abbildung 4 dargestellte HL aus der dynamischen Simulation entspricht dem Maximum der (sortierten) HL (die maximale HL wird nur für wenige Stunden im Jahr benötigt). Es ist erwähnenswert, dass die vom gebäudeweisen PHPP vorhergesagte Heizlast im Durchschnitt -34% im Vergleich zu der nach EN 12831-1 berechneten Heizlast beträgt und -46%, wenn auch die Wiederaufheizleistung berücksichtigt wird. Dies ist dadurch begründet, dass in der Norm andere Bedingungen 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 Heizlast dar, was zumindest für längere Heizperioden ohnehin unwahrscheinlich ist.

Um eine Überdimensionierung des Heizsystems zu vermeiden, wird empfohlen, die Heizlast auch mittels dynamischer Simulation [13] oder unter Verwendung des PHPP zu berechnen (das nach [9] eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des dynamischen Simulationstools aufweist). Dies ist wichtig, um eine Verringerung des Wirkungsgrads der Wärmepumpe durch häufige „Ein-Aus“-Zyklen zu vermeiden. Hingegen wird für die Dimensionierung der Heizkörper empfohlen [13], eine raumweise Berechnung der Wärmelast 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 vom Volumen bzw. der Kapazität des Pufferspeichers und dem Betrieb der WP ab.



**Abbildung 4: HL berechnet mit dem PHPP (gebäudeweise) und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten**

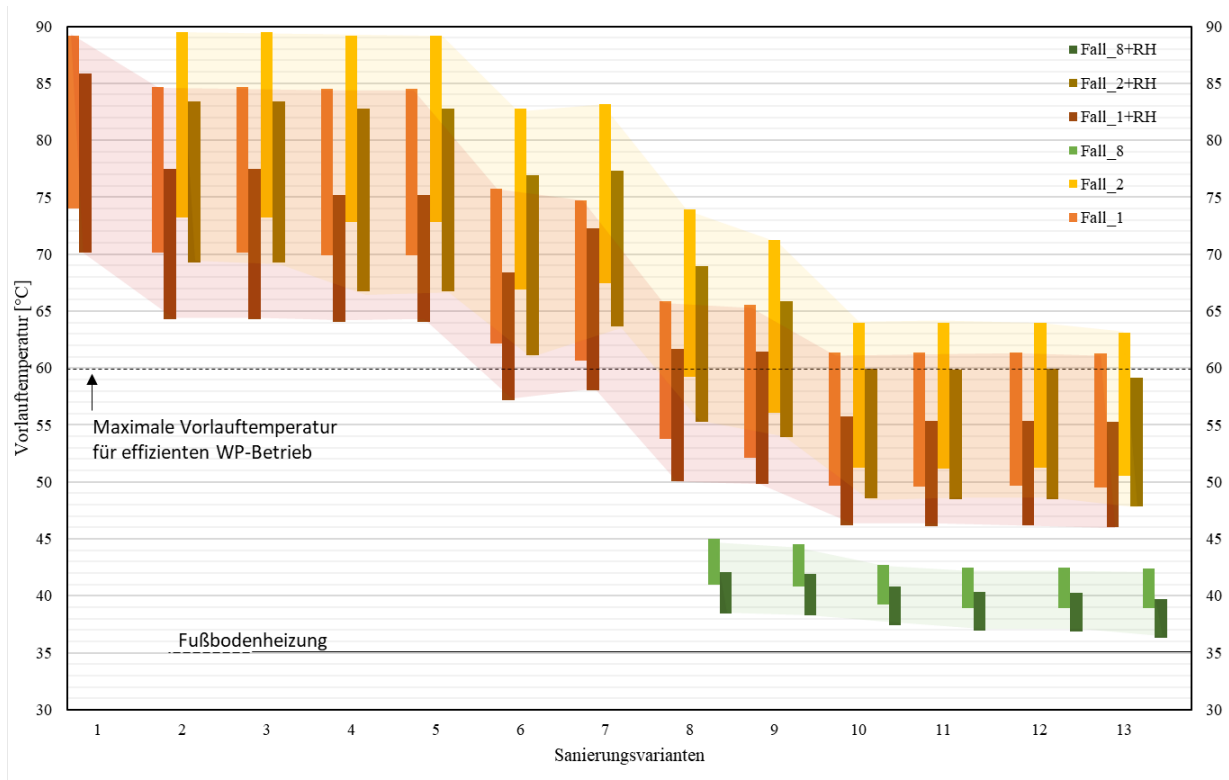
Abbildung 5 zeigt die mögliche Bandbreite der Vorlauftemperaturen für die verschiedenen Sanierungsvarianten unter der Annahme, dass die Heizkörper für bestimmte Sanierungsvarianten dimensioniert wurden:

- Sanierungsvariante 1 unter Berücksichtigung der zusätzlichen Wiederaufheizleistung aufgrund des intermittierenden Betriebs der Heizungsanlage oder nicht (d.h. Fall\_1+RH und Fall\_1 mit den Farben Rot und Orange),
- Sanierungsvariante 2 (d. h. Fall\_2+RH und Fall\_2 mit den Farben Braun und Gelb) und
- Sanierungsvariante 8 mit Niedertemperaturheizkörper (Fall\_8+RH und Fall\_8 mit den Farben Dunkel- und Hellgrün).

Jeder Fall wird durch eine Bandbreite der Temperatur anstelle eines Punktes dargestellt, da ein möglicher Bereich von Heizkörpern (d.h. mit unterschiedlichem Exponenten  $n$ ) mit verschiedenen Temperaturdifferenzen ( $\Delta T$ ) berücksichtigt und mit einem Bereich des Massenstroms betrieben wurde, der die Fließgeschwindigkeit zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s limitiert. Die Sanierungsvarianten, in denen die Heizkörper installiert werden, sind in dieser Arbeit beispielhaft gewählt (d.h. 1, 2, 8). In Wirklichkeit könnten die Heizkörper in jeder Sanierungsvariante ausgetauscht/installiert werden und könnten unter Berücksichtigung verschiedener Vorlauftemperaturen dimensioniert werden, was zu einem noch größeren Bereich möglicher Vorlauftemperaturen führt, die bei jeder Sanierung erforderlich sind.

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass bei den Sanierungsvarianten 8 bis 13 ein breiter Bereich möglicher Vorlauftemperaturen zu erwarten ist, abhängig von der Wahl, die bei den vorherigen 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). Es ist nicht empfehlenswert, ein monovalentes WP-System einzusetzen, wenn eine Vorlauftemperatur von (deutlich) über 60 °C erforderlich ist, da die Effizienz zu gering wäre. Es ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den in Abbildung 5 angegebenen Temperaturen um Auslegungstemperaturen handelt, die unter den ungünstigsten Winterbedingungen erforderlich sind, und dass während der Heizsaison eine außentemperaturgeführte Regelung (Heizkurve) zur Anwendung käme, die eine höhere Effizienz des WP-Systems ermöglicht.

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



**Abbildung 5: Bandbreite der Auslegungsvorlauftemperaturen, die in den verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Auslegungsbedingungen (d.h. Fall 1, 2, 8 mit oder ohne Wiederaufheizung (RH)) erforderlich sind. Die verschiedenen Heizkörpertypen (d.h. verschiedene Exponenten  $n$ ), die mit verschiedenen  $\Delta T$  und unter Berücksichtigung verschiedener Massenströme mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s dimensioniert sind, beeinflussen die Bandbreite der einzelnen Balken.**

Die Effizienz der Wärmepumpe und ihre Umsetzbarkeit in einem (teil-)sanierten Gebäude hängen in hohem Maße von der erforderlichen Vorlauftemperatur ab, die durch die Größe und Typologie der installierten Heizkörper und die Auslegungsheizlast bestimmt wird. Die Analyse der Vorlauftemperatur zeigt, dass für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb stark überdimensionierte Heizkörper, eine sehr tiefe thermische Sanierung oder zumindest eine moderate thermische Sanierung in Kombination mit dem Austausch der vorhandenen Heizkörper durch Niedertemperaturheizkörper erforderlich sind.

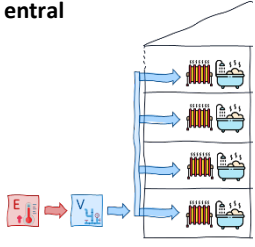
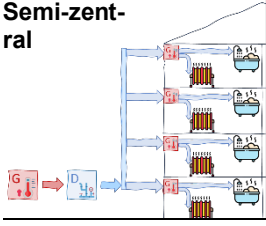
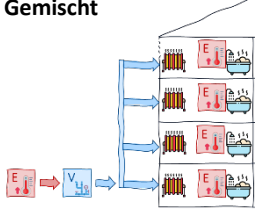
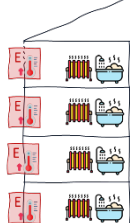
Es ist auch wichtig zu erwähnen, dass eine hochwertige thermische Sanierung nicht nur einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe ermöglicht, sondern auch das HLK-System robuster gegen nicht optimale Betriebsbedingungen macht.

## 2 Wärmepumpensysteme

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 Wärmepumpensysteme bzw. elektrische Wärmeversorgungssysteme abdecken (vgl. Tabelle 2). In dieser Auswahl repräsentieren insbesondere die zentralen Varianten bzw. die Variante E-Boiler 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 Wärmepumpensystemen 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 Wärmepumpen und daher ein zentrales Ziel bei der Konzeption moderner Wärmeversorgungslösungen.

**Tabelle 2: Auswahl zentraler, semi-zentraler, dezentraler und gemischter wärmepumpenbasierter bzw. elektrischer Wärmeversorgung im Mehrgeschosswohnbau**

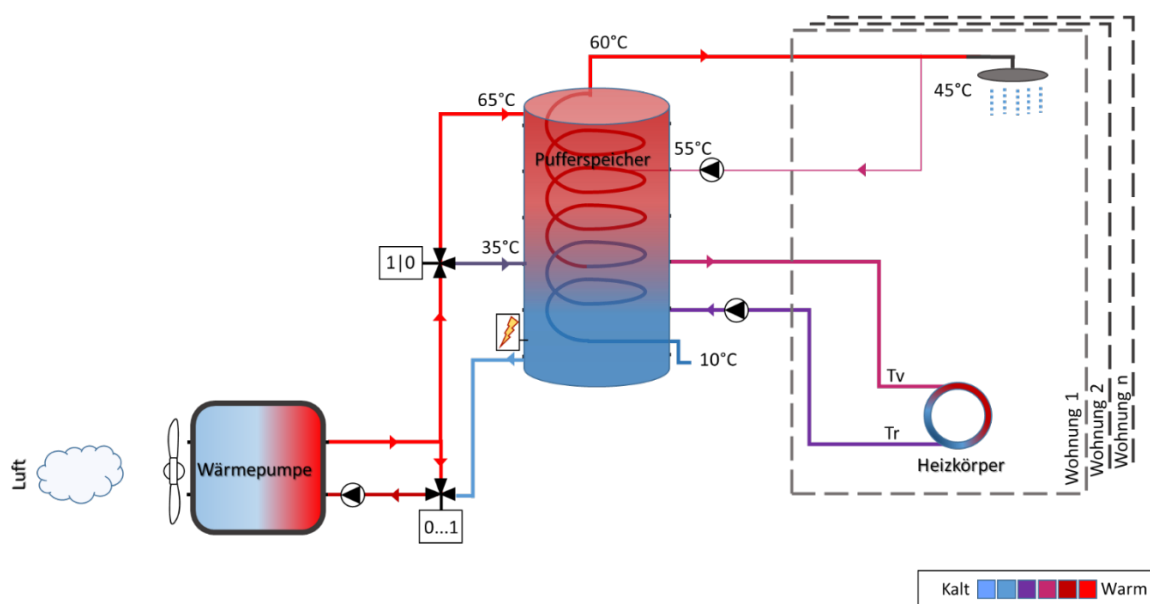
Kategorie	Bezeichnung	Wärmepumpensystem
<b>entral</b> 	<b>4LZ</b>	Vierleiter-System mit Zirkulation
	<b>2+2L FriWa</b>	Zwei + Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungsweisen) Frischwasserstationen
	<b>2L WüSt</b>	Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungsweisen) Wärmeübergabestationen
	<b>2L BF</b>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

Eine Duschwasserwärmerückgewinnung kann prinzipiell in allen Varianten eingesetzt werden. Die möglichen Einsparungen hängen vom Anteil des Warmwasserbedarfs fürs Duschen am gesamten Warmwasserbedarf ab, von den Verteilverlusten und von der Effizienz der Wärmebereitstellung (d.h. COP der Wärmepumpe). Bei E-Boilern ist das Einsparpotential entsprechend am größten.

### Vierleiter-System mit Zirkulation (4LZ)

Das Vierleiter-System mit Zirkulation ist in Abbildung 6 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. In diesem System gibt es einen zentralen Pufferspeicher, häufig als Schichtspeicher ausgeführt, der über einen meist internen Wärmeübertrager zur Warmwasserbereitung

und direkt zur Heizung genutzt wird. Aus Hygienegründen müssen bei zentraler Warmwasserbereitung am Austritt des Wärmespeichers 60 °C garantiert werden. Die Wärmepumpe kann optional über eine hydraulische Schaltung zur Schichtbeladung des Pufferspeichers genutzt werden. Dies bedeutet, dass über zwei Einlässe auf unterschiedlichen Höhen der untere Teil des Speichers für die Raumheizung mit höherer Effizienz auf niedrigem Temperaturniveau gehalten wird, während der obere Teil des Speichers für die Trinkwarmwasserbereitung zur Verfügung steht. Das Drei-Wege-Mischventil im Vorlauf der Wärmepumpe wird in der Heizphase der Anlage eingesetzt und erlaubt, dass die Wärmepumpe ohne zu große Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf arbeiten kann. Es gibt mehrere Anlagenvarianten unter anderem auch die Variante mit zentralem Frischwasserspeicher und getrenntem Heizungspuffer bzw. sogenannter hydraulischer Weiche.

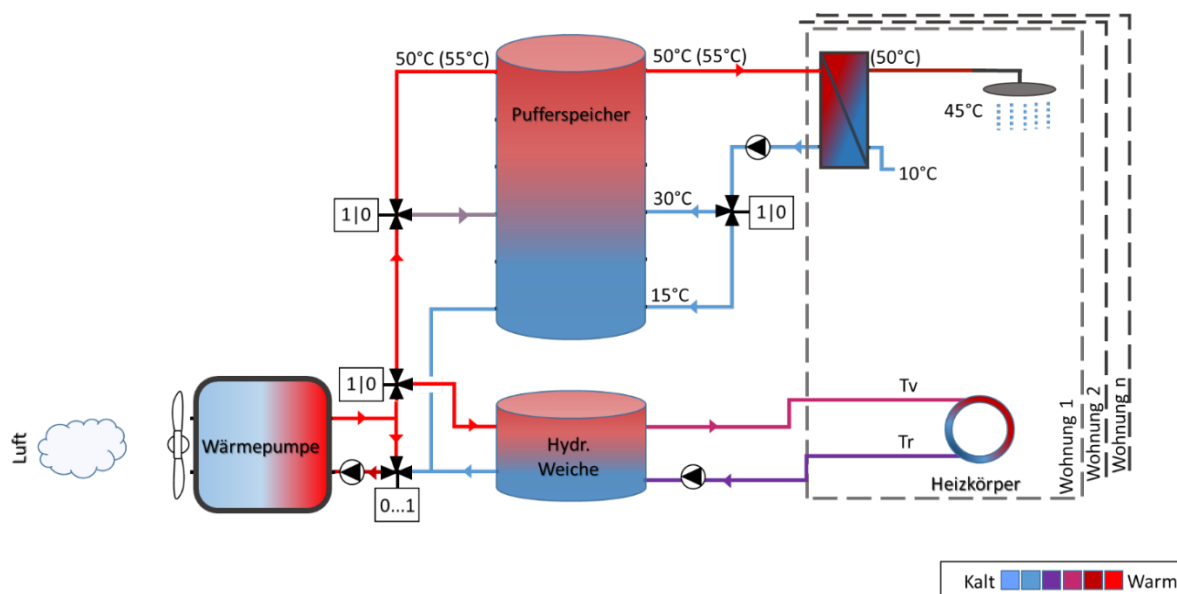


**Abbildung 6: Vierleiter-System mit Zirkulation, hier mit internem Frischwasser-Wärmeübertrager – vereinfachtes Haustechnikschema**

### **Zwei + Zweileiter-System mit dezentraler Frischwasserstation (2+2L FriWa)**

Das Zwei + Zweileiter- System mit dezentralen (d.h. wohnungsweisen) Frischwasserstationen (Friwa) ist in Abbildung 7 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. Bei dezentraler d.h. wohnungsweiser Trinkwarmwassererwärmung mit dezentralen Wärmeübertragern entfällt die Notwendigkeit, das Warmwasser auf mindestens 60 °C zu erwärmen. In diesem System gibt es einen zentralen Pufferspeicher, von dem aus die dezentralen Frischwasserstationen zur Warmwasserbereitung versorgt werden. Die dezentralen Frischwasserstationen haben in der Regel Nennleistungen im Bereich von 25 kW bis 50 kW. Ein Thermostatventil begrenzt die Rücklauftemperatur auf etwa 30 °C in Zeiten ohne Zapfung. Idealerweise wird je nach Rück-

lauftemperatur (d.h. 30 °C ohne Zapfung und etwa 15 °C in Zeiten hohen Trinkwarmwasserbedarfs) der Frischwasserstation das in den Pufferspeicher zurückgeführte Wasser in unterschiedlichen Höhen zugeführt, um die Schichtung im Speicher aufrechtzuerhalten. Hier kann aufgrund der dezentralen Warmwasserbereitung (insofern die Leitungslängen in der Wohnung kurzgehalten werden können) die Vorlauftemperatur auf etwa 52 °C abgesenkt werden. Der Heizungsvorlauf kann unabhängig auf möglichst geringem Temperaturniveau gefahren werden. Für die Heizung wird idealerweise eine hydraulische Weiche verwendet, um den Massenstrom des zur Wärmepumpe zirkulierenden Heizwassers von dem zur Heizung hydraulisch zu entkoppeln. Varianten nutzen einen Kombispeicher oder eigenen Heizungspuffer. Die Verbindung der Wärmepumpe mit dem Pufferspeicher erfolgt idealerweise über zwei Einlässe auf unterschiedlichen Höhen, um eine Schichtbeladung zu ermöglichen. Das Drei-Wege-Mischventil im Vorlauf der Wärmepumpe wird in der Heizphase der Anlage eingesetzt und erlaubt den Betrieb der Wärmepumpe ohne zu große Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf.



**Abbildung 7: Zwei+Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungswesisen) Frischwasserstationen – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.**

### Zweileiter-System mit dezentraler Wärmeübergabestation (2L WüSt)

Das Zweileiter-System mit dezentralem Wärmeübertrager (Wärmeübergabestation) ist in Abbildung 8 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. Durch die zwei eingesparten Verteilstränge ist die Installation günstiger als beim konventionellen Vierleiter- als auch Zwei+Zweileitersystem. Bei diesem System gibt es einen zentralen Pufferspeicher, der sogenannte wohnungswesisen Wohnungsübergabestationen mit Heizungsverteiler und Plattenwär-





## Zweileiter-System mit Booster-Wärmepumpe (2L BWP)

Das Zweileiter-System mit Booster-Wärmepumpe ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt und stellt ein semi-zentrales Konzept zur wohnungsweisen Wärmeversorgung dar. Die zentrale Wärmepumpe speist einen Zwischenkreis, über den die Raumheizung versorgt wird, während die dezentralen Booster-Wärmepumpen in jeder Wohnung sowohl die Trinkwarmwasserbereitung als auch die Unterstützung der Raumheizung übernehmen.

Die Booster-Wärmepumpe entnimmt ihre Wärme direkt der zentralen Wärmepumpe und hebt sie lokal auf das für Heizung und Trinkwarmwasser erforderliche Temperaturniveau an. Dieses Konzept ist besonders effizient, da die zentrale Wärmepumpe mit niedrigen Vorlauftemperaturen arbeiten kann, wodurch Verteil- und Speicherverluste reduziert werden. Gleichzeitig stellen die Booster-Wärmepumpen bedarfsgerecht die höheren Temperaturen für Heizung und Warmwasser bereit.

Das System kombiniert somit niedrige Verteilverluste, hohe Gesamteffizienz und bedarfsgerechte Wärmebereitstellung, ist jedoch mit erhöhtem Platzbedarf, Schallemissionen und Wartungsaufwand in den einzelnen Wohneinheiten verbunden.

7.9

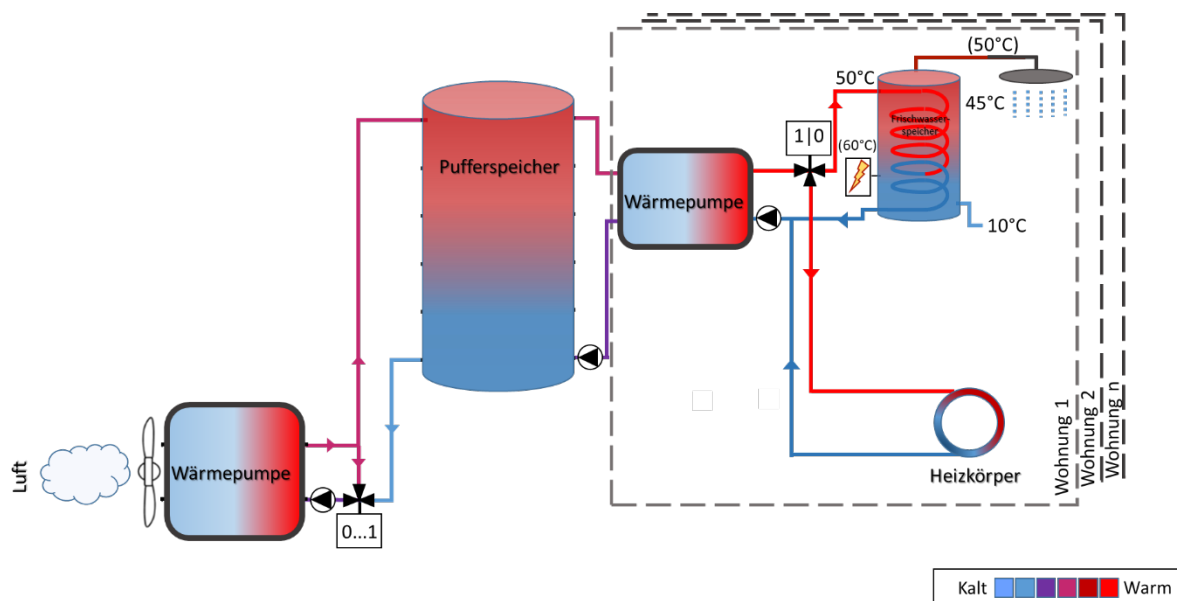


Abbildung 10: Zweileiter-System mit Booster-Wärmepumpe (2L BWP) – vereinfachtes Haustechnikschema

## Zweileiter-System mit Rücklauf-Wärmepumpe (2L RLWP)

Das Zweileiter-System mit Rücklauf-Wärmepumpe ist in Abbildung 13 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. Es handelt sich um ein semi-zentrales Konzept, bei dem die

Raumheizung zentral und die Trinkwarmwasserbereitung dezentral erfolgt. Die Rücklauf-Wärmepumpe ist dabei ein spezieller Typ der Booster-Wärmepumpe. Ein zentraler Pufferspeicher versorgt die Fußbodenheizung mit Heizwasser. Parallel dazu, entweder direkt in den Heizkreis eingebunden oder alternativ im Rücklauf der Fußbodenheizung, wird eine wohnungsweise installierte Booster-Wärmepumpe betrieben. Diese Booster-Wärmepumpe nutzt die Rücklauf-temperatur der Fußbodenheizung als Wärmequelle und erwärmt damit einen dezentralen Trinkwarmwasserspeicher. Das Konzept ist nur in Verbindung mit Niedertemperatur-Heizsystemen wie Fußbodenheizungen sinnvoll. Bei höheren Systemtemperaturen stünde die für die Warmwasserbereitung benötigte Temperatur ohnehin direkt zur Verfügung, sodass eine zusätzliche Rücklauf-Wärmepumpe nicht benötigt wäre.

Durch diese Aufteilung entfallen hygienische Anforderungen an die zentrale Speicher-Temperatur, sodass die Vorlauftemperaturen abgesenkt und die Verteilverluste minimiert werden können. Die zentrale Heizungswärmepumpe arbeitet somit mit hoher Effizienz. Auch die Rücklauf-Wärmepumpe erzielt aufgrund der niedrigen Temperaturanforderungen gute Leistungszahlen, wenngleich im Winter teilweise ein Kaskadenbetrieb erforderlich ist. Im Sommer kann das System so betrieben werden, dass die zentrale Speichertemperatur reduziert wird; die Rücklauf-Wärmepumpe ermöglicht dann zusätzlich eine begrenzte Kühlung, indem sie dem Heizkreis Wärme entzieht.

Das Drei-Wege-Mischventil im Vorlauf der Wärmepumpe wird in der Heizphase der Anlage eingesetzt, um die Wärmepumpe gegen zu große Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf zu schützen.

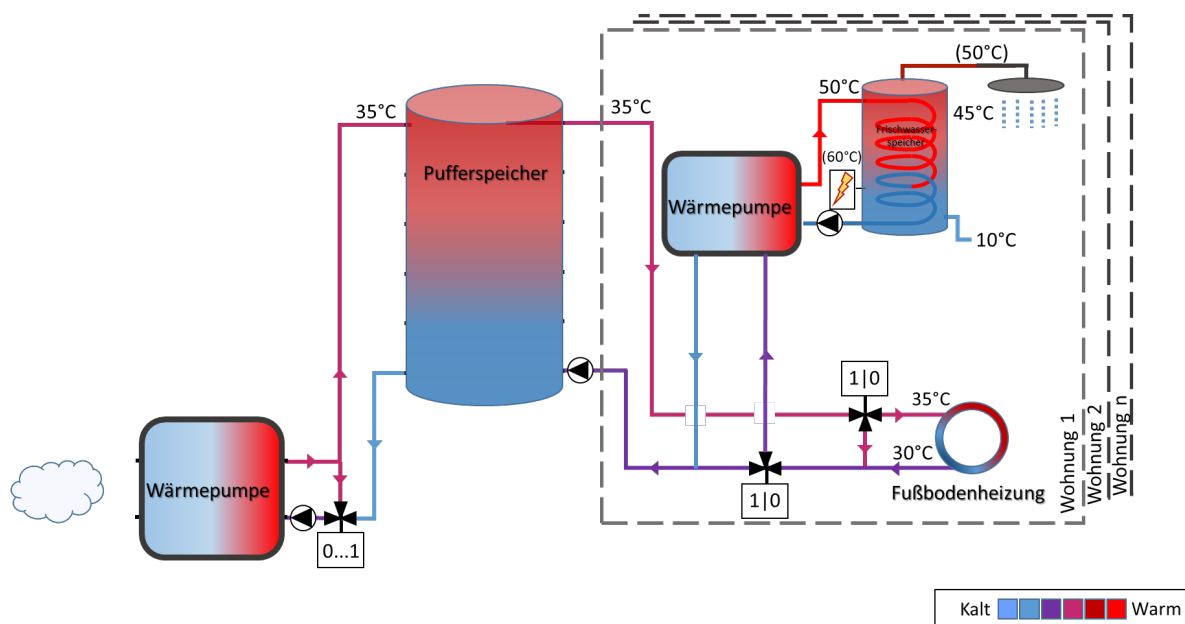
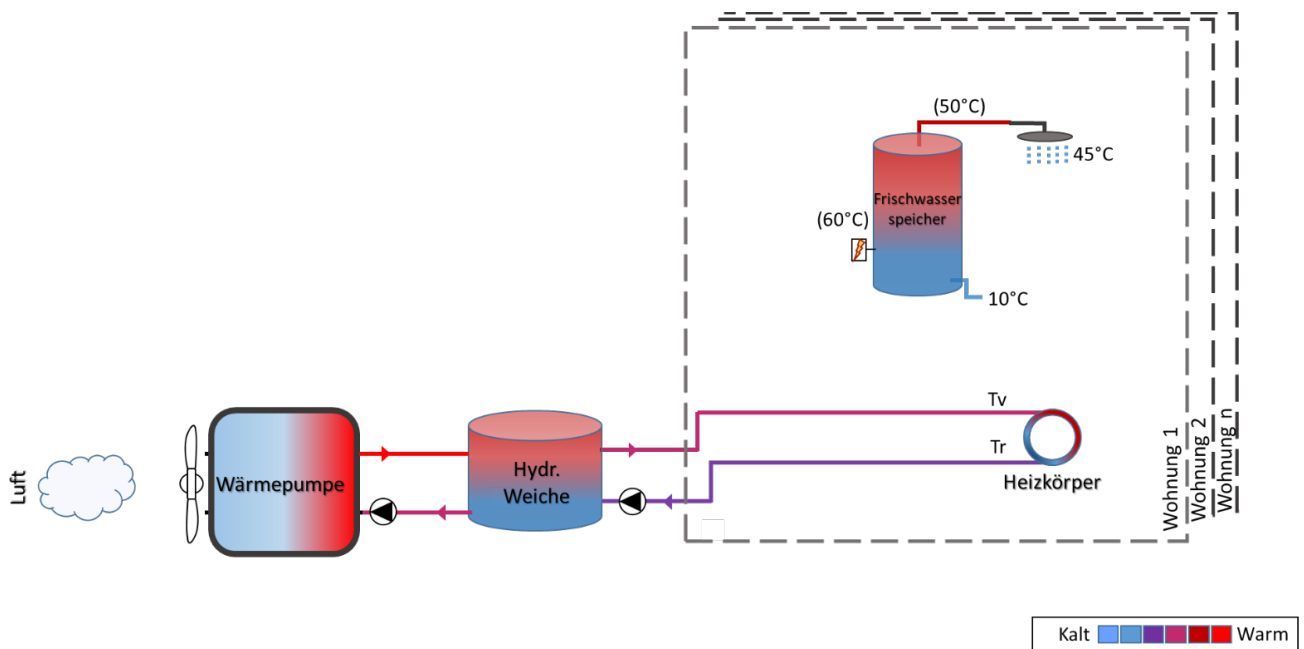


Abbildung 11: Zweileiter-System mit Rücklauf-Wärmepumpe (2L RLWP) – vereinfachtes Haustechnikschema

## Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler (2L E-Boiler)

Das Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler ist in Abbildung 12 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. Dieses System ist kostengünstig in der Anschaffung, jedoch thermodynamisch ungünstig und wenig effizient. Eine zentrale Wärmepumpe versorgt über eine hydraulische Weiche die Heizung, während die Warmwasserbereitung dezentral über einen E-Boiler erfolgt.



**Abbildung 12: Zweileiter-System mit Elektro-Boilern – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.**

## Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler mit Duschwasser-Wärmerückgewinnung (2L EB DWRG)

Das Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler und Duschwasser-Wärmerückgewinnung ist in Abbildung 13 als vereinfachtes Haustechnikschema dargestellt. Durch die Duschwasser-Wärmerückgewinnung kann der Warmwasserbedarf für das Duschen reduziert werden und damit kann der Stromverbrauch entsprechend begrenzt werden.

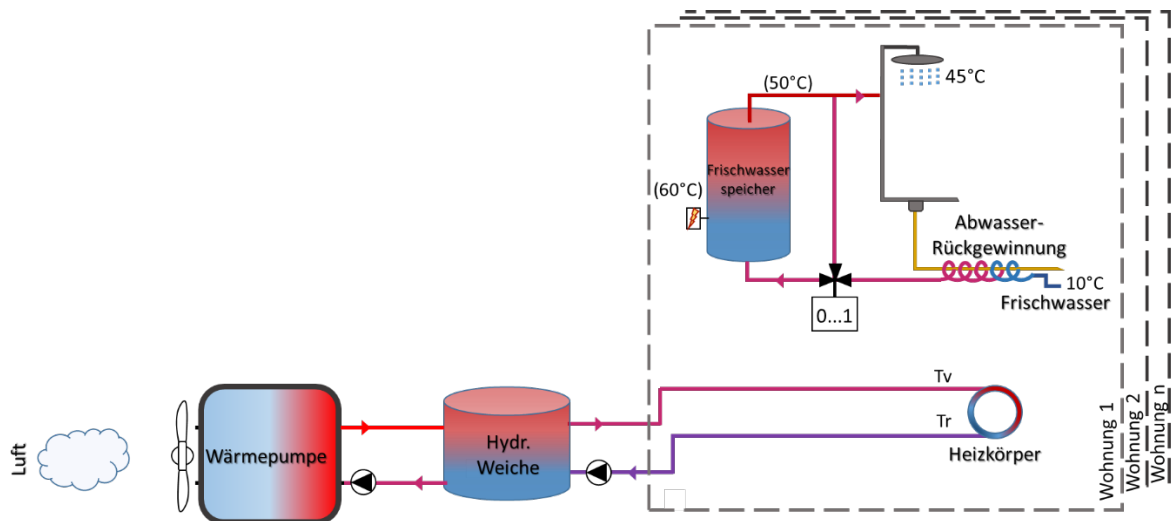


Abbildung 13: Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler mit Duschwasser-Wärmerückgewinnung – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.

### Zweileiter-System mit dezentraler Warmwasser Wärmepumpe (2L WW-WP)

Als Variante würde statt des E-Boilers eine dezentrale L/W-TWW-WP eingesetzt. Diese und sogenannte Boiler-Wärmepumpe (welche Raum- bzw. Abluft als Quelle nutzt) bzw. dezentrale Fortluft- oder Abluft-Wärmepumpe sind am Markt bisher nur als Nischen- oder Prototyp erhältlich.

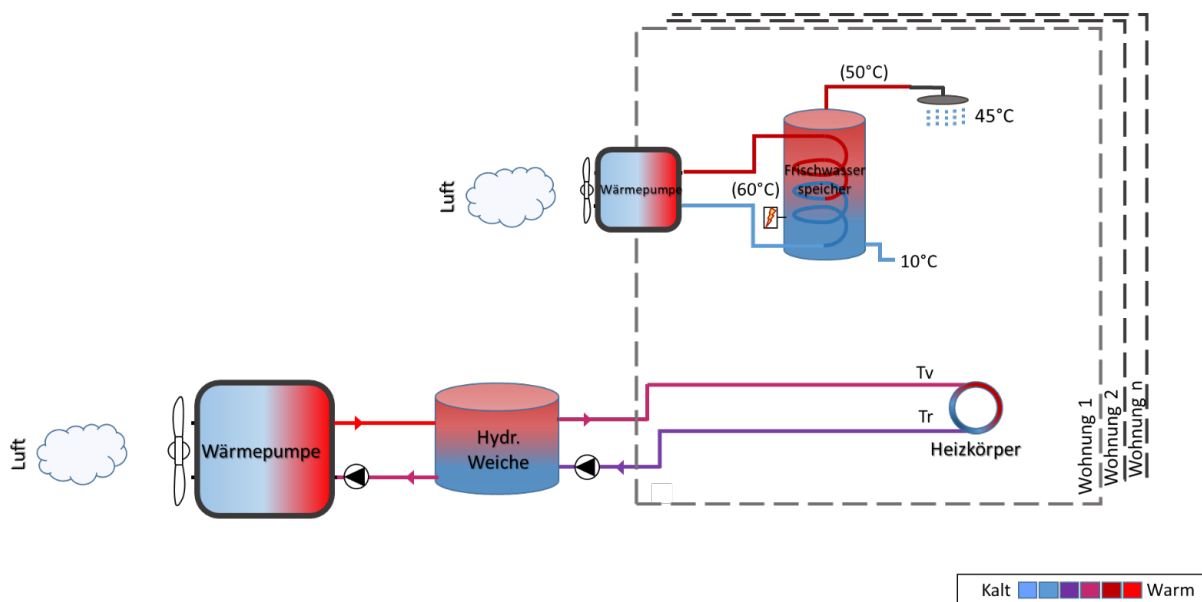
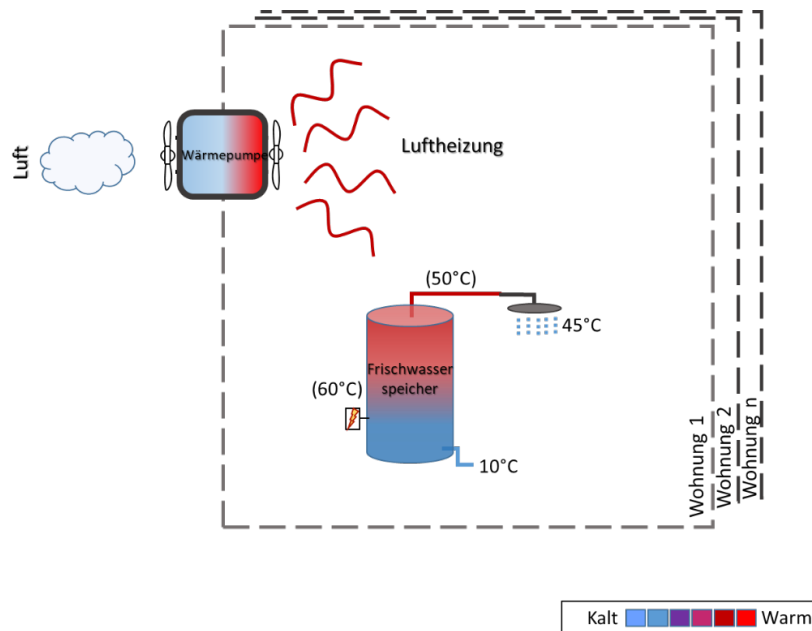


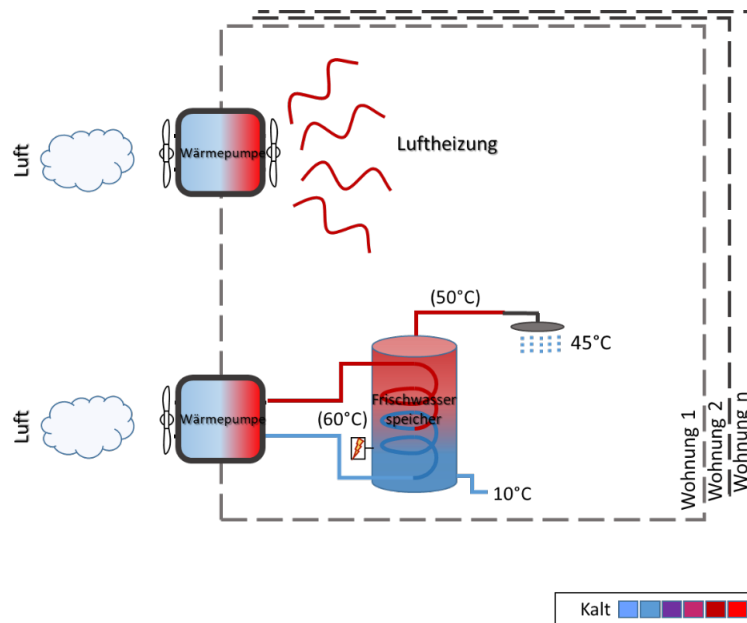
Abbildung 14: Zweileiter-System mit dezentraler Warmwasser Wärmepumpe – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.

Dezentrale Split Wärmepumpe für Raumheizung und dezentrale Warmwasser Wärmepumpe (S-WP WW-WP) Ein dezentrales System für Raumheizung und Warmwasser ist in Abbildung 15 dargestellt. Ein oder mehrere Split Luft-Luft Wärmepumpen (bzw. Multi-Split-WP) werden für Raumheizung genutzt. Ein Elektroboiler erwärmt das Warmwasser.



**Abbildung 15: Dezentrale Split Wärmepumpe für Raumheizung und Elektro-Boiler – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.**

Zwei dezentrale Wärmepumpen pro Wohnung (Abbildung 16) oder ein Multi-Split-Gerät mit Luftheizung und Warmwasseroption wären effizienter als die Variante mit E-Boiler, aber diese Geräte sind bisher am Markt nur als Nischen- oder Prototyp erhältlich.



**Abbildung 16: Dezentrale Split Wärmepumpe für Raumheizung und dezentrale Warmwasser Wärmepumpe – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind).**

### **3 Anwendungsbeispiel des integralen Planungsansatzes**

In diesem Kapitel wird der in Abschnitt 1.2 beschriebene integrale Planungsansatz auf die Fallstudie eines zu renovierenden Mehrfamilienhauses mit Gasetagenheizung angewendet. Nach der Beschreibung des Gebäudes bzw. der Fallstudie werden die Annahmen für die integrale Planung erläutert, Zulezt werden die Ergebnisse dargestellt, analysiert und diskutiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird eine begrenzte Anzahl von Kombinationen betrachtet:


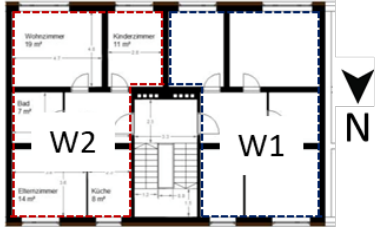
- 3 Varianten für die thermische Sanierung,
- 2 Varianten für das Wärmeabgabesystem,
- 4 Varianten für das Wärmepumpensystem und
- 2 Wärmequellen

Dies führt in Summe zu 48 Varianten, welche dimensioniert und technoökonomisch untersucht und gegenübergestellt werden.

#### **3.1 Gebäudebeschreibung**

Die Fallstudie betrachtet ein typisches unsaniertes bzw. teilsaniertes Mehrfamilienhaus mit Gasetagenheizung. Es besteht aus fünf Stockwerken und zwei symmetrischen Wohnungen pro Stockwerk. Das Stiegenhaus und der Keller sind nicht beheizt. Die wichtigsten Daten des Gebäudes sind in Tabelle 3 aufgeführt und Tabelle 4 fasst die Flächen der einzelnen Komponenten der Gebäudehülle zusammen.

**Tabelle 3: Hauptdaten, Gebäudeansicht und Grundriss des Gebäudes**

Klima	Innsbruck	 
Energiebezugsfläche [m <sup>2</sup> ]:	732	
Wohnfläche (WNF) [m <sup>2</sup> ]:	680	
Überbaute Fläche [m <sup>2</sup> ]:	202	
Zahl der Stockwerke [-]:	5	
Zahl der Wohnungen pro Stockwerk [-]:	2	
Energiebezugsfläche der Wohnungen [m <sup>2</sup> ]:	70	
Personen pro Wohnung [-]:	2	
Winter-Solltemperatur [°C]	22	
Sommer-Solltemperatur [°C]	25	
Warmwasserbedarf [Liter/Person/Tag]	25	
Interne Gewinne [W/m <sup>2</sup> ]	2.78	

Dachfläche [m <sup>2</sup> ]	202.3
Wandfläche [m <sup>2</sup> ]	729.6
Bodenfläche [m <sup>2</sup> ]	202.3
Kellerwandfläche [m <sup>2</sup> ]	45.8
Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	120.1
Fensteranzahl [-]	100

**Tabelle 4: Fläche der Gebäudehüllenteile**

In dieser Studie wurden drei verschiedene Varianten in Bezug auf die Qualität der thermischen Hülle betrachtet, (1) unsaniert, (2) Sanierung nach den Mindestanforderungen der OIB-Richtlinie 6 (2023) und (3) hochwertige Sanierung (EnerPHit).

## 3.2 Methode

Der allgemeine Workflow ist in Abschnitt 1.2 beschrieben, und hier werden die für die spezifische Fallstudie angenommenen Hypothesen spezifiziert. Die Ausgangssituation ist der unsanierte Zustand, der als Referenzfall einen Heizwärmebedarf von 164 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBFA</sub>) und einen Trinkwasserwärmebedarf von 13.7 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBFA</sub>) hat. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl die Heizung als auch die Trinkwassererwärmung mit einer Gasetagenheizung erfolgt und

einen System-Wirkungsgrad von 85% hat, so dass der gesamte Wärmeenergiebedarf 209 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBFa</sub>) beträgt. Unter Berücksichtigung eines Gaspreises von 0,1 €/kWh belaufen sich die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten auf 23,7 €/(m<sup>2</sup><sub>EBFa</sub>). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen würden 43,5 kg<sub>CO2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>EBFa</sub>) betragen. Dabei wird der Umrechnungsfaktor gemäß OIB-Richtlinie 6 (2023) (201 g<sub>CO2</sub>/kWh) verwendet (Tabelle 8).

Der Fall mit L/W WP ohne thermische Sanierung wird nicht berücksichtigt (weder mit alten, noch mit neuen Heizkörpern), da die Wärmepumpe zu groß und zu laut wäre (aufgrund der hohen Heizlast und hohen Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke).

Der Heizwärmebedarf wird anhand monatlicher Energiebilanzen [14] und die Heizlast des Gebäudes auf Basis von Auslegungstagen berechnet [14]. Es werden drei verschiedene Varianten hinsichtlich der Qualität der Gebäudehülle analysiert (siehe Tabelle 9). Eines stellt den aktuellen Zustand dar, die anderen zwei entsprechen einer Standardsanierung (d.h. gemäß OIB-Richtlinie 6 (2023) im Nachweisweg  $f_{gee}$ ) und einer umfassenden Sanierung (d.h. gemäß EnerPHit).

Zwei verschiedene Varianten werden in Bezug auf die Heizkörper analysiert und auf Basis dessen wird die Vorlauftemperatur wie folgt berechnet:

1. Bestehende Heizkörper bleiben bestehen: Ihre Nennleistung wird als zuerst unbekannt angenommen und wird auf Grundlageder nicht renovierten thermischen Hülle des Gebäudes und der Fenstergröße berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Heizkörper, wie früher typisch, unter den Fenstern installiert wurden. Die Vorlauftemperatur wird dann auf Grundlage der installierten Leistung und der Heizlast des kritischen Raums ermittelt.
2. Einbau neuer Heizkörper: Die Vorlauftemperatur kann individuell gewählt werden (Default bzw. Eingabe). Es wird davon ausgegangen, dass die neuen Heizkörper auf der Grundlage der gewählten Vorlauftemperatur dimensioniert werden. In dieser Fallstudie wurde eine Vorlauftemperatur im Auslegefall von 55°C angenommen.

Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich der kritische Raum für die Sanierungsvarianten nicht ändert. Als kritischer Raum wird das Kinderzimmer angenommen. Die Heizlast wird unter der Annahme einer Innentemperatur von 22 °C, einer Mindest-Luftwechselrate von 0,3 1/h, einer Außentemperatur von -10,8 °C, einem Fenster von 2,8 m<sup>2</sup> und dem an den Boden angrenzenden Fußboden berechnet.

Exemplarisch wurden vier (d.h. 4LZ, 2+2L FriWa, 2L WüSt, 2L E-Boiler) der zuvor beschriebenen Systemvarianten (Abschnitt 1.3) detailliert untersucht. Die Auswahl dieser Varianten basiert auf der Annahme, dass im betrachteten Gebäude in den Wohnungen ein hydraulisches Verteilnetz vorhanden ist. Es ist anzumerken, dass, um den Vorteil der Heizkurve in einem 2+2L-System in der thermischen Berechnung zu berücksichtigen, die Vorlauftemperatur in der Berechnung im Mittel um 5 K reduziert wird, da in der vereinfachten Berechnung des PHPP die Heizkurve nicht umgesetzt werden kann.

Vollelektrische Systeme (z. B. dezentrale Direktheizungen und elektrische Durchlauferhitzer) wurden in der Analyse nicht berücksichtigt, da sie in Hinblick auf Energieeffizienz und Betriebskosten im Vergleich zu zentralen Wärmepumpensystemen deutlich schlechter abschneiden und insbesondere angesichts des aktuellen Strommixes sowie der geltenden Effizienzvorgaben nicht als zukunftsfähig einzustufen sind. In dieser Fallstudie wurden auch weder Photovoltaik-Paneele noch solarthermischen Kollektoren betrachtet.

Die Auslegung der Systeme erfolgte auf Basis der Gebäudegeometrie, während die Dimensionierung anhand der jeweiligen Gebäudelast bestimmt wurde. Es wurden zwei verschiedene Wärmepumpenquellen analysiert (Luft-Wasser- oder Sole-Wasser-Wärmepumpe) und ihre Effizienz (COP) mit Hilfe eines Kennfeldes (Performance Map) [14] bewertet.

Die ausgewiesenen Kosten werden als Bruttokosten angegeben. Für die Analyse wird ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren zugrunde gelegt. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauer der einzelnen Elemente müssen manche innerhalb des 20-jährigen Betrachtungszeitraums ersetzt werden, während andere darüber hinaus noch funktionsfähig bleiben. Diese Aspekte werden in den Berechnungen nach PHPP (Blatt PH eco) berücksichtigt.

Die Korrelationen, die für die Berechnung der Investitions- und Installationskosten und der Nutzungsdauer der Dämmung von Dach, Boden, Wänden, des Austauschs von Fenstern, der Verbesserung der Luftdichtheit und der Lüftungssysteme verwendet wurden, sind in Tabelle 5 angegeben.

**Tabelle 5: Korrelationen für die Investitions- und Installationskosten und die Nutzungsdauer der verschiedenen Komponenten der Gebäudehülle, basierte auf [14], [15] (Die ursprünglichen Werte wurden mit einem Regionalfaktor von 1,1 multipliziert), [16], [17], und [18].**

	Kostenannahme (Investition + Installation)	Nutzungsdauer[J]
<b>Gerüste</b>	$127,03 * WNF^{(-0,32)} \text{ €/m}^2_{WNF}$	
<b>Außenwanddämmung</b> [15], [16]	$166,58 \text{ €/m}^2_{\text{Außenwandfläche}} + 482,90 \text{ €/m}_{\text{Dämmstoff}}/\text{m}^2_{\text{Bauteil}} \cdot m_{\text{Dämmstoff}}$	40
<b>Dachdämmung</b> [15], [16]	$337 \text{ €/m}^2_{\text{(Dachfläche)}}$	40
<b>Fenster austausch</b> [15], [16]	Holzrahmen IV 88, gute Dreifachverglasung mit Argon Füllung: $795 \text{ €/m}^2_{\text{(Fensterfläche)}}$	30
	Holzrahmen IV 88, sehr gute Dreifachverglasung mit Argon Füllung: $825 \text{ €/m}^2_{\text{(Fensterfläche)}}$ . Zusätzlich: Abdichtungen 42 €/Fenster	30
		10
<b>Verbesserte Luftdichtheit</b> [13]	$3 \text{ €/m}^2_{\text{EBF}}$ (nicht EnerPHit)	30
	$5 \text{ €/m}^2_{\text{EBF}}$ (EnerPHit)	
<b>Lüftungsanlage</b> [17]	Abluftsystem: $46 \text{ €/m}^2_{\text{EBF}}$ Lüftung mit WRG: $117 \text{ €/m}^2_{\text{EBF}}$ (zusätzlich: 100 €/Wohnung/Jahr für die Wartung)	30

Tabelle 6 fasst die Elemente zusammen, die je nach Art des Verteilungssystems in die Kostenanalyse einbezogen werden.

**Tabelle 6: Komponenten, die in die Kostenanalyse für die betrachteten Verteilungssysteme berücksichtigt wurden.**

	4LZ	2+2L FriWa	2L WüSt	2L E-Boiler
Heizkörper (im Falle neuer Heizkörper)	X	X	X	X
Pufferspeicher	X	X	X	X
WP	X	X	X	X
Leitungen (einschließlich Dämmung)	X	X	X	X
Pumpen	X	X	X	X
Frischwasserstationen (dezentral)		X		
Wärmeübergabestationen (dezentral)			X	
Frischwassermodul, zentral (Zirkulation)	X			
Elektrische Boiler				X

Tabelle 7 beschreibt die Korrelationen, die zur Berechnung der Investitions-, Installations- und Wartungskosten sowie der Nutzungsdauer der verschiedenen Komponenten des Gebäudesystems verwendet wurden.

**Tabelle 7: Korrelationen für die Investitions-, Installations- und Wartungskosten und die Nutzungsdauer der verschiedenen Komponenten des Gebäudesystems (Kostenannahme), basierte auf [19], [20], [21], [22], [23], [24], und [23], [24].**

	(Investition + Installation)	Wartung	Nutzungsdauer [a]
Heizkörper (im Falle neuer Heizkörper) [18]	80 €/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> <sup>1</sup>	0	30
Pufferspeicher [19]	20.5 €/l	0.5€/l/a	30
Luft/Wasser WP[21]	4310*P[kW <sub>th</sub> ] <sup>0.6177</sup> €	14 €/kW [16]	15
Sole/Wasser WP[21]	491.5*P[kW <sub>th</sub> ] <sup>1.046</sup> €	14 €/kW [16]	15
Erdsonde	1000+1667 €/kW <sub>th</sub>	0	40
Leitungen [18]	1.22 €/m/mm	0	30
Rohrdämmung [18]	1.06 €/m/mm	0	30
Pumpen [18]	0.41 €/l/s	0.006€/l/s/a	15

<sup>1</sup> Die Kosten werden nur als Funktion der behandelten Fläche betrachtet, da sie nicht stark von der Größe des Heizkörpers abhängen

<b>Frischwasserstationen (dezentral) [22]</b>	3250 €/System	0	30
<b>Wärmeübergabestationen (dezentral)</b>	3500 €/System	0	30
<b>Frischwassermodul (zentral) [21]</b>	10000 €/System	0	30
<b>Elektrischer Boiler [22], [23]</b>	1100 €/System	0	30

Tabelle 8 fasst die in der Analyse verwendeten CO<sub>2</sub>-Umrechnungsfaktoren sowie Gas- und Strompreise zusammen.

**Tabelle 8: Gas- und Strompreise und CO<sub>2</sub>-Konversionsfaktoren**

<b>Konversionsfaktor <math>f_{CO_2eq}</math> [g/kWh]</b>	Gas	<b>201 OIB2023</b>
	Strom	<b>156 OIB2023</b>
<b>Preis [€/kWh]</b>	Gas	<b>0.10</b> (Econtrol: 01/2025)
	Strom	<b>0.31</b> (Econtrol: 01/2025)

Aus Gründen der Vereinfachung werden für das Beispielgebäude die Jahres-Konversionsfaktoren der OIB-Richtlinie 6 (2023) verwendet. In Zukunft wird es unerlässlich sein, statt der Jahreswerte monatliche Konversionsfaktoren für Strom zu verwenden, da die spezifischen Emissionen im Winter erheblich höher sind als im Sommer [3].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die elektrische Anschlussleistung. Der Einfluss der Sanierungstiefe sowie der Unterschied zwischen Luft/Wasser- und Sole/Wasser WP ist im Hinblick auf die maximale Belastung für die Stromnetze v.a. im Winter besonders relevant. Die maximale Leistung wurde mit dem Carnot-Gütegrad-Ansatz unter folgenden Annahmen berechnet:  $T_{max} = 55^{\circ}C$ ,  $T_{min(L/W WP)} = -5^{\circ}C$  und  $T_{min(S/W WP)} = 10^{\circ}C$ ,  $\eta_{(L/W WP)} = 0,4$ , und  $\eta_{(S/W WP)} = 0,45$ .

### 3.3 Ergebnisse

Für jede der drei untersuchten Varianten für die Gebäudehülle sind die U-Werte der verschiedenen Bauteile der thermischen Hülle in Tabelle 9 dargestellt. Der HWB und alle weiteren Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die Energiebezugsfläche (entsprechend PHPP).

**Tabelle 9: U-Werte und andere Kennwerte der verschiedenen Gebäudehüllenelemente für die verschiedenen Sanierungsvarianten**

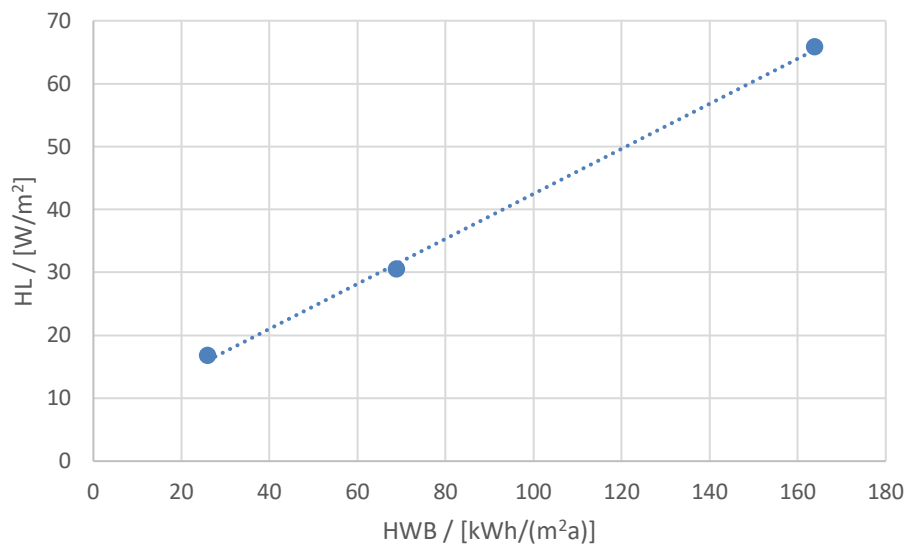
Sanierungsvariante	Nicht saniert	OIB f <sub>gee</sub>	EnerPHit
HWB [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	<b>164</b>	<b>69</b>	<b>26</b>
Dach U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.399	0.146	0.146
Wand U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.907	0.265	0.157
Boden U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.872	0.872	0.255
Fenster U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.25	0.91	0.84
<b>Gebäudehülle mittlerer U-Wert [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>1.048</b>	<b>0.480</b>	<b>0.286</b>
Lüftung	Fensterlüftung	Abluftanlage	Lüftung mit WRG
Luftwechsel bei Drucktest n <sub>50</sub> [1/h]	1.5	1.25	0.5
Luftwechselrate n [1/h]	0.15	0.3	0.3

Der HWB, die Heizlast (HL) und der Energiebedarf für die 3 Varianten der thermischen Sanierung sind in Tabelle 10 dargestellt.

**Tabelle 10: Heizwärmebedarf, Heizlast und Energiebedarfe der drei Varianten**

Sanierungsvariante	Nicht saniert	OIB f <sub>gee</sub>	EnerPHit
HWB [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	<b>164</b>	<b>69</b>	<b>26</b>
Heizlast [W/m <sup>2</sup> ]	65,7	30,4	16,7
WW-Bedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	13,7	13,7	13,7
Hilfsstrom [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	0	2,4	2,7
Haushaltstrom [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	19,6	19,6	19,6

Die Korrelation zwischen Heizwärmebedarf (HWB) und Heizlast (HL) des Gebäudes zeigt Abbildung 17.

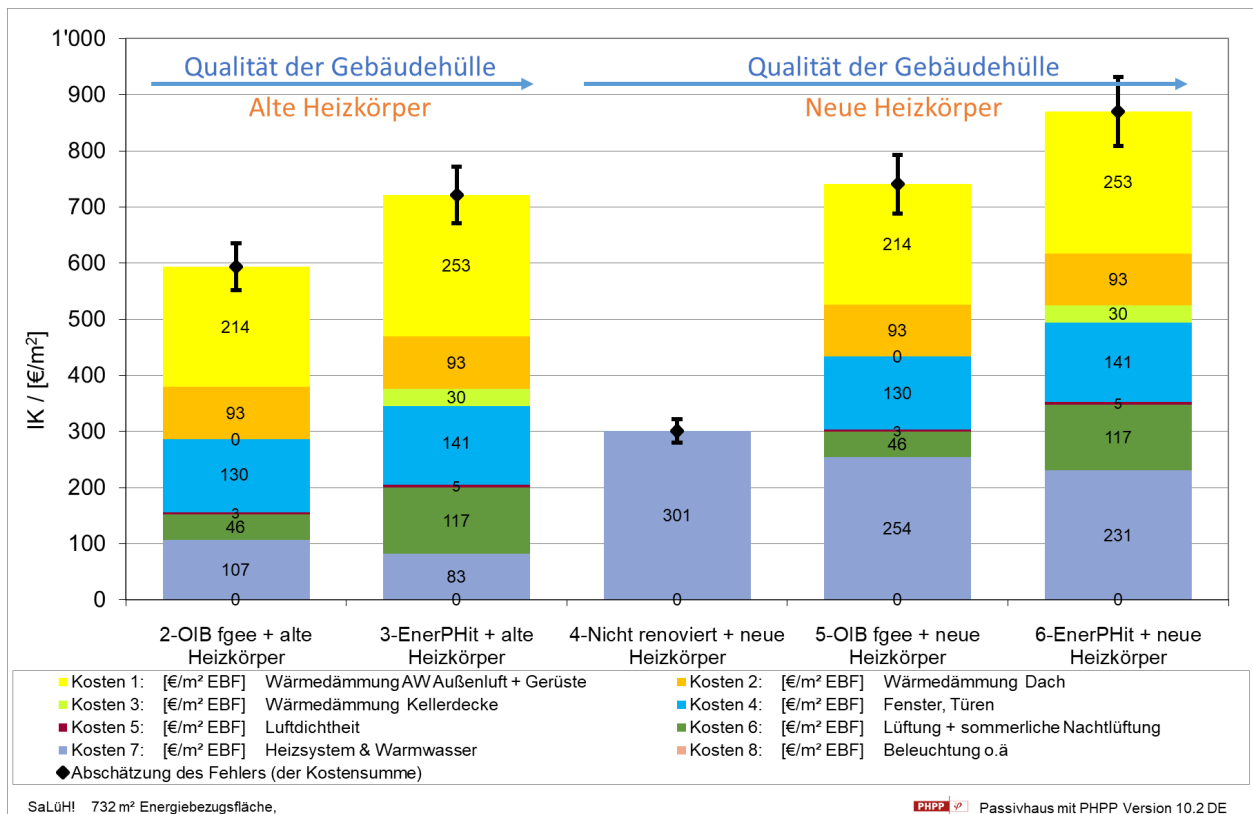


**Abbildung 17: Heizwärmebedarf und Heizlast des Gebäudes der drei Varianten**

Abbildung 18 zeigt die Gesamtinvestitions- und Wartungskosten pro Quadratmeter Energiebezugsfläche unter Berücksichtigung eines 4LZ-Verteilungssystems mit Luft-Wärmepumpe für die 3 Sanierungsvarianten bei Beibehaltung der alten Heizkörper (links) und Austausch der Heizkörper (rechts). Die Abbildung 18 dargestellten Kosten sind nach den verschiedenen Kategorien aufgeteilt, und es ist zu erkennen, dass die größten Beiträge für die Heizung und das Warmwassersystem (grau), die Lüftungsanlage (orange), Fenster (blau), Wärmedämmung Kellerdecke (grün) und Wärmedämmung Außenwände (gelb) anfallen.

Insbesondere sind die Kosten für das Heizungs- und Warmwassersystem im unsanierten Fall im Vergleich zu den sanierten Fällen höher, da eine Wärmepumpe mit höherer Leistung erforderlich ist. Die beiden anderen Fälle, in denen die Gebäudehülle saniert wird, haben höhere Gesamtinvestitionskosten als der unsanierte Fall, obwohl die Kosten des Systems stark reduziert sind.

Der Unterschied zwischen den Gesamtinvestitionskosten der beiden betrachteten Sanierungsvarianten (d.h. OIB  $f_{gee}$  und EnerPHit) ist minimal, da die höheren Investitionen in die Lüftungsanlage, die Fenster, die Außenwände sowie die Dämmung der Kellerdecke durch die geringeren Kosten für das Heizungs- und Warmwassersystem teilweise kompensiert werden. Die Varianten mit alten und neuen Heizkörpern unterscheiden sich zusätzlich durch die Kosten für Heizkörper, aber auch unterschiedliche Kosten für Rohre, Rohrisolierung und Pumpen.

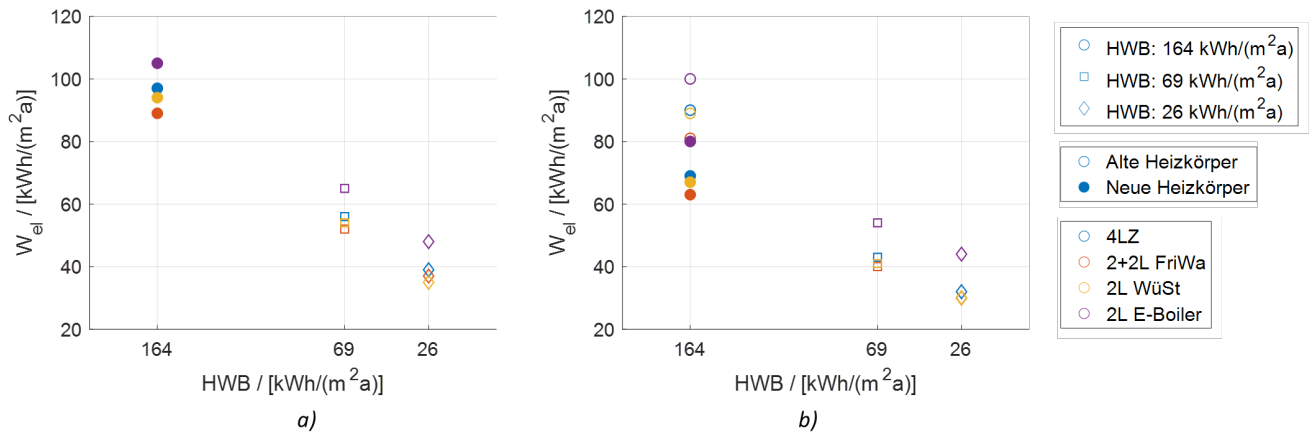


**Abbildung 18: Gesamtinvestitions- und Wartungskosten pro Quadratmeter Energiebezugsfläche unter Berücksichtigung eines 4LZ-Verteilungssystems mit Luft/Wasser-Wärmepumpe für die 3 Sanierungsarten unter Beibehaltung der alten Heizkörper (links) und Austausch der Heizkörper (rechts). Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

Abbildung 19 zeigt den jährlichen Strombedarf für die 3 Sanierungsvarianten (x-Achse) für alle betrachteten Verteilersysteme mit alten oder neuen Heizkörpern und unter Berücksichtigung einer Luft/Wasser-WP (links) und einer Sole/Wasser-WP (rechts). Aus Abbildung 19 geht hervor, dass durch die Verbesserung der Gebäudehüllenqualität der Strombedarf unabhängig vom Wärmeabgabe- und Verteilungssystem sowie vom Wärmepumpensystem erheblich gesenkt werden kann. Außerdem zeigt sich, dass in diesem Fall der Austausch von Heizkörpern nur im unsanierten Fall Vorteile bringt, wenn die vorhandenen Heizkörper eine höhere Vorlauftemperatur erfordern würden (d.h. 74 °C im Vergleich zu den 55°C, die für neue Heizkörper erforderlich sind).

Hinsichtlich der Erzeugungssysteme ist zu erkennen, dass die Sole/Wasser-WP einen geringeren Stromverbrauch als die Luft/Wasser-WP aufweist, obwohl die Unterschiede mit zunehmender Qualität der Gebäudehülle abnehmen. Darüber hinaus ist der Stromverbrauch in dem Fall, in dem Elektroboiler für die Warmwasserbereitung verwendet werden (violette Punkte), deutlich höher als bei Systemen, in denen die Wärmepumpe sowohl Heizung als auch Warmwasser bereitstellt. Der 2L E-Boiler-Fall mit der EnerPHit-Sanierung hat den gleichen oder

sogar einen höheren Verbrauch als die Varianten mit zentraler Wärmepumpe (d.h. 4LZ, 2+2 FriWa, 2L WüSt) in der OIB  $f_{\text{gee}}$ -Sanierung.



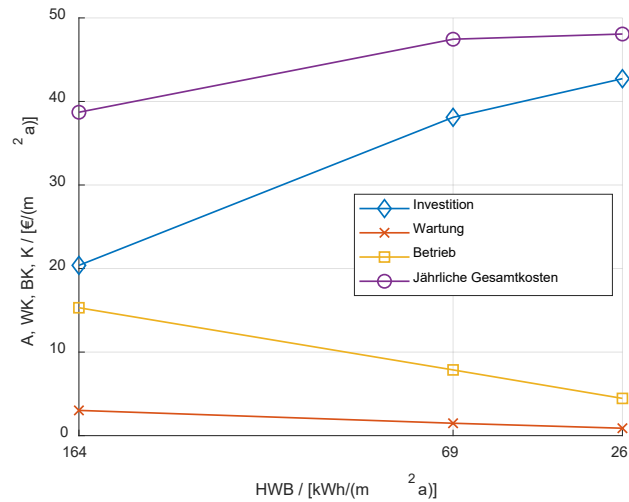
**Abbildung 19: Strombedarf für alle berücksichtigten Sanierungen und Verteilungssysteme unter Berücksichtigung von (a) Luft/Wasser-Wärmepumpe und (b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

Abbildung 20 zeigt die jährlichen Gesamtkosten, aufgeteilt in Betrieb, Wartung und Investition für die verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung der Sole/Wasser-WP und des 4LZ-Systems mit alten Heizkörpern. Wie in Abbildung 19 dargestellt, sinken die Betriebskosten mit zunehmender Qualität der Sanierung (d.h. der Heizwärmebedarf des Gebäudes sinkt). Die jährlichen Wartungskosten werden nach der im PHeco-Blatt des PHPP implementierten Methode berechnet. Die Wartungskosten sind in den verschiedenen Sanierungsvarianten sehr ähnlich.

Die nach Gleichung (1) berechneten Annuitäten (A) zeigen einen unterschiedlichen Trend zu den in Abbildung 20 dargestellten Gesamtinvestitionskosten<sup>2</sup>.

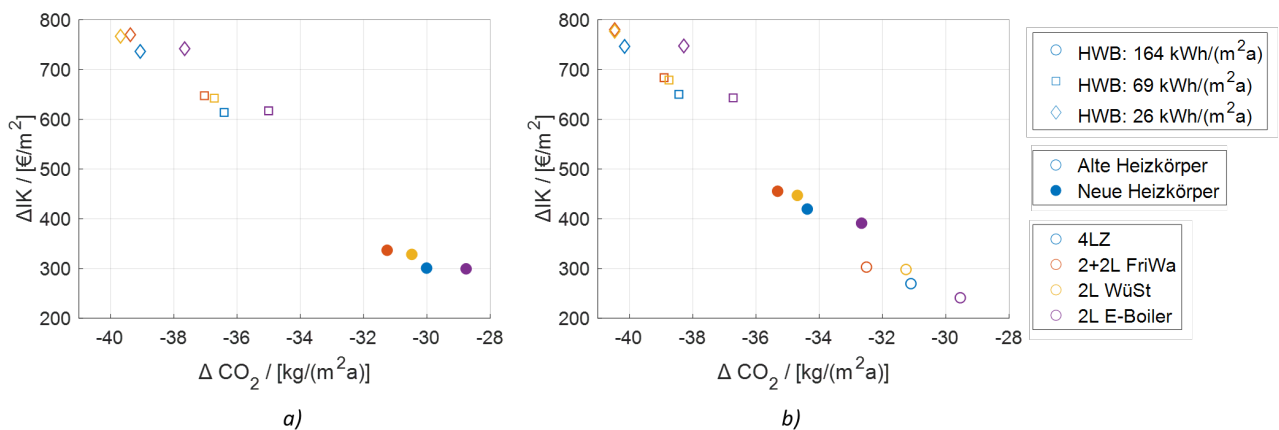
Die Gesamtkosten der EnerPHit-Sanierung sind höher als die Gesamtkosten der  $f_{\text{gee}}$ -Sanierung. Die Gesamtkosten im Fall der OIB  $f_{\text{gee}}$  Sanierung sind wegen der Investitionskosten höher als im unsanierten Fall.

<sup>2</sup> Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden ohne Berücksichtigung jeglicher Förderungen durchgeführt. Schon die Berücksichtigung der Bundesförderung für die Sanierung der Gebäudehülle (Sanierungsbonus 2026) in Höhe von 150 EUR/m<sup>2</sup><sub>WNF</sub> für Gebäude, die die Mindestanforderungen des klimaktiv-Standards erfüllen, würde dazu führen, dass die Sanierung im Standard EnerPHit wirtschaftlicher ist, als die nach den Mindestanforderungen der OIB-Richtlinie 6 (2023).



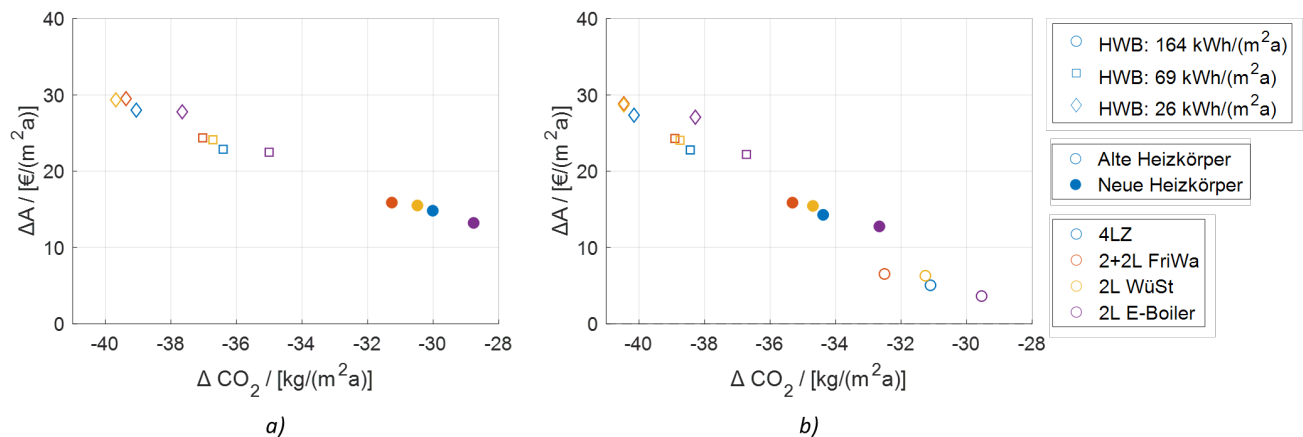
**Abbildung 20: Jährliche Gesamtkosten (K), aufgeteilt in Betriebs- (BK), Wartungs- (WK) und Investitionskosten (A) für die verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung der Sole-Wärmepumpe und des 4LZ-Verteilungssystems mit neuen Heizkörpern. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

Abbildung 21 zeigt die Differenz zwischen den Investitionskosten und die Differenz zwischen den CO<sub>2</sub>-Emissionen aller berechneten Fälle im Vergleich zum Referenzfall. Es ist ersichtlich, dass die Investitionskosten im Allgemeinen mit hochwertiger thermischer Sanierung (d.h. höheren CO<sub>2</sub>-Reduktionen) ansteigen.



**Abbildung 21: Differenz zwischen den Investitionskosten und den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung ohne thermische Renovierung) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

Abbildung 22 zeigt den Unterschied in der Annuität zwischen den verschiedenen Fällen. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauer der Wärmepumpen ist die Annuität der Fälle mit S/W WP geringer als die der Fälle mit A/W WP.



**Abbildung 22: Differenz zwischen den Annuitäten und den  $\text{CO}_2$ -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung ohne thermische Renovierung) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

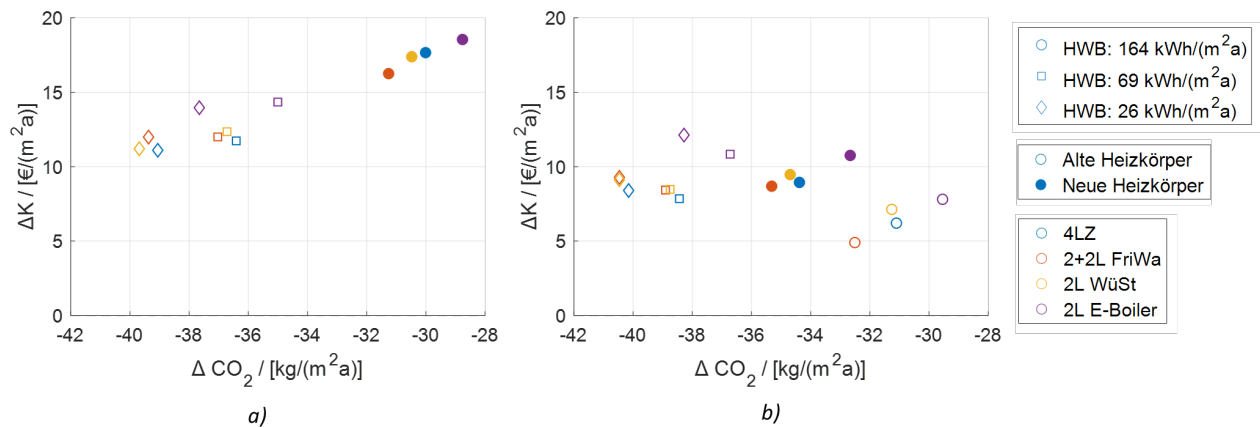
Abbildung 23 zeigt die Differenz zwischen jährlichen Gesamtkosten und  $\text{CO}_2$ -Emission für alle untersuchten Fälle im Vergleich zum Referenzfall (d.h. Austausch des Gasheizkessels mit unsanierter Gebäudehülle und alten Heizkörpern), links für die Fälle mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und rechts für die Fälle mit Sole/Wasser-Wärmepumpe. Aus Abbildung 23 geht hervor, dass die Sanierung der Gebäudehülle den größten Einfluss auf die  $\text{CO}_2$ - und Kostenreduzierung hat.

Die Verteilersysteme 4LZ, 2+2L FriWa und 2L WüSt zeichnen sich durch ähnliche  $\text{CO}_2$ -Reduktionen, aber unterschiedliche Gesamtkosten aus. Insbesondere ist das 4LZ-System immer durch die niedrigsten Kosten gekennzeichnet, gefolgt von 2L WüSt und 2+2L FriWa. Das 2L E-Boiler-System zeichnet sich durch deutlich höhere Kosten und  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus als die anderen Wärmepumpensysteme, da in diesem Fall die Warmwasserbereitung durch einen ineffizienten Elektroboiler anstelle einer Wärmepumpe erfolgt.

Die Sole/Wasser-WP führt aufgrund der höheren Effizienz zu einer größeren  $\text{CO}_2$ -Reduktion als die Luft/Wasser-WP. Die Sole/Wasser-WP hat im Vergleich zur Luft/Wasser-WP geringere Gesamtkosten. Dieser Unterschied ist bei sehr gut renovierten Gebäuden gering, wird jedoch bei weniger gut renovierten Gebäuden relevanter. Dies ist auf die ähnliche Annuität (siehe Abbildung 22) und die geringeren Betriebskosten (siehe Abbildung 19) im Vergleich zur Luft/Wasser-WP zurückzuführen.

Es ist bei der Bewertung zu beachten, dass beim unsanierten Gebäude, innerhalb des Betrachtungszeitraums (von hier 20 Jahren) Reparaturen an oder Erneuerung von einigen Komponenten (z.B. Fenster) erforderlich sein werden. Würde die Komponente durch eine neue Komponente gleicher energetischer Qualität ersetzt, entstünden zusätzliche Kosten, ohne

dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert würden. Würde eine Komponente mit höherer thermischer Qualität eingesetzt, entstünden zusätzliche Investitions- und Installationskosten, und auch geringere Betriebskosten (aufgrund der vorgenommenen Verbesserung) und somit eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dieser Aspekt sollte zukünftig z.B. im Rahmen von Varianten berücksichtigt werden.



**Abbildung 23: Differenz zwischen den jährlichen Gesamtkosten und den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung und unsaniertes Gebäude) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

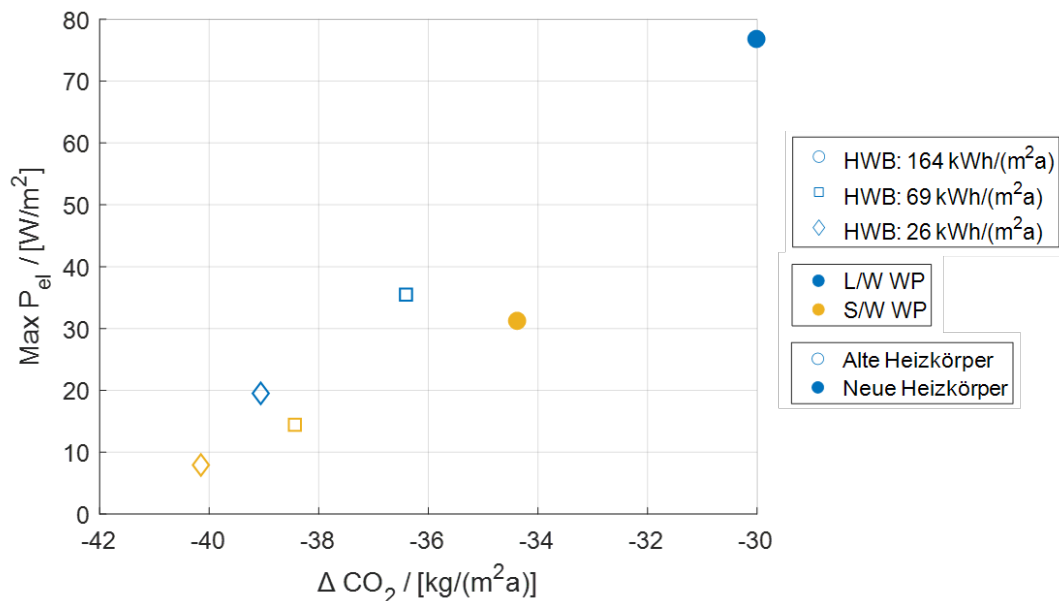
Die Korrelation zwischen der maximalen elektrischen Leistung ( $\max P_{el}$ ) und der Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Referenzfall ist in Abbildung 24 dargestellt (für die Fälle mit den alten Heizkörpern und 4LZ-Verteilungssystem).

Für die drei Sanierungsvarianten werden beispielhaft Wärmepumpen entsprechend der notwendigen Leistung (Kapazität) ausgewählt. Für die Warmwasserbereitung werden drei Beladefenster mit je zwei Stunden angenommen. Die Leistung der Wärmepumpe erhöht sich somit im Vergleich zur Heizleistung um  $24/(24-6)$ . Für die Auslegung wird die Leistung bei A-7/W55 verwendet. Diese wird auf Basis der Kapazität bei A2/W35 laut Datenblatt abgeschätzt. Es zeigt sich (siehe Tabelle 11), dass in Bezug auf den benötigten Platz für die Aufstellung sowie bezogen auf die Schallemissionen die Variante ohne thermische Sanierung an den meisten Standorten keine reale Option darstellen würde und auch die Variante OIB  $f_{gee}$  mit Luft/Wasser-WP schwierig zu realisieren wäre.

**Tabelle 11: Heizwärmebedarf, Heizlast und beispielhafte Auswahl einer L-W Wärmepumpe (iDM) für die drei Varianten (monovalente Auslegung)**

Sanierungsvariante	nicht saniert	OIB f <sub>gee</sub>	EnerPHit
HWB [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	<b>164</b>	<b>69</b>	<b>26</b>
Heizlast [W/m <sup>2</sup> ]	65,7	30,4	16,7
Kapazität Wärmepumpe [kW]	78.7	40.5	22.3
Wärmepumpentyp (Anzahl)	ALM MAX (3)	ALM 10-24 (3)	ALM 4-12 (3)
Größe je Wärmepumpe [mm]	1514x3748x1005	1461x1928x997	960x1600x800
Schallleistungspegel [dB(A)] je WP (nominal, laut Datenblatt)	57 dB(A)	56 dB(A)	51 dB(A)

Die Sole/Wasser-WP benötigt in allen Varianten weniger elektrische Leistung als die Luft/Wasser WP bei gleicher Sanierung und installiertem System. Durch die reduzierte Anschlussleistung können die jährlichen Fixkosten für die Stromversorgung sinken. Dies wird sich voraussichtlich noch stärker auswirken, wenn in Zukunft flexible Stromtarife eingeführt werden und der Winterstrom teurer wird. Sole/Wasser-WP mit geringerem Strombedarf im Winter und geringeren Leistungsspitzen würden dann zu zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteilen führen, die über die bisher dargestellten hinausgehen.



**Abbildung 24: Maximale elektrische Leistung der WP und Differenz zwischen den jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung und nicht renovierte Gebäudehülle) bei 4LZ-Verteilungssystem. Ergebnisse bezogen auf die EBF.**

## 4 Fazit

Neue Planungsansätze sowie ein integraler Workflow sind erforderlich, um wesentliche Fortschritte in der Planung, Umsetzung und im Betrieb von Projekten zur thermischer Sanierung und zum Heizungstausch in Mehrgeschosswohnbauten zu erzielen und damit die Dekarbonisierung des Gebäudebestand zu beschleunigen und gleichzeitig Risiken und Kosten zu senken.

Im Gegensatz zu tertiären Gebäuden (z.B. Bürogebäude), die i.d.R. detailliert geplant und im Betrieb überwacht werden, wird bei Wohngebäuden, auch bei großen Mehrwohnungshäusern, oft auf vereinfachte Ansätze bei der Planung zurückgegriffen. So basiert in der Regel die Planung einer thermischen Sanierung und Auslegung der HLK-Systeme auf statischen Referenzbetriebsbedingungen und die Steuerung und Regelung von HLK-Systemen wird dabei oft vernachlässigt. Entscheidungen basieren häufig auf der Intuition und Erfahrung der Planenden. Varianten werden nicht detailliert betrachtet, nicht energetisch bewertet und verglichen.

Planungsansätze bestehen in der Regel aus isolierten, nicht gekoppelten Teilaufgaben, z.B. Energieausweis durch Bauphysikbüro für die Berechnung des HWB und TGA-Büro für Ermittlung der Heizlast und die Planung der Wärmepumpe. Ein integraler Planungsansatz mit Optimierungsmöglichkeiten ist damit nicht gegeben. Die derzeitig verfügbaren Werkzeuge für die Modellierung, Simulation und die Optimierung der Energieeffizienz und der Gebäudetechnik sind häufig zu komplex und betrachten jeweils nur Teilaspekte.

Der bestehende Ansatz muss umstrukturiert werden und ein neuer Workflow muss ermöglichen, jede Phase des Lebenszyklus eines Gebäudes zu optimieren (d.h. Vorplanung, Planung, Inbetriebnahme, Betrieb sowie zukünftig auch das Ende der Nutzungsdauer, den Rückbau, die Wiederverwendung). Darüber hinaus soll der Workflow die Kooperation zwischen den verschiedenen Planenden (z.B. Energieberatung, Architektur, Bauphysik, HLK) und zwischen den verschiedenen Interessengruppen (z.B. Bauträger, Wohnungsbaugesellschaften und Hausverwaltungen) erleichtern.

In jeder Phase solch eines Projekts mit thermischer Sanierung und Heizungstausch, von der Vorplanung über die (Detail-) Planung, die Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb, ist abhängig vom Informationsstand ein entsprechender Detaillierungsgrad bei der Planung und Optimierung zu ermöglichen.

Gerade in der Vorplanungsphase ist es wichtig, dass der Workflow einen integralen Ansatz ermöglicht, bei dem alle Aspekte und ihre wechselseitigen Einflüsse berücksichtigt werden können. Dazu zählen das Klima und das Nutzer\*innenverhalten; die Gebäudehülle und das

Lüftungssystem, das Wärmeabgabe- und das Wärmeverteilsystem, das Wärmeerzeugersystem, die Speicherung, erneuerbare Energien sowie Regelung, Steuerung und Sollwerte.

Ein solcher integraler Planungsansatz ermöglicht es, für jede individuelle thermische Sanierung mit Heizungstausch die optimale Lösung zu identifizieren –unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen und lokalen Gegebenheiten. Unterstützt werden sollte dieser Prozess durch Datenbanken, die aktuelle Kosteninformationen zu den verschiedenen Sanierungskomponenten bereitstellen.

Im Rahmen der Untersuchung einer Fallstudie erfolgt eine techno-ökonomische Bewertung verschiedener Varianten einer thermischen Sanierung und der Umstellung auf eine wärmepumpenbasierte Heizung mit und ohne Tausch der Heizkörper. Es werden im Rahmen einer integralen Planung Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten sowie Strombedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen für drei Sanierungsniveaus (unsaniert, Mindestanforderungen gem. OIB-Richtlinie 6 (2023) Nachweisweg  $f_{gee}$  sowie EnerPHit) in Kombination mit verschiedenen Verteil- und Wärmepumpensystemen (4LZ, 2+2L FWS, 2L Wüst, 2L E-Boiler) verglichen.

Die Investitionskosten für die thermische Sanierung (inkl. Lüftung mit WRG, Fenster, Kellerdeckendämmung und Außenwanddämmung) sind deutlich höher als die Wärmepumpen-Systemkosten (für Heizung und Warmwasser) auch im Falle des Tauschs der Heizkörper. Die Investitionskosten liegen zwischen 300 EUR/m<sup>2</sup> und 870 EUR/m<sup>2</sup> für den Fall 4LZ. Im unsanierten Fall liegen die Systemkosten wegen der größeren Heizleistung deutlich höher als im sanierten Fall (ca. 300 EUR/m<sup>2</sup> statt 230 EUR/m<sup>2</sup>). Der Unterschied der gesamten Investitionskosten zwischen OIB  $f_{gee}$  und EnerPHit ist relativ gering: höhere Investitionen in Gebäudehülle und Lüftung werden teilweise durch niedrigere Wärmepumpen-Systemkosten kompensiert. Auch in der Annuitätenbetrachtung ohne Berücksichtigung jeglicher Förderung sind die Gesamtkosten für OIB  $f_{gee}$  niedriger als für EnerPHit; beide liegen über dem Fall unsaniert, nur Heizungstausch, aber die Unterschiede werden geringer (zwischen min. 21 EUR/(m<sup>2</sup> a) und max. 42 EUR/(m<sup>2</sup> a)), aufgrund der langen Nutzungsdauer für Fenster und Wärmedämmung. Schon bei Inanspruchnahme des Sanierungsbonus 2026 für den Mehrgeschossigen Wohnbau in Höhe von 150 EUR/m<sup>2</sup><sub>WNF</sub> wäre die Sanierung im Standard EnerPHit wirtschaftlicher als jene nach den Mindestanforderungen der OIB-Richtlinie 6 (2023).

Eine verbesserte Gebäudehülle senkt den Stromverbrauch deutlich, unabhängig vom Verteil- oder Wärmepumpensystem (von knapp über 110 kWh/(m<sup>2</sup> a) auf ca. 50 kWh/(m<sup>2</sup> a) im schlechtesten Fall und von ca. 65 kWh/(m<sup>2</sup> a) bis auf ca. 35 kWh/(m<sup>2</sup> a) im besten Fall). Im unsanierten Fall liegt damit der Stromverbrauch im besten Fall immer noch deutlich über dem schlechtesten Fall mit thermischer Sanierung. Der Heizkörpertausch bringt (hier) nur Vorteile im unsanierten Fall (Vorlauftemperatur kann von ca. 75 °C auf 55 °C abgesenkt werden). Die

Fälle mit Sole/Wasser-Wärmepumpe sind effizienter als die mit Luft/Wasser Wärmepumpe, die Unterschiede nehmen mit besserer Gebäudehülle ab. Systeme mit Elektroboiler für Warmwasser haben deutlich höheren Stromverbrauch und sind entsprechend nicht zu empfehlen.

### **Gesamtkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

- Daraus abgeleitet ist offensichtlich, dass mit der thermischen Sanierung die größten Einsparungen sowohl bei den Betriebskosten als auch bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden.
- Bezogen auf die Wärmepumpensysteme sind die Unterschiede geringer und hängen von den Randbedingungen ab, abgesehen von der Variante 2L E-Boiler, die immer deutlich teurer ist und die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist.
- Der Unterschied zwischen den Varianten 2+2L FriWa, 2L WüSt, und 4LZ ist relativ gering und hängt von der Sanierungstiefe ab. Insbesondere mit den Varianten 2+2L FriWa und 2L WüSt werden die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht, jedoch bei etwas höheren Gesamtkosten als bei 4LZ.
- Mit Sole/Wasser-Wärmepumpen können geringere CO<sub>2</sub> Emissionen bei etwas geringeren Lebenszykluskosten als bei Luft/Wasser-Wärmepumpen erreicht werden, jedoch bei höheren Investitionskosten.

Für Sole/Wasser-WP werden geringere elektrische Anschlussleistungen im Vergleich zu Luft/Wasser-WP benötigt, wodurch die Fixkosten gesenkt werden können (sofern es einen Leistungspreis gibt). Bei zukünftigen flexiblen Stromtarifen mit voraussichtlich höheren Strompreisen im Winter gewinnen sie zusätzliche Vorteile. Unsanierte Gebäude verursachen über den Betrachtungszeitraum zusätzliche Ersatzinvestitionen (z.B. Fenstersanierung oder Tausch), ohne zwingende CO<sub>2</sub>-Vorteile – außer es werden höherwertige Komponenten gewählt.

Die thermische Sanierung der Gebäudehülle ist der entscheidende Hebel zur Kosten- und CO<sub>2</sub>-Reduktion. Die Wahl des Wärmepumpensystems beeinflusst sowohl die Gesamteffizienz als auch die Kosten und sollte individuell geplant und optimiert werden. Trotz der höheren Investitionskosten sollten Sole/Wasser-WP mit der höheren Effizienz stärker gefördert werden, da diese zu geringerem Verbrauch und geringeren Spitzenlasten im Winter führen und damit einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten können. Zukünftig, wenn flexible Stromtarife dominieren werden, könnten diese auch Kostenvorteile bringen.

## Literatur

- [1] F. Ochs, M. Magni, and G. Dermentzis, "Integration of Heat Pumps in Buildings and District Heating Systems—Evaluation on a Building and Energy System Level," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 3889, vol. 15, no. 11, p. 3889, May 2022, doi: 10.3390/EN15113889.
- [2] Christof Drexel, "Limitierungen für den Einsatz von Brennholz in der Raumwärme," Bregenz, Aug. 2024.
- [3] Thomas Roßkopf-Nachbaur and Martin Ploss, "Ermittlung monatlicher Primärenergiefaktoren und CO<sub>2</sub>eq-Konversionsfaktoren für den aktuellen österreichischen Verbraucherstrommix sowie Szenario für 2030," Dornbirn, Aug. 2025.
- [4] "PhaseOut." Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/4499093>
- [5] M. Lämmle *et al.*, "Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings," *Energy*, vol. 242, p. 122952, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.122952.
- [6] T. Cao and Y. Hwang, "HPT Annex 54: Heat Pump Systems with Low-GWP Refrigerants TASKS 1, 2 AND 3," 2022.
- [7] R. O'Hegarty, O. Kinnane, D. Lennon, and S. Colclough, "Air-to-water heat pumps: Review and analysis of the performance gap between in-use and product rated performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111887, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111887.
- [8] ISO 13790:2008, *Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*. 2008.
- [9] G. Dermentzis *et al.*, "A comprehensive evaluation of a monthly-based energy auditing tool through dynamic simulations, and monitoring in a renovation case study," *Energy Build*, vol. 183, pp. 713–726, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.11.046.
- [10] EN 12831-1:2017, "Energy performance of buildings - Method for calculation of the design heat load - Part 1: Space heating load," 2017.
- [11] M. Magni, F. Ochs, E. Venturi, G. Dermentzis, and W. Monteleone, "Impact of the European Building Energy Requirements on the Heat Pump Market," in *14th IEA Heat*

- Pump Conference*, 2023, pp. 1–12. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/372288194>
- [12] Z. Bastian *et al.*, “Retrofit with Passive House components,” *Energy Effic*, vol. 15, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1007/s12053-021-10008-7.
- [13] M. Grim-Schlink, A. Preisler, and A. Stipsits, “Heizlast optimieren,” 2020.
- [14] Passivhaus Institut, “Passive House Planning Package (PHPP).” Accessed: Jan. 13, 2022. [Online]. Available: [https://passiv.de/en/04\\_phpp/04\\_phpp.htm](https://passiv.de/en/04_phpp/04_phpp.htm)
- [15] Müller, André, Fiedler, Anna-Lena, Koch, and Thilo, “Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2022 und 2023,” Darmstadt, Aug. 2024. [Online]. Available: [www.iwu.de](http://www.iwu.de)
- [16] G. Weinberger, S. Amiri, and B. Moshfegh, “Investigating techno-economic effects and environmental impacts of energy renovation of residential building clusters on a district heating system,” *Energy Build*, vol. 251, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111327.
- [17] G. Weinberger and B. Moshfegh, “Techno-economic investigation of the potential for energy efficiency measures of multi-story apartment buildings at cluster level using different district heating tariffs,” *Energy Build*, vol. 236, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110758.
- [18] E. Hinz Reprotechnik and R. Hatteh, *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*. 2015. [Online]. Available: [www.iwu.de](http://www.iwu.de)
- [19] R. Fedrizzi *et al.*, “Project Title: Development of Systemic Packages for Deep Energy Renovation of Residential and Tertiary Buildings including Envelope and Systems,” 2015. [Online]. Available: [www.inspirefp7.eu](http://www.inspirefp7.eu)
- [20] “Thermal Energy Store Cost 2025: How Much is a Thermal Store?” Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.myjobquote.co.uk/costs/installing-a-thermal-store>
- [21] iDM, “TECHN. VERTRIEBSUNTERSTÜTZUNG ÖSTERREICH VERBUNDEN MIT DER iDM ENERGIEFAMILIE,” 2024. [Online]. Available: [www.iDM-energie.at](http://www.iDM-energie.at)
- [22] “Innsbruck - Ren + Homes.” Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://renplushomes.eu/demos/innsbruck/>

- [23] “Get the Right Electric Boiler for Your Flat | Boiler Guide.” Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.boilerguide.co.uk/electric-boiler/flats-guide>
- [24] “The Essential Guide to Electric Boiler Installation | Boiler Guide.” Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.boilerguide.co.uk/boilers/replacement-installation/electric>

## Abbildungen

Abbildung 1: Schema der Komponenten und Elemente, die bei der integralen Planung einer Sanierung mit Umstellung auf eine wärmepumpenbasierte Heizung berücksichtigt werden müssen .....	7
Abbildung 2: Elemente des integralen Planungsprozesses .....	9
Abbildung 3: Heizwärmebedarf, berechnet mit dem PHPP - gebäudeweise und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten. ....	13
Abbildung 4: HL berechnet mit dem PHPP (gebäudeweise) und mittels dynamischer Simulation für das gesamte Gebäude für alle Sanierungsvarianten.....	14
Abbildung 5: Bandbreite der Auslegungsvorlauftemperatur, die in den verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Auslegungsbedingungen (d.h. Fall 1, 2, 8 mit oder ohne Wiederaufheizheizung (RH)) erforderlich sind. Die verschiedenen Heizkörpertypen (d.h. verschiedene Exponenten n), die mit verschiedenen $\Delta T$ und unter Berücksichtigung verschiedener Massenströme mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s dimensioniert sind, beeinflusst die Bandbreite der einzelnen Balken .....	16
Abbildung 6: Vierleiter-System mit Zirkulation, hier mit internem Frischwasser-Wärmeübertrager – vereinfachtes Haustechnikschema .....	19
Abbildung 7: Zwei+Zweileiter-System mit dezentralen (wohnungsweisen) Frischwasserstationen – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.....	20
Abbildung 8: Zweileiter-System mit dezentralen Wärmeübergabestationen – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind .....	21
Abbildung 9: Zweileiter-System mit dezentralem Frischwasserspeicher mit Beladefenster – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind.....	22
Abbildung 10: Zweileiter-System mit Booster-Wärmepumpe (2L BWP) – vereinfachtes Haustechnikschema.....	23
Abbildung 11: Zweileiter-System mit Rücklauf-Wärmepumpe (2L RLWP) – vereinfachtes Haustechnikschema .	24
Abbildung 12: Zweileiter-System mit Elektro-Boilern – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind. ....	25

Abbildung 13: Zweileiter-System mit dezentralem Elektro-Boiler Boiler mit Duschwasser-Wärmerückgewinnung – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind. ....	26
Abbildung 14: Zweileiter-System mit dezentraler Warmwasser Wärmepumpe – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind. ....	26
Abbildung 15: Dezentrale Split Wärmepumpe für Raumheizung und Elektro-Boiler – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind. ....	27
Abbildung 16: Dezentrale Split Wärmepumpe für Raumheizung und dezentrale Warmwasser Wärmepumpe – vereinfachtes Haustechnikschema; die Zahlen zeigen beispielhafte bzw. empfohlene Temperaturen in °C; in Klammern sind Temperaturen angegeben, wenn diese aus hygienischen Gründen erreichbar sein müssen bzw. bei Bedarf bzw. zyklisch erforderlich sind).....	28
Abbildung 17: Heizwärmebedarf und Heizlast des Gebäudes der drei Varianten .....	37
Abbildung 18: Gesamtinvestitions- und Wartungskosten pro Quadratmeter Energiebezugsfläche unter Berücksichtigung eines 4LZ-Verteilungssystems mit Luft/Wasser-Wärmepumpe für die 3 Sanierungsarten unter Beibehaltung der alten Heizkörper (links) und Austausch der Heizkörper (rechts). Ergebnisse bezogen auf die EBF.....	38
Abbildung 19: Strombedarf für alle berücksichtigten Sanierungen und Verteilungssysteme unter Berücksichtigung von (a) Luft/Wasser-Wärmepumpe und (b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Ergebnisse bezogen auf die EBF.....	39
Abbildung 20: Jährliche Gesamtkosten (K), aufgeteilt in Betriebs- (BK), Wartungs- (WK) und Investitionskosten (A) für die verschiedenen Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung der Sole-Wärmepumpe und des 4LZ-Verteilungssystems mit neuen Heizkörpern. Ergebnisse bezogen auf die EBF. ....	40
Abbildung 21: Differenz zwischen den Investitionskosten und den CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung ohne thermische Renovierung) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF. ....	40
Abbildung 22: Differenz zwischen den Annuitäten und den CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung ohne thermische Renovierung) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF. ....	41

Abbildung 23: Differenz zwischen den jährlichen Gesamtkosten und den CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung und unsaniertes Gebäude) für a) Luft-Wasser- und b) Sole/Wasser-Wärmepumpe. Eine Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ist durch ein negatives Zeichen gekennzeichnet. Ergebnisse bezogen auf die EBF.....	42
Abbildung 24: Maximale elektrische Leistung der WP und Differenz zwischen den jährlichen CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zum Referenzfall (neue Gasheizung und nicht renovierte Gebäudehülle) bei 4LZ-Verteilungssystem. Ergebnisse bezogen auf die EBF.....	43

## Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der Sanierungsvarianten.....	13
Tabelle 2: Auswahl zentraler, semi-zentraler, dezentraler und gemischter wärmepumpenbasierter bzw. elektrischer Wärmeversorgung im Mehrgeschosswohnbau .....	18
Tabelle 3: Hauptdaten, Gebäudeansicht und Grundriss des Gebäudes .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Tabelle 4: Fläche der Gebäudehüllenteile .....	30
Tabelle 5: Korrelationen für die Investitions- und Installationskosten und die Nutzungsdauer der verschiedenen Komponenten der Gebäudehülle, basierte auf [13], [14] (Die ursprünglichen Werte wurden mit einem Regionalfaktor von 1,1 multipliziert), [15], [16], und [17].....	33
Tabelle 6: Komponenten, die in die Kostenanalyse für die betrachteten Verteilungssysteme berücksichtigt wurden. ....	34
Tabelle 7: Korrelationen für die Investitions-, Installations- und Wartungskosten und die Nutzungsdauer der verschiedenen Komponenten des Gebäudesystems (Kostenannahme), basierte auf [18], [19], [20], [21], [22], [23], und [22], [23].....	34
Tabelle 8: Gas- und Strompreise und CO <sub>2</sub> -Konversionsfaktoren.....	35
Tabelle 9: U-Werte und andere Kennwerte der verschiedenen Gebäudehüllenelemente für die verschiedenen Sanierungsvarianten .....	36
Tabelle 10: Heizwärmebedarf, Heizlast und Energiebedarfe der drei Varianten .....	36
Tabelle 11: Heizwärmebedarf, Heizlast und beispielhafte Auswahl einer L-W Wärmepumpe (iDM) für die drei Varianten (monovalente Auslegung) .....	42